

ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО РЕАКТОРА СМ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОГРАММЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ПУСКЕ

Пайдулов А.В., Малков А.П., Пименов В.В., Воробей А.О., Узиков В.А., Полякова Т.А.

АО «ГНЦ НИИАР»,

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



Статья посвящена обоснованию безопасности реактора СМ и выполнению программы экспериментальных исследований при пуске после изменения компоновки нейтронной ловушки при модернизации реактора. Рассмотрена концепция изменения центральной замедляющей полости активной зоны уникальной научной установки «Высокопоточный исследовательский реактор СМ-3», позволяющая повысить безопасность реактора и существенно расширить экспериментальный объем нейтронной ловушки. В экспериментах на критической сборке получены основные данные для обоснования безопасности модернизированного реактора. Для обоснования гидропрофилирования активной зоны были определены в активационных экспериментах коэффициенты неравномерности энерговыделения в типовых ячейках активной зоны.

По завершении модернизации выполнена поэтапная загрузка топлива в активную зону и проведены экспериментальные исследования на модернизированном реакторе для уточнения его нейтронно-физических характеристик, важных для безопасности. Выполнены работы по подготовке реактора и его систем к пуску после модернизации, проведена поэтапная загрузка ТВС в активную зону. Проведена проверка чувствительности и стабильности работы каналов контроля новой аппаратуры СУЗ. Расчетно-экспериментальными методами исследованы реактивностные параметры модернизированной активной зоны реактора СМ. Определены значения эффективностей, градуировочные характеристики органов СУЗ, запас реактивности и подкритичность активной зоны. Измерены температурный и мощностной эффекты реактивности, определено значение температурного эффекта реактивности и мощностного коэффициента реактивности, оценены величины стационарного отравления нуклидами ^{135}Xe и ^{149}Sm .

Ключевые слова: реактор СМ, нейтронная ловушка, нейтронно-физические характеристики, активная зона, эффекты реактивности, градуировочные характеристики.

Для цитирования: Пайдулов А.В., Малков А.П., Пименов В.В., Воробей А.О., Узиков В.А., Полякова Т.А. Обоснование безопасности модернизированного реактора СМ и основные результаты выполнения программы экспериментальных исследований при пуске. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 2. – С. 83–92. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.07>

ВВЕДЕНИЕ

Концепция высокопоточного исследовательского реактора с нейтронной ловушкой определяет состав, геометрию, условия работы активной зоны, основные конструктивные решения реакторной установки. Соответственно компоновка нейтронной ловушки (геометрия, размеры, замедлитель нейтронов, облучаемые материалы) оказывает влияние на физические и эксплуатационные характеристики реактора – запас реактивности, эффективность органов СУЗ, коэффициенты неравномерности распределения энерговыделения, мощностной и температурный коэффициенты реактивности, баланс реактивности в кампании, показатели использования топлива [1, 2]. При модернизации реактора СМ в 2019–2020 гг. изменены компоновка нейтронной ловушки (центральной замедляющей полости), конструкция и количество центральных органов СУЗ.

Концепция [3] новой компоновки нейтронной ловушки включает в себя отказ от центральных бериллиевых вкладышей и увеличение количества ячеек с 27-ми до 57-ми для облучения материалов в условиях высокой плотности нейтронного потока. С позиций обеспечения безопасности – это повышение надежности работы реактора и сокращение количества высокоактивных радиоактивных отходов, поскольку для бериллиевых вкладышей необходима частая замена при достижении предельно допустимого флюенса нейтронов (через 1–1,5 года эксплуатации). Кроме этого ликвидируется наиболее эффективный кольцевой центральный компенсирующий орган (ЦКО), увеличивается для повышения эффективности диаметр четырех стержневых РО АЗ с переводом их в разряд рабочих органов аварийной защиты и компенсации реактивности (РО АЗ-КО) – примерно на 1/3 хода от крайнего нижнего состояния – зона АЗ, 2/3 хода до полного извлечения из активной зоны – зона компенсатора реактивности (КО). С позиций обеспечения безопасности – это повышение надежности работы реактора за счет уменьшения общего количества РО СУЗ и исполнительных механизмов (ИМ) с одновременной их унификацией (снижение вероятности отказа). Эффективность отдельных органов снижается по сравнению с эффективностью ЦКО (минимизируются последствия несанкционированного извлечения наиболее эффективного компенсатора реактивности) с одновременным равномерным распределением требуемой компенсирующей способности по четырем независимым органам. Повышаются эффективность отдельного РО АЗ-КО, вводимого в активную зону под действием силы тяжести, и суммарная отрицательная реактивность, быстро вводимая в активную зону по сигналу АЗ при работе реактора на мощности (повышается эффективность защитного действия).

