

Беляева Анна Викторовна

**ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ НА
МИКРОСТРУКТУРУ И РАСПУХАНИЕ УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО
НИТРИДНОГО ТОПЛИВА**

1.3.8. Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ульяновск – 2022 г.

Работа выполнена в лаборатории исследований топлива отделения реакторного материаловедения Акционерного общества «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР») Росатом

Научный руководитель:

Крюков Федор Николаевич
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Троянов Владимир Михайлович
доктор технических наук,
АО «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», научный руководитель

Бахин Андрей Николаевич
кандидат технических наук,
АО "Научно-исследовательский институт Научно-производственное объединение "ЛУЧ", начальник лаборатории 076 отделения ТКМ

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Защита диссертации состоится «19» апреля 2022 г. в 11 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.422.01 при ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет» по адресу: г. Ульяновск, ул. Набережная реки Свияги, д. 106, к. 1, ауд. 703.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в научной библиотеке Ульяновского государственного университета и на сайте ВУЗа <https://www.ulsu.ru>, а так же с авторефератом можно ознакомиться на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования РФ – <https://vak.minobrnauki.gov.ru>

Отзывы на автореферат просим высылать по адресу: 432970, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, д. 42, УлГУ, отдел подготовки кадров высшей квалификации.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Вострецова Любовь Николаевна

Общая характеристика работы

Актуальность

Стратегия развития атомной энергетики России основывается на двухкомпонентной системе с реакторами на быстрых и тепловых нейтронах и замкнутым ядерным топливным циклом [1]. В настоящее время в России существует два направления развития реакторов на быстрых нейтронах – это реакторы типа БН с натриевым теплоносителем (действующие БН-600 и БН-800 и проектируемый БН-1200) и реакторы со свинцовым теплоносителем типа БРЕСТ (проектируемые БРЕСТ ОД-300 и БРЕСТ-1200). На первом этапе освоения реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем используется оксидное урановое и уран-плутониевое топливо, а в качестве перспективы рассматривается использование смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива. В проектах реакторов БРЕСТ изначально заложено использование нитридного топлива.

Сочетание высоких значений теплопроводности, температуры до начала разложения, удельного содержания тяжёлых изотопов в соединениях на основе мононитридов урана и плутония и их совместимость как с натриевым, так и со свинцовым теплоносителем позволяют рассматривать эти соединения в качестве топливных композиций, способных обеспечить необходимые нейтронно-физические характеристики, теплогидравлические параметры и безопасную работу реакторных установок на быстрых нейтронах. Для практического применения нитридного топлива необходима информация о влиянии реакторного облучения на изменение его свойств [2].

К числу основных факторов, определяющих работоспособность тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), относится радиационное распухание топлива, природа которого обусловлена изменением элементного состава и структуры топливной композиции вследствие образования и накопления продуктов деления. Поведение газообразных и твердых продуктов деления, структурно-фазовое состояние облученного топлива зависят от нейтронно-физических и температурных условий облучения, достигнутого уровня выгорания и исходных характеристик топливной композиции.

В рамках выполнения научно-исследовательских программ по изучению свойств нитридного топлива в АО «ВНИИНМ» были разработаны и изготовлены экспериментальные ТВЭЛы с топливными композициями (U,Pu)N для облучения в опытном реакторе на быстрых нейтронах БОР-60 (АО «ГНЦ НИИАР»). Различное конструктивное исполнение ТВЭЛов и сборно-разборный тип облучательных устройств обеспечили возможность проведения реакторных испытаний топлива в интервале температуры от 550 до 1760 °С с поэтапным увеличением выгорания до 5,5 % т.а. для ТВЭЛов с жидкометаллическим (свинцовым) заполнением и до 12,1 % т.а. для ТВЭЛов с газовым (гелиевым) заполнением, промежуточными и итоговыми послереакторными исследованиями в материаловедческом комплексе АО «ГНЦ НИИАР». В результате был получен обширный массив экспериментальных данных о влиянии облучения в реакторе на быстрых нейтронах на состояние топливных композиций, оболочек и ТВЭЛов в целом. К числу наиболее актуальных, существенных для развития научных представлений и важных для практического применения относятся экспериментальные данные о характеристиках радиационного распухания нитридного топлива, представленные в настоящей работе.

Цель и задачи

Целью работы было выявление закономерностей набухания уран-плутониевого нитридного топлива под действием облучения в реакторе на быстрых нейтронах.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи.

1. Получить экспериментальные данные о распределении продуктов деления, микроструктуре, фазовом составе и изменении объёма уран-плутониевого нитридного топлива для выявления физической природы, величины и скорости набухания в результате низкотемпературного облучения в ТВЭлах со свинцовым заполнением.
2. Исследовать влияние уровня выгорания при низкотемпературном облучении на особенности состояния топлива – перераспределение продуктов деления, изменение микроструктуры и скорости набухания.
3. Получить экспериментальные данные о влиянии температуры на перераспределение продуктов деления, изменения микроструктуры и фазового состава топлива для анализа особенностей его набухания в условиях повышенных температур в составе ТВЭлов с гелиевым заполнением.
4. Определить скорость свободного и сдерживаемого оболочкой набухания уран-плутониевого нитридного топлива на разных этапах облучения в составе ТВЭлов с гелиевым заполнением, определить изменения объёма твёрдой фазы и пористости.

Научная новизна полученных результатов

1. Установлено, что в результате облучения уран-плутониевого нитридного топлива при температуре в центре сердечника ниже 870 °С до выгорания 3,9 % т.а. его набухание обусловлено в основном увеличением объёма твёрдой фазы; изменений микроструктуры и фазового состава, влияющих на набухание, не происходит, основное количество продуктов деления находится в твёрдой фазе, обуславливая увеличение параметра кристаллической решётки многокомпонентного твёрдого раствора на основе (U,Pu)N.
2. Обнаружено, что при низкотемпературном облучении уран-плутониевого нитридного топлива до уровня выгорания около 5,5 % начинается процесс формирования характерной мелкопористой субзернистой структуры высоковыгоревшего топлива, связанный с измельчением зерна до субмикронных размеров, формированием пористости и выходом газообразных продуктов деления в образующиеся поры. Увеличение средней скорости набухания топлива за счёт реструктуризации на начальном этапе составило около 0,1 %/% выгорания.
3. Установлено, что в результате облучения уран-плутониевого нитридного топлива при максимальной температуре в центре таблетки до 1760 °С основные изменения микроструктуры связаны с выходом газообразных продуктов деления из твёрдой фазы, образованием новых пор, увеличением пористости и выделением вторых фаз, содержащих металлические продукты деления, при этом основу твёрдой фазы составляет многокомпонентный твёрдый раствор с увеличенным параметром кристаллической решётки.
4. Для данной конструкции ТВЭлов и условий облучения определены значения выгорания до контакта топлива с оболочкой, количественные характеристики свободного и сдерживаемого оболочкой набухания, значения величины и скорости набухания за счёт увеличения пористости и увеличения объёма твёрдой фазы, включая вклад за счёт увеличения параметра кристаллической решётки.

Практическая значимость работы

Исследования, результаты которых представлены в диссертации, являются частью работ, выполненных в рамках ФЦП «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 годов и на перспективу до 2020 года» и реализуемой в настоящее время в Госкорпорации «Росатом» «Комплексной программы расчетно-экспериментального обоснования плотного топлива для реакторов на быстрых нейтронах». Полученные экспериментальные данные о влиянии нейтронного облучения в опытном реакторе БОР-60 на свойства уран-плутониевого нитридного топлива послужили основой для обоснования работоспособности, безопасности и возможности поэтапного увеличения выгорания в промышленном реакторе БН-600, для обоснования проектов твэлов первых загрузок реакторов БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200, а также для подготовки программы НИОКР «Разработка смешанного уран-плутониевого нитридного (СНУП) топлива со средним выгоранием до 12 % т.а.». Результаты исследования микроструктуры, поведения продуктов деления и распухания нитридного топлива непосредственно использованы при разработке универсального твэльного кода БЕРКУТ (ИБРАЭ РАН), для модернизации и верификации топливного кода ДРАКОН (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»), предназначенных для численного моделирования поведения топлива и твэлов в реакторах на быстрых нейтронах, что подтверждено справками об использовании результатов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Распухание нитридного уран-плутониевого топлива, облученного в составе твэлов со свинцовым подслоем при максимальной температуре в центре таблетки 870 °С до выгорания 3,9 % т.а., происходит преимущественно за счет увеличения объема твёрдой фазы вследствие образования и накопления продуктов деления в топливной матрице, новых пор не образуется, выход ГПД в технологические поры происходит по атермическому механизму; средняя скорость распухания топливной композиции не превышает $(1,4 \pm 0,1) \%/\%$ выгорания.
2. При достижении выгорания 5,5 % т.а. в нитридном уран-плутониевом топливе, облученном в составе твэлов со свинцовым подслоем при максимальной температуре ниже 870 °С, обнаружено явление реструктуризации, сопровождающееся образованием новых пор, выходом газообразных продуктов деления в поры и формированием субзеренной структуры. Это приводит к изменению механизма и скорости распухания топлива: к распуханию за счет увеличения объема твёрдой фазы (при начальном уровне выгорания) добавляется вклад в распухание за счет образования и роста пор, появившихся в процессе реструктуризации. Скорость распухания топлива на начальной стадии реструктуризации при выгорании 5,5 % т.а. составила $(1,5 \pm 0,1) \%/\%$ выгорания.
3. В уран-плутониевом нитридном топливе, облученном в составе твэлов с гелиевым подслоем до выгорания 12,1 % т.а. при максимальной температуре в центре топлива до 1760 °С, выход ксенона и цезия из твёрдой фазы составляет соответственно 65 и 62 % от образовавшихся количеств. Распухание топлива происходит как за счёт увеличения объема твёрдой фазы, так и за счёт формирования пористости.
4. Распухание уран-плутониевого нитридного топлива, облучённого в составе твэлов с гелиевым подслоем, состоит из двух стадий – стадии свободного распухания до контакта топлива с оболочкой при выгорании меньше 5 % т.а. и стадии распухания в условиях механического сдерживания со стороны оболочки твэла при выгорании выше 5 % т.а. Скорость распухания

