

УДК 621.039.51

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.1.10>

Оригинальная статья / Original paper

Результаты тестирования модели для расчета нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора РБТ-10/2 по эксплуатационным данным

Е.И. Ефимов, В.В. Пименов, А.П. Малков

АО «ГНЦ НИИАР»,

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

Реферат. Представлены результаты тестирования нейтронно-физической модели активной зоны реактора РБТ-10/2, разработанной на базе прецизионного кода серии МСУ. Тестирование выполнялось с помощью данных, зафиксированных в эксплуатационных документах реактора в течение почти четырех лет (октябрь 2021 г. – июль 2025 г.) после его перевода на новый тип топлива с повышенным содержанием ^{235}U . Использованы эксплуатационные данные: мощность реактора, положения органов СУЗ, температура теплоносителя в бассейне, перегрузки топлива и облучательных устройств. Проведен анализ результатов моделирования критических состояний реактора, показано удовлетворительное согласие с экспериментальными данными: среднее расчетное значение реактивности за весь моделируемый период времени равно $0,22\% \Delta k/k$, среднеквадратическое отклонение – $0,14\% \Delta k/k$. Отмечены скачки реактивности между кампаниями, связанные с погрешностями определения выгорания загружаемого топлива, и тренды внутри кампаний, обусловленные неточностями учета мощности и состава топлива. Несмотря на это размах отклонений в пределах большинства кампаний не превышает $0,25\% \Delta k/k$, а максимальный размах равняется $0,45\% \Delta k/k$. Полученные результаты подтверждают адекватность модели для прогнозирования продолжительности кампаний, оценки выгорания топлива и эффектов реактивности при перегрузках.

Ключевые слова: реактор РБТ-10/2, нейтронно-физические характеристики, расчетная модель, расчетный код, МСУ, выгорание топлива, моделирование кампаний реактора.

Для цитирования: Ефимов Е.И., Пименов В.В., Малков А.П. Результаты тестирования модели для расчета нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора РБТ-10/2 по эксплуатационным данным. *Известия вузов. Ядерная энергетика.* 2026;1:122–132. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.1.10>

правило, во время длительных остановок после расхолаживания реактора и полного распада ^{135}Xe в топливе, они требуют существенных затрат реакторного времени. А определение таких характеристик, как распределение энерговыделения по активной зоне и материальный состав облученного топлива, сопряжено со столь значительными трудностями технического, организационного и экономического характера, что на практике распределение энерговыделения измерялось лишь единожды – при энергопуске реактора, а экспериментальное исследование нуклидного состава топлива после его облучения в реакторе РБТ-10/2 не проводилось ни разу.

В то же время современная вычислительная техника, прецизионное программное обеспечение и тестированные по имеющимся экспериментальным данным расчетные модели позволяют за приемлемое время рассчитывать все необходимые для обоснования безопасной работы реактора нейтронно-физические параметры активной зоны. Вместе с тем, для обоснования адекватности разрабатываемых на основе прецизионных кодов моделей требуется их валидация с использованием экспериментальных данных. Для реактора РБТ-10/2 такими экспериментальными данными являются положение органов СУЗ в критическом состоянии реактора, экспериментально определенная эффективность РО СУЗ, подкритичность реактора при всех введенных в активную зону РО СУЗ, продолжительность его кампании.

В статье приводится анализ результатов моделирования работы реактора РБТ-10/2, начиная с первой кампании после полного перевода на новый тип топлива, и оценка их достоверности путем сравнения с эксплуатационными данными. Под кампанией реактора далее понимается время работы реактора без перегрузки топлива в активной зоне. В то же время в течение топливной кампании реактор, как правило, периодически останавливают для перегрузки облучательных устройств и при необходимости для проведения работ по ремонту и техническому обслуживанию оборудования.

Расчетная модель реактора РБТ-10/2

Моделирование работы реактора и выгорания топлива проводили с применением полномасштабной расчетной модели, разработанной на базе прецизионного кода MCU-FR [3, 4], предназначенного для расчета функционалов потока нейтронов и фотонов методом Монте-Карло на основании оцененных ядерных данных. Моделирование выгорания топлива проводилось с применением встроенного модуля выгорания кода MCU [5].

