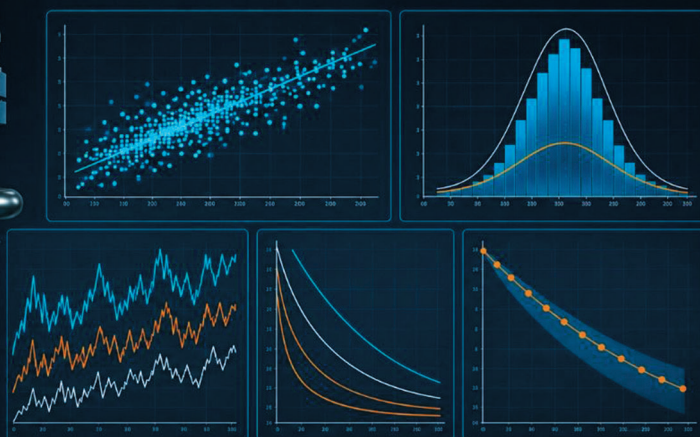
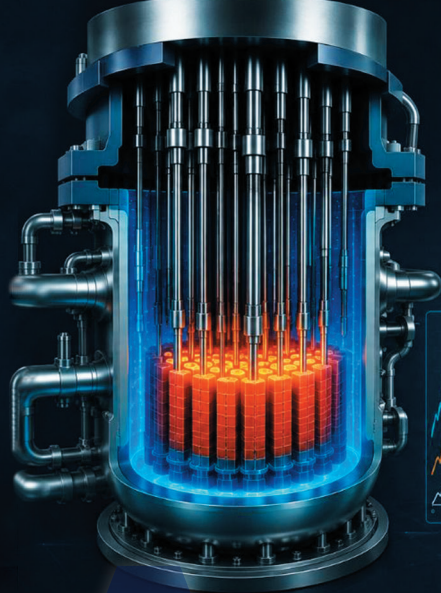




УДК: 621.039.56

DOI: 10.26277/SECNRS.2026.121.3.004

© 2026. Все права защищены.

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПРИ ОБОСНОВАНИИ БЕЗОПАСНОСТИ РЕАКТОРА СМ ПОСЛЕ МОДЕРНИЗАЦИИ

Ханбиков Р. З.*,** (razkhanbikov@mail.ru),
Малков А. П.*,**, д-р техн. наук (malkovap@mail.ru),
Пименов В. В.*, канд. техн. наук (v_pimenov@inbox.ru),
Буркацкий Е. О.* (yburkatskiy@list.ru),
Шаймурзин И. М.*,** (ildar.shaymurzin@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 30 июля 2026 г.

Аннотация

В статье представлены результаты анализа изменения эффективности рабочих органов системы управления и защиты, запаса реактивности и подкритичности активной зоны реактора СМ после модернизации 2019–2020 гг. Анализ выполнен по данным, полученным в ходе 59 градуировок (экспериментального определения эффективности) рабочих органов системы управления и защиты, с целью уточнения исходных данных, используемых при обосновании его безопасности. С применением методов статистического анализа исследованы изменчивость рассматриваемых характеристик, характер их распределения и наличие статистической связи между исследуемыми параметрами. Для оценки тесноты и направления монотонной зависимости использован коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Для количественной оценки линейной тенденции применен непараметрический метод Тейла–Сена, характеризующийся высокой устойчивостью оценки тренда к влиянию выбросов и отдельных аномальных наблюдений. Установлены закономерности изменения эффективности рабочих органов системы управления и защиты, запаса реактивности и подкритичности активной зоны. По результатам анализа значения исследуемых характеристик находятся в установленных паспортных пределах. Полученные статистические зависимости и соотношения могут быть использованы для уточнения исходных данных, применяемых при расчетах, а также при анализе возможных сценариев развития аварийных ситуаций и обосновании безопасности реактора СМ.

► **Ключевые слова:** реактор СМ, эффективность рабочих органов системы управления и защиты, запас реактивности, подкритичность активной зоны, градуировка, статистический анализ, обоснование безопасности.

* АО «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов», Дмитровград, Россия.

** Дмитровградский инженерно-технологический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Дмитровград, Россия.

ANALYSIS OF CONTROL RODS EFFECTIVENESS VARIATIONS FOR REFINEMENT OF INPUT DATA IN THE SAFETY JUSTIFICATION OF THE SM REACTOR AFTER MODERNIZATION

Khanbikov R. Z.^{*,**},
Malkov A. P.^{*,**}, D. Sc. (Engineering),
Pimenov V. V.^{*}, Ph. D. (Engineering),
Burkatskiy E. O.^{*},
Shaimurzin I. M.^{*,**}

The article was received by the editors' crew on July 30, 2026.

Abstract

The article presents the results of the analysis of changes in the effectiveness of the control and protection system control rods, the reactivity margin, and the subcriticality of the core of the SM reactor following the modernization carried out in 2019–2020. The analysis was based on operational data obtained from 59 experimental calibration and was performed to refine the initial data used in the reactor safety justification. Statistical analysis methods were applied to investigate the variability of the considered characteristics, the distribution patterns of the experimental data, and the statistical relationships between the studied parameters. The strength and direction of monotonic relationships were evaluated using Spearman's rank correlation coefficient. A nonparametric Theil–Sen regression estimator was used to quantify linear trends and characterize the relationships between the parameters. This approach provides a robust assessment of trends and reduces the influence of individual outliers and anomalous observations on the results. The analysis established the characteristic trends in the variation of control rod effectiveness, the reactivity margin, and core subcriticality. The results obtained from the statistical analysis demonstrate that the values of the investigated characteristics remain within the established design and operational limits specified for the reactor. The identified statistical relationships and derived correlations can be used to refine the initial data for reactor safety calculations, as well as to support the analysis of possible accident scenarios and for substantiating the safety of the SM reactor.

► **Keywords:** SM research reactor, control and protection system control rods effectiveness, reactivity margin, core subcriticality, control rod calibration, statistical analysis, safety justification.

* Joint-Stock Company “State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors”, Dimitrovgrad, Russia.

** Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute of the National Research Nuclear University MEPhI, Dimitrovgrad, Russia.

