

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
доктора технических наук Троянова Владимира Михайловича
на диссертацию Беляевой Анны Викторовны
**«Влияние облучения быстрыми нейтронами на микроструктуру и
распухание уран-плутониевого нитридного топлива»**,
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния» в
диссертационный совет 24.2.422.01 при Ульяновском государственном
университете

В течение последнего десятилетия научно-техническая задача квалификации плотного ядерного топлива для реакторов на быстрых нейтронах, которым и является смешанное нитридное уран-плутониевое (далее – СНУП) топливо - предмет исследования диссертанта, приобрела чрезвычайно высокую актуальность. Это связано с тем, что в 2010 году в рамках Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения» была открыта целевая задача – создание новой технологической платформы ядерной энергетики на базе реакторов на быстрых нейтронах естественной безопасности с использованием СНУП-топлива. Этот вид топлива стал рассматриваться, как неременный атрибут быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем, являющийся ключевой проблемой для приобретения этими реакторами заявленных качеств и свойств безопасности.

Идея не была новой. Существовали научно-технические программы по изучению возможности применения СНУП-топлива (наряду с другими видами плотного топлива) для быстрых реакторов за рубежом, в СССР и в России. Судя по списку литературы и цитированию, результаты этих работ внимательно изучены диссертантом и использованы.

Однако в рамках выполнения этих работ в основном были получены экспериментальные результаты, которые описывали внешние эффекты эксплуатации экспериментальных изделий, но не давали научнообоснованного понимания физических закономерностей и процессов в веществе, не давали возможности качественного и количественного предсказания его поведения в экстремальных условиях ядерного реактора под облучением высокоинтенсивным потоком нейтронов. Проблема усугубляется тем, что опубликованные результаты весьма противоречивы, имеют большие погрешности, методики исследований во многих случаях были недостаточно совершенны и не соответствовали современным исследовательским возможностям.

Диссертант взял на себя чрезвычайно сложную задачу установления закономерностей поведения СНУП-топлива не только по ранее опубликованным результатам, но и, что особенно важно, проведения новых исследований на современном уровне с помощью специально спланированных экспериментов по облучению топливных образцов, изготовленных по современным технологиям.

Сказанное выше определяет **актуальность** рецензируемой работы и её **практическую значимость** для развития ядерной энергетики будущего.

Цель работы – выявление закономерностей набухания уран-плутониевого нитридного топлива под действием облучения в реакторе на быстрых нейтронах в целом достигнута:

- Получены экспериментальные данные о распределении продуктов деления, микроструктуре, фазовом составе и изменении объёма СНУП-топлива, выявлены физическая природа, величина и скорость набухания при низкотемпературном облучении;
- Получены результаты исследований влияния уровня выгорания при низкотемпературном облучении на перераспределение продуктов деления, изменение микроструктуры, скорости набухания;
- Определено влияние температуры на перераспределение продуктов деления, изменение структуры и фазового состава в условиях более высокого уровня температур;
- Определена скорость свободного и сдерживаемого оболочкой набухания СНУП-топлива на разных этапах облучения, определено изменение объёма твёрдой фазы и пористости.

Впервые получены и подтверждены результаты, свидетельствующие о последовательном изменении механизмов набухания: на первом этапе до выгорания, близком к 4% т.а., набухание топливной композиции обусловлено накоплением продуктов деления в твёрдом растворе и увеличением параметров кристаллической решётки, а при выгорании выше 5% т.а. начинается реструктуризация, формирование мелкокристаллической структуры и образование газонаполненных пор размером менее 1 мкм.

При высокой температуре топлива (до 1760 °С) наблюдается выход газообразных продуктов деления из твёрдой фазы с образованием новых пор, увеличение пористости и выделение вторых фаз. При этом наблюдается увеличение параметров кристаллической решётки.

Получены количественные характеристики процесса набухания, в том числе за счёт увеличения пористости и изменения параметров кристаллической решётки. Определены эффекты набухания топливного сердечника в свободном состоянии и сдерживаемого оболочкой стеснённого набухания, как, например: в диапазоне 0-5% т.а. скорость набухания составляет ~ 2,1 %/% т.а., в диапазоне выгорания 0-12% т.а. составляет ~1,3 %/% т.а., в диапазоне ~5-12 % т.а. – 0,7%/ % т.а.. Полученные данные в работе сопровождаются анализом особенностей структурного и фазового состояния материала.

