

На правах рукописи
УДК 621.039.63



СОЛДАТОВ ЕВГЕНИЙ ОЛЕГОВИЧ

**РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК БЫСТРОГО РЕАКТОРА СО СВИНЦОВЫМ
ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ**

2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная
безопасность

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2026

Работа выполнена в Акционерном обществе «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала» (АО «НИКИЭТ»).

Научный руководитель: **Моисеев Андрей Владимирович**
кандидат физико-математических наук, научный
руководитель проекта БРЕСТ-ОД-300 АО «НИКИЭТ»

Официальные оппоненты: **Ельшин Александр Всеволодович**
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник отдела нейтронно-
физических исследований федерального
государственного унитарного предприятия
«Научно-исследовательский технологический
институт имени А.П. Александрова»

Невиница Владимир Анатольевич
кандидат технических наук, руководитель
отделения быстрых и высокотемпературных
реакторов ФГБУ «Национальный
исследовательский центр «Курчатовский институт»

Ведущая организация: Акционерное общество «Государственный
научный центр – Научно-исследовательский
институт атомных реакторов»

Защита состоится «20» мая 2026 г. в 11.00 на заседании диссертационного
совета 74.1.004.01 на базе АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и
конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала» по адресу:
Москва, 107140, пл. Академика Доллежала, д. 1, к.3.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, следует направлять
по адресу: Москва, 101000, а/я 788, ученому секретарю диссертационного совета
74.1.004.01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте
АО «НИКИЭТ» www.nikiet.ru.

Автореферат разослан «13» марта 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 74.1.004.01



А.В. Джалавян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящее время на площадке АО «Сибирский химический комбинат» в г. Северске осуществляется сооружение опытно-демонстрационного энергоблока с реакторной установкой (РУ) БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем и замкнутым ядерным топливным циклом (ЗЯТЦ). Для осуществления крупномасштабного развития ядерной энергетики, отвечающей современным требованиям к реакторам нового поколения, проектируется конкурентоспособный коммерческий энергоблок с РУ БР-1200 электрической мощностью 1200 МВт.

Концепция замкнутого цикла предполагает полное воспроизводство делящихся изотопов в активной зоне без применения blankets. Это позволяет эффективно использовать ресурсы урана ^{238}U путём его конверсии в плутоний ^{239}Pu в быстром спектре нейтронов, а также возможность трансмутации нарабатываемых минорных актинидов при рециклировании. В реакторах БРЕСТ-ОД-300 и БР-1200 будет использоваться смешанное нитридное уран-плутониевое топливо (СНУП), экспериментальное обоснование которого проводится на реакторах на быстрых нейтронах БОР-60 (АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград) и БН-600 (Белоярская АЭС, г. Заречный).

Спроектировать реактор для работы в режиме замкнутого ядерного топливного цикла в соответствии с нормативными требованиями возможно только с применением верифицированных и аттестованных программных комплексов, предназначенных для расчётов быстрых реакторов. Данные программные комплексы должны обеспечивать моделирование всех этапов эксплуатации реакторной установки и топливного цикла. Для решения задач физического проектирования реактора БР-1200 необходимо нейтронно-физическое моделирование ключевых стадий эксплуатации: физического пуска, формирования стартовой загрузки, начального периода работы и в режиме замыкания ядерного топливного цикла. Данный комплекс расчётов может быть выполнен с помощью прецизионного программного комплекса MCU-BR, используемого совместно с теплофизическим модулем. Однако данный подход потребует значительных вычислительных ресурсов и времени.

Расчеты кампании быстрого реактора принято проводить с использованием диффузионного программного комплекса (ПК). Поскольку диффузионная программа самостоятельно не может решить поставленные задачи из-за методических погрешностей и отсутствия опции решения нейтронно-фотонной задачи, требуется подходить к решению поставленных задач системно. Проведение полномасштабных нейтронно-физических расчетов реактора БР-1200 на различных этапах эксплуатации подразумевает использование системы детализированных прецизионных и диффузионных расчетных моделей в современных программных комплексах для снижения погрешности расчетов. Перед выполнением данной работы расчетные модели активной зоны БР-1200, которые моделируют представленные выше состояния реактора, не были разработаны, а программные комплексы не верифицированы и не аттестованы. Таким образом, разработка системы детализированных расчетных моделей активной зоны реактора БР-1200 и выполнение с их использованием нейтронно-физических расчетов является актуальной задачей.

Цель и задачи работы.

Целью диссертационного исследования является разработка системы детализированных прецизионных, диффузионных расчетных моделей и выполнение нейтронно-физических расчетов реактора БР-1200.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- подготовка системы кодов для проведения нейтронно-физических расчетов реактора БР-1200;
- верификация программы FACT-BR для нейтронно-физических расчетов быстрого реактора со свинцовым теплоносителем большой мощности;
- разработка системы расчетных моделей активной зоны реактора БР-1200 в программных комплексах FACT-BR и MCU-BR;
- выполнение расчетного анализа нейтронно-физических характеристик на этапе физического пуска;
- моделирование нейтронно-физических характеристик реактора в стартовой загрузке, на начальном этапе эксплуатации и в замкнутом ядерном топливном цикле.

Научная новизна.

Выполнена подготовка и адаптация системы кодов для расчетов нейтронно-физических характеристик реактора БР-1200, ранее применявшаяся для РУ БРЕСТ-ОД-300, впервые проведена верификация программы FАСТ-BR для реактора со свинцовым теплоносителем большой мощности.

Впервые для реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем большой мощности БР-1200 разработана система детализированных расчетных моделей в диффузионном и прецизионном программных комплексах FАСТ-BR и MSU-BR и выполнены основные расчеты нейтронно-физических характеристик реактора на этапах физического пуска, стартовой загрузки, начального этапа эксплуатации, в режиме замыкания ядерного топливного цикла.

Предложены решения по безопасной эксплуатации быстрого реактора со свинцовым теплоносителем большой мощности на этапах физического пуска, стартовой загрузки, начального этапа эксплуатации и в режиме замыкания ядерного топливного цикла.

Практическая значимость.

Разработанная система детализированных расчетных моделей использовалась на стадии эскизного проектирования и используется на стадии технического проекта РУ БР-1200.

