

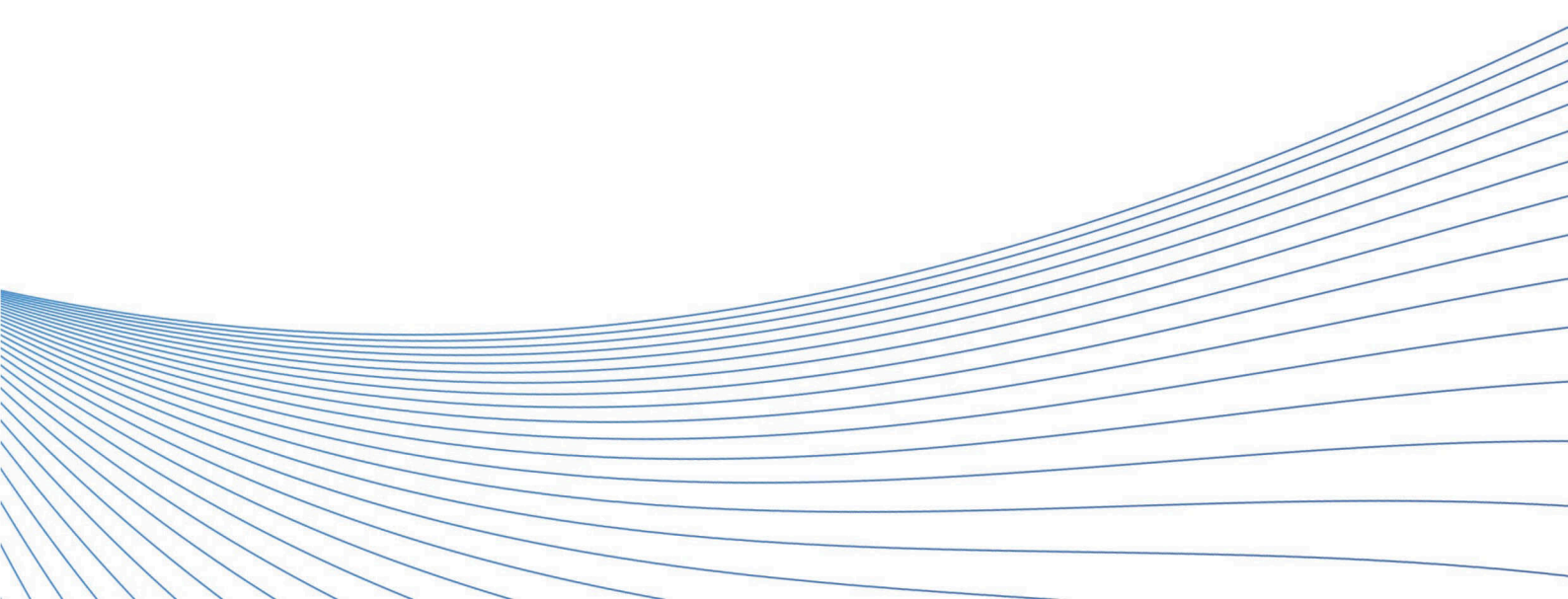


ВНИИНМ
РОСАТОМ

Тезисы докладов научно-технического семинара

НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ В ОБЛАСТИ ТОЛЕРАНТНОГО ТОПЛИВА

**23 марта 2023 года
Москва, АО «ВНИИНМ»**



Акционерное общество
«Высокотехнологический научно-исследовательский институт
неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара»

Тезисы докладов научно-технического семинара

НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ В ОБЛАСТИ ТОЛЕРАНТНОГО ТОПЛИВА

Москва, 2023

УДК 621.039.54.058

Новые направления развития в области толерантного топлива: сборник тезисов докладов научно-технического семинара. – М.: АО «ВНИИНМ», 2023. – 22 стр.

Данный сборник содержит тезисы докладов научно технического семинара «Новые направления развития в области толерантного топлива», 23.03.2023 в АО «ВНИИНМ».

ISBN 978-5-6048666-2-7

ТОПЛИВО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОДО-ВОДЯНЫХ РЕАКТОРОВ С ПОВЫШЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ К АВАРИЯМ: НАУЧНЫЕ АСПЕКТЫ, НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ

¹И.И. Коновалов, ²П.Б. Птицын

¹НИЯУ МИФИ, Москва

²ЦАИР ЧУ «НИИ»

В докладе содержатся основные положения аналитического отчета ЦАИР [1].

Дан анализ отечественных и зарубежных подходов к повышению стойкости тепловыделяющих элементов в аварийных условиях и достигнутый уровень разработок на начало 2022 года.

В качестве основных направлений по «толерантному» топливу за рубежом приняты:

- оксидное топливо с оптимизированным размером зерна (ADOPT);
- в качестве оболочек твэлов, приняты сплавы Zr с хромовым покрытием (реакторы PWR) и стальные оболочки из Фехралей (реакторы BWR).

Такие направления по разработке «толерантного» топлива, как использование керамической оболочки из SiC/SiC композита, переход на «холодное» топливо на основе ураноемких композиций за рубежом не вышли из начальной стадии обоснования – технико-экономической оценки применимости.

Проведенные в России работы в части металлургии и обработки Zr сплавов уже сейчас позволяют обеспечить международные требования по стойкости оболочки твэлов в аварийных условиях.

Для дальнейшего повышения конкурентоспособности отечественного топлива проводится отработка технологий модифицирования поверхности циркониевых оболочек и легирование «естественного» оксида циркония, позволяющих расширить допустимые параметры аварий по времени и температуре.

В качестве среднесрочной перспективы также прорабатывается «кардинальное» решение проблемы – разработка сверх тонкостенных оболочек из ферритной стали типа 555. Перспективность этого направления подтверждается зарубежными тенденциями по разработке низко хромистых алюминий содержащих сталей.

Технология UO₂ с оптимальным размером зерна типа ADOPT (в том числе без дополнительных нейтронно-поглощающих добавок) в России решена.

На первый план выходит технико-экономическое обоснование дальнейшего развития материалов и технологий «толерантного» топлива, в том числе при его производстве и эксплуатации в реакторах.

Список литературы

1 Коновалов И.И., Птицын П.Б. Топливо энергетических водо-водяных реакторов с повышенной устойчивостью к авариям: научные аспекты, направления исследований и текущее состояние. Аналитический отчет – М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2022. – 72 с.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ УРАНОВЫЕ СПЛАВЫ И ТОПЛИВНЫЕ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ ТОЛЕРАНТНОГО ТОПЛИВА

*А.М. Савченко, Г.В. Кулаков, Ю.В. Коновалов, Л.А. Карпюк, Е.А. Дергунова
АО «ВНИИНМ», Москва, sav-alex111@mail.ru*

В работе рассмотрены перспективные направления совершенствования ураноемкого теплопроводного топлива и возможности применения его для толерантных твэлов. Исследованы характеристики следующих видов топлива:

1. Металлокерамическое толерантное топливо на базе U-Mo.
2. Толерантное топливо дисперсионного типа (композитное топливо).

1. Для металлокерамического топлива разработана и экспериментально обоснована новая концепция легирования гамма-фазных сплавов урана, заключающаяся в получении многофазной структуры, состоящей из матричной γ -(U-Mo) фазы и керамической или интерметаллидной фазы, или смеси этих фаз. Эти вторичные фазы имеют высокую плотность по урану, высокую радиационную стойкость и температуру плавления. А также в них отсутствует или содержится более низкое количество молибдена, имеющего ощутимый захват нейтронов, что благоприятно для стабилизации гамма-фазы и улучшает нейтронно-физические характеристики топлива в целом. С этой целью в U-Mo вводятся дополнительно добавки O, C, N, Si. При этом увеличивается температура ликвидуса, которая определяет размерную устойчивость топлива. Усиливаются межатомные связи, что приводит к уменьшению величины распухания топлива. Получены первые экспериментальные результаты, которые подтверждают данную концепцию. Помимо использования в качестве толерантного топлива, такие сплавы могут применяться также для исследовательских и быстрых реакторов. На сплавы получен Российский патент и проводится процедура международного патентования.

