

УДК 519.642:621.039.5

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММЫ TDMCC ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ С ДОМИНАНТНЫМ ОТНОШЕНИЕМ, БЛИЗКИМ К ЕДИНИЦЕ

Е. Ф. Митенкова, Т. В. Семенова

(ИБРАЭ РАН, г. Москва; ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", г. Саров Нижегородской области)

Представлены новые возможности программы TDMCC для анализа распределений скорости деления нейтронов в слабосвязанных системах. Рассмотрены методы вычисления доминантного отношения и энтропии Шеннона, реализованные в программе TDMCC. Для систем с доминантным отношением, близким к единице, продемонстрирована связь между сходимостью вычисляемых функционалов и энтропией Шеннона. Приведен пример, в котором недооценка погрешностей вычисляемых функционалов и специфика алгоритмов, используемых в задачах на критичность, приводят к несогласованным результатам вариантных расчетов, связанных с малыми изменениями исходных параметров системы.

*Ключевые слова:* метод Монте-Карло, метод поколений, слабосвязанная система, доминантное отношение, энтропия Шеннона.

### Введение

Предназначенные для моделирования нейтронно-физических процессов алгоритмы, использующие методы Монте-Карло, были изначально ориентированы на вычисление коэффициента эффективного размножения нейтронов  $K_{эф}$ . В отечественных (MCU, TDMCC и др.) и зарубежных (KENO, MCNP и др.) кодах Монте-Карло для решения задач на критичность традиционно используется метод поколений (power iteration method), обеспечивающий корректность вычисления  $K_{эф}$  [1]. Для систем с доминантным отношением, близким к единице, при вычислении нейтронных потоков и соответствующих функционалов могут возникнуть определенные трудности, обусловленные как чисто расчетными проблемами, связанными с выбором адекватных значений статистических параметров (число нейтронов в поколении, число неактивных поколений и др.), так и алгоритмически [2].

В научном мире интерес к вычислению доминантного отношения методом Монте-Карло проявился сравнительно недавно, и в последнее время исследования в этом направлении [3–5] заметно активизировались. Доминантное отношение, близкое к единице, могут иметь системы

разной степени сложности и гетерогенности в компоновке и композиционном составе, включая простые ячейки, макроячейки, а также более сложные модели объектов ядерной энергетики. Важность знания доминантного отношения будет продемонстрирована на примере бенчмарк-расчетов для слабосвязанных систем, выполненных с помощью программы TDMCC [6].

### Вычисление доминантного отношения в TDMCC

Исторически доминантное отношение рассматривалось в качестве некоторого маркера при оценке сходимости итерационных процессов, поэтому вычисление доминантного отношения всегда связано с используемым методом расчета нейтронно-физических характеристик.

Для вычисления доминантного отношения применяются различные алгоритмы. Наиболее естественным представляется FM-метод (Fission Matrix Method) [3] с использованием матрицы деления, для которой вычисляются собственные значения  $\lambda_0, \lambda_1, \dots$ . Матрица деления  $M$  размером  $N \times N$  формируется для  $N$  пространственных областей. Элемент матрицы  $m_{ij}$  равен числу нейтронов, появившихся в ячейке  $i$  от одного

нейтрона деления в ячейке  $j$  предыдущего поколения. В соответствии с FM-методом главное собственное значение  $\lambda_0$  матрицы деления является всегда положительным, тождественным  $K_{эф}$ , а соответствующая собственная функция отражает в первом приближении пространственное распределение нейтронного источника деления. Если для матрицы деления определены собственные значения  $\lambda_0 > |\lambda_1| \geq |\lambda_2| \geq \dots$ , то отношение  $|\lambda_1|/\lambda_0$  называется доминантным отношением ( $DR$ ).

Матрица деления  $M$  есть дискретное представление ядра интегрального оператора  $K(x', x)$  перехода точки деления  $x'$  в  $x$ . Элементы матрицы деления можно рассчитать с помощью практически любой программы, использующей метод Монте-Карло. В программе TDMCC расчет матрицы деления возможен при использовании разделов *Тактика счета* и *Параметры и результаты*. Для этого необходимо каждому нейтрону источника деления приписать метку, характеризующую его положение в пространстве, например номер пространственной ячейки, в которой он находится, и число делений распределять по номеру финальной пространственной ячейки и номеру метки нейтрона.

