

УДК: 621.039.51

DOI: 10.26277/SECNRS.2026.119.1.001

© 2026. Все права защищены.

АТТЕСТАЦИЯ ПРОГРАММЫ MCU-PTR ДЛЯ СОПРОВОЖДЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ИВВ-2М

Зырянова А. А.* (ziryanova_aa@irmatom.ru),
Волчихина Ю. В.*,** (Metelyo55@yandex.ru),
Русских И. М.* (imruskikh@rosatom.ru),
Ташлыков О. Л.*,** д-р техн. наук (otashlykov@list.ru),
Хомяков А. П.*,** д-р техн. наук (a.p.khomiakov@urfu.ru)

Статья поступила в редакцию 18 февраля 2026 г.

Аннотация

Одной из важных задач в области математического моделирования исследовательских ядерных реакторов является верификация расчетных кодов, используемых для расчетного определения нейтронно-физических параметров.

Программа MCU-PTR предназначена для моделирования процессов переноса нейтронов, фотонов аналоговыми и неаналоговыми методами Монте-Карло на основе оцененных ядерных данных в системах с трехмерной геометрией с учетом изменения изотопного состава материалов на многопроцессорных компьютерах.

В статье приведена информация о валидации программы MCU-PTR с библиотекой констант MCADB50 для полномасштабного расчета исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М. Валидация основывалась на сравнении результатов расчета по программе MCU-PTR с экспериментальными данными, полученными при эксплуатации реактора ИВВ-2М.

Разработана модель исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М для расчета по программе MCU-PTR с банком данных MDBPT50 с учетом выгорания топлива. Путем расчетных исследований проведено обоснование параметров пространственно-временной дискретизации расчетных моделей.

Опыт проведения процедуры валидации программы MCU-PTR на исследовательском ядерном реакторе ИВВ-2М может быть применен специалистами других организаций, деятельность которых подразумевает проведение аттестации программных средств, в том числе с целью приведения деятельности организации в соответствие с нормативными правовыми актами, устанавливающими требования к безопасному использованию атомной энергии.

► **Ключевые слова:** программа MCU-PTR, исследовательский ядерный реактор, моделирование, метод Монте-Карло, расчет, нейтронно-физические параметры, валидация.

* АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Свердловская обл., Россия.

** ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия.

CERTIFICATION OF THE MCU-PTR PROGRAM FOR SUPPORTING THE OPERATION OF THE IVV-2M RESEARCH NUCLEAR REACTOR

Zyryanova A. A.*,
Volchikhina Yu. V.*,**,
Russkikh I. M.*,
Tashlykov O. L.**, D. Sc.,
Khomyakov A. P.**, D. Sc.

The article was received by the editors' crew on February 18th, 2026.

Abstract

One of the important tasks in the field of mathematical modeling of research nuclear reactors is the verification of computational codes used for the calculation of neutron-physical parameters.

The MCU-PTR program is designed to simulate neutron and photon transport processes using analog and non-analog Monte-Carlo methods on multiprocessor computers using evaluated nuclear data in systems with three-dimensional geometry, taking into account changes in the isotopic composition of materials.

This article presents information on the verification and validation of the MCU-PTR program with the MCUDB50 constant library for a full-scale simulation of the IVV-2M research nuclear reactor. Validation was based on a comparison of MCU-PTR calculation results with experimental data obtained during the operation of the IVV-2M reactor.

A model of the IVV-2M research nuclear reactor was developed for calculations using the MCU-PTR program with the MCUDB50 databank, taking into account fuel burnup depth. Computational studies were used to validate the parameters of the spatial-temporal discretization of the computational models.

The experience gained from the validation procedure of the MCU-PTR computational code at the IVV-2M research nuclear reactor can be applied by specialists from other organizations whose activities involve software verification and certification, including for the purpose of aligning their activities with federal rules and regulations establishing requirements for the safe use of nuclear energy.

► **Keywords:** *MCU-PTR program, research nuclear reactor, modeling, Monte-Carlo method, calculation, neutron-physical parameters, validation.*

* Research Institute of Nuclear Materials JSC, Zarechny, Sverdlovsk Region, Russia.

** Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Введение

Одной из задач в области математического моделирования исследовательских ядерных реакторов (ИЯР) является аттестация расчетных кодов, используемых для расчетного определения нейтронно-физических параметров, а также создание комплекса расчетного сопровождения экспериментов, проводимых на ИЯР.

Как известно, нейтронно-физические расчеты являются действенным инструментом обоснования параметров исследовательских ядерных реакторов. Использование программных средств позволяет оперативно решать следующие задачи: проводить вариантный расчетный анализ для формирования активных зон (АЗ) и выбора загрузок топлива, минимизировать запас реактивности, оптимизировать использование топлива, а также прогнозировать и определять условия облучения образцов в экспериментальных устройствах (ЭУ) и т. д.

Для разработки экспериментальных программ реакторных исследований важно знать не только характеристики основных нейтронно-физических параметров реактора и экспериментальных устройств, но и прогноз их изменения в процессе работы реактора.

ИЯР ИВВ-2М имеет горизонтальные экспериментальные каналы для вывода нейтронных пучков и множество вертикальных каналов в АЗ и отражателе, в которых могут облучаться ЭУ с образцами различного материального состава (перспективные стали, образцы-свидетели, композитные материалы, различные минералы, изотопная продукция и др.).

Из-за сложности и разнообразия геометрических форм элементов конструкции как самого реактора, так и различных ЭУ с опытными образцами, инженерные программы нейтронно-физического расчета, использующие диффузионное приближение, не удовлетворяют современным требованиям к точности определения параметров в ходе расчетного дореакторного и реакторного сопровождения экспериментов. Прецизионные программные средства, реализующие метод Монте-Карло, возможности которых по точности моделирования ограничены только неопределенностью констант в файлах оцененных ядерных данных, удовлетворяют современным требованиям к проводимым экспериментам.

Все сказанное выше свидетельствует об актуальности разработок по обеспечению расчетного сопровождения эксплуатации ИЯР ИВВ-2М и определению необходимых параметров проводимых экспериментов на реакторе с использованием пре-

цизионной программы MCU-PTR [1, 2] с банком данных MDBPT50, реализующей метод Монте-Карло, с учетом постоянно возрастающих требований к безопасности и эффективности эксплуатации исследовательских ядерных реакторов.

1. Аттестация программы MCU-PTR

Экспертиза и аттестация программ для электронно-вычислительных машин (ЭВМ) проводится во исполнение требований статьи 26 Федерального закона от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» [3], согласно которым при подготовке документов, обосновывающих безопасность объектов использования атомной энергии, для построения расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность указанных объектов, должны использоваться программы для ЭВМ, прошедшие экспертизу в организации научно-технической поддержки уполномоченного органа государственного регулирования.

Процедура аттестации программы MCU-PTR для сопровождения эксплуатации ИЯР ИВВ-2М проведена согласно [4].

Программа MCU-PTR предназначена для моделирования процессов переноса нейтронов, фотонов, электронов и позитронов методом Монте-Карло на основе оцененных ядерных данных в системах с трехмерной геометрией с учетом изменения нуклидного состава материалов при взаимодействии с нейтронами. Для всех перечисленных частиц решается неоднородное уравнение переноса частиц, а для нейтронов программа позволяет решать также однородное уравнение.

Математически это означает, что для рассматриваемой системы решается кинетическое уравнение с заданными граничными условиями, описывающее распределение в ней потока частиц. При этом регистрируются эффективный коэффициент размножения нейтронов ($K_{эфф}$), распределения энерговыделения по тепловыделяющим сборкам (ТВС) и отдельным тепловыделяющим элементам, эффективная доля запаздывающих нейтронов, потоки частиц и другие функционалы.

MCU-PTR может работать в двух режимах – статическом и динамическом. В статическом режиме рассчитываются характеристики реактора при заданном нуклидном составе его материалов. В динамическом режиме учитывается изменение нуклидного состава и те же характеристики рассчитываются в зависимости от времени работы реактора. Для расчета изменения нуклидного состава

материалов реактора применяется модуль выгорания BURNUP, в котором реализована итерационная схема расчета (предиктор-корректор) для учета зависимости сечений от времени. Это позволяет использовать сравнительно большие размеры шагов и тем самым сократить общее время работы программы. Все необходимые для расчета характеристики выгорающих ядер собраны в библиотеке BURN, содержащей данные для примерно 1 100 нуклидов.

MCU-PTR является развитием пакета программ семейства MCU4, из которого аттестованы следующие программы [5]:

- MCU-RFFI/A с библиотекой констант DLC/MCUDAT-1.0 (аттестационный паспорт № 400 от 14.07.2016);
- MCU-REA/1.0 с библиотекой констант DLC/MCUDAT-1.0 (аттестационный паспорт № 192 от 03.03.2005);
- MCU-REA/1.1 с библиотекой констант DLC/MCUDAT-2.2 (аттестационный паспорт № 224 от 23.05.2007);
- MCU-REA/2.0 с библиотекой констант DLC/MCUDAT-2.2 (аттестационный паспорт № 218 от 19.04.2006).

Программа MCU-PTR с банком данных MDBPT50 ранее аттестована для расчетов реактора ИР-8 (аттестационный паспорт № 320 от 23.07.2024), а также для расчетов реакторов ИРТ-Т, ИРТ-МИФИ (аттестационный паспорт № 393 от 14.07.2016).

При аттестации программы MCU-PTR с банком данных MDBPT50 для проверки качества констант проведены эксперименты по данным Международного проекта по оценке критических экспериментов (International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project). Оценена методическая погрешность для систем с плутониевым и урановым топливом более 60 и менее 10 %. Результаты расчетов этих экспериментов представлены в верификационном отчете [6].

2. Матрица валидации

Валидация программы MCU-PTR для расчета ИЯР ИВВ-2М включала в себя следующие расчеты:

- трех критических загрузок реактора ИВВ-2М, набранных при физическом пуске в 1976 г., и сопоставление результатов, полученных по верифицированной реперной программе;
- рабочей загрузки из 30 свежих ТВС после физического пуска 1976 г.;
- рабочих компоновок АЗ реактора ИВВ-2М;
- градуировки рабочих органов (РО) системы управления и защиты (СУЗ);
- плотности потока нейтронов в ячейках АЗ ИЯР ИВВ-2М и сравнение с результатами нейтронно-физических измерений, проведенных методом нейтронно-активационного анализа.