топлива до контакта с оболочкой составляет $(2,1 \pm 0,2)$ % /% выгорания, при этом средняя за весь период облучения скорость распухания равна $(1,3 \pm 0,1)$ %/% выгорания.

Апробация работы

Основные положения и результаты, полученные на разных стадиях проведения данной работы, докладывались и обсуждались на Всероссийской научной школе для молодежи «Реакторы на быстрых нейтронах» (г. Обнинск, 2009 г.), VIII Курчатовской молодежной научной школе (г. Москва, 2010 г.), Всероссийской научной конференции «Материалы ядерной техники» (Туапсе, 2010 г.), Молодежной отраслевой научно-технической конференции «Развитие технологий реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем» (Нижний Новгород, 2011 г.), Международной школе-семинаре по ядерным технологиям «Черемшанские чтения» (Дмитровград, 2011 г.), школе-конференции для молодых ученых и специалистов «Материалы перспективных реакторных установок» (г. Звенигород, 2012 г.), Международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (Москва, 2012 г.), Всероссийской молодежной конференции «Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения» (Дмитровград, 2016 г.), Всероссийской молодежной конференции «Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения» (Дмитровград, 2018 г.), XI конференции по реакторному материаловедению (Дмитровград, 2019 г.), X Всероссийской молодежной конференции «Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения» (Дмитровград, 2021 г.).

Достоверность научных положений, результатов и выводов определяется:

- воспроизводимостью экспериментальных данных;
- верификацией методов исследований по результатам измерений разными методами и сравнением с литературными данными;
- метрологической аттестацией методик исследования;
- наличием системы обеспечения качества в АО «ГНЦ НИИАР» в соответствии с государственной аккредитацией научной организации в области обеспечения единства измерения для выполнения работ и (или) оказания услуг по аттестации методик (методов) измерений, метрологической экспертизе и поверке средств измерений (аттестат аккредитации № 01.00050-2014 от 12.05.2014), а также лицензией на осуществление деятельности по данному тематическому направлению (ГН-03-115-3888 от 10.08.2020).

Личный вклад

Все экспериментальные результаты послереакторных исследований получены в материаловедческом комплексе АО «ГНЦ НИИАР» при непосредственном участии автора. Личный вклад автора состоит в получении, обработке, анализе и обобщении экспериментальных данных, подготовке публикаций. Постановка задач и обсуждение результатов были проведены совместно с научным руководителем. Основные результаты, использованные в диссертации для определения особенностей распухания СНУП топлива, получены автором самостоятельно. Исследования методами рентгеноструктурного анализа, сканирующей электронной микроскопии и электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа выполнены с участием доктора технических наук, профессора Косенкова В.М., кандидатов физико-математических наук Кузьмина С.В. и Никитина О.Н. Параметры облучения экспериментальных

ТВЭЛОВ в реакторе БОР-60 были рассчитаны в управлении перспективных разработок реакторного исследовательского комплекса АО «ГНЦ НИИАР» под руководством доктора технических наук Жемкова И.Ю. и в АО «ГНЦ РФ ФЭИ» под руководством кандидата технических наук Забудько Л.М.

Публикации

По теме диссертации и результатам исследований при участии автора в научных изданиях опубликованы 19 научных работ, в том числе, 7 статей в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science, 3 статьи в журналах, входящих в национальную библиографическую базу данных научного цитирования, индексируемых в РИНЦ, 9 статей в сборниках и трудах международных и российских научных конференций.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объём работы составляет 125 страницы, включая 69 рисунков и 30 таблиц. Список литературы содержит 73 наименования.

Основное содержание работы

В первой главе проведен анализ литературы о влиянии облучения на структуру, элементный состав и набухание нитридного уран-плутониевого топлива, который показал, что благодаря высокой теплопроводности нитридное топливо характеризуется большей стабильностью к изменению микроструктуры, и большей способностью к удержанию продуктов деления по сравнению с более изученным оксидным топливом [3]. Данные об элементном и фазовом составе облученного нитридного топлива получены преимущественно с помощью термохимических расчетов. Результаты послереакторных исследований ограничены в связи со сложностью проведения реакторных испытаний и противоречивы, что связано с многочисленностью комбинаций веществ с участием продуктов деления, а также влиянием на поведение продуктов деления множества факторов, основные из которых температура, структура, состав топлива, уровень выгорания. Отсутствуют как теоретические, так и экспериментальные данные, описывающие механизм изменения параметра кристаллической решетки (ПКР) нитридного топлива в процессе облучения. Существенный разброс имеют экспериментальные данные о скорости радиационного набухания нитридного топлива [4-12]. В связи с этим сделано заключение о необходимости экспериментального определения радиационного набухания нитридного топлива при разных значениях температуры и выгорания, а также проведение расчета вкладов различных механизмов набухания в объемные изменения топливных таблеток.

Во второй главе приведены характеристики исследуемых материалов и условия облучения, описаны методы послереакторных материаловедческих исследований.

В данной работе исследованы два типа ТВЭЛОВ после облучения в реакторе БОР-60 с различным заполнением зазора между топливом и оболочкой (гелий или свинец). Вследствие разной теплопроводности заполняющего материала температурные условия облучения уран-плутониевых нитридных топливных композиций (таблица 1) имели существенные различия, что дало возможность облучения топлива в широком температурном интервале и позволило выявить зависящие от температуры эффекты.

Таблица 1 – Основные характеристики и параметры облучения твэлов с нитридным уран-плутониевым топливом

Наименование параметра	Характеристика параметра			
	гелий	свинец	гелий	свинец
Теплопередающий подслей	гелий	свинец	гелий	свинец
Состав топливного сердечника	U _{0,4} Pu _{0,6} N	U _{0,82} Pu _{0,18} N	U _{0,88} Pu _{0,12} N	
Материал оболочки твэла	сталь ЧС-68	сталь ЭП-823		
Плотность топлива, г/см ³	12,16	13,08	12,18	13,16
Пористость, %	15,1	8,5	15,0	8,0
Диаметр топливной таблетки, мм	5,88	7,85	8,07	7,88
Номинальный диаметр твэла, мм	6,9	9,4	9,4	
Номинальная толщина оболочки, мм	0,4	0,5	0,5	
Номинальная длина топливного сердечника, мм	450	390	390	390
Расчётное максимальное выгорание, % т.а.	7,0 ¹⁾ 12,1 ²⁾	2,8 ¹⁾ 4,0 ²⁾ 5,5 ³⁾	4,8	3,9
Расчётная максимальная линейная тепловая мощность твэла, Вт/см	545	435	320	329
Расчётная максимальная температура топлива в центре таблетки, °С	1760	870	1145	734

^{1), 2), 3)} - значение в первом, втором и третьем этапе облучения, соответственно

Послереакторные материаловедческие исследования включали в себя:

– получение распределений продуктов деления по высоте и радиусу топливного сердечника методами гамма-сканирования и электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа [13, 14];

– исследование макро- и микроструктуры топлива методами металлографии и сканирующей электронной микроскопии [15, 16];

– получение данных о кристаллической структуре топлива и определение влияния условий облучения на изменение параметра кристаллической решётки UPuN методом рентгеноструктурного анализа [17];

– определение геометрических параметров топливного сердечника методами планиметрии [18], профилометрии [19] и оценку радиационного распухания топлива в результате облучения по формуле:

$$\frac{\Delta V_i}{V_0} = \frac{d_i^2 \cdot \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \cdot \frac{B_i}{B_{cp}}\right)}{d_0^2} - 1, \quad (1)$$

где ΔV_i – изменение объема топливного сердечника в i -том сечении, мм³;

V_0 – объем топливного сердечника до облучения, мм³;

d_i – значение диаметра топливного сердечника в i -том сечении, мм;

d_0 – значение диаметра таблеток до облучения;

B_i – значение выгорания в i -том сечении, % т.а.;

B_{cp} – среднее значение выгорания в твэле, % т.а.;

l_0 – высота топливного сердечника до облучения, мм;

Δl – увеличение высоты топливного сердечника в результате облучения, мм.