Использование такого подхода оказывается весьма неудобным из-за необходимости проведения специальной постобработки большого объема выходных данных, требуемых для формирования матрицы деления, и в связи с этим в программе TDMCC реализована возможность вычисления доминантного отношения FM-методом в рамках стандартного расчета методом поколений. При моделировании траектории нейтрона запоминаются номера исходной и финальной пространственных ячеек. Перед записью фазовых координат точки деления для следующего поколения проводится суммирование весовых коэффициентов нейтронов и запись в массив, из которого формируется матрица деления. Для этой матрицы вычисляются собственные значения и соответственно доминантное отношение. Вычисление собственных значений для полученной матрицы возможно с помощью любого стандартного математического пакета. При этом надежность вычисляемых собственных значений зависит от вида матрицы. Возникающие сложности носят чисто математический характер.

Матрица деления рассчитывается при моделировании каждого поколения нейтронов, включая неактивные, поскольку каждая траектория ней-

трона дает вклад в оценку элементов матрицы деления. При этом матрица деления сильно зависит от сегментации и количества подобластей исходной системы, что подробно обсуждается, например, в [3]. Если при моделировании реакторных систем число подобластей оказывается достаточно большим (порядка 100, 1000 или более), то для матриц большого размера (размер матрицы деления равен квадрату числа подобластей) могут возникнуть проблемы с вычислением собственных значений. В то же время для "хорошей" матрицы деления (малое число обусловленности и др.) оказывается возможным вычисление собственных функций не только для главного собственного значения  $\lambda_0$ , но и для  $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ , которые могут быть полезны при обосновании корректности распределения нейтронных потоков и скоростей реакций в размножающей системе [3].

Расчет доминантного отношения с помощью NPM-метода (Noise Propagation Matrix Method) [4, 5] основан на использовании шумовой переходной матрицы (NP-матрицы), которая получается из корреляционных матриц источников деления, рассчитываемых в процессе итераций поколений нейтронов методом Монте-Карло. Этот метод подробно описан и математически обоснован в [4], где, в частности, доказывается, что доминантное отношение есть наибольшее по модулю собственное значение NP-матрицы, вычисляемое стандартными алгебраическими методами. Для NPM-метода отчасти снимается проблема надежности вычисления главного и первого собственных значений.

В отличие от матрицы деления NP-матрица требует гораздо меньше памяти, но она рассчитывается на активных поколениях [4], и корректность NPM-метода обеспечивается для систем с установившимся распределением нейтронов деления при отсутствии нулевых элементов в NP-матрице.

С учетом специфики FM- и NPM-методов при расчете доминантного отношения в программе TDMCC реализованы оба метода. Реализация FM-метода допускает рассмотрение только делящихся областей, что приводит к автоматическому уменьшению ранга матрицы деления и сокращению объема требуемой памяти. Корректность FM- и NPM-методов проанализирована на примерах бенчмарков GODIVA [5], K\_of\_the\_World [6] (табл. 1, 2 и рис. 1, 2, см. также цветную вкладку) и шахматная доска [6].

Таблица 1

## Тестовые DR-расчеты бенчмарка GODIVA

Метод	Разбиение системы	DR*	Источник
FM	2×2×2	0,56	[4]
	4×4×4	0,60	
	8×8×8	0,65	
ARMA(2,1)	2×2×2	0,63±0,04	
FM	2×2×2	0,56	TDMCC
	6×6×6	0,63	
	9×9×9	0,64	
NPM	2×2×2	0,60±0,04	

\*Результаты FM-метода приводятся без указания погрешности.

Таблица 2

## Тестовые DR-расчеты бенчмарков K\_of\_the\_World и шахматная доска

Источник	K_of_the_World, 5×5×1	Шахматная доска
[6]	0,9037	0,9970
TDMCC, FM-метод	0,9031	0,9977
TDMCC, NPM-метод	0,9101	0,9975