Матрица валидации нейтронно-физических характеристик реактора ИВВ-2М представлена в таблице № 1.

Таблица № 1

Матрица валидации
Validation matrix

№ п/п	Характеристика	Разотравленное состояние после перегрузки в начале кампании	Стационарное отравленное состояние в начале кампании	Стационарное отравленное состояние в конце кампании	Разотравленные критические состояния при определении эффективности поглощающих стержней
1	Эффективный коэффициент размножения нейтронов	+	+	+	+
2	Эффективность поглощающих стержней РО СУЗ	-	-	-	+
3	Запас реактивности, % $\Delta K/K$	+	+	+	-
5	Плотность потока тепловых нейтронов	+	+	-	-
6	Подкритичность при взведенных РО АЗ, % $\Delta K/K$	+	+	+	-

3. Геометрическая модель активной зоны и отражателя реактора ИВВ-2М

Краткое описание и основные характеристики ИЯР ИВВ-2М приведены в работах [7, 8].

Геометрическая модель активной зоны реактора ИВВ-2М построена в соответствии с конструкторской документацией. Горизонтальные экспериментальные каналы, графитовый отражатель, бетонный массив, опорная решетка и облицовка бассейна реактора из нержавеющей стали имеют упрощенное представление, что не оказывает влияния на критичность системы и распределение плотности потока нейтронов в активной зоне (рис. 1).

Конструктивные решения и блочная структура АЗ и отражателя, однотипность и взаимозаменяемость элементов АЗ обеспечивают реактору ИВВ-2М физико-конструктивную гибкость, что позволяет создавать различные компоновки АЗ, изменять количество секций, их размеры и размещение в опорной решетке, а также варьировать размерами ЭУ и их нейтронно-физическими и теплотехническими характеристиками.

В основном АЗ формируется установкой в опорную плиту шестигранных ТВС (от 36 до 42 штук), шестигранных бериллиевых блоков отражателя, шестигранных свинцовых и графитовых блоков, а также облучательных устройств (ОУ) и ЭУ. В качестве примера приведена типовая загрузка реактора ИВВ-2М на рис. 2. Геометрическая модель компоновки представлена на рис. 3.

Геометрия и материальный состав элементов АЗ задаются согласно конструкторской документации. В расчетной модели используется система координат Декарта. Начало координат расположено на нижней границе опорной решетки. Ось O_x направлена вдоль бассейна реактора, ось O_y – поперек бассейна, а ось O_z – вверх. В материалах отчета о верификации [9] приведено обоснование выбранной расчетной модели ИЯР ИВВ-2М. В модели не учитывалось выгорание поглотителя.

3.1. Геометрическая модель тепловыделяющей сборки

Геометрическая модель ТВС типа ИВВ-2М представлена на рис. 4. Каждая ТВС состоит из пяти трубчатых шестигранных топливных элементов, коаксиально установленных между шестигранными чехловыми трубами. Конструкционным материалом сборок и оболочек топливных элементов служит сплав алюминия АМЧН-2. Топливным слоем является двуокись урана, диспергированная в алюминиевой матрице. В каждой топливной сборке также имеется полость, образованная внутренней шестигранной чехловой трубой. В эти полости устанавливаются РО СУЗ реактора либо могут устанавливаться различные ОУ. Головка и хвостовик ТВС заданы упрощенно. Головка ТВС представлена шестигранной призмой из гомогенной смеси алюминия и воды. Хвостовик упрощен до шестигранной трубы. Конструкционным материалом хвостовика служит сплав алюминия АМЧН-2.

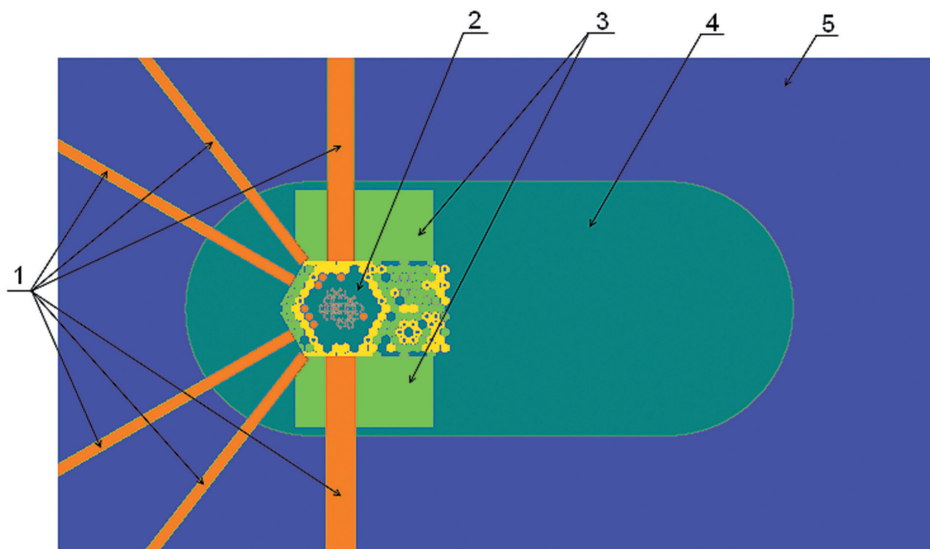


Рис. 1. Поперечное сечение расчетной модели на уровне центра активной зоны:

- 1 – горизонтальные экспериментальные каналы; 2 – активная зона; 3 – графитовый отражатель;
- 4 – бассейн реактора; 5 – бетонный массив

[Fig. 1. Cross-section of the calculation model at the level of the center of the core:

- 1 – horizontal experimental channels; 2 – core; 3 – graphite reflector; 4 – reactor pool; 5 – concrete massif]

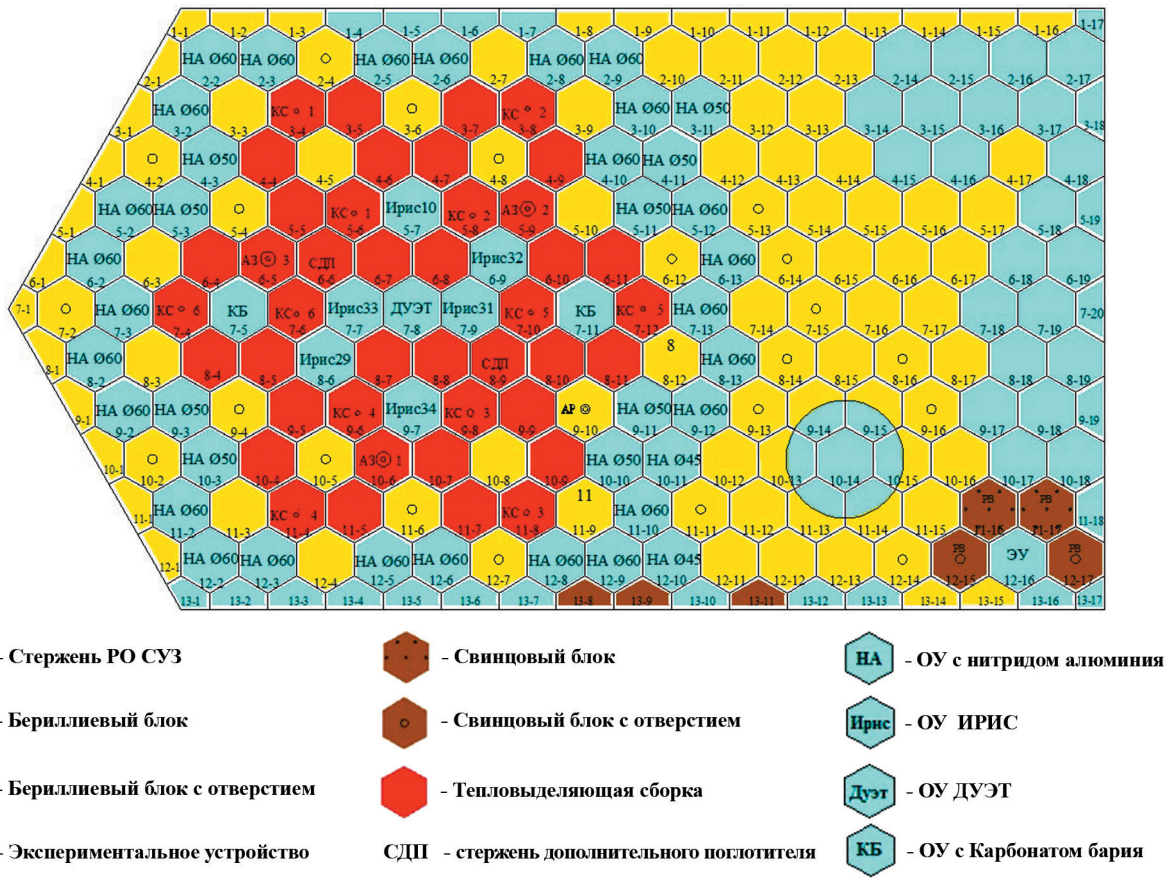


Рис. 2. Картограмма типовой загрузки реактора ИВВ-2М
 [Fig. 2. Cartogram of the IVV-2M]