2. Показано, что свойства топлива, в частности U-Mo, можно улучшить при применении его в виде композитов, то есть как топливо дисперсионного типа. Дисперсионные твэлы обладают высокой радиационной стойкостью, надежностью и работоспособностью в режиме переменных нагрузок. В АО ВНИИНМ разработан новый класс дисперсионного METMET топлива в виде композитов с жаропрочной и коррозионностойкой матрицей, типа циркониевых сплавов ЦЖБН, ЦЖМ. Твэлы изготавливаются методом капиллярной пропитки (жидкофазного спекания). Такая композиция обладает высокой теплопроводностью и коррозионной стойкостью, а также устойчивостью при термоциклировании и более высокой ураноемкостью по сравнению со штатным твэлом для ВВЭР-1000. Она может также использоваться для АСММ. Проведенные реакторные испытания пилотной сборки твэлов (24 шт.) в конструкции ПЭБ «Академик Ломоносов» показали отсутствие взаимодействия компонентов топлива и объемных изменений твэлов. Показана и обоснована возможность использования композитного топлива типа METMET как толерантного для реакторов ВВЭР. Предложены модификации топлива для дальнейшего увеличения его стойкости в условиях ЛОСА.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛОВ ИЗ КОМПОЗИТА SiC/SiC С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ЛЕЙНЕРОМ

*Р.Г. Захаров, А.В. Глебов, Ф.В. Макаров, А.П. Пономаренко, А.Д. Багдатов,
И.А. Дзюбинский, Е.М. Глебова, В.А. Пирог, А.А. Алексеев, Д.В. Кузнецов,
А.В. Антиа, Д.А. Кожева, Н.В. Гречухина
АО «ВНИИНМ», Москва, RGZakharov@bochvar.ru, AVGlebov@bochvar.ru*

Важнейшим направлением развития атомной энергетики является повышение надежности и экономических характеристик ядерно-энергетических установок, в связи с чем в настоящее время активно ведутся исследования по разработке толерантного топлива (ATF – Accident Tolerant Fuel). Основным фактором, разрушающим циркониевые твэлы в реакторах ВВЭР, является паро-циркониевая реакция, происходящая при температурах свыше 800 °С. Таким образом задача повышения безопасности атомных станций может быть решена путем модификации или замены циркониевых оболочек. Одними из альтернативных материалов оболочек твэлов ВВЭР являются композиты на основе карбида кремния SiC/SiC. Они отличаются низким сечением захвата тепловых нейтронов, общей химической инертностью, способностью выдерживать высокое выгорание топлива и повышенные температуры, хорошей радиационной стойкостью и низким уровнем индуцированного излучения. Для обеспечения герметичности композитных оболочек твэла на основе SiC/SiC предлагается перспективный вариант конструкции с внутренним металлическим лейнером из Nb, Zr, Nb-Ti, толщиной 100–250 мкм, их свойства представлены в табл. 1.

Таблица 1

*Свойства перспективных материалов, рассматриваемых для использования
в качестве лейнера оболочек SiC/SiC*

Материал	КЛТР, $\alpha \cdot 10^{-6}, \text{K}^{-1}$	Сечение захвата тепловых нейтронов, барн/атом	$T_{пл}, \text{°C}$	Тип решетки
SiC	4,5	0,13	2800	ГЦК
Nb	7,7	1,1	2477	ОЦК
Ta	6,6	21	3000	ОЦК
Zr	8,6	0,24	1855 ($\alpha \leftrightarrow \beta$ при 863)	Zr α – ГЦК, Zr β – ОЦК
Ti	9,2 (α)	6,1	1670 ($\alpha \leftrightarrow \beta$ при 883)	Ti α – ГПУ, Ti β – ОЦК

Преимущества использования металлического лейнера:

- повышение ресурса композитных оболочек твэлов на основе SiC/SiC;
- отсутствие необходимости удаления формообразующей оснастки;
- концепция позволяет легко масштабировать технологию создания полноразмерных твэлов;
- возможность применения отработанных методов герметизации металлическими концевыми элементами.

ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ХРОМА ДЛЯ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ

¹Д.В. Сиделёв, ¹Е.Б. Кашкаров, ¹М.С. Сыртанов, ¹В.Н. Кудияров, ²А.Г. Мальгин,
²И.А. Шелепов, ²Н.С. Сабуров

¹Томский политехнический университет, Томск, sidelevdv@tpu.ru

²АО «ВНИИНМ», Москва

В настоящее время активно ведутся разработки толерантного топлива, необходимого для повышения безопасности работы легководных ядерных реакторов [1, 2]. Опубликованные данные уже продемонстрировали, что Zr сплавы могут быть эффективно защищены от окисления в течение продолжительного времени при магнетронном нанесении Cr покрытия на их поверхность. Технологические параметры процесса осаждения оказывают значительное влияние на структурные свойства Cr покрытий и, как следствие, на кинетику окисления Zr сплавов с покрытиями в условиях, имитирующих нормальный и аварийный режимы эксплуатации реакторов.

В данной работе представлены результаты испытаний пластин и оболочечных труб из сплава Э110 с Cr покрытиями, полученными методом магнетронного распыления. Были рассмотрены две технологии осаждения: высокоскоростная (скорость осаждения - 40-50 нм/с, плотность ионного тока на изделие - 3-5 мА/см²) и мультикатодная (скорость осаждения - 3-5 нм/с, плотность ионного тока на изделие - 5-8 мА/см²). Получены данные об окислении сплава Э110 с Cr покрытиями на воздухе и в потоке пара при температурах до 1100 и 1400 °С, соответственно. Продемонстрирована роль микроструктуры и толщины хромовых покрытий на скорость окисления Zr сплава в диапазоне температур 900-1200 °С. Установлено, что наличие азота в окислительной атмосфере вызывает ускорение процесса окисления и приводит к неоднородному окислению образцов по их поперечному сечению. На длительность защитного поведения Zr сплава с Cr покрытием существенное влияние оказывает диффузия и растворение Cr в β-Zr. Это является ключевой проблемой применения Cr покрытия для защиты Zr сплавов при высокотемпературном окислении (более 1200 °С), так как при взаимной диффузии Cr и Zr происходит образование эвтектического Cr-Zr слоя с температурой плавления ~1332 °С. Между Cr покрытием и Zr сплавом может быть применён барьерный слой, а толщина такого слоя должна быть достаточной с учётом морфологии поверхности оболочек. В настоящей работе приведены результаты высокотемпературного окисления Zr оболочек с барьерными слоями на основе металлов (Mo и Ta), нитрида хрома (CrN), оксидов алюминия и циркония (ZrO₂, Al₂O₃).

Работа выполнена из средств гранта РФФИ №19-79-10116.

Список литературы

1. Brachet J.C., Rouesn, E., Guilbert T., Ribis J., Saux M.Le. Nony, G. Palancher, H, David A., Bischoff J., Augereau J., Pouillier E. High temperature steam oxidation of chromium-coated zirconium-based alloys: kinetics and process. *Corros. Sci.*, 2020, 167, 108537.
2. Sidelev D.V., Kashkarov E.B., Syrtanov M.S., Krivobokov V.P. Nickel-chromium (Ni-Cr) coatings deposited by magnetron sputtering for accident tolerant nuclear fuel claddings. *Surf. Coat. Technol.* 2019, 369, 69-78.