В расчетной модели активной зоны реактора учтены геометрические размеры, формы и материальный состав всех значимых элементов в соответствии с конструкторской документацией. К ним относятся тепловыделяющие и конструктивные элементы ТВС, поглощающие элементы рабочих органов СУЗ, облучательные устройства (ОУ) в активной зоне и периферийных каналах, а также другие значимые (с точки зрения влияния на нейтронно-физические свойства) элементы конструкции активной зоны и ее отражателя.

В ТВС, отработавших в реакторе СМ-3 и после выдержки впервые загружаемых в реактор РБТ-10/2, заданы усредненные значения ядерных концентраций нуклидов в зависимости от среднего выгорания топлива по ^{235}U , которые берутся из базы данных имитатора активной зоны реактора СМ-3 [6]. Далее нуклидный состав топлива в ТВС рассчитывается по ходу моделирования кампаний реактора РБТ-10/2.

Для групп твэлов, усредненных по выгоранию, учтены эффекты их распухания вследствие накопления осколков деления при выгорании топлива [7]. Учтено также термическое расширение конструкционных материалов активной зоны и снижение плотности теплоносителя.

Алгоритм моделирования

В качестве исходных данных для моделирования использовались сведения (эксплуатационные данные), зафиксированные в эксплуатационном журнале и информационно-измерительной системе: график работы реактора, положение РО СУЗ, средняя тепловая мощность реактора, температура теплоносителя в бассейне и на входе в активную зону.

Работу реактора моделировали следующим образом.

1. Период времени непрерывной работы на мощности (цикл облучения) разбивали на шаги продолжительностью одни сутки, дробную часть цикла выделяли в отдельный шаг. На каждом шаге задавали среднюю мощность реактора в цикле в соответствии с эксплуатационными данными. Глубину погружения РО СУЗ в активную зону задавали равной среднестатистическому положению за моделируемый цикл:

$$\bar{P}_{\text{АЗ-КО}} = \int_0^{T_c} W(t) P_{\text{АЗ-КО}}(t) dt / \int_0^{T_c} W(t) dt,$$

где $W(t)$ – мощность реактора в момент времени t , МВт; $P_{\text{АЗ-КО}}(t)$ – глубина погружения РО АЗ–КО в активную зону в момент времени t в делениях по указателю положения; T_c – продолжительность цикла облучения, час.

2. В цикле облучения нуклидный состав изменяли только в топливе. Во всех других материалах, включая мишени для наработки осколочного ^{99}Mo , поглощающий материал в РО СУЗ и т.п., нуклидный состав оставался неизменным.

3. Значения средней температуры теплоносителя в активной зоне на всех временных шагах соответствовали эксплуатационным данным.

4. Время останова реактора (на перегрузку ТВС, ОУ, планово-предупредительный ремонт и т.п.) моделировали одним шагом, при этом мощность реактора задавали равной 1 Вт. Все РО СУЗ, кроме РО АЗ, моделировали введенными в активную зону.

5. Все изменения, вносимые в соответствии с рабочими программами в активную зону реактора во время его останова, также вносили в расчетную модель. ТВС, оставшиеся в активной зоне, сохраняли свой нуклидный состав. Вновь загружаемые ТВС имели нуклидный состав, импортируемый из базы данных имитатора активной зоны реактора СМ-3 [6].

Результатом расчетов являются значения эффективного коэффициента размножения нейтронов, распределение энерговыделения по активной зоне, нуклидный состав топлива в различные моменты циклов облучения.

Результаты моделирования работы реактора

По описанному выше алгоритму были промоделированы все кампании реактора, начиная с первой активной зоны с полной загрузкой ТВС с повышенным содержанием ^{235}U в октябре 2021 г. и заканчивая кампанией в июле 2025 г.

Данные по изменению количества ^{235}U в перегружаемых ТВС и в активной зоне за рассматриваемый период времени приведены в табл. 1 и на рис. 2. Можно отметить, что среднее выгорание в загружаемых ТВС за этот период времени уменьшилось примерно на 5%, а масса ^{235}U в активной зоне возросла примерно на 10%. Приращение массы ^{235}U в целом по активной зоне происходило, в основном, в периферийных ячейках, в то время как в центральных ячейках масса ^{235}U практически не изменилась. За счет такого перераспределения топлива по активной зоне уменьшилась неравномерность распределения энерговыделения по ее сечению и увеличилась эффективность РО СУЗ.

