

ОСВОЕНИЕ МОНТЕ-КАРЛО ПРОГРАММЫ OPENMC И РАСЧЕТ МЕЖДУНАРОДНОГО БЕНЧМАРКА WWER MOX

А. В. Николайчик

Белорусский государственный университет, г. Минск;

nikolaychik.nastenka@gmail.com;

науч. рук. – Р. Б. Богданович

В работе освоена Монте-Карло программа OpenMC, рассчитан международный бенчмарк WWER MOX, рассчитан тестовый пример моделирования эквивалентной ячейки. Получены результаты k_{eff} для прямоугольной ячейки, которые согласуются с результатами представленными на официальном сайте OpenMC. Полученные результаты согласуются с точностью до статистической ошибки. Получены результаты k_{inf} для шестиугольной ячейки международного бенчмарка WWER MOX. Проведен анализ полученных результатов расчета бесконечного коэффициента размножения для шестиугольной ячейки варианта V1 в трех состояниях (S1, S5, S6). Полученные результаты согласуются с результатами бенчмарка.

Ключевые слова: OpenMC; Монте-Карло; международный бенчмарк WWER MOX.

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование является важной составляющей современной науки.

Особую роль оно играет в ядерной энергетике. С помощью моделирования можно обосновывать безопасность объектов использования атомной энергии на всех стадиях жизненного цикла, можно моделировать ядерные установки. Одним из самых точных методов для моделирования ядерных реакторов является метод Монте-Карло. Сегодня в мире существуют десятки программ, основанных на данном методе, однако большинство из них распространяется за немалые деньги. Код OpenMC [1] является бесплатным и открыт для каждого, поэтому его легко можно использовать в БГУ для научных исследований. OpenMC является довольно популярным кодом, существует огромное количество публикаций с его использованием. Также актуальность работы заключается в том, что программу OpenMC можно использовать с целью расчета реактора, строящегося в Беларуси.

Целью моей работы является освоение Монте-Карло программы.

OpenMC и расчет международного бенчмарка WWER MOX [2], а также показать, что полученные результаты по моделированию реактора типа ВВЭР согласуются с результатами, полученными по другим программам.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЯЧЕЙКИ PIN-CELL

В работе создавалась модель Pin-Cell, которая эквивалентна моделированию бесконечного массива топливных элементов. Моделирование эквивалентной ячейки произведено с использованием среды программирования Jupyter Notebook, с целью освоения различных функций OpenMC, используя API Python.

В работе получены значения коэффициента размножения нейтронов для прямоугольной ячейки, которые согласуются с результатами представленными на официальном сайте OpenMC [3] (рассчитанное в работе $k\text{-effective} = 1.40396 \pm 0.00268$, представленное в тестовом примере $k\text{-effective} = 1.39719 \pm 0.00286$). Полученные результаты согласуются с точностью до статистической ошибки.

РАСЧЕТ МЕЖДУНАРОДНОГО БЕНЧМАРКА WWER MOX

В бенчмарке смоделированы восемь различных топливных композиций (вариантов топлива) V1-V4 и V7-V10, с конкретным набором условий эксплуатации реактора (состояний S1 - S6), представляющих штатные и нештатные ситуации, включая заданные значения температуры топлива, температуры и плотности замедлителя, концентрации продуктов деления, содержания борного поглотителя.

В реальных тепловыделяющих сборках реактора ВВЭР-1000 топливные элементы имеют центральное отверстие, а топливо расположено на шестигранном (треугольном) шаге в шестигранных тепловыделяющих сборках. В данной работе используется шестигранный шаг 1,275 см. Диаметр цилиндрической топливной области равен 0,772 см. Для простоты моделирования центральное отверстие в топливной таблетке не учитывается. Наружный диаметр оболочки равен 0,9164 см, при толщине оболочки 0,0772 см.

Для расчета бенчмарка разработана модель шестиугольной ячейки (рис. 1). Технические характеристики для свежего топлива и других материалов варианта V1 представлены в таблице 1. В работе использовался метод интерполяции температурной зависимости микросечений взаимодействия, чтобы получить более достоверные результаты. Проведено сравнение результатов с интерполяцией и без интерполяции. В таблице 2 и на рисунке 2 представлены полученные результаты в сравнении с результатами, полученными по другим программам. Вариант V1 рассчитан в трех состояниях: S1 (при температуре топлива 1027 К с учетом ^{135}Xe и ^{149}Sm , температуры других материалов 579 К), S5 (температура всех материалов 579 К), S6 (температура всех материалов 300 К).