СПЛАВ 42ХНМ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЕГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ ТОЛЕРАНТНОГО ТОПЛИВА

*Д.В. Савин, А.А. Голубничий, М.В. Леонтьева-Смирнова, А.А. Никитина,
В.Н. Речицкий
АО «ВНИИНМ», Москва, DmiVaSavin@bochvar.ru.*

Одним из путей создания толерантного топлива для реакторов типа ВВЭР является использование, вместо применяемых циркониевых сплавов, материалов, в которых невозможно протекание пароциркониевой реакции. К таким материалам относится хромоникелевый сплав 42ХНМ. Он может быть рекомендован для оболочек твэлов промышленных РУ типа ВВЭР, т.к. имеется позитивный опыт его эксплуатации в транспортных реакторах. Сплав имеет достаточный уровень механических характеристик, коррозионной стойкости и не подвержен низкотемпературному радиационному охрупчиванию в рабочем температурном диапазоне оболочек твэлов РУ ВВЭР. Однако, сплав 42ХНМ склонен к высокотемпературному радиационному охрупчиванию (ВТРО), обусловленному распадом пересыщенного твердого раствора γ -Ni. Повышение стабильности последнего может расширить температурный интервал применения сплава 42ХНМ за счет повышения температуры проявления ВТРО.

Для повышения структурной стабильности твердого раствора сплава 42ХНМ в соответствии с диаграммой состояния Ni-Cr, были обоснованы четыре опытных сплава на базе сплава 42ХНМ, отличавшихся меньшим содержанием Cr. Два сплава отличались от 42ХНМ только концентрацией Cr (тип I), а два других включали повышенную концентрацию Mo и W (тип II). Исследование механических характеристик опытных сплавов показало, что сплавы I типа уступают 42ХНМ по прочности и пластичности, а сплавы II типа превосходят его по этим характеристикам.

В качестве критерия структурной стабильности принята объемная доля распада γ -Ni при старении. После старения при 650 °С в опытных сплавах обнаружены следы прерывистого распада γ -Ni, формирующегося на границах зерен в виде чередующихся пластинок γ -Ni и α -Cr. Области прерывистого распада занимают малую часть объема опытных сплавов, что демонстрирует большую стабильность структуры в сравнении с 42ХНМ. После старения при 800 °С структура сплавов II типа представлена зернами γ -Ni с дисперсными включениями α -Cr, что свидетельствует о непрерывном распаде твердого раствора γ -Ni, т.е. повышение температуры старения с 650 до 800 °С изменяет механизм распада γ -Ni с прерывистого на непрерывный. Для сплавов I типа изменение структуры после старения не наблюдается.

Таким образом, оптимизация состава сплава 42ХНМ позволила повысить стабильность структуры. Сплавы типа II не уступают 42ХНМ по прочности и пластичности в стандартных условиях эксплуатации, а при 650 °С дольше сохраняют высокую пластичность. Сплавы типа I уступают по прочности и пластичности сплаву 42ХНМ, но практически не подвержены распаду твердого раствора γ -Ni при старении, что делает возможным их применение при более высоких температурах.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ТРУБ ИЗ СПЛАВА Э110ОПТ С БАРЬЕРНЫМ СЛОЕМ И ХРОМОВЫМ ПОКРЫТИЕМ В УСЛОВИЯХ ОКИСЛЕНИЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ДО 1500 °С

¹А.Г. Мальгин, ¹И.А. Шелепов, ¹В.А. Маркелов, ¹Е.Г. Буланцова, ¹В.В. Новиков,
¹Л.А. Карнюк, ²Б.А. Калинин, ²П.С. Джумаев, ²А.С. Яшин, ²Е.Л. Корневский,
²Р.Ш. Исаев, ²В.А. Чурсин, ²Н.А. Пухарева, ²Е.Д. Малиновский
¹АО «ВНИИНМ», Москва, AGMalgin@bochvar.ru
²НИЯУ МИФИ, Москва, PSDzhumaev@mephi.ru

В настоящее время ключевым трендом в мировой атомной энергетике является разработка и внедрение в топливный цикл толерантного топлива (ATF), чтобы вывести безопасность АЭС на качественно новый уровень и улучшить технологические и экономические показатели реакторов.

Одним из перспективных вариантов ATF является использование оболочек твэлов с хромовым покрытием на наружной поверхности. При минимальном влиянии на обогащение топлива, физику реактора, геометрию и другие функциональные свойства твэлов нанесение хромового покрытия позволяет повысить стойкость циркония к окислению, как при нормальных условиях эксплуатации, так и в условиях нарушения нормальных условий эксплуатации, в том числе при аварийных ситуациях типа LOCA.

Максимальный проектный предел по температуре оболочек твэлов в проектной аварии LOCA составляет 1200 °С, однако в случае запроектной аварии оболочки твэлов могут разогреваться до более высоких температур. Ранее проведенные исследования оболочечных труб из сплава Э110опт (Э110о.ч.) с нанесенным на наружную поверхность хромовым покрытием, выполненные в АО «ВНИИНМ» и НИЯУ МИФИ показали, что в условиях высокотемпературного окисления в среде водяного пара защитное хромовое покрытие расходуется на образование оксида хрома, интерметаллида $ZrCr_2$, вследствие диффузии хрома к поверхности раздела Zr/Cr, и на дальнейшее проникновение Cr в циркониевую матрицу. Интенсивность такого процесса возрастает с увеличением температуры и длительности окисления, а при $T > 1330$ °С происходит образование эвтектики Zr-Cr, которая приводит к потере устойчивости оболочки и резкому снижению её остаточной пластичности.

Для обеспечения работоспособности хромового покрытия на оболочках твэлов из сплава Э110опт при $T > 1330$ °С, целесообразно нанесение промежуточного барьерного слоя на основе тугоплавких металлов, которые должны блокировать диффузию хрома в циркониевую матрицу. Кроме того, замедлить диффузию хрома, кислорода и водорода в циркониевую матрицу в условиях высокотемпературного окисления возможно путем создания модифицированного поверхностного слоя (до 1 мкм) методом ионного перемешивания таких элементов как Ta, Nb, Cr и др. перед процедурой нанесением барьерного слоя и покрытия.

В докладе представлены результаты работы по созданию и исследованию образцов оболочечных труб из сплава Э110опт с барьерными слоями Ta и Ta/Nb и финишным хромовым покрытием в условиях окисления до 1500 °С.

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРАБОТКИ НИТРИДНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ РЕАКТОРОВ ВВЭР

Тарасов Б.А.

АО «ВНИИНМ», Москва, BoATarasov@bochvar.ru

Толерантное топливо (англ. – Accident Tolerant Fuel) в случае нарушения отвода тепла в активной зоне реактора должно в течение достаточно длительного времени сохранять целостность без возникновения пароциркониевой реакции, способствующей выделению водорода.

Принято, что ATF топливо в условиях нормальной эксплуатации должно обладать повышенными эксплуатационными свойствами по сравнению со штатным топливом.

Аргументами в пользу использования нитридного топлива в реакторе ВВЭР являются: высокая теплопроводность, высокая плотность и ураноемкость, высокая совместимость с конструкционными материалами, стабильность под облучением; способность к удержанию ГПД, высокая теплопроводность и низкая удельная теплоемкость, значительный российский опыт исследования, изготовления и облучения нитридного топлива в реакторах на быстрых нейтронах.

Недостатками нитридного топлива при использовании в тепловом реакторе являются низкая совместимость с водой при высоких температурах, высокое сечение захвата нейтронов на ^{14}N , реакция $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ и другие аспекты влияния на нейтронные характеристики активной зоны; более сложный процесс производства (требуется инертная атмосфера, дополнительная операция карботермического синтеза, более высокая температуры спекания).