Тестирование модели проводилось путем сравнения расчетных данных с экспериментально полученными данными в критических состояниях реактора в ходе его кампаний за рассматриваемый период времени. В качестве основной сопоставляемой величины использованы значения реактивности в моделируемых критических состояниях реактора. На рисунках 3а, 3б приведены результаты сравнения. Реактивность вычисляли по формуле $\rho = (k_{ef} - 1)/k_{ef} \cdot 100$, где ρ – реактивность, % $\Delta k/k$; k_{ef} – эффективный коэффициент размножения нейтронов.

Таблица 1

Выгорание ^{235}U в активной зоне и в перегружаемых ТВС

Дата начала кампании	Среднее выгорание ^{235}U , %				Число перегружаемых ТВС, шт.
	в перегружаемых ТВС		в активной зоне		
	загружаемых	выгружаемых	начало кампании	конец кампании	
07.10.2021	40,4	50,8	45,8	47,1	11
22.01.2022	41,2	52,8	46,6	47,2	1
28.03.2022	40,0	52,9	46,0	46,7	7
10.06.2022	39,6	51,4	45,5	46,5	9
14.10.2022	40,4	50,9	45,2	45,6	10
18.11.2022	30,3	52,8	43,6	44,0	7
23.12.2022	31,7	52,9	44,0	44,9	9
24.03.2023	48,8	50,0	42,6	43,1	7
03.06.2023	38,3	46,4	43,0	43,6	8
08.09.2023	34,8	52,8	42,8	43,5	5
03.11.2023	39,1	52,5	42,3	42,8	2
22.12.2023	49,7	53,0	42,5	43,2	2
16.02.2024	49,1	52,4	43,1	43,3	5
22.03.2024	43,6	52,6	43,1	44,3	6
21.06.2024	31,7	50,0	43,6	44,1	2
16.08.2024	37,9	47,0	43,6	44,0	21
01.11.2024	36,1	52,3	41,4	42,7	5
12.02.2025	32,7	52,7	41,9	42,4	7
09.04.2025	н/д*	н/д*	40,6	42,0	н/д*

Результаты тестирования модели для расчета нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора РБТ-10/2 по эксплуатационным данным

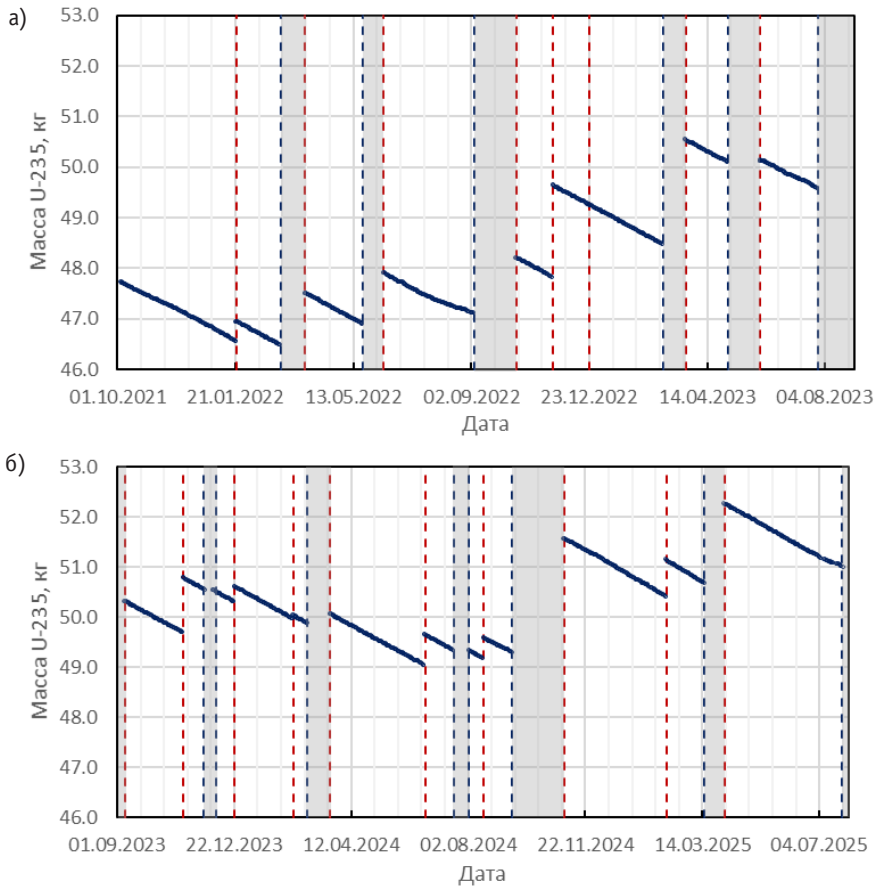


Рис. 2. Изменение массы ^{235}U в активной зоне реактора: а) период 01.10.2021 – 01.09.2023; б) период 01.09.2023 – 26.07.2025