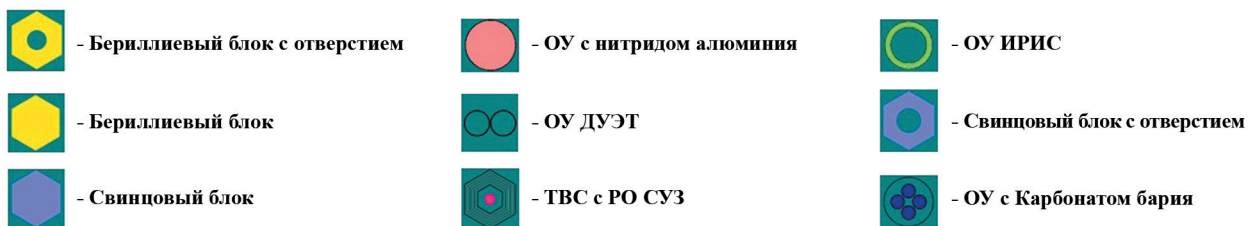
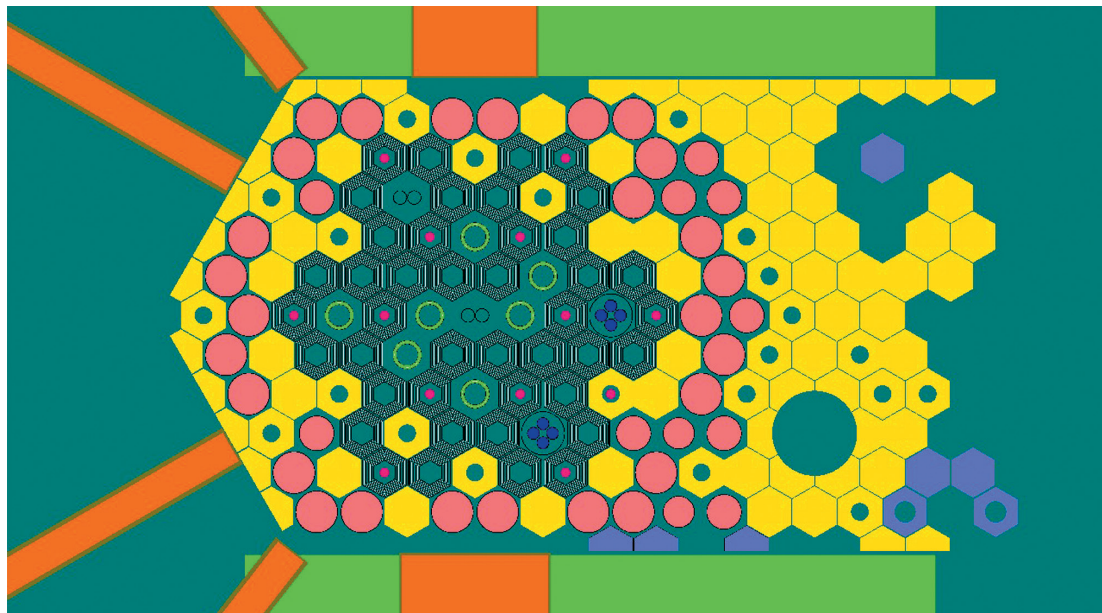


Рис. 3. Поперечное сечение расчетной модели активной зоны с рабочим органом системы управления и защиты, стержни аварийной защиты находятся на верхних концевиках
 [Fig. 3. Cross-section of the calculation model at the level of the center of the core]

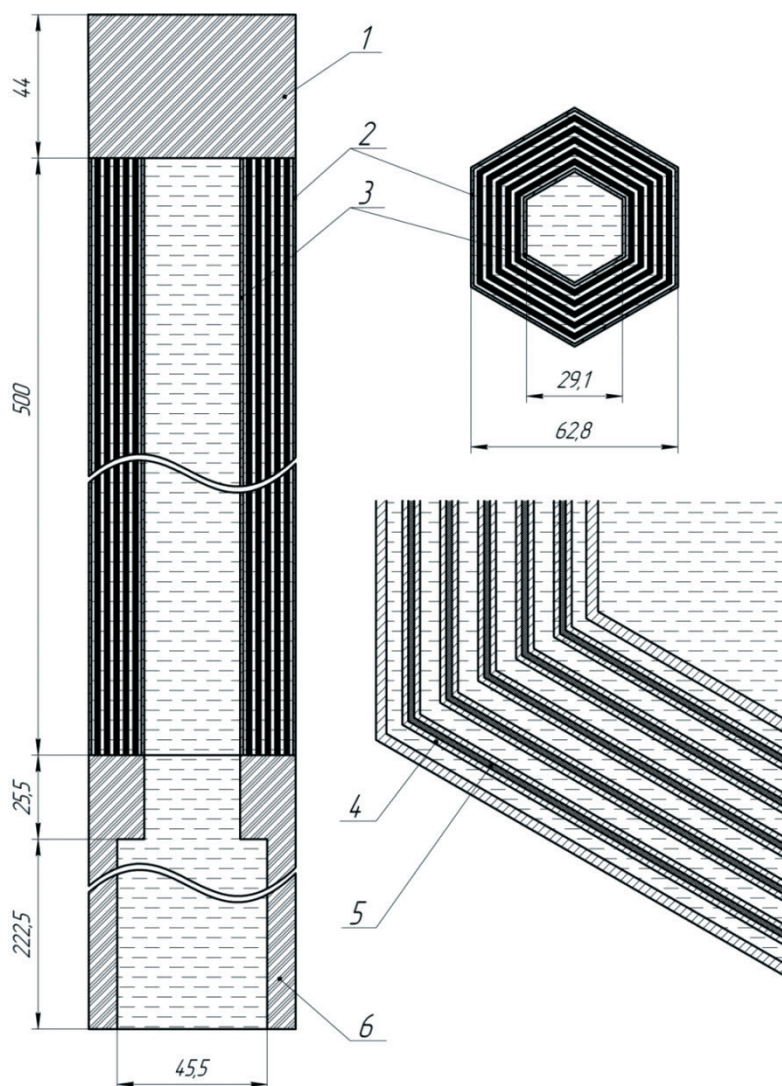


Рис. 4. Схема продольного и поперечного сечений тепловыделяющих сборок типа ИВВ-2М:
 1 – головка тепловыделяющей сборки; 2 – внешняя чехловая труба; 3 – внутренняя чехловая труба;
 4 – оболочка твэла; 5 – топливный сердечник; 6 – хвостовик тепловыделяющей сборки
 [Fig. 4. Diagram of longitudinal and transverse sections of the IVV-2M type fuel assembly:
 1 – fuel assembly head; 2 – outer casing tube; 3 – inner casing tube; 4 – fuel element cladding;
 5 – fuel core; 6 – fuel assembly shank]

Исполнительными органами СУЗ реактора ИВВ-2М являются 16 стержней с карбидом бора в качестве поглотителя нейтронов: 12 компенсирующих стержней (КС), 3 стержня АЗ и один стержень автоматического регулирования (АР). Поглощающие стержни заданы в виде цилиндров из карбида бора, окруженных оболочкой из нержавеющей стали. Имеется возможность задавать разную глубину погружения поглощающих стержней в активную зону. Выгорание поглотителя не учитывается.

3.2. Моделирование бериллиевых блоков активной зоны, графитовых и свинцовых блоков

Бериллиевые блоки (ТУ 725-71) заданы в виде шестигранных призм. Используются сплошные бериллиевые блоки и блоки с отверстием. Перемещение бериллиевых блоков в АЗ в течение

эксплуатации реактора не отслеживалось. Поэтому величина концентрации поглотителей ${}^3\text{Li}^6$ и ${}^2\text{He}^3$ определялась эмпирически и экспериментально методом взвешивания. Подробное обоснование выбора концентраций поглотителей в бериллиевых блоках указано далее. Графитовые блоки (ТУ 48-01-60-71) и свинцовые блоки (СЗ ГОСТ 3778-65), сплошные и с отверстием, имеют конструкцию, аналогичную бериллиевым блокам.

3.3. Моделирование облучательных устройств

В расчетную модель реактора ИВВ-2М включены модели ОУ, используемых для наработки изотопов. Каждое ОУ имеет свою конструкцию.

ОУ «ИРИС» предназначено для наработки ${}^{192}\text{Ir}$. ОУ состоит из постаментов с хвостовиком, графитового вкладыша, предназначенного для установки

мишеней из металлического ^{191}Ir , и алюминиевых ампул, в которые упаковываются графитовые вкладыши с мишенями (рис. 5, а и 6, а). Для каждой картограммы конфигурация ОУ «ИРИС» различна. На реакторе ИВВ-2М облучаются природный иридий (37,3 % ^{191}Ir) и обогащенный по изотопу ^{191}Ir до 81 %. В расчетной модели конструкция вкладышей упрощена, используется эффективный слой иридия требуемого обогащения.

ОУ «Карбонат бария» («КБ») предназначено для наработки изотопа ^{131}Cs . ОУ «КБ» состоит из трех-четырех ампул, содержащих обечайку (материал АД-1) и мишень (материал мишени – порошок BaCO_3), и постамента для установки этих ампул

(рис. 5, б и 6, б). Ампулы окружает оболочка из сплава АД-1.

ОУ «ДУЭТ» предназначено для наработки ^{177}Lu . Оно представляет собой два алюминиевых канала, в каждый из которых возможна загрузка до двух алюминиевых капсул (сплав АД-1). В капсуле размещается кварцевая ампула с мишенью (рис. 5, в и 6, в). Мишень представляет собой соль лютеция массой не более 0,75 мг.

ОУ «Нитрид алюминия» («НА») предназначено для наработки изотопа ^{14}C . ОУ «НА» состоит из ампулы (сплав АД-1) с хвостовиком, в которую упакованы брикеты из прессованного порошка нитрида алюминия (рис. 5, г и 6, г).

