



ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

Акционерное общество «Ордена Ленина
Научно-исследовательский и конструкторский институт
энерготехники имени Н. А. Доллежала»
(АО «НИКИЭТ»)
а/я 788, Москва, 101000
Телетайп: 611569 МОМЕНТ,
Тел. (499) 263-73-88, факс (499) 788-20-52
E-mail: nikiet@nikiet.ru, www.nikiet.ru

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Маркова Дмитрия Владимировича «Основные закономерности изменения свойств и характеристик топлива ВВЭР и РБМК нового поколения в период эксплуатации по результатам комплексных послереакторных исследований», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.03 - Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации.

Диссертационная работа Маркова Д.В. выполнена в Акционерном обществе «Государственный научный центр - Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР»).

Актуальность темы

Необходимость удовлетворения возрастающим эксплуатационным требованиям потребителей ядерного топлива (ЯТ), повышения его конкурентоспособности на традиционных рынках сбыта и завоевания новых, улучшения технико-экономических показателей ядерного топливного цикла (ЯТЦ) при обеспечении необходимого уровня безопасности ставит перед производителями и поставщиками ЯТ следующие задачи: 1) увеличение глубины выгорания топлива; 2) повышение эксплуатационного ресурса и



надёжности тепловыделяющих сборок (ТВС) и твэлов; 3) реализацию безопасных, экономически эффективных и гибких топливных циклов (ТЦ); 4) создание ремонтпригодных ТВС; 5) обоснование работоспособности топлива в маневренных режимах и в условиях повышенной мощности реакторов. Для решения поставленных задач предприятиями Госкорпорации «Росатом» проводятся НИОКР по разработке и внедрению в эксплуатацию ядерного топлива нового поколения.

К 2010 году в АО «ГНЦ НИИАР» проведены послереакторные исследования пяти ТВСА различных модификаций, эксплуатировавшихся на энергоблоке 1 Калининской АЭС в течение 1-6 топливных циклов, а также двух ТВС-2 после эксплуатации на энергоблоке 1 Балаковской АЭС в течение 1-го и 4-х топливных циклов, соответственно, а также пяти ТВС РБМК-1000 с энергоблоков 1 и 2 Ленинградской АЭС, содержащих уран-эрбиевое топливо, обогащённое по урану-235 до 2,6%, с циркониевыми и стальными дистанционирующими решетками и твэлами с оболочками без финишных операций травления и анодирования.

Проведенные исследования являются ключевым элементом программ экспериментального обоснования внедрения в эксплуатацию ядерного топлива нового поколения, как с точки зрения повышения эффективности его использования, так и с точки зрения обеспечения безопасности эксплуатации.

Таким образом, актуальность данной работы, посвященной изучению основных закономерностей изменения свойств и характеристик нового поколения ТВС и твэлов ВВЭР и РБМК при эксплуатации в энергетических реакторах на основе результатов, полученных при выполнении комплексных послереакторных исследований, несомненна.

Оценка научной новизны

Впервые проведены комплексные послереакторные исследования полномасштабных ТВС ВВЭР и РБМК нового поколения (ТВСА и ТВС-2 ВВЭР-1000 и ТВС РБМК-1000 с уран-эрбиевым топливом и оболочками без

финишных операций травления и анодирования), эксплуатировавшихся на российских АЭС до различных выгораний топлива.

Анализ результатов этих исследований позволил автору:

- установить закономерности изменения геометрических параметров и силовых характеристик ТВСА и ТВС-2 ВВЭР-1000, их несущих каркасов и конструктивных элементов (пружинных блоков, пружин, ЦНК и ЦДР, уголков жёсткости), отработавших на действующих энергоблоках АЭС в течение 1-6 топливных циклов;
- установить основные причины и механизмы разгерметизации твэлов ВВЭР-1000 и РБМК-1000 и дать рекомендации по их устранению;
- показать, что изменение геометрических параметров, газовыделение из топлива, коррозионное повреждение оболочек, взаимодействие «топливо-оболочка» не ограничивают работоспособности твэлов ВВЭР-1000 вплоть до выгораний топлива ~ 72 МВт·сут/кг U;
- установить, что отмена финишных операций травления и анодирования твэлов РБМК не оказывает негативного влияния на их коррозионную стойкость в исследованном диапазоне выгораний топлива, при этом наиболее развитая нодульная коррозия и фреттинг-износ оболочек наблюдаются на участках под стальными дистанционирующими решётками (СДР);
- показать, что при длительной эксплуатации в реакторе РБМК при достижении выгораний топлива ~ 30 МВт·сут/кг U, в стенках ячеек СДР наблюдаются сквозные и несквозные трещины, обусловленные коррозией под напряжением, при этом обеспечивается надёжное дистанционирование твэлов и сохранение геометрии пучков; в этих же условиях наблюдается охрупчивание и разрушение циркониевой дистанционирующей решетки (ЦДР) при проведении транспортно-технологических операций из-за значительного окисления и наводороживания материала (сплав Э110), из которого они изготовлены;
- установить, что основная причина разгерметизации твэлов ТВС ВВЭР и РБМК нового поколения (debris-повреждение их оболочек из-за взаимодействия с инородными предметами в потоке теплоносителя) никак не связана с особенностями их конструкций, дать рекомендации по совершенствованию конструкции кассет для сокращения случаев таких повреждений;

