

УДК 519.6

## РАСЧЕТ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕНЧМАРКА FullCore ПО ПРОГРАММАМ TDMCC И "САПФИР\_95&RC\_ВВЭР"

С. Н. Антонов, А. Д. Русаков, А. Н. Устинов, М. В. Фатеев, М. В. Фролова,  
Т. В. Семенова, Н. А. Волков  
(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", г. Саров Нижегородской области;  
АО ОКБ "ГИДРОПРЕСС", г. Подольск Московской области)

Представлены результаты верификации программного комплекса САПФИР\_95 &RC\_ВВЭР для расчетов нейтронно-физических характеристик активных зон ВВЭР.

Для верификации использовался бенчмарк FullCore. Основой исходных данных бенчмарка являются геометрические и материальные параметры активной зоны АЭС "Темелин". Обоснование точности расчета по программному комплексу САПФИР\_95&RC\_ВВЭР основывалось на использовании результатов расчетов, выполненных методом Монте-Карло по программе TDMCC. Предварительно результаты расчетов, выполненных по программе TDMCC, сравнивались с результатами, полученными по прецизионным программам Serpent, MCNP и MCU.

*Ключевые слова:* верификация, нейтронно-физические характеристики, активная зона, бенчмарк, точность расчета, метод Монте-Карло, прецизионные программы.

### Введение

Работа является логическим продолжением доклада, сделанного в 2010 году [1], основой которого являлись геометрические и материальные параметры бенчмарка MIDICORE.

Исходные данные бенчмарка FullCore основаны на геометрических и материальных характеристиках одной из топливных загрузок активной зоны (АЗ) ВВЭР-1000 АЭС "Темелин". Впервые этот бенчмарк был представлен чешскими специалистами ŠKODA JS на 26-й конференции AER [2]. В работах, выполненных специалистами Курчатовского института и ŠKODA JS, с помощью прецизионных программ Serpent, MCNP и MCU [3–5], основанных на методе Монте-Карло, рассчитывались критические состояния и распределение энерговыделения по сечениям АЗ и отдельных топливных сборок (ТВС).

Программа TDMCC [6], использованная в расчетах, является прецизионной многоцелевой программой с высокой степенью детализации геометрических объектов и предназначена для расчета критических параметров с учетом выгорания топлива. В ней предусмотрены возможно-

сти использования различных систем констант для моделирования взаимодействия частиц с веществом.

При расчете переноса нейтронов используются данные из национальных библиотек оцененных ядерных данных США ENDL-82, ENDF/B-V, VI, VII, а также CNDC (CNDC Beijing, China), JENDL (JAERI Tokai, Japan) [7]. Все расчеты по программе TDMCC, представленные в данной статье, проводились с использованием нейтронных констант с непрерывной энергетической зависимостью из библиотеки MCCNUS. Эта библиотека, основанная на ENDF/B-VI [7], содержит информацию для 297 изотопов.

В аттестованной в Ростехнадзоре версии комплекса программ САПФИР\_95 &RC\_ВВЭР [8, 9] расчет потвального энерговыделения проводится методом суперпозиции. Данный метод базируется на представлении решения уравнения диффузии нейтронов в реакторе в виде суперпозиции микрораспределения потока нейтронов в кассете и макрораспределения потока нейтронов по реактору в целом. Набор микрораспределений

скоростей реакций деления в твэлах получается с использованием спектральной программы САПФИР\_95 [10] на этапе решения уравнения переноса для однородной решетки ячеек. Макроход потока нейтронов по реактору получается в результате расчетов по комплексу программ САПФИР\_95&RC\_ВВЭР в диффузионном приближении на конечно-разностной сетке с 24 точками на ТВС. На границах АЗ и отражателя используются разрывные граничные условия для тока и потока нейтронов (далее обобщенные граничные условия (ОГУ)). Степень различия потока и тока слева и справа от границы задается с помощью корректирующих коэффициентов. Корректирующие коэффициенты выбраны и обоснованы при верификации программы в сравнении с реперными расчетами и не меняются от загрузки к загрузке, поскольку определяются, в первую очередь, свойствами и конструкцией отражателя.

Также для сравнения приводятся результаты расчетов с использованием в комплексе САПФИР\_95&RC\_ВВЭР мелкосеточного метода. Он основан на расчете потвэльного энерговыделения в диффузионном приближении на регулярной конечно-разностной сетке, соответствующей шагу решетки твэла в ТВС. На границах ТВС, где нарушается регулярность решетки, для корректировки диффузионных характеристик микроячеек применяется так называемый коэффициент сжатия. Расчет этим методом проводился с двумя и шестью группами нейтронов.

Представлены результаты сравнительных расчетов нейтронно-физических характеристик бенчмарка FullCore ВВЭР-1000 по прецизионной программе TDMCC и инженерному комплексу программ САПФИР\_95&RC\_ВВЭР с применением методов расчета потвэльного энерговыделения. Полученные результаты также сравнивались с результатами расчетов по программам MCNP и MCU.

### Описание бенчмарка FullCore

Бенчмарк FullCore был создан для тестирования программ, ориентированных на расчет нейтронно-физических характеристик АЗ ВВЭР. Геометрически бенчмарк является двумерной моделью АЗ ВВЭР-1000. На рис. 1 представлено горизонтальное сечение 1/6 конструктивных элементов, окружающих АЗ.

АЗ бенчмарка FullCore формировалась из "свежих" ТВС типа А-Т, отличающихся обога-

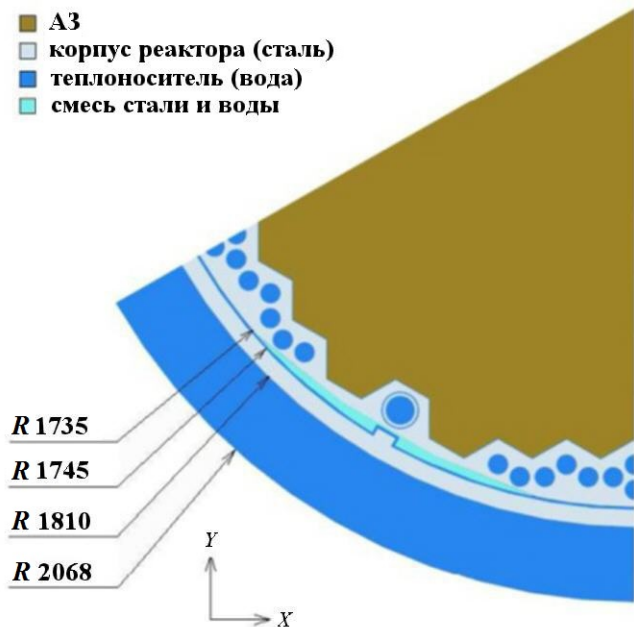


Рис. 1. Горизонтальное сечение 1/6 корпуса реактора, окружающего АЗ

щениями и наличием твэгов. В бенчмарке температура всех материалов задана равной 600 К. Размеры элементов АЗ и плотность материалов (за исключением теплоносителя) взяты для холодного состояния. Плотность теплоносителя задана для давления 15,7 МПа. Стержни СУЗ не погружены в АЗ, и в направляющих каналах находится теплоноситель. Геометрические размеры для холодного состояния базируются на конструкторской документации с упрощениями. Водный зазор между сталью бокового отражателя и гранью ближайшей ТВС принят равным 3 мм.

