

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-03>

EDN HJDXDQ

Оригинальная статья / Original paper



Применение кода OpenMC для бенчмарка ВВЭР-1000 со смешанной
загрузкой уранового и МОКС-топлива

Д.А. Плотников , В.И. Романенко , Д.А. Соловьев  ✉, В.Г. Зимин , И.А. Молев ,
В.Н. Кудратов , С.В. Ивахин , Б. Джарум 

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

✉ DASolovev@mephi.ru

Аннотация. В данной работе представлены результаты численного моделирования бенчмарка реактора ВВЭР-1000 со смешанной загрузкой уранового и МОКС-топлива, разработанного Агентством по Ядерной Энергии при Организации Экономического Сотрудничества и Развития (АЯЭ ОЭСР), с помощью программного комплекса OpenMC. OpenMC предназначен для моделирования процессов переноса нейтронов методом Монте-Карло и использует в качестве программного интерфейса язык программирования Python. Нейтронные сечения для различных нуклидов, необходимые для проведения расчетов, были получены с помощью баз оцененных ядерных данных ENDF/B-VII.1 и ENDF/B-VIII.0. Использование двух версий библиотек позволили провести оценку влияния выбора базы ядерных данных на ключевые нейтронно-физические параметры ВВЭР-1000. Рассчитанные значения эффективного коэффициента размножения и скорости реакции деления в тепловыделяющих сборках для различных стационарных состояний реактора ВВЭР-1000 были сопоставлены с результатами, полученными с помощью кодов MCU, RADAR и MCNP (опубликованными АЯЭ ОЭСР и, в частности, сотрудниками Агентства по Атомной Энергии Турции). Дополнительно была проведена кросс-верификация полученных результатов, для чего была построена расчетная модель бенчмарка ВВЭР-1000 с помощью кода Serpent. Полученные результаты демонстрируют хорошую сходимость с результатами других прецизионных кодов и подтверждают корректность построенных в OpenMC и Serpent расчетных моделей. Работа подтверждает возможность использования OpenMC для точного моделирования нейтронно-физических характеристик ВВЭР-1000, что актуально для задач проектирования и анализа безопасности современных ядерных энергетических установок. Методология, реализованная в данной работе, может быть использована для последующего моделирования и анализа новых конфигураций активных зон различных реакторных установок.

Ключевые слова: OpenMC, Serpent, ВВЭР-1000, метод Монте-Карло, моделирование, перенос нейтронов.

Для цитирования: Плотников Д.А., Романенко В.И., Соловьев Д.А., Зимин В.Г., Молев И.А., Кудратов В.Н., Ивахин С.В., Джарум Б. Применение кода OpenMC для бенчмарка ВВЭР-1000 со смешанной загрузкой уранового и МОКС-топлива. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(3):26–35. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-03>

For citation: Plotnikov D.A., Romanenko V.I., Solovyev D.A., Zimin V.G., Molev I.A., Kudratov V.N., Ivakhin S.V., Djaroum B. Application of OpenMC code to VVER-1000 MOX Core computational benchmark. *Nuclear Safety*. 2025; 15(3):26–35. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-03>

Application of OpenMC code to VVER-1000 MOX Core computational benchmark

Denis A. Plotnikov , Vladislav I. Romanenko , Denis A. Solovyev  ✉,
Vyacheslav G. Zimin , Ilya A. Molev , Voxid N. Kudratov , Sergey V. Ivakhin ,
Belaid Djaroum 

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation

✉ DASolovev@mephi.ru

Abstract. This paper presents the results of numerical modeling of the VVER-1000 benchmark with a mixed loading of uranium and MOX fuel, developed by the Nuclear Energy Agency of the Organisation for Economic Co-operation and Development (NEA OECD), using the OpenMC code. OpenMC is a Monte Carlo-based neutron transport simulation code that employs Python as a user interface. The neutron cross sections for various nuclides required for the calculations are obtained from the ENDF/B-VII.1 and ENDF/B-VIII.0 evaluated nuclear data libraries. The use of two different nuclear data versions made it possible to assess the sensitivity of key neutronic parameters of the VVER-1000 reactor to the choice of cross-section libraries. Calculated values of the effective multiplication factor and fission reaction rates in the fuel assemblies for several stationary reactor states are compared with benchmark results obtained using MCU, RADAR, and MCNP codes (published by the NEA OECD and, in particular, by researchers from the Turkish Atomic Energy Authority). Additionally, a cross-verification of the results is carried out using an independent model of the VVER-1000 benchmark developed in the Serpent code. The results demonstrate good agreement with other high-precision codes and confirm the correctness of the OpenMC and Serpent models. The presented methodology is applicable for further modeling and analysis of new core configurations in various reactor systems.

Keywords: OpenMC, Serpent, VVER-1000, Monte Carlo method, modeling, neutron transport.

