

ОТЗЫВ

официального оппонента Тарасова Бориса Александровича
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»

Представленная диссертационная работа Задорожного Антона Валерьевича посвящена усовершенствованию 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. Данный код позволяет комплексно исследовать совокупность процессов, протекающих в твэле при эксплуатации в быстром реакторе: тепловых, механических и физико-химических.

В фокусе внимания ключевые процессы, такие как распухание топлива и выход продуктов деления под оболочку твэла. Важным этапом работы стала валидация усовершенствованного кода. Для этого были использованы экспериментальные данные, полученные в ходе послереакторных исследований экспериментальных твэлов со СНУП топливом.

Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью создания расчетного кода, позволяющего прогнозировать поведение твэлов со СНУП топливом в условиях работы реактора на быстрых нейтронах.

Общий объём работы составляет 120 страниц машинописного текста, включая 40 рисунков, 10 таблиц и 113 библиографических ссылок.

К новизне представленной диссертационной работе следует отнести:

- разработку новой модели для твэльного кода БЕРКУТ-У, учитывающей влияние твёрдых фазовых включений (преципитатов) на теплопроводность СНУП топлива в процессе выгорания;
- получение эмпирических зависимостей параметров моделей, отражающих влияние открытой и закрытой пористости топлива на его распухание и выход газовых продуктов деления (ГПД) и гелия;
- валидацию твэльного кода БЕРКУТ-У на данных ПРИ твэлов с определением конкретных значений погрешностей расчёта для распухания СНУП топлива и количества газов под оболочкой твэла. Данная валидация проведена впервые, что

подтверждает достоверность расчётов кода и его пригодность для практического применения;

Таким образом, новизна работы заключается в комплексном усовершенствовании твэльного кода БЕРКУТ-У и разработке новых методических подходов к анализу поведения СНУП топлива, что вносит существенный вклад в развитие инструментов расчетного обоснования работоспособности твэлов реакторов на быстрых нейтронах.

Результаты исследования имеют прикладное значение:

- твэльный код БЕРКУТ-У успешно аттестован для моделирования твэлов со СНУП топливом до уровня выгорания 12,1 % тяж. ат. Аттестация подтверждает надёжность и достоверность расчётов, выполняемых с помощью кода, и позволяет использовать его в проектных расчётах и обоснованиях;

- аттестация кода БЕРКУТ-У позволила включить его в качестве твэльного модуля в интегральный код ЕВКЛИД/V2. Это существенно расширяет возможности моделирования тяжёлых аварий на АЭС с реакторными установками БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200М, повышая уровень безопасности эксплуатации данных установок;

Обоснованность и достоверность полученных в диссертации научных результатов, выводов и заключений обеспечивается использованием передовых вычислительных методов, корректностью постановок задач, применением научно обоснованных расчётных методик, сравнением полученных результатов с известными экспериментальными данными, а также экспертной оценкой через публикации и представлением результатов работы на конференциях.

Материалы диссертационного исследования прошли апробацию на профильных научных конференциях и представлены в 10 печатных работах, в том числе, в четырех статьях, опубликованных в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК или входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science.

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

Вместе с тем, исходя из анализа содержания текста диссертации и автореферата, диссертационная работа содержит ряд замечаний и пожеланий.

- 1) В первой главе, в описании ядерно-топливного цикла присутствует множество неточностей. Например, «повторное использование плутония», «металлическое топливо не позволяет достигнуть высоких выгораний», хотя именно на металлическом топливе достигнуты рекордные выгорания более 20 % т.а. в

реакторе EBR-II. Указывается возможность существования «двухфазного состояния СНУП топлива», хотя мононитриды урана и плутония обладают полной взаимной растворимостью, а также использование жидко-металлического подслоя не увеличивает «эффективность использования плотного топлива в твэлах РБН» и т.д. и т.п..