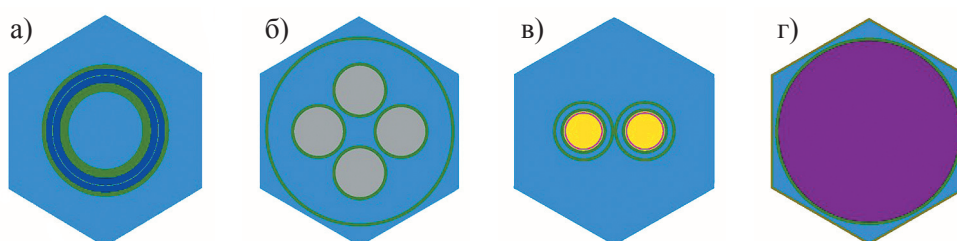


Рис. 5. Горизонтальные сечения расчетных геометрических моделей облучательных устройств:

а) «ИРИС»; б) «КБ»; в) «ДУЭТ»; г) «НА»

[Fig. 5. Horizontal sections of the calculated geometric models of the irradiation devices:

a) “IRIS”; b) “KB”; c) “DUET”; d) “NA”]

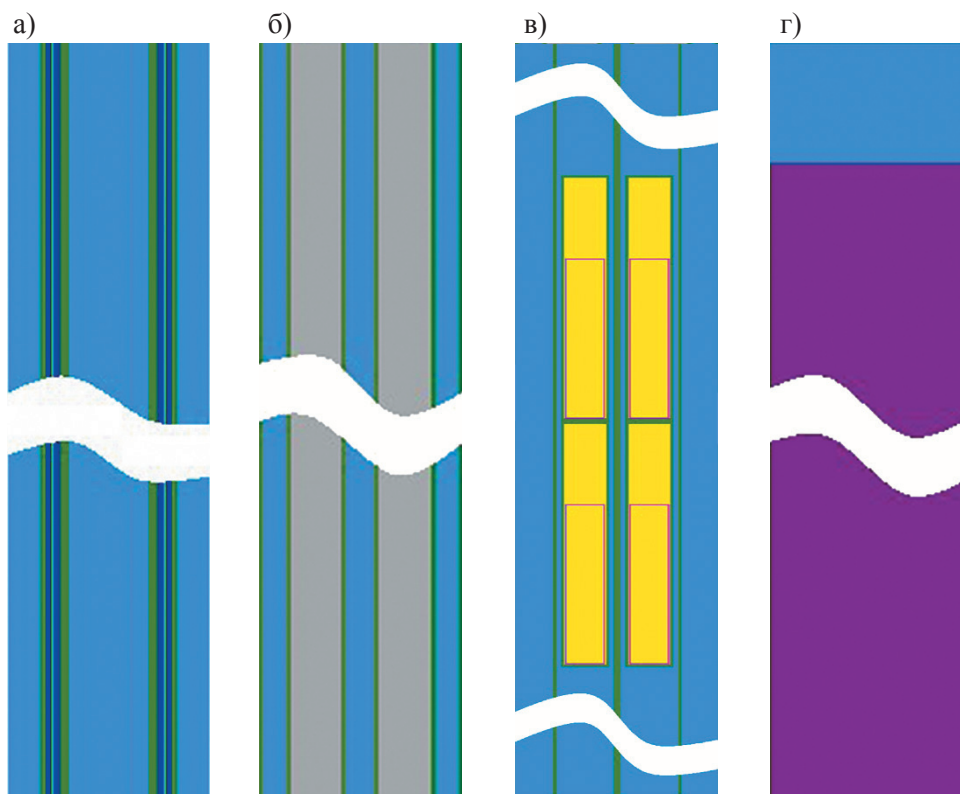


Рис. 6. Вертикальные сечения расчетных геометрических моделей облучательных устройств (хвостовые и головные части не показаны):

а) «ИРИС»; б) «КБ»; в) «ДУЭТ»; г) «НА»

[Fig. 6. Vertical sections of the calculated geometric models of the irradiation devices (tails and head parts are not shown):

a) “IRIS”; b) “KB”; c) “DUET”; d) “NA”]

Геометрия хвостовиков ОУ задана аналогично хвостовикам ТВС. Упрощение конструкции хвостовиков и головки ОУ не оказывает существенного влияния на достоверность расчета. Для каждой ампулы с изотопом задается своя регистрационная зона для расчета требуемой величины.

4. Результаты валидации

4.1. Результаты расчета критических конфигураций и стартовой загрузки активной зоны исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М

Методические погрешности для системы с трубчатыми ТВС типа ИВВ-2М, водным замедлителем и бериллиевым отражателем оценены на основе критических конфигураций и стартовой загрузки на реакторе ИВВ-2М, сформированных во время физического пуска в 1976 г. В качестве меры погрешности расчета использовано максимальное отклонение рассчитываемого параметра от величины, рассчитанной по верифицированной зарубежной реперной программе MCNP 5 [10].

Значения $K_{эфф}$ для критических сборок с различными отражателями, полученные расчетным путем при различных положениях РО СУЗ, приведены в таблицах № 2–4. При расчете критических конфигураций учтено разбиение бериллиевых блоков на группы по длительности эксплуатации [8, 9]. Компоновки критических конфигураций и стартовой загрузки ИЯР ИВВ-2М приведены на рис. 7–10.

Отличие результатов расчета по программе MCU-PTR с использованием банка данных MDBPT50 от результатов расчета по MCNP с константами ENDF/B-VII составляет не более 0,3 % $\Delta K/K$, что может объясняться неопределенностью положения нижнего торца стержня РО СУЗ относительно верха активной части ТВС ИВВ-2М, которое достигает 0,3 см (погрешность определения положения РО СУЗ ~ 0,6 %).

Значения $K_{эфф}$, а также значения плотности потока тепловых нейтронов с энергией $E < 0,625$ эВ в различных ячейках АЗ для стартовой загрузки ИЯР ИВВ-2М, полученные расчетным путем при различных положениях РО СУЗ, приведены в таблицах № 5, 6 и на рис. 11. При расчете стартовой загрузки учтено разбиение бериллиевых блоков на группы по длительности эксплуатации, обоснованное в [8, 9].

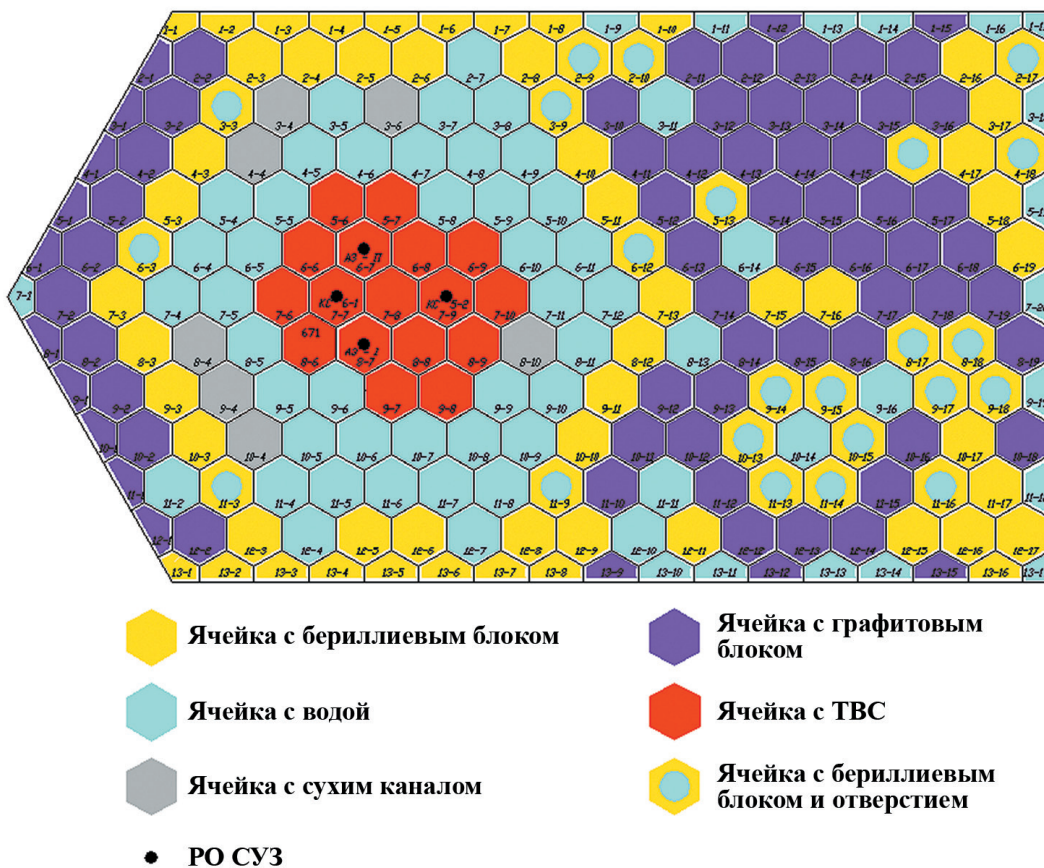


Рис. 7. Критическая конфигурация № 1 с водяным отражателем [Fig. 7. Critical configuration No. 1 with water core reflector]

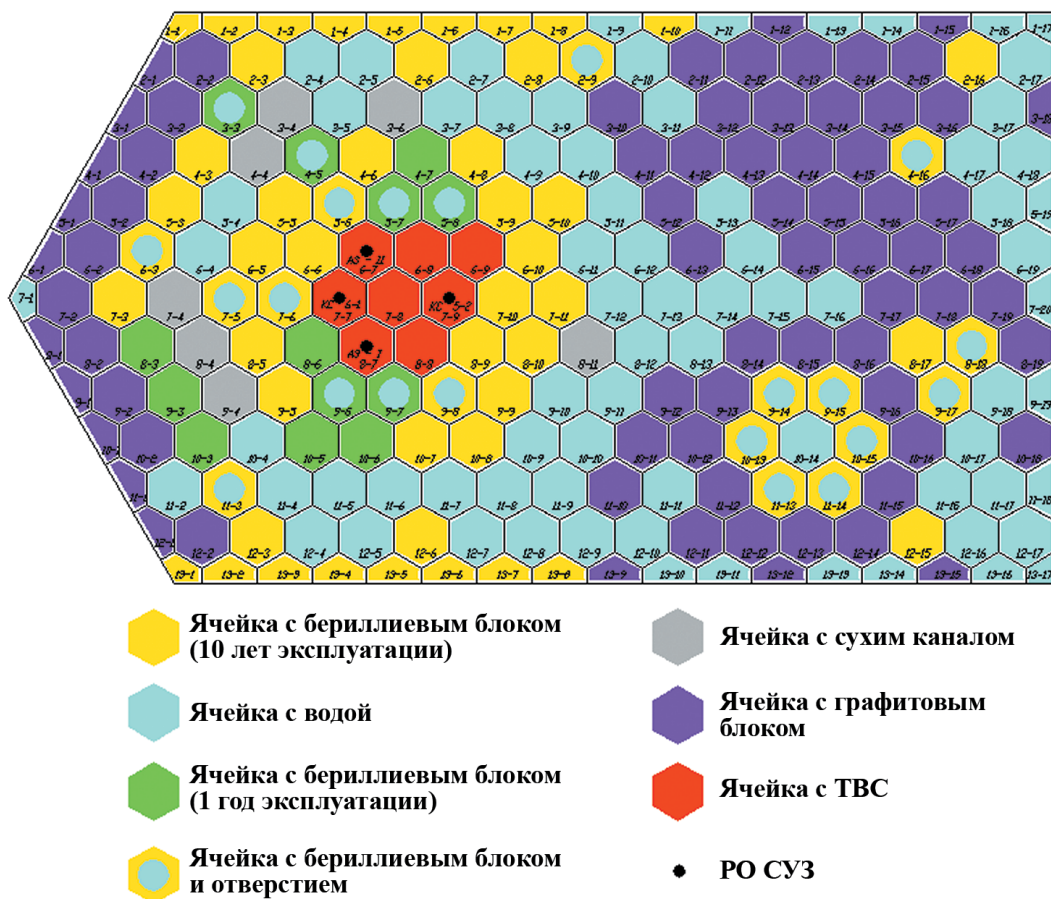


Рис. 8. Критическая конфигурация № 2 с бериллиевым отражателем
 [Fig. 8. Critical configuration No. 2 with beryllium core reflector]