Результаты нейтронно-физических расчетов на этапах физического пуска, стартовой загрузки, начального этапа эксплуатации использованы при разработке программ физического, энергетического пусков, опытно-промышленной эксплуатации, методик и систем измерений нейтронно-физических характеристик.

Проведенные исследования позволили уточнить набор выполняемых измерений и порядок проведения физического пуска реактора БРЕСТ-ОД-300, который является референтным по отношению к реактору БР-1200.

Результаты нейтронно-физических расчетов в режиме замкнутого ядерного топливного цикла применяются в технико-экономическом обосновании эксплуатации быстрого реактора со свинцовым теплоносителем большой мощности БР-1200.

Основные положения, выносимые на защиту.

- 1) Результаты верификации программного комплекса FACT-BR для расчетов быстрого реактора со свинцовым теплоносителем большой мощности.
- 2) Система детализированных расчетных моделей активной зоны реактора БР-1200 в диффузионном и прецизионном программных комплексах FACT-BR и MCU-BR.
- 3) Результаты нейтронно-физических расчетов БР-1200 на этапе физического пуска, методология проведения измерений нейтронно-физических характеристик, разработки методик и систем измерения.
- 4) Разработанные подходы к эксплуатации быстрого реактора со свинцовым теплоносителем большой мощности на момент стартовой загрузки и начального этапа эксплуатации.
- 5) Результаты расчетов нейтронно-физических характеристик полномасштабной, равновесной активной зоны реактора БР-1200 в режиме замкнутого ядерного топливного цикла.

Достоверность и обоснованность полученных результатов.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается использованием верифицированных и аттестованных программных комплексов MCU-BR и FACT-BR для расчетов реактора БРЕСТ-ОД-300, выполненной верификацией и аттестацией программ для расчетов быстрого реактора со свинцовым теплоносителем большой мощности и сравнением с экспериментальными данными.

Апробация работы.

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях:

- научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики – Нейтроника» (г. Обнинск, 2019, 2022, 2024 гг.);
- конференция молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике» (г. Москва, 2019 г.);
- VI международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (г. Москва, 2023 г.);

- международная конференция МАГАТЭ FR-22 «Быстрые реакторы и связанные с ними топливные циклы: устойчивая энергия будущего» (Вена, Австрия, 2022 г.);

- международная конференция МАГАТЭ по тематическим вопросам ядерной безопасности «Повышение безопасности эволюционных и инновационных конструкций реакторов» (Вена, Австрия, 2022 г.);

- международная научно-практическая конференция молодых специалистов, ученых и аспирантов по физике ядерных реакторов – Волга-2024 (2024 г.);

- международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов атомной отрасли «КОМАНДА» (г. Санкт-Петербург, 2025 г.).

Публикации.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 4-х статьях в журналах, включенных в перечень ВАК («Вопросы атомной науки и техники, Серия: Ядерно-реакторные константы», «Известия вузов. Ядерная энергетика») и международные базы данных Scopus, Web of Science («Атомная энергия») и 10 докладах в сборниках трудов международных и российских конференций.

Личный вклад.

В процессе выполнения исследований автор принимал непосредственное участие в подготовке системы кодов для расчетов быстрого реактора со свинцовым теплоносителем большой мощности, разработке расчетных моделей активной зоны реактора БР-1200, верификации программы FАCT-BR, расчетах нейтронно-физических характеристик реактора на этапе физического пуска, стартовой загрузки, начального этапа эксплуатации, в режиме замыкания ядерного топливного цикла, а также в анализе гомогенного и гетерогенного варианта трансмутации америция, сформулировал основные выводы и рекомендации по результатам работы.

Структура и объем работы.

Диссертация содержит введение, пять глав, заключение. Объем работы составляет 122 страницы, включая 55 рисунков и 58 таблиц. Список литературы содержит 84 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность работы, поставлены цели и задачи, изложены положения, выносимые на защиту, а также указана новизна и практическая значимость работы. Определен предмет исследования – нейтронно-физические характеристики быстрого реактора со свинцовым теплоносителем большой мощности БР-1200.

В первой главе выполнен обзор программных комплексов для проведения нейтронно-физических расчетов быстрых реакторов, представлены основные программные комплексы, предназначенные для расчетов реакторов БН и БРЕСТ-ОД-300.

Для учета особенностей эксплуатации реактора БР-1200 в расчетном моделировании его работы необходимо анализировать запас реактивности, коэффициент воспроизводства, распределение энерговыделения, предельную температуру оболочек, максимальное выгорание (топлива, материалов поглотителя), повреждающую дозу, эффективности групп рабочих органов (РО) системы управления и защиты (СУЗ); баланс и изотопный состав топлива. С целью решения данных задач с приемлемой точностью и скоростью расчетов подготовлена система кодов.

Архитектура рассматриваемой системы кодов построена по модульному принципу и включает в себя несколько программных комплексов. Их согласованная работа обеспечивается модулем управления, который координирует обмен входными и выходными данными. В состав системы входят: диффузионный программный комплекс FACT-BR, система подготовки нейтронных сечений CONSYST, использующая библиотеку БНАБ-93, прецизионный комплекс MCU-BR, теплофизический модуль IVIS-BR, а также модуль для расчета выгорания топлива.

В системе кодов с использованием программы FACT-BR предлагается проводить расчеты запаса реактивности, параметров кинетики, эффективности групп РО СУЗ, эффектов реактивности, распределения энерговыделения в топливе, нуклидной кинетики, пространственной кинетики и задачи с источником нейтронов. С использованием программы MCU-BR необходимо выполнять расчетное

моделирование переноса нейтронов, фотонов и уточняющие расчеты для корректировки методических погрешностей нейтронно-физического расчета в диффузионном приближении.

Во второй главе приведены результаты разработки системы детализированных моделей для расчетов нейтронно-физических характеристик реактора БР-1200.

С использованием входных параметров реактора проводится разработка расчетной модели в диффузионной программе FACT-BR в гомогенном представлении. Далее проводится нейтронно-физический и теплофизический расчет для стабилизации распределений энерговыделения и температур. Прецизионный нейтронно-физический расчет осуществляется в программном комплексе MCU-BR на основе данных, предварительно рассчитанных в диффузионном комплексе FACT-BR. В MCU-BR подбираются поправочные коэффициенты для корректировки методических погрешностей в диффузионном программном комплексе FACT-BR, в котором выполняется нейтронно-физический и теплофизический расчет с поправочными коэффициентами и получаются актуализированные поля энерговыделения и температур.