– определение плотности топлива методом гидростатического взвешивания [20] и оценку радиационного распухания топлива в результате облучения по формуле:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V - V_0}{V_0} = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho}, \quad (2)$$

где ρ_0 и ρ – плотность топливного сердечника до и после облучения, соответственно;

– определение пористости топлива после облучения методом количественной металлографии [15] и оценку вклада увеличения объема пор в общее распухание топливных композиций по формуле:

$$\left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)_r = \Pi \cdot \left(\frac{\Delta V}{V_0} + 1\right) - \Pi_0, \quad (3)$$

где $\frac{\Delta V}{V_0}$ – распухание топлива, %;

Π_0 и Π – значение пористости материала соответственно до и после облучения, %.

В третьей и четвертой главах представлены результаты исследований особенностей структурно-фазового состояния и радиационного распухания СНУП топлива после низкотемпературного облучения в твэлах с жидкометаллическим (свинцовым) подслоем.

При исследовании структуры и элементного состава топливной композиции $U_{0,82}Pu_{0,18}N$, облученной при температуре от 550 до 870 °С, в зависимости от достигнутого выгорания было обнаружено два характерных типа микроструктуры топлива, коррелирующие с поведением газообразных продуктов деления.

Для первого типа, соответствующего выгоранию до 3,9 % т.а. включительно, микроструктура облученного топлива не имела существенных отличий от структуры топливной композиции до облучения, продукты деления были распределены в топливной матрице равномерно. Отсутствовали признаки формирования вторичной пористости в топливе, связанной с образованием и перераспределением газообразных продуктов деления (рисунк 1). Выход газообразных продуктов деления (ГПД) в технологические поры происходил по атермическому механизму и не превышал 10 % для ксенона и 6 % для цезия (рисунк 2).

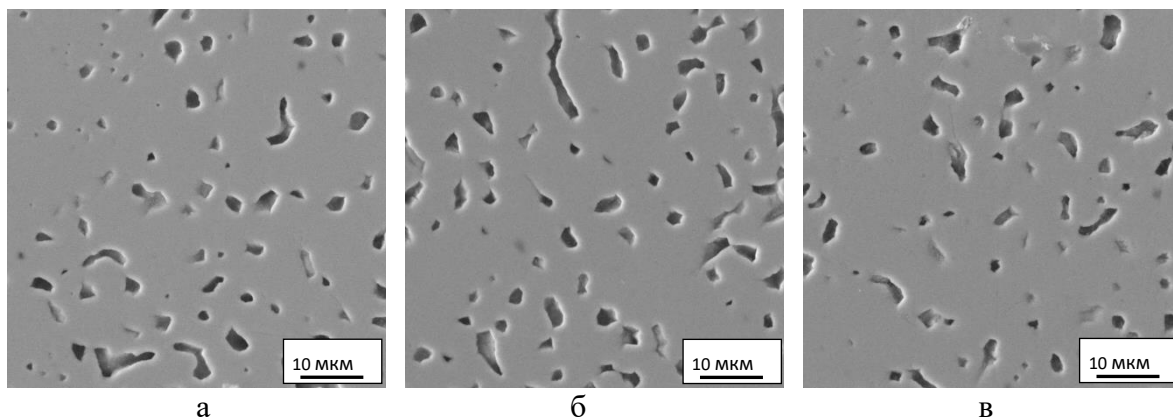


Рисунок 1 – Изображения микроструктуры топлива вдоль радиуса топливной таблетки после облучения до выгорания 3,9 % т.а.: а – в центре, б – на середине радиуса, в – на краю [21]

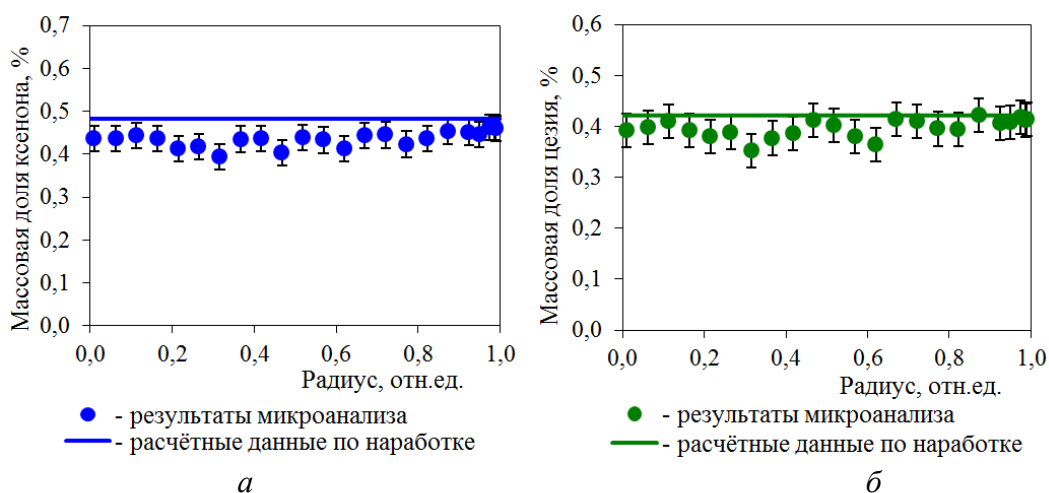


Рисунок 2 – Распределения ксенона (а) и цезия (б) вдоль радиуса топливного сердечника после облучения до выгорания 3,9 % т.а. [21]

Таким образом, малая диффузионная подвижность продуктов деления и структурная стабильность топливной композиции в условиях низкотемпературного облучения за счет введения жидкометаллического подслоя были подтверждены экспериментально и согласовывались с литературными данными.

Изменения микроструктуры уран-плутониевого нитридного топлива, зафиксированные в диапазоне выгораний от 5 до 5,5 % т.а., заключались в формировании субзеренной структуры и образовании газонаполненных пор размером менее 1 мкм (рисунок 3). Методом электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа было показано, что микроструктурные изменения, происходящие в топливной матрице, сопровождаются перераспределением газообразных продуктов деления и выходом ксенона в образовавшиеся субмикронные поры (рисунок 4).