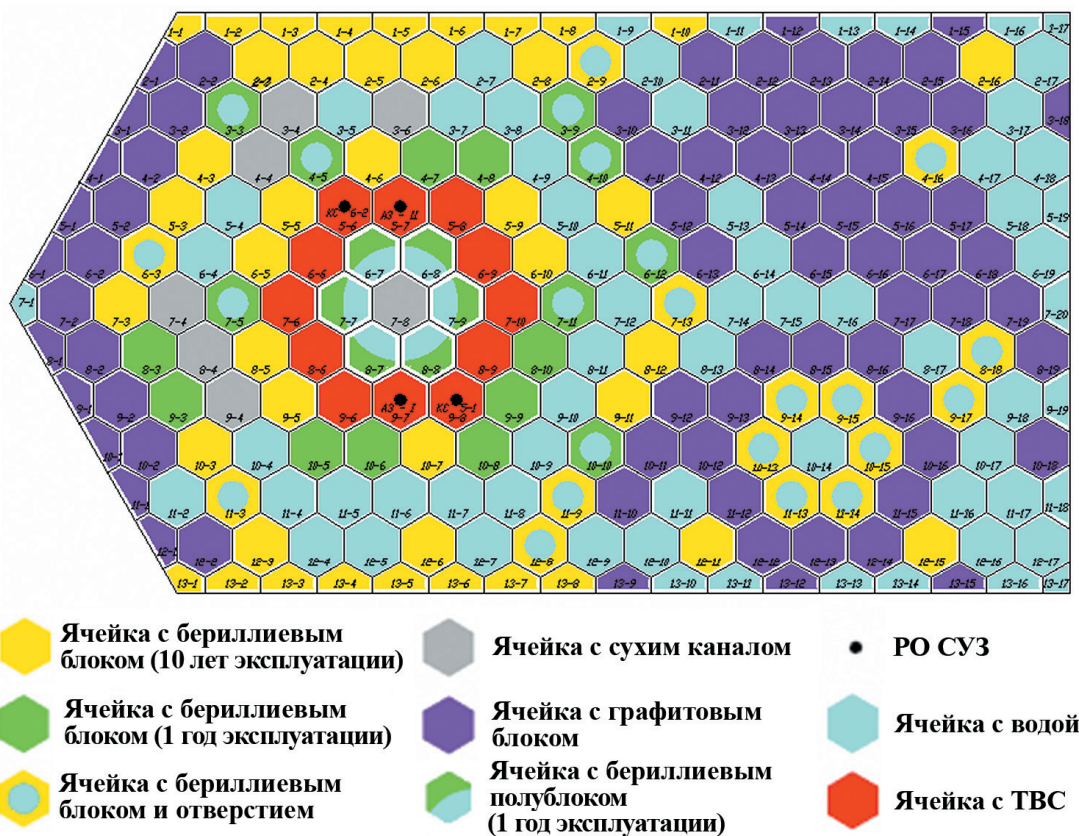


Рис. 9. Критическая конфигурация № 3 с нейтронной ловушкой и водно-бериллиевым отражателем
 [Fig. 9. Critical configuration No. 3 with neutron trap and water-beryllium core reflector]



Рис. 10. Картограмма стартовой загрузки активной зоны реактора ИВВ-2М
 [Fig. 10. Cartogram of the IVV-2M core inventory]

Таблица № 2

Результаты расчета критических состояний для сборки с водяным отражателем (конфигурация № 1)
Results of calculation of critical states for configuration with water core reflector (configuration No. 1)

Глубина погружения РО СУЗ по указателю положения в критическом состоянии, см		$K_{эфф}$ MCNP	$K_{эфф}$ MCU-PTR	Различие $\Delta\rho$, % $\Delta K/K$
КС5-2	КС6-1			
0,0	32,0	1,0029±0,0009	1,0018±0,0004	-0,11
12,5	30,0	1,0029±0,0009	0,9999±0,0004	-0,30
17,5	27,5	1,0007±0,0009	0,9988±0,0004	-0,19
21,0	25,0	0,9999±0,0009	0,9988±0,0003	-0,11
22,5	22,5	0,9998±0,0009	0,9994±0,0004	-0,04
26,5	19,0	0,9989±0,0009	0,9981±0,0003	-0,08
29,5	14,0	0,9999±0,0009	0,9991±0,0004	-0,08
33,0	4,5	1,0008±0,0009	0,9995±0,0004	-0,13
Ср. знач.		1,0007±0,0009	0,9994±0,0004	-0,13

Таблица № 3

Результаты расчета критического состояния для сборки с бериллиевым отражателем (уточненная конфигурация № 2)
Results of calculation of critical states for configuration with beryllium core reflector (refined configuration No. 2)

Глубина погружения РО СУЗ по указателю положения в критическом состоянии, см		$K_{эфф}$ MCNP	$K_{эфф}$ MCU-PTR	Различие $\Delta\rho$, % $\Delta K/K$
КС5-2	КС6-1			
15,0	15,0	0,9993±0,0009	1,0003±0,0004	0,10

Таблица № 4

Результаты расчета критического состояния для сборки с центральной водяной полостью диаметром 100 мм и бериллиевым отражателем (уточненная конфигурация № 3)
Results of calculation of critical states for configuration with a central water neutron trap with a diameter of 100 mm and beryllium core reflector (refined configuration No. 3)

Глубина погружения РО СУЗ по указателю положения в критическом состоянии, см		$K_{эфф}$ MCNP	$K_{эфф}$ MCU-PTR	Различие $\Delta\rho$, % $\Delta K/K$
КС5-2	КС6-1			
0,0	31,5	0,9994±0,0009	1,0009±0,0004	0,15
10,5	29,0	0,9984±0,0009	0,9999±0,0004	0,15
17,0	25,0	0,9991±0,0009	0,9984±0,0004	-0,07
21,0	21,0	0,9990±0,0009	0,9981±0,0003	-0,09
25,0	14,5	0,9995±0,0009	0,9998±0,0004	0,03
28,0	0,0	1,0007±0,0009	0,9999±0,0004	-0,08
Ср. знач.		0,9994±0,0009	0,9995±0,0004	0,02

Таблица № 5

Результаты расчета критического состояния для стартовой загрузки из 30 тепловыделяющих сборок
Results of calculation of critical states of the IVV-2M core inventory with 30 fuel assemblies

Глубина погружения РО СУЗ по указателю положения в критическом состоянии, см							$K_{эфф}$ MCNP	$K_{эфф}$ MCU-PTR	Различие $\Delta\rho$, % $\Delta K/K$
КС1	КС2	КС3	КС4	КС5	КС6	АР			
29	50	50	29	50	29	30	0,9997±0,0009	0,9996±0,0004	-0,01
50	29	29	50	29	50	20,5	0,9999±0,0009	1,0002±0,0004	0,03
37	37	37	37	37	37	20	0,9945±0,0009	0,9957±0,0004	0,12
50	44	0	44	44	44	0	0,9995±0,0009	1,0047±0,0004	0,52
45	0	45	50	44	44	0	0,9977±0,0009	1,0039±0,0004	0,62
45	45	45	45	50	0	0	1,0011±0,0009	1,0056±0,0004	0,45
Ср. знач.							0,9987±0,0009	1,0016±0,0004	0,29

Таблица № 6

Результаты расчета средней плотности потока нейтронов в водяных ловушках
Results of calculating the average neutron flux density in neutron traps

Номер ячейки	Средняя плотность потока нейтронов, нейтр/см ² ·с						Отношение MCU/MCNP		
	MCNP			MCU					
	$E < 0,625$ эВ	0,625эВ <E<0,1 МэВ	$E > 0,1$ МэВ	$E < 0,625$ эВ	0,625эВ <E<0,1 МэВ	$E > 0,1$ МэВ	$E < 0,625$ эВ	0,625эВ <E<0,1 МэВ	$E > 0,1$ МэВ
7-8	2,14·10 ¹⁴	4,52·10 ¹³	2,79·10 ¹³	2,17·10 ¹⁴	5,27·10 ¹³	3,27·10 ¹³	1,01	1,17	1,17
4-5	1,66·10 ¹⁴	9,18·10 ¹³	8,55·10 ¹³	1,72·10 ¹⁴	9,28·10 ¹³	8,77·10 ¹³	1,04	1,01	1,03
4-8	1,58·10 ¹⁴	8,71·10 ¹³	8,16·10 ¹³	1,66·10 ¹⁴	8,92·10 ¹³	8,48·10 ¹³	1,05	1,02	1,04
10-8	1,52·10 ¹⁴	8,40·10 ¹³	8,01·10 ¹³	1,59·10 ¹⁴	8,62·10 ¹³	8,24·10 ¹³	1,05	1,03	1,03
10-5	1,44·10 ¹⁴	7,85·10 ¹³	7,46·10 ¹³	1,48·10 ¹⁴	7,99·10 ¹³	7,56·10 ¹³	1,03	1,02	1,01
7-11	1,71·10 ¹⁴	9,33·10 ¹³	8,79·10 ¹³	1,69·10 ¹⁴	9,11·10 ¹³	8,58·10 ¹³	0,99	0,98	0,98
7-5	1,63·10 ¹⁴	9,02·10 ¹³	8,48·10 ¹³	1,75·10 ¹⁴	9,37·10 ¹³	8,87·10 ¹³	1,07	1,04	1,05

