

А. М. Абдуллаев¹, С. Г. Божко²,
В. С. Красноруцкий¹, Р. Латорре (R. Latorre)³,
В. Р. Татаринов¹, Н. Ю. Шумкова⁴,
А. В. Шепитчак²

¹ Научно-технический комплекс «Ядерный топливный цикл»
Национального научного центра «Харьковский физико-
технический институт», г. Харьков, Украина

² Государственная инспекция ядерного регулирования
Украины, г. Киев, Украина

³ Тихоокеанская северо-западная лаборатория,
Ричланд, США

⁴ Национальная атомная энергогенерирующая компания
«Энергоатом», г. Киев, Украина

Проект квалификации ядерного топлива Украины (ПКЯТУ)

Рассмотрены этапы разработки и результаты реализации комплексов организационных, научных и технических решений по внедрению нового ядерного топлива от альтернативного поставщика — компании Westinghouse — на АЭС Украины с реакторами типа ВВЭР-1000. Анализ результатов испытаний шести опытных тепловыделяющих сборок компании Westinghouse (TBCW) в течение 17–20-й топливных кампаний энергоблока № 3 Южно-Украинской АЭС (2005–2010 гг.) и 42-х TBCW перегрузочной партии в течение 21–24-й топливных кампаний (2011–2014 гг.) подтвердил выполнение проектных характеристик нового топлива, сохранение целостности и надежности в течение четырехлетнего цикла эксплуатации.

Ключевые слова: топливо для ВВЭР-1000, диверсификация, тепловыделяющие сборки, лицензирование, эксплуатация.

А. М. Абдуллаев, С. Г. Божко, В. С. Красноруцкий, Р. Латорре,
В. Р. Татаринов, Н. Ю. Шумкова, А. В. Шепитчак

Проект кваліфікації ядерного палива України (ПКЯПУ)

Розглянуто етапи розробки та результати реалізації комплексу організаційних, наукових і технічних рішень щодо впровадження нового ядерного палива від альтернативного постачальника — компанії Westinghouse — на АЕС України з реакторами типу ВВЕР-1000. Аналіз результатів випробувань шести дослідних тепловидільних збірок компанії Westinghouse (TBCW) протягом 17–20-ї паливних кампаній енергоблока № 3 Южно-Української АЕС (2005–2010 рр.) і 42-х TBCW перевантажувальної партії протягом 21–24-ї паливних кампаній (2011–2014 рр.) підтвердив виконання проектних характеристик нового палива, збереження цілісності й надійності протягом чотирирічного циклу експлуатації.

Ключові слова: паливо для ВВЕР-1000, диверсифікація, тепло-
видільні збірки, ліцензування, експлуатація.

© А. М. Абдуллаев, С. Г. Божко, В. С. Красноруцкий, Р. Латорре,
В. Р. Татаринов, Н. Ю. Шумкова, А. В. Шепитчак, 2017

Обеспечение реакторов АЭС свежим ядерным топливом является начальной стадией ядерного топливного цикла, которая во многом определяет возможность государств, владеющих АЭС, регулировать и развивать атомную энергетику. Поэтому в мире сложилась практика поставок ядерного топлива на АЭС от нескольких производителей.

В Украине после распада СССР сохранились в эксплуатации водо-водяные реакторы типа ВВЭР и РБМК. При этом практически вся инфраструктура обеспечения эксплуатации АЭС, в том числе производство ядерного топлива, осталась в Российской Федерации, и поставки топлива на АЭС Украины осуществлялись только из РФ. Понимая важность надежного и стабильного обеспечения топливом украинской атомной генерации, на государственном уровне было принято решение о необходимости квалификации альтернативного поставщика ядерного топлива для реакторов ВВЭР-1000 АЭС Украины.

5 июня 2000 года было подписано «Исполнительное соглашение между правительством Украины и правительством Соединенных Штатов Америки относительно Проекта квалификации ядерного топлива для Украины». Основная цель ПКЯТУ — предоставление Украине помощи в сфере повышения безопасности и решения вопросов, связанных с диверсификацией промышленного ядерного топлива для атомных энергетических реакторов типа ВВЭР-1000 по направлениям:

а) оборудование, документация и компьютерные программы для проектирования активных зон реакторов, анализа безопасности, лицензирования ядерного топлива и его использования;

б) ядерные топливные сборки;

в) практическая подготовка украинских специалистов по вопросам проектирования ядерного топлива и активных зон реакторов, методология анализа безопасности ядерного топлива и лицензирования, использования ядерного топлива и управления проектами.

Для координации и выполнения ПКЯТУ американская сторона назначила Министерство энергетики США своим исполнительным представителем. Минэнерго США определило, со своей стороны, Тихоокеанскую северо-западную национальную лабораторию (PNNL) в качестве официальной организации, ответственной за выполнение работ по ПКЯТУ. В США был проведен тендерный процесс, в результате которого Westinghouse Electric Company (далее — компания Westinghouse) утверждена как поставщик технологий и ядерного топлива для Украины, лицензирования аппаратуры и программных средств для мониторинга активных зон.

В Украине, в соответствии с Соглашением, был проведен конкурс на выбор базовой организации по созданию Центра проектирования активных зон реакторов (ЦПАЗ) — украинской организации, ответственной за проектирование ядерного топлива и активных зон реакторов, а также лицензирование ядерного топлива. Победителем конкурса стал Научно-технический комплекс «Ядерный топливный цикл» Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт» (НТК ЯТЦ ННЦ ХФТИ), обладающий значительным опытом проектирования и создания новых ядерных и нейтронопоглощающих материалов, конструкций и технологий изготовления твэлов, пэлов, ТВС для реакторов различного типа и назначения.

