

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАСЧЕТНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ НА НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО РЕАКТОРА

Саляев А.В., Усынина С.Г., Калинина В.П.

АО «ОКБМ им. И.И. Африкантова»

603074, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15



Объектом исследования является призматическая топливная сборка высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) в виде графитового блока с проходками под топливные элементы, выгорающий поглотитель и гелиевый теплоноситель. По сравнению с концепцией насыпной активной зоны на базе шаровых топливных элементов призматическая сборка имеет более сложную структуру применительно к расчету нейтронно-физических характеристик.

Для исследования влияния расчетных приближений и способов моделирования призматического топливного блока (ТВС) ВТГР на точность расчета нейтронно-физических характеристик была разработана модель типичного топливного блока, включающего в себя топливные компакты (ТК), компакты выгорающего поглотителя (ВП) и проходки под теплоноситель. Рассчитывалось изменение характеристик в процессе облучения ТВС. Расчет выгорания выполнен на базе программного комплекса SCALE 6.2.4 с использованием расчетного модуля, реализующего метод Монте-Карло, с многогрупповой библиотекой сечений на базе файлов оцененных ядерных данных ENDF/B-VII.1 и модуля расчета выгорания ORIGEN, входящих в состав данного комплекса.

Рассмотренные различные способы моделирования топливных компактов и компактов выгорающего поглотителя с помощью встроенного в комплекс средства (тип ячейки DOUBLENET) и путем задания микрочастиц ВП в графитовой матрице показали согласие рассчитываемых характеристик с результатами, полученными путем прямого моделирования топливного блока ВТГР с использованием поточечной библиотеки сечений, в пределах 1–2%.

Проведена также серия расчетов для оценки влияния параметров расчетной статистики на результаты.

Ключевые слова: высокотемпературный газовый реактор, двойная гетерогенность, выгорание, стандартное отклонение, Монте-Карло, микротвэл, SCALE 6.2.4.

Для цитирования: *Салеев А.В., Усынина С.Г., Калинина В.П.* Оценка влияния расчетных приближений на нейтронно-физические характеристики тепловыделяющей сборки высокотемпературного газоохлаждаемого реактора. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 1. – С. 159–169. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.13>

ВВЕДЕНИЕ

Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы представляют собой перспективное направление в области ядерной энергетики ввиду внутренне присущих им свойств безопасности и возможности получения высокопотенциального тепла и (или) производства электроэнергии с высоким КПД. Ключевой особенностью современных ВТГР является использование специфического по сравнению с другими реакторами топлива на основе микротвэлов с многослойными термостойкими керамическими покрытиями, размещенных в шаровых твэлах или топливных компактах и графитовых блоках. Резонансная экранировка микросечений проявляется как на микротвэлах, так и на топливных элементах. В связи с этим необходимы специальные расчетные методики и программы, учитывающие эффекты двойной гетерогенности топлива ВТГР.

Наиболее точными программами для моделирования и расчета переноса излучений в сложных геометриях являются программы, основанные на методе Монте-Карло. Они позволяют снизить количество приближений в отношении как описываемой геометрии, так и моделей взаимодействия нейтронов с топливной и замедляющей композициями. В данной работе с использованием модели одиночной ТВС исследованы возможности программного комплекса SCALE 6.2.4 [1] в части влияния параметров расчетной статистики и способа описания гетерогенной структуры топливных компактов и компактов выгорающего поглотителя на нейтронно-физические характеристики ТВС в процессе выгорания.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДОЛОГИИ РАСЧЕТА

В соответствии с данными, приведенными в табл. 1, средствами построения геометрии SCALE была разработана детальная трехмерная расчетная модель ТВС. Сечение ТВС представлено на рис. 1.