На рисунке 3 вертикальными красными штриховыми линиями обозначены даты перегрузки топлива в активной зоне реактора, синими штриховыми линиями – начало длительного останова реактора. Красными маркерами отмечены усредненные расчетные значения реактивности для неотравленного критического состояния реактора, полученные в результате моделирования активной зоны, работающей на минимально контролируемом уровне мощности при градуировке РО СУЗ или после длительного останова реактора. Синими маркерами отмечены усредненные за один недельный цикл расчетные значения реактивности моделируемых критических состояний реактора. Горизонтальными пунктирными линиями отмечены средние значения реактивности за всю кампанию.

Расчетное значение реактивности реактора является случайной величиной, которая подвержена неконтролируемому разбросу из-за влияния ряда факторов: невозможности задания фактического распределения делящегося нуклида в твэлах ТВС со сложным профилем выгорания топлива после облучения сборок в реакторе СМ-3, неопределенности параметров расчетной модели, обусловленной допусками геометрических размеров конструктивных элементов активной зоны и ОУ и погрешностями определения их материального состава; неопределенности исходных

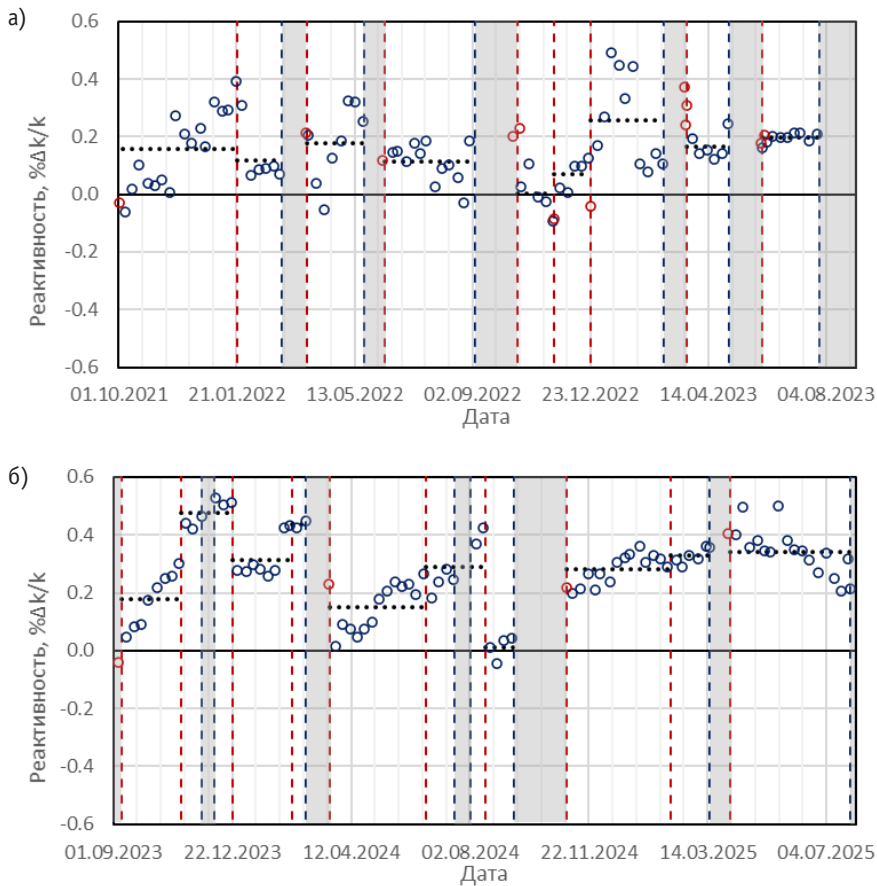


Рис. 3. Расчетные значения реактивности реактора: а) период 01.10.2021 – 01.09.2023; б) период 01.09.2023 – 26.07.2025

данных, обусловленной погрешностями измерения мощности реактора, положения РО СУЗ, температуры теплоносителя; статистическим характером метода расчета k_{ef} и скоростей нейтральных реакций.