Изменение конструктивных решений и физических характеристик реактора СМ при модернизации потребовало выполнения исчерпывающего анализа и обоснования безопасности установки.

По завершении пуско-наладочных работ технических систем реактора потребовалось выполнение программы экспериментальных исследовательских работ для подтверждения проектных характеристик.

АНАЛИЗ И ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ УСТАНОВКИ

Исходные данные для анализа получены по результатам расчетно-экспериментальных исследований. Эксперименты выполнены на критической сборке – физической модели реактора. Полученные в экспериментах коэффициенты неравномерности энерговыделения удовлетворительно согласуются с расчетными данными. Они использованы для расчета гидропрофилирования расхода теплоносителя по типовым ячейкам активной зоны реактора СМ, а также как исходные данные для анализа и обоснования безопасности модернизированного реактора при подготовке документов для получения лицензии на его эксплуатацию. Пересмотрены исходные события нарушений нормальной эксплуатации и выполнен анализ их последствий по категориям – несанкционированный ввод положительной реактивности; ухудшение теплоотвода от активной зоны; изменение давления в первом контуре реактора; ухудшение отвода тепла вторым контуром; природные явления и события техногенного происхождения. Обоснована безопасность реактора СМ после модернизации активной зоны.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОГРАММЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ПУСКЕ

Программа исследований включала в себя поэтапную загрузку активной зоны с одновременной проверкой характеристик новой аппаратуры СУЗ и оценкой эффектов реактивности при проведении перегрузочных операций; определение эффективности, градуировочных характеристик органов СУЗ, запаса реактивности и подкритичности активной зоны; температурного эффекта реактивности; мощностного коэффициента реактивности для неотравленного и отравленного по ^{135}Xe состояний реактора.

Загрузку топлива в активную зону реактора СМ-3 проводили в соответствии с основными принципами безопасного набора критической массы согласно НП-009-17 [4]. При этом предусматривалось, что в процессе загрузки активной зоны реактора топливом восстанавливается картограмма размещения облученных ТВС (ОТВС) в активной зоне на момент останова реактора перед модернизацией, характеристики которой известны.

Вывод реактора в критическое состояние на минимально контролируемый уровень мощности (МКУ) выполняли равномерным извлечением четырех АЗ-КО.

Положение рабочих органов СУЗ в критическом состоянии составило

- АЗ-КО-1–4 – 27 мм (рабочие органы введены в активную зону на 27 мм при полном диапазоне перемещения 280 мм в зоне КО);
- АР-1–2 – полностью погружены;
- КО-1–4 – полностью погружены.

В экспериментальных исследованиях на реакторе уточняли градуировочные характеристики всех органов СУЗ и определяли их эффективность для конкретной загрузки активной зоны.

На рисунке 1 представлена усредненная по четырем РО КО градуировочная характеристика в единицах относительной эффективности вместе с градуировочной характеристикой реактора до модернизации.

На рисунке 2 представлена усредненная по четырем РО АЗ-КО градуировочная характеристика в единицах относительной эффективности с границей зон аварийной защиты и компенсации реактивности.

