

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МОДЕЛИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ТИПА ВВЭР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

С. А. Бобров¹⁾, А. Л. Лобарев¹⁾

¹⁾ Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь, sergeybobrov745@gmail.com

В статье рассматриваются принципы нейтронно-физического расчета реакторных установок типа ВВЭР с использованием метода Монте-Карло. Приведено описание реакторной установки, метода расчета и его реализации в коде OpenMC. Выполнено моделирование активной зоны реактора отдельных тепловыделяющих сборок. Получены коэффициенты размножения нейтронов, а также зависимости коэффициента размножения от времени. При развивающихся компьютерных технологиях, использование таких программ, как OpenMC, во многом упрощают и удешевляют разработку и модернизацию реакторных установок.

Ключевые слова: OpenMC; эффективный коэффициент размножения; кампания; ВВЭР; метод Монте-Карло; тепловыделяющая сборка; тепловыделяющий элемент.

NEUTRON-PHYSICAL CALCULATION OF THE CORE MODEL OF A VVER REACTOR PLANT USING THE MONTE CARLO METHOD

S. A. Bobrov¹⁾, A. L. Lobarev¹⁾

¹⁾ International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Dolgobrodskaya str., 23/1, 220070, Minsk, Belarus, sergeybobrov745@gmail.com

The article deals with the principles of neutron-physical calculation of VVER reactor plants using Monte Carlo method. The description of reactor plant, calculation method and its implementation in OpenMC code are given. Modelling of the reactor core is performed. Neutron multiplication factors and time dependences of the multiplication factor are obtained. With developing computer technologies, the use of such programs as OpenMC simplifies and reduces the cost of development and modernization of reactor plants.

Keywords: OpenMC; effective multiplication factor; campaign; VVER; Monte Carlo method; fuel assembly; fuel element.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2025-1-14-18>

Современные реакторные технологии требуют точного нейтронно-физического моделирования, обеспечивающего безопасность и эффективность работы ядерных энергетических установок. В данной работе используется метод Монте-Карло для моделирования активной зоны реактора ВВЭР-1200 с применением программного кода OpenMC. Основной целью исследования является определение эффективного коэффициента размножения нейтронов и изменение эффективного коэффициента размножения в кампании реактора.

ВВЭР-1200 – это водо-водяной энергетический реактор нового поколения с повышенной безопасностью и энергетической мощностью ~1200 МВт. Использует воду как замедлитель и теплоноситель, оснащен пассивными и активными системами безопасности. Обладает увеличенным сроком службы (до 60 лет) и повышенной экономичностью за счет сниженной себестоимости выработки энергии благодаря более эффективному использованию топлива. Соответствует современным международным стандартам ядерной безопасности [1], что требует

точных расчетов и моделирования сложных физических процессов. Одним из эффективных подходов к такому моделированию является метод Монте-Карло, который широко применяется для анализа поведения нейтронов в реакторах.

Метод Монте-Карло подходит для моделирования полёта частиц, например нейтронов в реакторах. Метод основан на получении большого числа реализаций стохастического (случайного, вероятностного) процесса, который формируется таким образом, чтобы его вероятностные характеристики совпадали с аналогичными величинами решаемой задачи [2]. Развитие компьютерных технологий и повышение их мощностей, дают возможность использовать метод Монте-Карло в различных программах, одна из таких – программный код OpenMC.

OpenMC – это открытый код Монте-Карло для переноса нейтронов и фотонов. OpenMC реализует метод Монте-Карло путем статистического моделирования траекторий нейтронов на основе вероятностных законов взаимодействия с веществом. Используются случайные числа для определения параметров столкновений, рассеяния, поглощения и деления, что позволяет получать точные нейтронно-физические характеристики системы [3]. OpenMC способен выполнять расчеты с фиксированным источником, k - собственными значениями и подкритическим умножением на моделях, построенных с использованием конструктивной геометрии твердого тела или CAD-представления [4].

Основываясь на конструкции, конструкционные материалы и топливо, соответствующие или близкие параметрам реакторной установки ВВЭР-1000/1200, были спроектированы: модель активной зоны и модели ТВС. Проектирование и расчеты проводились с использованием кода OpenMC.

Для определения эффективного коэффициента размножения (k_{eff}) была построена модель элементарной ячейки активной зоны, представленная на рисунке 1. Модель представляет собой кассетную структуру, состоящую из 7 ТВС.

