

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ СМ-3, ПРИНЯТЫЕ РЕШЕНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ РЕСУРСА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Тузов А.А., Ижutow А.Л., Петелин А.Л., Гурьева М.Н., Сазонтов С.А., Винокуров В.С.

АО «ГНЦ НИИАР»,

433510, Ульяновская обл., г. Димитровград, Западное шоссе, д. 9



Представлена информация об основных конструкторских решениях, принятых в ходе реализованного в АО «ГНЦ НИИАР» инвестиционного проекта Госкорпорации «Росатом» по модернизации активной зоны исследовательского реактора СМ-3. Основными целями модернизации реактора СМ-3 являлись создание новой активной зоны с улучшенными экспериментальными характеристиками и проведение замены конструкций активной зоны для продления срока эксплуатации реактора. Описаны особенности модернизированной центральной зоны уникальной научной установки – высокотоочного реактора СМ-3, выполнен сравнительный анализ ее характеристик с конструкцией, находившейся в эксплуатации с 1993 по 2019 гг. В новой нейтронной ловушке удалось расположить за счет эффективного использования полезного объема 57 ячеек со сверхвысокой плотностью потока нейтронов для облучения мишеней вместо 27-ми ячеек в старой конструкции за счет исключения из конструкции активной зоны центрального компенсирующего органа (ЦКО) и создания новых органов аварийной защиты с совмещением функций ЦКО. Рассмотрены пути решения проблем, возникавших на всех стадиях реализации проекта, включая демонтаж, транспортировку и размещение на длительное хранение выработавших ресурс элементов, создание новой центральной зоны и ее установку в корпус реактора. Опыт эксплуатации реактора с новой активной зоной подтвердил правильность разработанных технических решений и продемонстрировал эксплуатационную надежность и безопасность эксплуатации реактора СМ-3.

Ключевые слова: реактор СМ-3, модернизация центральной зоны, нейтронная ловушка.

Для цитирования: Тузов А.А., Ижutow А.Л., Петелин А.Л., Гурьева М.Н., Сазонтов С.А., Винокуров В.С. Разработка конструкции модернизированной центральной зоны реакторной установки СМ-3, принятые решения и обоснование ресурса эксплуатации. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 2. – С. 74–82. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.06>

ВВЕДЕНИЕ

Исследовательский реактор СМ-3 на промежуточных нейтронах тепловой мощностью 100 МВт имеет плотность потока нейтронов более $5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ и является самым высокопоточным материаловедческим реактором в мире. СМ-3 используется для исследования физико-механических свойств материалов ядерных реакторов под воздействием нейтронного облучения, проведения фундаментальных научных исследований, наработки трансплутониевых элементов (ТПЭ) и радионуклидов с высокой удельной активностью. В период с июля 2019 г. по октябрь 2020 г. была проведена радикальная модернизация реактора с заменой всех внутрикорпусных устройств. Решение по его модернизации было принято в связи с предстоящим окончанием срока эксплуатации, без модернизации дальнейшая работа реактора была бы невозможна.

Конструкция нового внутрикорпусного оборудования разрабатывалась в рамках концепции, предусматривающей решение следующих задач проекта: обеспечение возможности увеличения объема и количества облучательных ячеек с высокой плотностью потока нейтронов $\geq 2 \cdot 10^{15}$ в новой центральной нейтронной ловушке реактора с заменой рабочих органов аварийной защиты на вновь разработанные универсальные органы с одновременным выполнением функций аварийной защиты и компенсации реактивности при исключении центрального компенсирующего органа [1].

Все поставленные цели достигнуты, в результате модернизации значительно увеличена наработка изотопов, повышены надежность и безопасность эксплуатации реактора, минимум до 2040 г. продлен срок его эксплуатации.

КОНСТРУКЦИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Центральная зона исследовательской ядерной установки СМ-3 предназначена для размещения активной зоны с жестким спектром нейтронов, отражателя, нейтронной ловушки со сверхвысоким потоком тепловых нейтронов.