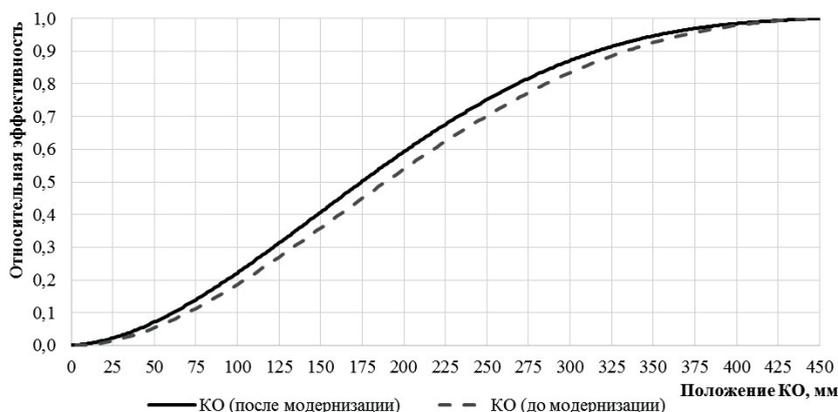


Рис. 1. Усредненная градуировочная характеристика четырех РО КО до и после модернизации реактора

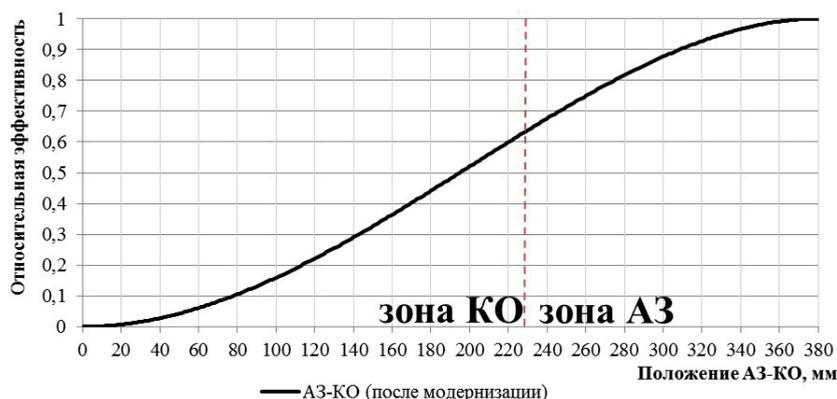


Рис. 2. Усредненная градуировочная характеристика четырех РО АЗ-КО, полученная после модернизации реактора

В таблице 1 представлены результаты определения эффективности РО СУЗ реактора СМ-3 в условиях картограммы загрузки восстановленной активной зоны в сопоставлении с проектными характеристиками.

Таким образом, полученные значения эффективности РО СУЗ после модернизации находятся в проектных диапазонах.

Запас реактивности и подкритичность реактора для исследуемой компоновки реактора составили:

- запас реактивности – $10,4 \beta_{эфф}$ (7,79% $\Delta K/K$);
- подкритичность при взведенных РО АЗ (РО АЗ-КО в положении «верх АЗ» – «низ КО») и полностью погруженных компенсирующих органах – $4,0 \beta_{эфф}$ (3,0% $\Delta K/K$).

Полученное значение подкритичности активной зоны реактора СМ-3 также находится в пределах проектных значений.

Изотермический температурный эффект реактивности определяли по изменению реактивности при равномерном разогреве всех компонентов активной зоны. Разогрев теплоносителя первого контура осуществляли в процессе работы главных циркуляционных насосов при отключенных теплообменниках второго контура. При этом происходило равномерное повышение температуры всех элементов первого контура, в том числе и активной зоны.