Введение

Расчетное моделирование процессов, протекающих в различных ядерных установках, является одной из наиболее важных задач по развитию конкурентоспособности ядерной энергетики на мировой арене, так как позволяет прогнозировать поведение ядерных установок в различных условиях и оценивать их безопасность и эффективность. Для проведения таких расчетов в настоящее время разработаны различные программные комплексы, например, такие, как MCU [1], MCNP [2] и пр. Для того, чтобы оценить насколько корректно и точно производят расчеты разработанные программы используются тесты, результаты которых получены с высокой точностью. Данные тесты называются бенчмарк-тестами или бенчмарками.

Целью данной работы является проверка качества разработанной в коде OpenMC [3] модели активной зоны совместно с выгородкой и корпусом для реактора ВВЭР-1000.

Для решения этой задачи была выполнена серия расчетов состояний модели, приведенной в бенчмарке VVER-1000 MOX Core Computational Benchmark [4]. Результаты данных расчетов будут представлены ниже. Расчеты выполнены по кодам OpenMC и Serpent [5]. Serpent используется для дополнительной кросс-верификации полученных результатов.

Используемые программы

Одним из программных комплексов, осуществляющих прецизионные расчеты ядерных установок методом Монте-Карло, является программный комплекс OpenMC,

разработанный Массачусетским Технологическим Институтом в 2011 г.

OpenMC представляет собой код моделирования переноса нейтронов методом Монте-Карло с программным интерфейсом на языке программирования Python. OpenMC доступен в виде бесплатного программного обеспечения под лицензией с открытым исходным кодом, что позволяет использовать его на международном уровне и расширить сотрудничество с сообществом специалистов в области ядерной науки и техники [3]. Результаты применения данного программного комплекса для решения различных нейтронно-физических задач были неоднократно опубликованы (например, в работе [6]).

Комплекс трехмерных программ Serpent разработан техническим исследовательским центром Финляндии и используется для расчета переноса частиц методом Монте-Карло с непрерывной энергетической зависимостью нейтронов. Работы по его созданию начались в 2004 г. Сам код был загружен в OECD/NEA (the Organization for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency) и RSICC (Radiation Safety Information Computational Center) в 2009 году. Serpent позволяет выполнять расчеты коэффициента размножения нейтронов, нуклидного состава и ряда других параметров систем, содержащих ядерные делящиеся материалы. Код Serpent разработан таким образом, чтобы повысить скорость расчета за счет использования больших объемов оперативной памяти. Код предназначен для некоммерческого использования.

Описание бенчмарк-эксперимента ВВЭР-1000

В качестве исходных данных для проведения расчетов использовались данные, которые приведены в описании расчетного бенчмарк-теста, разработанного Агентством по Ядерной Энергии при Организации Экономического Сотрудничества и Развития (АЯЭ ОЭСР) [4].

В этом бенчмарк-тесте представлено описание двухмерной модели активной зоны реактора ВВЭР-1000 со смешанной загрузкой уранового и МОКС-топлива. В модели используется 2 типа тепловыделяющих сборок – тепловыделяющие сборки с урановым топливом, содержащие ТВЭГ с гадолинием в качестве выгорающего поглотителя, и профилированные тепловыделяющие сборки с МОКС-топливом, также содержащие ТВЭГ с гадолинием. При этом тепловыделяющие сборки имеют различные глубины выгорания. Представленная модель активной зоны имеет 60° симметрию. Схематичное изображение модели представлено на рисунке 1.

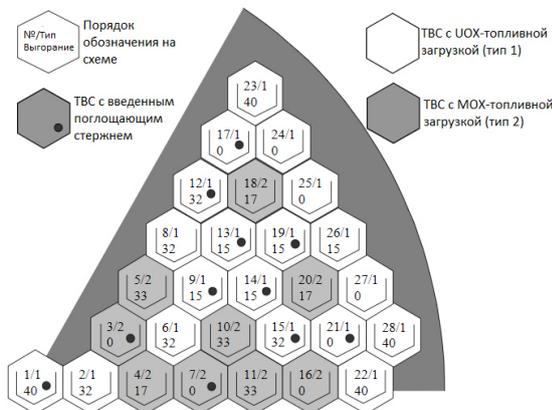


Рисунок 1. Расчетная модель со смешанной загрузкой уранового и МОКС-топлива [4]

Figure 1. Computational model with mixed uranium and MOX fuel loading [4]

Активная зона реактора, как указано на рисунке 2, окружена следующими слоями отражателя (по порядку от центра к периферии): водяной зазор, стальная выгородка с отверстиями для отвода тепла, стальная внутриреакторная шахта, опускной участок, стальной корпус реактора. В активной зоне расположены 163 тепловыделяющие сборки, каждая из которых состоит из 331 шести-

гранной ячейки (ТВЭЛы различного обогащения, ТВЭГ, направляющие трубки, центральная трубка). Подробное описание модели (геометрические размеры, материальный состав, температуры и пр.) представлено в описании бенчмарк-теста.