Для улучшения работы с экспериментальными данными и повышения экономического эффекта от проведения послереакторных исследований создана база данных на платформе SQL сервера и информационной системы, обеспечивающих необходимый интерфейс для доступа к данным и документам.

Разработан программный продукт Fuel Elements Data System, включающий в себя весь необходимый инструментарий работы с базой данных.

Практическая значимость работы

Результаты работы использованы для обоснования и внедрения в эксплуатацию на реакторах ВВЭР-1000 и РБМК-1000 топлива нового поколения с улучшенными характеристиками геометрической стабильности при повышении глубины выгорания топлива и увеличении эксплуатационного ресурса, для реализации безопасных, экономически эффективных и гибких топливных циклов (ТЦ) и создания ремонтпригодных ТВС.

Полученные данные позволили:

- экспериментально обосновать работоспособность ТВС ВВЭР-1000 нового поколения (ТВСА и ТВС-2) при длительности эксплуатации вплоть до 6 топливных циклов;
- подтвердить работоспособность твэлов ВВЭР-1000 при достижении высоких выгораний топлива вплоть до ~ 72 МВт·сут/кг U при эксплуатации в штатных режимах работы действующих энергоблоков АЭС;
- экспериментально подтвердить работоспособность твэлов РБМК-1000 с уран-эриевым топливом при эксплуатации в условиях действующих энергоблоков АЭС до достижения выгораний ~ 32 МВт·сут/кг U и/или при длительности эксплуатации до ~ 10 лет;
- экспериментально подтвердить ремонтпригодность ТВСА и ТВС-2 в условиях исследовательских защитных камер.

При дальнейшем совершенствовании конструкции ТВСА рекомендовано учитывать эффект разницы в удлинении при эксплуатации циркониевых направляющих каналов и каркасных уголков, приводящий к

депланации дистанционирующих решёток. Величина депланации ЦДР не должна достигать значений, при которых существенно возрастают усилия проскальзывания удлиняющихся в процессе эксплуатации твэлов относительно ячеек дистанционирующих решёток. Кроме того, условия крепления твэлов в ячейках депланированных ЦДР не должны приводить к существенному фреттинг-износу их оболочек при эксплуатации.

Для обеспечения безопасного извлечения негерметичных твэлов из пучков ТВС ВВЭР-1000 нового поколения в условиях бассейнов выдержки действующих АЭС рекомендована модернизация узлов их крепления в нижней опорной решётке, обеспечивающая уменьшение усилий страгивания и извлечения до величины ниже 200 Н.

При проведении дальнейших работ по созданию и совершенствованию нового поколения топлива для РБМК-1000, способного обеспечивать увеличение глубины выгорания свыше 35 МВт·сут/кгU, рекомендовано обратить особое внимание на разработку дистанционирующих решеток, способных сохранять работоспособность в течение всего срока службы ТВС РБМК-1000 и вызывающих минимальное локальное окисление оболочек твэлов под их пуклевками.

Личный вклад

Автор был ответственным исполнителем, а затем руководителем тем и договоров по проведению послереакторных исследований полномасштабных ТВС и твэлов реакторов ВВЭР и РБМК.

Автор осуществлял разработку программ исследований и постановку задач для проведения экспериментальных работ, лично проводил исследования по указанным темам в исследовательских защитных камерах и получал ключевые экспериментальные результаты, провел анализ и обобщение полученных экспериментальных закономерностей.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается применением аттестованных испытательных установок и методик измерений, воспроизводимостью полученных экспериментальных данных, а также успешным внедрением в эксплуатацию ТВСА и ТВС-2 ВВЭР-1000, ТВС РБМК-1000 с уран-эрбиевым топливом и оболочками без финишных операций травления и анодирования.