В качестве ядерной установки для проведения опытно-промышленной эксплуатации проектируемого альтернативного ядерного топлива выбран энергоблок № 3

Южно-Украинской АЭС (ЮУАЭС). Национальная атомная энергогенерирующая компания «Энергоатом» определена как организация, ответственная за получение, загрузку и эксплуатацию ядерного топлива, а также за предоставление в целом необходимой поддержки деятельности, направленной на выполнение ПКЯТУ.

На основе принятых решений сформирована Программа работ по ПКЯТУ, включающая этапы решения организационных, научных и технических вопросов проектирования, обоснования безопасности, изготовления, проведения комплекса реакторных испытаний ядерного топлива альтернативного поставщика — компании Westinghouse.

Цель статьи — осветить ход выполнения Программы работ по ПКЯТУ, а также привести основные результаты работ по проектированию ТВС компании Westinghouse и опытно-промышленной эксплуатации смешанных загрузок альтернативных и российских ТВС в 17–24-й топливных компаниях.

Обучение специалистов и передача технологий. Одним из важных результатов выполнения Программы работ по ПКЯТУ стало создание в рамках структуры НТК ЯТЦ ННЦ ХФТИ Центра по проектированию активных зон ядерных установок (ЦПАЗ) в составе лаборатории проектирования ядерного топлива, лаборатории проектирования активных зон, лаборатории анализа безопасности и лицензирования эксплуатации. Задача ЦПАЗ — научно-техническое сопровождение внедрения альтернативного топлива на АЭС Украины.

НТК ЯТЦ имеет сертифицированную систему управления (качества). НАЭК «Энергоатом» регулярно проводит аудит системы качества НТК ЯТЦ. Результаты аудита подтверждают, что НТК ЯТЦ является квалифицированным поставщиком для НАЭК «Энергоатом» услуг в области ядерной энергетики по исследованию, разработке, проектированию и обоснованию безопасности ядерного топлива, ядерных установок и хранилищ отработавшего ядерного топлива.

Компания Westinghouse с целью овладения специалистами ЦПАЗ современными технологиями проектирования и обоснования безопасности альтернативного ядерного топлива провела обучение специалистов-расчетчиков ЦПАЗ по следующим направлениям: механическое проектирование и конструкция тепловыделяющих сборок; проектирование твэлов; теплогидравлический анализ; ядерно-физическое проектирование; анализ безопасности; лицензирование.

Специалисты ЦПАЗ прошли также обучение по проектным основам систем АЭС, основам управления проектами и экономики топливного цикла. В процессе обучения проводились рабочие встречи с представителями регулирующих органов и организаций технической поддержки США и Украины, на которых были представлены различные аспекты лицензирования ядерного топлива.

В 2005 году после завершения стажировки специалистов ЦПАЗ в компании Westinghouse в Украину переданы 44 расчетные программы, документация к ним и тематические отчеты компании Westinghouse для выполнения проектных расчетов и обоснований безопасной эксплуатации ТВСВ. В дальнейшем, с помощью PNNL, в ЦПАЗ переданы и другие расчетные программы для выполнения экспертных оценок, проведено обучение пользователей этих программ. В ЦПАЗ переданы две рабочие станции HP8000C, персональные компьютеры и другое вспомогательное оборудование.

Проектирование, поставка и эксплуатация шести опытных ТВСВ. Проектирование топлива компании Westinghouse на всех этапах работ: выдача исходных данных для проектирования, разработка технического задания на проектирование, разработка технических условий ТВСВ, подготовка отчета по анализу безопасной эксплуатации ТВСВ в составе смешанных загрузок — осуществлялось при постоянном участии специалистов Украины.

В отличие от проекта ТВС компании Westinghouse для АЭС «Темелин» (Чехия), в украинском варианте ТВСВ для ВВЭР-1000 АЭС Украины изначально была принята концепция максимального соответствия по основным параметрам разрабатываемой конструкции ТВСВ и базовой на тот период конструкции российской ТВСМ (рис. 1) [1].

При проектировании ТВСВ применялись следующие технические решения:

- использование проверенных расчетных и экспериментальных методик для ТВС с шестигранной геометрией;

- использование проверенных материалов и конструкции твэлов;

- использование компанией Westinghouse конструкций дистанционирующей решетки (ДР) и головки ТВСВ, модифицированных для ВВЭР-1000;

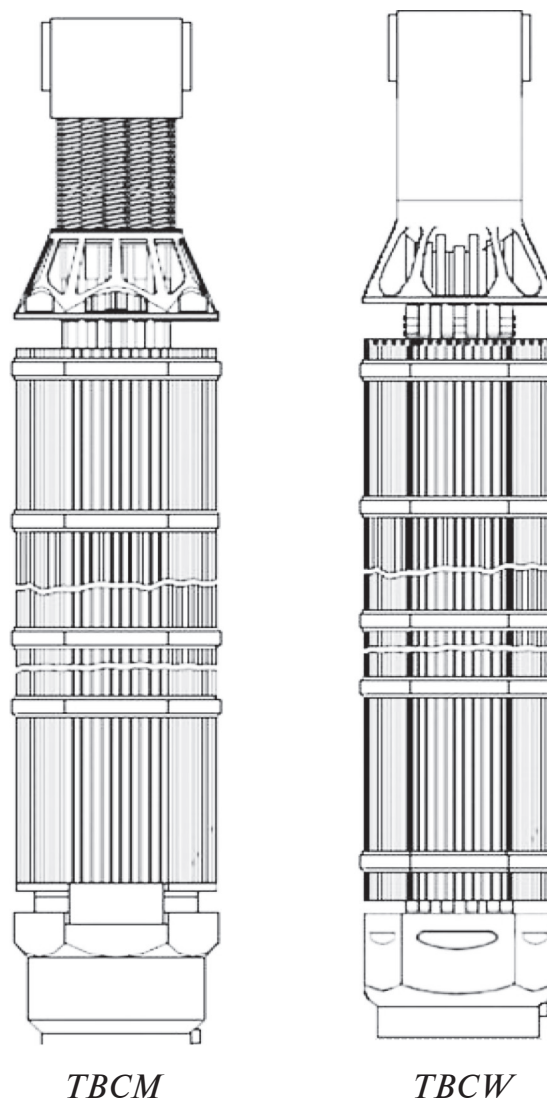


Рис. 1. Сопоставление резидентной ТВСМ и опытной ТВСВ

обеспечение совместимости ТВСВ с транспортно-технологическим оборудованием энергоблока № 3 ЮАЭС;
проведение механических и гидравлических испытаний компонентов конструкции и ТВСВ в целом;

