УДК 621.039.55 DOI: 10.26583/npe.2024.2.03

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЕКТА ПО МОДЕРНИЗАЦИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА СМ-3

Тузов А.А., Ижутов А.Л., Малков А.П., Петелин А.Л., Сазонтов С.А.

АО «ГНЦ НИИАР»,
433510, Ульяновская обл., г. Димитровград, Западное шоссе, д. 9

Высокопоточный материаловедческий реактор СМ-3 с максимальной плотностью потока нейтронов до $5 \cdot 10^{15}$ $с^{-1} \times см^{-2}$ пущен в эксплуатацию в 1961 г. В период с июля 2019 г. по октябрь 2020 г. была проведена радикальная модернизация реактора с заменой всех внутрикорпусных устройств. Основная научно-техническая идея работ заключалась в кардинальном изменении компоновки активной зоны с двукратным увеличением объема нейтронной ловушки и количества экспериментальных ячеек со сверхвысокой плотностью потока нейтронов. Фактически модернизация представляла собой создание абсолютно новой конструкции активной зоны реактора СМ-3 со значительно улучшенными экспериментальными характеристиками, позволяющими расширить направления научных и прикладных исследований. Создана новая компоновка активной зоны на основе новых конструкций нейтронной ловушки, рабочих органов, исполнительных механизмов и новой аппаратуры системы управления и защиты реактора. Значительно улучшены экспериментальные характеристики реактора, количество ячеек в нейтронной ловушке возросло с 27-ми до 57-ми, возможность наработки трансплутониевых элементов и радионуклидов высокой удельной активности увеличилась в 1,8 раза. Существенно улучшена надежность и безопасность эксплуатации, обеспечено продление срока службы реактора, по меньшей мере, до 2040 г. Описаны основные научно-технические решения, содержание и результаты работ по модернизации реактора СМ-3.

Ключевые слова: реактор СМ-3, активная зона, нейтронная ловушка, модернизация, ядерное топливо, твэл, СУЗ, радионуклиды.

Для цитирования: *Тузов А.А., Ижутов А.Л., Малков А.П., Петелин А.Л., Сазонтов С.А.* Реализация проекта по модернизации активной зоны реактора СМ-3. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 2. – С. 30 – 40. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.03

© ***Тузов А.А., Ижутов А.Л., Малков А.П., Петелин А.Л., Сазонтов С.А., 2024***

ВВЕДЕНИЕ

Высокопоточный корпусной водо-водяной исследовательский реактор СМ-3 на промежуточных нейтронах с нейтронной ловушкой является уникальной экспериментальной установкой Российской Федерации, имеет наибольшую плотность потока нейтронов $5 \cdot 10^{15}$ $с^{-1} \times см^{-2}$ среди остальных действующих исследовательских реакторов [1]. В настоящее время только исследовательский реактор HFIR Окриджской Национальной лаборатории (США) имеет сопоставимые с СМ-3 характеристики, но при этом имеет в два раза меньший коэффициент использования при меньшем значении плотности потока нейтронов. Конструктивные особенности и экспериментальное оснащение реактора позволяют проводить различные внутриреакторные инструментованные исследования материалов в интересах ядерной и термоядерной энергетики и нарабатывать широкий спектр радиоизотопов научного, медицинского и промышленного назначения.

В течение более 60-и лет работы на реакторе СМ-3 выполнен большой комплекс испытаний материалов и топлива для энергетических реакторов типа ВВЭР, РБМК, транспортных ядерно-энергетических установок и термоядерных реакторов. Получены первые результаты по радиационной стойкости аустенитных и ферритно-мартенситных сталей типа ЧС-68, ЭП-172, ЭП-450 для твэлов и ТВС быстрых реакторов с натриевым теплоносителем. Впервые получены данные по уникальной радиационной стойкости сплава типа ЭП-630 (аналог 42ХНМ), широко используемого в активных зонах корабельных реакторов, ПЭБ и АСММ.

Испытаны различные марки графитов, жаростойких материалов для высокотемпературных газовых реакторов, перспективных материалов на основе бериллия и материалов для термоядерных реакторов при температурах 1000 – 2500°С, повреждающих дозах до 25 сна/год.

Реактор эффективно используется для наработки широкого спектра радиоактивных нуклидов медицинского и промышленного назначения, включая трансплутониевые элементы (^{33}P, ^{55}Fe, ^{59}Fe, ^{60}Co, ^{63}Ni, ^{75}Se, ^{89}Sr, ^{90}Y, ^{106}Ru, ^{113}Sn, ^{119m}Sn, ^{125}I, ^{131}I, ^{133}Ba, ^{144}Ce, ^{153}Gd, ^{177}Lu, ^{188}W, ^{192}Ir, ^{241}Am, ^{243}Am, ^{244}Cm, ^{248}Cm, ^{249}Bk, ^{252}Cf и др.), проведения фундаментальных научных исследований с применением нейтринного излучения реактора и созданных с его помощью источников нейтрино сверхвысокой активности.