Апробация работы

Основные результаты работы были доложены автором на многочисленных конференциях и семинарах, например: на 5, 6, 7, 8 и 9-й российских конференциях по реакторному материаловедению, Димитровград, 1998, 2000, 2003, 2007, 2009 гг., Международном форуме по проблемам науки, техники и образования, Москва, 1998 г., 4, 5 и 6-й международных научно-технических конференциях «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», Москва, 2004, 2006, 2010 гг., международных конференциях «Поведение топлива легководных реакторов/TopFuel», Токио, Япония, 2005, Сеул, Корея, 2008, Париж, Франция, 2009, Орландо, США, 2010, Европейской ядерной конференции, Франция, Версаль, 2005 г.

Содержание диссертации в достаточной степени отражено публикациях автора. Основные результаты диссертации изложены в 111 печатных работах, в том числе в статьях в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК и индексируемые международные базы цитирования. Зарегистрированы 2 патента на изобретение.

Задачи исследования соответствуют поставленной цели – выявлению закономерностей изменения свойств и характеристик при эксплуатации ТВСА и ТВС-2 ВВЭР-1000 и ТВС РБМК-1000 с уран-эрбиевым топливом, стальными и циркониевыми дистанционирующими решётками по результатам комплексных послереакторных исследований.

Основные результаты и выводы соответствуют задачам исследования применительно как для топлива ВВЭР-1000, так и для топлива РБМК-1000.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации, включая основные результаты и выводы.

По своему содержанию диссертация соответствует приведенным в библиографии опубликованным работам.

Тема диссертации соответствует паспорту специальности 05.14.03 - Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации.

Диссертация написана понятным и терминологически точным языком, по каждой главе сделаны четкие выводы. По оформлению диссертации замечаний нет.

По работе имеются следующие замечания:

1. Не рассмотрена связь параметров фактического состояния ТВС после эксплуатации, например, продолжительности эксплуатации на мощности и толщины слоя отложений продуктов коррозии контура, продолжительности эксплуатации на мощности и геометрических характеристик элементов конструкции (ячеек и обойм) дистанционирующих решеток и твэлов.

2. Ошибочно указано (таблица 1.8), что все исследованные ТВС РБМК-1000 эксплуатировались на энергоблоке № 2 Ленинградской АЭС. ТВС РС-4 и РС-10 (таблица 1.9) эксплуатировались, соответственно на энергоблоках № 3 и № 1.

3. Не бесспорно утверждение о том, что повышенное газовыделение, зафиксированное при исследованиях ТВС с уран-эрбиевым топливом, по сравнению с диоксидным, обусловлено исключительно более низкой теплопроводностью уран-эрбиевого топлива. Газовыделение – функция многих параметров: химического состава топливной таблетки (наличие или отсутствие выгорающего поглотителя), геометрии топливной таблетки (наличие или отсутствие осевого отверстия, фасок, лунок), ее

микроструктуры (размер зерна, открытая и закрытая пористость), истории эксплуатации ТВС.

4. Малое количество исследованных ТВС РБМК-1000 и результаты выполненных исследований не позволяют однозначно утверждать, что единственной причиной разгерметизации твэлов является debris-повреждение оболочек твэлов.

Отмеченные недостатки не снижают ценности, полезности и общего высокого уровня диссертационной работы в целом.

Диссертация Д.В. Маркова представляет собой завершенное научное исследование, в котором изложено обоснованное решение важной научно-технологической проблемы - обоснование внедрения в эксплуатацию ядерного топлива нового поколения для реакторов ВВЭР-1000 и РБМК-1000, что позволяет как повысить эффективность его использования, так и обеспечить безопасность эксплуатации.

Представленная работа по форме и содержанию удовлетворяет критериям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Марков Дмитрий Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности - 05.14.03 - Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации.

Официальный оппонент
доктор технических наук,
главный научный сотрудник
АО «НИКИЭТ»

БТ

Габараев Борис Арсентьевич

15 марта 2018 г.

Тел.: 8(499)263-73-76; e-mail: gabaraev@nikiet.ru

АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежалея» (АО «НИКИЭТ»), адрес: а/я 788, Москва, 101000, тел.: (499) 263-73-37, e-mail: nikiet@nikiet.ru

Подпись Габараева Б.А. заверяю
Ученый секретарь АО «НИКИЭТ»
кандидат химических наук



19.03.2018

А.В. Джалавян