Активная зона с размерами в плане 420×420 мм состоит из 36-ти ячеек, занятых ТВС, компенсирующими органами, органами аварийной защиты и нейтронной ловушкой. Высота активной зоны 350 мм. В угловых ячейках активной зоны установлены компенсирующие органы системы управления и защиты реактора.

До модернизации центральную часть активной зоны размером 140×140 мм занимали нейтронная ловушка цилиндрической формы, центральный компенсирующий орган кольцевой формы, а по углам располагались бериллиевые вкладыши, внутри которых были направляющие трубы рабочих органов аварийной защиты.

Тепловыделяющие сборки (ТВС) активной зоны, конструктивные элементы нейтронной ловушки, блоки отражателя из металлического бериллия, направляющие трубы рабочих органов системы управления и защиты (СУЗ) располагались в ячейки опоры центральной зоны, которая была установлена на опорное кольцо еще одного внутрикорпусного элемента – экрана.

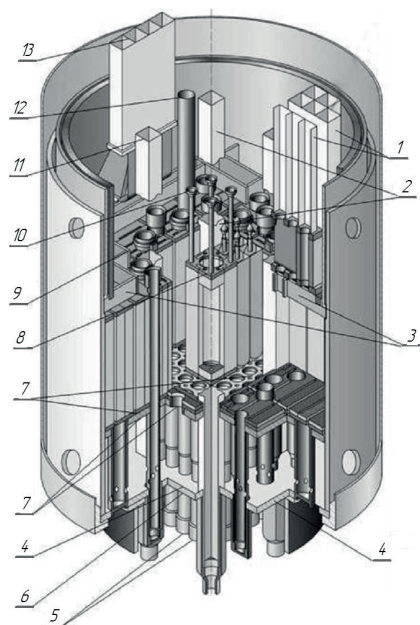


Рис. 1. Центральная зона до модернизации: 1 – большое хранилище ТВС; 2, 11 – направляющая труба КО; 3 – прижимная решетка; 4 – нижняя плита опоры; 5 – диффузоры; 6 – низ нижней плиты опоры; 7 – верхняя плита опоры; 8 – центральные бериллиевые вкладыши; 9 – верх прижимной решетки; 10 – направляющая труба АЗ; 12 – направляющая труба АР; 13 – малое хранилище ТВС

Конструкция центральной зоны в сборе представлена на рис. 1.

При эксплуатации реактора существенным воздействиям нейтронного и гамма-излучения, статических и динамических нагрузок подвергается верхняя плита опоры центральной зоны, представленной на рис. 2. Именно она определяет установленный срок службы центральной зоны – 25 лет.

В рамках модернизации [2] произошли следующие изменения в компоновке активной зоны (рис. 3):

- исключен центральный компенсирующий орган;
- исключены центральные бериллиевые вкладыши;
- модернизированы рабочие органы аварийной защиты (РО АЗ) в органы аварийной защиты – компенсирующие органы