Одним из путей повышения коррозионной стойкости нитридного уранового топлива является повышение плотности таблеток до 95-99% ТП, создание композитного или микролегированного топлива, нанесение коррозионностойких барьерных покрытий на топливные таблетки. Например, введение в состав UN силицида урана приводит к жидкофазному спеканию нитрида урана и получению плотного композита при технологически приемлемых условиях. Скорость коррозии в воде при 300 °С такого композита примерно вдвое меньше, чем скорость коррозии таблетки мононитрида урана плотностью 99% при тех же условиях. Нанесение на топливную таблетку инертного к воде высоких параметров покрытия также должно снизить скорость взаимодействия топлива с теплоносителем при контакте в аварийных условиях.

В работе обсуждается принципиальная возможность применения топлива на основе UN в водном теплоносителе.

ИСПЫТАНИЯ ТВЭЛОВ ATF В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНОЙ АВАРИИ В РЕАКТОРЕ МИР.М1

¹А.Л. Ижutow, ¹О.И. Дреганов, ¹А.В. Алексеев, ¹А.Г. Ещеркин, ¹Н.А. Иванов,
¹И.В. Киселева, ¹А.Н. Маркелов, ¹В.А. Овчинников, ¹М.С. Сычугов, ¹Р.А. Яшин
²В.В. Новиков, ²В.И. Кузнецов, ²П.В. Федотов
¹АО «ГНЦ НИИАР», Димитровград
²АО «ВНИИНМ», Москва

В рамках работ по разработке и обоснованию безопасности применения ядерного топлива толерантного типа из дисилицида урана (U_3Si_2) в канале реактора МИР.М1 проведены реакторные испытания экспериментальных твэлов в условиях проектной реактивной аварии с импульсом мощности (RIA).

Цель испытаний – получение экспериментальных данных для оценки работоспособности и изучения поведения твэлов с топливом из дисилицида урана в режиме импульсного изменения мощности.

Главным разработчиком ATF твэлов с уран-силицидным топливом является АО «ВНИИНМ», испытания ATF твэлов в условиях проектных аварий (в том числе RIA) и послереакторные исследования (ПРИ) выполняет АО «ГНЦ НИИАР».

Для проведения эксперимента RIA-PWR-USi/0 в режиме RIA разработаны:
– сценарий и алгоритм реакторных испытаний, согласованные с АО «ВНИИНМ»;
– два варианта исполнения облучательного устройства (ОУ), которые были изготовлены и предварительно апробированы. По результатам предтестовых расчетных исследований и данных по апробации вариантов исполнения ОУ выбрана наиболее оптимальная конструкция;
– новая конструкция твэла с установкой кабельного термоэлектро-преобразователя типа ХА и касанием к верхней топливной таблетке.

При проведении эксперимента RIA установлено, что отрицательный эффект реактивности равный $-0,127 \beta_{эфф}$ и возникающий при реализации импульса мощности путем вращения поглощающего экрана в ОУ, сказывается на занижении ЛМ в импульсе, для компенсации указанного эффекта необходима доработка конструкции ОУ.

Результаты эксперимента RIA-PWR-USi/0 и ПРИ свидетельствуют, что рефабрикованный твэл №5 сохранил герметичность, а параметры эксперимента соответствуют заданному сценарию, что подтверждает проектные характеристик ATF твэлов с топливом из дисилицида урана.

РЕАКТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ПОСЛЕРЕАКТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТВЭЛОВ ТОЛЕРАНТНОГО ТИПА

*¹А.Л. Ижutow, ¹А.В. Бурукин, ¹Е.А. Звир, ¹А.И. Долгов, ¹А.Н. Маркелов,
¹М.А. Мокеичев, ¹М.С. Сычугов, ¹А.А. Шельдяков
²В.В. Новиков, ²В.И. Кузнецов, ²П.Г. Демьянов, ²Д.В. Рыкунов
¹АО «ГНЦ НИИАР», Димитровград
²АО «ВНИИНМ», Москва*

С целью получения экспериментальных данных для подтверждения работоспособности и верификации расчетных кодов проводятся испытания твэлов типа ВВЭР и PWR с различными видами топлива (UO_2 , UMo , U_3Si_2), оболочками из сплавов Э110, в том числе с хромовым покрытием, а также 42ХНМ в составе двух экспериментальных ТВС (ЭТВС-В и ЭТВС-К) в петлевых установках (ПУ) реактора МИР.М1.

Конструкция экспериментальных твэлов разработана АО «ВНИИНМ». АО «ОКБМ Африкантов» разработал конструкцию ЭТВС-В и ЭТВС-К, которая позволяет разместить 24 твэла длиной ~500 мм в двух пучках по высоте активной зоны реактора, либо 12 твэлов длиной ~1000 мм.

В процессе реакторных испытаний моделируются условия нормальной эксплуатации твэлов типа ВВЭР и PWR, включая показатели качества аммиачно-борно-калиевого и борно-литиевого с дозированием газообразного водорода водно-химического режима соответственно. Результаты анализа показаний системы контроля герметичности оболочки и проб теплоносителя первого контура ПУ реактора МИР.М1 свидетельствуют о герметичности экспериментальных твэлов.

Программа испытаний предусматривает два этапа с выгрузкой экспериментальных твэлов для послереакторных исследований по окончании каждого из них.

В ходе промежуточных исследований, проводимых на стенде инспекции в бассейне выдержки реактора, видимых повреждений и дефектов на оболочках твэлов, сварных соединений и конструктивных элементов ЭТВС не обнаружено.

По результатам послереакторных исследований получены экспериментальные данные о состоянии оболочки и покрытия облученных твэлов толерантного типа.

ИСПЫТАНИЯ ТВЭЛОВ ATF В ИЯУ МИР.М1 В УСЛОВИЯХ СО СКАЧКОМ МОЩНОСТИ

¹А.Л. Ижutow, ¹Е.А. Звир, ¹В.А. Жителев, ¹В.А. Овчинников, ¹А.Г. Ещеркин,
¹И.Н. Волкова, ¹Е.Е. Шахмуть, ¹Е.Е. Кузнецова, ¹М.А. Мокеичев
²В.В. Новиков, ²В.И. Кузнецов, ²Б.И. Нестеров
¹АО «ГНЦ НИИАР», Димитровград
²АО «ВНИИНМ», Москва

В реакторе МИР.М1 проводили облучение экспериментальных ТВС (ЭТВС), содержащих различные твэлы толерантного типа. Облучение выполняли с поддержанием рабочих условий эксплуатации, максимально соответствующих условиям реакторов ВВЭР и PWR. После облучения в течение ~260 эфф. суток из ЭТВС типа ВВЭР были выгружены твэл (В.2.3) с хромоникелевой оболочкой, средним выгоранием (максимальным) около 10,6 (12,9) МВт·сут/кгU и твэл (В.2.1) с оболочкой из циркониевого сплава с хромовым покрытием и средним выгоранием (максимальным) около 12,2 (14,1) МВт·сут/кгU.

Основной задачей эксперимента было сравнение поведения твэлов толерантного типа с разными оболочками в условиях со скачком мощности.