- 2) В работе нет единообразия единиц измерения (например, используются К и °С). Используются не общепринятые термины, например «топливное зерно», «отложения на поверхности топлива». Отсутствуют ссылки на литературу во многих принципиально важных моментах литературного обзора, например, «Наличие примесей кислорода и углерода существенно сказывается на эксплуатационных свойствах СНУП топлива, влияя как на его распухание в процессе облучения, так и поведение ПД, их распределение по связанным состояниям и, в конечном счёте, на выход из топлива».
- 3) Утверждение, что «во всех зарубежных расчётных кодах отсутствуют модели поведения СНУП топлива» не вполне верно, коды BISON, FAST позволяют моделировать твэлы контейнерного типа с нитридным топливом и последнее время разработаны корреляции свойств, по крайней мере, нитридного топлива для этих кодов, например в [Miller Z. et al. Thermo-mechanical property correlations for uranium mononitride with uncertainty quantification //Available at SSRN 5417748.].
- 4) В пункте 1.4 «Влияние продуктов деления на теплопроводность смешанного нитридного топлива» отсутствуют собственно какие-либо данные, о влиянии на теплопроводность СНУП топлива продуктов деления, а приводится только описание модели Оделевского для теплопроводности гетерогенных систем.
- 5) В главе 2 не понятна разница между введенными понятиями изменение объёма матрицы $(U, Pu)N$, связанное с процессами деления атомов U и Pu ΔV_m и изменение параметра кристаллической решетки $(U, Pu)N$ ΔV_l , так как изменение параметра решетки происходит именно из за растворения продуктов деления. Вообще из главы 2 сложно понять суть проведенных в данной работе усовершенствований кода, они раскрываются только в главе 3.
- 6) Основной параметр $\chi_{ор}$ - часть потока ГПД из топливных зерен, непосредственно попадающая в свободный объем твэла через открытую технологическую пористость, а также в результате мгновенного (через механизмы выбивания и отдачи) выхода из приповерхностных областей

топливной таблетки, сразу объявлен подгоночным и не сделаны даже попытки оценки его величины.

- 7) При разработке модели изменения теплопроводности топлива по облучением автор использует модели Оделевского и результаты расчета фазового состава топлива при заданном выгорании и температуре, полученные кодом БЕРКУТ-У. Основная фаза по результатам расчета – U_2N_3 , однако не указаны используемые данные по теплопроводности этой фазы, оппоненту такие данные не известны. При этом получаемое по модели снижение теплопроводности (при выгорании 15% т.а. максимальное снижение при температуре 1000 К составляет порядка 10%), незначительно и в общем сравнимо с экспериментальной погрешностью определения теплопроводности свежего топлива. Неоднократно упоминаемое по тексту диссертации утверждение о снижении теплопроводности за счет примесей углерода и кислорода в данном разделе не подтверждается. Так же следует отметить, что экспериментально выделения вторичных фаз в СНУП топливе при глубоких выгораниях не наблюдаются.
- 8) Не понятна зависимость твердотельного распухания от размера зерна, которая в предложенной модели наблюдается только при малых выгораниях. Из общих представлений, основные продукты деления – благородные газы и элементы, растворимые в нитриде урана (Zr, РЗМ). При делении выход нерастворимых продуктов деления (металлы и т.д.) относительно мал и они накапливаются в значимых количествах уже при глубоких выгораниях. Соответственно при малых выгораниях твердотельное распухание по предложенному в диссертации механизму «формирования преципитатов» должно быть нулевым и начинать вносить хоть какой-то вклад только при средних и глубоких выгораниях, а при малых выгораниях основной механизм твердотельного распухания – изменение параметра решетки за счет растворения ПД, но оно не может зависеть от размера зерна.

Указанные замечания не являются принципиальными и не влияют на общее положительное заключение о диссертационной работе. Считаю, что диссертационная работа выполненная автором на высоком научном уровне, носит научно-исследовательский характер, в ней ясно сформулированы актуальность, цель и задачи. Детально описаны результаты работы, отражена их достоверность и практическая значимость.

Диссертационная работа А.В. Задорожного на тему «Моделирование поведения

смешанного нитридного уран-плутониевого топлива под облучением» является законченным научно-исследовательским трудом, полностью соответствующим требованиям Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. и Приказа Минобрнауки России №326 от 16.04.2014 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».

Руководитель проекта
АО «ВНИИНМ»
кандидат технических наук


дата, подпись

Тарасов Борис Александрович

Наименование организации: Акционерное общество «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ»)

Почтовый адрес: 123098, г. Москва, ул. Рогова, д. 5а

Телефон: 8 (499) 190-82-97

Электронная почта: vniinm@rosatom.ru

Официальный сайт: <https://vniinm.tvcl.ru/>

Подпись Б.А. Тарасова удостоверяю