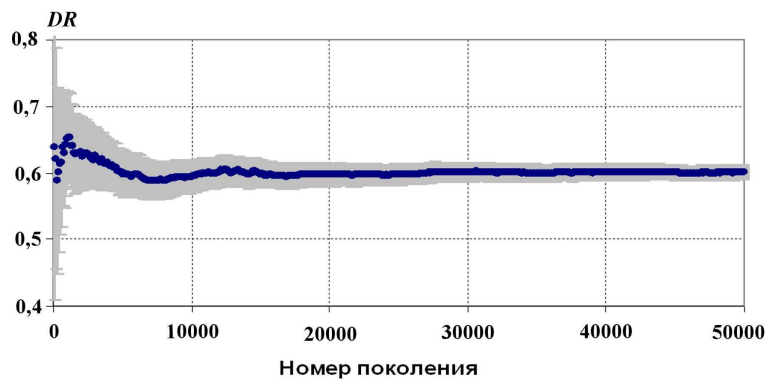
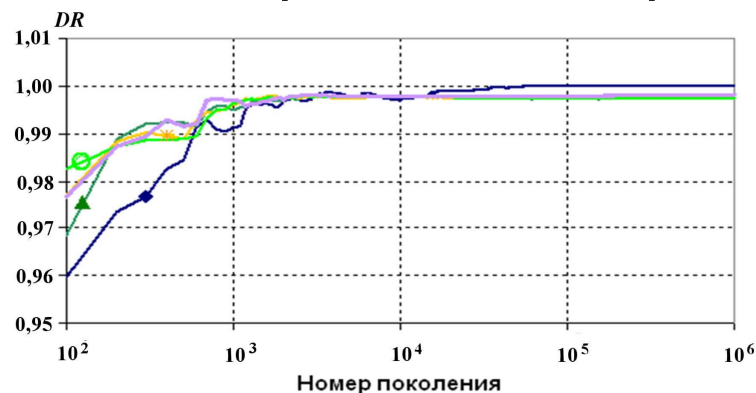
Рис. 1. Динамика доминантного отношения в расчете NPM-методом бенчмарка GODIVA ( $NPAC^1 = 20\,000$ )

Рис. 2. Динамика доминантного отношения в расчетах NPM-методом бенчмарка шахматная доска:  $\blacklozenge$  —  $NPAC = 400$ ;  $\blacktriangle$  —  $NPAC = 8\,000$ ;  $\ast$  —  $NPAC = 20\,000$ ;  $\ominus$  —  $NPAC = 100\,000$ ;  $\blacksquare$  —  $NPAC = 200\,000$

<sup>1</sup>Здесь и всюду далее  $NPAC$  — количество нейтронов в поколении.

## Вычисление энтропии Шеннона в TDMCC

Проблема обоснования гарантированной устойчивости нейтронно-физических характеристик, вычисляемых с помощью кодов Монте-Карло, имеет особую значимость в связи с возможностью выполнения больших объемов вычислений на многопроцессорных кластерных системах.

Для оценки устойчивости вычисляемых характеристик в задачах на критичность в ряде зарубежных кодов (MCNP, SERPENT) используется энтропия Шеннона [7]. В теории информации энтропия Шеннона является мерой неопределенности, приходящейся на единицу информации, и определяется как

$$H_{src} = - \sum_{i=1}^N P_i \log_2(P_i), \quad (1)$$

где  $P_i$  — вероятность появления  $i$ -го символа в сообщении длины  $N$ .

В расчетах на критичность использование энтропии Шеннона предлагается, в частности, для исследования сходимости источника деления [7]. Вся область источника деления разбивается на  $N$  пространственных подобластей. В качестве  $P_i$  ( $i = \overline{1, N}$ ) берется значение функции распределения средней скорости деления  $R_i$  в подобласти  $i$ :

$$P_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^N R_i}. \quad (2)$$

Предполагается, что выход  $H_{src}$  на стационарное значение свидетельствует о достижении устойчивых значений вычисляемых нейтронно-физических характеристик. При этом отсутствует математическая формулировка критерия устойчивости и указание погрешности вычисляемых характеристик.

Реализация расчета энтропии Шеннона в TDMCC обеспечивает вычисление  $H_{src}$  как для всей системы, так и для любой подобласти фазового пространства. Сравнительный анализ динамики энтропии Шеннона для отдельных ТВС помогает оценить достаточность вычислений с точки зрения устойчивости получаемых результатов. Реализованный алгоритм вычисления энтропии Шеннона в программе TDMCC позволяет исследовать сходимость  $H_{src}$  по разным параметрам, включая пространственные координаты, энергию, угловые переменные и др.

Для бенчмарков GODIVA и K\_of\_the\_World приведено изменение энтропии Шеннона при увеличении числа активных поколений (рис. 3). В системе GODIVA, не являющейся слабосвязанной системой ( $DR = 0,63$ ), энтропия Шеннона достаточно быстро выходит на стационарное значение при  $\sim 500$  активных поколениях в отличие от слабосвязанной системы K\_of\_the\_World с  $DR = 0,90$ , которая не выходит на стационар даже после 6 000 активных поколений.