Картограмма АЗ тестовой модели ВВЭР-1000 показана на рис. 2. Она аналогична картограмме девятой топливной загрузки АЗ АЭС "Темелин", но в центральную ячейку АЗ вместо ТВС типа А30Е9 загружена ТВС типа А20. Картограммы ТВС, применяемых в бенчмарке FullCore, приведены на рис. 3–7. Геометрические размеры и материальный состав конструктивных элементов АЗ и ТВС бенчмарка FullCore детально описаны в работе [2].

Тестирование расчетного комплекса САПФИР\_95&RC\_ВВЭР осуществлялось в два этапа. На первом тестировалась программа TDMCC на расчетах АЗ стандартной модели бенчмарка FullCore. Результаты расчетов сравнивались с результатами, полученными по про-

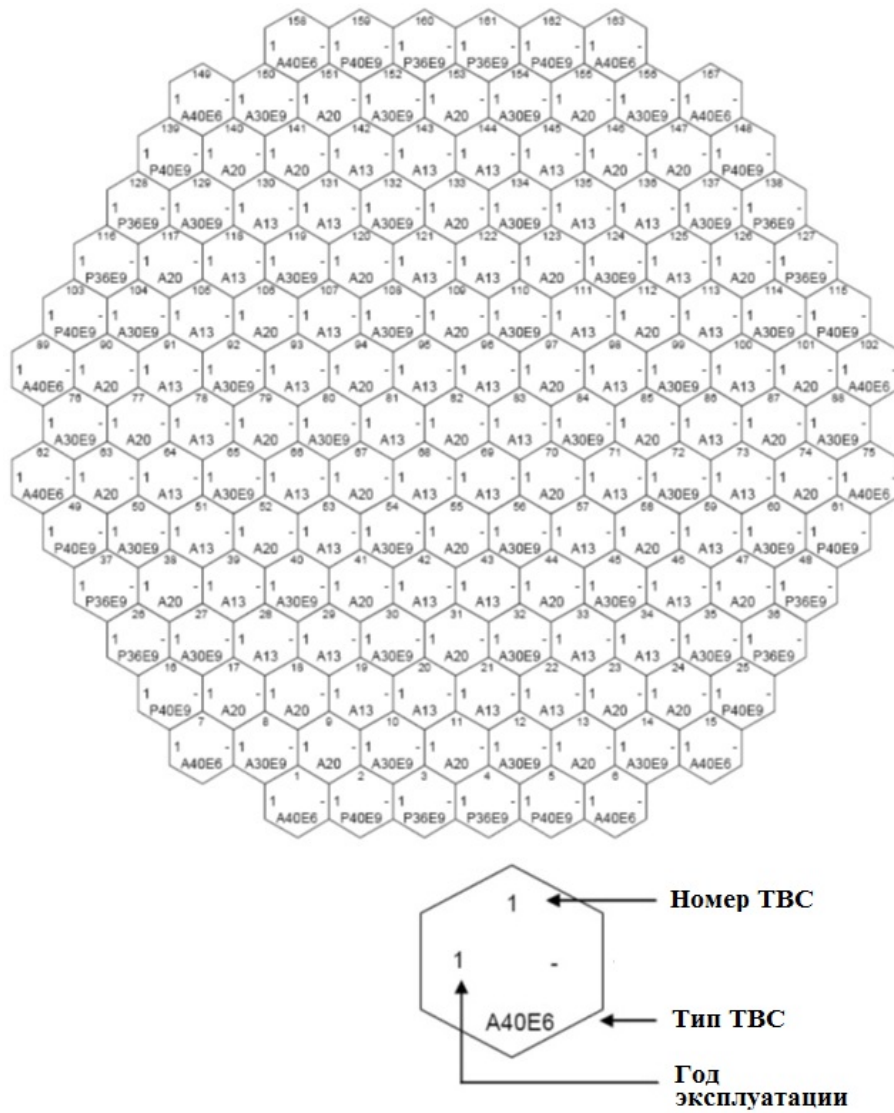


Рис. 2. Топливная загрузка АЗ бенчмарка FullCore



Рис. 3. ТВС типов А13 и А20 с обогащением 1,3 и 2,0% по  $^{235}\text{U}$  соответственно