обеспечение механической, гидравлической и ядерно-физической совместимости разрабатываемых ТВСВ с резидентными (базовыми) ТВСМ в активной зоне.

Конструктивные особенности ТВСВ для обеспечения механической совместимости с ТВСМ:

дистанционирующие решетки (15 шт.) расположены соответственно аксиальному расположению ДР резидентных ТВС;

конструкции хвостовика и головки ТВСВ обеспечивают соответствующее сопряжение с блоком защитных труб и опорными стаканами, а также поперечное позиционирование и опору ТВС;

конструкции обечайки решетки, элементов головки и хвостовика предотвращают непреднамеренное зацепление между опытными и резидентными сборками;

ДР и направляющие каналы прочно соединены;

коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) ДР ТВСВ был максимально приближен к КГС ДР ТВСМ.

В результате спроектирована ТВСВ, совместимая с российской ТВСМ по конструкции, теплогидравлическим характеристикам, механической прочности, вибрационной устойчивости и коррозионным характеристикам, которая по всем параметрам признана удовлетворяющей условиям эксплуатации смешанной с российскими ТВСМ топливной загрузки активной зоны энергоблока № 3 ЮАЭС.

Основные технические характеристики ТВСМ и ТВСВ (опытной партии из шести ТВСВ) приведены в табл. 1.

Обоснование безопасности активной зоны с шестью опытными ТВСВ компании Westinghouse [2] разрабатывалось согласно требованиям нормативных документов Украины по обеспечению ядерной и радиационной безопасности, отраслевых руководящих документов по выполнению анализа безопасности перегрузки и эксплуатации смешанной топливной загрузки активной зоны реакторной установки ВВЭР-1000, а также в соответствии со следующими базовыми принципами:

отсутствие существенного влияния опытных ТВСВ на характеристики активной зоны, что обеспечивает применимость действующего анализа безопасности энергоблока № 3 ЮАЭС, загруженного резидентным топливом, для смешанной активной зоны, состоящей из ТВСМ и шести опытных ТВСВ компании Westinghouse;

обеспечение проектного расхода для резидентного топлива;

непревышение скорости поперечных перетоков теплоносителя, которые использованы в обосновании работоспособности механической конструкции резидентной ТВС;

обеспечение нейтронно-физической совместимости (размножающие свойства и выгорание), сохранение практики формирования топливных загрузок с резидентными ТВС;

сохранение проектных пределов и условий безопасной эксплуатации реакторных установок для активной зоны с резидентным топливом;

сохранение алгоритмов работы и уставок системы управления и защиты;

применимость действующих инструкций по эксплуатации.

Таблица 1. Основные технические характеристики ТВСМ и ТВСВ (опытной партии)

Параметр	ТВСМ	ТВСВ
Количество твэлов в ТВС	312	312
Шаг расположения твэлов, мм	12,75	12,75
Топливо	UO ₂	UO ₂
Интегрированный выгорающий поглотитель	—	ZrB ₂
Масса топлива (UO ₂), кг (номинальная)	455,52	536
Обогащение топлива по урану-235, %: центральная зона бланкет	4,4 —	2,9; 3,1; 3,8 2,6
Длина центральной зоны, мм (номинальная)	3530	3225,2
Длина бланкета, мм (номинальная)	—	152,4 (2 зоны)
Масса топливной сборки, кг (номинальная)	670,5	743
Диаметр твэла, мм (номинальный)	9,1	9,14
Количество центральных труб	1	1
Наружный диаметр центральной трубы, мм	11,2	12,6
Внутренний диаметр центральной трубы, мм	9,6	11,0
Количество направляющих каналов	18	18
Материал оболочки твэлов, направляющих каналов и центральной трубы	Zr1%Nb	Сплав ZIRLO™
Количество дистанционирующих решеток	16	16
В том числе: из сплава Zr1%Nb из сплава 718	16	2 14
Количество дистанционирующих решеток в зоне столба топлива	15	13
В том числе: из сплава Zr1%Nb из сплава 718	15	2 11

Для обоснования безопасности смешанных активных зон использовались коды и методология компании Westinghouse [1]. По требованию Государственной инспекции ядерного регулирования Украины особое внимание было уделено квалификации системы расчетных кодов, используемых для ядерно-физического проектирования. Отчет по обоснованию безопасности продемонстрировал