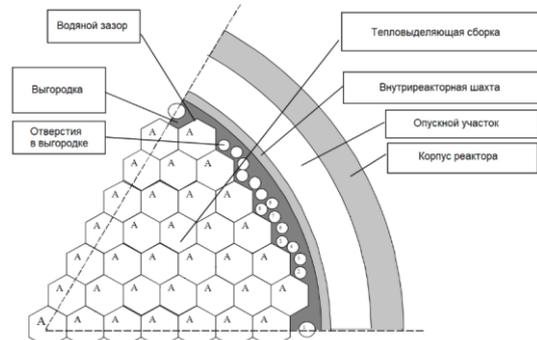


Рисунок 2. Расположение конструктивных элементов реактора в расчетной модели [4]

Figure 2. Layout of reactor structural components in the computational model [4]

Схематичные изображения тепловыделяющих сборок представлены на рисунке 3 (тепловыделяющая сборка с урановым топливом. Обозначение: 1 – Центральная трубка, 2 – ТВЭЛ с обогащением 4,2 % по ^{235}U , 3 – Направляющая трубка, 4 – ТВЭГ с обогащением 3,3 % по ^{235}U и 5 % по Gd_2O_3 , 5 – ТВЭЛ с обогащением 3,7 % по ^{235}U , 7 – Замедлитель [4]) и рисунке 4 (тепловыделяющая сборка с МОКС-топливом. Обозначение: 1 – Центральная трубка, 2 – ТВЭЛ с обогащением 3,62 % по энергетическому плутонию (материал PU_3.6 из [5]), 3 – Направляющая трубка, 4 – ТВЭГ с обогащением 3,6 % по ^{235}U и 4 % по Gd_2O_3 , 5 – ТВЭЛ с обогащением 2,7 % по энергетическому плутонию (материал PU_2.7 из [5]), 6 – ТВЭЛ с обогащением 2,4 % по энергетическому плутонию (материал PU_2.4 из [5]), 7 – Замедлитель [4]). Всего в бенчмарк-тесте рассчитано 6 различных состояний активной зоны реактора. Краткое описание расчетных состояний представлено в таблице 1.

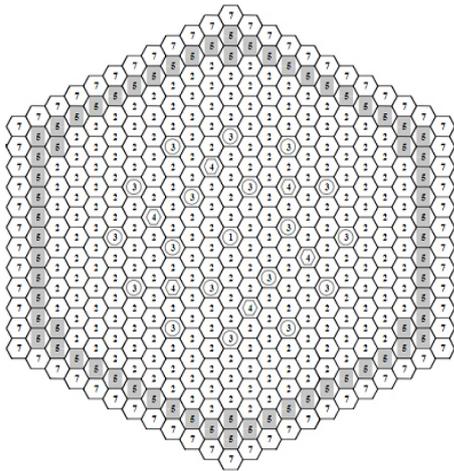


Рисунок 3. Схематичное изображение тепловыделяющей сборки с урановой топливной загрузкой.
Figure 3. Schematic diagram of a fuel assembly with uranium fuel loading.

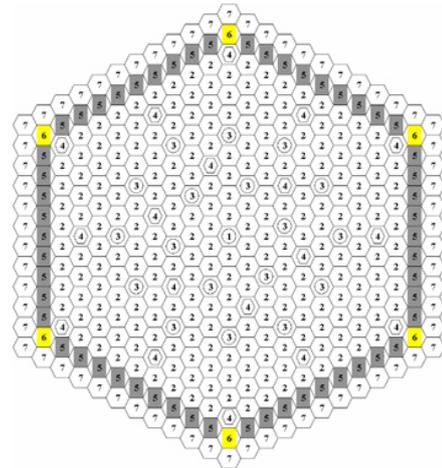


Рисунок 4. Схематичное изображение тепловыделяющей сборки с МОКС-топливной загрузкой.
Figure 4. Schematic diagram of a fuel assembly with MOX fuel loading.

Таблица 1. Описание расчетных состояний реактора ВВЭР-1000
Table 1. Description of the calculated states of the VVER-1000 reactor

Номер состояния	Наименование состояния	Температура топлива, К	Температура воды в ТВС, К	Температура в отражателе, К
1	Рабочее состояние	1027	575	560
2	Состояние с постоянной температурой	575	575	560
3	Холодное состояние с бором	300	300	300
4	Рабочее состояние без бора	1027	575	560
5	Состояние без бора с постоянной температурой	575	575	560
6	Состояние с введенными стержнями АЗ	553	553	553

Результаты расчетов

Расчет данного бенчмарк-теста неоднократно проводился для верификации различных программных средств (например, подобные исследования проводились сотрудниками Агентства по Атомной Энергии Турции и опубликованы в работе [7]).

В нашей работе были проведены расчеты по *OpenMC* и *Serpent*. При этом данные нейтронных сечений нуклидов были получены с помощью баз оцененных ядерных данных *ENDF/B-VII.1* и *ENDF/B-VIII*.