В высокопоточных исследовательских реакторах критическими компонентами, определяющими ресурс работы, являются внутрикорпусные устройства, прежде всего опорная конструкция активной зоны. С момента предыдущей реконструкции в 1992 г. реактор СМ-3 проработал на мощности более 25-ти лет и к 2021 г. полностью исчерпывал установленный и продленный ресурс работы внутрикорпусных устройств, включая опорную конструкцию активной зоны. В связи с выработкой ресурса центральной зоны было принято решение о ее замене с одновременной модернизацией активной зоны для расширения экспериментальных возможностей реактора СМ-3 и повышения эффективности его использования. После проработки многочисленных вариантов была сформирована новая конфигурация активной зоны. Специалисты института разработали технический проект, рабочую конструкторскую документацию и изготовили новые конструктивные компоненты активной зоны [2].

После подготовительного периода и обоснования основных проектных решений был инициирован инвестиционный проект Госкорпорации «Росатом» по модернизации активной зоны СМ-3 с периодом реализации с апреля 2017 г. по октябрь 2020 г. Все заплани-

рованные работы были выполнены в полном объеме, ввод реактора в промышленную эксплуатацию был успешно осуществлен 10 октября 2020 г. на полтора месяца раньше запланированного срока. Основные работы проекта, включая проектно-конструкторские разработки, изготовление элементов конструкции активной зоны, демонтаж, монтаж и пуско-наладочные работы, выполнялись специалистами АО «ГНЦ НИИАР». Разработка, изготовление и шеф-монтаж АСУЗ были проведены совместно с ЗАО «СНИИП-СИСТЕМАТОМ», изготовление и шеф-монтаж электромеханических приводов СУЗ выполнялись с привлечением ЗАО «Диаконт».

ЦЕЛИ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ МОДЕРНИЗАЦИИ

Основными целями модернизации активной зоны реактора СМ-3 являлись разработка и создание новой активной зоны с улучшенными экспериментальными характеристиками, повышение эффективности использования, улучшение надежности и безопасности эксплуатации, обеспечение продления срока эксплуатации реакторной установки до 2040 г. Достижение поставленных целей позволит в конечном итоге сохранить лидирующие позиции Российской Федерации в области высокопоточных исследовательских материаловедческих реакторов для проведения прикладных и фундаментальных научных исследований.

Основная научно-техническая идея заключалась в разработке новой компоновки активной зоны с увеличением не менее чем в два раза объема нейтронной ловушки и количества экспериментальных ячеек со сверхвысокой плотностью потока нейтронов до $5 \cdot 10^{15}$ с$^{-1}\times$ см$^{-2}$ за счет инновационной компоновки нейтронной ловушки и активной зоны.

Для этого были выполнены конструкторские проработки и расчетные исследования различных вариантов компоновок нейтронной ловушки и активной зоны. В результате детальных расчетно-конструкторских исследований была разработана нейтронная ловушка без использования конструктивно и технологически трудоемких бериллиевых вкладышей, имеющих ограниченный временной ресурс (не более двух лет эксплуатации) из-за высокой повреждающей дозы в центре активной зоны реактора. Также для обеспечения дополнительного экспериментального объема в центре активной зоны была обоснована возможность исключения центрального компенсирующего органа (ЦКО), что потребовало разработку и создание новых более эффективных компенсирующих органов вместо рабочих органов (РО) аварийной защиты (АЗ) с обоснованием совмещения ими функций компенсации реактивности (РО АЗ-КО). Компоновка нейтронной ловушки до и после модернизации представлена на рис. 1.

Для оценки влияния перекомпоновки активной зоны на нейтронно-физические характеристики реактора были выполнены расчетно-экспериментальные исследования. В таблице 1 приведены результаты расчетов плотности потока нейтронов в различных рядах ловушки до и после модернизации. Несмотря на то, что в модернизированной нейтронной ловушке количество ячеек 57 против 27-ми ячеек до модернизации, снижение плотности потоков нейтронов после модернизации, в основном, находится в пределах 10%.

Нейтронно-физические расчеты проводились по программе MCU-RR, реализующей алгоритм моделирования траекторий нейтронов в реакторе в трехмерной геометрии методом Монте-Карло. Расчетные исследования показали возможность использования РО АЗ-КО как для компенсации реактивности, так и для выполнения функций аварийной защиты с новой конструкцией нейтронной ловушки реактора СМ [3].