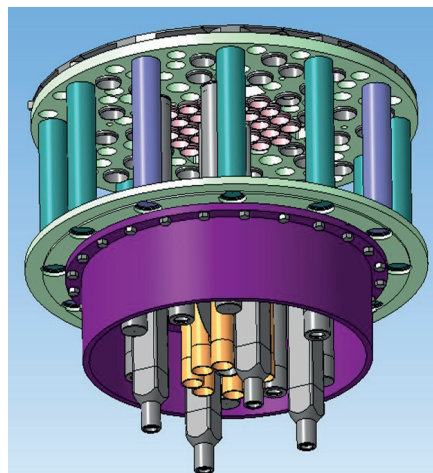


Рис. 2. Опора центральной зоны

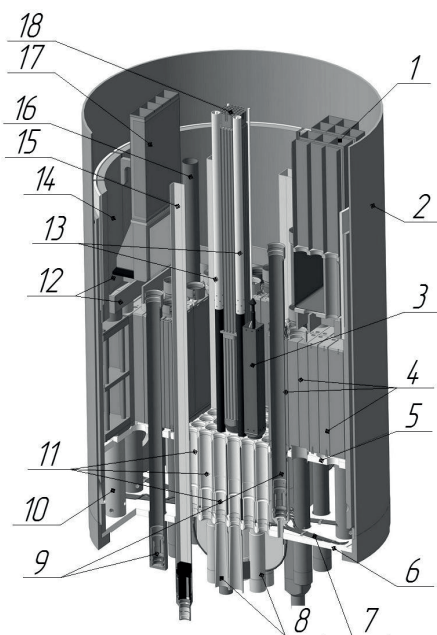


Рис. 3. Центральная зона после модернизации: 1 – большое хранилище ТВС; 2 – экран; 3 – ТВС; 4 – бериллиевые блоки; 5 – верхняя плита опоры; 6 – нижняя плита опоры; 7 – трубки КГО; 8 – диффузоры; 9 – трубы; 10 – стакан; 11 – гнездо под ТВС; 12 – прижимная решетка; 13 – направляющие трубы РО АЗ-КО; 14 – корпус центральной зоны; 15 – труба КО; 16 – труба АР; 17 – малое хранилище ТВС; 18 – нейтронная ловушка

(РО АЗ-КО) с увеличением описанного диаметра и количества поглощающих элементов (пэлов) и включением в состав РО нижнего вытеснителя с замедляющим нейтроны материалом (металлическим бериллием).

Сложность реализации данных изменений заключалась в плотной «архитектуре» элементов существующей конструкции в районе активной зоны, а также ограничениях по размерам центрального отверстия для выполнения перегрузки мишеней и отверстий под размещение модернизированных органов АЗ-КО в существующей крышке реактора. При этом из-за разности в координатах органы АЗ-КО расположились под небольшим углом к вертикальной оси и со сближением в районе активной зоны (рис. 4).

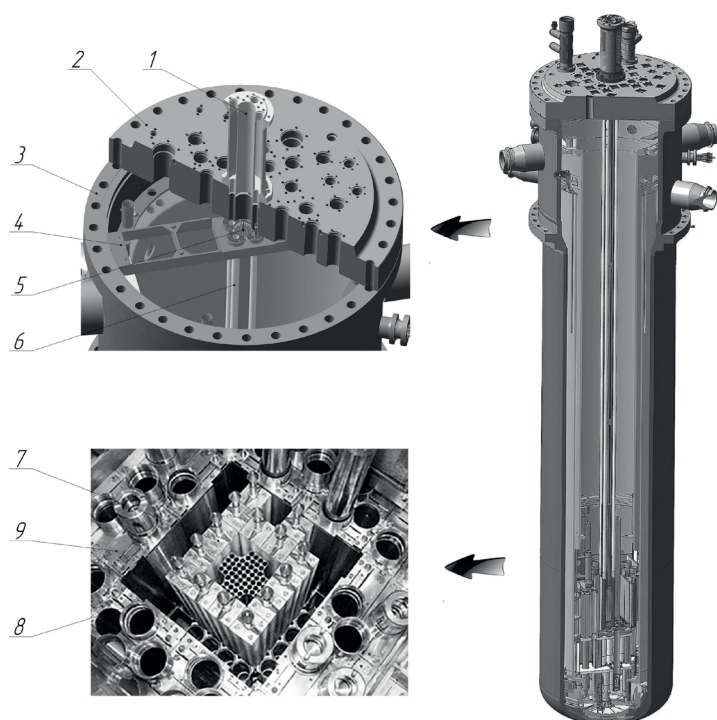


Рис. 4. Вертикальный разрез реактора; крышка и вид новой активной зоны: 1 – центральный стояк; 2 – крышка реактора; 3 – корпус реактора; 4 – установочная плита; 5 – нейтронная ловушка; 6 – направляющая труба РО АЗ-КО; 7 – ТВС; 8 – хвостовик нейтронной ловушки; 9 – бериллиевые блоки отражателя

Принятые конструкторские решения позволили увеличить надежность и безопасность реактора за счет уменьшения количества органов СУЗ и их исполнительных механизмов – отказа от наиболее эффективного центрального компенсирующего органа кольцевой формы в нейтронной ловушке и перераспределение его функций как компенсатора реактивности на четыре РО АЗ-КО цилиндрической формы при сохранении всех требуемых функций СУЗ, и при этом разместить нейтронную ловушку новой конструкции с увеличенным количеством ячеек [3].