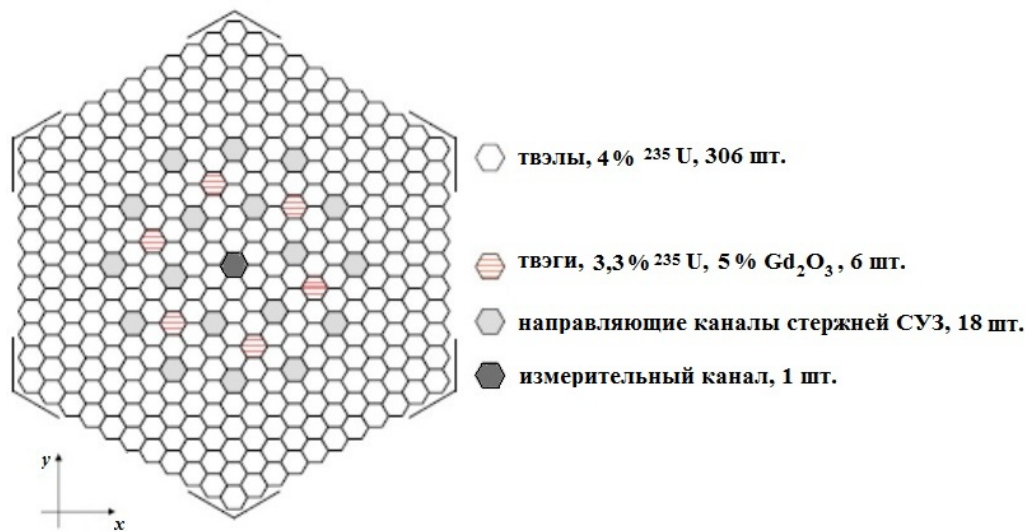


Рис. 4. ТВС типа А40Е6

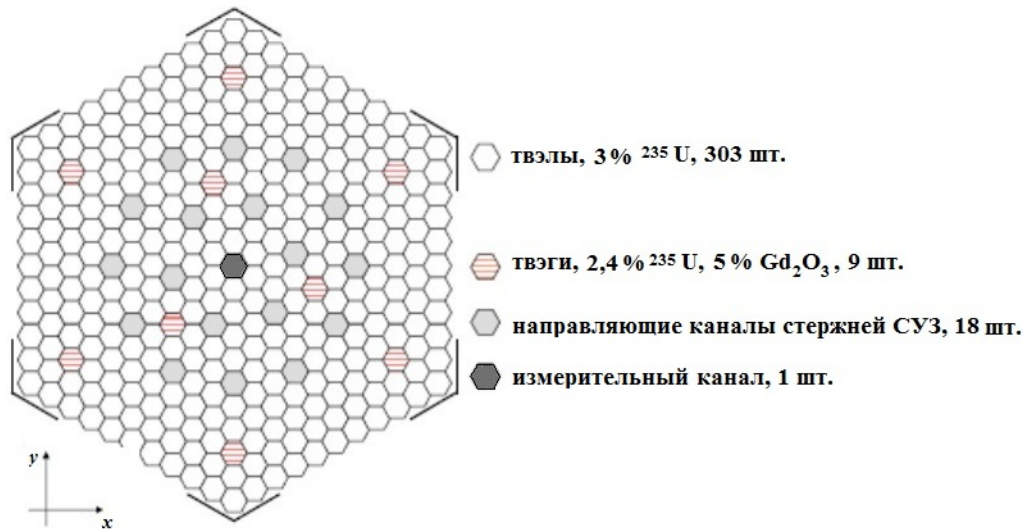


Рис. 5. ТВС типа А30Е9



Рис. 6. ТВС типа Р36Е9

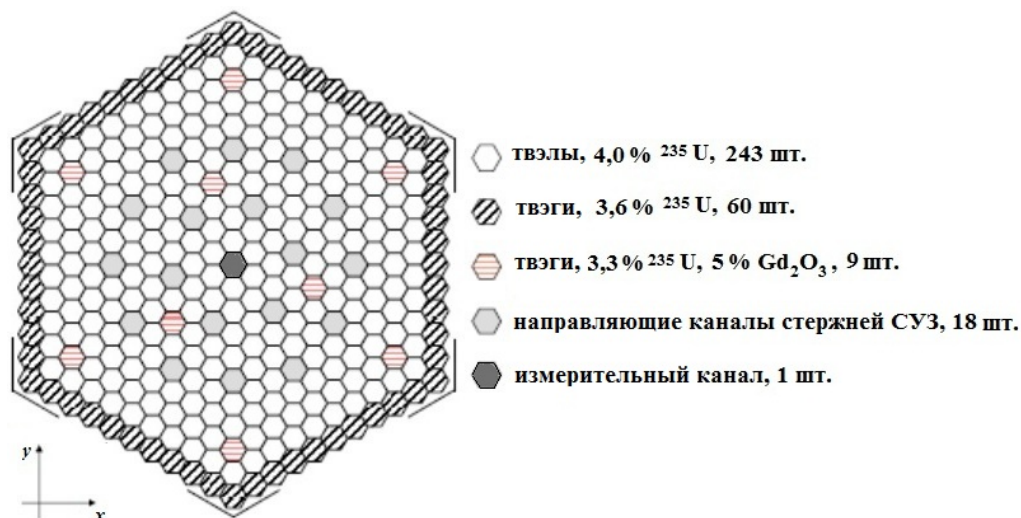


Рис. 7. ТВС типа P40E9

граммам Serpent, MCNP и MCU, решения интегродифференциальных уравнений в которых также основаны на методе Монте-Карло. На втором этапе по программе TDMCC и комплексу САФИР\_95&RC\_ВВЭР рассчитывались нейтронно-физические характеристики АЗ бенчмарка FullCore.

### Результаты расчетов бенчмарка FullCore по прецизионным программам

Результаты расчетов эффективного коэффициента размножения  $k_{эф}$  двумерной модели бенчмарка FullCore представлены в табл. 1. Значение  $k_{эф\text{TDMCC}}$ , полученное по программе TDMCC, равно 1,00172. Оно практически совпадает со значениями, полученными по программам MCNP и MCU.

Результаты расчетов распределения энерговыделения по сечению АЗ ( $k_q$ ) представлены на рис. 8. Видно, что отклонение энерговыделения в ТВС для программы TDMCC по сравнению с реперной программой MCNP\* не превышает 0,20 %, что показывает достаточно хорошее совпадение результатов расчетов по этим программам.

На рис. 9–12 и в табл. 2 приведены отклонения энерговыделения по поперечному сечению ТВС для программы TDMCC относительно MCNP для всех типов ТВС модели FullCore.

\*Здесь и далее отклонения результатов определяются по формуле  $\sigma = \frac{k1 - k2}{k1} \cdot 100\%$ , где  $k1$  — результат по реперной программе,  $k2$  — по анализируемой.

Таблица 1

Результаты расчетов  $k_{эф}$  двумерной модели бенчмарка FullCore

Программа	$k_{эф}$	$k_{эф} - k_{эф\text{TDMCC}}$
Serpent	1,00289	-0,00117
MCNP5	1,00199	-0,00027
MCU REA	1,00200	-0,00028
TDMCC	1,00172	0

Таблица 2

Среднеквадратичные и максимальные отклонения результатов расчетов энерговыделения в ТВЭлах по программе TDMCC от результатов расчета по MCNP

Тип ТВС	$\sigma_{\max}, \%$	$\sigma_{\text{ср}}, \%$
A30E9 № 54	4	1,23
A40E6 № 1	5,7	1,9
P40E9 № 2	3,6	0,9
P36E9 № 3	3,5	0,65

На основании сравнения результатов, полученных по программам MCNP и TDMCC, можно сделать вывод, что программа TDMCC позволяет достаточно хорошо моделировать нейтронно-физические характеристики АЗ модели FullCore, а полученные по ней результаты могут быть реперными для инженерных кодов. Таким образом, программу TDMCC можно считать реперной по отношению к комплексу САФИР\_95&RC\_ВВЭР.

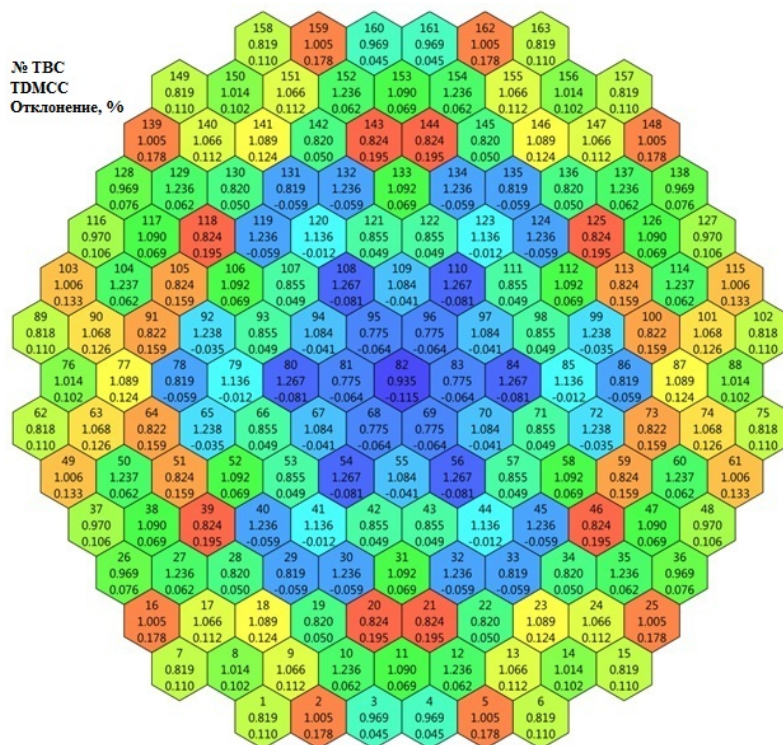


Рис. 8. Распределение энерговыделения по поперечному сечению АЗ ( $k_q$ ) бенчмарка FullCore, рассчитанное по программе TDMCC