Рассматривались следующие варианты задания микротвэлов и частиц выгорающего поглотителя в компактах:

- топливные компакты и компакты выгорающего поглотителя моделировались с использованием средства задания ячейки с двойной гетерогенностью (тип ячейки DOUBLEHET);
- топливные компакты моделировались с использованием ячейки DOUBLEHET, компакты выгорающего поглотителя – в явном виде частицами карбида бора в графитовой матрице;
- топливные компакты и компакты выгорающего поглотителя моделировались в явном виде частицами.

В первом варианте для работы программы в ячейке с карбидом бора требуется задание фиктивной концентрации делящегося вещества. В случае моделирования в явном виде частицы в графитовой матрице размещались по регулярной квадратной решетке

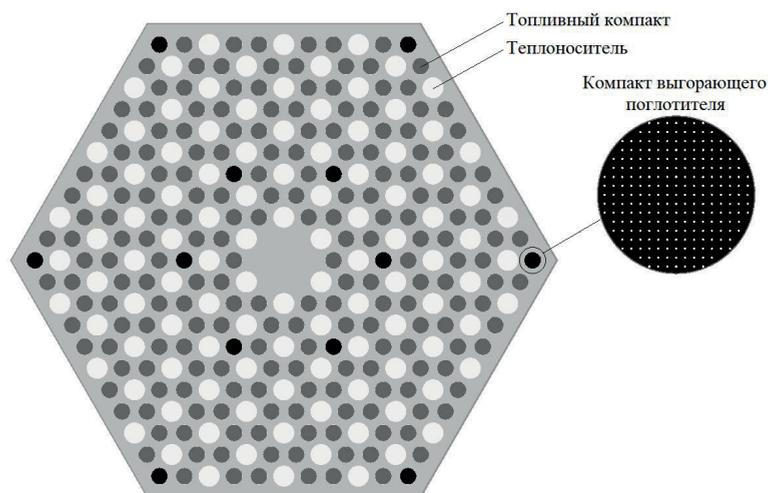


Рис. 1. Модель ТВС

Таблица 1

Основные характеристики расчетной модели [2]

Характеристика	Значение
Топливо	
– материал топливной композиции	UO ₂
– плотность, г/см ³	10,4
– обогащение по ²³⁵ U, % вес	15
Топливный блок	
– размер «под ключ», см	360
– высота, см	800
– шаг треугольной решетки расположения каналов, см	1,9
– диаметр отверстий под топливные компакты, см	1,3
– диаметр отверстий под теплоноситель, см	1,6
Топливные компакты	
– диаметр, см	1,3
– высота, см	5
– число топливных частиц на компакт	4884
Топливные частицы	
– радиус ядра, см	0,02
– толщина /плотность буферного слоя PuC, см / г/см ³	0,0095/1,0
– толщина/плотность внутреннего слоя PuC, см / г/см ³	0,004/1,9
– толщина/плотность слоя SiC, см / г/см ³	0,0035/3,2
– толщина/плотность наружного слоя PuC, см / г/см ³	0,004/1,8
Компакты с выгорающим поглотителем	
– диаметр, см	1,3
– высота, см	5
– число частиц В ₄ С на компакт	15618

(см. рис. 1). Исследования влияния случайного (неравномерного) распределения частиц в графитовой матрице приведены, например, в [3].

Дальнейшей задачей был выбор управляющих последовательностей и расчетных модулей программного комплекса SCALE 6.2.4. Рассчитывалась бесконечная решетка ТВС с зеркальным граничным условием. Методология расчета в общем виде заключалась в следующем.

1. Библиотека констант, в том числе одnogрупповых микросечений для расчета выгорания, готовилась с использованием управляющего модуля TRITON [4] в последовательностях T-DEPL-1D (простая многозонная ячейка – микротвэл) и T6-DEPL (призматический топливный блок). Последовательность T6-DEPL основывается на расчетном модуле KENO-VI, предназначенном для решения транспортной задачи методом Монте-Карло. Последовательности позволяют получить библиотеку констант для каждого материала на каждом шаге выгорания.