Сценарий эксперимента, разработанный специалистами АО «ВНИИНМ» и АО «ГНЦ НИИАР», включал кондиционирование твэлов – облучение на постоянном уровне мощности не менее 12 часов с последующим быстрым подъемом мощности за время 20-25 мин и выдержкой на этом уровне в течение 12 часов (при сохранении целостности твэлов), затем снижение мощности. Во время эксперимента линейная мощность (ЛМ) в центральной части твэла на этапе выдержки на постоянном уровне перед скачком для твэла В.2.1 изменялась в диапазоне $(158 \pm 13) - (184 \pm 15)$ Вт/см, а для твэла В.2.3 – $(139 \pm 11) - (162 \pm 13)$ Вт/см. ЛМ в центральной части твэла перед скачком для твэла В.2.1 составила (172 ± 14) Вт/см, а для твэла В.2.3 (152 ± 12) Вт/см. ЛМ в центральной части твэла сразу после скачка для твэла В.2.1 составила (359 ± 29) Вт/см, а для твэла В.2.3 – (317 ± 25) Вт/см. ЛМ в центральной части твэла на этапе выдержки на постоянном уровне после скачка для твэла В.2.1 изменялась в диапазоне $(335 \pm 27) - (359 \pm 29)$ Вт/см, а для твэла В.2.3 изменялась в диапазоне: $(295 \pm 24) - (317 \pm 25)$ Вт/см. Через 15 минут после подъема мощности начался рост активности теплоносителя, эксперимент был прекращен и реактор остановлен.

По завершении эксперимента проведены послереакторные исследования состояния указанных твэлов, результаты которых свидетельствуют, что:

- твэл с хромоникелевой оболочкой сохранил герметичность и работоспособность;
- твэл с оболочкой из циркониевого сплава с хромовым покрытием разгерметизировался в области дефекта в виде скола топливной таблетки;
- диаметр твэла В.2.3 после эксперимента практически не изменился, а у твэла В.2.1 увеличился до 12 мкм в нижней его половине и наблюдаются гофры на оболочке на большей её части. Аномально высокая гофра была обнаружена в зоне сквозного дефекта оболочки;

– места расположения трещины в оболочке твэла В.2.1 и скола в топливной таблетке совпадают. Наличие локального увеличения деформации оболочки в этой зоне является признаком возникновения во время эксперимента концентратора растягивающих напряжений, который привел к КРН и образованию трещины;

– во время ранее проведенных испытаний со скачком мощности разгерметизация оболочки происходила при значительно больших значениях остаточной диаметральной деформации, превышающих 1,5%, это вероятно указывает на то, что скол топливной таблетки послужил возможной причиной разгерметизации;

– состояние оболочки твэла В.2.3 без аномалий, признаки окисления отсутствуют;

– покрытие на наружной поверхности оболочки твэла В.2.1 во всех исследованных сечениях сохранилось, его толщина изменяется в пределах 3–7 мкм. После штатного облучения было обнаружено два локальных дефекта покрытия в виде мелких точечных отслоений покрытия, после скачка мощности внешний вид которых не изменился;

– в результате ресурсных испытаний и эксперимента на скачок мощности существенных изменений механических характеристик оболочек твэлов не произошло.

ВЛИЯНИЕ ТЕКСТУРЫ ЦИРКОНИЕВОЙ ОБОЛОЧЕЧНОЙ ТРУБЫ НА ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ХРОМОВОГО ПОКРЫТИЯ

М.Г. Исаенкова, К.Е. Ключова, О.А. Крымская, А.В. Тенишев,
В.В. Михальчик, В.А. Фесенко
НИЯУ «МИФИ», Москва, *isamarg@mail.ru*

Циркониевые сплавы являются основными материалами для создания изделий, работающих в условиях активной зоны атомных реакторов на тепловых нейтронах. Повышение выгорания топлива при одновременном ужесточении требований к безопасности ЯЭУ обуславливают необходимость увеличения прочности и коррозионной стойкости оболочечных труб, что решается путем нанесения на них тонких покрытий. Для эффективной работы защитного покрытия в аварийных ситуациях необходимо располагать информацией об устойчивости такой композиции при нагреве в интервале температур от 20 до 1200 °С.

В данной работе рассмотрено влияние заключительной термообработки труб из сплавов на основе циркония Zr-Nb на их термическое расширение-сжатие в интервале температур 20 до 1200 °С. Анализ поведения оболочечных труб из сплавов на основе циркония показал, что при расширении в результате нагрева и последующем сжатии при их охлаждении остаточная деформация труб с разной ориентацией призматических нормалей вдоль осевого направления (L) оказывается разной. Наличие замкнутой цилиндрической поверхности в трубе не позволяет однозначно объяснить такое поведение труб в условиях термического цикла нагрев-охлаждение. Поэтому дальнейшие исследования проведены на образцах кубической формы, вырезанных из стенки канальных труб из сплава Э125, характеризующихся разными текстурами в отожженном состоянии. Заключительный отжиг проведен при 480 и 580 °С, т.е. когда вдоль направления оси трубы (L) преимущественно ориентированы призматические нормали разных типов $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ и $\langle 11\bar{2}0 \rangle$. На рис. 1 (а) и (б) показано изменение размеров образцов кубической формы вдоль осевого (L), радиального (R) и тангенциального (T) направлений в результате цикла фазовых превращений $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$. Нагрев представлен сплошными линиями, а охлаждение – пунктирными.

Согласно представленным результатам для достижения минимальных размерных изменений при цикле нагрев-охлаждение в температурном интервале 20-1200 °С необходимо проводить предварительный рекристаллизационный отжиг циркониевых изделий, при котором вдоль L -направления преимущественно ориентируются нормали $\langle 11.0 \rangle$. Таким образом, удлинение оболочечных труб вдоль L связано с их расширением в T -направлении.



Рис. 1. Расширение (сплошная линия) и последующее сжатие (пунктир) в трех направлениях (R , T , L) кубиков, вырезанных из отожженных канальных труб из сплава Э125:
а и б – предварительный отжиг при температурах 530 и 580 °С соответственно

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОБРАЩЕНИЯ С ОТРАБОТАВШИМ ТОЛЕРАНТНЫМ ТОПЛИВОМ

Л.Н. Подрезова, А.Ю. Шадрин, М.Н. Медведев, А.В. Ананьев, В.А. Кащеев
АО «ВНИИНМ», Москва, Inpodrezova@bochvar.ru

Разрабатываемое толерантное топливо обладает повышенной устойчивостью к высоким температурам и возникновению пароциркониевой реакции, что существенно снижает риск возникновения аварий на АЭС. Учитывая принятую в РФ концепцию по замыканию ядерного топливного цикла, необходимо разработать технологию по переработке отработавшего толерантного топлива и обращению с образующимися РАО. С этой целью АО «ТВЭЛ» инициирован соответствующий проект с акцентом на проверку и адаптацию существующих в Российской Федерации технологий переработки ОЯТ.

В рамках реализации проекта разрабатывается технология переработки твэлов с оболочками с покрытием из хрома или сплавов с хромом и с топливной композицией из дисилицида триурана (U_3Si_2).

Рассматриваются следующие варианты переработки отработавшего толерантного топлива:

– гидрометаллургическая переработка с получением раствора ОЯТ, пригодного для передачи на экстракционный передел по технологической схеме радиохимического завода ФГУП «ПО «МАЯК»;

– пирохимическая переработка в расплавах солей молибдена с получением совместного оксида $(U,Pu)O_2$ методом прямой кристаллизации из расплава и очисткой от продуктов деления не менее 10^3 .

Наличие большого количества кремния в составе силицидного топлива приводит к необходимости дополнительной очистки раствора ОЯТ от Si, а также к необходимости разработки методов обращения с новыми видами радиоактивных отходов.

По результатам выполненных в 2022 году научно-исследовательских работ, установлены оптимальные режимы для полного окисления труднорастворимого в азотнокислых растворах U_3Si_2 до SiO_2 и легкорастворимого U_3O_8 , рекомендован режим растворения, определен захват кремнийсодержащим осадком ядерных материалов, выполнено исследование процесса осветления раствора волоксидированного силицидного топлива на лабораторных установках по двум направлениям – с применением модифицированного контактного фильтра и с использованием процесса тангенциальной ультрафильтрации. Определены режимы, обеспечивающие коэффициент осветления не менее 10^3 .

