

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  $5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$  среди остальных действующих исследовательских реакторов. 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. Реактор СМ-3 обеспечивает научно-техническое лидерство Российской Федерации в следующих направлениях:

- внутриреакторные исследования физико-механических свойств материалов ядерных и термоядерных реакторов при воздействии высокодозного нейтронного облучения при температурах до 3000 °С;
- фундаментальные научные исследования с использованием реакторного излучения.

С учетом значимости выполняемых прикладных и фундаментальных исследований реактор СМ-3 был включен в реестр уникальных научных установок национальной технологической базы Российской Федерации. Реактор в настоящее время успешно работает для достижения приоритетов научно-технологического развития страны, обозначенных в Указе Президента РФ от 01.12.2016 № 642 «О стратегии научно-технологического развития РФ».

Реактор СМ-3 был введен в эксплуатацию в 1961 году, в процессе работы несколько раз модернизировался и с момента предыдущей реконструкции в 1992 году проработал более четверти века. Продленный ресурс установки, определявшийся работоспособностью внутрикорпусных устройств реактора, заканчивался к 2020-му году. Прекращение эксплуатации реактора СМ-3 привело бы к крайне негативным последствиям для России. Страна полностью потеряла бы возможности производства источников нейтронного излучения большой мощности для оборонных

применений с возникновением критической зависимости от импорта из США. Невозможно стало бы дальнейшее развитие отечественных средств технической диагностики и дефектоскопии с помощью источников на основе изотопов  $^{60}\text{Co}$  и  $^{192}\text{Ir}$  с высокой удельной активностью. Медицинские учреждения страны попали бы в критическую зависимость от импорта сырьевых радионуклидных препаратов на основе  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{225}\text{Ac}$ ,  $^{223}\text{Ra}$  при проведении перспективных исследований по разработке и внедрению новых отечественных, в том числе и импортозамещающих, радиофармацевтических лечебных и диагностических препаратов.

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 века;

- 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 СМ-3 преследовала две основные цели: создание нового проекта активной зоны с улучшенными экспериментальными и производственными характеристиками; и проведение замены конструкций активной зоны для продления срока эксплуатации реактора как минимум до 2040 года.

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 за счет исключения из конструкции активной зоны центрального компенсирующего органа (ЦКО) и создания новых органов аварийной защиты с совмещением функций ЦКО. 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.

Работы проходили в несколько этапов и включали в себя:

- расчетно-экспериментальное обоснование новой активной зоны и разработку нового проекта активной зоны с изменением конструкции, функций и количества рабочих органов и исполнительных механизмов системы управления и защиты (ИМ СУЗ), а также ее аппаратуры (АСУЗ);

- изготовление собственными силами института новых элементов активной зоны, включая опорные и несущие конструкции, нейтронную ловушку; изготовление и поставку бериллиевого отражателя, рабочих органов и ИМ СУЗ, а также АСУЗ;

- разработку новых типов ТВЭлов и ТВС, изготовление, реакторные и послереакторные исследования 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 для выполнения работ;

- разработка технологии демонтажа и захоронения старой активной зоны;

- монтаж и установка новой активной зоны;

- проведение испытаний и ввод в эксплуатацию систем и оборудования;

– лицензирование, опытная эксплуатация и ввод в промышленную эксплуатацию реакторной установки;

– разработка и внедрение новых экспериментальных методик и производственно-технологических процессов, обеспечивающих решение научных и практических задач современной ядерной физики, получения новых трансплутониевых элементов и наработки радионуклидов для ядерной медицины.

Модернизация активной зоны СМ-3 велась в рамках инвестиционного проекта Госкорпорации «Росатом» в течение трех лет. Все запланированные работы были выполнены в полном объеме, ввод реактора в промышленную эксплуатацию был успешно осуществлен 10 октября 2020 года 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».

Модернизация реактора позволила кардинально нарастить его экспериментальные и производственные возможности. Количество каналов со сверхвысокой плотностью потока нейтронов увеличено с 27 до 57 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 года, 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 года» для обоснования инновационных проектов ядерно-энергетических установок, наработки уникальной радиоизотопной продукции и проведения фундаментальных исследований.