В таблице 2 представлены значения эффективного коэффициента размножения по всем стационарным состояниям реактора из таблицы 1. Отметим, что в работе [7] не представлены результаты для стационарного состояния №6 с введенными стержнями аварийной защиты. В данном бенчмарк-тесте опубликованы значения эффективного коэффициента размножения, полученные с помощью программных комплексов *MCU*

(база ядерных данных *MCUDAT-2.2*), *RADAR* (63-групповая библиотека с 40 тепловыми группами с границей в 1 электрон-вольт), *MCNP4C* (база ядерных данных *JEF 2.2*). В работе [7] опубликованы значения эффективного коэффициента размножения, полученные с помощью программного комплекса *MCNP5* (база ядерных данных *ENDF/B-VI.6*). Эти результаты использованы нами для сравнения с результатами, полученными по *OpenMC* и *Serpent*. При этом стандартное отклонение при расчете эффективного коэффициента размножения для различных состояний, полученных по *OpenMC*, не превышает 0,017 %, а для результатов, полученных по *Serpent*, не превышает 0,016%.

Для расчета состояний по *OpenMC* использовались статистики из бенчмарк-теста, а именно: для расчета первого состояния были взяты следующие параметры: 2×10^4 нейтронов в одном поколении нейтронов,

5×10^3 нейтронных поколений, 50 первых нейтронных поколений не учитываются при расчете функционалов. Для расчета оставшихся пяти состояний использовались следующие параметры: 2×10^4 нейтронов в одном поколении нейтронов, 2×10^3 нейтронных поколений, 500 первых нейтронных поколений не учитываются при расчете функционалов.

Для расчета состояний по *Serpent* использовались следующие параметры: 10^6 историй нейтронов в одном поколении, 100 нейтронных поколений, 20 первых нейтронных поколений не учитываются при расчете функционалов.

В таблице 3 представлены относительные отклонения эффективного коэффициента размножения от значений, полученных с помощью *MCU* (база ядерных данных *MCUDAT-2.2*), принятых за «эталонные» и представленных в бенчмарк-тесте. Именно эти результаты приняты за эталон, поскольку бенчмарк разрабатывался в НИЦ «Курчатовский институт», и основным расчетным средством в данном бенчмарке является программа *MCU*. Для проведенных по *OpenMC* расчетам, полученные отклонения от *MCU* не превышают 1 %.

Таблица 2. Значения эффективного коэффициента размножения (*Kэфф*) для различных состояний реактора
Table 2. Effective multiplication factor values (*Keff*) for different reactor states

Расчетный код	Номера состояния					
	1	2	3	4	5	6
<i>OpenMC</i> _{ENDF/B-VII.1}	1,04087	1,05478	0,93470	1,14302	1,15885	1,04861
<i>OpenMC</i> _{ENDF/B-VIII.0}	1,04127	1,05503	0,93427	1,14325	1,15856	1,04802
<i>Serpent</i> _{ENDF/B-VII.1}	1,03794	1,05150	0,93427	1,13919	1,15456	1,04747
<i>Serpent</i> _{ENDF/B-VIII.0}	1,03800	1,05174	0,93407	1,13907	1,15466	1,04746
<i>MCU</i> [5]	1,03341	1,04719	0,93237	1,14932	1,14932	1,04267
<i>RADAR</i> [5]	1,03769	1,05117	0,93204	1,14081	1,15574	N/A
<i>MCNP4C</i> [5]	1,03770	1,05132	0,93416	1,13871	1,15400	1,04729
<i>MCNP5</i> [6]	1,03614	1,04339	0,93397	1,13511	1,14333	1,03914

Таблица 3. Относительные отклонения эффективного коэффициента размножения для различных состояний реактора от значений, полученных с помощью *MCU*

Table 3. Relative deviations of the effective multiplication factor for different reactor states from the values obtained using *MCU*

Расчетный код	Номера состояния					
	1	2	3	4	5	6
$(OpenMC_{ENDF/B-VII.1}-MCU) / MCU, \%$	0,722	0,725	0,250	-0,548	0,829	0,570
$(OpenMC_{ENDF/B-VIII.0}-MCU) / MCU, \%$	0,761	0,749	0,204	-0,528	0,804	0,513
$(Serpent_{ENDFB7.1}-MCU) / MCU, \%$	0,438	0,412	0,204	-0,881	0,456	0,460
$(Serpent_{ENDFB8.0}-MCU) / MCU, \%$	0,444	0,434	0,182	-0,892	0,464	0,459
$(RADAR-MCU) / MCU, \%$	0,414	0,380	-0,035	0,740	0,559	N/A
$(MCNP4C-MCU) / MCU, \%$	0,415	0,394	0,192	-0,923	0,407	0,443
$(MCNP5-MCU) / MCU, \%$	0,264	-0,363	0,172	-1,234	-0,521	-0,339

При проведении расчетов с помощью *OpenMC* и *Serpent* были также получены средние значения скоростей реакции деления в тепловыделяющих сборках и относительные отклонения в процентах от значений, полученных по *MCU* (представлены на рисунках 5–10) для всех стационарных со-

стояний из таблицы 1. Полученные результаты сравниваются со средними значениями скоростей реакции деления в тепловыделяющих сборках, полученными с помощью разных прецизионных кодов, предста-

вленных в работах [4,7]. При этом на рисунках 5–10 тепловыделяющие сборки оди-

наковой конструкции и с одинаковыми глубинами выгорания обозначены одинаковым цветом.