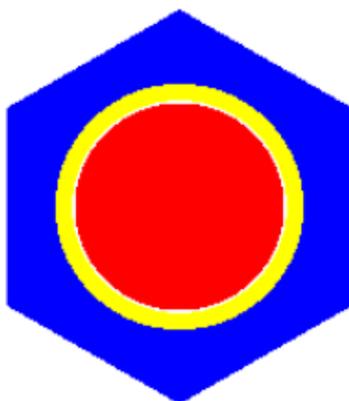


Рис. 1. Модель эквивалентной ячейки Pin-Cell

Табл. 1

Технические характеристики для свежего топлива и других материалов варианта V1

| Материал | Комментарий | Нуклид | Концентрация (а/б-см) | Высота ячейки(см) |
|----------|--|---|---|-------------------|
| FU1 | Свежее урановое топливо с добавлением поглотителей | ^{235}U ^{238}U ^{16}O ^{135}Xe ^{149}Sm | 8.7370×10^{-4} 1.8744×10^{-2} 3.9235×10^{-2} 9.4581×10^{-9} 7.3667×10^{-8} | 275.643 |
| CL1 | Оболочка | Zr | 4.2300×10^{-2} | — |
| MOD1 | Горячий замедлитель с борной кислотой | H ^{16}O ^{10}B ^{11}B | 4.783×10^{-2} 2.391×10^{-2} 4.7344×10^{-6} 1.9177×10^{-5} | — |

Табл. 2

Сравнение полученных результатов для шестиугольной эквивалентной ячейки с результатами, полученными по другим программам

| | | S1 | | S5 | | S6 | |
|-------|--------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| | | k_{inf} | | k_{inf} | | k_{inf} | |
| V1 | SAS2H | 1.2589 | | 1.3245 | | 1.3669 | |
| | HELIOS | 1.2750 | | 1.3393 | | 1.3754 | |
| | MCU | 1.2743 | | 1.3382 | | 1.3739 | |
| | OpenMC | без интер-поляции | с интер-поляцией | без интер-поляции | с интер-поляцией | без интер-поляции | с интер-поляцией |
| 1.276 | | 1.276 | 1.341 | 1.342 | 1.359 | 1.359 | |

Чтобы добиться желаемой точности, был проведен прикидочный расчет с небольшим числом нейтронных историй. Далее используя формулу для зависимости статистической погрешности от числа историй, было рассчитано число историй, необходимое для достижения

точности 0,0004 в значении коэффициента размножения. Время расчета одного состояния модели составило 22 минуты.

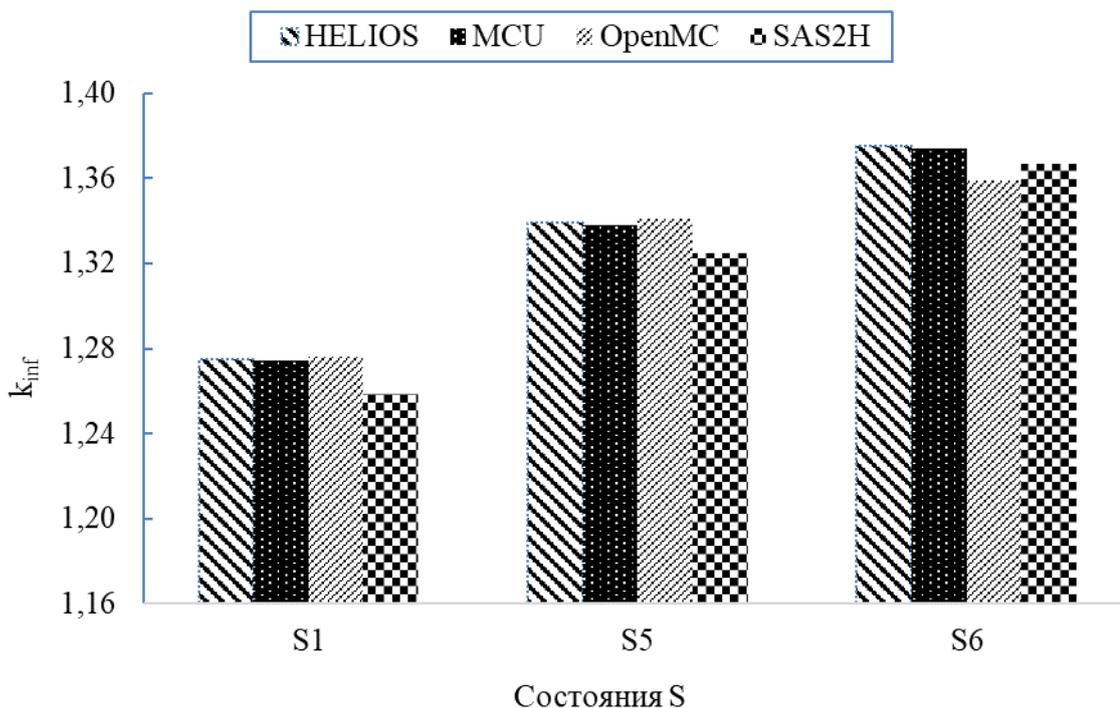


Рис. 2. Сравнение результатов k_{inf} для различных программ варианта V1

Анализируя полученные результаты расчета бесконечного коэффициента размножения нейтронов для шестиугольной ячейки, можно сделать вывод, что результаты варианта V1 согласуются с результатами бенчмарка, с точностью до 1 % (значение OpenMC $k_{inf} = 1,359$, среднее значение других программ $k_{inf} = 1,372$). Небольшое отклонение полученных результатов может быть обусловлена различием в библиотеках сечений, использованных при расчете бенчмарка и OpenMC.

Библиографические ссылки

1. Интернет-адрес: <https://docs.openmc.org/en/stable/index.html>.
2. Ellis R. J. Analyses of Weapons-Grade MOX VVER-1000 Neutronics Benchmarks: Pin-Cell Calculations with SCALE/SAS2H // 2000. P. 42.
3. Интернет-адрес: <https://docs.openmc.org/en/stable/examples/pincell.html>.