Таблица 1

Результаты экспериментального определения эффективности органов СУЗ

Рабочий орган	Эффективность РО СУЗ, $\beta_{эфф}$	Проектные диапазоны эффективности РО СУЗ, $\beta_{эфф}$
АР-1	0,03	0,01 – 0,4
АР-2	0,03	0,01 – 0,4
АЗ-КО-1 (зона АЗ)	0,55	0,5 – 1,1
АЗ-КО-2 (зона АЗ)	0,55	0,5 – 1,1
АЗ-КО-3 (зона АЗ)	0,72	0,5 – 1,1
АЗ-КО-4 (зона АЗ)	0,82	0,5 – 1,1
АЗ-КО-1 (зона КО)	0,91	0,6 – 1,4
АЗ-КО-2 (зона КО)	0,71	0,6 – 1,4
АЗ-КО-3 (зона КО)	1,25	0,6 – 1,4
АЗ-КО-4 (зона КО)	1,34	0,6 – 1,4
КО-1	2,53	1,3 – 3,5
КО-2	2,21	1,3 – 3,5
КО-3	2,15	1,3 – 3,5
КО-4	3,12	1,3 – 3,5

Температурный эффект реактивности определяли для разотравленного состояния реактора в диапазоне температур от 14 до 70°C по изменению положения предварительно отградуированного органа СУЗ (на МКУ мощности) в процессе разогрева активной зоны.

Эксперимент выполняли в следующей последовательности:

- в реакторе создали рабочее давление (5 МПа);
- включили циркуляцию теплоносителя по первому контуру всеми главными циркуляционными насосами;
- реактор вывели на МКУ мощности последовательным извлечением АЗ-КО-1–4 и КО-1–4 (критическое состояние было достигнуто при положении АЗ-КО-1 = 230 мм, АЗ-КО-2 = 230 мм, АЗ-КО-3 = 228 мм, АЗ-КО-4 = 227 мм; КО-1 = 207 мм, КО-2 = 207 мм, КО-3 = 206 мм, КО-4 = 207 мм по УП);
- в процессе разогрева теплоносителя первого контура регистрировали изменение его температуры и положения РО АЗ-КО-3 в критическом состоянии (эффективность и градуировочная характеристика РО АЗ-КО-3 были измерены ранее);
- при достижении температуры в первом контуре 70°C фиксировали положение органов СУЗ в критическом состоянии.

На рисунке 3 показано изменение реактивности в процессе разогрева активной зоны реактора.

Кривая, аппроксимирующая экспериментально измеренные точки, описывается полиномом второй степени, коэффициенты которого получены путем минимизации отклонений экспериментально полученных значений реактивности от соответствующих расчетных значений (метод «наименьших квадратов»):

$$\rho(T) = -1,49 \cdot 10^{-4} \cdot (T - T_0)^2 + 4,86 \cdot 10^{-5} \cdot (T - T_0), \quad (1)$$

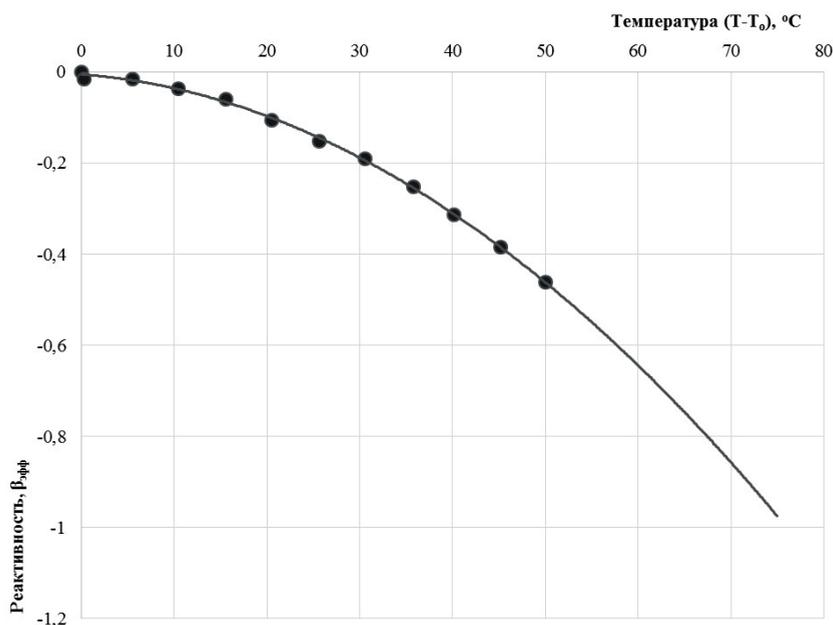


Рис. 3. Изменение реактивности при равномерном разогреве активной зоны реактора СМ-3 в неотравленном состоянии в зависимости от температуры разогрева: экспериментальные точки (●) и аппроксимирующая их кривая (—)

где $\rho(T)$ – температурный эффект реактивности; $\beta_{эфф}; T$ – средняя температура теплоносителя в активной зоне, °С; T_0 – начальная температура теплоносителя в активной зоне (принята равной 14,25°С), °С.