Введение

Эффективность рабочих органов системы управления и защиты (РО СУЗ) – важнейшая характеристика, определяющая показатели эксплуатации и безопасности любого ядерного реактора. От суммарной эффективности компенсирующих органов зависит запас реактивности реактора, его подкритичность при выполнении перегрузочных и ремонтных работ, баланс реактивности и продолжительность кампании. Безопасность реактора при отклонениях от режимов нормальной эксплуатации обеспечивается, прежде всего, эффективностью аварийной защиты, скоростью ввода отрицательной реактивности по аварийному сигналу и достаточной эффективностью всех средств воздействия на реактивность. Исходные данные, необходимые для расчетного анализа любых постулируемых аварийных ситуаций, – это значение и скорость ввода отрицательной реактивности при останове реактора. Эти параметры определяют временной график изменения мощности реактора в ходе развития инцидента. Таким образом, для корректного расчета последствий аварийных ситуаций необходимо знать закономерности изменения эффективности РО СУЗ для анализируемых состояний реактора [1].

В 2019–2020 гг. проведена модернизация центральной зоны реактора СМ-3 [2, 3]. В ходе этих работ было увеличено количество ячеек для облучения мишеней в нейтронной ловушке, исключены центральный компенсирующий орган и центральные бериллиевые вкладыши, а также усовершенствована система СУЗ путем замены рабочих органов аварийной защиты (РО АЗ) на рабочие органы аварийной защиты и компенсации реактивности (РО АЗ-КО). Накопление экспериментальных данных после модернизации реактора, полученных в ходе градуировок РО СУЗ, позволяет провести статистический анализ для определения масштаба влияния различных факторов, уточнения диапазонов изменения эффективности рабочих органов с учетом загрузки активной зоны и взаимного влияния различных групп РО СУЗ друг на друга. Кроме того, подобная работа позволяет выявить аномальные результаты (выбросы), полученные во время градуировок РО СУЗ, для последующего установления причины их появления.

Авторами настоящей статьи с помощью методов статистического анализа исследованы результаты градуировок РО СУЗ, выполненных с момента пуска реактора СМ после модернизации.

Анализируемые данные

Активная зона реактора СМ имеет форму прямоугольного параллелепипеда с квадратом 420×420 мм в основании и высотой 350 мм, где размещаются 28 тепловыделяющих сборок (ТВС) с шагом 70 мм. В угловых ячейках активной зоны установлены компенсирующие органы (КО). РО КО состоит из верхней поглощающей части, переходника и нижней части – ТВС, которая вводится в активную зону по мере извлечения КО. Четыре центральные ячейки активной зоны отведены для размещения замедляющей полости (нейтронной ловушки), в которой размещают облучаемые материалы. Расположенные в нейтронной ловушке РО АЗ-КО совмещают функции АЗ и компенсации реактивности. РО КО вместе с РО АЗ-КО в зоне КО компенсируют запас реактивности, необходимый для обеспечения кампании. Для регулирования мощности реактора в автоматическом режиме используют РО автоматического регулирования (АР), расположенные в боковом отражателе. На рис. 1 представлено поперечное сечение активной зоны реактора СМ-3.

Градуировка РО СУЗ реактора СМ-3 проводится после длительной остановки продолжительностью не менее чем трое суток, необходимой для расхолаживания активной зоны и распада ядер ^{135}Xe в топливе (холодное неотравленное состояние реактора). В ходе градуировки определяют (измеряют):

- эффективность РО КО, АЗ-КО (как зоны АЗ, так и зоны КО) и АР;
- суммарную эффективность РО СУЗ;
- подкритичность активной зоны;
- запас реактивности;
- градуировочные характеристики РО СУЗ (при необходимости).

В статье проанализированы перечисленные характеристики реактора, интегральные и экстремальные (максимальная и минимальная эффективность РО КО, суммарная эффективность трех РО АЗ-КО в зоне АЗ без одного наиболее эффективного органа) характеристики РО СУЗ, данные о которых получены в ходе 59 градуировок, выполненных с момента пуска реактора СМ после модернизации с 2020 г. по декабрь 2025 г.

Далее в тексте использованы следующие обозначения для реактивностных параметров:

- $R_{\Sigma\text{КО}}$ – суммарная эффективность четырех РО КО;
- $R_{\text{КОmax}}$ – максимальная эффективность одного РО КО;

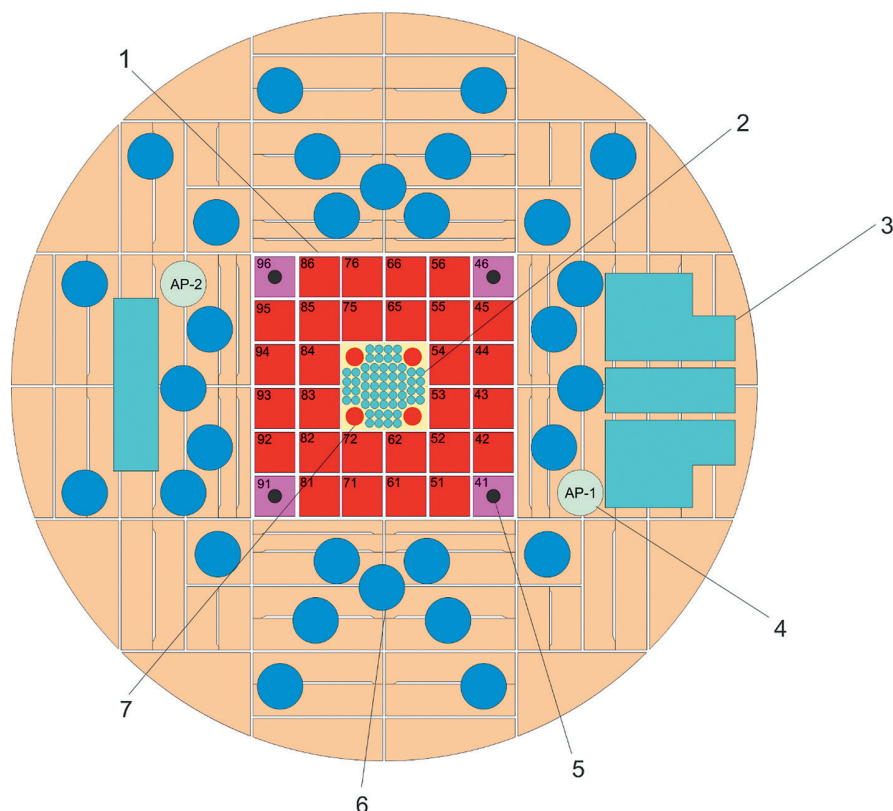
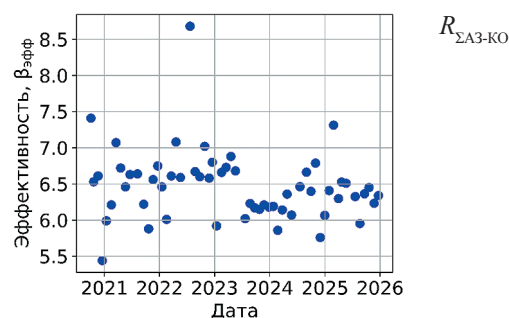
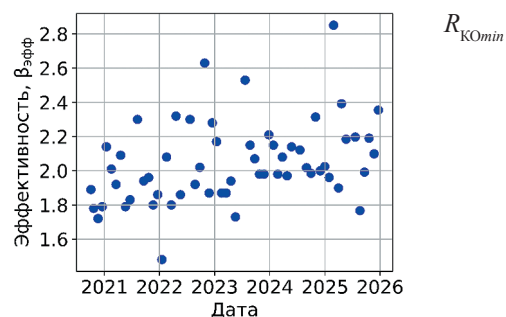
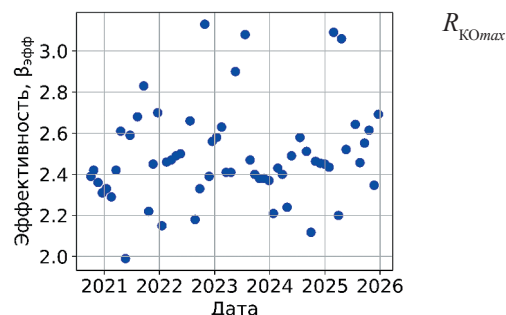
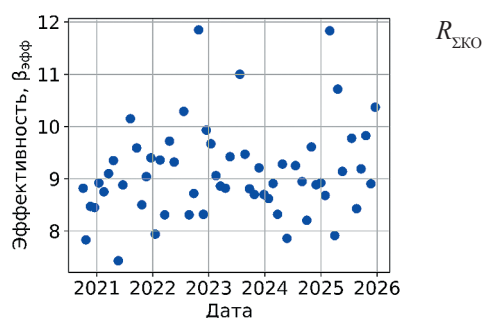