В результате разработки новой конструкции нейтронной ловушки удалось расположить за счет эффективного использования полезного объема в общем 57 ячеек для облучения мишеней вместо 27-ми ячеек в старой конструкции, из них 41 ячейка с перегрузкой через

центральное отверстие в крышке реактора. Крайний ряд – 16 ячеек – обслуживается через свободные отверстия в крышке реактора.

Новая ловушка нейтронов представляет собой сепараторную конструкцию из 57-ми трубок. Трубки с конфигурации нижнего уровня с плавным изгибом переходят в плотный пучок на верхний уровень, дистанционируются между собой с помощью фланцев на нескольких уровнях. Блок направляющих трубок по всей длине закрыт кожухом, который служит для защиты направляющих труб от деформации и механических повреждений и обеспечивает конструкцию дополнительной жесткостью. Во фланцах нескольких уровней выполнены четыре паза в виде полуотверстий для фиксации направляющих труб РО АЗ-КО. Новая конструкция ловушки представлена на рис. 5.

Так как плотность ячеек нейтронной ловушки увеличилась, обслуживание оператором (перегрузка мишеней в ячейках ловушки) без специальных приспособлений было бы очень затруднительно и увеличивало временные затраты на проведение работ. Для решения этой проблемы была разработана специальная направляющая для загрузки мишеней (рис. 6).

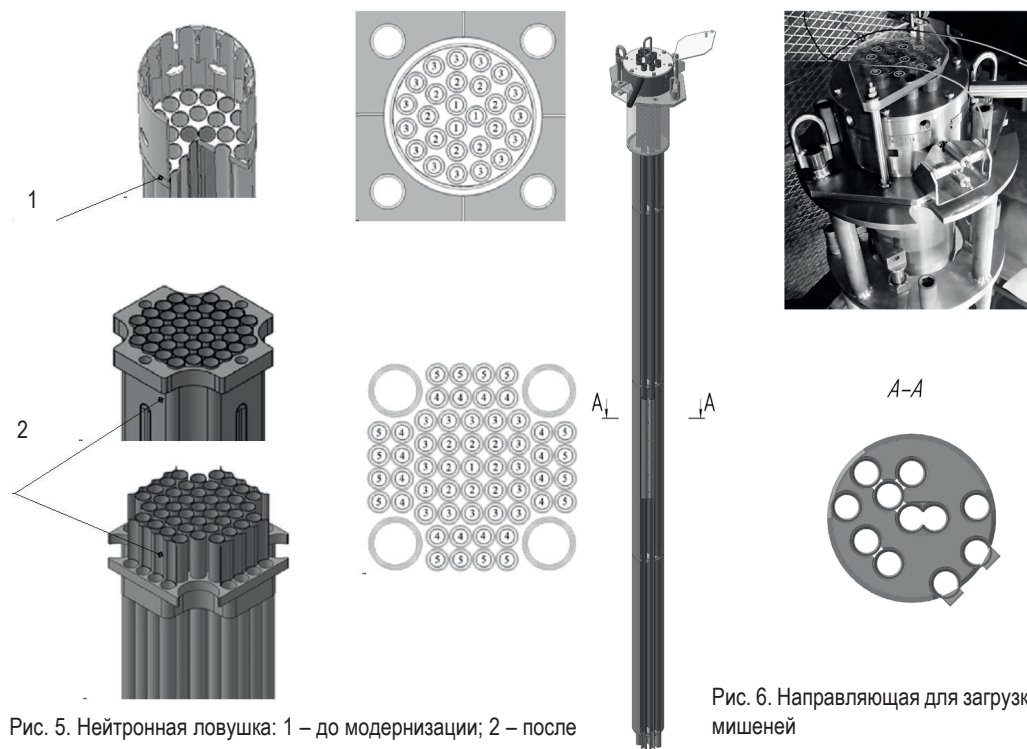


Рис. 5. Нейтронная ловушка: 1 – до модернизации; 2 – после модернизации

Рис. 6. Направляющая для загрузки мишеней

Направляющая позволяет координировать захват при выполнении транспортных операций по загрузке (выгрузке) мишеней и представляет собой поворотный блок из 11-ти труб, имеющий четыре рабочих положения, что позволяет обслуживать 41 ячейку нейтронной ловушки. На головной части направляющей закреплена картограмма, показывающая нумерацию ячеек.