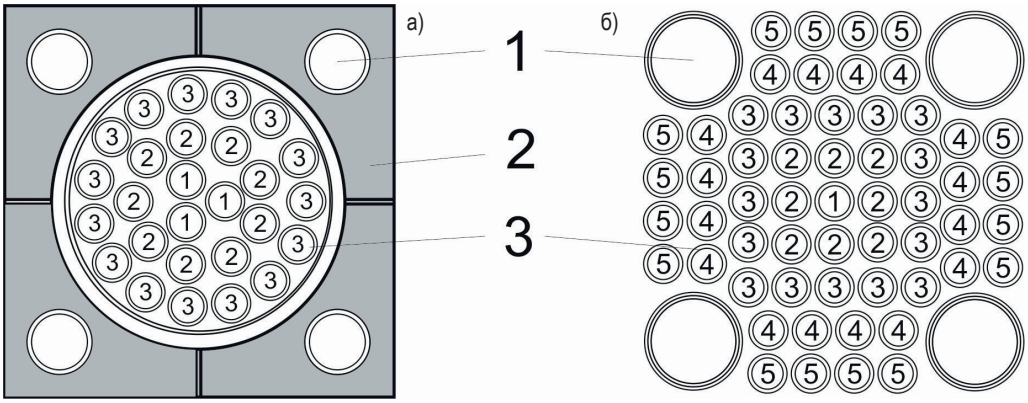


Рис. 1. Компоновка нейтронной ловушки реактора СМ-3: а) – до модернизации; б) – после модернизации; 1 – стержни аварийной защиты; 2 – бериллиевые вкладыши; 3 – экспериментальные ячейки (цифра соответствует номеру ряда ячеек)

Таблица 1

Плотности потока нейтронов в ячейках нейтронной ловушки при мощности реактора 100 МВт

Вариант	Ряд	Плотность потока нейтронов, $\times 10^{14}$, $см^{-2}\ с^{-1}$			
		0 – 0.5 эВ	0.5 – 100 эВ	0.1 – 100 кэВ	0.1 – 20 МэВ
Модернизированная ловушка	1	19.6	0.93	6.20	8.38
	2	19.0	0.94	6.27	8.72
	3	17.7	0.95	6.64	9.47
	4	15.6	0.95	7.08	10.55
	5	11.9	0.94	7.70	12.64
Ловушка до модернизации	1	19.8	1.06	7.00	8.73
	2	18.4	1.06	7.32	9.25
	3	15.5	1.06	7.88	10.33

На физической модели реактора СМ проведены экспериментальные исследования в обоснование модернизации, для этого критическая сборка реактора была приведена в соответствие с планируемой компоновкой активной зоны, были изготовлены макеты нейтронной ловушки и новых РО АЗ-КО. Проведенные исследования показали принципиальную возможность модернизации активной зоны с использованием новых РО АЗ-КО с описанным диаметром 32 мм, содержащих большее количество поглощающих элементов стандартной конструкции, с вытеснителями из бериллия, вместо РО АЗ описанным диаметром 20 мм в прежней компоновке.

В связи с изменением конструкции, массо-габаритных характеристик и требований по скоростям перемещений рабочих органов СУЗ возникла необходимость разработки и создания новых исполнительных механизмов для их перемещения и управления.

Для улучшения эксплуатационной надежности и безопасности было принято решение о замене электронной аппаратуры СУЗ на современную цифровую аппаратуру, в том числе для совместного функционирования с новыми исполнительными механизмами.

Важной и значимой научно-технической задачей проекта, которая была решена в течение реализации проекта, является выполнение комплекса работ по обоснованию тех-

нической возможности перевода реактора на более эффективное топливо, в перспективе позволяющее существенно сократить годовое потребление высокообогащенного урана. Расчетно-экспериментальные исследования, выполненные в предпроектный период, показали принципиальную возможность использования в твэлах вместо крупки диоксида урана, диспергированного в медно-бериллиевой матрице, интерметаллида урана, диспергированного в алюминиевом сплаве [4].

Для достижения поставленной цели была разработана новая конструкция твэлов малым вредным поглощением нейтронов с топливной композицией $U(Al,Si)_3$ в матрице из алюминиевого сплава Al + 2% Ni + 11,8% Si (далее – твэлы МВП). Использование алюминиевого сплава вместо медного существенно снижает вредное поглощение нейтронов в активной зоне, а легирование сплава никелем повышает коррозионную стойкость и предотвращает возможное размытие топливной композиции теплоносителем в случае разгерметизации твэлов.