Рис. 1. Картограмма активной зоны реактора (1 – ячейка активной зоны; 2 – ячейка нейтронной ловушки для загрузки мишеней; 3 – хранилище ТВС; 4 – РО АР; 5 – РО КО; 6 – экспериментальная ячейка в отражателе; 7 – РО АЗ-КО)
[Fig. 1. Core layout of the reactor (1 – core cell; 2 – neutron trap cell for target loading; 3 – fuel assembly storage; 4 – automatic control rod; 5 – shim control rod; 6 – experimental cell in the reflector; 7 – shut off rod)]

- $R_{КОmin}$ – минимальная эффективность одного РО КО;
- $R_{\Sigma АЗ-КО}$ – суммарная эффективность четырех РО АЗ-КО;
- $R_{\Sigma АЗ}$ – суммарная эффективность четырех РО АЗ-КО в зоне АЗ;
- $R_{\Sigma 3-х АЗ}$ – суммарная эффективность трех РО АЗ-КО в зоне АЗ без учета наиболее эффективного органа;
- $R_{КО(АЗ-КО)}$ – суммарная эффективность четырех РО АЗ-КО в зоне КО;
- $R_{\Sigma АР}$ – суммарная эффективность двух РО АР;
- ρ_c – запас реактивности активной зоны;
- ρ_s – подкритичность активной зоны.

На рис. 2 представлены значения реактивных характеристик, используемых в анализе, которые расположены в хронологическом порядке.



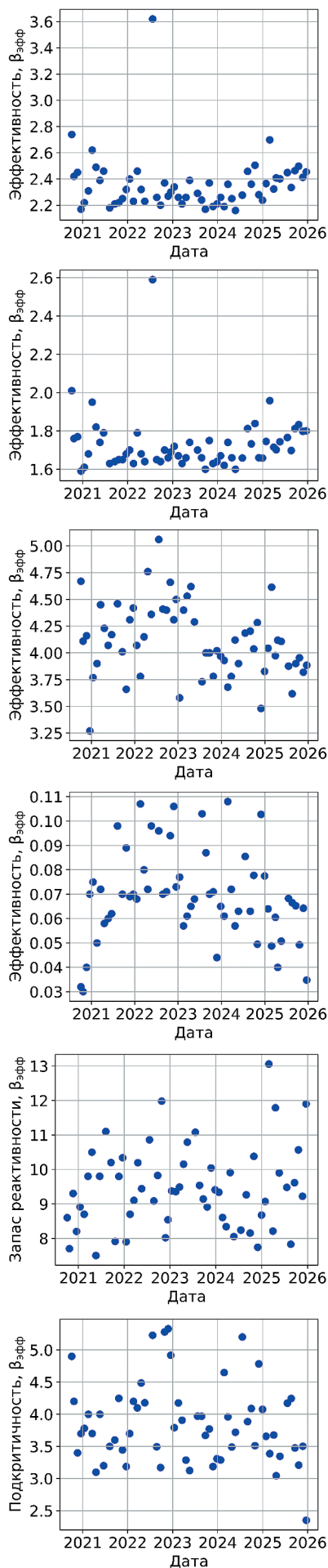


Рис. 2. Реактивностные параметры реактора СМ
[Fig. 2. Reactivity parameters of the SM reactor]

$R_{\Sigma A3}$

$R_{\Sigma 3-x A3}$

$R_{KO(A3-KO)}$

$R_{\Sigma AP}$

ρ_c

ρ_s

Первичный анализ

Для определения мер центральной тенденции и изменчивости результаты 59 градуировок РО СУЗ, проведенных с момента начала работы реактора после модернизации, были представлены в виде графиков разброса (диаграмма типа “box plot” – «ящик с усами») [4] измеренных параметров (рис. 3–6). Диаграмма типа “box plot” – это диаграмма для компактного и наглядного представления о характеристиках распределения результатов измерений. Данные, представленные на диаграмме, интерпретируются следующим образом: нижняя и верхняя стороны ящика соответствуют первому (Q_1) и третьему (Q_3) квартилям; маркер и отрезок внутри ящика – среднее значение и медиана соответственно; штриховые линии – нижняя ($Q_1 - 1,5(Q_3 - Q_1)$) и верхняя ($Q_3 + 1,5(Q_3 - Q_1)$) границы, отделяющие возможные выбросы в распределении; нижний ус (вертикальный отрезок с планкой) идет от первого квартиля к наименьшему значению в распределении, не выходящему за нижнюю границу, верхний ус – от третьего квартиля к наибольшему значению, не выходящему за верхнюю границу; маркеры вне границ – возможные выбросы.