2. Спектр нейтронов в процессе выгорания рассчитывался с использованием 252-групповой библиотеки, включающей в себя нейтронные данные, основанные на файлах оцененных ядерных данных ENDF/B-VII.1 [5]. Отметим, что для ячеек с двойной гетерогенностью типа DOUBLEHET не может быть задана библиотека с поточечным (CE) представлением сечений.

3. Расчет блокировки микросечений проводился с использованием транспортного модуля CENTRM, рассчитывающего непрерывный по энергии (CE) спектр нейтронов, использующийся в качестве весовой функции (тип ячейки DOUBLEHET). При этом на правой границе ячейки микротвэла и ячейки твэла использовалось белое граничное условие.

4. Расчет выгорания проводился по модулю изотопной кинетики ORIGEN [6]. TRITON вызывает расчетный модуль ORIGEN для определения на каждом временном шаге изменения нуклидного состава материалов композиции на базе полученных пространственно-энергетического распределения плотности потока нейтронов, многогрупповых микросечений, концентраций и объемов материалов. ORIGEN выполняет нормировку, осуществляет свертку микросечений и проводит расчет выгорания, а также режима выдержки для определения новых концентраций нуклидов, используемых на следующем этапе расчета.

В третьем варианте, в котором топливные компакты и компакты выгорающего поглотителя моделировались в явном виде частицами в графитовой матрице, использовалась библиотека с поточечным (CE) представлением сечений `se_v7.1` комплекса SCALE 6.2.4.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для расчетов с использованием статистического метода Монте-Карло характерна зависимость точности рассчитываемых характеристик от количества разыгранных историй нейтронов. Путем вариации количества нейтронов в поколении (`gen`) и количества поколений (`npg`) была проведена серия расчетов для оценки влияния параметров статистики на точность расчета. Для оценки влияния параметров расчетной статистики на нейтронно-физические характеристики использовался первый вариант задания (тип ячеек DOUBLEHET). Полученные результаты приведены в табл. 2 и на рис. 2–4.

Из анализа представленной информации можно отметить прямое влияние количества нейтронов в поколении (`npg`) и количества поколений (`gen`) на точность расчета, а общего количества разыгрываемых историй нейтронов – на устойчивость статистики. В целом для расчета подобной композиции по комплексу SCALE можно рекомендовать задание

Таблица 2

Влияние параметров расчетной статистики на точность расчета нейтронно-физических характеристик

npg	gen	Количество разыгранных историй	K_{inf} на начало / конец облучения	Среднее по шагам выгорания значение стандартного отклонения (CO), %		
				K_{inf}	Количество делений	Количество поглощений
100	100	10000	0,803/1,051	0,586	0,555	0,271
100	250	25000	0,797/1,054	0,369	0,353	0,170
250	100	25000	0,794/1,055	0,374	0,358	0,174
100	500	50000	0,797/1,057	0,248	0,248	0,122
500	100	50000	0,796/1,061	0,268	0,245	0,123
250	200	50000	0,796/1,062	0,256	0,251	0,126
1000	200	200000	0,795/1,055	0,125	0,126	0,062
500	400	200000	0,796/1,053	0,122	0,125	0,062
200	1000	200000	0,796/1,053	0,118	0,125	0,061
1000	400	400000	0,795/1,054	0,088	0,087	0,043
2000	200	400000	0,794/1,055	0,092	0,090	0,044
1000	1000	1000000	0,795/1,055	0,055	0,056	0,027