Степень обоснованности и достоверности полученных в диссертации результатов подтверждается тщательностью исследований и отработанностью методик, большим количеством независимых измерений, апробацией и открытым их обсуждением на различных публичных форумах. **Выводы и рекомендации** справедливы, не выходят за пределы области исследований в

рамках специальности, и могут быть расширены за пределы этой области читателем самостоятельно при желании.

Результаты исследований в каждом отдельном случае и в совокупности обладают **новизной**, а в контексте установления фактической связи макроскопических эффектов с изменениями структурно-фазового состояния СНУП-топлива новизна несомненна.

Несмотря на безусловно положительную оценку диссертационной работы, можно отметить некоторые неточности и недостатки, а именно:

1. В тексте неоднократно встречается упоминание об «атермическом механизме» выхода части газовых продуктов деления в газонаполненные поры при относительно невысоких температурах облучения (конкретные температуры указаны в тексте). Действительно, в этих случаях термическая диффузия атомов не должна проявляться. Однако хотелось бы, чтобы в этих случаях автор высказал своё отношение к проблеме возникновения термопиков, возникающих в каждом акте деления плутония в топливной матрице, оценил масштабы и влияние этих событий на диффузионные процессы, определив их через понятия радиационно-стимулированной диффузии.

2. Автор многократно демонстрирует изображения поперечного сечения топливного сердечника, который практически всегда имеет трещины и фрагментирован на какое-то количество частей. Не вызывает сомнения, что растрескивание приводит к релокации топливных фрагментов и изменению эффективного размера топливной таблетки. При этом используются три метода определения распухания (определение радиуса кривизны фрагментов по трём точкам, планиметрический метод с исключением площади трещин, гидростатическое определение плотности), которые позволяют с высокой точностью определить плотность фрагментов топлива, но не позволяют утверждать, что до достижения определённой величины распухания сердечник испытывает свободное распухание. Утверждение о свободном распухании сердечника следует понимать как условно свободное распухание, когда фрагменты топливных таблеток локально нагружают оболочку, локально деформируют её с искажением круговой формы. Это происходит потому, что даже с учётом радиационной ползучести оболочки и сердечника жёсткость сердечника СНУП-топлива намного выше жесткости стальной оболочки.

3. Соответственно, приходится признать, что утверждения автора, например на стр. 76, о том, что «контакт топлива с оболочкой данной конструкции произойдёт при выгорании около 9%» - идеализированы.

4. Факт обнаружения удлинения топливного столба на первом, втором и третьем этапе облучения, достигшем среднего значения 2,8% при выгорании в максимуме до 5,5%, приведён на стр. 77, но не получил желаемого анализа и интерпретации. Также остаются неясности в отношении причин приведённого на стр. 105 факта: «Во всех исследованных сечениях увеличение размеров топливных таблеток в диаметральном направлении больше, чем в

аксиальном». Для изотропно распухающего сердечника это различие локального увеличения диаметра и локального удлинения в 4 раза должно привлекать внимание и найти объяснение.

Приведённые недостатки не изменяют положительного впечатления от выполненной работы, а демонстрируют широкий масштаб выполняемых исследований и возникновение новых задач. Работа выполнена на беспрецедентно глубоком уровне исследований ядерного топлива, содержит постановку задачи, разработку и применение сложных методик исследования, выполнение исследований лично автором, описание полученных экспериментальных результатов и их интерпретацию.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, при выполнении которой получены важные научные и практические результаты, соответствует требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям, автореферат в достаточной мере отражает содержание диссертации. Автор работы – Беляева Анна Викторовна – заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент -
научный руководитель АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»,
доктор технических наук,
научная специальность: 05.14.03- «Ядерные энергетические установки,
включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации»
249032, Калужская область, г. Обнинск, пл. Бондаренко 1
Тел. 4843998540, эл. почта vmtroyanov@ippe.ru

Троянов Владимир Михайлович
« 17 » марта 2022

Подпись Троянова В.М. заверяю:
Учёный секретарь НТС,
заместитель генерального директора АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»



Н.Г. Айрапетова