## Анализ нейтронно-физических характеристик бенчмарка шахматная доска

Бенчмарк *шахматная доска* рассматривается как модель хранилища ядерного топлива легководных реакторов [8], состоящая из трех рядов размещенных в шахматном порядке ТВС и заполненных водой ячеек, окруженных с трех сторон бетонными стенками и с одной стороны водой (рис. 4). В ТВС используется свежее диоксидурановое топливо с обогащением 3,5%. Бенчмарк *шахматная доска* предполагает расчет  $K_{эф}$  и покассетного распределения скорости делений. Расчеты выполнены для трехмерной модели с потвэльным описанием геометрии.

Данная система относится к слабосвязанным системам, особенностью которых является крайне малая вероятность попадания нейтрона из одной ТВС в другую. При этом для нейтрона, родившегося в одной ТВС, вероятность деления в другой составляет десятые или даже сотые доли процента. Значения  $K_{эф}$ , проанализированные при разных статистических параметрах, приведены во многих ранее опубликованных работах (см., например, [7–10]). Целью данной работы является анализ распределения скорости деления ( $R_f$ -распределение), полученного по программе TDMCC при разных статистических параметрах.

Вариантные расчеты проведены с числом нейтронов в поколении от 400 до 400 000<sup>2</sup> и общей статистикой до 1 млн поколений (рис. 5, см. также цветную вкладку). Результаты  $K_{эф} = 0,884$  с максимальным значением  $R_f$ -распределения  $\sim 0,403$  в ячейке 1 согласуются с результатами работ [8–10]. Анализ полученных результатов показывает, что для обеспечения устойчивых

<sup>2</sup>Это эквивалентно  $\sim 1000$  и 1 млн нейтронов в поколении в расчетах по MCNP и MCU.

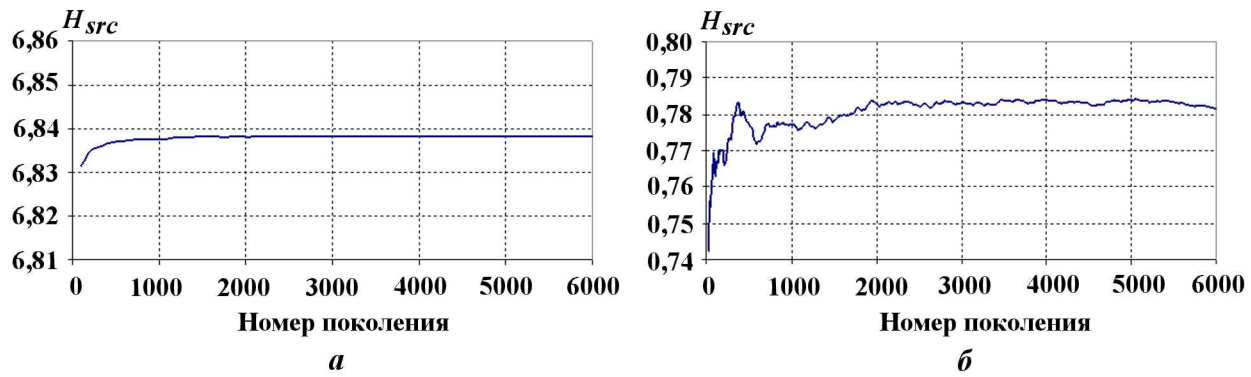


Рис. 3. Изменение  $H_{src}$  в расчетах систем:  $a$  — GODIVA;  $b$  — K\_of\_the\_World