Разработан стержень выгорающего поглотителя для ТВС реактора СМ-3 (далее – СВП), предназначенный для снижения неравномерности нейтронного потока в ТВС, активной зоне и обеспечения необходимых нейтронно-физических характеристик реактора. Разработана новая конструкция ТВС реактора СМ-3 в четырех исполнениях (рис. 2): а) – ТВС с СВП, б) – ТВС основного массива, в) – ТВС с четырьмя ампульными каналами, г) – ТВС с одним ампульным каналом.

Вдоль одной грани ТВС исполнения (а) (см. рис. 2а) расположены семь СВП, чередующиеся с твэлами МВП и предназначенные для гетерогенного размещения выгорающего поглотителя в активной зоне. В качестве материала поглотителя в СВП используется композиция, состоящая из смеси порошков оксида гадолиния естественного изотопного состава и оксидов циркония и ниобия. Гадолиний за счет изотопов Gd-155 и Gd-157 имеет высокое начальное значения сечения поглощения нейтронов, оптимальный темп выгорания и невысокую величину остаточного сечения поглощения нейтронов, близкую к сечению поглощения нержавеющей стали.

Во всех исполнениях ТВС используются стержневые крестообразные твэлы, аналогичные штатным твэлам по геометрическим характеристикам, твэлы МВП с описанным диаметром 5,15 мм.

Разработана технология изготовления твэлов, изготовлены опытные партии твэлов и СВП на ПАО «МСЗ» и проведены их ресурсные испытания в реакторе СМ-3.

Твэлы МВП и СВП имеют одну и ту же конструкцию, представляющую собой стержень крестообразного сечения, лопасти которого закручены спирально вдоль оси с шагом 300 ± 40 мм. Оболочка выполнена из нержавеющей стали. В качестве ядерного топлива в твэлах используется интерметаллид урана в силуминовой матрице.

В качестве поглотителя в СВП используется композиция КГНЦ, состоящая из оксидов гадолиния (ест.), ниобия и циркония. Масса Gd в СВП – 8,0 ± 0,14 г, масса композиции КГНЦ – 15,3 ± 0,3 г. При взаимодействии гадолиния с нейтронным потоком не происходит выделения газообразных продуктов, благодаря чему давление под оболочкой СВП не увеличивается

Твэлы МВП были испытаны в петлевой установке ВП-1 реактора СМ-3, суммарное время облучения составило 130 эффективных суток, максимальный тепловой поток с поверхности максимально напряженного твэла – 5,41 МВт/м^2. Среднее выгорание U-235 по ЭТВС составило 93,1%, максимально напряженного твэла – 94,7%. Показания системы КГО и мощности дозы гамма-излучения в течение всего времени испытаний твэлов МВП нахо-