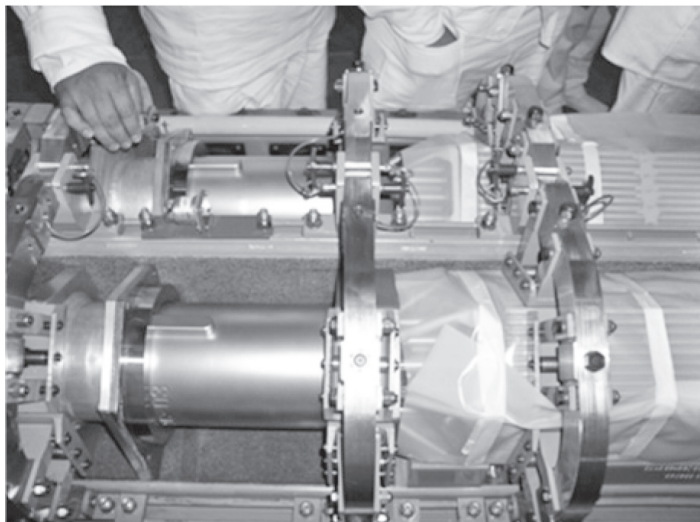


Рис. 2. Сверка номеров ТБСВ и выгрузка ТБСВ из транспортного контейнера

выполнение всех критериев безопасности, установленных в нормативных документах, и охватил все аспекты безопасности: прочность и надежность механической конструкции ТБСВ, работоспособность твэлов, теплогидравлический анализ и анализ безопасности. В связи с тем, что опытные ТБСВ не являлись лимитирующими в топливных загрузках активной зоны в 17–20-й топливных кампаниях энергоблока № 3 ЮУАЭС, анализ проектных исходных событий выполнялся в ограниченном объеме.

Процесс разработки опытных ТБСВ представлен следующими основными документами:

- программой работ по проекту (2000–2005 годы);
- отчетами по квалификации расчетных методик и кодов для применения в обосновании конструкции ТБСВ и анализе безопасности ВВЭР-1000 (2002);
- техническим заданием на изготовление ТБСВ (2003);
- отчетами по результатам механических и гидравлических испытаний ТБСВ (2004);
- техническими решениями эксплуатирующей организации на установку опытных ТБСВ в соответствии действующими НТД (2005);
- техническими условиями на ТБСВ (2005);
- обоснованием безопасности использования опытных ТБСВ на энергоблоке № 3 ЮУАЭС (2005).

Шесть опытных ТБСВ были изготовлены на заводе компании Westinghouse (Колумбия, штат Южная Каролина). Специалистами НАЭК «Энергоатом», ЮУАЭС и ЦПАЗ проведен аудит системы обеспечения качества компании Westinghouse и аудит производства опытных ТБСВ.

Для сопровождения эксплуатации топливных загрузок с ТБСВ компанией Westinghouse в кооперации с украинскими организациями выполнена модернизация системы мониторинга активной зоны (СМАЗ) с использованием программных средств BEACON и ПТК «Вулкан-ВРК».

Шесть ТБСВ доставлены морским транспортом в порт «Октябрьский» (Украина, г. Николаев). Выгрузка ТБС из контейнеров и входной контроль опытных ТБСВ на узле свежего топлива ЮУАЭС (рис. 2) проведены в присутствии специалистов компании Westinghouse, НАЭК «Энергоатом» и ЦПАЗ.

На основании положительного заключения государственной экспертизы представленного комплекта документов по разработке, обоснованию безопасности и результатам

входного контроля шести опытных ТБСВ, в 2005 году получено разрешение регулирующего органа Украины на их установку в активную зону энергоблока № 3 ЮУАЭС. Специалисты ЦПАЗ сопровождали загрузку ТБСВ в активную зону и выполняли измерения усилий затирания ТБС и разновысотность расположения головок опытных ТБСВ. В течение первого года эксплуатации шести опытных ТБСВ в составе 17-й топливной загрузки энергоблока № 3 ЮУАЭС и последующих 18–20-й топливных кампаний выполнен следующий цикл работ по научно-техническому сопровождению опытно-промышленной эксплуатации опытных ТБСВ:

- выбор вариантов и расчет нейтронно-физических характеристик топливных загрузок активной зоны для подготовки технических решений об их составе и эксплуатации;
- поддержка опытно-промышленной эксплуатации модернизированной системы мониторинга активной зоны в части подготовки расчетных моделей BEACON топливных загрузок, сравнения расчетных и измеренных полей энерговыделения в активной зоне;
- оформление результатов входного контроля ТБСВ в узле свежего топлива, плановых инспекций ТБСВ в период перегрузок активной зоны;
- сбор и анализ данных по эксплуатации ТБСВ в каждой топливной кампании, включая регистрируемые СМАЗ эксплуатационные параметры энергоблока, характеристики водно-химического режима первого контура, удельную активность теплоносителя первого контура на работающем реакторе и при его останове на планово-предупредительный ремонт, результаты осмотра и измерений ТБСВ;
- обучение и поддержка квалификации персонала ЮУАЭС для выполнения эксплуатационных расчетов перегрузок смешанной активной зоны.

По результатам входного контроля и загрузки шести опытных ТБСВ в активную зону энергоблока № 3 ЮУАЭС все шесть опытных ТБСВ допущены к эксплуатации в 17-й топливной кампании.

После завершения 17-й топливной кампании и, соответственно, одного года эксплуатации ТБСВ проведены визуальный осмотр состояния компонентов ТБС и состояния оболочек твэлов, а также измерения усилий извлечения ТБС из активной зоны и разновысотности расположения головок ТБСВ. Все шесть опытных ТБСВ были