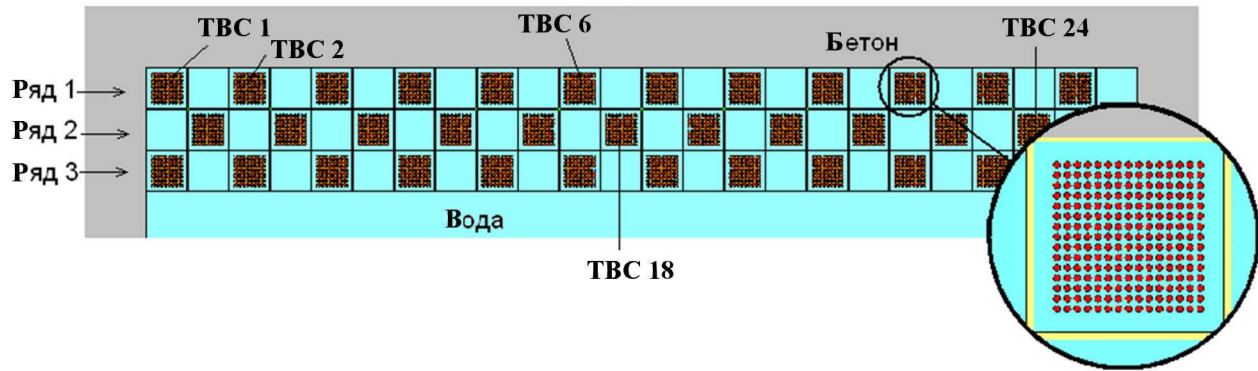


Рис. 4. Геометрия бенчмарка шахматная доска

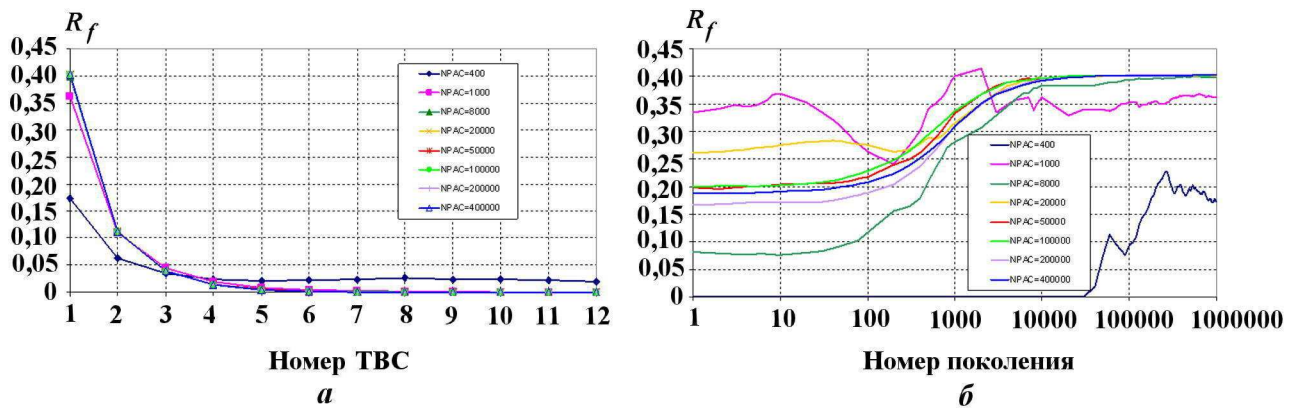


Рис. 5.  $R_f$ -распределение в системе шахматная доска:  $a$  — покассетное в ряду 1;  $b$  — в ТВС 1 (бетон)

$R_f$ -распределений необходимо задавать не менее 8 000 частиц в одном поколении и моделировать не менее 10 000 активных поколений нейтронов. Для рассматриваемой системы с достаточно простой геометрией указанная статистика выглядит непропорционально большой. Для осмысления полученного результата используется энтропия Шеннона.

Анализ значений энтропии Шеннона  $H_{src}$  с заметными перепадами показывает, в частности (рис. 6, см. также цветную вкладку), что для  $NPAC = 1000$  завершение расчета после  $2 \cdot 10^5$  поколений не гарантирует получения корректного распределения. Схожий характер изменения  $H_{src}$  наблюдается и для  $NPAC \geq 20000$ , что подтверждает нецелесообразность дальней-

шего увеличения числа нейтронов в поколении для улучшения сходимости.

Характерные изменения  $H_{src}$  для выделенных ТВС (см. рис. 4) и всей системы в потвэльном приближении (рис. 7, см. также цветную вкладку) позволяют оценить степень "неустойчивости" распределений  $R_f$  в ТВС на фоне изменения энтропии Шеннона всей системы.

Анализ  $H_{src}$  подтверждает существенно более медленную покассетную сходимость по сравнению с потвэльной сходимостью внутри отдельной ТВС. При прогнозировании сходимости распределений наряду с анализом динамики изменения  $H_{src}$  возможно использование и самих значений  $H_{src}$ , меняющихся в интервале  $[0, \log_2 N]$  согласно (1). При этом нулевое значение соответствует вырожденному (точечному) распределению, а максимальное — равномерному. Вы-

ход энтропии Шеннона на стационарное значение служит основанием для завершения расчета. Наметившаяся тенденция изменения  $H_{src}$  только в сторону убывания или только в сторону возрастания указывает на сходимость к более острому или пологому распределению соответственно. Так, для ТВС 1 энтропия Шеннона с меньшим стационарным значением по сравнению со значениями для других ТВС (см. рис. 7) указывает на явное различие  $R_f$ -распределений в ТВС 1 и ТВС 2, 6, 18, 24.