Температурный коэффициент реактивности есть производная от данного полинома по температуре:

$$k_p(T) = -2,98 \cdot 10^{-4} \cdot (T - T_0) + 4,86 \cdot 10^{-5} (\beta_{эфф}/^{\circ}\text{C}). \quad (2)$$

Температурный эффект реактивности при разогреве активной зоны с 14 до 70°С составил $-0,46 \beta_{эфф}$.

Сравнение расчетных (проектных) характеристик и результатов измерений представлено на рис. 4.

Таким образом, значения температурного коэффициента реактивности и температурного эффекта реактивности, полученные в результате расчета и в экспериментах на реакторе, практически не отличаются.

При размещении в каналах 1–2 радиуса отражателя исследуемой активной зоны десяти устройств для наработки ^{192}Ir и двух устройств для наработки ^{60}Co суммарный эффект от их загрузки составил

- по запасу реактивности – $3,16 \beta_{эфф}$ (2,38%);
- по подкритичности – $1,59 \beta_{эфф}$ (1,20%).

На рисунке 5 представлено изменение запаса реактивности в ходе кампании до остановки РУ СМ-3 на модернизацию и после модернизации. Из приведенных графиков можно сделать вывод о том, что величина стационарного отравления по ^{135}Xe и темп потери реактивности реактора практически не изменились.

Мощностной коэффициент реактивности определяли как отношение изменения реактивности к соответствующему изменению мощности для рабочего состояния активной

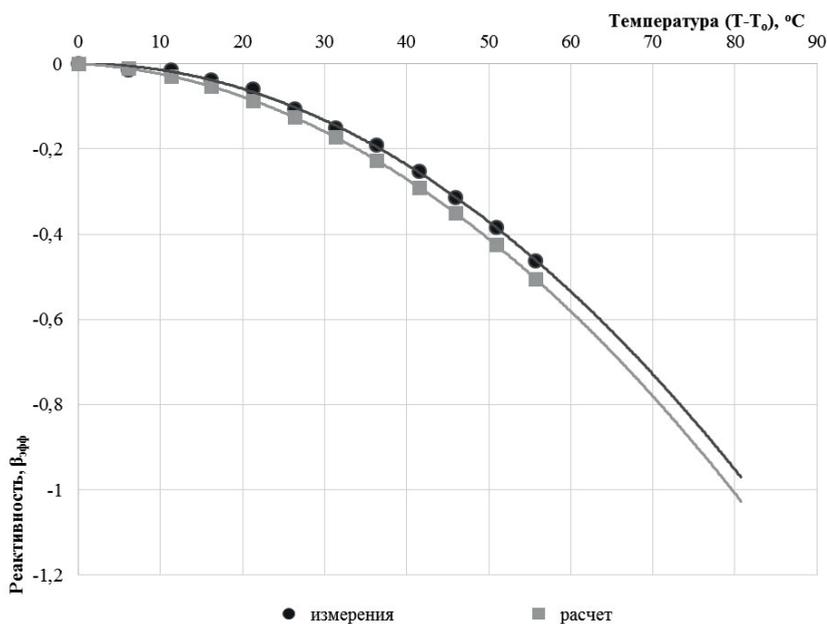


Рис. 4. Убыль запаса реактивности (расчетные и экспериментальные значения) при равномерном разогреве активной зоны реактора