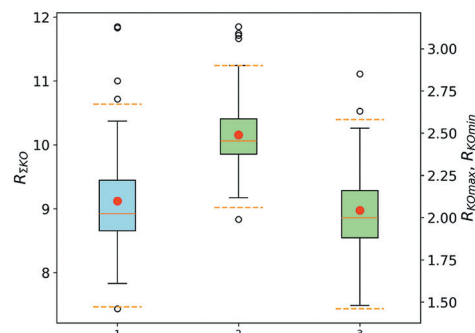


Рис. 3. Диаграмма распределения характеристик РО КО, $\beta_{эфф}(1 - R_{\Sigma KO}, 2 - R_{KOmax}, 3 - R_{KOmin})$
[Fig. 3. Distribution of the shim control rods characteristics, $\beta_{эфф}(1 - R_{\Sigma KO}, 2 - R_{KOmax}, 3 - R_{KOmin})$]

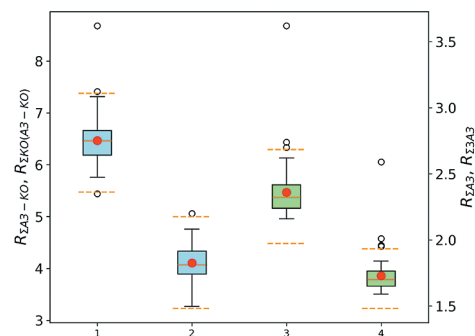


Рис. 4. Диаграмма распределения характеристик РО АЗ-КО, $\beta_{эфф}(1 - R_{\Sigma A3-KO}, 2 - R_{KO(A3-KO)}, 3 - R_{\Sigma A3}, 4 - R_{\Sigma 3-x A3})$
[Fig. 4. Distribution of the shut off rods characteristics, $\beta_{эфф}(1 - R_{\Sigma A3-KO}, 2 - R_{KO(A3-KO)}, 3 - R_{\Sigma A3}, 4 - R_{\Sigma 3-x A3})$]

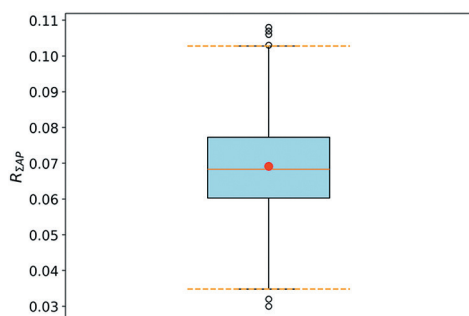


Рис. 5. Диаграмма распределения суммарной эффективности РО АР, $\beta_{\text{эфф}}$
[Fig. 5. Distribution of total automatic control rod characteristics, $\beta_{\text{эфф}}$]

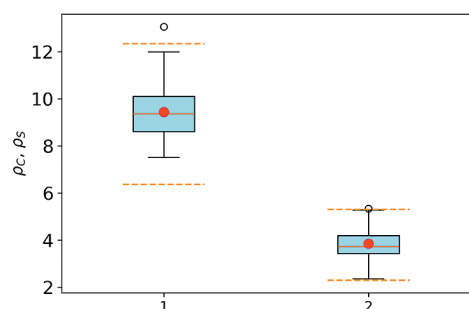


Рис. 6. Диаграмма распределения запаса реактивности и подкритичности активной зоны, $\beta_{\text{эфф}}(1 - \rho_c, 2 - \rho_s)$
[Fig. 6. Distribution of reactivity margin and subcriticality, $\beta_{\text{эфф}}(1 - \rho_c, 2 - \rho_s)$]

Из представленных рисунков видно, что данные сгруппированы достаточно плотно и в основном расположены симметрично, каких-либо аномалий в распределениях не обнаружено. Согласно оценке, выполненной с помощью критерия Шапиро-Уилка [5], все представленные данные с доверительной вероятностью 0,95 подчиняются нормальному распределению.

Некоторые данные находятся вне штриховых линий, то есть можно предположить наличие в распределениях выбросов. Однако во всех случаях они связаны с особенностями компоновки активной зоны реактора: в случае РО КО градуировка была проведена после замены выгоревших топливных подвесок с дополнительной загрузкой необлученной ТВС в ячейку активной зоны, а в случае РО АЗ-КО – из нейтронной ловушки были выгружены ампулы с веществом, обладающим высоким макросечением поглощения тепловых нейтронов [6]. Таким образом, существенных доводов для отбрасывания этих данных в дальнейшем анализе нет.

В таблице № 1 приведены сводки пяти чисел для рассматриваемых параметров, которые представляют собой наборы описательных статистических данных об их распределениях, а также приведены значения размаха и интерквартильного размаха распределений.

Из данных, представленных на рис. 2–5 и в таблице № 1, для результатов градуировок РО СУЗ, выполненных в указанный период, можно сделать следующие выводы:

1) Максимальная суммарная эффективность РО КО и РО АЗ-КО, с учетом неопределенности измерений, не превосходит максимального значения, указанного в паспорте реактора:

$$R_{\Sigma KO_{max}} \leq 11,85 \cdot (1 + 0,05) \leq 14,0 ; \quad (1)$$

$$R_{\Sigma AZ-KO_{max}} = 8,68 \cdot (1 + 0,045) < 10,0 = 5,6 + 4,4 , \quad (2)$$

где 0,05 и 0,045 – расширенная неопределенность (здесь и далее при доверительной вероятности $P=0,95$) измерения эффективности РО КО и РО АЗ-КО по аттестованной методике «Экспериментальное определение эффективности рабочих органов СУЗ реактора СМ-3», соответственно, 14,0 и 10,0 (5,6 + 4,4) – максимальное значение суммарной эффективности, допускаемое паспортом реактора для РО КО и РО АЗ-КО (в зоне КО и зоне АЗ), соответственно, $\beta_{\text{эфф}}$. Следует отметить, что максимальные значения суммарной эффективности РО КО и РО АЗ-КО были реализованы для разных вариантов компоновки активной зоны.

2) Максимальное значение запаса реактивности с учетом неопределенности расчета не превышает максимальное значение, указанное в паспорте:

$$\rho_{сmax} \leq 13,06 \cdot (1 + 0,05) \leq 17,0 , \quad (3)$$

где 0,05 – расширенная неопределенность расчета, 17,0 – максимальное значение запаса реактивности, допускаемое паспортом реактора, $\beta_{\text{эфф}}$.