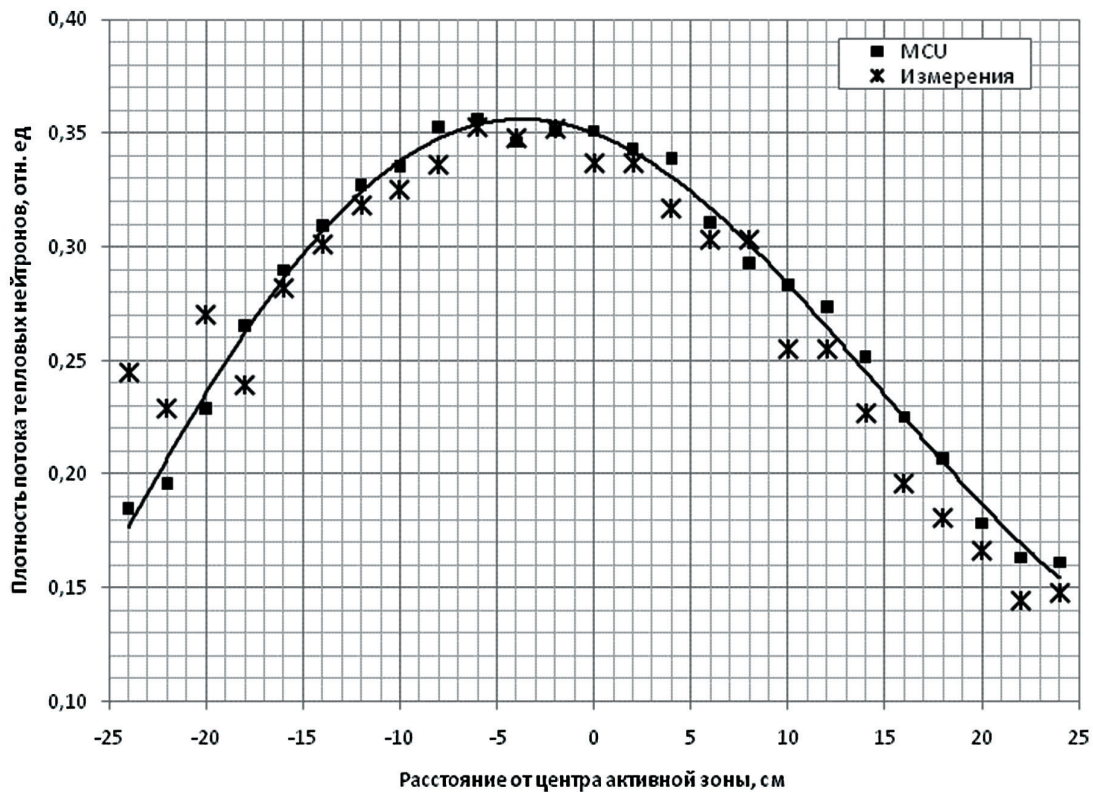


Рис. 11. Распределение относительной плотности потока тепловых нейтронов по высоте активной зоны. Тепловыделяющая сборка, ячейка 10-9
 [Fig. 11. Distribution of the relative thermal neutron flux density by the core height. Fuel assembly, cell 10-9]

При расчете распределения плотности потока тепловых нейтронов с энергией $E < 0,625$ эВ по высоте АЗ нормировка в ячейках производилась на ячейку с максимальным значением данной величины. Измерение относительного распределения плотностей потока тепловых нейтронов по высоте АЗ проводилось методом активации медных индикаторов. Максимальная плотность потока тепловых нейтронов с энергией $E < 0,625$ эВ в ячейке 7-8 измерена на мощности 1 МВт при помощи золотых индикаторов и составляет $3,25 \cdot 10^{13}$ нейтр/см²·с.

4.2. Сопоставление с реакторными экспериментальными данными исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М

Для расчета плотности потока тепловых нейтронов в ячейках АЗ выбраны две штатные компоновки АЗ ИЯР ИВВ-2М.

В основе методики проведения эксперимента лежит метод нейтронно-активационных измерений. Согласно этому методу, нейтронно-активационные детекторы (далее – детекторы) облучаются в поле нейтронов. В детекторах под действием нейтронов происходит реакция активации. После окончания облучения наведенная активность в детекторе измеряется при помощи гамма-спектрометра Canberra.

Плотность потока нейтронов в месте облучения детекторов определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{A}{N_{\text{я}} \cdot \sigma \cdot (1 - e^{-\lambda t})},$$

где φ – плотность потока нейтронов в месте облучения, нейтр/см²·с;

A – наведенная активность детектора на момент окончания облучения, Бк;

$N_{\text{я}}$ – количество ядер в детекторе исходного элемента;

σ – эффективное сечение реакции;

λ – постоянная распада дочернего изотопа, 1/с;

t – время облучения, с.

В отчете о результатах измерений приводятся данные по облучению нейтронно-активационных детекторов, активируемых под действием тепловых нейтронов: Со и Au. Детекторы представляют собой диски из фольги диаметром 10 мм. Количество ядер нуклида мишени приводится в паспорте на каждый детектор.

Результаты расчетов, представленные в таблице № 7, сравниваются с результатами измерений плотности потока тепловых нейтронов с энергией $E < 0,625$ эВ в ячейках АЗ. В первом случае – в ячейке 4-7 [11], во втором – в ячейке 8-5 [12].

Таблица № 7

Плотность потока тепловых нейтронов с $E < 0,625$ эВ
Thermal neutron flux density ($E < 0.625$ eV)

Компоновка активной зоны	Плотность потока нейтронов с $E < 0,625$ эВ, нейтр./см ² ·с		Отношение расчетного значения к экспериментальному
	экспериментальные значения	расчетные значения	
№ 1	$1,56 \cdot 10^{14}$	$1,48 \cdot 10^{14}$	0,95
№ 2	$3,41 \cdot 10^{14}$	$3,54 \cdot 10^{14}$	1,04

Из представленных результатов видно, что рассчитанные значения хорошо согласуются с экспериментальными, и отклонение расчетных величин к эксперименту не превышает 5 % в первом случае и 4 – во втором.

4.3. Расчет эффективности рабочих органов системы управления и защиты, запаса реактивности и подкритичности при штатных конфигурациях активной зоны исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М

Проведен расчет эффективности РО СУЗ для штатной компоновки АЗ ИЯР ИВВ-2М (2018 г.) путем моделирования процедуры градуировки. Рассчитано 72 критических состояния, одни из которых сделаны методом разгона, другие – методом перекомпенсации.

В таблице № 8 приведена часть расчета критических состояний, позволяющих оценить интегральную эффективность РО СУЗ. Сравнительные кривые интегральных характеристик представлены на рис. 12, 13. Сравнение результатов определения физических весов РО СУЗ расчетным и экспериментальным путем представлено в таблице № 9.

Перечисленные экспериментальные погрешности в целом находятся на приемлемом уровне.

В таблице № 10 приведены результаты определения расчетного запаса реактивности на начало кампаний № 1–8, суммарный вес РО СУЗ и подкритичность при взведенных РО АЗ. Расчетный запас реактивности определен путем расчета с полностью извлеченными РО СУЗ.

Подкритичность при взведенных АЗ определена как разность запаса реактивности и суммарного веса КС и АР.

Погрешность расчета запаса реактивности и подкритичности при взведенных РО АЗ, обеспечиваемой программой MCU-PTR, определялась на основе компоновки № 1.

По результатам расчета градуировки можно оценить запас реактивности как сумму весов погруженных участков, определенную по градуировочным кривым. Для расчетных кривых добавляется отклонение расчета от критичности.

В таблице № 11 представлены расчеты запаса реактивности для кампании № 1 на основе нескольких критических положений РО СУЗ.

Таким образом, исходя из данных таблицы № 11, погрешность расчета запаса реактивности и подкритичности, определяемой как разность суммарного веса КС и АР и запаса реактивности, составляет от 3 до 8 %.

Критические состояния, рассчитанные при проведении градуировки РО СУЗ (таблица № 8, пп. 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 23, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 43, 44, 46, 48, 50, 52, 54, 56, 58), использовались для оценки погрешности расчетов критичности разотравленных состояний реактора в начале его топливной кампании по программе MCU-PTR. Исходя из полученных результатов погрешность составляет – 0,19÷0,94 % $\Delta K/K$.

Для определения критичности отравленных состояний реактора в течение кампании проведен расчет кампании реактора № 2, следующей за проведением градуировки РО СУЗ. Результаты расчета показали, что расчетная реактивность для экспериментальных критических отравленных состояний реактора в течение кампании № 2 лежит в диапазоне от – 0,04 до 0,29 % $\Delta K/K$. В результате проведенной валидации расчетов по программе MCU-PTR на основе сопоставления с экспериментальными данными реактора ИВВ-2М получены следующие расхождения расчетных и экспериментальных значений:

- критичность разотравленных состояний в начале кампании – 0,19÷0,94 % $\Delta K/K$ % $\Delta K/K$;
- критичность разотравленных состояний в течение кампании – 0,04÷0,29 % $\Delta K/K$ % $\Delta K/K$;

- запас реактивности $3 \div 8 \%$;
- интегральная эффективность стержней КС $< 15 \%$;
- интегральная эффективность стержня АР $< 10 \%$.

Перечисленные расхождения получены при условии корректировки концентрации ядер-отравителей в бериллиевом блоке, в котором размещен РО АР, выбранной в результате анализа расхождения расчета и эксперимента по интегральной эффективности РО СУЗ.

Таблица № 8

Результаты расчета критических состояний при проведении градуировки рабочих органов системы управления и защиты. Штатная компоновка активной зоны исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М (2018 г.)