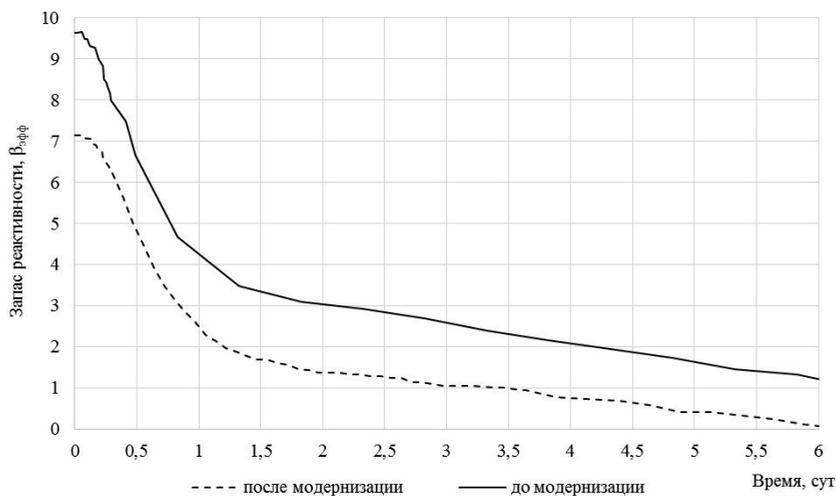


Рис. 5. Изменение запаса реактивности в ходе кампании

зоны и на заданном уровне мощности реактора в условиях стационарного отравления ^{135}Xe (после работы в течение двух суток на номинальном уровне мощности). Эксперимент проводили в конце первой кампании непосредственно перед остановом реактора. При этом значение мощностного коэффициента реактивности активной зоны реактора СМ-3 на рабочем уровне мощности (90 МВт) в условиях стационарного отравления ^{135}Xe составило $-2,5 \cdot 10^{-3} \beta_{\text{эфф}}/\text{МВт}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении экспериментальных исследований по итогам модернизации реактора СМ-3 выполнены все запланированные этапы работы. При этом определены основные нейтронно-физические характеристики модернизированной активной зоны. Результаты экспериментальных исследований подтвердили соответствие измеренных физических характеристик реактора СМ-3 с модернизированной активной зоной проектным значениям. Корректировка эксплуатационных пределов и условий безопасной эксплуатации в проектной и эксплуатационной документации модернизированного реактора не требуется.

Литература

1. *Краснов Ю.А., Личадеев В.В., Малков А.П., Петелин А.Л., Рязанов Д.К., Шиманский Г.А.* Расчетно-экспериментальные исследования нейтронно-физических характеристик реактора СМ с различными вариантами компоновки нейтронной ловушки. // Атомная энергия. – 2009. – Т. 107. – № 2. – С. 63–69. Электронный ресурс: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1580/1560> (дата доступа 05.04.2024).
2. *Краснов Ю.А., Малков А.П., Петелин А.Л., Пименов В.В.* Влияние компоновки нейтронной ловушки на физические и эксплуатационные характеристики реактора СМ. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2010. – № 2. – С. 15–22.
3. *Ижуртов А.Л., Петелин А.Л., Малков А.П. и др.* Программа модернизации активной зоны реактора СМ-3. / XXI Российская конференция «Безопасность исследовательских ядерных установок», г. Димитровград, 20-24 мая 2019 г.: тезисы докладов. Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2019. – С. 17. Электронный ресурс: http://niiar.ru/sites/default/files/conproc/tezisy_dokladov_iyau_2019_.pdf (дата доступа 05.04.2024).
4. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила ядерной безопасности исследовательских реакторов. НП-009-17. М.: 2017.