Таким образом, используя значения энтропии Шеннона и учитывая ее изменения, можно улучшить прогноз сходимости и устойчивости вычисляемых распределений. Также энтропия Шеннона может быть полезна при определении оптимальных расчетных параметров при проведении многовариантных расчетов.

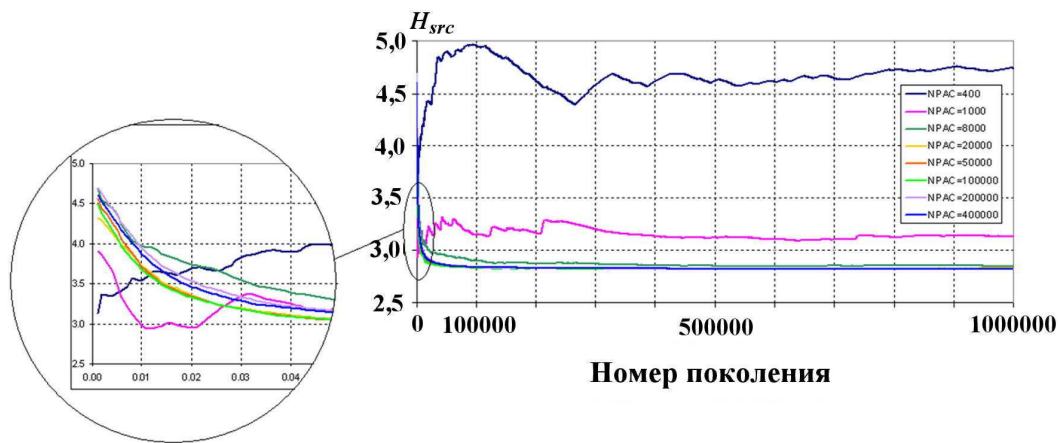


Рис. 6. Изменение энтропии Шеннона  $H_{src}$  для разного числа нейтронов в поколении в зависимости от статистики

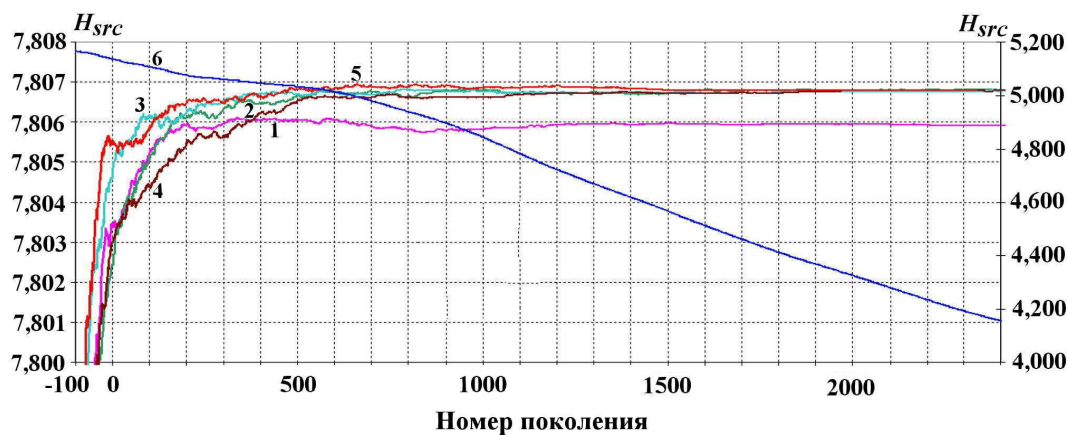


Рис. 7. Изменение  $H_{src}$  для ТВС 1 (1), 2 (2), 6 (3), 18 (4), 24 (5) (шкала слева) и всей системы шахматная доска (6) (шкала справа)



**Особенности распределений в системе шахматная доска при малых изменениях состава бетонных стенок.** Для систем с доминантным отношением, близким к единице, обоснование корректности полученных результатов приобретает особую значимость. При этом оценка чувствительности вычисляемых нейтронно-физических характеристик к малым возмущениям представляется одним из обязательных и естественных этапов в расчетах таких систем. В качестве малого возмущения для бенчмарка *шахматная доска* рассмотрены незначительные различия в композиционных составах материала граничных стенок (табл. 3). Во многих опубликованных работах, посвященных этой проблеме, в частности [12, 13], выводы о корректности  $R_f$ -распределений сделаны для базового варианта рассматриваемой системы. Вместе с тем  $R_f$ -распределения в системе, отличающейся от базового варианта лишь незначительными изменениями состава бетонных стенок, демонстрируют сильную чувствительность

результата к малым возмущениям.