Проверка статистической гипотезы нормальности распределения рассчитанных значений реактивности критерием Шапиро – Франчия [8] показала, что с уровнем значимости, существенно превышающим 0,1, гипотеза принимается. Следовательно, для анализа результатов расчета можно использовать статистические критерии для нормально распределенных величин. В частности, согласно критерию Шовене [8], в множестве значений реактивности выбросы отсутствуют.

Среднее значение реактивности при моделировании критического состояния реактора за весь рассматриваемый период составило 0,22% $\Delta k/k$, среднеквадратическое отклонение – 0,14% $\Delta k/k$ при систематическом завышении расчетного значения k_{ef} . Средние значения реактивности за кампанию находятся в пределах 0 – 0,35% $\Delta k/k$ во всех кампаниях за исключением одной с 07.11.2023 по 20.12.2023, в которой оно равно 0,48% $\Delta k/k$. Таким образом, моделирование почти четырехлетнего периода работы реактора показывает, что в модели не учитывается некий фактор (факторы), имеющий постоянное действие и приводящий к небольшому завышению в расчете

эффективного коэффициента размножения нейтронов. В числе таких факторов могут быть, например, небольшие изменения геометрии и (или) нуклидного состава конструкционных материалов в активной зоне реактора, которые не учитываются в модели, заниженная поглощающая способность осколков деления, обусловленная отсутствием данных о сечении взаимодействия нейтронов в расчетном коде или нуклидов с очень малой ядерной концентрацией, которые также не учитываются в расчете.

Кроме отмеченного завышения реактивности, ее значения также имеют другие отклонения, причем визуально можно заметить, что эти изменения расположены неслучайным образом. В самом деле, статистический критерий инверсий [8] дает основание практически достоверно утверждать, что расположение точек на рис. 3 носит систематический характер.

Скачкообразные изменения реактивности между окончанием одной и началом другой кампании, вероятнее всего, обусловлены погрешностью расчета нуклидного состава топлива в выгружаемых и загружаемых ТВС. Так, согласно методикам расчета выгорания топлива, погрешность определения выгорания ^{235}U в выгружаемых из реактора СМ-3 (и загружаемых в реактор РБТ-10/2) ТВС может достигать 5%, а погрешность определения выгорания в выгружаемых ТВС из реактора РБТ-10/2 с учетом предыдущей погрешности – 7%.

Скачкообразные изменения реактивности во время кампании связаны с перегрузками ОУ и устройств компенсации избытка или недостатка запаса реактивности и могут быть вызваны неопределенностями в их геометрических размерах и материальных составах.

Тренды роста или снижения реактивности в течение кампании могут быть обусловлены погрешностью контроля тепловой мощности реактора и, следовательно, неточным расчетом нуклидного состава топлива. Кроме того погрешности расчета нуклидного состава топлива могут быть вызваны случайными отклонениями расчета скорости реакции деления ^{235}U .

Несмотря на имеющиеся отклонения от среднего значения следует отметить, что размах расчетных значений реактивности в пределах кампаний невелик (рис. 4): для большинства из них он не превышает $0,25\% \Delta k/k$ и лишь для трех кампаний находится в пределах от $0,35$ до $0,45\% \Delta k/k$.

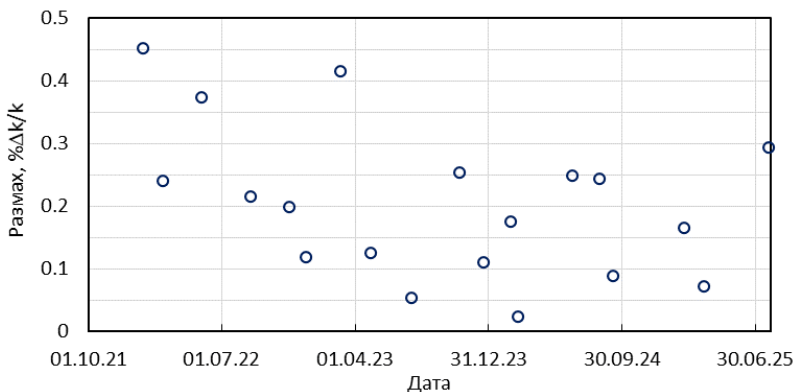


Рис. 4. Значение размаха расчетных значений реактивности в пределах одной кампании