Поступила в редакцию 09.04.2024

Авторы

Пайдупов Андрей Владимирович, главный инженер РУ МИР.М1, РБТ-10/2,
E-mail: zlbplrk@yandex.ru

Малков Андрей Павлович, начальник службы ядерной безопасности, д.т.н.,
E-mail: malkovar@mail.ru

Пименов Василий Вениаминович, начальник физико-технической лаборатории,
E-mail: v_pimenov@inbox.ru

Воробей Андрей Олегович, главный инженер,
E-mail: aovorobey@niiar.ru

Узиков Виталий Алексеевич, ведущий инженер-технолог,
E-mail: uzikov62@mail.ru

Полякова Татьяна Андреевна, старший научный сотрудник,
E-mail: tosipova89@gmail.com

UDC 621.039.566

Justification of the Safety of the Upgraded Reactor SM and the Main Results of the Experimental Research Program at the Start of the Reactor**Paydulov A.V., Malkov A.P., Pimenov V.V., Vorobey A.O., Uzikov V.A., Polyakova T.A.***JSC «SSC RIAR»,
9 Zapadnoe Sh., 433510 Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., Russia***Abstract**

The paper focuses on the justification of SM reactor safety and a program of experiments once the reactor was launched after the refurbishment of its core and change in the neutron trap configuration.

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 experiments performed at the critical assembly gave key data to justify safety of the refurbished reactor. To justify the core hydro-profiling, the coefficients of heat rate unevenness in typical core cells were determined in the activation experiments.

Once the refurbishment was completed, the fuel was loaded into the core stage by stage and experiments were performed in the refurbished reactor to specify its neutronic characteristics important for safety.

The reactor and its systems were prepared for the startup after the refurbishment; fuel assemblies were step-by-step inserted into the core. The sensitivity and stability of new control-and-safety system equipment was tested.

The reactivity parameters of the refurbished SM core were evaluated by calculations and experiments. The efficiency values, calibration characteristics of control rods, reactivity margin and core subcriticality were determined. The temperature effect and power effects of reactivity were evaluated and their values were measured; the stationary poisoning with ^{135}Xe and ^{149}Sm were estimated.

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.

Keywords: SM reactor, neutron trap, neutron-physical characteristics, core, reactivity effects, calibration characteristics.

For citation: Paydulov A.V., Malkov A.P., Pimenov V.V., Vorobey A.O., Uzikov V.A., Polyakova T.A. Justification of the Safety of the Upgraded Reactor SM and the Main Results of the Experimental Research Program at the Start of the Reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 2, pp. 83–92; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.07> (in Russian).

References

1. Krasnov Yu.A., Lichadeev V.V., Malkov A.P., Petelin A.L., Ryazanov D.K., Shimanskii G.A. Computational-experimental studies of the neutronics of the SM reactor with different variants of the neutron-trap arrangement. *Atomic Energy*. 2009, vol. 107, no. 2, pp. 77–84. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-009-9199-x>
2. Malkov A.P., Krasnov U.A., Petelin A.L., Pimenov V.V. The influence of the neutron trap layout on the physical and operational characteristics of the reactor SM. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2010, no. 2, pp. 3–9 (in Russian).
3. Izhutov A.L., Petelin A.L., Malkov A.P., et al. The SM-3 reactor core modernization program. XXI Russian Conference «Safety of Research Nuclear Installations», Dimitrovgrad, May 20-24, 2019: Abstracts of reports. Dimitrovgrad, *RIAR JSC Publ.*, p. 17. Available at: http://niiar.ru/sites/default/files/conproc/tezisy_dokladov_iyau_2019_.pdf (accessed Apr. 5, 2024) (in Russian).
4. Federal norms and rules in the field of atomic energy use. Rules of nuclear safety of research reactors. NP-009-17. Moscow, 2017 (in Russian).

Authors

Andrey V. Paydulov, Chief Engineer of MIR.M1, RBT-10/2,

E-mail: zlbplrk@yandex.ru

Andrey P. Malkov, Head of the Nuclear Safety Service, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: malkovap@mail.ru

Vasily V. Pimenov, Head of the Physics and Technology Laboratory,

E-mail: v_pimenov@inbox.ru

Andrey O. Vorobey, Chief Engineer,

E-mail: aovorobey@niiar.ru

Vitaly A. Uzikov, Leading Process Engineer,

E-mail: uzikov62@mail.ru

Tatiana A. Polyakova, Senior Researcher,

E-mail: tosipova89@gmail.com