Таблица 2. Проектные технические характеристики ТВС*

Параметры	ТВСМ	ТВСА
Размер ТВС «под ключ», мм	234	235,1 (по каркасу)
Длина ТВС, мм	4570	4570
Длина активной части ТВС, мм	3530	3530
Срок эксплуатации ТВС, лет**	5	6,5
Максимальное время эксплуатации в активной зоне, эфф. ч	30 000	30 000
Продолжительность работы на номинальном уровне мощности между перегрузками, эфф. ч	7000	7000
Тепловая мощность ТВС, максимально допустимая, МВт	27	27
Масса топлива (UO ₂) в ТВС, кг***	455,52	491,4 494,5
Масса ТВС, кг***	670,5	710 713
Топливо	UO ₂	UO ₂ UO ₂ +Gd ₂ O ₃
Обогащение топлива по урану-235 (максимальное), %	4,4	4,4
Наружный диаметр инструментальной трубы, мм	11,2	13,0
Внутренний диаметр инструментальной трубы, мм	9,6	11,0
Количество направляющих каналов	18	18
Наружный диаметр трубы направляющего канала, мм	12,6	12,6
Внутренний диаметр трубы направляющего канала, мм	11	10,9
Количество дистанционирующих решеток	15	15
Количество твэлов/твэгов в ТВС	312/0	312/0 306/6 303/9
Длина твэла, мм	3837	3837
Наружный диаметр оболочки твэла, мм	9,1	9,1
Шаг расстановки твэлов по треугольной решетке, мм	12,75	12,75
Давление газа под оболочкой твэла, МПа	2,0	2,0
Объемная доля гелия, %	Не менее 99	Не менее 99
Наружный диаметр топливной таблетки, мм	7,57	7,57
Высота топливной таблетки, мм	11	11
Диаметр отверстия таблетки, мм	2,35	1,4 или 1,5
Максимальное среднее выгорание по ТВС, МВт-сут/кг урана	49	55

* Приведены проектные данные из гл. 31 ТОВ РУ 320.00.00.000 Дб1.

** Эксплуатация в реакторе и промежуточное хранение в бассейне выдержки.

***Верхнее значение приведено для топлива с диаметром отверстия в таблетке 1,5 мм, нижнее значение — для топлива с диаметром отверстия в таблетке 1,4 мм.

герметичны и допущены к эксплуатации в 18-ю топливную кампанию. По материалам, собранным в процессе сопровождения эксплуатации, и по результатам проведенных измерений и осмотра ТВСВ в период ППР выпущен

«Отчет по сопровождению активной зоны в ходе 17-й топливной загрузки шести опытных ТВСВ на ЮУАЭС».

На протяжении последующих двух лет выполнялись работы по сопровождению эксплуатации шести опытных

ТВСВ в 18- и 19-й топливных загрузках активной зоны энергоблока № 3 ЮУАЭС, аналогичные по видам и объему работ, выполненных в течение 17-й топливной кампании.

В течение всего периода эксплуатации проводился контроль состояния активной зоны и шести опытных ТВСВ по штатной процедуре. По результатам эксплуатации и обследования в период ППР в течение трех лет сделаны следующие основные выводы [3]:

максимальное усилие установки (извлечения) ТВС в активную зону (из активной зоны) — менее 70 кгс;

разновысотность расположения головок опытных ТВС — не более 5 мм;

измеренное при горячих параметрах эксплуатации активной зоны максимальное время падения ОР СУЗ в опытных ТВСВ после трех лет эксплуатации — 1,8 с;

измеренное усилие установки (извлечения) поглощающих стержней управления и защиты (ПС СУЗ) в ТВС — менее 4 кгс (находится в регламентных пределах [4]);

по результатам контроля герметичности оболочки все шесть опытных ТВСВ признаны герметичными;

визуальным осмотром состояния компонентов ТВСВ и оболочек ТВЭЛов не выявлены повреждения, препятствующие дальнейшей эксплуатации ТВСВ.

Исходя из изложенного, по результатам трехлетнего этапа испытаний шести опытных ТВСВ следует, что:

1) все шесть опытных сборок в течение первых трех лет эксплуатации показали надежную работу, что подтверждает правильность критериев проектирования и применимость технологий компании Westinghouse для изготовления топлива для эксплуатации в ВВЭР-1000;

2) в течение трех кампаний (17—19-й) эксплуатация в активной зоне энергоблока № 3 ЮУАЭС шести опытных ТВСВ не вызвала каких-либо эксплуатационных ограничений;

3) система мониторинга активной зоны с использованием программных средств BEACON и ПТК «Вулкан-ВРК» показала надежную работу в условиях нормальной эксплуатации в течение трех топливных кампаний.

20-я топливная кампания имеет особенности смешанной активной зоны энергоблока № 3 ЮУАЭС, в которой, наряду с шестью опытными ТВСВ, были использованы в качестве свежего топлива подпитки активной зоны 42 ТВСА, имеющие существенные отличия от конструкции ранее применяемой ТВСМ [4] (табл. 2).

В связи с таким изменением состава загрузки на 20-ю топливную кампанию проведена дополнительная оценка основных теплогидравлических критериев проектирования смешанной активной зоны, а именно:

подтверждено обеспечение проектного расхода через ТВСА;

обосновано не превышение проектных скоростей поперечных перетоков теплоносителя в ТВСВ и ТВСМ; обоснована достаточность запасов до всплытия ТВС.

Результаты эксплуатации шести опытных ТВСВ в 20-й топливной кампании подтвердили результаты, полученные в предыдущих трех кампаниях. Полученные значения усилий затирания при загрузке опытных кассет ТВСВ в активную зону на 20-ю топливную кампанию не превышали проектных значений и удовлетворяют требованиям ТРБЭ.

Эксплуатация шести опытных ТВСВ в течение четырех топливных кампаний не выявила каких-либо повреждений ТВЭЛов [5].

По результатам контроля герметичности ТВС на работающем реакторе и при его плановом останове в ходе 17—20-й топливных кампаний все шесть ТВСВ признаны герметичными.

Опытно-промышленная эксплуатация системы BEACON, которая включала непрерывный контроль за распределением энерговыделения в активной зоне и испытания с отключением части петель, подтвердила проектные характеристики системы [6].

ЦПАЗ в течение всех четырех лет эксплуатации шести опытных ТВСВ выполнял расчетные обоснования безопасности текущих топливных загрузок энергоблока № 3 ЮУАЭС, вел сбор данных и оформлял отчеты по результатам эксплуатации ТВСВ.