Results of calculation of critical states during calibration of the control and protection system operating elements. IVV-2M regular core composition (2018 year)

№ п/п	Положение РО СУЗ, см							$K_{эфф}$	$\rho, \% \Delta K/K$
	КС-1	КС-2	КС-3	КС-4	КС-5	КС-6	АР		
1	50	19	0	19	19	20	0	1,000979	0,10
2	400	19	10	19	19	20	0	1,001551	0,15
3	40	19	0	19	19	20	0	0,999558	-0,04
4	35	19	15	19	19	20	0	1,000966	0,10
5	35	19	10	19	19	20	0	0,999517	-0,05
19	10	19	38	19	19	20	0	0,999100	-0,09
20	4	19	50	19	19	20	20	0,999400	-0,06
21	4	19	44	19	19	20	0	0,998100	-0,19
22	0	19	50	19	19	20	0	0,998900	-0,11
27	20	35	20	7	20	20	0	1,000707	0,07
28	20	32	20	16	20	20	0	0,999182	-0,08
29	20	32	20	12	20	20	0	1,000745	0,07
62	20	20	20	21	0	43	0	1,000071	0,01
63	0	25	0	25	0	24	50	1,008336	0,83
68	16	25	0	25	0	24	0	1,008197	0,81

Примечание: стандартное отклонение $\pm 0,00020$.

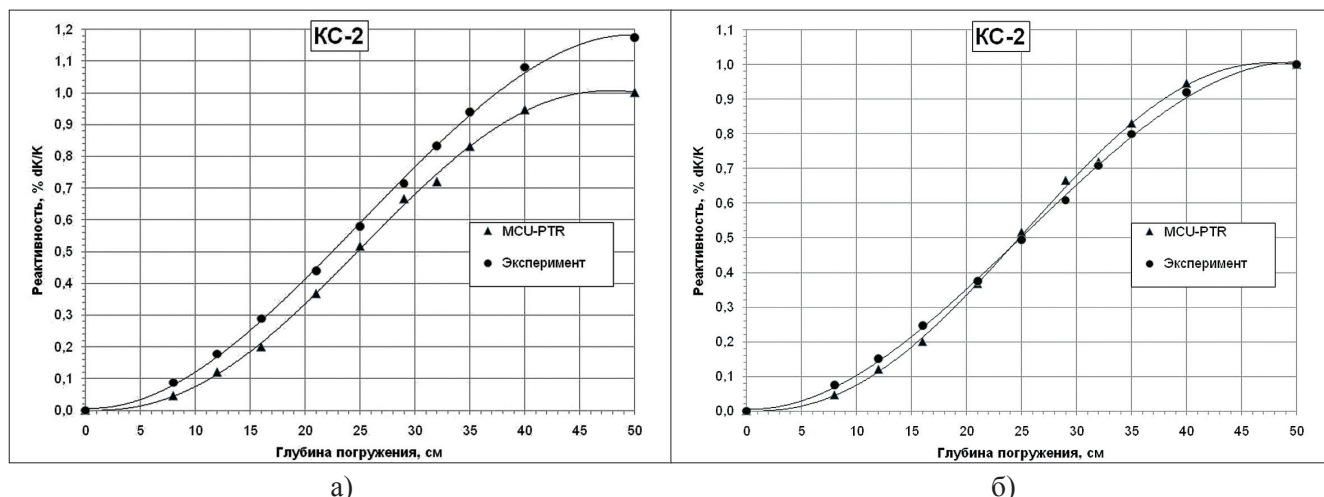


Рис. 12. Интегральная характеристика КС-2: а) в абсолютных единицах; б) в относительных единицах [Fig. 12. Integral characteristic of control rod-2: a) in absolute units; b) in relative units]

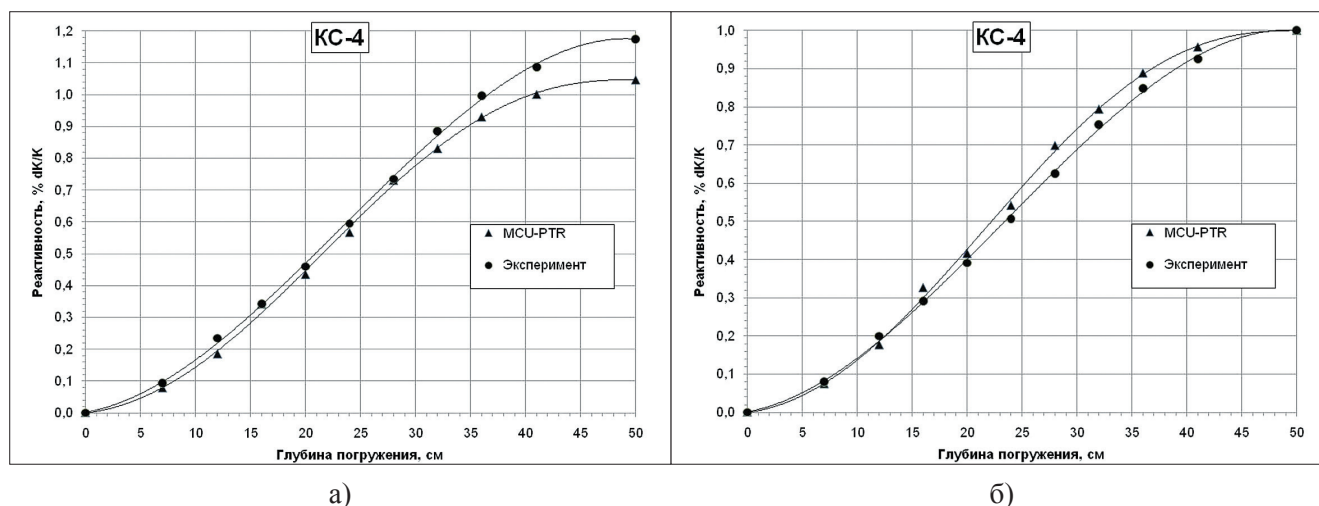


Рис. 13. Интегральная характеристика КС-4: а) в абсолютных единицах; б) в относительных единицах
 [Fig. 13. Integral characteristic of control rod-4: a) in absolute units; b) in relative units]

Таблица № 9

Физический вес рабочих органов системы управления и защиты
The efficiency of control members

РО СУЗ	Физический вес, % ΔK/K		Отношение расчет/эксперимент
	Эксперимент	Расчет	
КС-1	1,34	1,43	1,07
КС-2	1,19	1,11	0,93
КС-3	1,20	1,28	1,07
КС-4	1,14	1,05	0,92
КС-5	1,02	1,10	1,08
КС-6	1,09	1,16	1,06
АР	0,31	0,39	1,05
АЗ-1	0,62	0,71	-1,15
АЗ-2	0,63	0,61	-0,97
АЗ-3	0,75	0,73	-0,98
Суммарный вес КС+АР	7,29	7,52	1,02

Таблица № 10

Результаты определения запаса реактивности
Results of the reactivity margin determination

Кампания	$K_{эфф}^?$ разотравленное состояние	Суммарный вес РО КС+АР, % ΔK/K	Запас реактивности, % ΔK/K	Подкритичность при взведенных РО АЗ, % ΔK/K
№ 1	1,00098	7,35	2,94	-4,41
№ 2	1,06124	7,77	5,77	-2,00
№ 3	1,06643	7,67	6,22	-1,45
№ 4	1,06256	7,77	5,89	-1,88
№ 5	1,06113	7,57	5,76	-1,81
№ 6	1,06586	7,52	6,18	-1,34
№ 7	1,05051	7,32	4,81	-2,51
№ 8	1,05843	7,57	5,52	-2,05

Таблица № 11

Определение запаса реактивности по градуировочным кривым
Results of the reactivity margin determination according to calibration curves

№ п/п		КС-1	КС-2	КС-3	КС-4	КС-5	КС-6	$\rho, \% \Delta k/k$	Сумма
1	Положение РО СУЗ	50	19	0	19	19	20	0,10	3,03
	расч. вес	1,43	0,32	0,00	0,43	0,28	0,47		
	эксп. вес	1,34	0,38	0,00	0,44	0,39	0,34	–	2,94
2	Положение РО СУЗ	0	19	50	19	19	20	0,11	2,78
	расч. вес	0,00	0,38	1,20	0,44	0,39	0,37		
	эксп. вес	0,00	0,32	1,36	0,43	0,32	0,47	–	3,01
3	Положение РО СУЗ	20	20	20	21	50	0	0,10	2,87
	расч. вес	0,52	0,41	0,42	0,50	1,02	0,00		
	эксп. вес	0,55	0,34	0,37	0,48	1,10	0,00	–	2,94

Заключение

Проведенные расчеты подтверждают работоспособность математической модели АЗ ИЯР ИВВ-2М.

Модель аттестована в части расчета следующих нейтронно-физических параметров:

- эффективный коэффициент размножения нейтронов;
- запас реактивности;
- интегральная эффективность РО СУЗ;

- подкритичность при взведенных РО АЗ;
- плотность потока тепловых нейтронов с энергией $E < 0,625$ эВ;
- распределение энерговыделения в АЗ;
- глубина выгорания топлива в ТВС.

В таблице № 12 приведены относительные погрешности, определенные на основе анализа результатов расчета эксплуатационных данных реактора ИВВ-2М, внесенные в аттестационный паспорт программы для ЭВМ «MCU-PTR с банком данных MDBPT50» [13].

Таблица № 12

Погрешности, определенные на основе анализа результатов расчета эксплуатационных данных реактора ИВВ-2М
Accuracy determined based on the analysis of the calculation results of the IVV-2M reactor operating data

№ п/п	Параметр	Погрешность
1	$K_{эфф}$ (холодное состояние) ¹	$\pm 1 \% \Delta k/k$
2	$K_{эфф}$ (горячее состояние) ¹	$\pm 0,7 \% \Delta k/k$
3	Эффективность поглощающих КС ²	$\pm 10 \%$
4	Эффективность стержня АР ²	$\pm 10 \%$
5	Эффективность одного стержня АЗ ²	$\pm 15 \%$
6	Эффективность стержней АЗ ²	$\pm 5 \%$
7	Запас реактивности ²	$\pm 10 \%$
8	Плотность потока тепловых нейтронов ^{2, 4}	$\pm 10 \%$
9	Подкритичность при взведенных РО СУЗ ³	$\pm 10 \%$
10	Распределение энерговыделения ³	$\pm 10 \%$
11	Глубина выгорания ²³⁵ U ²	$\pm 5 \%$

Примечания:

- ¹ Максимальная погрешность.
- ² Максимальная относительная погрешность.
- ³ Среднеквадратическая относительная погрешность.
- ⁴ Погрешность указана для области АЗ и бериллиевого отражателя.