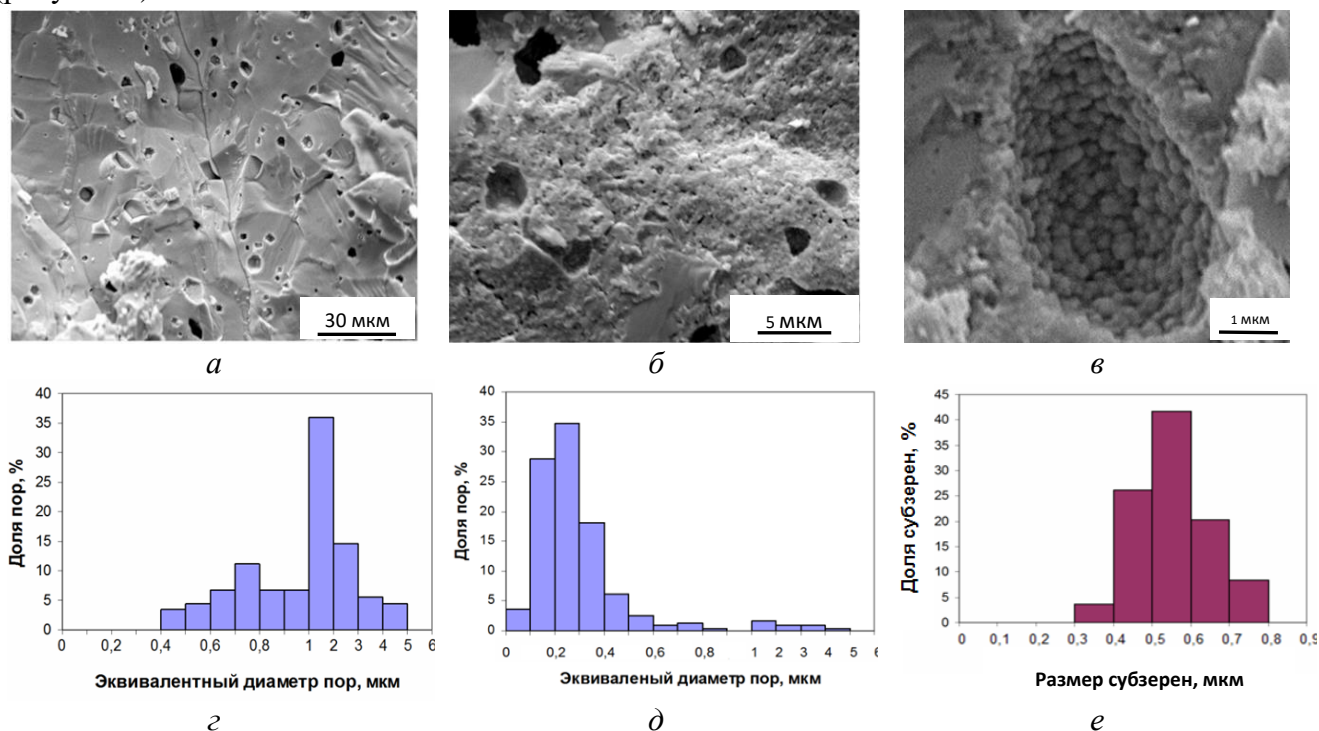


Рисунок 3 – Особенности микроструктуры топлива после низкотемпературного облучения до выгорания 5,5 % т.а.: участок без признаков реструктуризации (а) и реструктурированная область (б, в); распределение пор (г, д) и субзерен (е) по размерам [22]

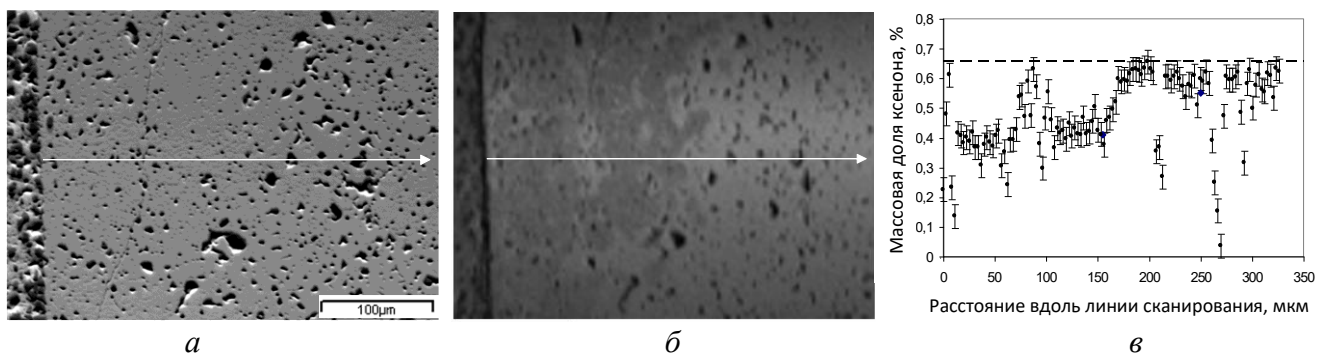


Рисунок 4 – Изображение микроструктуры топлива (а), распределение ксенона по площади (б) исследуемого участка (более светлому цвету на изображении соответствуют более высокое содержание ксенона) и вдоль линии сканирования (в) [22]

Полученные результаты свидетельствуют о наличии признаков реструктуризации нитридного топлива при низкотемпературном облучении в твэлах с жидкометаллическим наполнением, подобных признакам реструктуризации оксидного топлива в краевой зоне таблеток в твэлах легководных реакторов [23, 24].

Исходный тип ГЦК-кристаллической структуры твердого раствора $U_{0,82}Pu_{0,18}N$ после облучения сохраняется, но наблюдается увеличение параметра кристаллической решетки (рисунок 5). Скорость роста ПКР зависит от рабочей температуры топливного сердечника и коррелирует с содержанием продуктов деления в облученном топливе. Так при температуре $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выгорании около 4 % т.а. продукты деления находятся в твердом растворе матрицы топлива, средняя скорость увеличения ПКР составляет 0,04 %/% выгорания. С ростом температуры и выгорания до значений $860\text{--}870\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 5,5 % т.а., соответственно, происходит снижение средней скорости изменения ПКР до 0,03 %/% выгорания, что обусловлено выходом части продуктов деления из твердого раствора матрицы топлива, а также отжигом части радиационных дефектов. При низкотемпературном облучении предел растворимости в кристаллической решётке $UPuN$ таких продуктов деления, как цезий, молибден, технеций и рутений наступает при достижении выгорания около 4 % т.а., с ростом выгорания происходит выход части продуктов деления с образованием включений самостоятельных фаз (рисунок б).

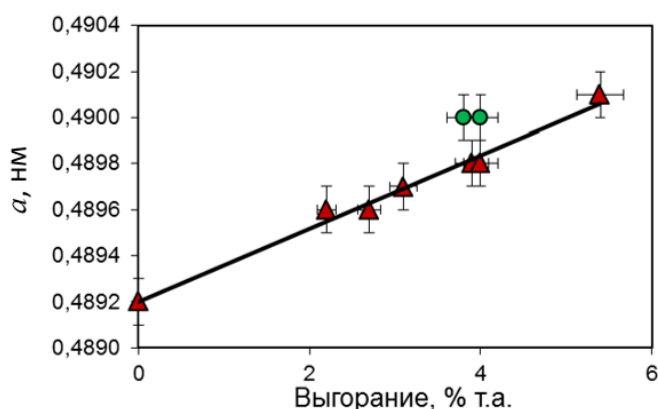


Рисунок 5 - Изменение параметра кристаллической решетки $U_{0,82}Pu_{0,18}N$ с ростом выгорания (● – для образцов из нижних сечений твэлов с температурой в центре топливного сердечника $550\text{ }^{\circ}\text{C}$; ▲ – для образцов из центральных и верхних сечений твэлов с температурой в центре топливного сердечника $860\text{--}870\text{ }^{\circ}\text{C}$) [24]

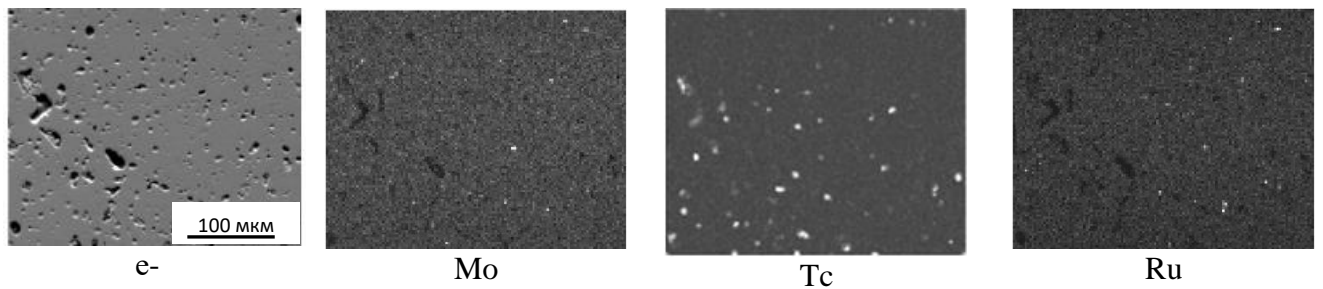


Рисунок 6 – Изображение в обратноотраженных электронах (e-) и карты распределения элементов после облучения до выгорания 5,5 % т.а [24]

Скорость набухания уран-плутониевого нитридного топлива, облученного в составе твэлов с жидкометаллическим подслоем до выгорания 3,9 % т.а., не превышает 1,4 %/% выгорания. Набухание происходит преимущественно за счет увеличения объема твердой фазы (1%/% выгорания) вследствие образования и накопления продуктов деления в топливной матрице и в меньшей степени за счет атермического выхода ГПД в технологические поры (0,4 %/% выгорания).

Проведенные исследования показали, что с ростом выгорания до 5,5 % т.а. вследствие изменения микроструктуры и увеличения общей пористости топлива на 2,8 % происходит увеличение средней скорости набухания до 1,5 %/ % выгорания (рисунок 7). При сохранении указанной скорости набухания, контакт топлива с оболочкой в макетах твэлов данной конструкции в рабочих условиях произойдет при выгорании около 9 % т.а. (рисунок 8).