Проектирование и эксплуатация перегрузочной партии из 42-х ТВСВ. При проектировании ТВСВ перегрузочной партии учтен опыт эксплуатации шести опытных ТВСВ в составе смешанных активных зон в 17—20-й топливных кампаний. Для повышения работоспособности и надежности в конструкции ТВСВ перегрузочной партии использованы другие материалы для изготовления решеток ТВС, двойная развальцовка втулок дистанционирующих решеток при их креплении к направляющим каналам (рис. 3), в качестве выгорающего поглотителя использован Gd_2O_3 вместо ZrB_2 [7].

На ТВСВ перегрузочной партии разработаны новые редакции технических условий и отчета по обоснованию безопасности эксплуатации. Выполнен расчет обогащения топлива в ТВСВ, НАЭК «Энергоатом» обеспечена поставка обогащенного диоксида урана для изготовления ТВСВ.

Основные технические характеристики 42 ТВСВ перегрузочной партии:

Количество ТВЭЛов в ТВС.	312
Шаг расположения ТВЭЛов, мм.	12,75
Топливо	UO_2
Интегрированный выгорающий поглотитель	Gd_2O_3
Масса топлива (UO_2), кг (номинальная)	550,6
Обогащение топлива по урану-235, %:	
центральная зона	(2,0...4,2)±0,05
бланкет.	0,714
Длина центральной зоны, мм (номинальная)	3225,2
Длина бланкета, мм (номинальная)	152,4 (две зоны)
Масса топливной сборки, кг (номинальная)	755
Диаметр оболочки ТВЭЛА, мм (номинальный):	
наружный.	9,14
внутренний.	8,0
Материал оболочки ТВЭЛов, направляющих каналов и центральной трубы	Сплав ZIRLO™
Количество решеток.	16
В том числе:	
из сплава $Zr1\%Nb$	13
из сплава 718	3
Количество дистанционирующих решеток в зоне столба топлива	13
В том числе:	
из сплава $Zr1\%Nb$	12
из сплава 718	1

Double Bulge Thimble to Grid Connections

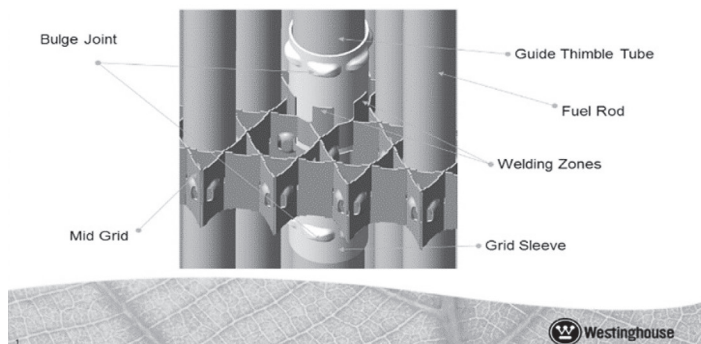


Рис. 3. Двойное закрепление дистанционирующих решеток в 42 ТВСВ перегрузочной партии

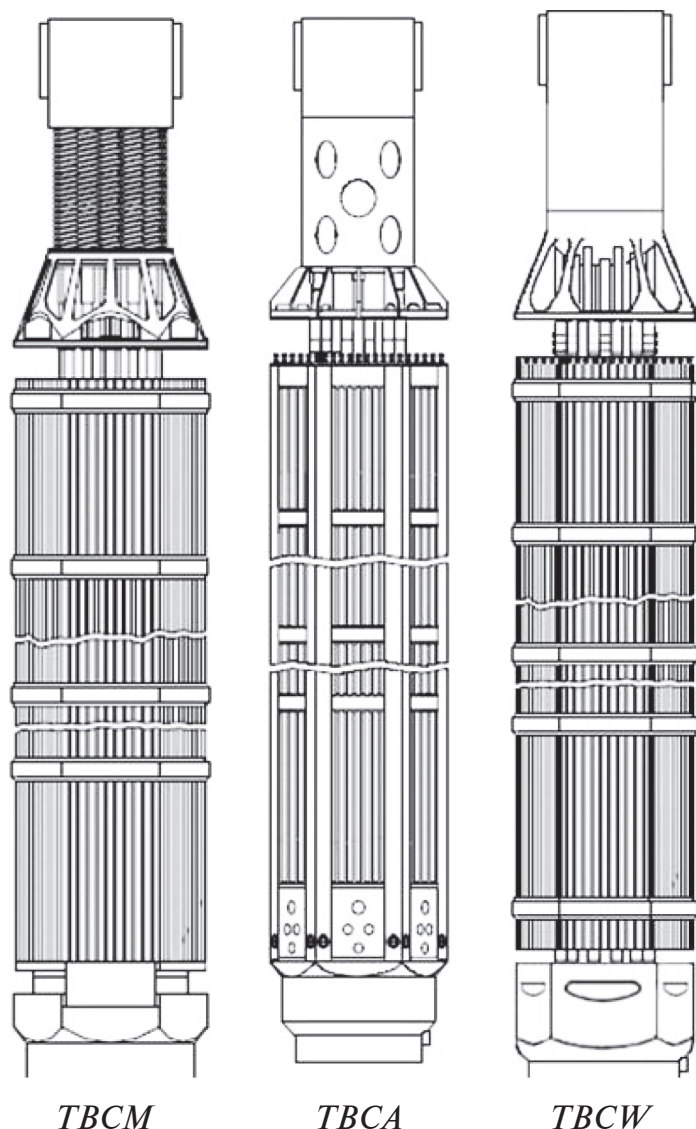


Рис. 4. ТВСМ, ТВСА и ТВСВ перегрузочной партии

В течение 2011—2014 года в активной зоне энергоблока № 3 ЮУАЭС проводилась опытно-промышленная эксплуатация перегрузочной партии из 42 ТВСВ в составе

смешанных топливных загрузок, содержащих три типа ТВС: ТВСМ, ТВСА и ТВСВ (рис. 4).