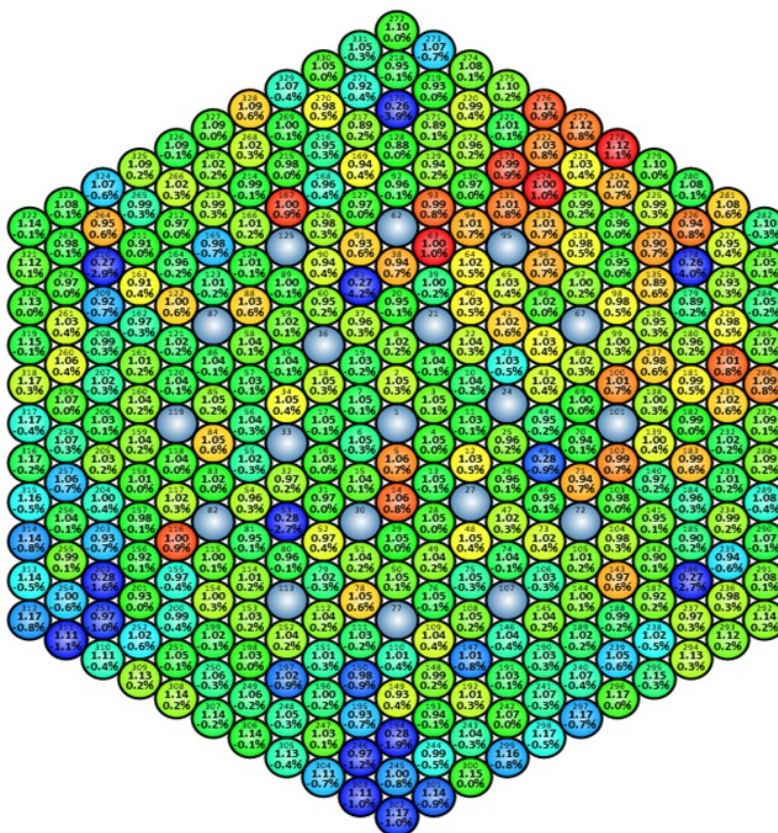


Рис. 9. Отклонения результатов расчета по программе TDMCC от результатов по MCNP для TBC АЗ0Е9 № 54

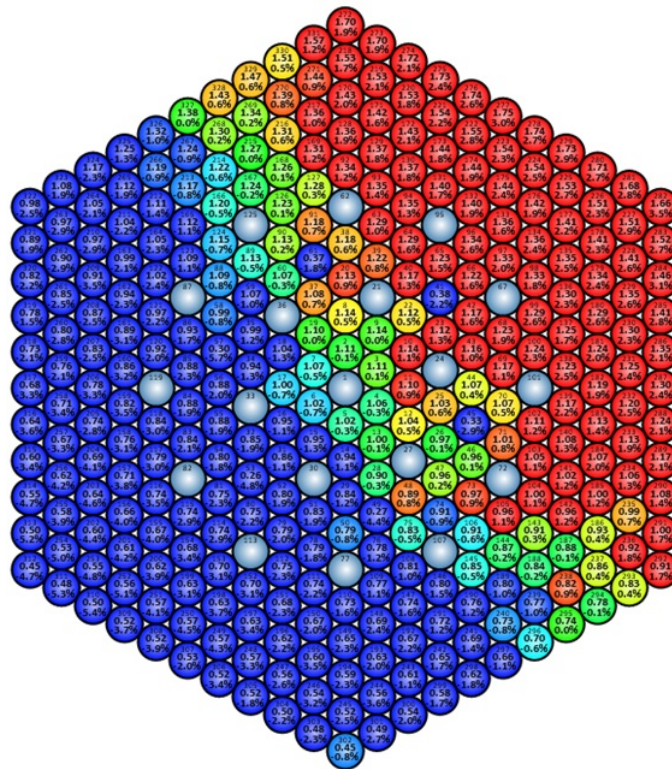


Рис. 10. Отклонения результатов расчета по программе TDMCC от результатов по MCNP для ТВС А40Е6 № 1

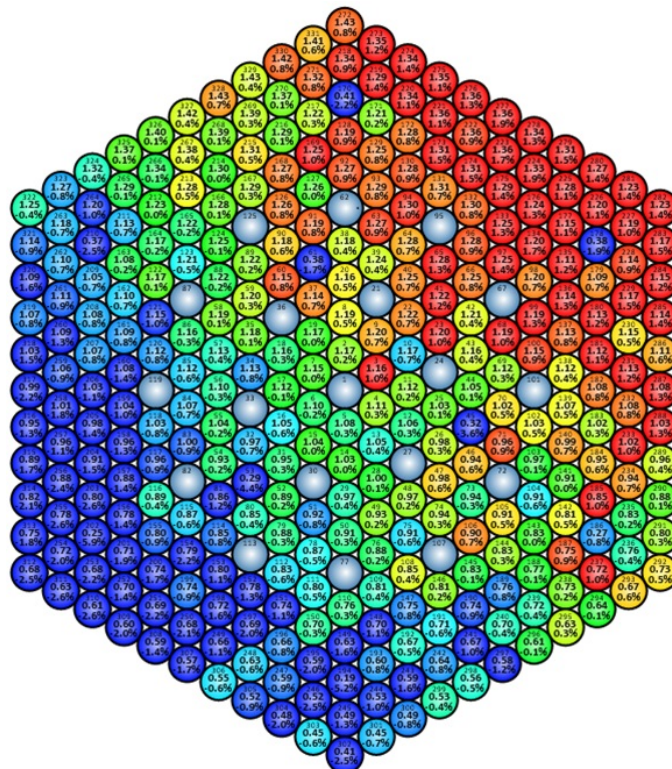


Рис. 11. Отклонения результатов расчета по программе TDMCC от результатов по MCNP для ТВС P40E9 № 2