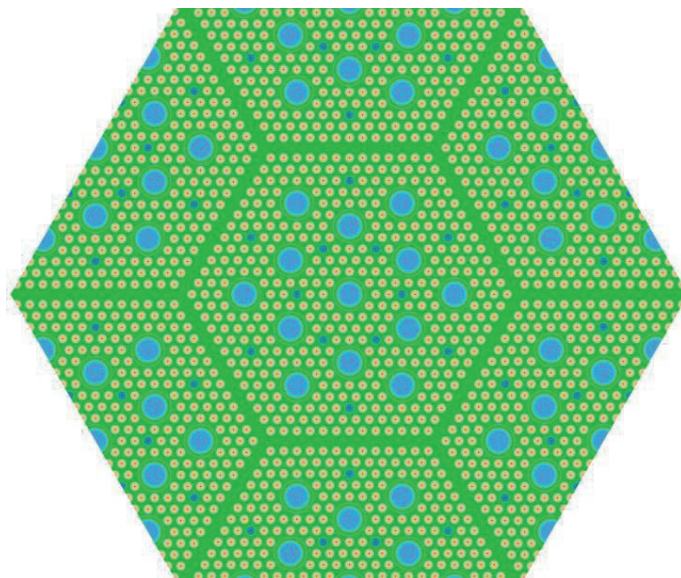


Рис. 1. Модель элементарной ячейки активной зоны

На рисунке 2 представлены изображения одной ТВС. Все ТВС одинаковы по конструкции и материалам и содержат:

- 368 ТВЭЛов со свежим топливом (обогащение U-235 3 %)
- 12 ТВЭГов (ТВЭЛы с гадолиниевым выгорающим поглотителем)
- 13 направляющих стрижней, заполненных карбидом бора (B_4C)

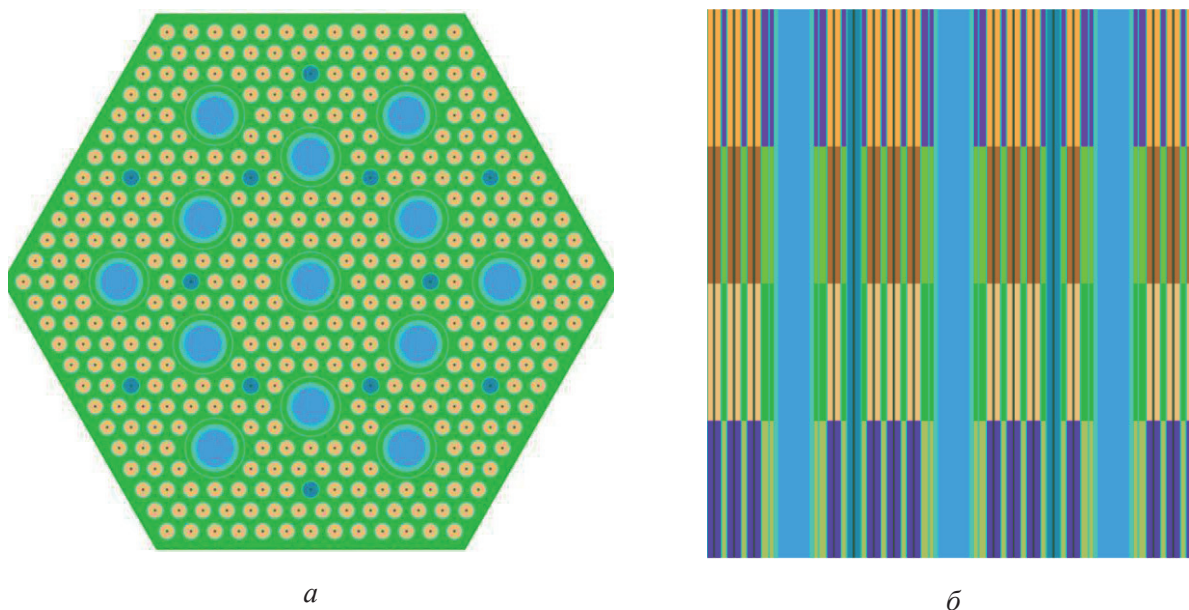


Рис. 2. Модель ТВС активной зоны:
a – поперечное сечение; *б* – продольное сечение

При расчетах вводилось допущение о том, что проектируемые 7 ТВС собираются в единое целое и принимаются за одну элементарную ячейку активной зоны, т.е. в данной структуре из 7 ТВС будут воспроизводиться условия, которые, предположительно, будут действовать во всей активной зоне. Результаты представлены в таблице ниже.