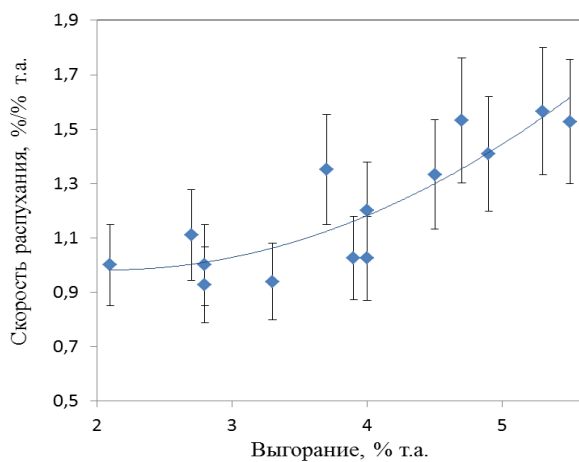


Рисунок 7 – Изменение средней скорости набухания топлива с ростом выгорания при температуре в центре топливного сердечника от 600 до 870 °С

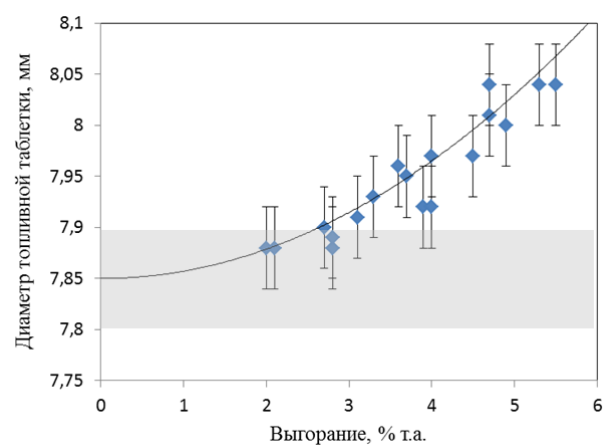


Рисунок 8 – Зависимость величины диаметра топливного сердечника от локального в сечении твэла выгорания (серая полоса на изображении показывает разброс значений диаметра до облучения) [22]

Таким образом, явление реструктуризации, наблюдаемое в уран-плутониевом нитридном топливе при температуре, не превышающей 870 °С, и выгорании 5,5 % т.а., приводит к появлению дополнительного механизма набухания, связанного с атермическим выходом газообразных продуктов деления из матрицы топлива и образованием газонаполненных пор. Максимальное значение набухания уран-плутониевого нитридного топлива составляет 8,4 % при выгорании 5,5 % т.а. (рисунок 9), из которых 3,7 % обусловлены образованием газонаполненных пор («газовое» набухание) и 4,7 % – изменением объема твердой фазы

(«твердое» распухание). Скорость распухания за счет увеличения объемов твердой фазы и пор составляют 0,8 и 0,7 %/% выгорания, соответственно. Дополнительно проведена оценка вклада в распухание за счет увеличения объема элементарной кристаллической ячейки топлива. Средняя скорость распухания за счет увеличения объема элементарной ячейки составляет около 0,1 % / % выгорания.

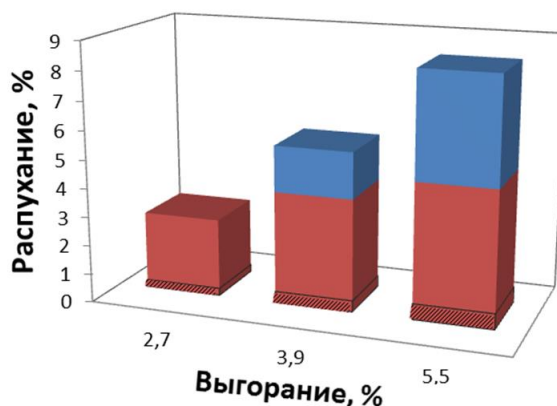


Рисунок 9 – Изменение распухания СНУП топлива после низкотемпературного облучения и вклады в распухание: ■ – за счет увеличения объема пор, ■ – за счет увеличения объема твердой фазы (в том числе штриховкой показан вклад в увеличение объема твердой фазы за счет увеличения объема элементарной кристаллической ячейки)

В пятой и шестой главах представлены результаты исследований особенностей структурно-фазового состояния и радиационного распухания СНУП топлива после высокотемпературного облучения в твэлах с газовым (гелиевым) подслоем.

В результате облучения при максимальной температуре 1760 °С вследствие накопления и высокой диффузионной подвижности газообразных продуктов деления в СНУП топливе происходит образование внутризёрнных и межзёрнных газовых пор диаметром от одного до нескольких микрометров. Пористость топлива увеличивается в направлении от края к центру топливной таблетки в сторону увеличения температуры (рисунки 10, 11). За счет объединения отдельных газовых и технологических пор в цепочки вдоль границ зерен формируется система межзёрнных связанных пор (рисунок 10 б), открытых, для выхода газообразных и летучих продуктов деления в свободный объем твэла. Выход ксенона и цезия из твердой фазы коррелирует с распределением пористости вдоль радиуса топливной таблетки (рисунок 12) и составляет соответственно 65 % и 62 % от образовавшегося их количества.

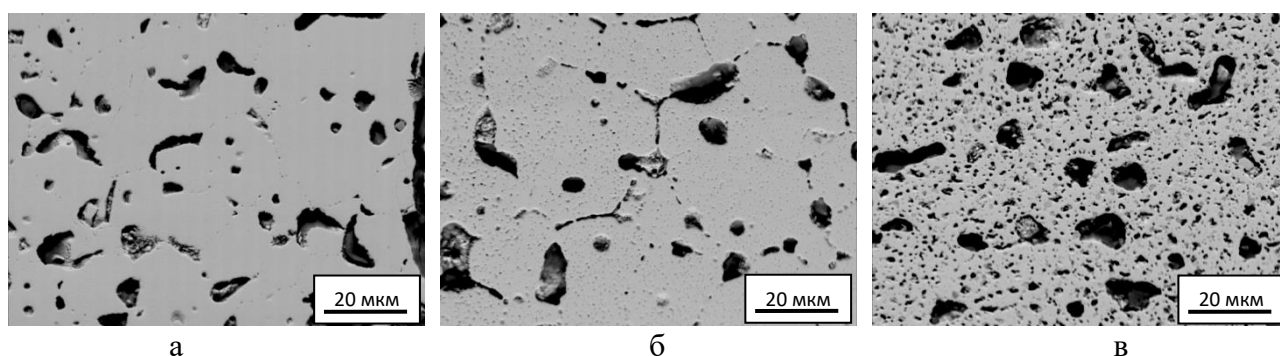


Рисунок 10 – Типичная микроструктура $U_{0,4}Pu_{0,6}N$ вдоль радиуса топливной таблетки после высокотемпературного облучения: а – около оболочки, б – на середине радиуса, в – центральная область [25]

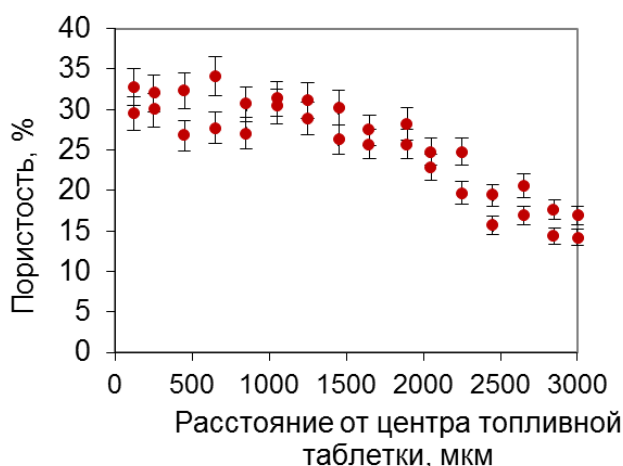


Рисунок 11 – Распределение пористости вдоль радиуса топливной таблетки после облучения до выгорания 12,1 % т.а. [25]

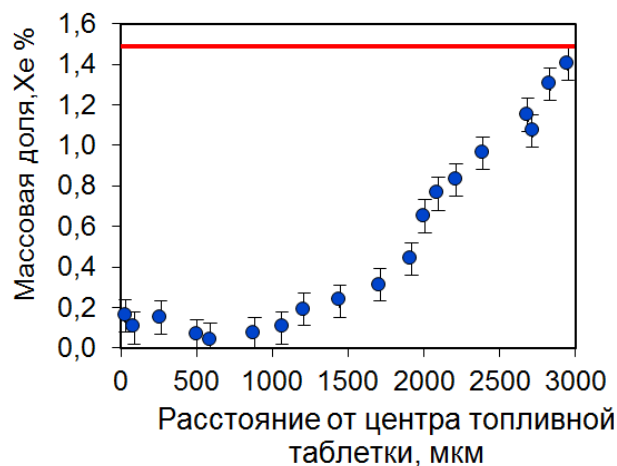


Рисунок 12 – Изменение массовой доли ксенона, содержащегося в твёрдом растворе (●) и накопленного при выгорании 12,1 % т.а. (—), вдоль радиуса топливной таблетки [25]

В структуре топливной композиции встречаются включения, представляющие собой вторые фазы из нерастворившихся продуктов деления. При высокотемпературном облучении самостоятельные фазы формируют молибден, палладий, рутений. Цирконий равномерно распределен в матрице топлива. Неодим и цезий находятся частично в твердом растворе, частично образуют вторые фазы (рисунок 13).