В развитие предложенных технологических подходов запланированы НИОКР, в том числе для проведения их испытаний на реальном отработавшем толерантном топливе в «горячих» камерах.

Окончательная технология переработки отработавшего толерантного топлива будет выбрана на основании экспериментальных и расчетных исследований, запланированных на 2022–26 гг.

ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЪЕМОВ И СОСТАВА РАО ОТ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ ТОЛЕРАНТНОГО ТОПЛИВА

*А.А. Рыкунова, Л.П. Подрезова, А.В. Ананьев, А.Ю. Шадрин
АО «ВНИИНМ», Москва, AARykunova@bochvar.ru*

Для предложенных АО «ВНИИНМ» технологий переработки толерантного отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) был проведен анализ и оптимизация состава и объемов образующихся радиоактивных отходов (РАО).

С использованием программного комплекса ВИЗАРТ [1, 2], функционал которого позволяет провести расчеты материальных балансов, проведен анализ гидрометаллургической и пирохимической технологий переработки толерантного ОЯТ.

Для гидрометаллургической технологии переработки толерантного ОЯТ получен состав и расход раствора ОЯТ, пригодного для дальнейшей переработки по схеме 235 завода ФГУП «ПО «МАЯК» в качестве потока питания на «головном» экстракционном блоке, с учетом необходимости корректировки содержания Si в растворе.

Для пирохимической схемы переработки проведена оценка потоков и объема остеклованных РАО. Установлено, что лимитирующим критерием при вычислении объема матрицы является включение в матрицу NaO, при этом объем получающихся РАО 1 класса составляет 5,42 м³/т ОЯТ.

Для оптимизации объема образующихся РАО была предложена модифицированная пирохимическая технология переработки толерантного ОЯТ, в которой основной реагент – молибдат натрия, не будет выводиться в РАО, а будет использован повторно. Данная установка позволяет снизить объем образующихся РАО более чем в 6,5 раз до 0,79 м³/т ОЯТ, а, в случае корректировки молибденового расплава оксидом натрия вместо молибдата натрия, удастся снизить объем РАО до 0,32 м³/т.

Список литературы

- 1. Шмидт О.В., Макеева И.Р., Ливенцов С.Н. Моделирование технологических переделов ЗЯТЦ, как инструмент при создании и оптимизации технологических производств. // Радиохимия, 2016, Т. 58, №4, С. 316-323.*
- 2. Шмидт О.В., Третьякова С.Г., Евсюкова Ю.А., и др. Программный комплекс ВИЗАРТ для балансовых расчетов материальных потоков технологий замкнутого ядерного топливного цикла // Атомная энергия. 2017. Т. 122, Вып. 2. С. 88-92.*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ИЗ ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ НИТРАТНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ТОЛЕРАНТНОГО REMIX-ТОПЛИВА

А.Г. Каренгин, Д.С. Щербина, А.А. Суняйкина
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, E-mail: karengin@tpu.ru

Использование ядерного топлива из диоксида урана, обогащенного по изотопу уран-235, ограничено природными запасами изотопа уран-235 [1]. Применение изотопов уран-235, уран-238 и плутоний-239 из отработавшего ядерного топлива для изготовления REMIX-топлива не потребует дорогостоящего изотопного обогащения, однако у него остается недостаток – низкая теплопроводность.

Перспективным является создание устойчивого к аварийным ситуациям толерантного REMIX-топлива в виде топливных оксидных композиций (ТОК), содержащих включения из диоксида урана и диоксида плутония, равномерно распределенных в оксидной матрице, имеющей высокую теплопроводность и малое поперечное сечение захвата нейтронов. Предлагается энергоэффективный плазмохимический синтез ТОК в воздушной плазме из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны) и имеющих адиабатическую температуру горения $T_{ад} \geq 1500$ К [2].

В результате расчетов определены составы растворов ВОНР на основе этанола (ацетона), включающие делящиеся (уран, плутоний) и матричные (магний, иттрий) металлы, имеющие $T_{ад} \geq 1500$ К и обеспечивающие синтез в воздушной плазме ТОК «PuO₂-UO₂-MgO» и «PuO₂-UO₂-Y₂O₃» различного состава при $\alpha = (PuO_2 + {}^{235}UO_2) / (PuO_2 + UO_2) = 0,034$.

По результатам термодинамического моделирования исследуемого процесса установлены закономерности влияния массовой доли воздуха на состав продуктов воздушно-плазменной переработки растворов ВОНР в конденсированных фазах при увеличении массовой доли матрицы в составе ТОК с 5 до 50% и определены режимы, обеспечивающие плазмохимический синтез ТОК требуемого фазового состава.

Результаты исследований будут использованы при создании технологии плазмохимического синтеза наноструктурных ТОК для толерантного REMIX-топлива.

Список литературы

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С. С. *Дисперсионное ядерное топливо*. – М.: Техносфера, – 2015. – 248 с.
2. Shamanin I.V., Karengin A.G., Karengin A.A., Novoselov I.Y. *Plasma-chemical synthesis and investigation of nano-size oxide compositions simulating uranium-thorium dispersion nuclear fuel // Atomic Energy*. – 2021. – Vol. 131 – №.1. – P. 46-49.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАНОСТРУКТУРНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ИЗ ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ НИТРАТНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ УРАН-ТОРИЕВОГО ТОЛЕРАНТНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

А.Г. Каренгин, А.А. Кузнецова, А.Е. Тихонов

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,
karengin@tpu.ru*

Использование изотопа торий-232 даст возможность создания ядерных энергетических установок сверхмалой (до 10 МВт) и малой (до 100 МВт) мощности, резко снизит расходы на утилизацию отработавшего ядерного топлива, а цикл его использования может быть доведен до 10-15 лет [1]. Перспективным является создание устойчивого к аварийным ситуациям уран-ториевого толерантного ядерного топлива

в виде топливных оксидных композиций (ТОК), содержащих включения из диоксида урана и диоксида тория, равномерно распределенных в оксидной матрице, имеющей высокую теплопроводность и малое поперечное сечение захвата нейтронов. Предлагается энергоэффективный плазмохимический синтез ТОК в воздушной плазме из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны) и имеющих адиабатическую температуру горения $T_{ад} \geq 1500$ К [2].

В результате расчетов определены составы растворов ВОНР на основе этанола (аcetона), имеющие $T_{ад} \geq 1500$ К и обеспечивающие синтез в воздушной плазме ТОК « UO_2-ThO_2-MgO » и « $UO_2-ThO_2-Al_2O_3$ » при $\alpha = UO_2/(UO_2+ThO_2) = 0,5...0,7$.

В ходе экспериментальных исследований показано, что воздушно-плазменная переработка растворов ВОНР на основе аcetона, включающих неодим (вместо урана), церий (вместо тория) и магний, приводит к образованию ОК « $Nd_2O_3-Ce_2O_3-MgO$ », в которых увеличение массовой доли MgO с 10 до 30% ведет (при $\alpha = 0,5$) к снижению размера частиц в водных суспензиях (D_{50}) с 9,8 до 9,3 мкм, увеличению удельной поверхности полученных порошков ($S_{уд}$) с 13,1 до 16,4 м²/г и снижению размера кристаллитов в их составе с 68 до 65 нм, а при $\alpha = 0,7$ ведет к снижению размера частиц D_{50} с 9,3 до 8,1 мкм, увеличению $S_{уд}$ полученных порошков с 13,9 до 16,8 м²/г и снижению размера кристаллитов в их составе с 69 до 58 нм.

Результаты исследований будут использованы при создании технологии плазмохимического синтеза наноструктурных ТОК для уран-ториевого толерантного ядерного топлива.