Для программного комплекса FACT-BR представлена расчетная модель реактора БР-1200 в гомогенном представлении (рисунок 1). Расчетная модель разбита на 33 аксиальных слоя. Для снижения методических погрешностей и увеличения точности расчетов в ПК FACT-BR внесены корректирующие коэффициенты. Поправки вносятся для расчетов запаса реактивности, эффективности групп РО СУЗ, распределения энерговыделения. Поправка для макросечения поглощения титаната диспрозия составляет 0,83, для карбида бора – 0,67. С использованием поправок относительное отклонение в суммарной эффективности РО СУЗ от результатов расчетов по программе MCU-BR составляет 2,1 %. Поправка в запасе реактивности составляет 0,5 % $\delta K/K$. Для расчетов распределения энерговыделения используется нормировка приблизительно 98 % на энерговыделение в топливе активной зоны. Введение форм-функции в потвэльном распределении корректирует распределение энерговыделения в твэлах рядом с трубками на величину приблизительно 10 % отн.

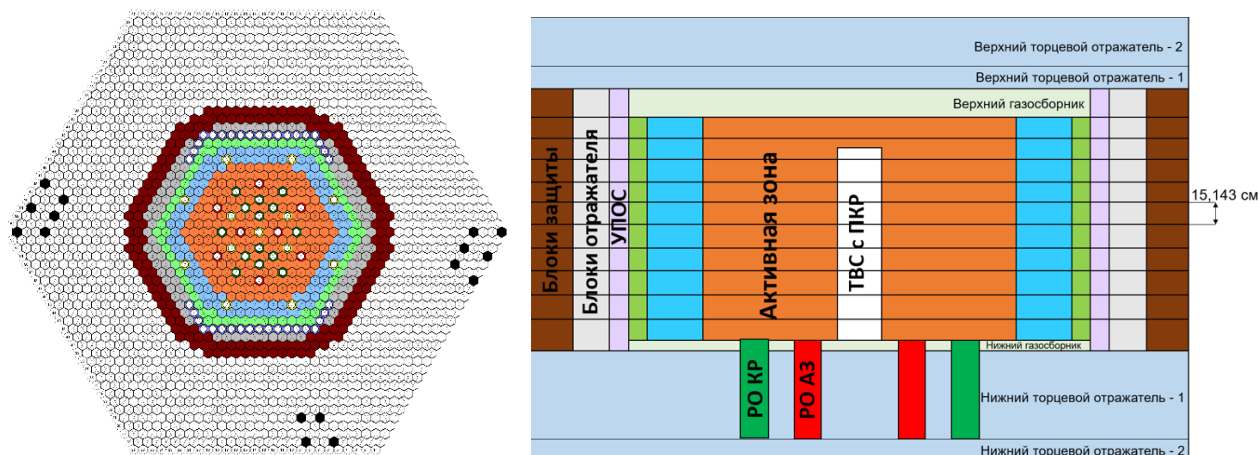


Рисунок 1 – Расчетная модель БР-1200 в диффузионном ПК FACT-BR

Для создания прецизионной расчетной модели (рисунок 2) использовалась Платформа – БРЕСТ, для которой были сформированы прецизионные геометрические шаблоны изделий активной зоны и библиотека физических параметров (ядерные концентрации и температуры). Из FACT-BR в Платформу передаются данные о картограмме расположения элементов активной зоны, глубине ввода РО СУЗ, распределениях температур.

Разработаны шаблоны конструкций тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), направляющих труб, имитаторов ТВЭЛ, поглощающих элементов, тепловыделяющих сборок (ТВС), ТВС с органами аварийной защиты (РО АЗ), органами компенсации реактивности (РО КР), органами автоматического регулирования (РО АР), ТВС с постоянным компенсатором реактивности (ПКР), блоков отражателя, блоков защиты, блоков отражателя с устройством пассивной обратной связи (44 шаблона).

По результатам работы Платформы – БРЕСТ сформирована полномасштабная прецизионная расчетная модель (рисунок 3), в которой задано 4420 материалов. С использованием разработанной расчетной модели нодальный расчет функционалов (плотности потока нейтронов (ППН), энерговыделения, повреждающих доз) может быть проведен с тремя вариантами разбиения активной зоны на регистрационные объекты. В первом варианте количество регистрационных зон составляет 15466, во втором - 7030, в третьем - 3910.

Расчетные модели для программ FACT-BR, MCU-BR позволяют моделировать нейтронно-физические характеристики реактора в стационарных состояниях с учетом

выгорания топлива, а также в приближениях задачи с источником и пространственной кинетики.

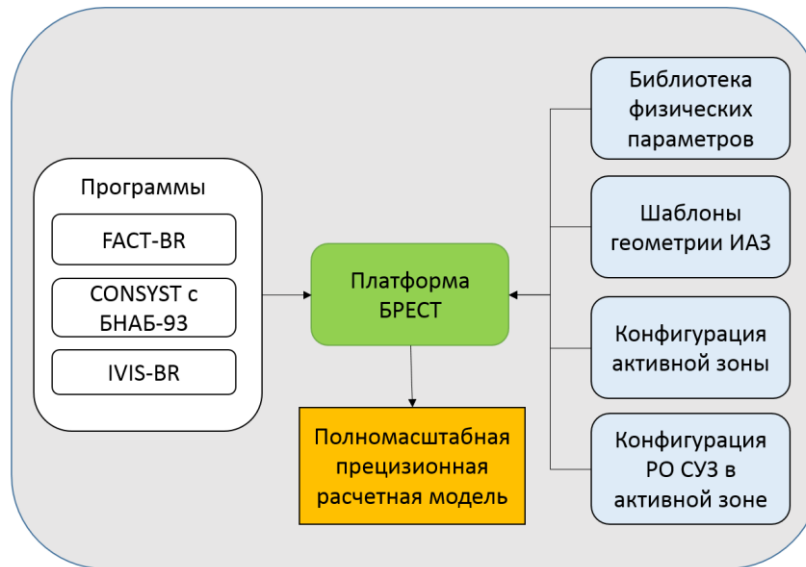


Рисунок 2 – Передача данных для разработки прецизионной расчетной модели для программы MCU-BR