Для системы *шахматная доска* с железобетонными (ж/б) стенками максимумы покассетного  $R_f$ -распределения в ряду 1 приходятся на разные ТВС центральной области (рис. 8, см. также цветную вкладку).

Наглядное отображение позволяет оценить различия полученных  $R_f$ -распределений в системе с бетонными и ж/б стенками (рис. 9, см. также цветную вкладку, где синий цвет соответствует минимальному значению, а красный — максимальному). Для системы с бетонными стенками максимум  $R_f$ -распределения находится в ячейке 1 ряда 1, что соответствует результатам работ [8, 9]; в системе с ж/б стенками максимум оказывается размазанным по нескольким центральным ТВС. Полученные различия вызывают вопрос о корректности вычисляемого  $R_f$ -распределения.

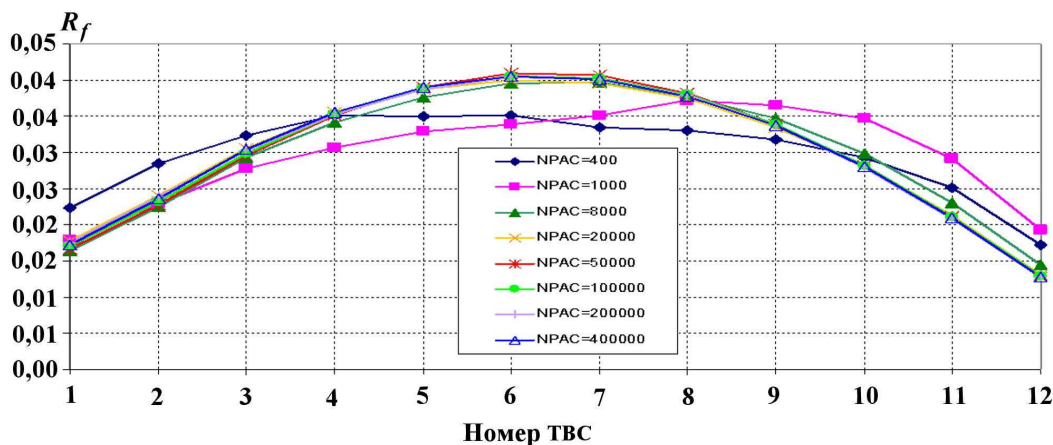
Для выяснения особенностей отражающих свойств бетонных стенок разного композиционного состава рассмотрены системы с укрупненными топливными макроячейками, состоящими из  $3 \times 3$  и  $3 \times 1$  исходных ТВС (рис. 10). Для обеих систем максимум  $R_f$ -распределения достигается в макроячейке 1 со значениями около 0,99 и 0,95 соответственно. Таким образом, практически одинаковое балансовое соотношение нейтронов *поглощение—отражение* для обоих составов бетона позволяет сделать вывод, что измененный состав бетонных стенок не может быть определяющим фактором качественного изменения  $R_f$ -распределений, что требует дополнительного анализа корректности  $R_f$ -распределения.

Таблица 3

Композиционный состав стенок хранилища

Нуклид	Бетон, $10^{24}$ ат/см <sup>3</sup> [8]	Железобетон, $10^{24}$ ат/см <sup>3</sup> [14, 15]*
O	$4,33854 \cdot 10^{-2}$	$3,61 \cdot 10^{-2}$
Fe	—	$9,12 \cdot 10^{-4}$
H	$5,54439 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-2}$
C	$6,98002 \cdot 10^{-3}$	—
Si	$7,71090 \cdot 10^{-3}$	$8,81 \cdot 10^{-3}$
Ca	$8,95927 \cdot 10^{-3}$	$2,96 \cdot 10^{-3}$
Al	—	$9,06 \cdot 10^{-4}$

\*Один из вариантов бетона на основе портландцемента.

Рис. 8.  $R_f$ -распределение в ряду 1 для системы с ж/б стенками

Использование энтропии Шеннона позволяет оценить устойчивость  $R_f$ -распределения. Для системы с бетонными стенками характер изменений  $H_{src}$  (кривая 1, рис. 11) указывает на медленную сходимость  $R_f$ -распределения. В то же время для системы с ж/б стенками поведение энтропии Шеннона со скачкообразными изменениями (кривая 2, рис. 11) указывает на неустойчивость получае-

мого распределения на стадии счета неактивных поколений и устойчивость  $R_f$ -распределения после счета примерно 2000 активных поколений. При этом необходимы специальные исследования для оценки корректности или некорректности получаемого распределения.