Список литературы

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, – 2015. – 248 с.
2. Shamanin I.V., Karengin A.G., Karengin A.A., Novoselov I.Y. Plasma-chemical synthesis and investigation of nano-size oxide compositions simulating uranium-thorium dispersion nuclear fuel // Atomic Energy. – 2021. – Vol. 131. – №1. – P. 46-49.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАНОСТРУКТУРНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ИЗ ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ НИТРАТНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ПЛУТОНИЙ-ТОРИЕВОГО ТОЛЕРАНТНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

А.Г. Каренгин, К.С. Иванов, С.Ю. Кузнецов

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,
karengin@tpu.ru*

Использование изотопов торий-232 и плутоний-239 не потребует дорогостоящего изотопного обогащения и даст возможность создания ядерных энергетических установок для «сжигания» накопленных запасов оружейного и энергетического плутония [1]. Перспективным является создание устойчивого к аварийным ситуациям плутоний-ториевого толерантного ядерного топлива в виде топливных оксидных композиций (ТОК), содержащих включения из диоксида плутония и диоксида тория, равномерно распределенных в оксидной матрице, имеющей высокую теплопроводность и малое поперечное сечение захвата нейтронов. Предлагается энергоэффективный плазмохимический синтез ТОК в воздушной плазме из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны) и имеющих адиабатическую температуру горения $T_{ад} \geq 1500$ К [2].

В результате расчетов определены составы растворов ВОНР на основе этанола (ацетона), имеющие $T_{ад} \geq 1500$ К и обеспечивающие синтез в воздушной плазме ТОК «PuO₂-ThO₂-MgO» при $\alpha = \text{PuO}_2 / (\text{PuO}_2 + \text{ThO}_2) = 0,1 \dots 0,3$.

В ходе экспериментальных исследований показано, что воздушно-плазменная переработка растворов ВОНР на основе ацетона, включающих самарий (вместо плутония), церий (вместо тория) и магний, приводит к образованию ОК «Sm₂O₃-Ce₂O₃-MgO», в которых увеличение массовой доли MgO с 5 до 30% ведет (при $\alpha = 0,1$) к снижению размера частиц в водных суспензиях (D_{50}) с 9,9 до 7,4 мкм, увеличению удельной поверхности полученных порошков ($S_{уд}$) с 7,9 до 14,1 м²/г и снижению размера кристаллитов в их составе с 110 до 67 нм, а при $\alpha = 0,3$ ведет к снижению размера частиц D_{50} с 5,9 до 4,9 мкм и увеличению $S_{уд}$ полученных порошков с 15,2 до 16,2 м²/г.

Результаты исследований будут использованы при создании технологии плазмохимического синтеза наноструктурных ТОК для плутоний-ториевого толерантного ядерного топлива.

Список литературы

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, – 2015. – 248 с.
2. Novoselov I.Y., Karengin A.A., Alyukov E.S., Poberezhnikov A.D., Babaev R.G, Mendoza O. Plasmachemical synthesis and evaluation of the thermal conductivity of metal-oxide compounds for prospective nuclear fuel // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1145, Article number 012057. – P. 1-7.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАНОСТРУКТУРНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ИЗ ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ НИТРАТНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ УРАНОВОГО ТОЛЕРАНТНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

А.Г. Каренгин, Д.М. Беляков, Н.И. Головков, С.Ю. Кузнецов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,
karengin@tpu.ru

Применяемое на АЭС керамическое ядерное топливо из диоксида урана, обогащенного по изотопу уран-235, наряду с достоинствами имеет недостаток – низкую теплопроводность. В аварийных ситуациях без охлаждения это ведет к повышению температуры, развитию паро-циркониевой реакции и разрушению оболочек твэл. Перспективным является создание устойчивого к аварийным ситуациям уранового толерантного ядерного топлива в виде топливных оксидных композиций (ТОК), содержащих включения из диоксида урана, равномерно распределенного в оксидной матрице, имеющей высокую теплопроводность и малое поперечное сечение захвата тепловых нейтронов. Традиционные методы изготовления ТОК (раздельное получение и механическое смешение, золь-гель и др.) многостадийны, продолжительны, не обеспечивают требуемый состав и равномерное распределение фаз, имеют высокие энерго- и трудозатраты [1]. Предлагается энергоэффективный плазмохимический синтез ТОК в воздушной плазме из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны) и имеющих адиабатическую температуру горения $T_{ад} \geq 1500$ К [2].

В результате расчетов определены составы ВОНР на основе этанола (ацетона), имеющие $T_{ад} \geq 1500$ К и обеспечивающие синтез в воздушной плазме ТОК « UO_2-MgO » и « $UO_2-Y_2O_3$ » различного состава. В ходе экспериментов показано, что воздушно-плазменная переработка растворов ВОНР, включающих неодим (вместо урана), магний и ацетон, приводит к образованию оксидных композиций « Nd_2O_3-MgO », в которых увеличение массовой доли матрицы (MgO) с 5 до 50% ведет к снижению размера частиц в водных суспензиях (D_{50}) с 13,2 до 4,7 мкм, увеличению удельной поверхности полученных порошков с 7,9 до 16,2 м²/г и снижению размера кристаллитов в их составе с 94 до 52 нм.

Результаты исследований будут использованы при создании технологии плазмохимического синтеза наноструктурных ТОК для уранового толерантного ядерного топлива.

Список литературы

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, – 2015. – 248 с.
2. Karengin A.G., Karengin A.A., Kuznetsov S.Yu., Novoselov I.Yu., et al. Plasma-chemical synthesis of nanostructured oxide compounds for accident tolerant fuel // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 65. – №4. – P. 677-872.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАНОСТРУКТУРНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ИЗ ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ НИТРАТНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ТОЛЕРАНТНОГО МОХ-ТОПЛИВА

А.Г. Каренгин, И.Ю. Новоселов, В.И. Расторгуев

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,
karengin@tpu.ru*

Применение керамического ядерного топлива из диоксида урана, обогащенного по изотопу уран-235, ограничено природными запасами изотопа уран-235 [1]. Использование изотопов уран-238 и плутоний-239 из отработавшего ядерного топлива для изготовления МОХ-топлива не потребует дорогостоящего изотопного обогащения, однако у него остается недостаток – низкая теплопроводность. Перспективным является создание устойчивого к аварийным ситуациям толерантного МОХ-топлива в виде топливных оксидных композиций (ТОК), содержащих включения из диоксида урана и диоксида плутония, равномерно распределенных в оксидной матрице, имеющей высокую теплопроводность и малое поперечное сечение захвата нейтронов. Предлагается энергоэффективный плазмохимический синтез ТОК в воздушной плазме из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны) и имеющих адиабатическую температуру горения $T_{ад} \geq 1500$ К [2].

В результате расчетов определены составы растворов ВОНР на основе этанола (ацетона), имеющие $T_{ад} \geq 1500$ К и обеспечивающие синтез в воздушной плазме ТОК « UO_2-PuO_2-MgO » и « $UO_2-PuO_2-Y_2O_3$ » при $\alpha = PuO_2/(UO_2+PuO_2) = 0,1...0,3$.

В ходе экспериментальных исследований показано, что воздушно-плазменная переработка растворов ВОНР на основе ацетона, включающих неодим (вместо урана), самарий (вместо плутония) и магний (иттрий), приводит к образованию ОК « $Nd_2O_3-Sm_2O_3-MgO$ » и « $Nd_2O_3-Sm_2O_3-Y_2O_3$ », в которых увеличение массовой доли MgO с 5 до 50% ведет (при $\alpha = 0,1$) к снижению размера частиц в водных суспензиях (D_{50}) с 13,5 до 4,3 мкм, увеличению удельной поверхности полученных порошков ($S_{уд}$) с 7,9 до 16,2 м²/г и снижению размера кристаллитов в их составе с 94 до 52 нм, а увеличение массовой доли матрицы (Y_2O_3) с 10 до 30% ведет (при $\alpha = 0,1$) к снижению размера частиц D_{50} с 12,1 до 11,2 мкм, увеличению $S_{уд}$ полученных порошков с 5,5 до 7,8 м²/г и снижению размера кристаллитов в их составе с 147 до 115 нм.