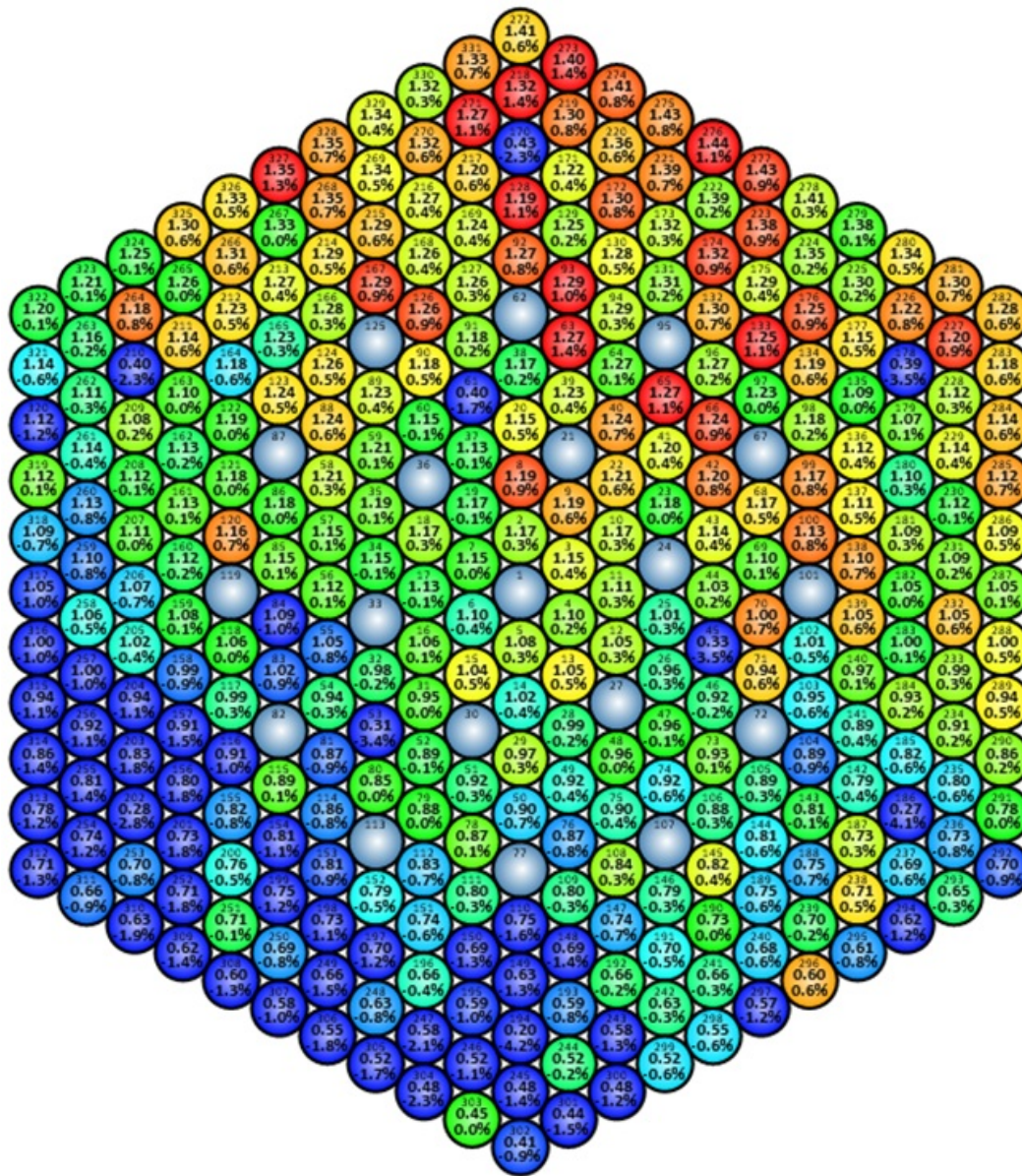


Рис. 12. Отклонения результатов расчета по программе TDMSS от результатов по MCNP для ТВС РЗБЕ9 № 3

### Тестирование программного комплекса САПФИР\_95&RC\_ВВЭР

Результаты сравнительных расчетов по программе TDMSS и комплексу САПФИР\_95&RC\_ВВЭР с использованием рассматриваемых методик представлены на рис. 13. Результаты мелкосеточного расчета приведены для двухгруппового и шестигруппового приближений. При расчете с шестью энергетическими группами использовались три тепловые группы и три эпитепловые группы для замедляющихся нейтронов.

Следует обратить внимание на то, что максимальные отклонения энерговыделений, полученных в стандартном (методом суперпозиции с ОГУ) и двухгрупповом мелкосеточном расчетах по САПФИР\_95&RC\_ВВЭР, от рассчитанных по TDMSS отмечены в угловых периферийных ТВС. Максимальные отклонения для шестигруппового мелкосеточного приближения отмечены в ТВС, расположенных в центре АЗ.

В табл. 3 приведены максимальные отклонения результатов расчетов энерговыделения в твэлах тестовых ТВС (на рис. 13 выделены се-