Таким образом, наблюдаемое удовлетворительное согласие между расчетными и экспериментальными значениями коэффициента размножения нейтронов для критических состояний реактора позволяет сделать вывод об адекватности расчетной модели реактора и обоснованности ее применения для расчета параметров, зависящих от размножающих свойств системы. В частности, модель может быть применима для прогнозной оценки продолжительности кампании реактора, оценки выгорания топлива в ТВС и эффектов реактивности от перегрузки ячеек с ТВС и облучательными устройствами в экспериментальных каналах.

Заключение

Выполнено тестирование расчетной модели реактора РБТ-10/2 по данным его эксплуатации в период с 07.10.2021 г. по 26.07.2025 г. Моделировались критические состояния реактора с разнообразным распределением ^{235}U по активной зоне. Загрузка экспериментальных ячеек активной зоны отличалась большим разнообразием: от ОУ с делящимся материалом (наработка осколочного ^{99}Mo) до имитаторов ТВС, изготовленных из различных материалов (сплава алюминия, нержавеющей стали, бериллия). Максимальное отклонение расчетного значения реактивности при моделировании критических состояний реактора составило $0,48\% \Delta k/k$, среднее значение – $0,22\% \Delta k/k$, среднеквадратическое отклонение – $0,14\% \Delta k/k$ при систематическом завышении расчетного значения относительно экспериментального. Такие результаты тестирования позволяют признать адекватность модели для расчета нейтронно-физических характеристик реактора. Опосредованно они подтверждают также адекватность расчета нуклидного состава топлива работающего реактора.

Разработанная расчетная модель используется для сопровождения эксплуатации реактора РБТ-10/2, а также как средство для реперных расчетов с целью совершенствования методик расчетного и инженерного сопровождения реактора.

Литература

1. Исследовательские ядерные установки России (под ред. Н.В. Архангельского, И.Т. Третьякова, В.Н. Федулина). М.: НИКИЭТ, 2012, 326 с. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/issledovatel'skie-yadernye-ustanovki_2012/p105/ (дата обращения: 10.09.2025).
2. Шараев А.М., Малков А.П., Пайдулов А.В., Валишин М.Ф., Краснов Ю.А., Пименов В.В. Перевод реакторов типа РБТ на новое топливо. *Вестник НИЯУ МИФИ*. 2020;9(4):298–304. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2304487X20040082>
3. Гуревич М.И., Калугин М.А, Олейник Д.С., Шкаровский Д.А. Характерные особенности MSU-FR. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов*. 2016;5:17–21. EDN: XEGPYU. URL: <https://nrcki.ru/files/pdf/1487661858.pdf> (дата обращения: 10.09.2025).
4. Ефимов Е.И., Пименов В.В. Разработка и тестирование расчетной модели реактора РБТ-10/2 для определения нейтронно-физических характеристик активной зоны. Сб. трудов АО «ГНЦ НИИАР» (сб. научных статей). Димитровград, АО «ГНЦ НИИАР», 2020, вып. 3, с. 37–45. EDN: MNBWPWN.
5. Юдкевич М.С. Пакет прикладных программ BURNUP для расчета изотопного состава материалов работающего реактора. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов*, 2011;4:24–28. EDN: OIHRZX.

6. Марихин Н. Ю. Комплекс программных средств на базе прецизионного кода для расчетов нейтронно-физических параметров эксплуатации реактора СМ: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук 05.13.18. Димитровград, 2011, 135 с. EDN: QFOPTP.

7. Цыканов В.А., Чечеткина З.И., Старков В.А. и др. Основные результаты исследований твэлов реактора СМ с повышенным содержанием урана. Сб. трудов ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». Димитровград, 2005, вып. 3, с. 3–20.

8. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006, 816 с.