К средней скорости деления в ТВС применяется следующее правило нормализации: значения скорости деления $R(I)$, $I = 1, 28$, нормированы на 163, где 163 является чис-

лом ТВС в реакторе, а 6 это число 60^0 секторов симметрии:

$$R(1) + 6 * \sum_{I=2}^{28} R(I) = 163$$

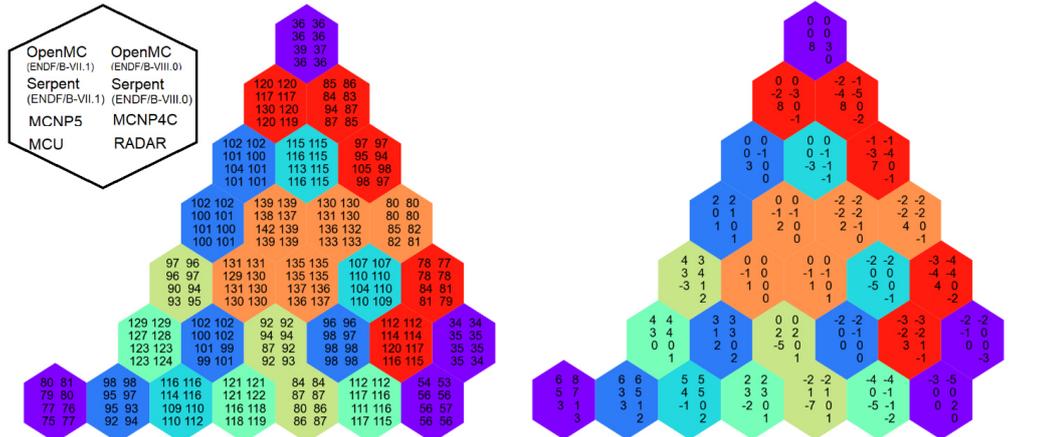


Рисунок 5. Средние значения скоростей реакции деления ($\times 100$) в тепловыделяющих сборках для разных прецизионных кодов и относительные отклонения в процентах от значений, полученных по MCU, для первого расчетного состояния из таблицы 1 (рабочее состояние)

Figure 5. Average fission reaction rates ($\times 100$) in fuel assemblies for different high-precision codes and relative deviations (in %) from MCU values for the first reactor state in Table 1 (operating state)

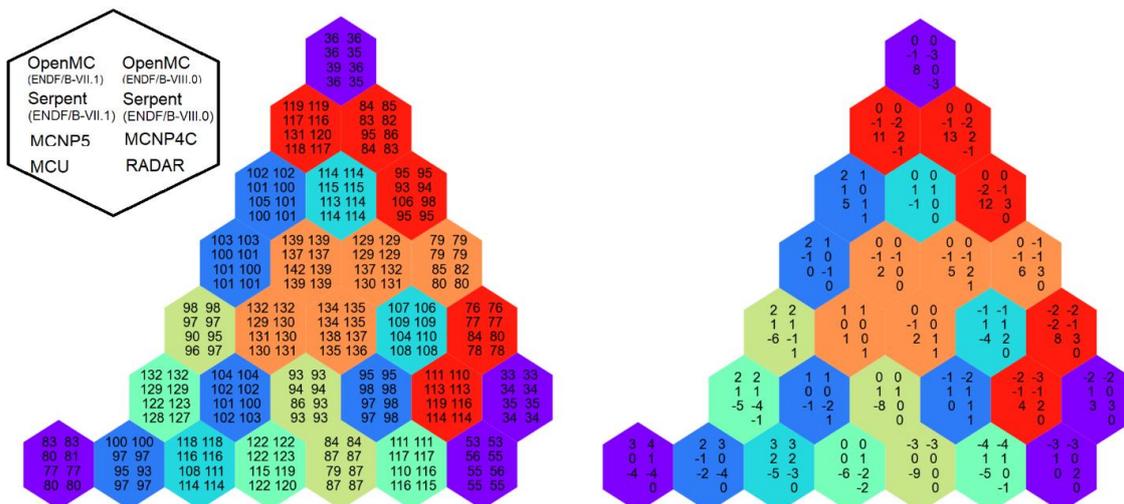


Рисунок 6. Средние значения скоростей реакции деления ($\times 100$) в тепловыделяющих сборках для разных прецизионных кодов и относительные отклонения в процентах от значений, полученных по MCU, для второго расчетного состояния из таблицы 1 (состояние с постоянной температурой)

Figure 6. Average fission reaction rates ($\times 100$) in fuel assemblies for different high-precision codes and relative deviations (in %) from MCU values for the second reactor state in Table 1 (constant temperature state)