Авторским коллективом АО «ИРМ» получен аттестационный паспорт программы для электронных вычислительных машин «MCU-PTR с банком данных MDBPT50» применительно к расчетам реактора ИВВ-2М № 498 от 14.12.2020 сроком на 10 лет [13].

Литература

1. Алексеев Н. И., Большагин С. Н., Гомин Е. А., Городков С. С., Гуревич М. И., Калугин М. А., Кулаков А. С. и др. Статус MCU-5 // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов. 2011. Вып. 4. С. 4–23.
2. Russkikh I. M., Seleznev E. N., Zyryanova A. A., Kotelnikov N. A., Tashlykov O. L. (2024). Conducting in-reactor studies of objects the length of which exceeds the height of the IVV-2M reactor core. Nuclear Energy and Technology, No. 10 (3), pp. 161–168. DOI: <https://doi.org/10.3897/nucet.10.128016>.
3. Об использовании атомной энергии: Федер. закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ.
4. Экспертиза и аттестация программ для ЭВМ. – URL: www.secnrs.ru/expertise/software-review (дата обращения: 18.02.2026).
5. Перечень программ семейства MCU. – URL: <https://mcuproject.ru/racodes.html> (дата обращения: 18.02.2026).
6. Верификация программы MCU-PTR с библиотекой констант MDBPT50 для расчетов нейтронных характеристик исследовательского реактора ИР-8, Инв. № 180-14/35, НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 2012.
7. Русских И. М. Исследовательский ядерный реактор ИВВ-2М // Атомная энергия. 2016. Т. 121. Вып. 4. С. 183–187. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0190-7>.
8. Зырянова А. А., Метелева Ю. В., Козлов А. В. и др. Расчет отравления блоков бериллия в активной зоне исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-реакторные константы. 2018. № 1. С. 5–16.
9. Верификация программы MCU-PTR с библиотекой констант MDBPT50 для расчетов нейтронно-физических характеристик исследовательского реактора: Отчет от 21.11.2019 № Ф-1235/44, АО «ИРМ», г. Заречный, 2019.
10. Анализ безопасности и изменения потребительских характеристик бассейнового исследовательского реактора при переходе на НОУ-топливо. Оптимизация нейтронно-физических характеристик бассейнового исследовательского реактора на новом топливе. Анализ потребительских характеристик бассейнового ИР при переходе на НОУ-топливо на основе диоксида урана (заключительный): Отчет о научно-исследовательской работе № Ф-382/09, г. Заречный, 2009.
11. Измерение плотности потока тепловых ($E < 0,625$ эВ) нейтронов в ячейке 4-7 активной зоны исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М: Протокол № 09-47 от 28.06.2013, АО «ИРМ», г. Заречный, 2013.
12. Определение плотности потока тепловых нейтронов в ячейке 8-5 активной зоны ИЯР ИВВ-2М: Протокол № 09-78 от 10.10.2013, АО «ИРМ», г. Заречный, 2013.
13. Перечень действующих аттестационных паспортов программ для ЭВМ. – URL: www.secnrs.ru/expertise/software-review/База_аттестационных_паспортов_январь_2026_СНА.pdf (дата обращения: 18.02.2026).

References

1. Alekseev N. I., Bol'shagin S. N., Gomin E. A., Gorodkov S. S., Gurevich M. I., Kalugin M. A., Kulakov A. S., et al. (2011). Status MCU-5 [The status of the MCU-5]. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: fizika yadernykh reaktorov – Issues of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear reactor physics, No. 4, pp. 4–23. [in Russian].
2. Russkikh I. M., Seleznev E. N., Zyryanova A. A., Kotelnikov N. A., Tashlykov O. L. (2024). Conducting in-reactor studies of objects the length of which exceeds the height of the IVV-2M reactor core. Nuclear Energy and Technology, No. 10 (3), pp. 161–168. DOI: <https://doi.org/10.3897/nucet.10.128016>.
3. Federal'nyi zakon No. 170-FZ “Ob ispol'zovanii atomnoi ehnergii” [Federal law No. 170-FZ “On the use of atomic energy”]. 1995.

4. Ehkspertiza i attestatsiya programm dlya EHVM [Expertise and certification of computer programs]. URL: www.secnrs.ru/expertise/software-review (reference date: 18.02.2026).
5. List of MCU family programs. URL: www.mcuproject.ru/racodes.html (reference date: 18.02.2026).
6. Verifikatsiya programmy MCU-PTR s bibliotekoi konstant MDBPT50 dlya raschetov neitronnykh kharakteristik issledovatel'skogo reaktora IR-8 [Verification of the MCU-PTR program with the MDBPT50 constant library for calculating the neutron characteristics of the IR-8 research reactor]. NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, 2012.
7. Russkikh I. M. (2017). Issledovatel'skii yadernyi reaktor IVV-2M [IVV-2M Nuclear research reactor]. Atomnaya ehnergiya – Atomic Energy, No. 121 (4), pp. 235–239. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0190-7>. [in Russian].
8. Zyryanova A. A., Meteleva Y. V., Kozlov A. V., et al. (2018). Raschet otravleniya blokov berilliya v aktivnoi zone issledovatel'skogo yadernogo reaktora IVV-2M [Beryllium blocks poisoning analysis in IVV-2M research nuclear reactor core]. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: yaderno-reaktornyye konstanty – Issues of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Reactor Constants, No. 1 (5), pp. 5–16. [in Russian].
9. Verifikatsiya programmy MCU-PTR s bibliotekoi konstant MDBPT50 dlya raschetov neitronno-fizicheskikh kharakteristik issledovatel'skogo reaktora [Verification of the MCU-PTR program with the MDBPT50 constant library for calculating the neutron characteristics of a research reactor]. Report No. F-1235/44 dated 21.11.2019, JSK “INM”, Zarechny, 2019.
10. Analiz bezopasnosti i izmeneniya potrebitel'skikh kharakteristik basseinovogo issledovatel'skogo reaktora pri perekhode na NOU-toplivo. Optimizatsiya neitronno-fizicheskikh kharakteristik basseinovogo issledovatel'skogo reaktora na novom toplive. Analiz potrebitel'skikh kharakteristik basseinovogo IR pri perekhode na NOU-toplivo na osnove dioksida urana (zaklyuchitel'nyi) [Analysis of safety and changes in performance of a pool-type research reactor during the transition to low-enriched fuel. Optimization of neutron performance of a pool-type research reactor using new fuel. Analysis of performance of a pool-type research reactor during the transition to low-enriched uranium dioxide fuel (final)]. Research Report No. F-382/09, Zarechny, 2009.
11. Izmerenie plotnosti potoka teplovykh ($E < 0,625$ EHV) neitronov v yacheike 4-7 aktivnoi zony issledovatel'skogo yadernogo reaktora IVV-2M [Flux density of thermal ($E < 0.625$ eV) neutrons measurement in cell 4-7 of the IVV-2M research reactor core]. Report No. 09-47 from 28.06.2013, JSK “INM”, Zarechny, 2013.
12. Opredelenie plotnosti potoka teplovykh neitronov v yacheike 8-5 aktivnoi zony IYAR IVV-2M [Flux density of thermal neutrons measurement in cell 8-5 of the IVV-2M research reactor core]. Report No. 09-78 from 10.10.2013, JSK “INM”, Zarechny, 2013.
13. List of valid certification passports for computer programs. URL: www.secnrs.ru/expertise/software-review/База_аттестационных_паспортов_январь_2026_СНА.pdf (reference date: 18.02.2026).

Сведения об авторах

Зырянова Александра Анатольевна, начальник группы физики реактора ИВВ-2М, АО «Институт реакторных материалов» (624250, Свердловская область, г. Заречный).

Волчихина Юлия Васильевна, инженер-физик по расчетам и режимам 1 категории, АО «Институт реакторных материалов» (624250, Свердловская область, г. Заречный); аспирант, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» (620062, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19).

Русских Иван Михайлович, главный инженер, АО «Институт реакторных материалов» (624250, Свердловская область, г. Заречный).

Ташлыков Олег Леонидович, доцент, профессор кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» (620062, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19).

Хомяков Анатолий Павлович, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и атомных производств, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» (620062, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19).

Authors credentials

Zyryanova Alexandra Anatolyevna, Head of the IVV-2M Reactor Physics Group, Research Institute of Nuclear Materials JSC (Sverdlovsk region, Zarechny, 624250), e-mail: zyryanova_aa@irmatom.ru.

Volchikhina Yulia Vasilievna, 1st Category Engineer-Physicist for Calculations and Modes, Research Institute of Nuclear Materials JSC (Sverdlovsk region, Zarechny, 624250); Graduate Student, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (19, Mira str., Yekaterinburg, 620062), e-mail: Metelyo55@yandex.ru.

Russkikh Ivan Mikhailovich, Chief Engineer, Research Institute of Nuclear Materials JSC (Sverdlovsk region, Zarechny, 624250), e-mail: imrusskikh@rosatom.ru.

Tashlykov Oleg Leonidovich, Associate Professor, Professor of the Department of Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (19, Mira str., Yekaterinburg, 620062), e-mail: otashlykov@list.ru.

Khomyakov Anatoly Pavlovich, Senior Researcher, Head of the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Nuclear Production, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (19, Mira str., Yekaterinburg, 620062), e-mail: a.p.khomiakov@urfu.ru.

Для цитирования

Зырянова А. А., Волчихина Ю. В., Русских И. М., Ташлыков О. Л., Хомяков А. П. Аттестация программы MCU-PTR для сопровождения эксплуатации исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М // Ядерная и радиационная безопасность. 2026. № 1 (119). С. 5–24. DOI: 10.26277/SECNRS.2026.119.1.001.

For citation

Zyryanova A. A., Volchikhina Yu. V., Russkikh I. M., Tashlykov O. L., Khomyakov A. P. (2026). Attestatsiya programmy MCU-PTR dlya soprovozhdeniya ehkspluatatsii issledovatel'skogo yadernogo reaktora IVV-2M [Certification of the MCU-PTR program for supporting the operation of the IVV-2M research nuclear reactor]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'* – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 1 (119), pp. 5–24. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2026.119.1.001.