По программе «Фабрика сверхтяжелых элементов» с октября 2020 года началась наработка стартовых материалов для синтеза новых элементов с атомными номерами  $Z=119$  и  $Z=120$  в ОИЯИ (г. Дубна). Синтез и изучение свойств сверхтяжелых элементов (СТЭ) являются фундаментальным направлением в современной ядерной физике. Исследования в этой области активно проводятся как в нашей стране, так и в ядерных центрах других стран (Германия, Япония, США, Франция). СТЭ получают путем облучения мишеней, содержащих изотопы трансплутониевых элементов, полученных в реакторе СМ-3, ускоренными до заданных энергий ионами легких химических элементов. Благодаря работам, выполненным в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова ОИЯИ (ЛЯР ОИЯИ), в последние годы были синтезированы новые сверхтяжелые элементы с порядковыми номерами 114 (Флеровий), 115 (Московский), 116 (Ливерморий), 117 (Теннессин) и 118 (Оганесон), а также изучены их ядерно-физические свойства. Для синтеза новых элементов с атомными номерами  $Z=119$  и  $Z=120$  на новом ускорительном комплексе ОИЯИ потребуются мишени с изотопами  $^{249}\text{Bk}$ ,  $^{251}\text{Cf}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ . Без успешно проведенной модернизации реактора СМ-3 и последующего продления срока его эксплуатации выполнение этих пионерских фундаментальных работ было бы невозможно.

Впервые за последние 50 лет начались испытания материалов в среде расплавленной соли для обоснования решений жидкосолевого реактора – дожигателя минорных актинидов, являющегося элементом двухкомпонентной атомной энергетики будущего. Наличие в

АО «ГНЦ НИИАР» реактора СМ-3 позволяет, в том числе, отработать технологии дожигания долгоживущих отходов ядерной энергетики – минорных актинидов, долгосрочная стратегия обращения с которыми в настоящее время не выбрана ни в одной стране мира.

Проводятся реакторные исследования поведения конструкционных материалов и топлива в обоснование технических проектов высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов для водородной энергетики.

Проводится экспериментальное обоснование работоспособности материалов перспективных реакторов ВВЭР-С, ВВЭР-СКД и других ядерно-энергетических систем 4-го поколения.

Разработаны и внедрены экономически эффективные технологии реакторной наработки и последующего выделения препаратов медицинского назначения:  $^{177}\text{Lu}$  без носителя (патент RU 2763745),  $^{225}\text{Ac}$ ,  $^{223}\text{Ra}$ , налажены их поставки в медицинские радиологические центры, в частности совместно с Медицинским радиологическим научным центром имени А.Ф. Цыба – филиалом ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России создаются инновационные радиофармпрепараты на основе  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{225}\text{Ac}$ ,  $^{223}\text{Ra}$ , предназначенные 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.

Результаты научных исследований, полученные с использованием реакторной установки СМ-3, публиковались в высокорейтинговых российских и зарубежных научных журналах с высокими импакт-факторами. За последние 5 лет опубликовано 22 статьи в журналах, индексируемых

информационно-библиотечными системами Web of Science и Scopus, индекс цитирования которых составляет 72. Опубликовано более 20 докладов на международных и российских конференциях. Получено 3 патента РФ на изобретения, зарегистрировано 4 секрета производства (ноу-хау) и 5 программ для ЭВМ.

Успешно проведенная модернизация реактора СМ-3 позволила не только сохранить российское присутствие на мировых рынках ядерных НИОКР и услуг, но и серьезно укрепить лидирующие позиции нашей страны в области исследовательских реакторов, которые являются ключевой частью сложного научно-технического комплекса, работающего над созданием инновационных ядерных технологий для использования в различных отраслях экономики, включая оборонно-промышленный комплекс.

Продление срока эксплуатации реакторной установки СМ-3, безусловно, имеет существенное влияние на социально-экономические аспекты для региона – суммарный эффект от реализации проекта составит до 2026 года около 28 млрд руб. при собственных инвестициях в проект 0,5 млрд руб. Сохранено более 750 рабочих мест высококвалифицированного персонала реактора, научных и производственных подразделений института, исторически являющегося градообразующим предприятием города Димитровграда Ульяновской области.

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