Объем работ по научно-техническому сопровождению опытно-промышленной эксплуатации перегрузочной партии ТВСВ в составе 21—24-й топливных кампаний на блоке №3 ЮУАЭС аналогичен объему работ по сопровождению опытной партии из шести ТВСВ.

По результатам опытно-промышленной эксплуатации перегрузочной партии из 42-х ТВСВ в 21—24-й топливных кампаниях активной зоны энергоблока № 3 ЮУАЭС в течение 2011—2014 годов можно сделать следующие выводы:

для большинства ТВСВ перегрузочной партии пиковое значение усилия затирания составляет менее 60 кгс; максимальное усилие затирания ТВСВ при установке в ячейку активной зоны — менее 130 кгс; усилия затирания при выгрузке ТВС из активной зоны во время ППР 2011—2014 годов также не превышали проектных значений и удовлетворяют требованиям ТРБЭ;

результаты измерений повысотных отметок ТВС, усилий перемещения ОР СУЗ в направляющих каналах ТВС и времени падения ОР СУЗ также удовлетворяли требованиям ТРБЭ;

максимальное значение усилий затирания кластера ПС СУЗ при его извлечении из ТВСВ составляло 4 кгс и не превышало регламентного значения 6,0 кгс;

для ТВСВ перегрузочной партии минимальное и максимальное время падения ОР СУЗ составило соответственно 1,8 и 2,1 с, что значительно ниже проектного значения (4,0 с);

при визуальном осмотре ТВСВ видимых дефектов оболочки периферийных твэлов и повреждений дистанционирующих решеток не обнаружено;

расстояние между заглушками твэлов и плитой хвостовика (головки) ТВСВ практически не изменялось;

удлинение ТВСВ после четырех лет эксплуатации меньше, чем удлинение ТВСА тех же сроков эксплуатации;

результаты контроля герметичности оболочек ТВС при плановом останове реактора показали, что 42 ТВСВ перегрузочной партии после четырех лет эксплуатации герметичны.

Таким образом, опытно-промышленная эксплуатация ТВС компании Westinghouse прошла без замечаний и успешно завершена.

Регуляторный надзор за реализацией ПКЯТУ. Процесс лицензирования новых ТВС, в том числе альтернативного производителя (поставщика), и модификации при этом необходимых систем (компонентов) АЭС четко регламентирован нормативно-правовыми актами по ядерной и радиационной безопасности Украины. Этими документами определены последовательные шаги, которые должна сделать эксплуатирующая организация, каждый из которых тщательно анализируется и контролируется регулирующим органом — от концептуального решения по внедрению нового топлива до его введения в промышленную эксплуатацию.

Соответствие законодательной базы Украины по ядерной и радиационной безопасности, включая процедуру лицензирования нового ядерного топлива, международным подходам, в частности стандартам МАГАТЭ, подтверждено в ходе выполнения проекта «ЕС-IAEA-UKRAINE JOINT PROJECT on Safety Evaluation of Ukrainian NPPs» в течение 2007—2010 годов.

В рамках реализации ПКЯТУ требования национальной нормативно-правовой базы соблюдены в полной мере.

Полученный опыт при реализации данного проекта принят во внимание при подготовке проектов новых нормативно-правовых актов в сфере внедрения новых типов ТВС на АЭС, которые разрабатываются на сегодняшний день взамен существующих.

Выводы

В результате реализации заданий, поставленных в ПКЯТУ, в Украине подготовлены специалисты, получено программное обеспечение и создано специализированное подразделение «Центр проектирования активных зон» (ЦПАЗ). В сочетании с имеющимися в ННЦ ХФТИ специалистами-материаловедами, конструкторами и технологами в области ядерных технологий, в Украине появилась возможность комплексно решать задачи от создания новых элементов ядерных установок до проектирования активных зон и обоснования безопасности ядерных установок в целом.

Компанией Westinghouse разработаны варианты ядерного топлива в виде твэлов и ТВС для эксплуатации в смешанных загрузках топлива в реакторах ВВЭР-1000.

На энергоблоке № 3 ЮУАЭС модернизирована система внутриреакторного контроля с применением системы BEACON.

Изготовлены и успешно прошли реакторные испытания нового топлива компании Westinghouse: опытной партии из шести ТВСВ в течение 17–20-й топливных кампаний и перегрузочной партии из 42-х ТВСВ в составе смешанных загрузок 21–24-й топливных кампаний на энергоблоке № 3 ЮУАЭС.

Результаты обследования топлива компании Westinghouse в различных вариантах смешанных загрузок показали, что новое ядерное топливо удовлетворяет всем требованиям условий эксплуатации активной зоны реакторов ВВЭР-1000, сохраняет целостность и надежность в течение четырехлетнего цикла эксплуатации.

В результате проведения всех организационных и технических мероприятий эксплуатирующая организация НАЭК «Энергоатом» получила опыт и разработала необходимую нормативно-техническую документацию для дальнейшего расширения применения альтернативных поставок ядерного топлива компании Westinghouse на АЭС Украины.

В Украине разработаны подходы и совершенствуется система лицензирования новых видов ядерного топлива для АЭС Украины.