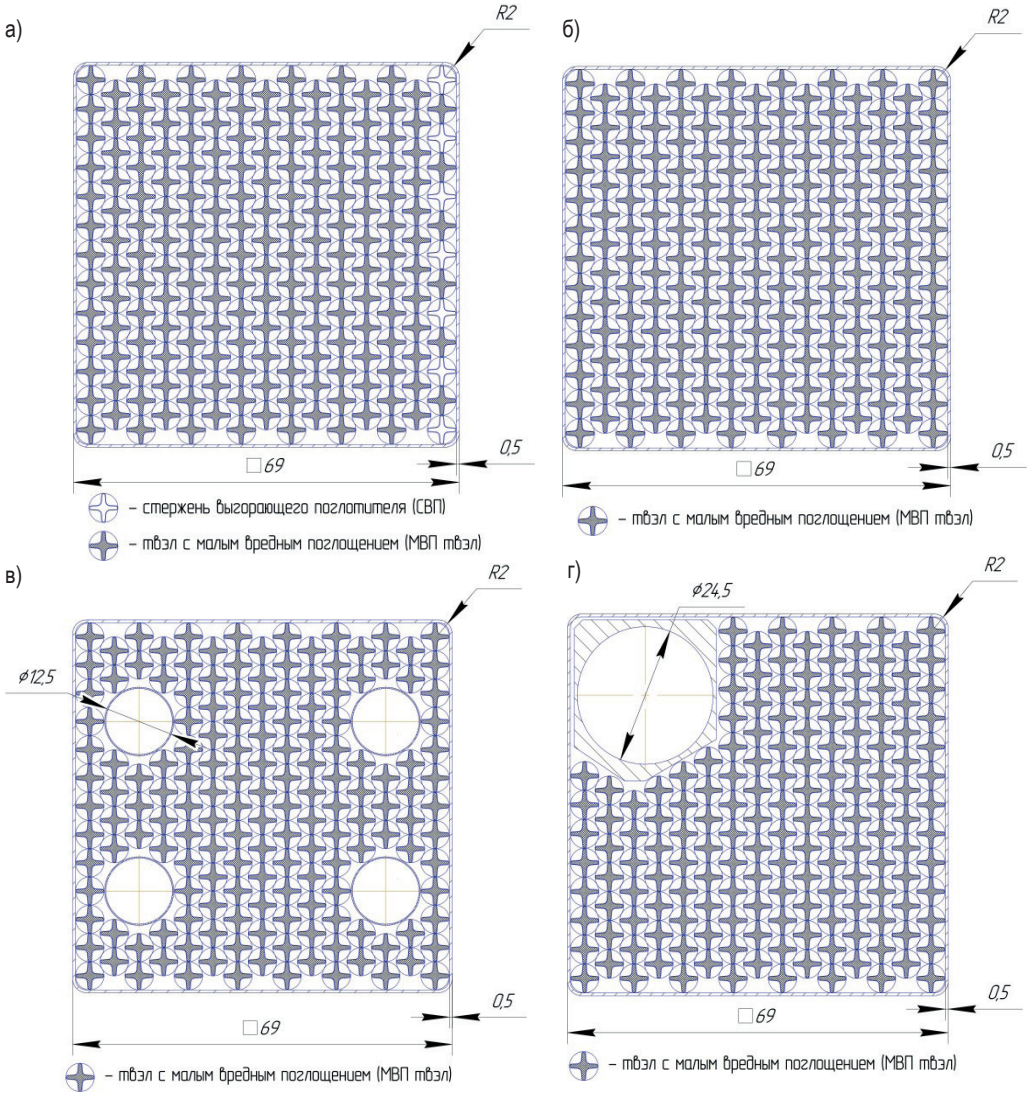


Рис. 2. Поперечное сечение ТВС с твэлами МВП: а) – ТВС с СВП; б) – ТВС основного массива; в) – ТВС с четырьмя ампульными каналами; г) – ТВС с одним ампульным каналом

дились в пределах фоновых значений, что свидетельствует о сохранении герметичности всех испытанных твэлов МВП.

После завершения ресурсных испытаний были проведены материаловедческие исследования, которые включали в себя визуальный осмотр и фотографирование внешней поверхности твэлов, измерение их геометрических размеров (объемов, параметров поперечных сечений), металлографию, электронную микроскопию, анализ элементного состава материалов топливной композиции до и после облучения. Результаты материаловедческих исследований показали удовлетворительное состояние опытных твэлов после облучения – не обнаружено их заметных искривлений, вмятин, изгибов, поверхность ровная, гладкая, чистая, с характерным металлическим блеском практически по всей высоте. Дисперсионная структура и строение топливного сердечника после облучения сохранились в удовлетворительном состоянии. Взаимодействие частиц интерметаллида урана с матрицей, свойственное таким композициям при облучении и зависящее от температуры

и интенсивности деления, незначительное. Сохранился плотный контакт между сердечником и оболочкой. Распухания за счет газовых продуктов деления не обнаружено. Положительные результаты ресурсных испытаний и послереакторных материаловедческих исследований позволяют предположить наличие резерва работоспособности в более напряженных условиях облучения и возможность увеличения ресурса твэлов такого типа за счет конструктивных доработок [5].

Испытания СВП проводились в составе штатной ТВС типа 184.09.000 ИЯУ СМ-3, в которой имеются облучательные объемы. Облучение СВП проведено в период с 07.02.2019 г. по 14.04.2019 г. (шесть кампаний). Максимальный расчетный флюенс нейтронов на оболочке СВП за время испытаний составил ~ $7{,}882 \cdot 10^{21}$ см$^{-2}$ ($E > 0{,}1$ МэВ). При визуальном осмотре СВП после завершения облучения не зафиксировано признаков повреждения, изменения внешнего вида и геометрических размеров.

В последующем необходимо решить вопросы с постановкой на промышленное производство твэлов МВП, СВП и ТВС новой конструкции с целью перевода реактора СМ-3 на новый вид топлива.

ЭТАПЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА МОДЕРНИЗАЦИИ

Реализация проекта модернизации активной зоны СМ-3 осуществлялась в рамках инвестиционного проекта Госкорпорации «Росатом» с апреля 2017 г. по октябрь 2020 г. Реактор СМ-3 на осуществление модернизации был остановлен в июле 2019 г., и через год – в июле 2020 г. были выполнены все работы по демонтажу старых и монтажу новых компонентов активной зоны, аппаратуры СУЗ и пульта управления.