**Результаты определения эффективного коэффициента размножения
для построенной модели активной зоны**

k_{eff} (на основе метода столкновений)	0,81666±0,00031
k_{eff} (на основе оценки треков)	0,81665±0,00032
k_{eff} (на основе поглощения нейтронов)	0,81618±0,00036
k_{eff} (общее)	0,81646±0,00023
Утечка нейтронов	0,00000±0,00000

Анализ полученных данных показывает, что спроектированная модель находится в подкритическом состоянии, т.к. $k_{eff} < 1$. Цепная реакция затухает, что характерно при наличии поглотителя (карбида бора) в направляющих каналах. Утечка нейтронов отсутствует и не влияет на k_{eff} , из этого следует, что была выбрана точная геометрия и граничные условия.

Также были спроектированы: модель ТВС 1 и модель ТВС 2, представленные на рисунке 3, для определения изменений эффективного коэффициента размножения кампании.

Модель ТВС 1 состоит из:

- 312 ТВЭЛов с урановым топливом обогащением 3,3 %
- 19 направляющих стержней с теплоносителем в виде борной воды.

Модель ТВС 2 состоит из:

- 300 ТВЭЛов с урановым топливом обогащением 3,3 %
- 12 ТВЭГов с гадолиниевым выгорающим поглотителем
- 19 направляющих стержней с теплоносителем в виде борной воды.

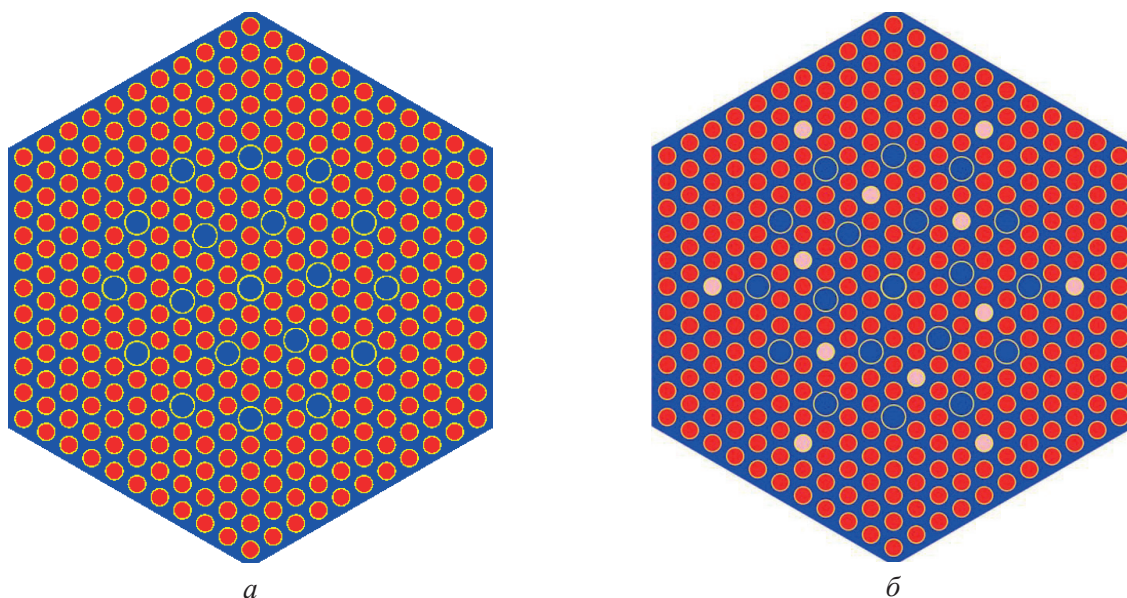


Рис. 3. Результаты визуализации моделей ТВС:
a – Модель ТВС 1; *б* – Модель ТВС 2

При расчетах OpenMC учитывает образующиеся вторичные элементы: Хе, Sm, Pu и др. и эти элементы заранее были прописаны при создании материалов [5]. Для расчета, значение энерговыделения было принято за $q_v = 108 \text{ Вт/см}^3$. Результаты представлены на рисунках 4-5, в виде графика зависимости k_{eff} от времени (t , сутки).