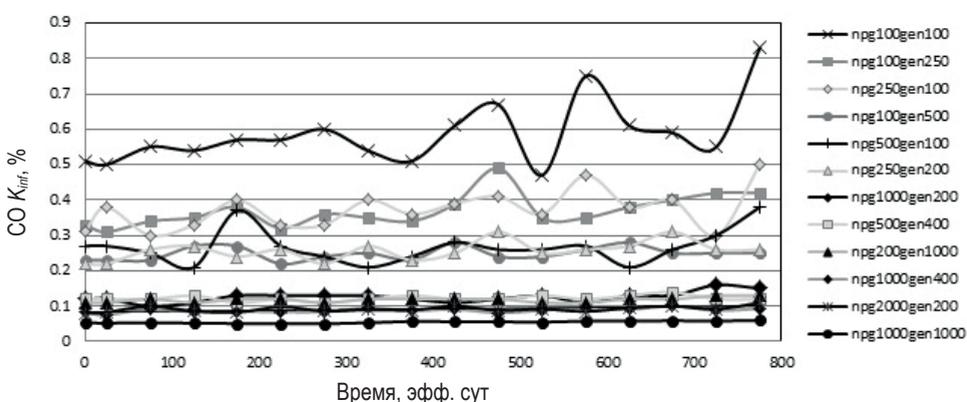


Рис. 2. Зависимость значения CO коэффициента размножения от времени облучения для различных параметров расчетной статистики

не менее 200000 историй, при этом количество частиц в поколении либо количество поколений должно быть не менее 250. В дальнейших расчетах использовались параметры 1000 частиц в поколении и 1000 поколений.

Результаты расчетов вариантов задания микротвэлов и частиц выгорающего поглотителя приведены в табл. 3 и на рис. 5–8. Время счета определялось при равных условиях – один и тот же расчетный сервер и количество расчетных узлов для всех задач. При этом использовалось распараллеливание по технологии MPI.

Полученные результаты подтверждают корректность работы встроенного средства комплекса SCALE – ячеек с двойной гетерогенностью типа DOUBLEHET и возможность его использования для расчета нейтронно-физических характеристик топлива ВТГР. Рас-

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

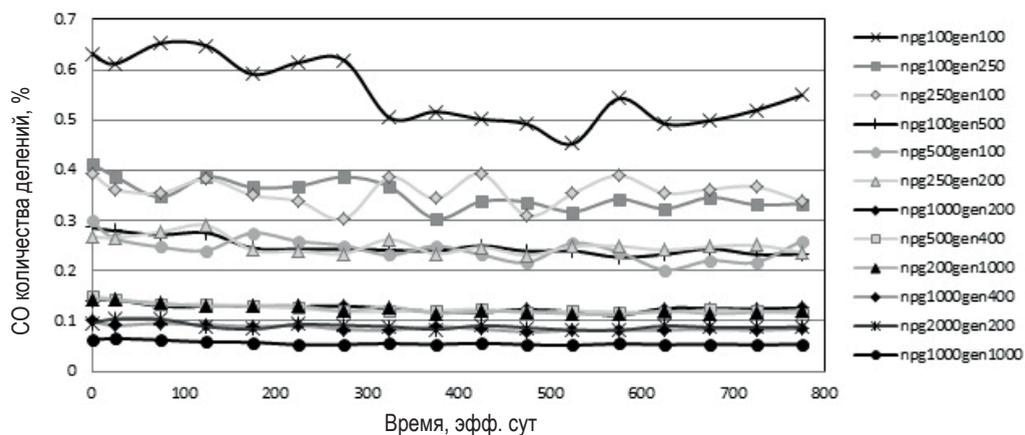


Рис. 3. Зависимость значения CO количества делений от времени облучения для различных параметров расчетной статистики