Целесообразно выделить основные этапы реализации проекта:

• расчетно-экспериментальное обоснование новой компоновки активной зоны, разработка нового проекта активной зоны с увеличенным более чем в два раза объемом нейтронной ловушки, изменением конструкции, функций и количества рабочих органов и исполнительных механизмов системы и управления и защиты (ИМ СУЗ), а также аппаратуры СУЗ (АСУЗ);

• изготовление активной зоны на базе новых элементов, включая опорные и несущие конструкции, нейтронную ловушку, бериллиевый отражатель, рабочие органы и ИМ СУЗ, а также АСУЗ;

• разработка новых типов твэлов и ТВС на основе топлива с малым вредным поглощением нейтронов, реакторные и послереакторные исследования, изготовление опытной партии твэлов и обоснование возможности перевода реактора на новый вид топлива, позволяющего сократить использование высокообогащенного урана до 40%;

• разработка проектно-конструкторской, технологической и эксплуатационной документации;

• разработка технологии, демонтаж и захоронение старой активной зоны;

• монтаж и установка активной зоны на базе новых элементов, ИМ СУЗ и АСУЗ;

• пусконаладочные работы, проведение комплекса испытаний и ввод в эксплуатацию систем и оборудования;

• лицензирование, опытная эксплуатация и ввод в промышленную эксплуатацию реакторной установки СМ-3.

Все основные работы по модернизации специалисты АО «ГНЦ НИИАР» выполнили самостоятельно, включая проектно-конструкторские разработки, изготовление компонентов активной зоны, демонтажно-монтажные и пуско-наладочные работы.

Разработка, изготовление и шеф - монтаж АСУЗ были выполнены совместно с ЗАО «СНИИП-СИСТЕМАТОМ». Разработка, изготовление и шеф-монтаж электромеханических приводов СУЗ выполнены с привлечением ЗАО «Диаконт».

Все запланированные работы были выполнены в полном объеме, ввод реактора на промышленную эксплуатацию был осуществлен 10 октября 2020 г. на 1,5 месяца раньше запланированного срока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уникальная научная установка «Высокопоточный исследовательский реактор СМ-3» по значимости выполняемых прикладных и фундаментальных научных исследований включена в реестр уникальных научных установок национальной технологической базы Российской Федерации и обеспечивает решение задач, обозначенных в указе Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642 «О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». Для Российской Федерации проведенная модернизация реактора СМ-3 обеспечила

• сохранение и существенное развитие экспериментальной базы для наработки практически всей требуемой РФ и мировому рынку линейки изотопов медицинского и промышленного назначения;

• кратный рост потенциала развития ядерной медицины в РФ;

• возможности создания новых материалов и ядерного топлива для инновационных ядерно-энергетических установок на горизонте второй половины XXI в.;

• возможность проведения комплексных исследований по обращению с накопленными высокоактивными радиоактивными отходами для решения проблемы их накопления для будущих поколений;

• получение новых фундаментальных знаний, в том числе в области открытия и исследования свойств искусственно полученных сверхтяжелых элементов.

Модернизация реактора позволила кардинально нарастить его экспериментальные и производственные возможности. Количество каналов со сверхвысокой плотностью потока нейтронов увеличено с 27-ми до 57-ми штук, это обеспечило рост мощностей производства радионуклидов в 1,7 раза при существенном увеличении доступности экспериментальных каналов для прикладных и фундаментальных научных исследований. Срок эксплуатации реактора продлен до 2040 г., при этом безопасность и технико-экономические показатели существенно повысились.

Ввод в эксплуатацию реактора СМ-3 с модернизированной активной зоной обеспечивает существенное расширение возможностей экспериментальных исследований в рамках Национального проекта «Наука» и Государственной программы «Развитие атомного энергопромышленного комплекса» (РАЭПК), включая новую комплексную программу «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 г.» для обоснования инновационных проектов ядерно-энергетических установок, наработки уникальной радиоизотопной продукции и проведения фундаментальных исследований:

• по программе «Фабрика сверхтяжелых элементов» с октября 2020 г. началась наработка стартовых материалов для последующего синтеза новых элементов с атомными номерами $Z = 119$ и $Z = 120$ в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна);

• впервые за последние 50 лет начались реакторные испытания материалов в среде расплавленной соли для обоснования проектных решений жидкосолевого реактора – до-

жигателя минорных актинидов, являющегося элементом разрабатывающихся перспективных схем двухкомпонентной атомной энергетики будущего;

• в 2022 г. стартовали реакторные испытания различных типов графитовых материалов и топливных компактов в обоснование технических проектов высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов для водородной энергетики;

