

# ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ И МАКРОСКОПИЧЕСКИХ СЕЧЕНИЙ ДЛЯ ТВС И ОТРАЖАТЕЛЯ РЕАКТОРА ВВЭР-1200

**А. В. Николайчик**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
nikolaychik.nastenka@gmail.com;  
науч. рук. – С. А. Кутень, ст. преп.*

В работе изучены подходы к расчетам макроскопических сечений и коэффициентов диффузии для одной ТВС в Монте-Карло коде Serpent, подготовлен входной файл и рассчитаны макроскопические сечения и коэффициенты диффузии для одной ТВС реактора ВВЭР-1200 с помощью кода Serpent, создан инструмент для чтения и обработки выходных файлов кода Serpent и создания набора библиотек макроскопических сечений в формульном формате для реакторного кода DYN3D для указанных в данной работе параметров. Проведена процедура параметризации (фитирования) сечений по параметрам активной зоны, найденные коэффициенты параметризации записаны в требуемом формате для wqs-файла библиотеки. Подготовлено 8 библиотек сечений (\_wqs.dat) для кода DYN3D с использованием разных методов расчетов макроскопических сечений и коэффициентов диффузии. Проведено тестирование созданных файлов сечений.

**Ключевые слова:** макроскопические сечения; коэффициент диффузии; малогрупповые библиотеки сечений; Монте-Карло; Serpent; DYN3D.

## ВВЕДЕНИЕ

Компьютерное моделирование является одним из самых эффективных методов изучения сложных систем. Технические системы, которые существуют в современном мире уже невозможно исследовать обычными теоретическими методами. Особую роль компьютерное моделирование играет в ядерной энергетике, в частности для АЭС. Объекты энергетике нуждаются в управлении, которое подразумевает постоянное наблюдение в процессе эксплуатации за интенсивными и динамичными процессами преобразования энергии и движения рабочих сред. Это связано с необходимостью исследования допустимости различных режимов работы, оценки и прогнозирования технического состояния и т.п., что целесообразно выполнять с помощью специализированных программных средств. Одним из самых точных методов для моделирования нейтронно-физических процессов, происходящих в активной зоне ядерных реакторов является метод Монте-Карло.

Целью работы является подготовка входного файла в Монте-Карло коде Serpent и создание, с помощью ПС Wolfram Mathematica, средства для автоматического чтения и обработки выходных файлов для рассматриваемой задачи и селекции необходимых физических величин в зависимости от нейтронно-физических параметров и последующей параметризации макроскопических сечений и коэффициентов диффузии для подготовки библиотеки в формульном формате для реакторного диффузионного кода DYN3D.

## ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

В таблице 1 представлены методы расчета макроскопических сечений и коэффициентов диффузии [1]:

- $B_1$ : поиск геометрического параметра для расчета коэффициентов диффузии и критического спектра.
- $P_1$ : аналогично  $B_1$ , но без одного коэффициента, зависящего от геометрического параметра.

Дополнительные методы расчета коэффициентов диффузии:

- TRC: способ расчета более точных коэффициентов диффузии с использованием транспортных поправочных коэффициентов.
- СММ: метод кумулятивной миграции, общий способ расчета коэффициентов диффузии внутреннего рассеяния в бесконечной геометрии.

Таблица 1

Методы расчета макроскопических сечений и коэффициентов диффузии

	$B_1$	$P_1$	СММ	TRC
Сечения	+	+	<del>+</del>	<del>+</del>
Коэффициенты диффузии	+	+	+	+

## ПОДГОТОВКА ФАЙЛОВ В КОДЕ SERPENT

В работе используется спектральный Монте-Карло код Serpent. Подготовлен входной файл для модели одной ТВС с учетом возможного наличия поглощающих стержней в направляющих каналах с заданием команд для проведения расчета малоэнергетических сечений и коэффициентов диффузии всеми доступными методами ( $B_1$ ,  $P_1$ , СММ, TRC). Заданы параметры (табл. 2), при которых проведены расчеты характеристик ТВС (температура топлива  $T_{fuel}$ , температура  $T_{mod}$  и плотность  $Den_{mod}$  теплоносителя, концентрация борной кислоты  $C_b$  в теплоносителе, глубина выгорания).

## Значения параметров

$T_{fuel}$ , К	$T_{mod}$ , К	$C_b$ , gH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> /kgH <sub>2</sub> O	$Den_{mod}$ , g/cm <sup>3</sup>
300	300	0	581
586.25	350	1	651
900	400	4	699.180
1200	450	8	750
1500	500	10	800
1800	586.25	13	900
2300	623	16	950
-	-	-	1002

Вначале задается 33 значения по глубине выгорания. Далее перечисляется 7 значений по концентрации борной кислоты в теплоносителе, 7 значений по плотности теплоносителя, 6 значений по температуре топлива и 7 значений по температуре теплоносителя. Далее указывается 3 вида материалов, которые могут находиться в направляющих каналах: борированная вода (теплоноситель), карбид бора В<sub>4</sub>С или титанат диспрозия Dy<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>.