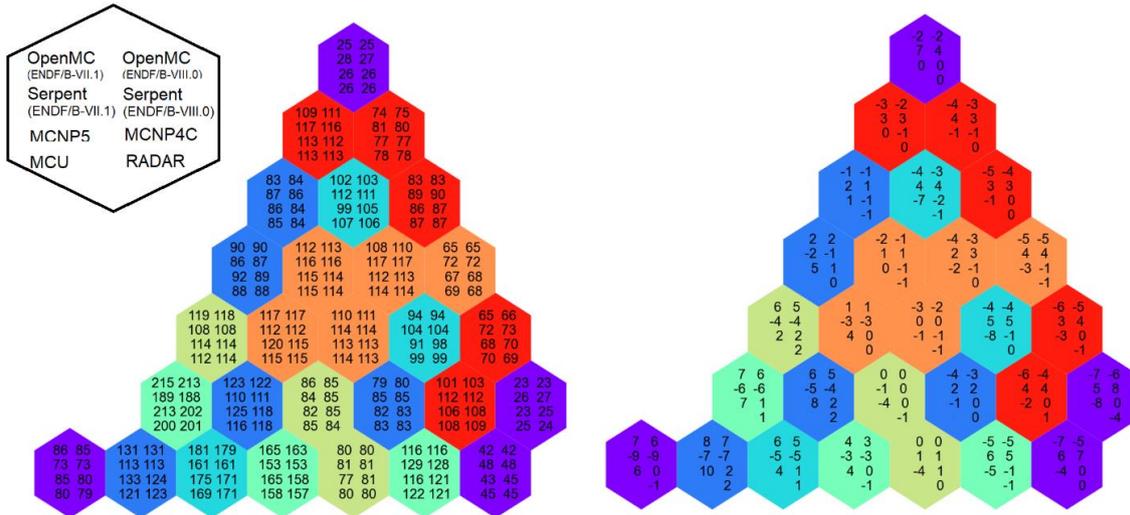


Рисунок 7. Средние значения скоростей реакции деления ($\times 100$) в тепловыделяющих сборках для разных прецизионных кодов и относительные отклонения в процентах от значений, полученных по MCU, для третьего расчетного состояния из таблицы 1 (холодное состояние с бором)

Figure 7. Average fission reaction rates ($\times 100$) in fuel assemblies for different high-precision codes and relative deviations (in %) from MCU values for the third reactor state in Table 1 (cold state with boron)

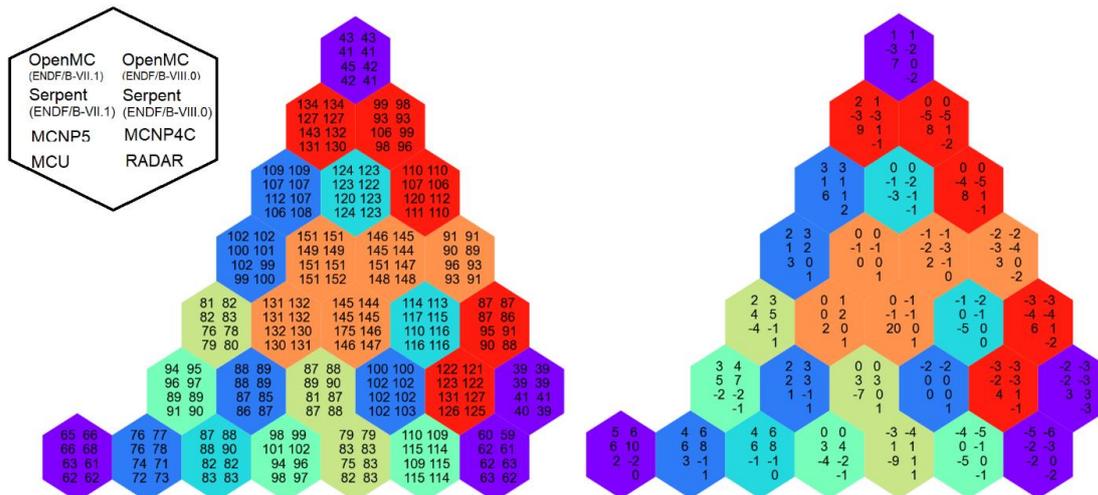


Рисунок 8. Средние значения скоростей реакции деления ($\times 100$) в тепловыделяющих сборках для разных прецизионных кодов и относительные отклонения в процентах от значений, полученных по MCU, для четвертого расчетного состояния из таблицы 1 (рабочее состояние без бора)

Figure 8. Average fission reaction rates ($\times 100$) in fuel assemblies for different high-precision codes and relative deviations (in %) from MCU values for the fourth reactor state in Table 1 (operating state without boron)