• разработаны технические предложения экспериментальных устройств для испытаний материалов активной зоны и корпуса перспективного реактора с водой при сверхкритических параметрах ВВЭР-СКД;

• разработаны и внедрены экономически эффективные технологии реакторной наработки и последующего выделения препаратов медицинского назначения: ^{177}Lu без носителя (патент РФ №2763745 [6]), ^{225}Ac, ^{223}Ra, налажены их поставки в медицинские радиологические центры для создания инновационных радиофармпрепаратов, предназначенных для проведения радиологической диагностики и радионуклидного лечения пациентов с онкологическими и неонкологическими заболеваниями;

• совместно с ПИЯФ им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт» создана новая нейтринная лаборатория для продолжения работ по эксперименту «Нейтрино-4», возможности которой обеспечат объяснение реакторной антинейтринной аномалии и подтвердят или опровергнут гипотезу о существовании стерильного нейтрино.

Успешно проведенная модернизация реактора СМ-3 позволила сохранить и серьезно укрепить лидирующие позиции нашей страны в области исследовательских реакторов, являющихся ключевым элементом сложного научно-технического комплекса, работающего над созданием инновационных ядерных технологий для их использования в различных отраслях экономики, и значимо расширить российское присутствие на мировых рынках ядерных НИОКР и услуг.

Комплексная модернизация и продление срока эксплуатации уникальной научной установки – исследовательского реактора СМ-3 имеют стратегическое значение для научно-технологического и инновационного развития Российской Федерации.

Литература

1. The IAEA Research Reactor Database (RRDB). Электронный ресурс: https://nucleus.iaea.org/rrdb/#/home/ (дата доступа 27.03.2024).

2. *Izhutov A.L., Malkov A.P., Petelin A.L., Sazontov S.A., Starkov V.A.* SM reactor core modernization program / Proc. of the European Research Reactor Conference (RRFM 2017), Rotterdam, The Netherlands, 2017, A0093. Электронный ресурс: https://www.euronuclear.org/download/proceedings-rrfm-2017/ (дата доступа 27.03.2024).

3. *Izhutov A.L., Starkov V.A., Pimenov V.V., Marikhin N.Yu.* SM-3 reactor characteristics after core modernization / Proc. of the European Research Reactor Conference (RRFM 2017), Rotterdam, The Netherlands, 2017, A0094. Электронный ресурс: https://www.euronuclear.org/download/proceedings-rrfm-2017/ (дата доступа 27.03.2024).

4. *Клинов А.В., Калинина Н.К., Марихин Н.Ю., Пименов В.В., Петелин А.Л., Старков В.А., Федосеев В.Е.* Испытания экспериментальных ТВС с малым вредным поглощением нейтронов в реакторе СМ. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – № 2. – С. 114 – 122.
DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2013.2.14

5. *Гильмутдинов Илгиз Ф., Шишин В.Ю., Ижутов А.Л., Марихин Н.Ю., Ефимов Е.И.* Послереакторные исследования опытных твэлов с малым вредным поглощением на основе интерметаллида урана с пониженным обогащением. Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» (отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2020 г.) – Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2021.

– С. 152 – 154. Электронный ресурс: http://niiar.ru/sites/default/files/ngo-2020_1.pdf (дата доступа 27.03.2024).

6. *Андреев О.И., Гончарова Г.В., Дитяткин В.А., Зотов Э.А.* Способ катионообменного выделения радионуклида лютеция-177 из облученного в ядерном реакторе иттербия. – Патент РФ №2763745 С1. Дата заявления: 02.06.2021, дата публикации: 10.01.2022.

Поступила в редакцию 28.03.2024

Авторы

Тузов Александр Александрович, директор, к.т.н.,
E-mail: niiar@niiar.ru
Ижутов Алексей Леонидович, заместитель директора – научный руководитель, к.т.н.,
E-mail: izhutov@niiar.ru
Малков Андрей Павлович, начальник службы ядерной безопасности, д.т.н.,
E-mail: malkov@niiar.ru
Петелин Алексей Леонидович, начальник отделения «Реакторный исследовательский комплекс»,
E-mail: pal@niiar.ru
Сазонтов Сергей Аркадьевич, главный инженер департамента исследовательских реакторов отделения «Реакторный исследовательский комплекс»,
E-mail: ssa@niiar.ru

UDC 621.039.55

SM-3 Core Refurbishment Project

Tuzov A.A., Izhutov A.L., Petelin A.L., Malkov A.P., Sazontov S.A.