Задана картограмма (рис.) ТВС типа Z44B2 (тип=3, шаг=1.275 см). Z44B2 – это ТВС с обогащением по урану 4,4 % в твэлах и 12 твэгов с обогащением по урану 3,6 % и 5% по оксиду гадолиния.

Использованное обозначение на картограмме: 16 – топливная ячейка (твэл), 24 – топливная ячейка с гадолинием Gd (твэг), 42 – ячейка с направляющими каналами, в которых может находиться теплоноситель или поглотитель (В<sub>4</sub>С или Dy<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>), 44 – пустая ячейка.

Сначала производится расчет по выгоранию при средних параметрах активной зоны для расчета нуклидного состава топлива, затем - расчет зависимости сечений и коэффициентов диффузии от различных параметров для каждого значения глубины выгорания.

```

44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44
44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 44
44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 44
44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 16 16 24 16 16 16 24 16 16 16 24 16 16 44
44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 44
44 44 44 44 44 44 44 44 16 16 16 16 16 16 16 42 16 16 16 16 16 16 44
44 44 44 44 44 44 44 44 16 16 16 16 16 16 42 16 16 16 16 42 16 16 16 44
44 44 44 44 44 16 16 24 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 24 16 16 44
44 44 44 44 16 16 16 16 42 16 16 16 42 16 16 16 42 16 16 16 42 16 16 44
44 44 44 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 42 16 16 16 16 16 16 44
44 16 16 24 16 16 42 16 16 16 16 16 16 16 16 16 42 16 16 24 16 16 44
44 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 42 16 16 16 16 16 16 16 44 44
44 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 42 16 16 16 16 16 16 16 16 44 44 44
44 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 44 44 44 44 44
44 16 16 24 16 16 16 24 16 16 16 24 16 16 44 44 44 44 44 44 44 44 44
44 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44
44 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44
44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44 44

```

Картограмма ТВС типа Z44B2

## ПОДГОТОВКА БИБЛИОТЕК СЕЧЕНИЙ ДЛЯ КОДА DYN3D

Библиотека сечений для кода DYN3D создана в формульном формате, с использованием программы Wolfram Mathematica. Формульный формат описывает зависимость макроскопических сечений и коэффициентов диффузии от различных параметров (температура топлива, температура и плотность теплоносителя, концентрация борной кислоты в теплоносителе, глубина выгорания). Библиотека создается для одной ТВС, в которой в направляющих каналах может быть теплоноситель или поглощающие стержни. Она готовится для каждого из трех случаев: CRwater (для теплоносителя), CRb4c (для поглощающих стержней из В<sub>4</sub>С), CRdy (для поглощающих стержней из титаната диспрозия).

Фитирование проводится по следующим формулам:

для концентрации борной кислоты и плотности теплоносителя:

$$a(1 + a1(x - xRef) + a2(x + xRef)^2),$$

для температуры топлива:

$$a(1 + a1(-\sqrt{xRef} + \sqrt{x})),$$

для температуры теплоносителя:

$$a\left(1 + a1\left(-\frac{1}{xRef^{0.5}} + \frac{1}{x^{0.5}}\right)\right),$$

где  $a$ ,  $a1$ ,  $a2$  – коэффициенты фитирования,  $xRef$  – референсные значения.

Каждый коэффициент аппроксимируется по выгоранию:

$$C0 + C1 \cdot B + C2 \cdot (B)^2.$$

Для проверки правильности проведенного фитирования рассчитывается  $k_{eff}$  в коде DYN3D/Serpent и сравнивается со значением из Serpent при одинаковых значениях параметров. Для такой проверки в коде DYN3D реализован специализированный модуль CONSTANT FEEDBACK CALCULATION, в котором варьируются значения по температуре топлива, температуре и плотности теплоносителя, концентрации борной кислоты.

Выбор оптимальных режимов расчета коэффициентов диффузии и макроскопических сечений для ТВС проводился для значений расчетов

коэффициента критичности и распределения энерговыделения для активной зоны реактора ВВЭР-1000. Поскольку погрешности расчета значений для коэффициента критичности является довольно маленькой, то выбор параметров производился исходя из минимальных значений погрешностей расчета энерговыделения в ТВС. Наиболее лучшим режимом расчета является следующее сочетание: метод TRC для коэффициентов диффузии и метод P1 для остальных констант.

#### **Библиографические ссылки**

1. *Rintala A.* Diffusion coefficients and critical spectrum methods in Serpent // 8<sup>th</sup> International Serpent User Group Meeting. Espoo, Finland, May 30, 2018.