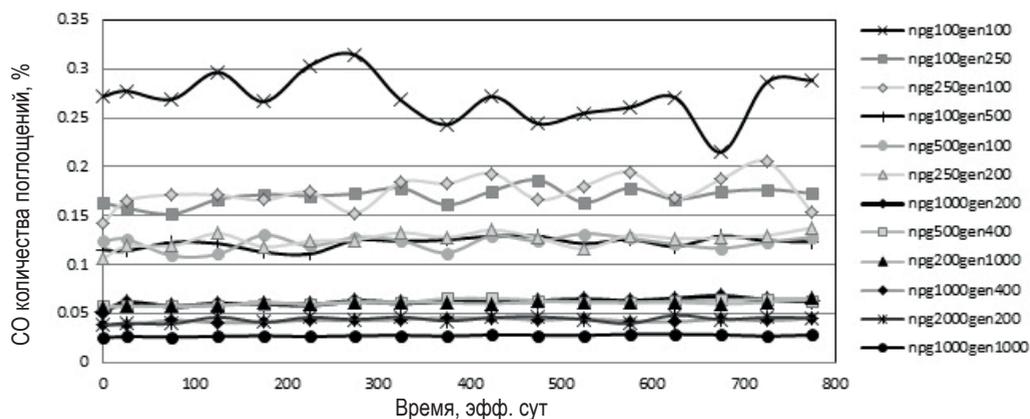


Рис. 4. Зависимости значения CO количества поглощений от времени облучения для различных параметров расчетной статистики

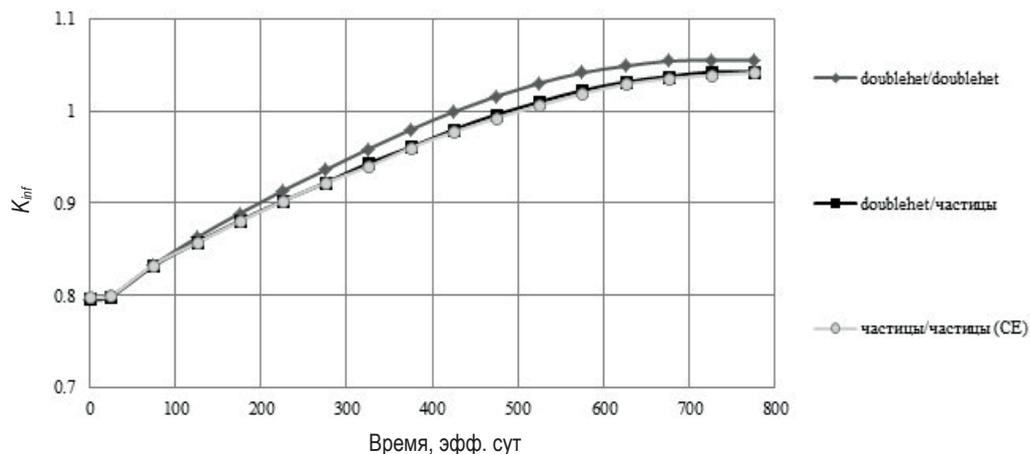


Рис. 5. Зависимость значения коэффициента размножения от времени облучения

Таблица 3

Влияние вариантов задания микротвзлов и частиц выгорающего поглотителя на результаты расчета

№ варианта		1	2	3
Вариант задания ТК/ВП		doublehet/doublehet	doublehet/ частицы	частицы/ частицы
Время счета, ч		3,8	3,4	38,5
Групповая структура		252	252	CE
K_{inf} на начало / конец облучения		0,795/1,055	0,797/1,042	0,799/1,041
Относительное отклонение K_{inf} от варианта № 3, %	Начало облучения	-0,4	-0,3	-
	Конец облучения	1,3	0,1	-
	Среднее по шагам облучения	1,4	0,1	-
Относительное отклонение содержания актинидов и продуктов деления на конец облучения от варианта № 3, %	²³⁵ U	-0,16	0,17	-
	²³⁹ Pu	-2,24	0,21	-
	²⁴⁰ Pu	-0,49	-0,22	-
	²⁴¹ Pu	-1,25	0,45	-
	²⁴¹ Am	-1,57	0,39	-
	²⁴⁴ Cm	-1,46	0,81	-
	⁸⁵ Kr	0,12	-0,06	-
	⁹⁰ Sr	0,15	-0,07	-
	¹³⁷ Cs	0,02	0,00	-
	¹³⁵ Xe	-1,07	0,29	-