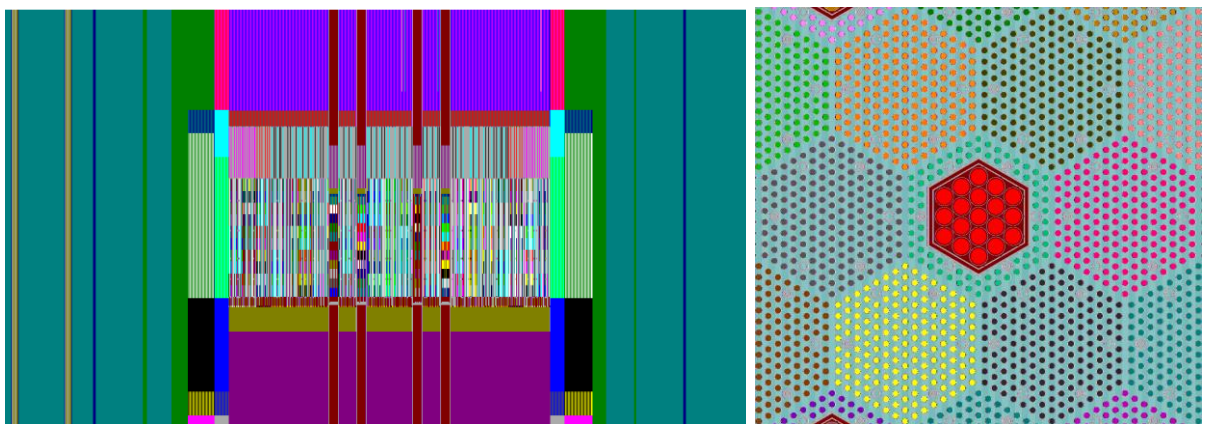


Рисунок 3 – Расчетная модель РУ БР-1200 в прецизионном ПК MCU-BR

Проведена верификация программы FACT-BR для расчетов основных нейтронно-физических характеристик быстрого реактора со свинцовым теплоносителем большой мощности. Максимальное отклонение в эффективности систем РО СУЗ составляет 15 %, максимальное отклонение в распределении энерговыделения в топливной части активной зоны составляет 10 %.

С использованием системы детализированных расчетных моделей проведен комплексный анализ нейтронно-физических характеристик на этапах физического

пуска, стартовой загрузки, начальной эксплуатации, в режиме замыкания ядерного топливного цикла.

В третьей главе рассмотрены методические подходы к расчетному моделированию физического пуска реактора БР-1200. На физическом пуске реактора БР-1200 для контролируемого набора критической массы предусматривается применение пускового источника нейтронов на основе изотопа ^{252}Cf в центральной ячейке активной зоны. Однако корпусные детекторы в реакторе БР-1200 могут находиться на радиусе от 8200 до 9560 мм от центра активной зоны, где ППН значительно снижается. Расчетная оценка плотности потока нейтронов в имитационной зоне с внешним источником нейтронов интенсивностью 10^9 1/с показала, что для проведения контролируемого набора критической массы необходимо использовать дополнительную систему детекторов (ППН лежит в диапазоне от 56 до 15939 1/(см²·с)), нейтронный поток в корпусных детекторах составляет менее 1 (1/(см²·с)).

В процессе набора критической массы проведен расчет кривых обратного умножения для состояний с введенными и выведенными РО СУЗ (рисунок 4). По расчетным оценкам физического пуска реактора БР-1200 минимальная критическая загрузка достигается при загрузке в активную зону 340 ТВС.

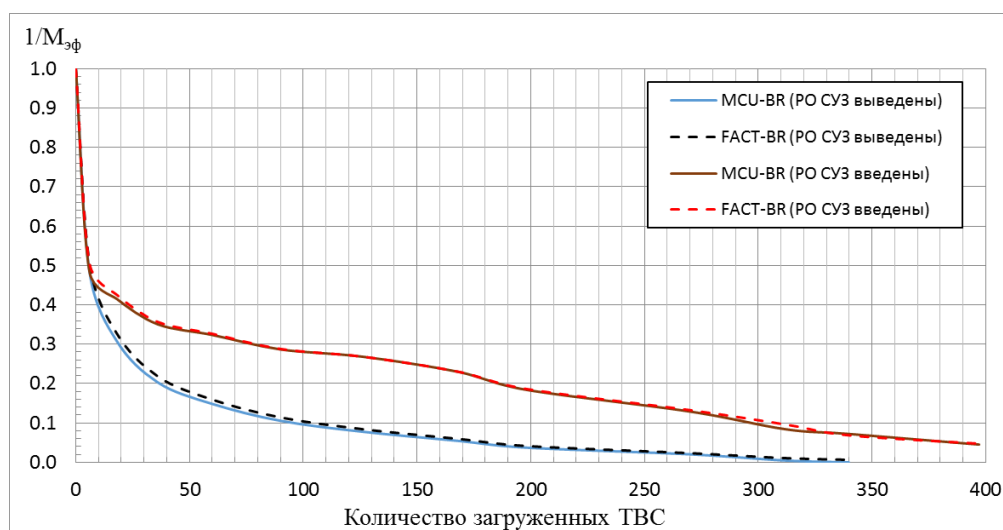


Рисунок 4 – График зависимости обратной величины коэффициента умножения нейтронов при загрузке ТВС

Расчеты нейтронно-физических характеристик стартовой загрузки быстрого реактора со свинцовым теплоносителем выполняются с учетом расчетных погрешностей и неопределенностей материального состава активной зоны, топлива и ТВС. Принято, что совокупная погрешность расчета составляет 0,7 %. Для компенсации этих неопределенностей применяются ПКР различных типов. Разработаны конфигурации с компенсацией избытка реактивности в 0 и 1,4 % (рисунок 5).

В "холодном состоянии" требуется скомпенсировать температурно-мощностной эффект реактивности, а также запас реактивности на выгорание. Для вывода реактора в критическое состояние все стержни РО КР частично вводятся на глубину 35 см, а все стержни РО АР на 55 см. Измерение эффективности отдельных стержней РО КР и АР выполняется с использованием цифрового реактиметра перекомпенсацией извлекаемого стержня. Системы РО АЗ, АР могут быть измерены методом обращенного решения уравнения кинетики (ОРУК), отклонение оценки эффективности РО от прямого расчета составляет до 2 %.