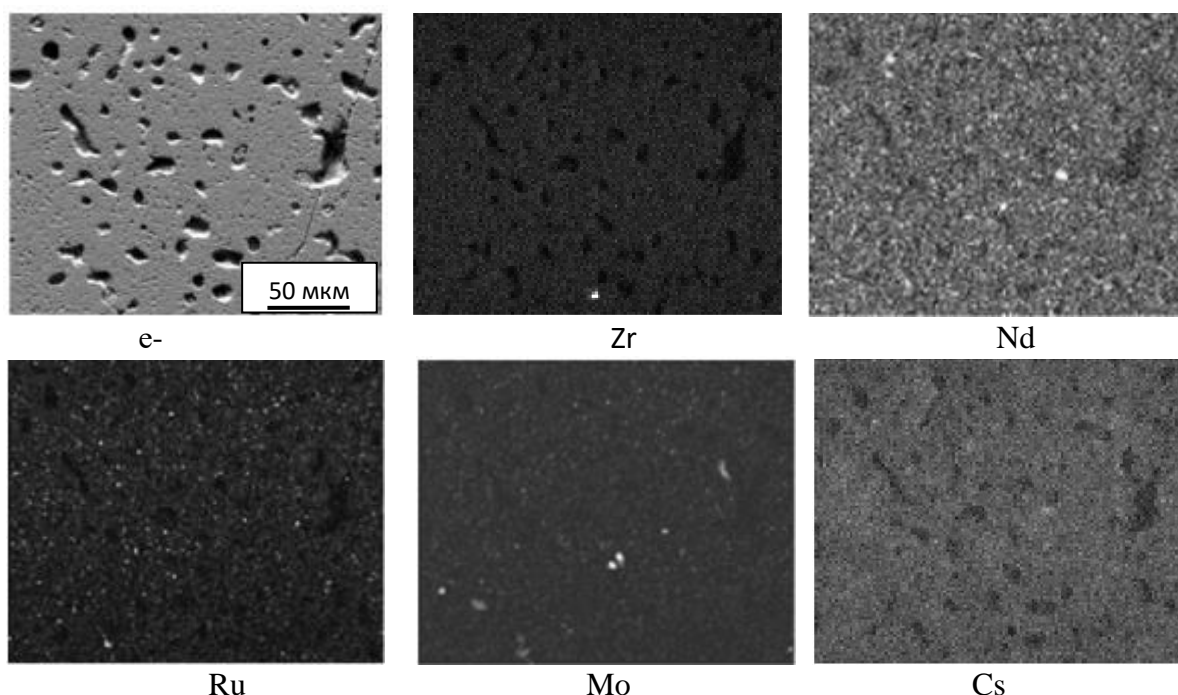


Рисунок 13 – Электронно-микроскопическое изображение в отраженных электронах (e^-) и распределение элементов в центральной области топливной таблетки состава $U_{0,4}Pu_{0,6}N$ после облучения до выгорания 12,1 % т.а. [22]

Кристаллическая решетка уран-плутониевого нитридного топлива сохраняет гранецентрированную сингонию, но испытывает монотонное увеличение параметра на

протяжении всего периода облучения, что связано с накоплением в ней продуктов деления с большим атомным радиусом, чем атомы компонентов топлива (рисунок 14).

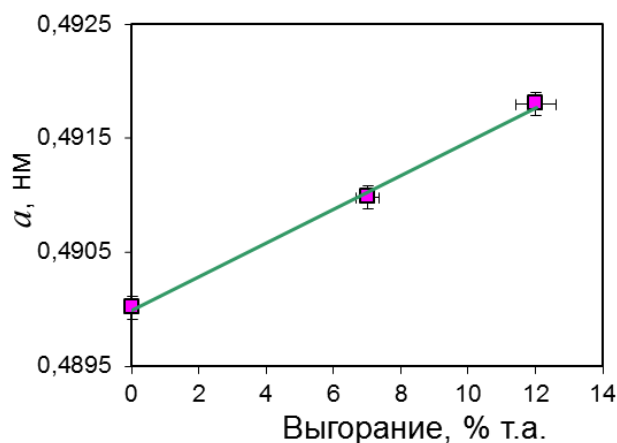


Рисунок 14 – Изменение параметра кристаллической решетки $U_{0,4}Pu_{0,6}N$ с ростом выгорания [22]

Контакт топлива с оболочкой для данной конструкции и условий облучения твэлов происходит при выгорании около 5 % т.а. (рисунок 15), поэтому при анализе распухания было выделено две стадии – стадия свободного распухания топлива и стадия распухания в условиях контакта с оболочкой твэла.

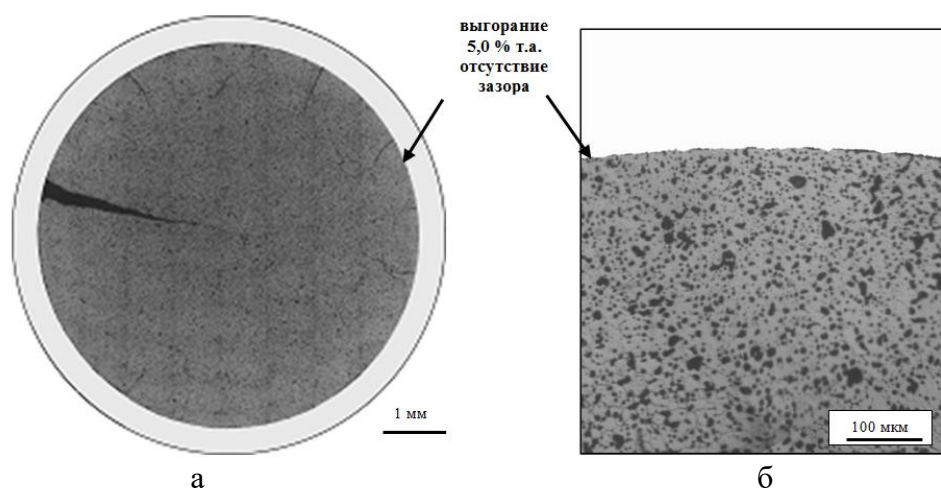


Рисунок 15 – Изображения макроструктуры топливного сердечника (а) и зона контакта топлива с оболочкой (б) в верхнем сечении твэла с локальным выгоранием 5 % т.а.

Скорость «свободного» распухания топлива максимальна за весь период облучения и составляет около 2,1 %/% выгорания (рисунок 16). После исчезновения зазора между топливным сердечником и оболочкой твэла скорость распухания существенно снизилась и в диапазоне выгорания от 5 до 12,1 % т.а. составляет 0,7 %/% выгорания, что связано со снижением рабочей температуры топлива и действием сжимающих напряжений со стороны оболочки.

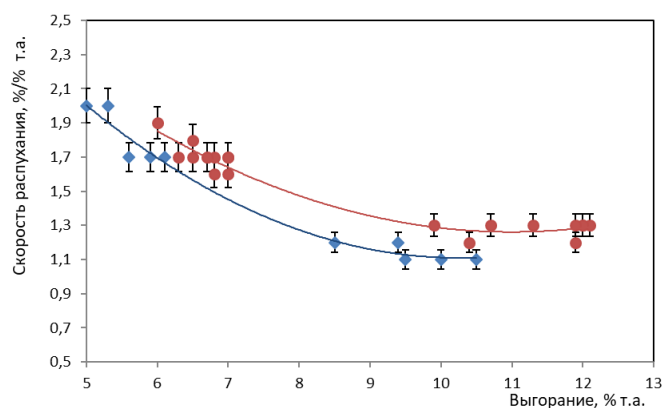


Рисунок 16 – Изменение средней скорости распухания топлива с ростом выгорания при различных значениях максимальной температуры в центре топливного сердечника: ● – от 1540 до 1760 °С, ◆ – от 1240 до 1450 °С

Средняя скорость распухания за весь период облучения составляет 1,3 %/% выгорания. Оценка вклада разных факторов в общую величину распухания показала, что в твэлах с газовым подслоем и, соответственно высокой рабочей температурой, большая диффузионная подвижность продуктов деления способствовала формированию развитой системы газовых пор, большого количества самостоятельных фаз из нерастворившихся продуктов деления, выходу части летучих и газообразных продуктов деления в образовавшиеся поры и в свободный объем твэла. В результате этих процессов значения скорости распухания нитридного топлива за счет увеличения объема пор и твердой фазы составляли соответственно 1,0 и 0,3 %/% выгорания.