При реализации проекта было необходимо решить проблему минимизации «паразитных» протечек теплоносителя между вновь изготовленной центральной зоной и экраном. Контактные поверхности в предшествующем варианте специальным образом притирались

для достижения максимальной плотности прилегания, без выполнения этой операции была достаточно высокая вероятность увеличения паразитного объема протечек теплоносителя.

Для решения данной проблемы было принято решение разработать уплотнение из нержавеющей стали, так как применять в условиях эксплуатации реактора другой материал невозможно (рис. 7). Было разработано и испытано на макете несколько конструкций уплотнений [4]. Вариант конструкции с конической обечайкой переменной толщины показал лучшие результаты и подтвердил свою работоспособность. Расчетная модель работы уплотнения под действием нагрузки от веса центральной зоны и перепада давления на активной зоне, равного 0,6 МПа, подтвердила необходимые прочностные свойства конструкции с учетом цикличности нагрузок.

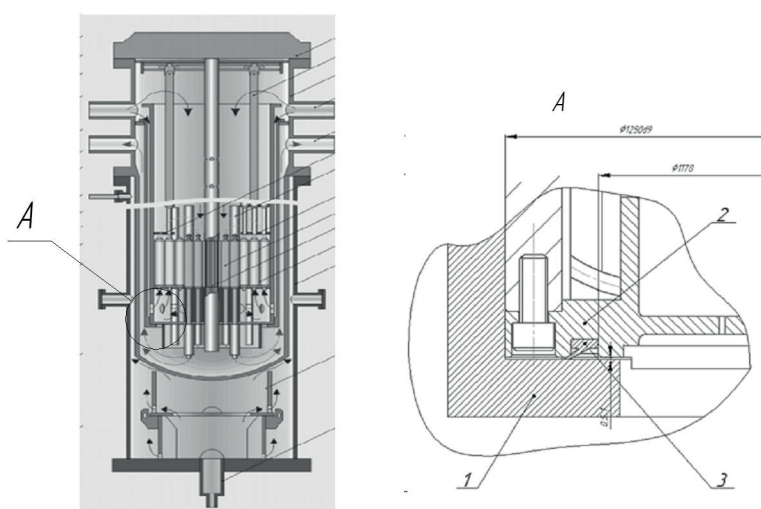


Рис. 7. Уплотнение центральной зоны: 1 – экран; 2 – центральная зона; 3 – уплотнение

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДЕМОНТАЖА И МОНТАЖА

Конструкция центральной зоны имеет 35 трубок контроля герметичности оболочек твэлов и две импульсные трубки для контроля перепада давления. Данные трубки проходят четырьмя пучками от центральной зоны вдоль экрана и соединяются с помощью разъёмных соединений с блоками проходок через корпус реактора.

Эта особенность конструкции потребовала создания комплекта инструмента и приспособлений.

Для демонтажа были разработаны резак и гибочное приспособление для дистанционной работы по удалению трубок от корпуса центральной зоны. Для минимизации дозовой нагрузки персонала, проводящего демонтаж трубок от блоков проходок, в шахте реактора была установлена подвесная корзина с биологической защитой в виде свинцовых матов.

Для монтажа трубок и их объединения в пучки был сконструирован специальный стенд, состоящий из стапеля, на который устанавливалась центральная зона в сборе с траверсой, и каркаса, установленного на стойки для конфигурации пучков (рис. 8).