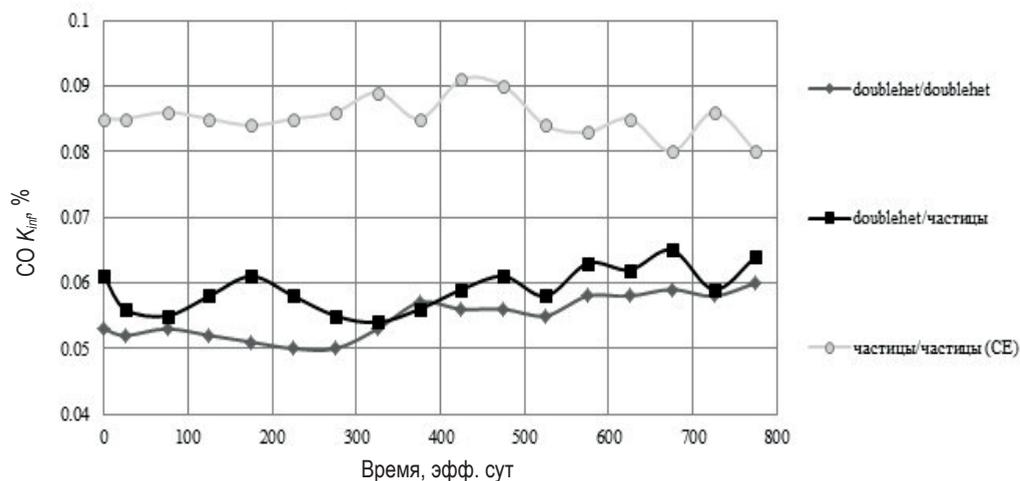


Рис. 6. Зависимость значения CO коэффициента размножения от времени облучения

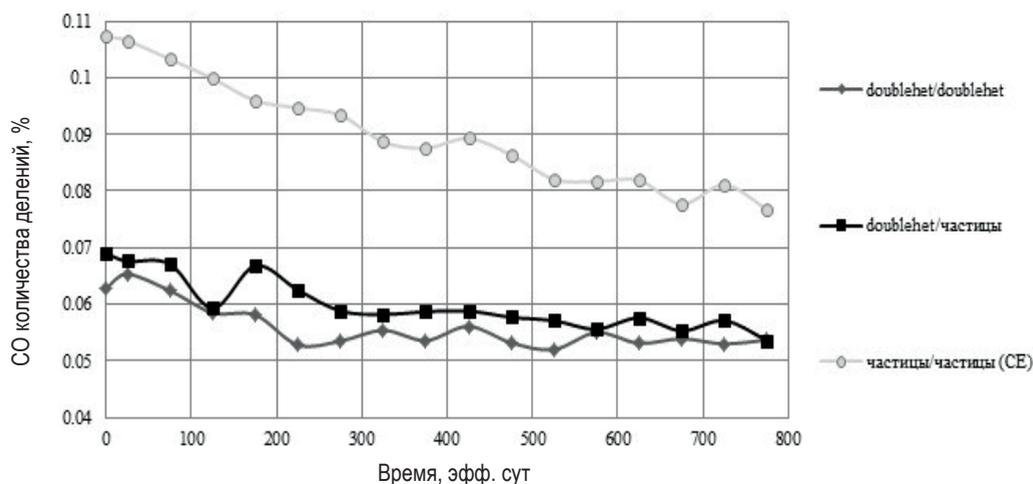


Рис. 7. Зависимость значения СО количества делений от времени облучения

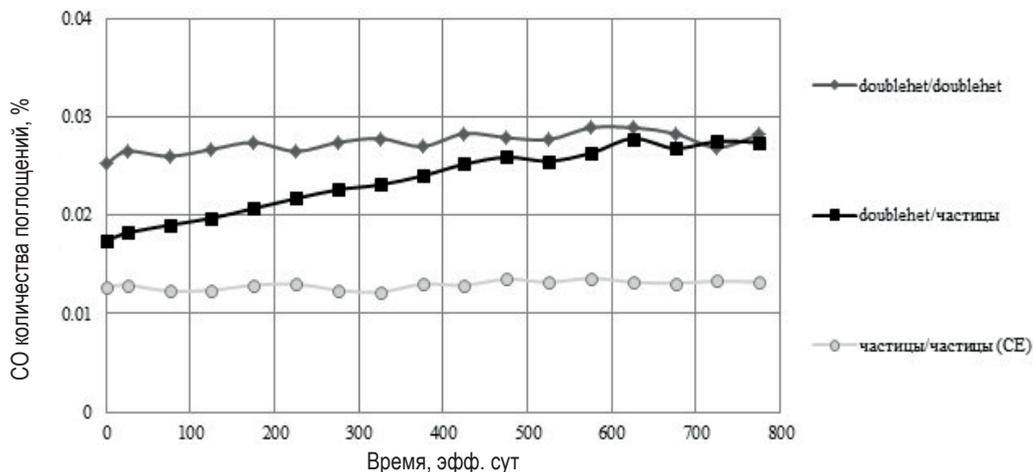


Рис. 8. Зависимость значения СО количества поглощений от времени облучения

четы показали также приемлемость моделирования компактов ВП как с помощью задания ячейки типа DOUBLENET, так и в явном виде частицами в графитовой матрице. В целом результаты расчетов по первым двум вариантам достаточно хорошо, в пределах 1–2%, согласуются с прямым расчетом с использованием поточечной библиотеки сечений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика и выполнены расчетные исследования влияния способов моделирования топливного блока ВТГР в программном комплексе SCALE 6.2.4 на его нейтронно-физические характеристики в процессе выгорания. Полученные значения при условии использования для топливных компактов ячеек DOUBLENET согласуются с результатами прямого моделирования топливного блока ВТГР с использованием поточечной библиотеки сечений в пределах 1–2%. Проведена также серия расчетов для оценки влияния параметров расчетной статистики на результаты. Для расчета подобной композиции по комплексу

SCALE можно рекомендовать задание не менее 200000 историй, при этом количество частиц в поколении либо количество поколений должно быть не менее 250.

Представленные результаты могут быть полезны пользователям программного комплекса SCALE 6.2.4 и других программ, реализующих метод Монте-Карло.

Литература

1. *Wieselquist W.A., Lefebvre R.A., Jessee M.A.* (Editors). SCALE Code System, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4, April 2020.