Заключение

Анализ результатов исследований уран-плутониевого нитридного топлива, облучённого в опытном реакторе БОР-60 в составе твэлов с жидкометаллическим (свинцовым) и газовым (гелиевым) заполнением при максимальной температуре в центре сердечника соответственно до 870 и 1760 °С с поэтапным увеличением уровня выгорания до 5,5 и 12,1 % т.а. в рамках научных программ по изучению свойств и обоснованию работоспособности плотного топлива для проектируемых реакторов на быстрых нейтронах, позволяет сделать следующие выводы:

1. После облучения уран-плутониевого нитридного топлива в составе твэлов с жидкометаллическим заполнением при температуре ниже 870 °С до уровня выгорания 3,9 % т.а. наработанные продукты деления находятся в основном в твёрдой фазе, обуславливая увеличение её объёма. Выход ксенона и цезия в технологические поры не превышал соответственно 10 и 6 % от образовавшегося количества. Максимальная скорость распухания составила 1,4 %/% выгорания, 1,0 % из которых обусловлен увеличением объёма твердой фазы.

2. После достижения выгорания 5,5 % т.а. на отдельных участках топливных таблеток, облучённых при температуре ниже 870 °С, обнаружены характерные признаки реструктуризации нитридного топлива – измельчение зерна до субмикронных размеров с выходом ксенона в сформировавшиеся поры. Среднее значение скорости распухания топлива при выгорании 5,5 % т.а. достигло 1,5 % / % выгорания, 0,7 % из которых обусловлено увеличением объёма пор, 0,8 % – увеличением объёма твёрдой фазы, включая 0,1 % за счёт увеличения параметра кристаллической решётки.

3. В уран-плутониевом нитридном топливе после облучения при максимальной температуре 1760 °С до глубины выгорания 12,1 % т.а. выход ксенона и цезия из твёрдой фазы составил соответственно 65 и 62 % от образовавшихся количеств. Распухание топлива происходило как за счёт увеличения объёма твёрдой фазы, в основе которой – многокомпонентный твёрдый раствор, содержащий выделения вторых фаз, так и за счёт формирования пористости.

4. При анализе распухания топлива, облучённого при максимальной температуре 1760 °С до глубины выгорания 12,1 % т.а., выделены две стадии – стадия свободного распухания до контакта топлива с оболочкой и стадия распухания в условиях механического сдерживания со стороны оболочки твэла. Показано, что для данной конструкции и условий облучения твэлов контакт топлива с оболочкой наступил при значении локального (в сечении) выгорания около 5 % т. а., при этом средняя скорость распухания топлива до контакта с оболочкой составила 2,1 %/% выгорания. После контакта топливного сердечника с оболочкой твэла произошло снижение скорости распухания, и среднее за весь период облучения значение составило 1,3 %/% выгорания, из которых за счёт увеличения объёма пор – 1,0 %, за счёт распухания твёрдой фазы 0,3 %, включая 0,1 % за счёт увеличения параметра кристаллической решётки.

Перечень основных публикаций по теме диссертационного исследования

Публикации в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science:

1. Kryukov, F.N Results of post-irradiation examinations of mixed nitride pins with gas and liquid metal sub-layers / F.N.Kryukov, **A.V. Belyaeva**, M.V. Skupov, L.M. Zabudko, Yu.S. Mochalov // Nuclear Engineering and Design – 2021. - № 384, 111463, ISSN 0029-5493, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111463>.
2. Грачев, А.Ф. Послереакторные исследования твэлов с нитридным уран-плутониевым топливом с газовым и жидкометаллическим подслоем / А.Ф. Грачев, Л.М. Забудько, Ю.С. Мочалов, **А.В. Беляева** [и др.] // Атомная энергия. – 2020. – № 129 (6). – С. 311-316.
3. Грачев, А.Ф. Особенности радиационного распухания уран-плутониевого нитридного топлива в экспериментальных твэлах с гелиевым и свинцовым подслоем / А.Ф. Грачев, Л.М. Забудько, **А.В. Беляева** [и др.] // Атомная энергия.–2020.–№ 129 (5). – С. 272-276.
4. Беляева, А.В. Особенности распухания уран-плутониевого нитридного топлива при низкотемпературном облучении в быстром реакторе до выгорания 5,5 % т.а. / **А.В. Беляева**, И.Ф. Гильмутдинов, И.Ю. Жемков [и др.] // Атомная энергия. – 2017. – № 122 (5). – С. 263–266.
5. Крюков, Ф.Н. Состояние нитридного топлива после облучения в быстрых реакторах / Ф.Н. Крюков, О.Н. Никитин, С.В. Кузьмин, **А.В. Беляева** [и др.] // Атомная энергия. – 2012. – № 112 (6). – С. 336–341.
6. Рогозкин, Б.Д. Результаты испытаний смешанного моноснитридного топлива $U_{0,55}Pu_{0,45}N$ и $U_{0,4}Pu_{0,6}N$ в реакторе БОР-60 до выгорания ~12 % тяж. ат. / Б.Д. Рогозкин, Н.М. Степеннова, Ю.Ю. Федоров, М.Г. Шишков, Ф.Н. Крюков, С.В. Кузьмин, О.Н. Никитин, **А.В. Беляева** [и др.] // Атомная энергия. – 2011. – № 110 (6). – С. 332–346.
7. Rogozkin, B.D. Results of irradiation of $U_{0,55}Pu_{0,45}N$ and $U_{0,4}Pu_{0,6}N$ fuels in BOR-60 up to 12 at. % burnup / B.D. Rogozkin, N.M. Stepennova, Yu.Ye. Fedorov, M.G. Shishkov, F.N. Kryukov, S.V.

Kuzmin, O.N. Nikitin, **A.V. Belyaeva** [et.al.] // Journal of Nuclear Materials. – 2013. – № 440 (1-3). – P. 445–456.

Публикации в журналах, входящих в национальную библиографическую базу данных научного цитирования, индексируемых в РИНЦ

8. Гильмутдинов, И.Ф. Распределение продуктов деления в облучённом нитридном топливе твэлов БН-600 / И.Ф. Гильмутдинов, Ф.Н. Крюков, О.Н. Никитин, **А.В. Беляева** // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2018. – №. 1(92). – С. 83–93.

9. Беляева, А.В. Основные результаты исследований уран-плутониевого нитридного топлива после облучения в реакторе БОР-60 / **А.В. Беляева**, Ф.Н. Крюков, О.Н. Никитин [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2013. – №. 2(75). – С. 4–10.

10. Беляева, А.В. Радиационное распухание уран-плутониевого нитридного топлива в экспериментальных твэлах с газовым и жидкометаллическим наполнением / **А.В. Беляева**, Ф.Н. Крюков, О.Н. Никитин [и др.] // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». – 2017. – № 3. – С. 17–29.

Статьи в сборниках и трудах международных и российских научных конференций

11. Беляева, А.В. Радиационное распухание смешанного нитридного уран-плутониевого топлива в экспериментальных твэлах с гелиевым и свинцовым подслоем / **А.В. Беляева**, Ф.Н. Крюков, О.Н. Никитин [и др.] // Тезисы X Всероссийской молодежной конференции «Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения» (Дмитровград, 2021 г.). – 2021. – С. 58-59.

12. Беляева, А.В. Особенности распухания уран-плутониевого нитридного топлива в экспериментальных твэлах с газовым и жидкометаллическим подслоем / **А.В. Беляева**, Ф.Н. Крюков, О.Н. Никитин [и др.] // Тезисы XI конференции по реакторному материаловедению, посвящённой 55-летию отделения реакторного материаловедения АО "ГНЦ НИИАР" (Дмитровград). – 2019. – С. 108–111.

13. Иванов, Ю.А. Особенности поведения СНУП топлива под облучением и их учет при описании газовой выделения и распухания в коде КОРАТ / Ю.А. Иванов, А.М. Иванов, И.В. Кожевникова, Г.А. Киреев, М.В. Скупов, О.В. Хоружий, В.Г. Зборовский, В.В. Лиханский, О.Н. Никитин, **А.В. Беляева** // Тезисы конференции МАЯТ-2019 (Москва). – 2019. – С. 107.

14. Хоружий, О.В. Модернизация моделей поведения смешанного нитридного уран-плутониевого топлива в коде "КОРАТ" и их верификация на данных экспериментов / О.В. Хоружий, В.Г. Зборовский, Н.Н. Елкин, Я.Р. Лифанов, В.В. Лиханский, О.Н. Никитин, **А.В. Беляева** [и др.] // Тезисы XI конференции по реакторному материаловедению, посвящённой 55-летию отделения реакторного материаловедения АО "ГНЦ НИИАР" (Дмитровград). – 2019. – С. 104–108.