Монтаж труб осуществлялся с лесов, после чего с помощью грузоподъемного крана центральная зона в сборе была перегружена в шахту реактора и установлена на экран.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении модернизации активной зоны реактора СМ-3 конструкторами Департамента проектирования и конструирования АО «ГНЦ НИИАР» успешно выполнены работы высокого уровня сложности. Разработаны конструкции целого набора сложнейших внутриреакторных устройств, учитывающие как многолетний опыт эксплуатации, так и необходимость решения поставленных амбициозных задач. Результаты, полученные при выполнении пусконаладочных работ, изучении физических характеристик установки, и успешная работа реактора после реконструкции подтверждают правильность принятых конструкторских решений.

Успешно проведенная модернизация реактора СМ-3 позволила сохранить и серьезно укрепить мировое лидерство Российской Федерации в области высокопоточных исследовательских реакторов, являющихся ключевым элементом экспериментальной базы для создания инновационных ядерных технологий и их использования в различных отраслях экономики.

Опыт эксплуатации реактора с новой активной зоной подтвердил правильность разработанных технических решений и продемонстрировал эксплуатационную надежность и безопасность эксплуатации реактора СМ-3.

Литература

1. Tuzov A.A., Izhutov A.L., Petelin A.L., Divnogorsky A.V. Status of the SM-3 reactor core refurbishment / Proc. of the European Research Reactor Conference (RRFM 2019), Jordan, 2019. Электронный ресурс: <https://www.euronuclear.org/download/rrfm-2019-part-3/> (дата доступа 08.04.2024).
2. Петелин А.Л., Гурьева М.Н., Сазонтов С.А., Винокуров В.С., Булгаков Б.В. Разработка конструкции модернизированной центральной зоны реакторной установки СМ: принятые решения и обоснование ресурса эксплуатации / Международная конференция «Безопасность исследовательских ядерных установок», г. Димитровград, 19-21 мая 2021 г. – Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2021. С. 24–25. Электронный ресурс: http://niiar.ru/sites/default/files/conproc/tezisy_bezopasnost_iyau_19-21.05.21.pdf (дата доступа 08.04.2024).
3. Петелин А.Л., Сазонтов С.А., Малков А.П., Насыров Н.Р., Винокуров В.С., Петров Р.В., Петров А.Г., Осипов А.А., Заикин А.А., Садов И.В., Чуприков М.В., Чигинцев Г.Д., Шиманский С.А., Кошкин В.В. Модернизация аппаратуры системы управления и защиты реакторной установки СМ / Международная конференция «Безопасность исследовательских ядерных установок», г. Димитровград, 19–21 мая 2021 г. – Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2021. – С. 33–35. Электронный ресурс: http://niiar.ru/sites/default/files/conproc/tezisy_bezopasnost_iyau_19-21.05.21.pdf (дата доступа 08.04.2024).

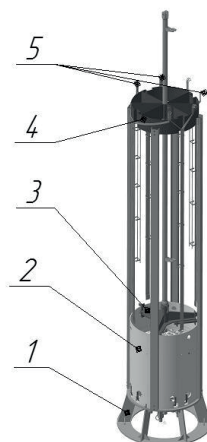


Рис. 8. Стенд для подготовки центральной зоны к монтажу: 1 – ступень; 2 – центральная зона; 3 – траверса; 4 – каркас; 5 – трубки КГО

4. *Шадьмова Т.А., Винокуров В.С., Иванов В.В.* Устройство для герметизации соединения между корпусом и верхним защитным перекрытием ядерного реактора. Патент РФ № 213678 U1. Дата заявления: 18.04.2022, дата публикации: 21.09.2022.

Поступила в редакцию 09.04.2024

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

Петелин Алексей Леонидович, начальник отделения «Реакторный исследовательский комплекс»,

E-mail: pal@niiar.ru

Гурьева Марина Николаевна, начальник департамента по проектированию и конструированию,

E-mail: mnguryeva@niiar.ru

Сазонтов Сергей Аркадьевич, главный инженер департамента исследовательских реакторов отделения «Реакторный исследовательский комплекс»,

E-mail: ssa@niiar.ru

Винокуров Вячеслав Сергеевич, заместитель начальника департамента – начальник управления конструкторских разработок департамента по проектированию и конструированию,

E-mail: vsvinokurov@niiar.ru

UDC 621.039.566

Design Engineering of the Refurbished Central Zone for the SM-3 Reactor Core, Decisions Made and Service Life Justification

Tuzov A.A., Izhutov A.L., Petelin A.L., Gureva M.N., Sazontov S.A., Vinokurov V.S.