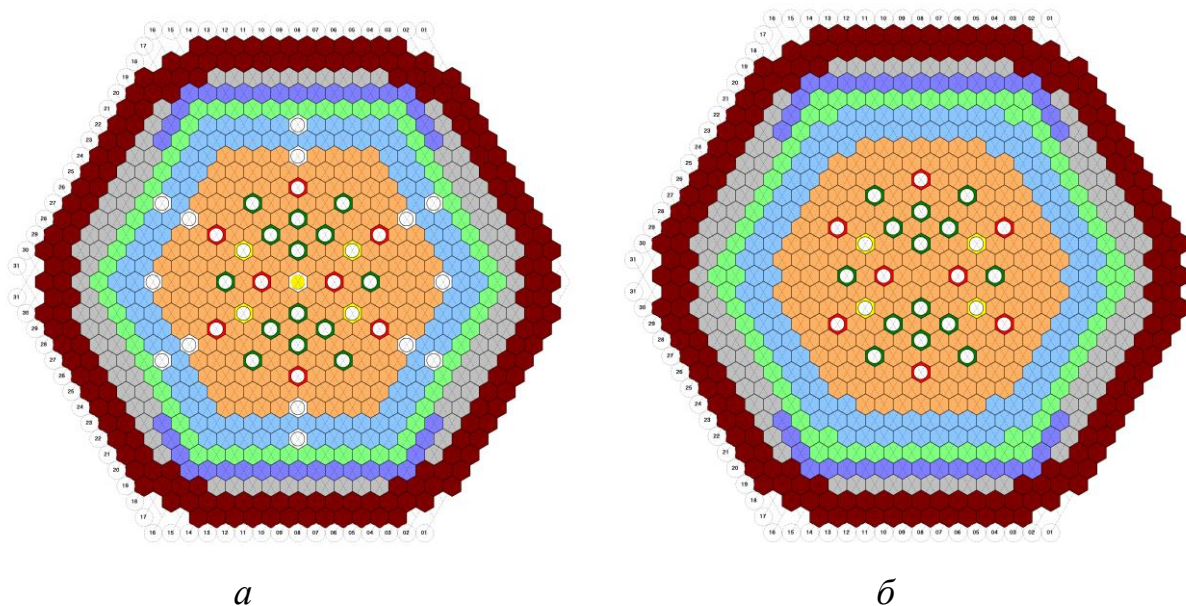


Рисунок 5 – Картограммы загрузок реактора БР-1200:
а – вариант с избытком реактивности 1,4 %, *б* - вариант с нулевой избыточной реактивностью

Эффективность всех стержней РО КР, РО СУЗ не может быть измерена методом перекомпенсации и ОРУК, поэтому изучены и смоделированы методы измерений

крайних оценок (МКО), парной интерференции (МПИ), восстановления по градуировке (Град.). Результаты моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Эффективности РО СУЗ в стартовой загрузке

СУЗ	Эффективность, % $\delta K/K$					Отклонение, %			
	Прямой расчет	ОРУК	МКО	МПИ	Град.	ОРУК	МКО	МПИ	Град.
РО АЗ	3,23	3,29	-	-	-	-1,94	-	-	-
РО КР	3,88	4,16	4,12	3,52	4,09	-7,40	-6,30	9,28	-5,53
РО АР	0,57	0,58	-	-	-	-1,96	-	-	-
РО СУЗ	5,67	6,42	6,28	4,46	-	-13,30	-10,81	21,34	-

Среди представленных косвенных методов для измерения РО КР и РО СУЗ наибольшие отклонения от прямого расчета получились по методу парной интерференции (до 20 %). Рекомендуется РО КР, СУЗ измерять методами крайних оценок и восстановления по градуировке, отклонение оценки эффективности РО с использованием данных методов от прямого расчета составляет до 10 %.

В четвертой главе представлены результаты исследований нейтронно-физических характеристик в стартовой загрузке и на начальном этапе эксплуатации.

С использованием ТВС с ПКР сформирована активная зона реактора БР-1200 с запасом реактивности в $0,56 \beta_{эф}$ на номинальном уровне мощности. В стартовой загрузке обеспечивается коэффициент воспроизводства приблизительно 1,11 на свежем топливе для выхода в установившийся режим частичных перегрузок на выгоревшей активной зоне. Высокий коэффициент воспроизводства в стартовой загрузке приводит к выбегам запаса реактивности (выше $1 \beta_{эф}$) в первых микрокампаниях, для компенсации которого необходимо провести короткие остановки в первой микрокампании на 110 и 220 эф.сут для перестановки ТВС с ПКР.

При моделировании начального этапа эксплуатации реактора БР-1200 рассматривается изотопный состав плутония, принятый в качестве базового для БРЕСТ-ОД-300. Рассмотрено влияние различных типовых вариантов изотопного состава плутония на возможность работы реактора в равновесном режиме с малым

запасом реактивности. Нейтронно-физические расчеты проводятся для следующих наиболее характерных изотопных составов плутония:

- из свежего отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) реактора ВВЭР-1000;
- топливо стартовой загрузки реактора БН-1200М;
- из свежего ОЯТ МОХ-топлива реактора ВВЭР-1000;
- низкофоновый плутоний, извлеченный из blankets реактора БН-800.

Результаты моделирования показывают, что в зависимости от состава плутония отклонение запаса реактивности от базового варианта может достигать 14 % $\delta K/K$. Для каждого типа топлива, имеющего свой изотопный состав плутония, скорректирована плотность топливного столба и массовая доля плутония (таблица 2) для эксплуатации реактора БР-1200 на начальном этапе эксплуатации с учетом ограничения на запас реактивности в $1 \beta_{эф}$.

Таблица 2 - Параметры реактора при корректировке плотности топлива и массовой доли плутония

Параметр	«БР-1200»	«БН-1200М»	«ОЯТ МОХ ВВЭР»	«ОЯТ ВВЭР»	«БН-800»
Плотность топливного столба, г/см ³	12,1	12,2	12	12,75	13,75*
Массовая доля плутония, %	13,6	13,7	16,9	13,1	10,5
Запас реактивности, $\beta_{эф}$	0,54	0,51	0,36	0,72	0,62
Нептуниевый эффект, % $\delta K/K$	-0,11	-0,12	-0,10	-0,13	-0,16
* Методическая оценка увеличения плотности топливного столба					

Моделирование начального этапа эксплуатации показало возможность работы реактора с малым запасом реактивности для всех рассмотренных вариантов топлива. Стратегия перегрузок ПКР для случаев использования плутония из «ОЯТ МОХ ВВЭР» и «БН-800» совпадает с базовой стратегией для «БР-1200». Для моделей «ОЯТ ВВЭР» и «БН-1200М» были введены корректировки использования ПКР.