3) Минимальное значение подкритичности с учетом неопределенности расчета не ниже минимального значения, указанного в паспорте:

$$\rho_{smin} \geq 2,65 \cdot (1 - 0,055) \geq 1,3 , \quad (4)$$

где 0,055 – расширенная неопределенность расчета, 1,3 – минимальная величина подкритичности активной зоны, допускаемая паспортом реактора, $\beta_{\text{эфф}}$.

4) Для минимальной эффективности РО АЗ-КО в зоне АЗ без учета наиболее эффективного РО выполняется следующее неравенство:

$$R_{\Sigma AZmin} \geq 1,59 \cdot (1 - 0,045) = 1,52 , \quad (5)$$

где 0,045 – расширенная неопределенность измерения эффективности РО АЗ-КО.

Таблица № 1

Сводка пяти чисел, размах и интерквартильный размах реактивных характеристик реактора СМ
Five-number summary, range, and interquartile range of the reactivity characteristics of the SM reactor

Параметр, $\beta_{эфф}$	Характеристика					$Z_{max} - Z_{min}^6$	$Q_3 - Q_1^7$
	Z_{min}^1	Q_1^2	Q_2^3	Q_3^4	Z_{max}^5		
$R_{\Sigma KO}$	7,43	8,65	8,92	9,45	11,85	4,42	0,79
R_{KOmax}	1,99	2,38	2,45	2,59	3,13	1,14	0,21
R_{KOmin}	1,48	1,88	2,00	2,16	2,85	1,37	0,28
$R_{\Sigma A3-KO}$	5,44	6,19	6,46	6,66	8,68	3,24	0,48
$R_{\Sigma A3}$	2,16	2,24	2,32	2,42	3,62	1,46	0,18
$R_{\Sigma KO(A3-KO)}$	3,27	3,89	4,07	4,34	5,06	1,79	0,44
$R_{\Sigma 3-x A3}$	1,59	1,65	1,65	1,76	2,59	1,00	0,11
$R_{\Sigma AP}$	0,03	0,06	0,07	0,08	0,11	0,08	0,02
ρ_c	7,50	8,60	9,36	10,10	13,06	5,56	1,50
ρ_s	2,35	3,42	3,72	4,17	5,33	2,98	0,75

Примечания:

1 – минимальное значение в выборке; 2 – значение первого квартиля; 3 – значение второго квартиля (медианы); 4 – значение третьего квартиля; 5 – максимальное значение в выборке; 6 – размах ряда чисел; 7 – межквартильный размах.

5) Реально полученные в экспериментах значения эффективности трех РО АЗ выше минимальной эффективности, использованной при анализе безопасности реактора, результаты которого представлены в отчете по обоснованию безопасности, равной $1,5 \beta_{эфф}$.

Корреляционный и регрессионный анализ

Для определения статистической связи между исследуемыми величинами были рассчитаны коэффициенты корреляции Спирмена [5]. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена подходит для использования по отношению к данным, которые могут иметь распределение, отличное от нормального, или иметь нелинейную связь, кроме того, он устойчив к выбросам, что делает его полезным при анализе распределений, где экстремальные значения могут исказить результаты.

В таблице № 2 представлены результаты вычисления ранговых коэффициентов Спирмена ρ .

Для интерпретации тесноты связи между величинами используется шкала Чеддока: если значение коэффициента корреляции находится от 0,1 до 0,3, то связь считается слабой, умеренная связь – от 0,3 до 0,5, заметная связь – от 0,5 до 0,7, высокая связь – от 0,7 до 0,9, весьма высокая (сильная) связь – от 0,9 до 1,0.

Из представленной таблицы можно сделать вывод, что имеется корреляционная связь между:

1) $R_{\Sigma KO}$ и R_{KOmax} ;

2) $R_{\Sigma KO}$ и ρ_c (необходимо отметить, что в данном случае эта корреляция справедлива только для компоновок активной зоны, реализованных в период 2020–2025 гг. или аналогичных им);

3) $R_{\Sigma A3-KO}$, $R_{\Sigma KO(A3-KO)}$ и $R_{\Sigma A3}$ – связь обусловлена соотношением $R_{\Sigma A3-KO} = R_{\Sigma A3} + R_{\Sigma KO(A3-KO)}$;

4) $R_{\Sigma A3}$ и $R_{\Sigma 3A3}$ – связь обусловлена соотношением $R_{\Sigma A3} = R_{\Sigma 3A3} + R_{A3max}$, где R_{A3max} – наиболее эффективный РО АЗ-КО в зоне АЗ.

Для первых двух пар величин простых соотношений не существует, поэтому для описания связи между ними использовали средства регрессионного анализа, а именно оценочную функцию Тейла-Сена. Эта функция является несмещенной оценкой наклона линейной регрессии, имеющей вид:

$$y = a + bx, \quad (6)$$

где a и b – параметры регрессии.

Чтобы рассчитать коэффициенты b_1 и b_2 , входящих в состав уравнений линейной регрессии между величинами $R_{\Sigma KO}$ и R_{KOmax} , $R_{\Sigma KO}$ и ρ_c , была произведена оценка угловых коэффициентов (1711 оценок для каждого коэффициента, $N = \frac{59 \cdot (59-1)}{2}$) распределений с помощью выражений β_{ij} :

$$\begin{aligned} \beta_{1ij} &= \frac{R_{\Sigma KOj} - R_{\Sigma KOi}}{R_{KOmaxj} - R_{KOmaxi}}, i < j, i = 1, \dots, 58, j = 2, \dots, 59; \\ \beta_{2ij} &= \frac{\rho_{cj} - \rho_{ci}}{R_{\Sigma KOj} - R_{\Sigma KOi}}, i < j, i = 1, \dots, 58, j = 2, \dots, 59. \end{aligned} \quad (7)$$

Таблица № 2

Коэффициенты корреляции Спирмена ρ
Spearman's rank correlation coefficients ρ

Параметр	Сравниваемый параметр									
	$R_{\Sigma KO}$	R_{KOmax}	R_{KOmin}	$R_{\Sigma A3-KO}$	$R_{\Sigma A3}$	$R_{\Sigma KO(A3-KO)}$	$R_{\Sigma 3-x A3}$	$R_{\Sigma AP}$	ρ_c	ρ_s
$R_{\Sigma KO}$	1	0,85	0,68	0,33	0,21	0,30	0,20	0,10	0,78	-0,12
R_{KOmax}		1	0,45	0,36	0,24	0,33	0,21	0,03	0,67	-0,10
R_{KOmin}			1	0,11	0,23	0,01	0,27	0,1	0,54	-0,04
$R_{\Sigma A3-KO}$				1	0,70	0,86	0,63	-0,30	0,54	-0,15
$R_{\Sigma A3}$					1	0,29	0,92	-0,51	0,28	-0,10
$R_{\Sigma KO(A3-KO)}$						1	0,20	-0,04	0,46	-0,04
$R_{\Sigma 3-x A3}$							1	-0,53	0,30	-0,14
$R_{\Sigma AP}$								1	-0,11	0,54
ρ_c									1	-0,54
ρ_s										1

Примечания: жирным шрифтом отмечены значения статистически значимых (при доверительной вероятности P , равной 0,95) ранговых коэффициентов корреляции, характеризующих высокую связь ($\rho \geq 0,7$).