JSC «SSC RIAR»,

9 Zapadnoye Sh., 433510 Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., Russia

Abstract

This paper describes the main engineering solutions adopted during the ROSATOM's investment project that was implemented by RIAR JSC to refurbish the SM-3 reactor core. The high-flux research reactor SM has the status of a unique scientific facility. A new configuration of its neutron trap allows for significant enhancement of its safety and widening of experimental capabilities. The main objectives of SM-3 core refurbishment were development of a new core with improved experimental capabilities and replacement of core parts to extend the reactor lifetime. Described here are the specific characteristics of the refurbished central zone in the core of the unique high-flux research reactor SM-3, and compared are its characteristics with the design that was in use from 1993 until 2019. The newly designed neutron trap could accommodate 57 irradiation positions (cells) which have super-high neutron flux density to be used for irradiation of targets instead of 27 positions in the core of the previous design by removing the central shim rod from the core and developing new safety rods with a combined function of the central shim rod. Discussed here are solutions to the challenges encountered at all stages of the project

implementation, including dismantling, transportation and long-term storage of the parts that have reached the end of their service life, development of a new core and its mounting in the reactor vessel. The operating experience of the reactor with the newly designed core proved the appropriateness of the elaborated technical decisions and demonstrated the operational reliability and operational safety of the SM-3 nuclear research reactor.

Keywords: SM-3 reactor, core refurbishment, neutron trap.

For citation: Tuzov A.A., Izhutov A.L., Petelin A.L., Gureva M.N., Sazontov S.A., Vinokurov V.S. Design Engineering of the Refurbished Central Zone for the SM-3 Reactor Core, Decisions Made and Service Life Justification. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 2, pp. 74–82; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.06> (in Russian).

References

1. Tuzov A.A., Izhutov A.L., Petelin A.L., Divnogorsky A.V. Status of the SM-3 reactor core refurbishment. *Proc. of the European Research Reactor Conference (RRFM 2019)*. Jordan, 2019. Available at: <https://www.euronuclear.org/download/rrfm-2019-part-3/> (accessed Apr. 08, 2024).
2. Petelin A.L., Gureva M.N., Sazontov S.A., Vinokurov V.S., Bulgakov B.V. Design development of the SM reactor core refurbishment project: adopted decisions and justification of the lifetime. *International conference «Safety of nuclear research facilities»*. Dimitrovgrad, Russia, 2021, pp. 24–25. Available at: http://niiar.ru/sites/default/files/conproc/tezisy_bezопасnost_iyau_19-21.05.21.pdf (accessed Apr. 8, 2024) (in Russian).
3. Petelin A.L., Sazontov S.A., Malkov A.P., Nasirov N.P., Vinokurov V.S., Petrov R.V., Petrov A.G., Osipov A.A., Zaikin A.A., Sadov I.V., Chuprikov M.V., Chigintsev G.D., Shimanskiy S.A., Koshkin V.V. Refurbishment of the equipment of the control and protection system of the SM reactor. *International conference «Safety of nuclear research facilities»*. Dimitrovgrad, Russia, 2021, pp. 33–35. Available at: http://niiar.ru/sites/default/files/conproc/tezisy_bezопасnost_iyau_19-21.05.21.pdf (accessed Apr. 8, 2024) (in Russian).
4. Shadimova T.A., Vinokurov V.S., Ivanov V.V. *Device for sealing the joint between the housing and the top protective covering of the nuclear reactor*. Patent RF, No. 213678 U1, 2022 (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

Alexey L. Petelin, Department Director,

E-mail: pal@niiar.ru

Marina N. Gureva, Head of Engineering and Design Department,

E-mail: mnguryeva@niiar.ru

Sergey A. Sazontov, Chief Engineer of Department,

E-mail: ssa@niiar.ru

Vyacheslav S. Vinokurov, Deputy Head of Engineering and Design Department,

E-mail: vsvinokurov@niiar.ru