Для стартовой загрузки реактора БР-1200 дополнительно рассмотрено использование СНУП-топлива на ¹⁵N (с обогащением 99 %), эффект реактивности при

замене ^{14}N на ^{15}N в топливе составляет 2,0 % $\delta\text{K}/\text{K}$, в результате чего масса стартовой загрузки топлива может быть снижена на 14 %.

В пятой главе приведены результаты моделирования нейтронно-физических характеристик быстрого реактора со свинцовым теплоносителем большой мощности в режиме ЗЯТЦ. В системе кодов построена расчетная модель реактора БР-1200 для анализа нейтронно-физических характеристик в замкнутом ядерном топливном цикле. В рамках модели выгоревшие ТВС после выгрузки во внутриреакторное хранилище направляются на внешнюю выдержку и последующую переработку. В цикл возвращаются изотопы урана, плутония и, в зависимости от сценария, определённые минорные актиниды. Для достижения требуемой массовой доли плутония регенерированное топливо разбавляется отвальным ураном в заданной пропорции. При моделировании трансмутации америций вводится в топливо из внешнего источника, а кюрий извлекается из ОЯТ.

Расчетное моделирование нейтронно-физических характеристик реактора БР-1200 проведено на весь срок эксплуатации с учетом ограничений по максимальному выгоранию (не более 12,5 % т.а.), изменению запаса реактивности (в пределах $1 \beta_{\text{эф}}$), выгоранию поглотителя из $\text{В}_4\text{С}$ (не более 25,5 % по $^{10}\text{В}$), максимальной повреждающей дозе в оболочках твэл (не более 169 смещений на атом), максимальной температуре оболочки твэл (до 670 °С).

В активной зоне реактора БР-1200 с пятого года в перегрузках используется собственное регенерированное топливо, а к седьмому году его доля приближается к 100%, что соответствует полному замыканию топливного цикла. На всем временном диапазоне изменение запаса реактивности за микрокампанию не превышает $1 \beta_{\text{эф}}$ (рисунок 6).

Изотопный состав плутония реактора БР-1200 в ходе эксплуатации подходит к равновесному значению. На конец срока службы БР-1200 в активной зоне формируется следующий состав плутония: ^{238}Pu – 1,1 %; ^{239}Pu – 62,4 %; ^{240}Pu – 28,8 %; ^{241}Pu – 3,8 %, ^{242}Pu – 2,4 %, ^{241}Am – 1,5 %.

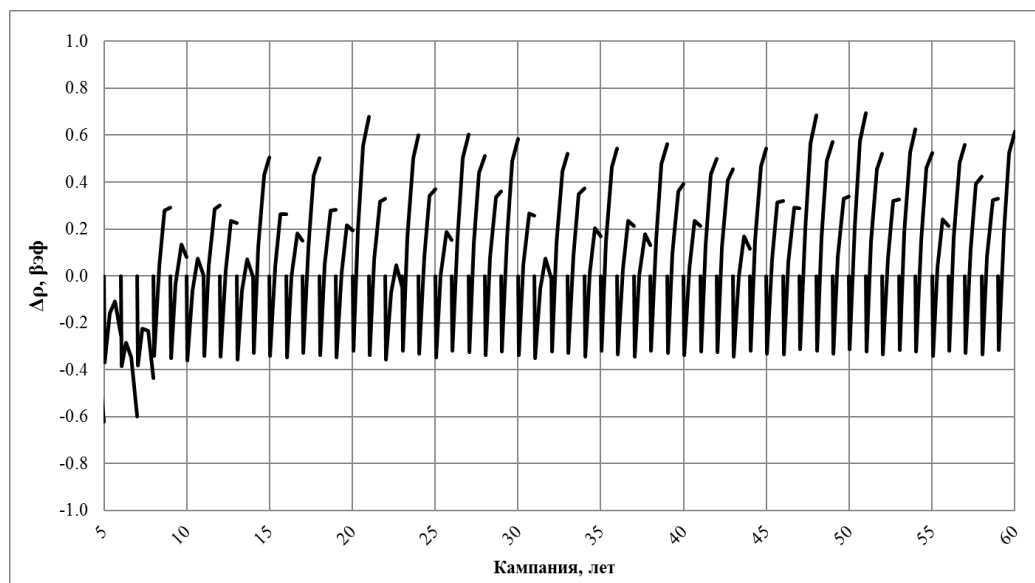


Рисунок 6 - Зависимость изменения реактивности активной зоны реактора от времени

Дополнительно проведен качественный и количественный анализ гомогенного и гетерогенного вариантов трансмутации америция. Исследование было проведено с учетом накопления дочерних минорных актинидов. Согласно расчётным данным, наибольшая эффективность трансмутации америция достигается при его гомогенном добавлении в топливо (от 0,5 % от массы т.а.) или при гетерогенном размещении в области верхнего газосборника. Для работы реактора с дополнительным америцием в топливе стартовой загрузки требуется снижение топливного столба на 12 % (для варианта 0,5 % ^{241}Am) и 20 % (для варианта 1 % ^{241}Am).

В режиме замыкания ядерного топливного цикла америций подмешивается в регенерированное топливо загружаемой топливной партии. В таком режиме отмечается снижение скорости трансмутации, однако выжигание америция до 0,5 % возможно без изменения высоты топливного столба. Вариант с гомогенным добавлением 1 % америция реализуем при переходе на режим повышенного выгорания (среднее выгорание выгружаемого топлива 12 % т.а.) без изменения конструктивных особенностей активной зоны.