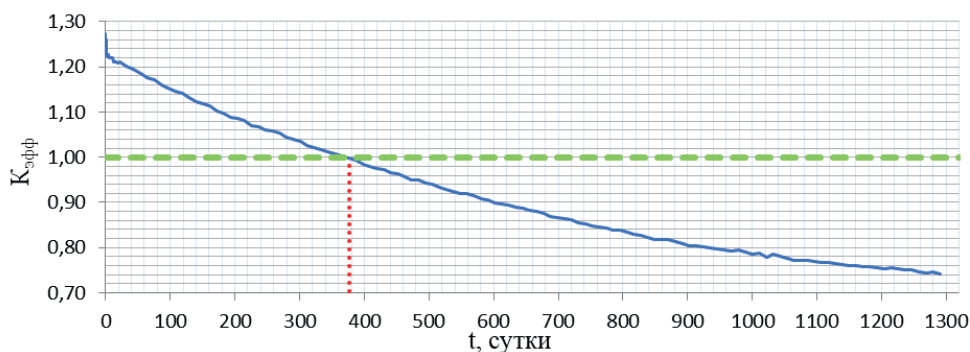


Рис. 4. График зависимости эффективного коэффициента размножения от времени для модели ТВС 1

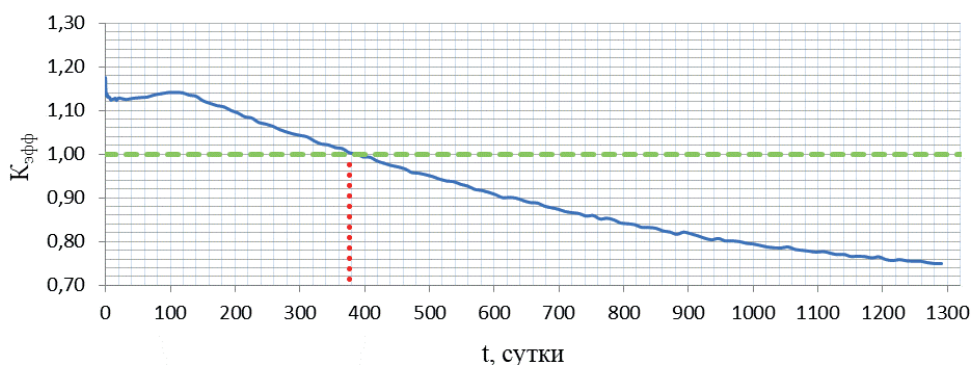


Рис. 5. График зависимости эффективного коэффициента размножения от времени для модели ТВС 2

Проанализировав результаты, можно сделать вывод, что время кампании для двух построенных моделей можно считать – 397 эффективных суток, что характеризуется выходом в подкритическое состояние. В реальности же реакторы не будут постоянно работать на максимальной мощности, следовательно – время кампании будет длиннее. Время расчета составило 1290 эффективных суток или 3,5 года. Использование выгорающего гадолиниевого поглотителя даёт возможность снизить реактивность в начале кампании, тем самым помогает уменьшить вмешательство оператора в поддержании реактивности на необходимом уровне.

Проведенное исследование подтвердило потенциал OpenMC как мощного инструмента для проектирования и анализа реакторных установок, возможности создания сложных систем и большой функционал расчетов. OpenMC предоставляет исследователям уникальные возможности для дальнейшего совершенствования разного рода реакторных установок. OpenMC сочетает высокую точность вычислений, возможность работы с детализированными геометриями и доступность для исследователей по всему миру. Это делает его незаменимым инструментом для анализа ядерных реакторов, проектирования активных зон и улучшения характеристик современных энергетических систем. Его использование способствует развитию ядерной науки и внедрению передовых технологий в энергетике.

Библиографические ссылки

1. *Смолов, В. Г.* Головной блок нового поколения – особенности проекта ВВЭР-1200 / В. Г. Асмолов [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2017. № 3.
2. *Панин, М. П.* Моделирование переноса излучения: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2008. С. 65-67.
3. Руководство пользователя [Электронный ресурс] // OpenMC Documentation. URL: <https://docs.openmc.org/en/stable/> – (дата обращения: 20.02.2025).
4. *Paul K. Romano, Nicholas E. Horelik, Bryan R. Herman, Adam G. Nelson, Benoit Forget, and Kord Smith* // OpenMC: A State-of-the-Art Monte Carlo Code for Research and Development // Ann. Nucl. Energy, 2015. P. 90-97.
5. *Paul K. Romano and Benoit Forget* // The OpenMC Monte Carlo Particle Transport Code // Ann. Nucl. Energy, 2013. P. 274–281.