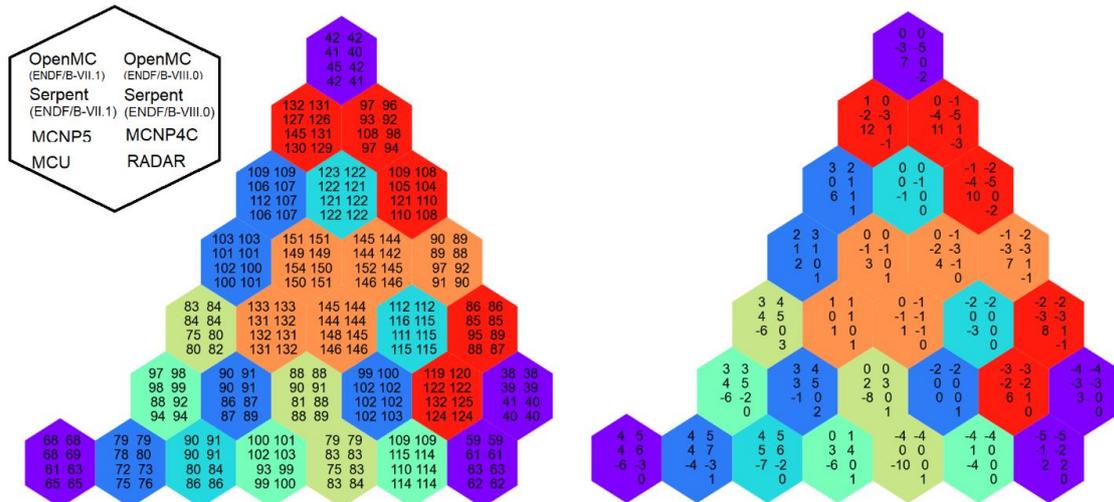


Рисунок 9. Средние значения скоростей реакции деления ($\times 100$) в тепловыделяющих сборках для разных прецизионных кодов и относительные отклонения в процентах от значений, полученных по MCU, для пятого расчетного состояния из таблицы 1 (состояние без бора с постоянной температурой)

Figure 9. Average fission reaction rates ($\times 100$) in fuel assemblies for different high-precision codes and relative deviations (in %) from MCU values for the fifth reactor state in Table 1 (constant temperature state without boron)

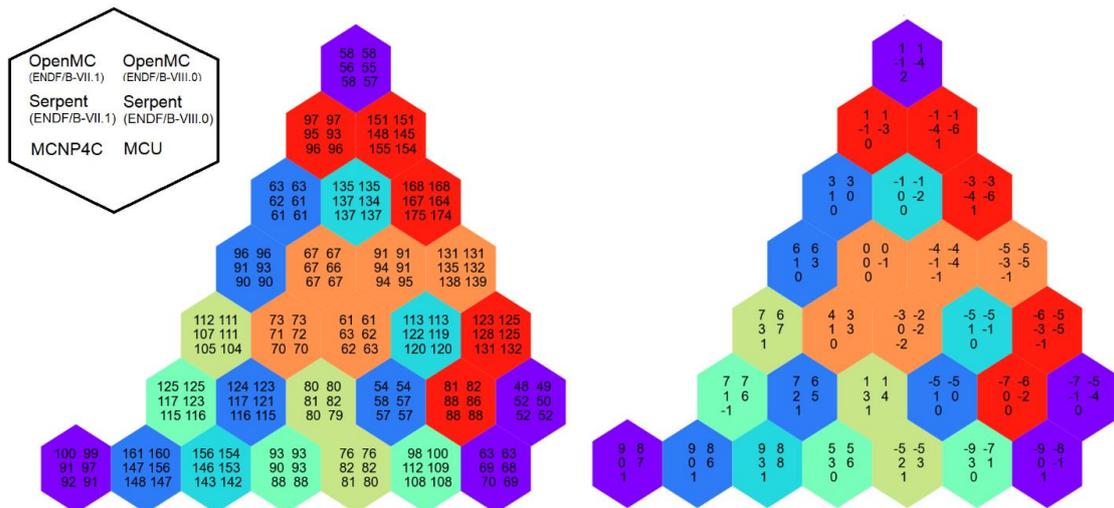


Рисунок 10. Средние значения скоростей реакции деления ($\times 100$) в тепловыделяющих сборках для разных прецизионных кодов и относительные отклонения в процентах от значений, полученных по MCU, для шестого расчетного состояния из таблицы 1 (состояние с введенными стержнями аварийной защиты).

Figure 10. Average fission reaction rates ($\times 100$) in fuel assemblies for different high-precision codes and relative deviations (in %) from MCU values for the sixth reactor state in Table 1 (state with inserted control rods)

Анализируя представленные данные по эффективным коэффициентам размножения и скоростям деления в ТВС можно сделать следующий вывод: результаты расчетов, полученные с применением кодов *OpenMC* и *Serpent*, показывают хорошее согласие с результатами расчетов, полученных по кодам *MCU*, *MCNP* и *RADAR*.