Поступила в редакцию 30.09.2025
После доработки 22.01.2026
Принята к опубликованию 20.03.2026

Авторы

Ефимов Евгений Ильич, научный сотрудник,
E-mail: dx2d@yandex.ru

Пименов Василий Вениаминович, начальник лаборатории, к.т.н.,
E-mail: v_pimenov@inbox.ru

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

UDC 621.039.51

Results of Model Testing for Calculating Neutron-Physical Characteristics of the RBT-10/2 Reactor Core Based on Operational Data

Efimov E.I., Pimenov V.V., Malkov A.P.

JSC «SSC RIAR»,

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

Abstract

The paper presents the results of testing the neutron-physics model of the RBT-10/2 reactor core developed using the precision MCU code. The testing was performed against data recorded in the reactor's operating documentation over almost four years (October 2021 – July 2025) after its conversion to a new fuel type with increased ^{235}U content. The analysis utilized reactor power, control rod positions, coolant temperature, and records of fuel and irradiation device reloads. An analysis of the simulated critical states shows satisfactory agreement with experimental data: the mean calculated reactivity for the entire modeled period is 0.22% $\Delta k/k$, with a root-mean-square deviation of 0.14% $\Delta k/k$. Reactivity jumps between campaigns were attributed to uncertainties in burnup determination of loaded fuel, while intra-campaign trends were linked to inaccuracies in power and fuel composition tracking. Despite this, the deviation range within most campaigns did not exceed 0.25% $\Delta k/k$, with a maximum of 0.45% $\Delta k/k$. The results confirm the model's adequacy for predicting campaign duration, fuel burnup, and reactivity effects during reloads.

Keywords: RBT-10/2 reactor, neutron-physical characteristics, computational model, calculation code, MCU, fuel burnup, reactor campaign simulation.

For citation: Efimov E.I., Pimenov V.V., Malkov A.P. Results of Model Testing for Calculating Neutron-Physical Characteristics of the RBT-10/2 Reactor Core Based on Operational Data. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2026;1:122–132. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.1.10> (in Russian).

References

1. Arkhangelsky N.V., Tretyakov I.T., Fedulin V.N. Research Nuclear Installations of Russia. Moscow, NIKIET Publ., 2012, 326 p. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/issledovatel'skie-yadernye-ustanovki_2012/p105/ (accessed Sep. 10, 2025) (in Russian).
2. Sharaev A.M., Malkov A.P., Paidulov A.V., Valishin M.F., Krasnov J.A., Pimenov V.V. Conversion of RBT Research Reactors to a New Fuel Type. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI"*. 2020;9(4):298–304. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2304487X20040082> (in Russian).
3. Gurevich M.I., Kalugin M.A., Oleynik D.S., Shkarovskiy D.A. Features of MCU-FR. *Problems of Atomic Science and Engineering. Series: Physics of Nuclear Reactors*. 2016;5:17–21. EDN: XEGPYY. URL: <https://nrcki.ru/files/pdf/1487661858.pdf> (accessed 10.09.2025) (in Russian).
4. Efimov E.I., Pimenov V.V. Development and testing of a computational model of the RBT-10/2 reactor for determining neutron-physical characteristics of the core. In: Proceedings of JSC "SSC RIAR" (collection of scientific papers). Dimitrovgrad, JSC "SSC RIAR" Publ., 2020, iss. 3, p. 37–45. EDN: MHBPWN (in Russian).
5. Yudkevich M.S. The BURNUP application software package for calculating the isotopic composition of reactor materials. *Problems of Atomic Science and Engineering. Series: Physics of Nuclear Reactors*. 2011;4:24–28. EDN: OIHRZX (in Russian).
6. Marikhin N.Yu. A software complex based on a precision code for calculations of neutron-physical parameters of SM reactor operation: Dissertation for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences 05.13.18. Dimitrovgrad, 2011, 135 p. EDN: QFOPTP (in Russian).
7. Tsykanov V.A., Chechetkina Z.I., Starkov V.A. Main results of investigations of SM reactor fuel elements with increased uranium content. In: Proceedings of FSUE "SSC RF RIAR". Dimitrovgrad, 2005, iss. 3, p. 3–20 (in Russian).
8. Kobzar A.I. Applied Mathematical Statistics for Engineers and Scientists. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006, 816 p. (in Russian).

Authors

Eugene I. Efimov, researcher,

E-mail: dx2d@yandex.ru

Vasilii V. Pimenov, Head of the Laboratory, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: v_pimenov@inbox.ru

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

E-mail: niiar@niiar.ru