Угловой коэффициент β_{1ij} находится в пределах от минус 193,4 до 1 150,6, а β_{2ij} – от минус 410,8 до 101,4 (рис. 7; для наглядности приведены только значения в пределах от минус 10 до 10).

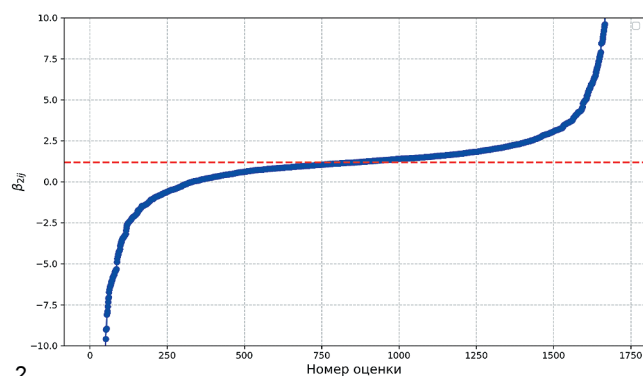
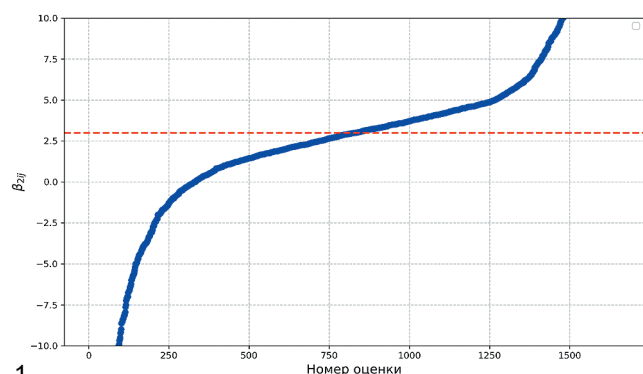


Рис. 7. Упорядоченные ряды β_{1ij} (1) и β_{2ij} (2)
[Fig. 7. Ordered sequences β_{1ij} (1) and β_{2ij} (2)]

Коэффициенты из уравнений линейной регрессии b_1 и b_2 равны медианам множеств β_{1ij} и β_{2ij} 3,08 и 1,18 соответственно. Коэффициенты a_1 и a_2 нашли из следующих уравнений:

$$\begin{aligned} Q(R_{\Sigma KO}) &= a_1 + b_1 \cdot Q(R_{KOmax}); \\ Q(\rho_c) &= a_2 + b_2 \cdot Q(R_{\Sigma KO}), \end{aligned} \quad (8)$$

где $Q(X)$ – медианы набора чисел X (таблица № 1).

Отсюда коэффициенты a_1 и a_2 в уравнениях линейной регрессии будут равны 1,32 и минус 1,19. Следовательно, оценочные функции Тейла-Сена для рассматриваемых величин примут следующий вид:

$$\begin{aligned} R_{\Sigma KO} &= 1,32 + 3,08 \cdot R_{KOmax}; \\ \rho_c &= 1,18 \cdot R_{\Sigma KO} - 1,19. \end{aligned}$$

Для проверки выдвинутой статистической гипотезы о равенстве углового коэффициента регрессии β_{1ij} и β_{2ij} указанным значениям рассчитали значение критерия C_α при уровне статистической значимости $\alpha = 0,95$ и статистики C_1 и C_2 [5]:

$$\begin{aligned} C_\alpha &= u_{\frac{1+\alpha}{2}} \sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}} = \\ &= u_{0,975} \sqrt{\frac{59(59-1)(2 \cdot 59 + 5)}{18}} \\ &\approx 1,96 \cdot 152,91 \approx 299,72, \end{aligned} \quad (9)$$

где $u_{\frac{1+\alpha}{2}}$ – квантиль уровня $\frac{1+\alpha}{2}$ стандартного нормального распределения, $\alpha = 0,95$;

$$C_1 = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^{j-1} \delta([R_{\Sigma KOj} - 3,08 \cdot R_{KOmaxj}] - [R_{\Sigma KOi} - 3,08 \cdot R_{KOmaxi}]) = -24 ;$$

$$C_2 = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^{j-1} \delta([\rho_{cj} - 1,18 \cdot R_{\Sigma KOj}] - [\rho_{ci} - 1,18 \cdot R_{\Sigma KOi}]) = 0, \quad (10)$$

где $\delta(x) = 1$, если $x > 0$; 0 , если $x = 0$; -1 , если $x < 0$.

Так как абсолютные значения C_1 и C_2 меньше C_α , то можно отвергнуть гипотезу о равенстве углового коэффициента регрессии β_{1j} и β_{2j} нулю и считать их равными $3,08$ и $1,18$ соответственно.

Точность уравнений регрессии оценили с помощью метода обучающих и экзаменуемых выборок [7]. Метод заключается в том, что выборку наблюдений B объема n разбивают k способами на две непересекающиеся подвыборки объемов n_1 и n_2 ($n_1 + n_2 = n$): обучающую $B^{об}$, на основании которой определяются параметры функции линейной регрессии, и экзаменуемую $B^{экз}$, по наблюдениям которой оцениваются основные характеристики точности анализируемой функции.