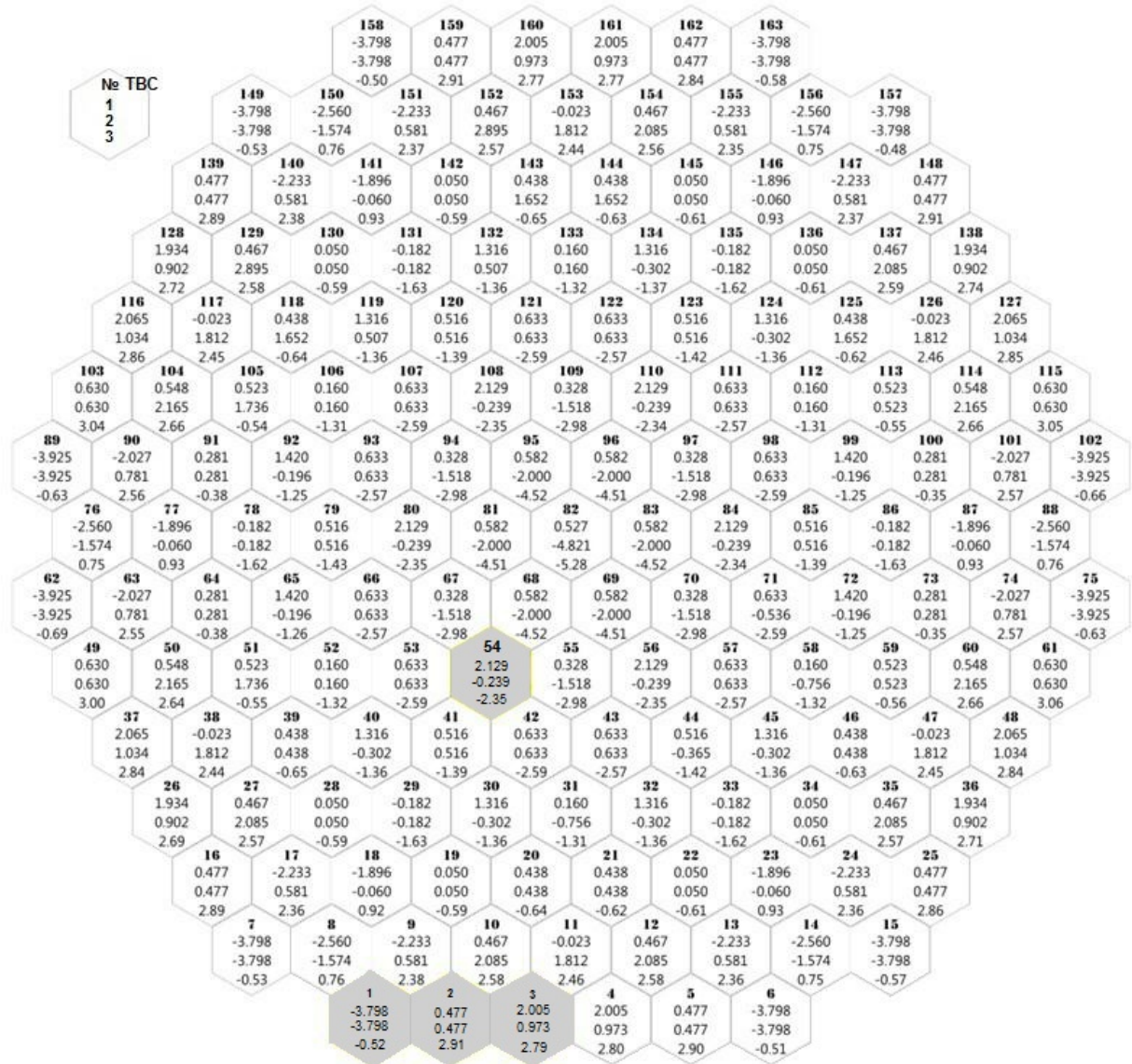


Рис. 13. Отклонения результатов расчета покассетного энерговыделения, полученных по САП-ФИР\_95&RC\_ВВЭР, от результатов по TDMCC: 1 — стандартная методика; 2, 3 — мелкосеточный метод для 2- и 6-группового приближений соответственно

рым цветом) от результатов, полученных по реперной программе.

Следует отметить, что отклонения результатов расчетов по программе САП-ФИР\_95&RC\_ВВЭР от результатов по TDMCC, полученные методом суперпозиции с ОГУ, несколько меньше, чем при расчетах мелкосеточными методами. Особенно это заметно для расчетов мелкосеточным методом с двумя группами нейтронов.

Для примера на рис. 14–16 приведены картограммы ТВС с распределением энерговыделений в твэлах ТВС № 1 (тип А40Е6) для использу-

емых методов расчета распределения энерговыделения.

Анализ полученных результатов расчетов распределений по поперечному сечению тестовых ТВС показал, что максимальные отклонения энерговыделений наблюдаются в твэлах, расположенных на границе с отражателем. Наиболее близкие к реперной программе результаты, как по максимальным, так и по средним отклонениям, получены для метода суперпозиций, что можно объяснить хорошо подобранными корректирующими коэффициентами для потоков и токов на границе с отражателем. Мелкосеточ-

Таблица 3

Отклонения результатов расчетов по программе САПФИР\_95&RC\_ВВЭР от результатов по TDMCC

Метод расчета	Отклонение, %							
	ТВС № 1 А40Е6		ТВС № 2 Р40Е9		ТВС № 3 Р36Е9		ТВС № 54 А30Е9	
	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\text{ср}}$	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\text{ср}}$	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\text{ср}}$	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\text{ср}}$
Метод суперпозиции (2 энергетические группы с ОГУ)	8,5	2,3	9,6	4,8	7,8	2,4	2,9	0,9
Мелкосеточный метод (2 энергетические группы)	13,6	1,9	13,8	1,9	13,6	1,9	7,8	1,3
Мелкосеточный метод (6 энергетических групп)	12,4	1,9	13,1	1,8	11,2	1,7	2,9	0,8

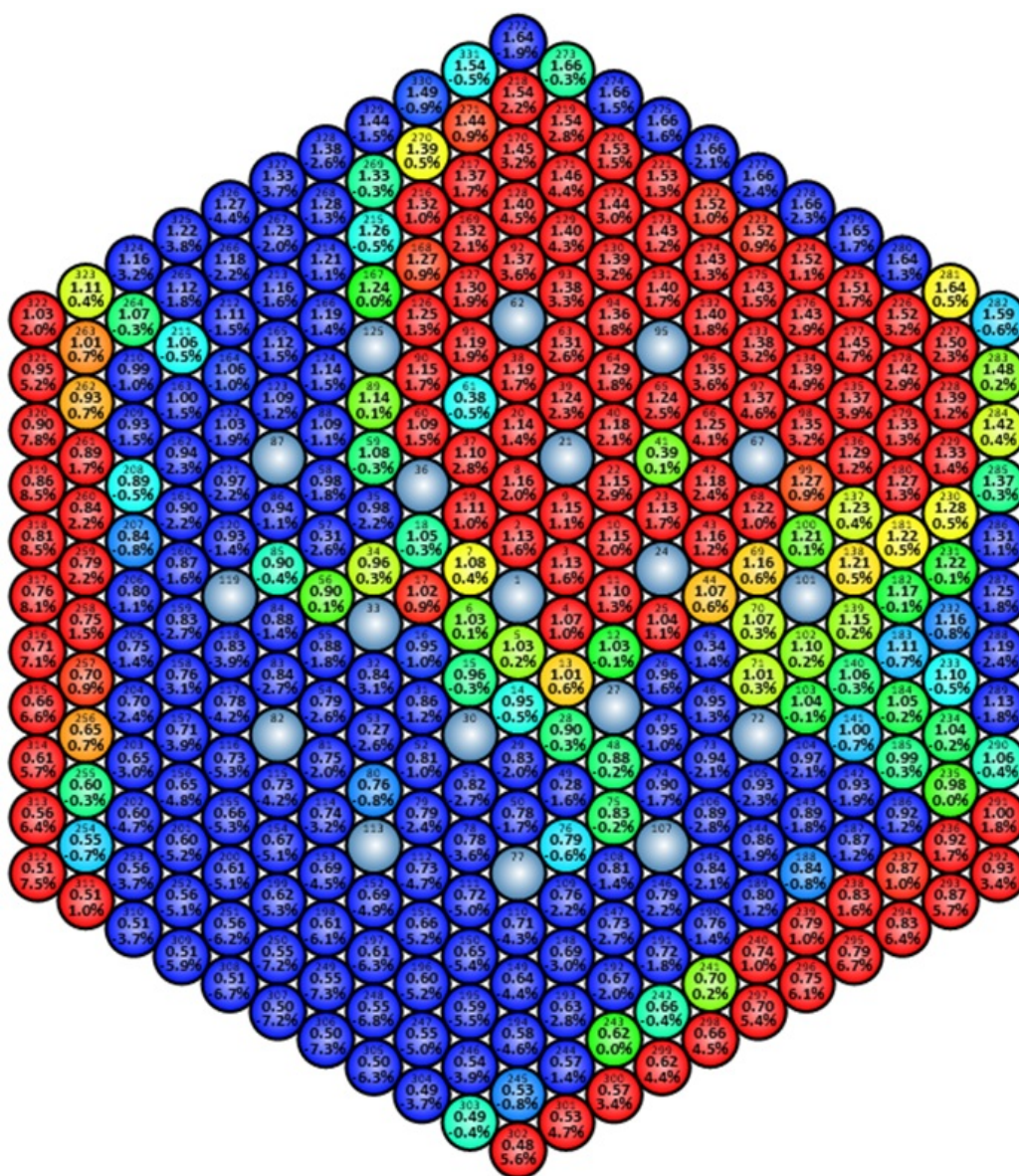


Рис. 14. Расчет методом суперпозиции с ОГУ. Отклонение результатов расчета по программе TDMCC от результатов по САПФИР\_95&RC\_ВВЭР в ТВЭлах ТВС № 1 (тип А40Е6)