JSC «SSC RIAR»,
9 Zapadnoye Sh., 433510 Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., Russia

Abstract

Research reactor SM-3 is a high-flux water-cooled vessel-type research reactor with a neutron trap that operates in the intermediate neutron spectrum. SM-3 has the highest neutron flux density in the world more than 10^{15} $cm^{-2}s^{-1}$, and this is one of the unique Russia's facilities to carry out applied research in nuclear power engineering and accumulate radioisotopes. The high thermal neutron flux density is achieved in a moderating trap in the core center. SM-3 is under operation since 1961 and serves for irradiation of reactor materials under the specified conditions to examine changes in their properties and accumulation of radionuclides and transplutonium elements. In July 2019, SM-3 was stopped for refurbishment, the main goals of which were: replacing obsolete core and control&safety equipment, extending the reactor lifetime, enlarging its experimental capabilities and improving its efficiency. The number of experimental cells for high-flux irradiation with a high neutron flux density doubled from 27 to 57, which significantly increases the accumulation of transuranium elements and radionuclides, such as cobalt-60, selenium-75, tungsten-188, lutetium-177, strontium-89 and others. Neutronic and thermohydraulic characteristics of the reactor have been checked and their compliance with design values has been confirmed. The reactor was brought to the designed power on October 10, 2020 one month earlier than planned by the Project. All major refurbishment activities were performed by RIAR's specialists, including design and development, manufacturing of core components, dismantling,

start-up and commissioning. Reactor refurbishment will increase the scope of ongoing R&D and radioisotopes accumulation by 40%. The reactor has become more reliable and safer, its lifetime can be extended beyond 2040. This article describes the main scientific and technical solutions, content and results of work on refurbishment the SM-3 reactor.

Keywords: SM-3 reactor, core, neutron trap, modernization, nuclear fuel, fuel rods, RCPS, radionuclides.

For citation: Tuzov A.A., Izhutov A.L., Petelin A.L., Malkov A.P., Sazontov S.A. SM-3 Core Refurbishment Project. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika.* 2024, no. 2, pp. 30 – 40; DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.03 (in Russian).

References

1. The IAEA Research Reactor Database (RRDB). Available at: https://nucleus.iaea.org/rrdb/#/home/ (accessed Mar.27, 2024).

2. Izhutov A.L., Malkov A.P., Petelin A.L., Sazontov S.A., Starkov V.A. SM reactor core modernization program. *Proc. of the European Research Reactor Conference (RRFM 2017). Rotterdam, The Netherlands, 2017, A0093.* Available at: https://www.euronuclear.org/download/proceedings-rrfm-2017/ (accessed Mar.27, 2024).

3. Izhutov A.L., Starkov V.A., Pimenov V.V., Marikhin N.Yu. SM-3 reactor characteristics after core modernization. *Proc. of the European Research Reactor Conference (RRFM 2017). Rotterdam, The Netherlands, 2017, A0094.* Available at: https://www.euronuclear.org/download/proceedings-rrfm-2017/ (accessed Mar.27, 2024).

4. Klinov A.V., Kalinina N.K., Marikhin N.Yu., Pimenov V.V., Petelin A.L., Starkov V.A., Fedoseev V.E. Tests of experimental low neutron poisoning fuel assemblies in reactor SM. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika.* 2013, no. 2, pp. 114 – 122; DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2013.2.14 (in Russian).

5. Gilmutdinov Ilgiz F., Shishin V.Yu., Izhutov A.L., Marikhin N.Yu., Efimov E.I. *Post- irradiation examinations of experimental fuel rods with low harmful absorption based on uranium intermetallic with reduced enrichment. Annual report SSC RIAR 2021.* Dimitrovgrad, SSC RIAR Publ., 2021, pp. 152 – 154 Available at: http://niiar.ru/sites/default/files/ngo-2020_1.pdf (accessed Mar.27, 2024) (in Russian).

6. Andreyev O.I., Goncharova G.V., Dityatkin V.A., Zotov E.A. *Method for the cation-exchange extraction of the radionuclide lutetium-177.* Patent RF, No 2763745 C1, 2021 (in Russian).

Authors

Alexandr A. Tuzov, Director, Cand. Sci. (Engineering),
E-mail: niiar@niiar.ru
Alexey L. Izhutov, Deputy Director – Science&Research, Cand. Sci. (Engineering),
E-mail: izhutov@niiar.ru
Andrey P. Malkov, Head of Service, Dr. Sci. (Engineering),
E-mail: malkov@niiar.ru
Alexey L. Petelin, Department Director,
E-mail: pal@niiar.ru
Sergey A. Sazontov, Chief Engineer of Department ,
E-mail: ssa@niiar.ru