Количественной мерой точности линейной регрессии является оценка среднеквадратической ошибки аппроксимации σ^2 , рассчитываемой для $R_{\Sigma KO}$ и ρ_c по следующим формулам [5]:

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{n-2-1} \sum_{j=1}^k \sum_{B_{1i}^{экз}(l)} (R_{\Sigma KOj} - a_{1j}(m) - b_{1j}(m)R_{KOmaxj})^2 ;$$

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{n-2-1} \sum_{j=1}^k \sum_{B_{2i}^{экз}(l)} (\rho_{cj} - a_{2j}(m) - b_{2j}(m)R_{\Sigma KOj})^2, \quad (11)$$

где $B_{1i}^{экз}(l)$ и $B_{2i}^{экз}(l)$ – экзаменуемые подвыборки выборок $B_1 = \{R_{\Sigma KOi}, R_{KOmaxi}; i = 1, 2, \dots, n; n = 59\}$ и $B_2 = \{\rho_{cj}, R_{\Sigma KOj}; i = 1, 2, \dots, n; n = 59\}$ соответственно; $a_{1j}(m)$, $b_{1j}(m)$, $a_{2j}(m)$ и $b_{2j}(m)$ – параметры регрессии, вычисленные с помощью оценки Тейла-Сена для обучающих подвыборок $B_{1i}^{об}(m)$ и $B_{2i}^{об}(m)$.

В таблице № 3 приведены результаты оценки среднеквадратической ошибки аппроксимации для разных значений разбинок выборок k .

Для оценки погрешности регрессии выбрали наибольшие значения среднеквадратического отклонения – $0,483$ и $0,643$ соответственно. В результате получили, что с вероятностью $0,95$ погрешность аппроксимации функцией регрессии не превышает:

$$\pm u_{\frac{1+0,95}{2}} \sigma_1 = \pm 1,96 \cdot 0,483 = \pm 0,95 \beta_{эфф}; \quad (12)$$

$$\pm u_{\frac{1+0,95}{2}} \sigma_2 = \pm 1,96 \cdot 0,643 = \pm 1,26 \beta_{эфф}.$$

Таким образом, с вероятностью $0,95$ справедливы следующие неравенства:

$$\begin{cases} R_{\Sigma KO} \geq 0,37 + 3,08 \cdot R_{KOmax} ; \\ R_{\Sigma KO} \leq 2,27 + 3,08 \cdot R_{KOmax} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \rho_c \geq 1,18 \cdot R_{\Sigma KO} - 2,45 ; \\ \rho_c \leq 1,18 \cdot R_{\Sigma KO} + 0,07 . \end{cases} \quad (14)$$

Точность регрессии проиллюстрирована на рис. 8, из которого видно, что в обоих случаях подавляющая часть измерений лежит в пределах, определенных представленными неравенствами.

Закключение

В ходе выполнения работы с помощью статистических инструментов проведен анализ реактивностных параметров реактора СМ после модернизации

Таблица № 3

Характеристики разбиений выборок и точность линейной регрессии Characteristics of sample splits and the accuracy of linear regression

Число разбиений выборок k	Объем подвыборки		Точность линейной регрессии σ	
	Обучающей (m)	Экзаменуемой (l)	Для пары $R_{\Sigma KO}$ и R_{KOmax}	Для пары ρ_c и $R_{\Sigma KO}$
24	46	2	0,402	0,594
16	45	3	0,411	0,599
6	40	8	0,462	0,620
4	36	12	0,474	0,643
3	32	16	0,483	0,633

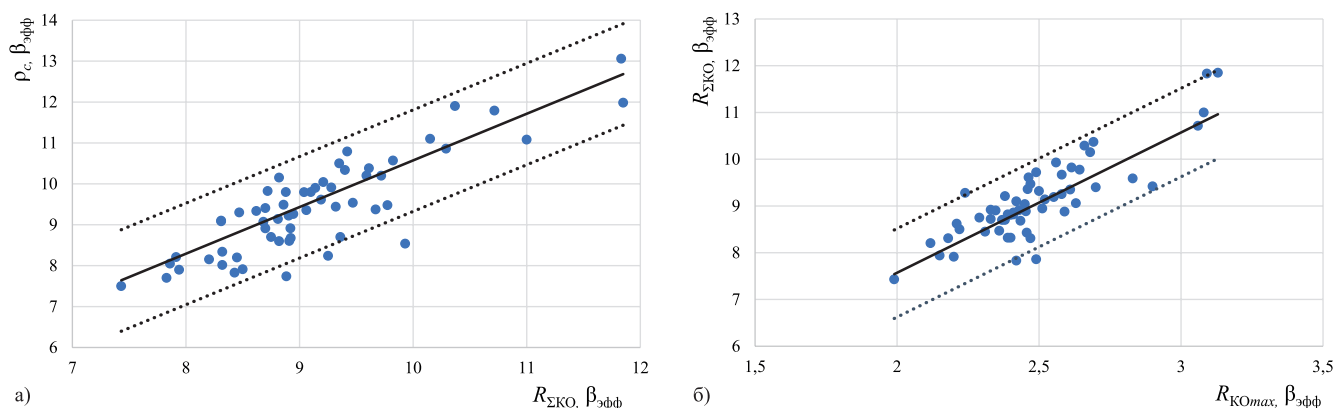


Рис. 8. Диаграммы рассеяния для пар $R_{\Sigma KO} - R_{KOmax}$ (а) и $\rho_c - R_{\Sigma KO}$ (б)
(сплошной линией обозначена линия регрессии, пунктирными – погрешность регрессии)
[Fig. 8. Scatter plots for the pairs $R_{\Sigma KO} - R_{KOmax}$ (a) and $\rho_c - R_{\Sigma KO}$ (b)
(the regression line is shown with a solid line, and the regression error with dashed lines)]

2019–2020 гг., полученных при градуировках РО СУЗ, исследованы основные тенденции изменения, взаимосвязи между величинами. По результатам анализа установлены следующие граничные значения, которые могут быть использованы при обосновании безопасности реактора в качестве исходных данных:

- минимальная подкритичность активной зоны – $2,3 \beta_{эфф}$;
- максимальная эффективность одного РО КО – $3,1 \beta_{эфф}$;

- максимальная эффективность одного РО АЗ-КО – $2,3 \beta_{эфф}$;
- минимальная эффективность одного РО АЗ-КО – $1,2 \beta_{эфф}$;
- максимальная суммарная эффективность РО КО – $11,9 \beta_{эфф}$;
- максимальная суммарная эффективность РО АЗ-КО – $8,7 \beta_{эфф}$;
- минимальная эффективность РО АЗ без учета одного наиболее эффективного органа – $1,6 \beta_{эфф}$.