Список использованной литературы

1. Abdullaev A. M., Baydulin V. Z., Zhukov A. I., "Design and Performance of South Ukraine Nuclear Power Plant Mixed Cores with Westinghouse Fuel", Proceedings of IAEA Technical Meeting on Fuel Design and Licensing of Mixed Cores for Water Cooled Reactors (December 12–14, 2011, Vienna, Austria), P. 101–102.
2. Абдуллаев А. М., Байдуллин В. З., Жуков А. И. Обоснование безопасности перегрузки активных зон реакторов ВВЭР-1000 АЭС Украины. *Материалы 11-й междунар. науч.-практ. конференции по проблемам атомной энергетики «Безопасность, эффективность, ресурс», 1–6 октября 2013 г.*, Севастополь. С. 51–53.
3. Красноруцкий В. С., Абдуллаев А. М., Байдуллин В. З., Татаринов В. Р., Жуков А. И. Процесс внедрения топлива компании «Вестингауз» в реакторы ВВЭР-1000. Развитие атомной энергетики России и Украины — фактор устойчивого межгосударственного сотрудничества. *Материалы совместного совещания-семинара РАН и НАНУ*. М. : Наука, 2009. С. 88–94.

4. Molchanov V. L., Dolgov A. B., Samoylov O. B.; Kaydalov V. B., Kuul V. S., Petrov I. V., Ivanov A. V., Simakov G. A., Aksenov V. I., Lupishko A. N. The Results of TVSA Development and Operations Experience. Proc., Technical Meeting, Caradache, France, (22–26) November, 2004, IAEA-TECDOC-1454, 2004.

5. Абдуллаев А. М., Байдуллин В. З., Слепцов С. Н., Слепцов А. Н., Кулиш Г. В., Жуков А. И., Латорре Р. Результаты четырехгодичной эксплуатации ТВС компании «Вестингауз» на энергоблоке № 3 ЮУАЭС с ВВЭР-1000/В-320». *Материалы 7-й междунар. науч.-техн. конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (29 мая — 1 июня 2011 г., Подольск, Российская Федерация)*. С. 29–34.

6. Красноруцкий В. С., Михайлова Е. Ю., Резниченко Э. А., Сергеев О. П. Система мониторинга активной зоны для проекта квалификации ядерного топлива США для Украины. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2008. № 1. С. 22–25.

7. Abdullaev A., Aleshin Y., Kulish G., Lashevich P., Lattore R., Slepstov O., Slepstov S., Sokolov D., Sparrow J. Westinghouse Fuel Assemblies Performance after Operation in South-Ukraine NPP Mixed Core. Proceedings of the 10-th International Conference on WWER Fuel Performance, Modeling and Experimental Support (September 7–14, 2013, Sandanski, Bulgaria). P. 125–130.

References

1. Abdullaev, A.M., Baidullin, V.Z., Zhukov, A.I., (2011), "Design and Performance of South Ukraine Nuclear Power Plant Mixed Cores with Westinghouse Fuel, Proceedings of IAEA Technical Meeting on Fuel Design and Licensing of Mixed Cores for Water Cooled Reactors", Vienna, Austria, pp. 101–102.
2. Abdullaev, A.M., Baidullin, V.Z., Zhukov, A.I. (2013), "Safety Justification of Reloading of Ukrainian Nuclear Power Plant VVER-1000 Cores" [Obosnovaniie bezopasnosti peregruzki aktivnykh zon reaktorov VVER-1000 AES Ukrainy], Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference on Nuclear Energy Problems "Safety, Effectiveness, Life", Sevastopol, pp. 51–53. (Rus)
3. Krasnorutskii, V.S., Abdullaev, A.M., Baidullin, V.Z., Tatarinov, V.R., Zhukov, A.I. (2009), "Process of Westinghouse Company Fuel Implementation into VVER-1000. Development of Nuclear Energy in Russia and Ukraine — Factor of Sustainable Interstate Cooperation" [Protess vnedreniia topliva kompanii "Westinghouse" v reaktory VVER-1000. Razvitiie atomnoi energetiki Rossii i Ukrainy — faktor ustoychivogo mezghosudarstvennogo sotrudnichestva], Proceedings of the Joint Meeting of Russian Academy of Sciences and National Academy of Sciences of Ukraine, Moscow, Science, pp. 88–94. (Rus)
4. Molchanov, V.L., Dolgov, A.B., Samoylov, O.B., Kaidalov, V.B., Kuul V.S., Petrov, I.V., Ivanov, A.V., Simakov, G.A., Aksionov, V.I., Lupishko, A.N. (2004), "The Results of TVSA Development and Operations Experience", Proc., Technical Meeting, Cadarache, France, 2004, IAEA-TECDOC-1454, 2004.
5. Abdullaev, A.M., Baidullin, V.Z., Slepstov, S.N., Slepstov, A.N., Kulish, G.V., Zhukov, A.I., Latorre, R. (2011), "Results of Four Year Operation of Westinghouse Fuel Assemblies at SUNPP-3 with VVER-1000/V-320" [Rezultaty chetyriokhgodichnoi ekspluatatsii TVS kompanii "Westinghouse" na energobloke No. 3 YUAES s VVER-1000/V-320], Proceedings of the 7th International Scientific and Technical Conference "Safety Assurance of NPPs with VVER", Podolsk, Russia, pp. 29–34. (Rus)
6. Krasnorutskii, V.S., Mykhailova, Ye.Yu., Reznichenko, E.A., Sergieiev, O.P. (2008), "Core Monitoring System for the Ukraine Nuclear Fuel Qualification Project" [Sistema monitoringa aktivnoi zony dlia proekta kvalifikatsii yadernogo topliva SShA dlia Ukrainy], *Nuclear and Radiation Safety Journal*, No. 1, pp. 22–25. (Rus)
7. Abdullaev, A., Aleshin, Y., Kulish, G., Lashevich, P., Lattore, R., Slepstov, O., Slepstov, S., Sokolov, D., Sparrow, J. (2013), "Westinghouse Fuel Assemblies Performance after Operation in South-Ukraine NPP Mixed Core. Proceedings of the 10-th International Conference on WWER Fuel Performance, Modeling and Experimental Support", Sandanski, Bulgaria, pp. 125–130.

Получено 14.03.2017.