Результаты исследований будут использованы при создании технологии плазмохимического синтеза наноструктурных ТОК для толерантного МОХ-топлива.

Список литературы

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, – 2015. – 248 с.
2. Shamanin I.V., Karengin A.G., Karengin A.A., Novoselov I.Y. Plasma-chemical synthesis and investigation of nano-size oxide compositions simulating uranium-thorium dispersion nuclear fuel // Atomic Energy. – 2021. – Vol. 131 – №1. – P. 46-49.

РЕАКТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ATF ТВЭЛОВ

*В.И., Кузнецов А.С. Еременко, П.Г. Демьянов, А.А. Ханков,
А.Н. Сорокин, А.И. Королева*

*АО «ВНИИНМ», Москва, vlikuznrtsov@bochvar.ru, alseremenko@bochvar.ru,
pgdemyanov@bochvar.ru, aakhankov@bochvar.ru, alksenikolsorokin@bochvar.ru
aikoroleva@bochvar.ru*

Разработка ATF топлива – одна из важных задач, стоящих перед мировым ядерным сообществом. В качестве ATF технологий рассматриваются новые конструкции, включающие как модификации существующих конструкционных материалов, так и разработку новых. Научно-исследовательским и конструкторско-технологическим отделением разработки твэлов с оксидным урановым топливом для тепловых реакторов АО «ВНИИНМ» совместно АО «ГНЦ НИИАР» ведутся реакторные исследования следующих конструкций и материалов:

- твэл Э110о.ч. (Cr)+UO₂
- твэл 42ХНМ+UO₂
- твэл Э110о.ч. (Cr)+UMo
- твэл 42ХНМ+UMo
- твэл Э110 о.ч.+U₃Si₂
- образцы SiC/SiC

С 2019 года по настоящее время проводятся дореакторные и реакторные исследования свойств ATF материалов и испытания ATF конструкций твэлов в реакторах МИР и БОР-60.

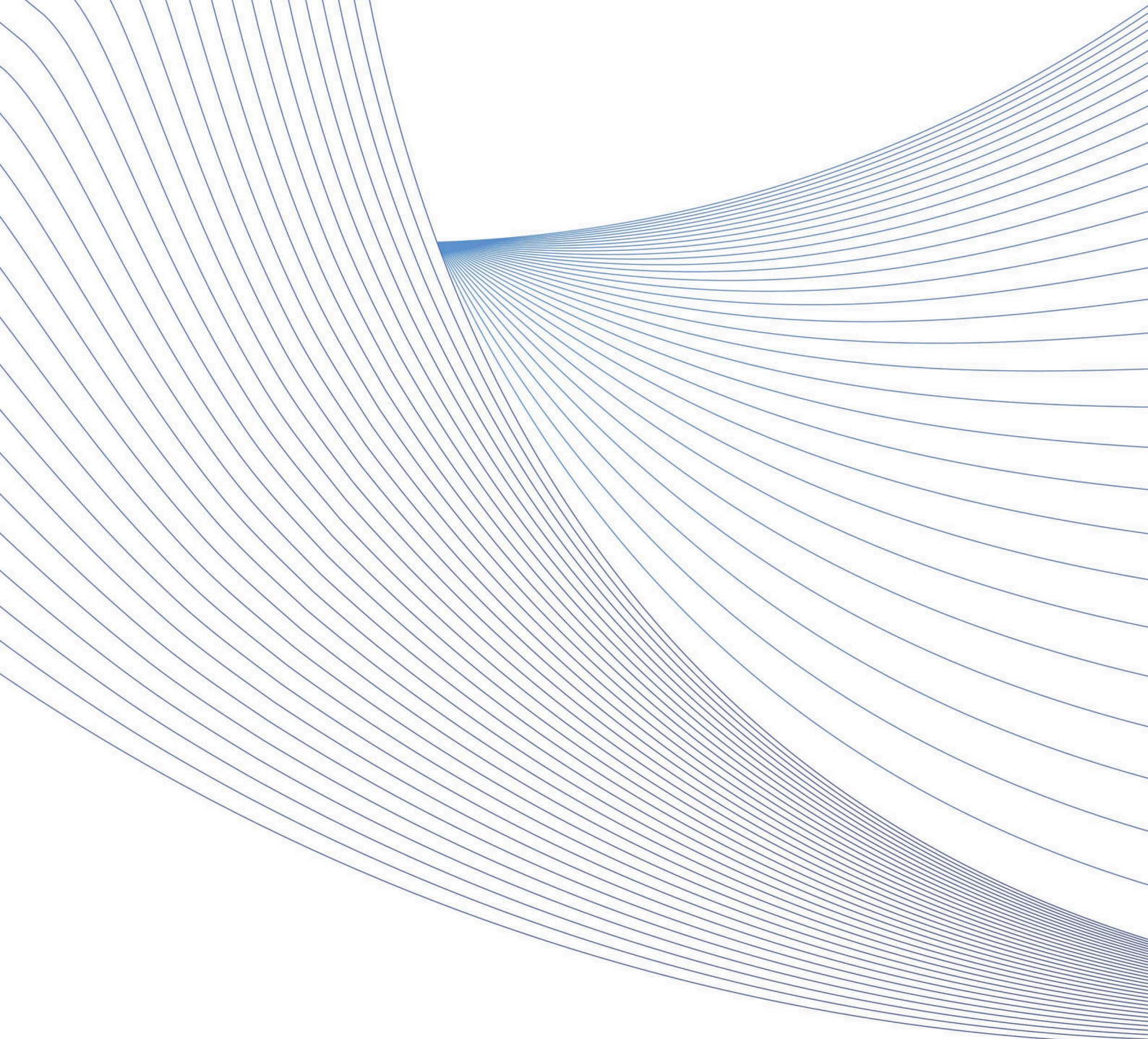
Для лицензирования новых разрабатываемых конструкции твэлов необходимо провести облучение в исследовательских реакторах. Расчетные коды, используемые при обосновании безопасности эксплуатации топлива, должны быть аттестованы и лицензированы, в том числе, по результатам после-реакторных исследований и реакторных экспериментов в соответствии с требованиями и нормами (НП-094-15, НП-082-07).

В результате визуального осмотра твэла конструкции Э110оч.(Cr)-UO₂, прошедшего облучение в реакторе МИР с 2019 по 2022 год и достигшего выгорания 27,2 МВт·сут/кгU, отслоения и трещины в Cr покрытии не наблюдаются. Нанесение покрытия для данной конструкции осуществлялось по технологии разработанной в АО «ВНИИНМ». Облучение сборки продолжается.

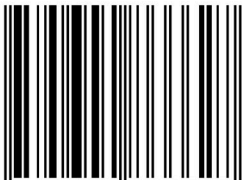
Для моделирования поведения твэлов под облучением в режимах НЭ, ННЭ и маневровых режимах в АО «ВНИИНМ» применяется код СТАРТ-4А. Для расчетов проектных аварий используется код РАПТА-5.2. По результатам дореакторных, реакторных и после-реакторных исследований осуществляется верификация кодов.

На конец 2022 года код СТАРТ-4А лицензирован для применения в расчетах с ATF материалами до выгораний 22 МВт·сут/кгU.

Планируются новые работы по реакторным испытаниям ATF, включая твэлы для ВВЭР, PWR и АСММ.



ISBN 978-5-6048666-2-7



9 785604 866627