15. Беляева, А.В. Результаты исследования радиационного распухания уран-плутониевого нитридного топлива в экспериментальных твэлах реакторов БОР-60 и БН-600 / **А.В. Беляева**, Ф.Н. Крюков // Тезисы Всероссийской молодежной конференции «Научные исследования и разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения» (Дмитровград). – 2018. – С. 11–15.

16. Беляева, А.В. Состояние нитридного топлива после облучения в реакторах на быстрых нейтронах / **А.В. Беляева**, Ф.Н. Крюков // Сб. докладов Международной школы-семинара по ядерным технологиям «Черемшанские чтения» (Дмитровград). – 2012. – С. 265–273.
17. Крюков, Ф.Н. Основные результаты исследований уран-плутониевого нитридного топлива после облучения в реакторе БОР-60 / Ф.Н. Крюков, О.Н. Никитин, С.В. Кузьмин, **А.В. Беляева** [и др.] // Сб. докладов Международной научно-технической конференции "Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики" (Москва). – 2012. – С. 223–229.
18. Крюков, Ф.Н. Основные итоги российско-французского эксперимента по облучению топливных композиций с повышенным содержанием плутония / Ф.Н. Крюков, С.В. Кузьмин, О.Н. Никитин, **А.В. Беляева** [и др.] // Сб. докладов (часть 2) молодежной отраслевой научно-технической конференции «Развитие технологии реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем» (Н.Новгород). – 2011. – С. 408–420.
19. Беляева, А.В. Поведение газообразных продуктов деления и набухание уран-плутониевого нитридного топлива при облучении в реакторе БОР-60 / **А.В. Беляева**, И.Ф. Гильмутдинов, И.Ю. Жемков [и др.] // Тезисы 8-ой международной конференции «Ядерная и радиационная физика» (Казахстан, Алматы). – 2011. – С. 390.

Список цитируемой литературы

1. Адамов, Е.О. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г / Е.О. Адамов [и др.] // Атомная энергия. – 2012. – № 112 (6). – С. 319–330.
2. Комплексная программа расчетно-экспериментального обоснования плотного топлива для реакторов на быстрых нейтронах (2-я редакция), утв. заместителем генерального директора-директором БУИ ГК «Росатом» 24.03.2015: офиц. текст. – М., 2015. – 57 с.
3. Frost, V. Materials Science and Technology. A Comprehensive Treatment / V. Frost [et al.] – Wiley: VCH, 1994. – 558 p
4. Алексеев, С.В. Нитридное топливо для ядерной энергетики: учеб. Пособие / С.В. Алексеев, В.А. Зайцев. – М.: Техносфера, 2013. – 240 с.
5. Котельников, Р.Б. Высокотемпературное ядерное топливо: учеб. пособие / Р.Б. Котельников [и др.] – 2-е изд. – М.: Атомиздат, 1978. – 432 с.
6. Iwai, T. Post-irradiation examinations of uranium-plutonium mixed nitride fuels irradiated in JMTR / T. Iwai // Report JAERI – Research 2000-2010 (Japan, Jan. 2000). – Japan, 2000. – P. 110.
7. Masaki, I. Irradiation Performance of Uranium-Plutonium Mixed Nitride Fuel Pins in JOYO / I. Masaki [et al.] // Global-2003 (New Orleans, LA). – 2003. – P. 1694-1703.
8. Fromont, M. Behaviour of Uranium-Plutonium Mixed Nitride and Carbide Fuels Irradiated in Phenix / M. Fromont [et al.] // Global-2005 (Tokyo, Japan). – 2005. – P. 2562-2571.
9. Грачев, А.Ф. Исследования смешанного нитридного уран-плутониевого топлива в рамках проекта «Прорыв» / А.Ф. Грачев [и др.] // Атомная энергия. – 2017. – № 122 (3). – С. 156-167.
10. Звир, Е.А. Результаты исследования твэлов комбинированной ЭТВС-1 после опытной эксплуатации в реакторе БН-600 / Е.А. Звир [и др.] // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». – 2017. – № 3. – С. 76-84.
11. Звир, Е.А. Результаты исследования экспериментального твэла с уран-плутониевым нитридным топливом после второго этапа облучения в реакторе БОР-60 / Е.А. Звир [и др.] // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». – 2017. – № 3. – С. 66-75.

12. Поролло, С.И. Анализ экспериментальных данных о газовой выделении и распухании облученного в реакторе БР-10 монокристаллического уранового топлива / С.И. Поролло [и др.] // Атомная энергия. – 2016. – № 121 (6). – С. 326-332.
13. Методика измерений распределения скорости счёта излучения радионуклидов по длине стержневых образцов гамма-спектрометрическим методом в радиационно-защитной камере РЗК-1. МИ Рег. № 1172. Реестр методик ОАО «ГНЦ РФ НИИАР», Дмитровград, 2018 г.
14. Электронно-зондовый рентгеноспектральный микроанализ топливных композиций ядерных энергетических реакторов: Монография / В.Н. Голованов [и др.]. - Ульяновск: УлГУ, 2006. – 143 с.
15. МИ рег.№ 1165 по Реестру. Материалы и изделия атомной техники. Методика измерений рег.№ 133-18 (ОМИТ). Методика измерения геометрических характеристик микроструктуры с использованием видеосистемы анализа изображений на микроскопах МДРЗК и Leica Telatom 4. Свидетельство о МА рег.№ 1165-01.00050-2014-2017 (рег. № 668) от 10.10.2018.
16. Golovanov Using Scanning Electron Microscope PHILIPS XL 30 ESEM-TMP installed in the Hot Cell / V.N. Golovanov [et al.]. // Report on HOTLAB Plenary Meeting. – 2004. P. 121-127.
17. Методика испытаний рег.№ 698 «Материалы атомной техники. Определение характеристик кристаллической структуры методом рентгенографии».15502000100. Свидетельство о МА рег.№ 106-13 (рег.№ 09-13) от 25.01.2018.
18. Измерение геометрических параметров изделий и элементов их макроструктуры с использованием системы анализа изображений, получаемых на микроскопе УМСД-2. Методика измерений, Рег. № 1163. Реестр методик АО «ГНЦ НИИАР», Дмитровград, 2018 г.
19. Методика измерения геометрических параметров облучённых стержневых изделий длиной до 4 метров в защитной камере К-1. МИ, Рег. № 1166. Реестр методик «ГНЦ РФ НИИАР», Дмитровград, 2018.
20. ISO 9278:2008 [Electronic resource]. Nuclear energy. Uranium dioxide pellets. Determination of density and volume fraction of open and closed porosity. — Web site of British Standards Institution. — Access mode: by subscription. — URL: <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail?pid=000000000030125442> (date of the application: 08.06.2021).
21. Грачев, А.Ф. Особенности радиационного распухания уран-плутониевого нитридного топлива в экспериментальных твэлах с гелиевым и свинцовым подслоем / А.Ф. Грачев [и др.] // Атомная энергия. – 2020. – №. 129 (5) – С. 272-276.
22. Беляева, А.В. Радиационное распухание уран-плутониевого нитридного топлива в экспериментальных твэлах с газовым и жидкометаллическим наполнением / А.В. Беляева [и др.] // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». – 2017. – № 3. – С. 17–29.
23. Spino, J. Detailed characterization of the rim microstructure in PWR fuels in the burn-up range 40-67 GWd/tM / J. Spino [et al.] // J. Nucl. Mater. – 1996. – № 231. – P. 179-190.
24. Coquerelle, M. Limits and Prospects for High Burn-up LWR fuels / M. Coquerelle [et al.]. – ITU Annual Report (EUR 17296). – 1996. – P. 235.
25. Беляева, А.В. Результаты испытаний смешанного монокристаллического топлива $U_{0,55}Pu_{0,45}N$ и $U_{0,4}Pu_{0,6}N$ в реакторе БОР-60 до выгорания ~12 % тяж. ат. / А.В. Беляева [и др.] // Атомная энергия. – 2011. – № 110 (6). – С. 332–346.

Перечень сокращений

ГПД	-	газообразные продукты деления,
ГЦК	-	гранцентрированная кубическая (кристаллическая решетка),
ПКР	-	параметр кристаллической решетки,
ОЯТ	-	отработавшее ядерное топливо,
СНУП	-	смешанное нитридное уран-плутониевое (топливо),
ТВС	-	тепловыделяющая сборка,
ТВЭЛ	-	тепловыделяющий элемент,
т.а.	-	тяжелые атомы.