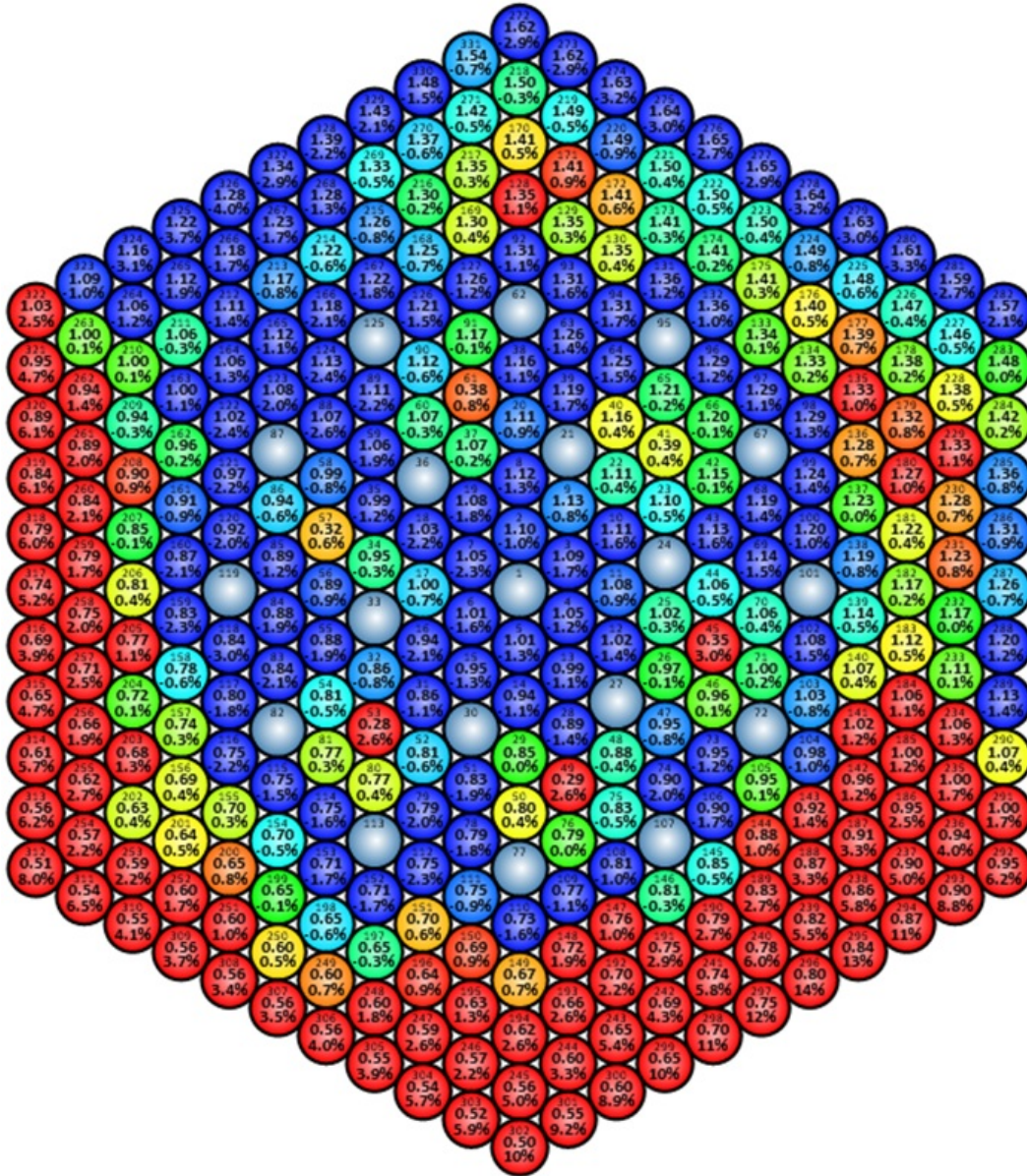


Рис. 15. Расчет мелкосеточным методом с двумя группами нейтронов. Отклонение результатов расчета по программе TDMCC от результатов по САПФИР\_95&RC\_ВВЭР в твэлах ТВС № 1 (тип А40Е6)

ные методы расчета дали несколько худшие результаты по сравнению с методом суперпозиций. При этом шестигрупповой мелкосеточный метод не намного, но ближе к двухгрупповому по сравнению с реперным расчетом по программе TDMCC.

### Выводы

По итогам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Результаты расчетов, полученные по программе TDMCC, хорошо согласуются с результатами расчетов по другим аналогичным программам (MCNP, MCU, SERPENT), что позволяет использовать ее в сравнительных расчетах по комплексу САПФИР\_95&RC\_ВВЭР в качестве реперной.
2. Сравнения расчетов распределения энерговыделения по сечению АЗ бенчмарка FullCore по программе TDMCC и комплексу САПФИР\_95&RC\_ВВЭР показали:

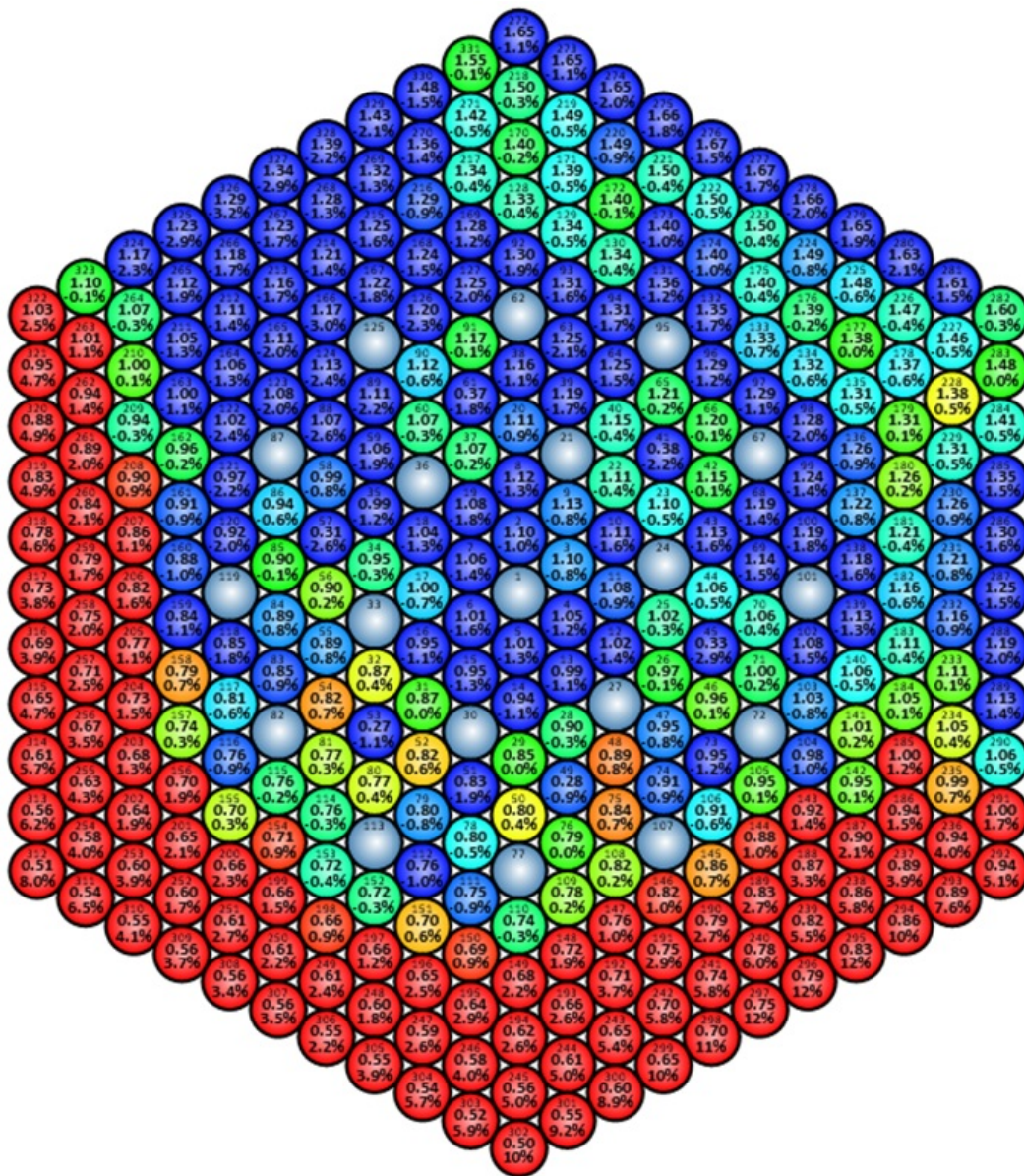


Рис. 16. Расчет мелкосеточным методом с шестью группами нейтронов. Относительное отклонение результатов расчета по программе TDMCC от результатов по САФИР\_95&RC\_VVЭР в твэлах ТВС № 1 (тип А40Е6)

- 1) максимальные отклонения энерговыделений для стандартного (метод суперпозиций микрораспределений потока нейтронов) и двухгруппового мелкосеточного расчетов, полученных по программе САФИР\_95&RC\_VVЭР, от рассчитанных по TDMCC отмечены в угловых периферийных ТВС;
- 2) максимальные отклонения энерговыделений для шестигруппового мелкосеточного расчета по программе САФИР\_95&RC\_VVЭР от полученных по TDMCC отмечены в ТВС, расположенных в центре АЗ. Для объяснения этого факта необходимо проведение дополнительных расчетных исследований по обеим программам.
3. Как и ожидалось, максимальные отклонения энерговыделений отмечены в твэлах, примыкающих к отражателю АЗ. Замечено, что минимальные отклонения результатов расчетов по программному комплексу САФИР\_95&RC\_VVЭР от результатов по программе TDMCC получены по методу

суперпозиций микрораспределений потока нейтронов. Это можно объяснить хорошо подобранными корректирующими коэффициентами для потоков и токов нейтронов на границе с отражателем.

Авторы статьи благодарны сотрудникам ФГУП "НИТИ им. А. П. Александрова" за предоставленные нейтронно-физические характеристики АЗ бенчмарка FullCore, полученные с использованием мелкосеточного метода по программному комплексу САПФИР\_95&RC\_ВВЭР.

### Список литературы

1. Krýsl V., Mikoláš P. "MIDICORE" VVER-1000 core periphery power distribution benchmark proposal // Proc. 20th Symposium of AER. Espoo, Finland, 2010. P. 215–234.
2. Krýsl V., Mikoláš P., Sprinzel D., Švarný J. Proposal of "FullCore" VVER-1000 calculation benchmark // Proc. 26th Symposium of AER. Helsinki, Finland. October 10–14, 2016. P. 33–44.
3. Leppänen J., Pusa M., Viitanen T. et al. The Serpent Monte Carlo code: status, development and applications in 2013 // Ann. Nucl. Energy. 2015. Vol. 82. P. 142–150.
4. MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B / Ed. by J. F. Briesmeister: LA-12625-M. USA, 1997.
5. Gomin E. A., Majorov L. V. The MCURFFI Monte Carlo code for reactor design applications // Proc. Int. Conf. on Mathematics and Computation, Reactor Physics and Environmental Analyses. April 30—May 4 1995. Portland Or., USA, 1995. Vol. 2 P. 1136–1141.
6. TDMCC. Аттестационный паспорт программного средства № 407 от 08.12.2016. TDMCC. Attestatsionny pasport programmogo sredstva № 407 ot 08.12.2016.
7. Data Formats and Procedures for Evaluated Nuclear Data File ENDF/B-VI and ENDF/B-VII. Report Brookhaven National Laboratory NCS-44945-05-Rev. 2005.
8. Артёмов В. Г., Иванов А. С., Кузнецов А. Н., Шемаев Ю. П. Комбинированный метод расчета потвэльного энергосделения в комплексе программ САПФИР\_95&RC\_ВВЭР // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы. 2014. Вып. 3. С. 85–89. Artemov V. G., Ivanov A. S., Kuznetsov A. N., Shemaev Yu. P. Kombinirovanny metod rascheta potvelnogo energovydeleniya v komplekse programm SAPFIR\_95&RC\_VVER // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Yaderno-reaktornye konstanty. 2014. Vyp. 3. S. 85–89.
9. САПФИР\_95&RC\_ВВЭР. Аттестационный паспорт программного средства № 388 от 16.12.2015. SAPFIR\_95&RC\_VVER. Attestatsionny pasport programmogo sredstva № 388 ot 16.12.2015.
10. САПФИР\_95.1. Аттестационный паспорт программного средства № 390 от 16.12.2015. SAPFIR\_95.1. Attestatsionny pasport programmogo sredstva № 390 ot 16.12.2015.

Статья поступила в редакцию 24.05.19.

CALCULATION OF NEUTRONIC PARAMETERS FOR THE FullCore BENCHMARK USING THE TDMCC AND SAPFIR\_95&RC\_VVER CODES / S. N. Antonov, A. D. Rusakov, A. N. Ustinov, M. V. Fateev, M. V. Frolova, T. V. Semenova, N. A. Volkov (FSUE "RFNC-VNIIEF", Sarov, Nizhny Novgorod Region; OAO OKB "GIDROPRESS", Podolsk, Moscow region).

Verification results are presented for the SAPFIR\_95&RC\_VVER software complex used to calculate the neutronic parameters for VVER cores. The FullCore benchmark was used for the verification. The geometric and material parameters of the Temelin NPP core form the basis for the input data used in the benchmark. The accuracy of simulations by SAPFIR\_95&RC\_VVER was proved using the obtained results of Monte Carlo simulations by the TDMCC code. The TDMCC results were previously compared to the results obtained using the precision codes Serpent, MCNP, and MCU.

*Keywords:* verification, neutronic parameters, core, benchmark, the Monte-Carlo method, precision codes.

---