Трансмутация америция в боковом отражателе недостаточно эффективна, а использование матрицы из UO_2 приводит к дополнительному накоплению минорных актинидов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана система детализированных расчетных моделей для использования в программах FACT-BR и MCU-BR. Расчетная модель в программе FACT-BR разбита на 33 аксиальных слоя и в ней используются 69531 физических зон. В FACT-BR вносятся поправки для расчетов запаса реактивности, эффективности РО СУЗ, распределения энерговыделения по активной зоне и потвэльного распределения энерговыделения. Для формирования прецизионной расчетной модели разработаны прецизионные геометрические шаблоны изделий активной зоны (44 шаблона) и библиотека физических параметров (ядерные концентрации и температуры). В расчетной модели задано 4420 материалов.

2. Проведена верификация основных функционалов в программе FACT-BR для расчетов быстрого реактора со свинцовым теплоносителем большой мощности с корректирующими коэффициентами, полученными по MCU-BR. Для снижения методических погрешностей и увеличения точности расчетов в ПК FACT-BR внесены корректирующие коэффициенты. Поправки вносятся для расчетов запаса реактивности, эффективности РО СУЗ, распределения энерговыделения по топливной части активной зоны и потвэльного распределения энерговыделения. Максимальное отклонение в эффективности систем РО СУЗ составляет 15 %, максимальное отклонение в распределении энерговыделения в топливной части активной зоны составляет 10 %.

3. Рассмотрены методические подходы проведения физического пуска реактора БР-1200. Проведенная оценка плотности потока нейтронов показала, что для проведения контролируемого набора критической массы необходимо использовать пусковые детекторы (ППН лежит в диапазоне от 56 до 15939 $1/(см^2 \cdot с)$), плотность потока в корпусных детекторах составляет менее 1 $1/(см^2 \cdot с)$. По расчетным оценкам физического пуска реактора БР-1200 минимальная критическая загрузка достигается при загрузке в активную зону 340 ТВС. Рассмотрены различные рекомендации по экспериментальному определению нейтронно-физических характеристик и необходимому оборудованию. Система РО АЗ и группа АР могут быть измерены методом ОРУК, отклонение оценки эффективности от прямого расчета составляет до

2 %. Группу РО КР и СУЗ рекомендуется измерять методами крайних оценок и восстановления по градуировке, отклонение оценки эффективности РО с использованием данных методов от прямого расчета составляет до 10 %.

4. С использованием ТВС с ПКР сформирована активная зона реактора БР-1200 с запасом реактивности в $0,56 \beta_{эф}$ на номинальном уровне мощности. Запас реактивности в стартовой загрузке выбран с учетом реализации нептуниевого эффекта. Дополнительно рассмотрено использование СНУП-топлива на ^{15}N (с обогащением 99 %), эффект реактивности составляет 2,0 % $\delta\text{K}/\text{K}$, в результате чего масса стартовой загрузки топлива может быть снижена. На начальном этапе эксплуатации предусмотрены короткие остановы в первой микрокампании на 110 и 220 эф.сут для перестановки ТВС с ПКР для поддержания малого запаса реактивности. Проанализировано влияние изотопного состава плутония на нейтронно-физические характеристики активной зоны БР-1200. Рассмотрены топливные композиции с плутонием из стартовой загрузки БН-1200М, blankets БН-800, ОЯТ МОХ ВВЭР и ОЯТ ВВЭР. Результаты моделирования показывают, что в зависимости от состава плутония отклонение запаса реактивности от базового варианта может достигать 14 % $\delta\text{K}/\text{K}$. Для каждого типа топлива плотность топливного столба и массовая доля плутония были скорректированы для работы в начале кампании с ограничением запаса реактивности в $1 \beta_{эф}$.

5. В активной зоне реактора БР-1200 с пятого года в перегрузках используется собственное регенерированное топливо, а к седьмому году его доля приближается к 100%, что соответствует полному замыканию топливного цикла. В расчетах контролировался диапазон изменения запаса реактивности в пределах $1 \beta_{эф}$. В ходе эксплуатации максимальное выгорание по кампании не превышает принятое ограничение в 12,5 % т.а. Среднее выгорание в выгружаемом топливе составляет приблизительно 9 % т.а. В ходе моделирования осуществлялся контроль температурных режимов для предотвращения превышения температуры оболочек ТВЭЛ $670 \text{ }^\circ\text{C}$. Максимальная повреждающая доза (в среднем по слою) не превышает 150 смещений на атом. Максимальное значение выгорания по ^{10}B для РО АЗ – 16,62 %, для РО КР составляет 19,15 %. На конец срока службы БР-1200 в активной

зоне формируется следующий состав плутония: ^{238}Pu – 1,1 %; ^{239}Pu – 62,4 %; ^{240}Pu – 28,8 %; ^{241}Pu – 3,8 %, ^{242}Pu – 2,4 %, ^{241}Am – 1,5 %. Средняя плотность топлива за весь период находится в интервале 12,0–12,5 г/см³, а массовая доля плутония в загружаемой топливной композиции варьируется от 13% до 14,6%.

6 Проведен качественный и количественный анализ гомогенного и гетерогенного вариантов трансмутации. Согласно расчётным данным, наибольшая эффективность трансмутации америция достигается при его гомогенном добавлении в топливо (от 0,5 % от массы т.а.) или при гетерогенном размещении в области верхнего газосборника. В условиях замкнутого ядерного топливного цикла америций вводится в состав регенерированного топлива загружаемых партий. В таком режиме отмечается снижение скорости трансмутации, однако выжигание америция до 0,5 % возможно без изменения высоты топливного столба. Вариант с гомогенным добавлением 1 % америция реализуем при переходе на режим повышенного выгорания (среднее выгорание выгружаемого топлива 12 % т.а.) без изменения конструктивных особенностей активной зоны. Трансмутация америция в боковом отражателе недостаточно эффективна, а использование матрицы из UO_2 приводит к дополнительному накоплению минорных актинидов.