2. *Саляев А.В., Усынина С.Г.* Моделирование расчетного бенчмарка по облучению топливных элементов ВТГР. // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2022. – № 1. – С. 68–76. DOI: https://doi.org/10.46960/1816-210X_2022_1_68
3. *She D., Wei C., Liu Z., Liu S., Wang K.* HTGR Fuel Element Depletion Benchmark: Results for Infinite Fuel Pebble Lattice. / Transactions of the American Nuclear Society, January 2015.
4. *Jessee M.A., Wiarda D., Clarno K.T. et al.* TRITON, A Multipurpose Transport, Depletion, and Sensitivity and Uncertainty Analysis Module, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4, April 2020.
5. *Chadwick M.B., Herman M., Obložinský P., Dunn M.E. et al.* ENDF/B-VII.1: Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data. // Nuclear Data Sheets. – 2011. – Vol. 112. – Iss. 12. – PP. 2887–2996. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>
6. *Wieselquist W., Hart S., Isotalo A. et al.* ORIGEN: Neutron Activation, Actinide Transmutation, Fission Product Generation, and Radiation Source Term Calculation, SCALE Code System. ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4, April 2020.

Поступила в редакцию 23.08.2023

Авторы

Саляев Александр Васильевич, начальник бюро,

E-mail: salyaev@okbm.nnov.ru

Усынина Светлана Германовна, ведущий инженер, канд. техн. наук,

E-mail: usynina@okbm.nnov.ru

Калинина Валерия Павловна, инженер-конструктор,

E-mail: kalinina_vp@okbm.nnov.ru

UDC:621.039.513:621.039.52.034.3

Assessment of Design Approximation Impact on Neutronic Characteristics of a High-Temperature Gas-Cooled Reactor Fuel Assembly

Salyaev A.V., Usynina S.G., Kalinina V.P.