Литература

1. Малков А. П. Обеспечение ядерной безопасности водоохлаждаемых исследовательских реакторов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Димитровград: [б. и.], 2013. – 210 с.
2. Тузов А. А., Ижутов А. Л., Малков А. П. и др. Реализация проекта по модернизации активной зоны реактора СМ-3 // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2024. № 2. С. 30–40.
3. Пайдулов А. В., Малков А. П., Пименов В. В. и др. Обоснование безопасности модернизированного реактора СМ и основные результаты выполнения программы экспериментальных исследований при пуске // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2024. № 2. С. 83–92.
4. Boddy R., Smith G. Statistical methods in practice: for scientists and technologists. – Chichester: John Wiley & Sons, 2009. – 248 p.
5. Кобзарь И. А. Прикладная математическая статистика: для инженеров и научных сотрудников. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.
6. Ханбиков Р. З., Малков А. П., Шаймурзин И. М. и др. Анализ показателей работы реактора СМ после модернизации / Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». – Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2025. – Вып. 3. – С. 38–50.
7. Хасты Т., Тибширани Р., Фридман Д. Основы статистического обучения: интеллектуальный анализ данных, логический вывод и прогнозирование, 2-е изд.: Пер. с англ. – СПб.: ООО «Диалектика», 2020. – 768 с.

References

1. Malkov A. P. (2013). Obespechenie yadernoi bezopasnosti vodookhlazhdaemykh issledovatel'skikh reaktorov [Ensuring nuclear safety of water-cooled research reactors]. Abstract of doctoral dissertation in technical sciences. Dimitrovgrad: [s. n.], 210 p. [in Russian].
2. Tuzov A. A., Izhutov A. L., Malkov A. P. et al. (2024). Realizatsiya proekta po modernizatsii aktivnoi zony reaktora SM-3 [Implementation of the project to modernize the core of the SM-3 reactor]. Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika, No. 2, pp. 30–40. [in Russian].
3. Paydulov A. V., Malkov A. P., Pimenov V. V. et al. (2024). Obosnovanie bezopasnosti modernizirovannogo reaktora SM i osnovnye rezul'taty vypolneniya programmy ehksperimental'nykh issledovaniy pri puske [Safety justification of the modernized SM reactor and main results of the experimental research program during startup]. Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika, No. 2, pp. 83–92. [in Russian].
4. Boddy R. & Smith G. (2009). Statistical methods in practice: for scientists and technologists. Chichester: John Wiley & Sons, 248 p.
5. Kobzar I. A. (2006). Prikladnaya matematicheskaya statistika: dlya inzhenerov i nauchnykh sotrudnikov [Applied mathematical statistics: for engineers and researchers]. Moscow: Fizmatlit, 816 p. [in Russian].
6. Khanbikov R. Z., Malkov A. P., Shaymurzin I. M. et al. (2025). Analiz pokazatelei raboty reaktora SM posle modernizatsii [Analysis of the performance indicators of the SM reactor after modernization]. In Collection of works of JSC SSC RIAR (vol. 3, pp. 38–50). Dimitrovgrad: JSC SSC RIAR. [in Russian].
7. Hastie T., Tibshirani R., Fridman J. (2020). Osnovy statisticheskogo obucheniya: intellektual'nyy analiz dannikh, logicheskiy vyvod i prognozirovanie [The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction]. Saint-Petersburg: Dialectica, 768 p. [in Russian].

Сведения об авторах

Ханбиков Разиль Загафярович, контролирующий физик 2 категории, АО «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (433510, Ульяновская обл., Димитровград, Западное ш., д. 9); аспирант, Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (433511, Ульяновская обл., Димитровград, ул. Куйбышева, д. 294).

Малков Андрей Павлович, начальник службы ядерной безопасности, АО «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (433510, Ульяновская обл., Димитровград, Западное ш., д. 9); профессор, Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (433511, Ульяновская обл., Димитровград, ул. Куйбышева, д. 294).

Пименов Василий Вениаминович, начальник лаборатории, АО «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (433510, Ульяновская обл., Димитровград, Западное ш., д. 9).

Буркацкий Егор Олегович, контролирующий физик 2 категории, АО «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (433510, Ульяновская обл., Димитровград, Западное ш., д. 9).

Шаймурзин Ильдар Марсович, контролирующий физик 2 категории, АО «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (433510, Ульяновская обл., Димитровград, Западное ш., д. 9); аспирант, Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (433511, Ульяновская обл., Димитровград, ул. Куйбышева, д. 294).

Authors credentials

Khanbikov Razil Zagafyarovich, Supervisor physicist of the 2nd category, Joint-Stock Company “State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors” (9, Zapadnoe hw, Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433510); Postgraduate Student, Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute of the National Research Nuclear University MEPhI (294, Kuibysheva str., Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433511), e-mail: razkhanbikov@mail.ru.

Malkov Andrey Pavlovich, Head of the Nuclear Safety Department, Joint-Stock Company “State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors” (9, Zapadnoe hw, Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433510); Professor, Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute of the National Research Nuclear University MEPhI (294, Kuibysheva str., Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433511), e-mail: malkovap@mail.ru.

Pimenov Vasily Veniaminovich, Head of the Laboratory, Joint-Stock Company “State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors” (9, Zapadnoe hw, Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433510), e-mail: v_pimenov@inbox.ru.

Burkatskiy Egor Olegovich, Supervisor physicist of the 2nd category, Joint-Stock Company “State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors” (9, Zapadnoe hw, Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433510), e-mail: yburkatskiy@list.ru.

Shaimurzin Ildar Marsovich, Supervisor physicist of the 2nd category, Joint-Stock Company “State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors” (9, Zapadnoe hw, Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433510); Postgraduate Student, Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute of the National Research Nuclear University MEPhI (294, Kuibysheva str., Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433511), e-mail: ildar.shaymurzin@gmail.com.

Для цитирования

Ханбиков Р. З., Малков А. П., Пименов В. В., Буркацкий Е. О., Шаймурзин И. М. Анализ изменения эффективности органов системы управления и защиты для уточнения исходных данных при обосновании безопасности реактора СМ после модернизации // Ядерная и радиационная безопасность. 2026. № 3 (121). С. 41–52. DOI: 10.26277/SECNRS.2026.121.3.004.

For citation

Khanbikov R. Z., Malkov A. P., Pimenov V. V., Burkatskiy E. O., Shaimurzin I. M. (2026). Analiz izmeneniya ehffektivnosti organov sistemy upravleniya i zashchity dlya utochneniya iskhodnykh dannykh pri obosnovanii bezopasnosti reaktora SM posle modernizatsii [Analysis of control rods effectiveness variations for refinement of input data in the safety justification of the SM reactor after modernization]. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 3 (121), pp. 41–52. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2026.121.3.004.