Список сокращений

АЗ	- аварийная защита
АР	- автоматический регулятор
БН	- быстрый реактор с натриевым теплоносителем
БР	- быстрый реактор
ВВЭР	- водо-водяной энергетический реактор
ЗЯТЦ	- замкнутый ядерный топливный цикл
КР	- компенсатор реактивности
МКО	- метод крайних оценок
МПИ	- метод парной интерференции
ОРУК	- обращенное решение уравнения кинетики
ОЯТ	- отработавшее ядерное топливо

ПК	- программный комплекс
ПКР	- постоянный компенсатор реактивности
ППН	- плотность потока нейтронов
РО	- рабочие органы
СНУП	- смешанное нитридное уран-плутониевое топливо
СУЗ	- система управления и защиты
т.а.	- тяжелый атом
ТВС	- тепловыделяющая сборка
ТВЭЛ	- тепловыделяющий элемент

Основные публикации по теме диссертации

1. Баловнев А.В., Давыдов В.К., Жирнов А.П., Иванюта А.Н., Моисеев А.В., Солдатов Е.О., Юферева В.А. Система кодов для физического проектирования реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем. // Вопросы атомной науки и техники, Серия: Ядерно-реакторные константы. - 2020. - № 3. - С. 30-38. (автор подготовил систему кодов для моделирования нейтронно-физических характеристик реактора БР-1200 и провел тестовые расчеты по оценке максимальной температуры оболочки ТВЭЛ в реакторе БР-1200).

2. Баловнев А.В., Давыдов В.К., Жирнов А.П., Моисеев А.В., Солдатов Е.О. Моделирование топливного цикла реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 2021. - № 4. - С. 66 - 75. (автор построил модель работы реактора БР-1200 в замкнутом ядерном топливном цикле, провел расчет нейтронно-физических характеристик на полный срок службы, обобщил результаты расчетов реакторов БРЕСТ-ОД-300 и БР-1200, оценил изменение изотопного состава плутония по кампании).

3. Солдатов Е.О., Жирнов А.П., Моисеев А.В., Лизунов А.В., Семенов А.А., Аникин А.С. Некоторые оценки использования смешанного уран-плутониевого топлива, обогащенного ^{15}N , в топливном цикле быстрых реакторов // Атомная энергия. 2022. Т. 132. № 1. С. 3-9. (автор провел методическую оценку влияния изотопно-модифицированного СНУП топлива на нейтронно-физические характеристики реактора БР-1200).

4. Баловнев А.В., Давыдов В.К., Жирнов А.П., Моисеев А.В., Солдатов Е.О. Исследование нейтронно-физических характеристик реактора БР-1200 при трансмутации америция // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2023. - № 1. - С. 91–104. (автор разработал расчетные модели реактора БР-1200 с возможностью трансмутации америция в реакторе БР-1200, провел анализ нейтронно-физических характеристик в режиме трансмутации, оценил темпы трансмутации америция для гомогенных и гетерогенных вариантов).

Материалы конференций

1. Баловнев А.В., Жирнов А.П., Моисеев А.В., Солдатов Е.О. Оптимизация частичных перегрузок в активной зоне реакторной установки БР-1200 // Сборник докладов конференции молодых специалистов «Инновации в атомной технике», г. Москва, 1- 3 октября 2019 г. М. АО НИКИЭТ. 2019. С. 107-109.

2. Баловнев А.В., Солдатов Е.О., Жирнов А.П., Иванюта А.Н. Система кодов для физического проектирования реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики», 27 – 29 ноября 2019 г., Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ. 2019. С. 42.

3. Баловнев А.В., Давыдов В.К., Жирнов А.П., Моисеев А.В., Солдатов Е.О. Исследование нейтронно-физических характеристик реактора БР-1200 при трансмутации америция // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-22)», 31 мая – 3 июня 2022 г., Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ. 2022. С. 12-13.

4. Moiseev A.V., Soldatov E.O., Zhirnov A.P., Davydov V.K., Balovnev A.V., Kalugina K.M., Ivanyuta A.N. Computational Studies of Advantages of Lead-Cooled Fast Reactor Core // International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Sustainable Clean Energy for the Future (FR22). Vienna, Austria, April 2022. CN 291-364.

5. Soldatov E., Balovnev A., Davydov V., Zhirnov A., Ivanyuta A., Rodnev D., Rozhdestvenskiy I., Yufereva V. System of design codes for the computational modelling of the lead cooled fast reactors (CN 308-45) // Book of Abstracts of the International

Conference on Topical Issues in Nuclear Installation Safety: Strengthening Safety of Evolutionary and Innovative Reactor Designs, Vienna, Austria, Tuesday 18 October 2022-Friday 21 October 2022. P. 23-24.

6. Баловнев А.В., Давыдов В.К., Жирнов А.П., Моисеев А.В., Солдатов Е.О. Моделирование кампании быстрого реактора со свинцовым теплоносителем на весь срок эксплуатации // Сборник докладов VI Международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики», г. Москва, 14-17 ноября 2023 г. М.: АО «НИКИЭТ». 2023. С 5-13.

7. Жирнов А.П., Моисеев А.В., Солдатов Е.О., Ламанов С.А., Войтехова В.В., Давыдов В.К., Хахулин В.И. Расчетное моделирование физического пуска быстрого реактора со свинцовым теплоносителем // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-24)», 28 – 31 мая 2024 г., Обнинск, АО «ГНЦ РФ-ФЭИ». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ. 2024. С. 59-60.

8. Жирнов А.П., Давыдов В.К., Моисеев А.В., Солдатов Е.О., Хахулин В.И. Исследование влияния изотопного состава топлива на нейтронно-физические характеристики РУ БР-1200 // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-24)», 28 – 31 мая 2024 г., Обнинск, АО «ГНЦ РФ-ФЭИ». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ. 2024. С. 64.

9. Жирнов А.П., Моисеев А.В., Солдатов Е.О. Баловнев А.В. Расчетное моделирование эффективности РО СУЗ в реакторе типа БРЕСТ с использованием диффузионного ПК FАСТ-BR // Сборник тезисов Международной конференции молодых специалистов, ученых и аспирантов по физике ядерных реакторов «Волга - 2024», 3 – 6 сентября 2024 г., М.: НИЯУ МИФИ, 2024. С. 33.

10. Солдатов Е.О., Жирнов А.П., Моисеев А.В. Расчетное моделирование нейтронно-физических характеристик быстрого реактора со свинцовым теплоносителем большой мощности // Сборник тезисов международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов атомной отрасли «КОМАНДА-2025» 3 -6 сентября 2025 г. Санкт-Петербург. – Москва: ООО «Издательский дом Недра». 2025. С. 245.

Подписано в печать 11.03.2026

Формат 60×84^{1/16}. Усл. печ. л. 1,0

Тираж 65 экз.

Отпечатано в типографии АО «НИКИЭТ»

по решению диссертационного совета 74.1.004.01. Заказ № 176117

107140, Москва, пл. Академика Доллежала, д. 1, к. 3