Afrikantov OKBM, Joint-Stock Company

15 Burnakovsky proyezd, 603074 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract

A comparative study has been conducted to find out how design approximations and simulation methods of a prismatic-type fuel block of a high-temperature gas-cooled reactor (HTGR) may affect the calculation accuracy of neutronic characteristics of fuel assemblies.

To study the impact, a detailed three-dimensional computational model of a typical fuel block including fuel compacts, burnable absorber compacts, and coolant passages was developed.

Changes in neutronic characteristics in the process of fuel assembly irradiation were calculated. The burnup was analyzed based on the SCALE 6.2.4 software package using a calculation module implementing the Monte Carlo method with a multigroup library of cross sections on the basis of ENDF/B-VII.1 files of assessed nuclear data and the ORIGEN burnup analysis module included in this package.

Different ways of modeling fuel compacts and burnable absorber compacts have been considered: using a built-in tool (DOUBLEHET cell type), by specifying microparticles in the graphite matrix, and their combination. The calculations were made using the 252-group library of constants except for the option in which fuel compacts and burnable absorber compacts were simulated explicitly by particles in the graphite matrix. In the latter case, a library with a pointwise (CE) representation of cross sections was used. A series of calculations were also made to assess the way computational statistic parameters affect the results.

The results confirm correct operation of the SCALE complex built-in tool, i.e. cells with the DOUBLEHET-type double heterogeneity, and its prospective use to calculate neutronic characteristics of HTGR fuel. The calculations have also shown that it is acceptable to model burnable absorber compacts both by setting a DOUBLEHET-type cell and explicitly by particles in the graphite matrix. In general, the calculation results for these options agree quite well, within 1–2 %, with the direct calculation using the pointwise library of cross sections.

Based on the computational statistic parameters, it may be recommended to set at least 200,000 histories and the number of particles in a generation or the number of generations should be at least 250.

Key words: high-temperature gas-cooled reactor, double heterogeneity, burnup, standard deviation, Monte Carlo, fuel particle, SCALE 6.2.4.

For citation: Salyaev A.V., Usynina S.G., Kalinina V.P. Assessment of Design Approximation Impact on Neutronic Characteristics of a High-Temperature Gas-Cooled Reactor Fuel Assembly. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 1, pp. 159–169; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.13> (in Russian).

References

1. Wieselquist W.A., Lefebvre R.A., Jessee M.A. (Editors). SCALE Code System, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4, April 2020.
2. Salyaev A.V., Usynina S.G. Simulation of Calculated Benchmark for Radiation Exposure of HTGR fuel cells // *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*. 2022, no. 1, pp. 68–76. DOI: https://doi.org/10.46960/1816-210X_2022_1_68 (in Russian).
3. She D., Wei C., Liu Z., Liu S., Wang K. HTGR Fuel Element Depletion Benchmark: Results for Infinite Fuel Pebble Lattice. *Transactions of the American Nuclear Society*. January 2015.
4. Jessee M.A., Wiarda D., Clarno K.T. et al. TRITON, A Multipurpose Transport, Depletion, and Sensitivity and Uncertainty Analysis Module, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4, April 2020.
5. Chadwick M.B., Herman M., Obložinský P., Dunn M.E. et al. ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data. *Nuclear Data Sheets*. 2011, vol. 112, iss. 12, pp. 2887–2996. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>
6. Wieselquist W., Hart S., Isotalo A. et al. ORIGEN: Neutron Activation, Actinide Transmutation, Fission Product Generation, and Radiation Source Term Calculation. SCALE Code System. ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4, April 2020.

Authors

Alexander V. Salyaev, Head of Group,

E-mail: salyaev@okbm.nnov.ru

Svetlana G. Usynina, Lead Design Engineer, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: usynina@okbm.nnov.ru

Valeriya P. Kalinina, Design Engineer,

E-mail: kalinina_vp@okbm.nnov.ru