Выводы

Целью данной работы является проверка качества разработанной в коде *OpenMC* модели активной зоны, выгородки и корпуса для реактора ВВЭР-1000. Для этого был проведен расчет бенчмарк-теста по *OpenMC* и дополнительная кросс-верификация полученных результатов с помощью расчетной модели, построенной по *Serpent*. Данные о нейтронных сечениях были получены с помощью баз оцененных ядерных данных

ENDF/B-VII.1 и *ENDF/B-VIII*. В результате проведенных расчетов были получены значения эффективного коэффициента размножения и скоростей реакции деления в ТВС для стационарных состояний ВВЭР-1000,

приведенных в бенчмарк-тесте. Полученные по *OpenMC* результаты показывают, что разработанная модель активной зоны корректна и может быть использована для дальнейших работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Kalugin M.A., Oleinik D.S., Shkarovsky D.A. Overview of the MCU Monte Carlo Software Package. *Annals of nuclear energy*. 2015;82:54–62. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.032>
2. Briesmeister J.F. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C. Los Alamos National Laboratory, 2000. Technical Report LA-13709-M. Available at: https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/TechReport_2000_LANL_LA-13709-M_Briesmeisterothers.pdf (accessed: 03.02.2025).
3. Romano P.K., Horelik N.E., Herman B.R., Nelson A.G., Forget B., Smith A.* OpenMC: A state-of-the-art Monte Carlo code for research and development. *Annals of Nuclear Energy*. 2015;82:90–97. <https://doi.org/10.1051/SNAMC/201406016>
4. Gomin E., Kalugin M., Oleynik D. VVER-1000 MOX Core Computational Benchmark: Specification and Results, NEA/NSC/DOC(2005)17. OECD, 2006. https://doi.org/10.1787/oecd_papers-v6-art12-en
5. Leppänen J. Serpent – A Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. *VTT Technical Research Centre of Finland*, 2015. Available at: https://serpent.vtt.fi/download/Serpent_manual.pdf (accessed: 07.02.2025).
6. Танаш Х.А., Соловьёв Д.А., Щукин Н.В., Зимин В.Г., Лобарев А.Л., Плотников Д.А. Выбор алгоритма выгорания в OpenMC на примере расчетного бенчмарка сборки LEU и MOX-топлива ВВЭР-1000. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;1(46):79–91. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-07>
7. Şentürk Lüle S., Özdemir L., Erdoğan A. Application of CNUREAS and MCNP5 codes to VVER-1000 MOX Core Computational Benchmark. *Progress in Nuclear Energy*. 2015;85:454–461. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.07.007>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Плотников Д.А. – создание расчетной модели и проведение расчетов в OpenMC;
Романенко В.И. – создание расчетной модели и проведение расчетов в Serpent
Соловьёв Д.А. – создание расчетной модели и проведение расчетов в OpenMC;
Зимин В.Г. – постановка задачи и анализ литературных источников;
Молев И.А. – обработка результатов расчетов;
Кудратов В.Н. – обработка результатов расчетов;
Ивахин С.В. – подготовка исходных данных;
Джарум Б. – подготовка текста статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Денис Алексеевич Плотников, аспирант НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0001-9387-170X>
 e-mail: pda1995@gmail.com

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Plotnikov D.A. – creation of a calculation model and OpenMC calculation;
Romanenko V.I. – creation of a calculation model and Serpent calculation;
Solovyev D.A. – creation of a calculation model and OpenMC calculation;
Zimin V.G. – statement of the problem and analysis of literary sources;
Molev I.A. – processing of calculation results;
Kudratov V.N. – processing of calculation results;
Ivaxin S.V. – preparation of input data;
Djaroum B. – preparation of the article text.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Denis A. Plotnikov, Postgraduate, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0001-9387-170X>
 e-mail: pda1995@gmail.com

Владислав Игоревич Романенко, инженер НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0002-8641-5885>

e-mail: romanenkovli@yandex.ru

Денис Алексеевич Соловьев, доцент НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-0507-0839>

e-mail: vulture@inbox.ru

Вячеслав Геннадьевич Зимин, доцент НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-0334-3741>

e-mail: vgzimin@mail.ru

Илья Александрович Молев, инженер НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-7247-3040>

e-mail: iamolev@gmail.com

Вохид Насриддин угли Кудратов, аспирант НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0006-4760-5877>

e-mail: vkudratov0727@gmail.com

Сергей Викторович Ивахин аспирант НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0003-0320-8950>

e-mail: sergey.ivakhin@gmail.com

Белади Джарум, аспирант НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-1862-8838>

e-mail: bel.djar111215@gmail.com

Vladislav I. Romanenko, Engineer, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-8641-5885>

e-mail: romanenkovli@yandex.ru

Denis A. Solovyev, Assistant Professor, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-0507-0839>

e-mail: vulture@inbox.ru

Vyacheslav G. Zimin, Assistant Professor, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-0334-3741>

e-mail: vgzimin@mail.ru

Ilya A. Molev, Engineer, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-7247-3040>

e-mail: iamolev@gmail.com

Voxid N. Kudratov, Postgraduate, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0006-4760-5877>

e-mail: vkudratov0727@gmail.com

Sergey V. Ivakhin, Postgraduate, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0003-0320-8950>

e-mail: sergey.ivakhin@gmail.com

Belaid Djaroum, Postgraduate, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-1862-8838>

e-mail: bel.djar111215@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 14.04.2025

После доработки / Revision 17.06.2025

Принята к публикации / Accepted 24.06.2025