Анализ собственных коэффициентов размножения нейтронов для каждой ТВС, вычисленных при запуске вторичных нейтронов деления в остальных ТВС (рис. 12), так-

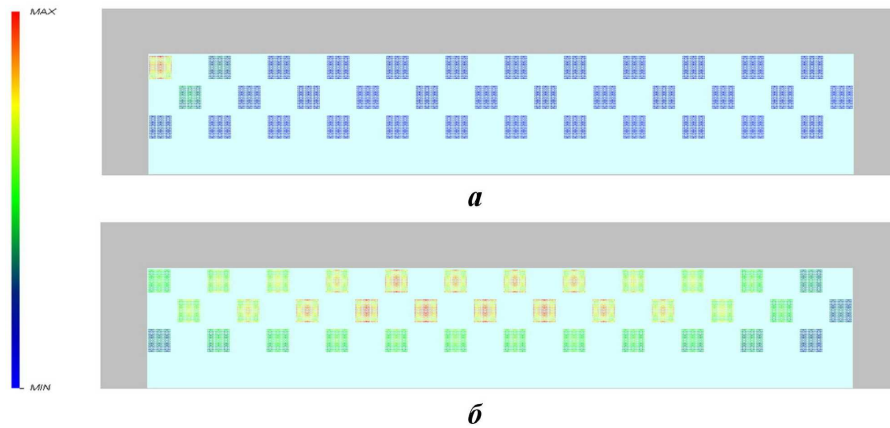


Рис. 9.  $R_f$ -распределение в системе с бетонными (а) и ж/б (б) стенками

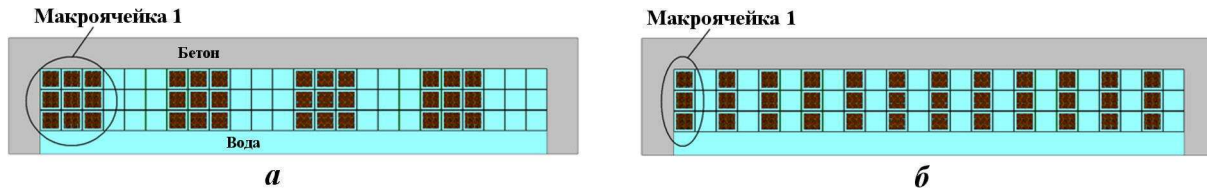


Рис. 10. Геометрия бенчмарка шахматная доска с макроячейками  $3 \times 3$  (а) и  $3 \times 1$  (б)

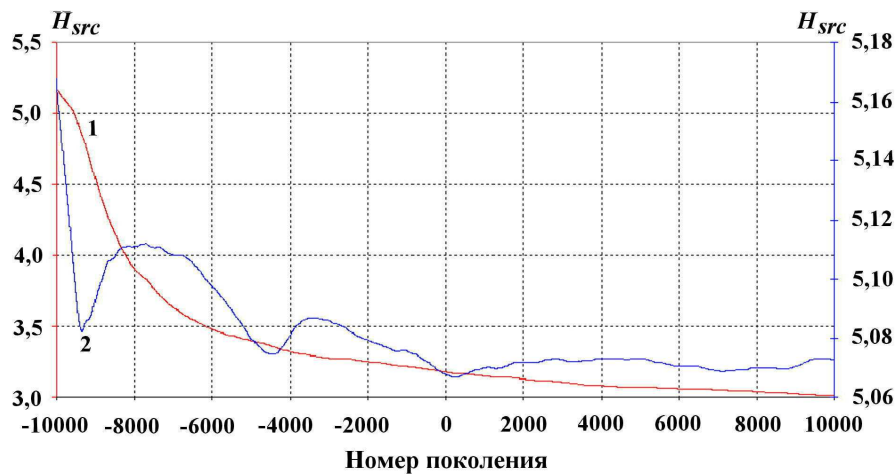


Рис. 11. Изменение энтропии Шеннона в бенчмарке шахматная доска с бетонными (1, шкала слева) и ж/б (2, шкала справа) стенками



же заставляет усомниться в корректности  $R_f$ -распределений на рис. 8. Сравнение кривых  $R_f$ -распределений (рис. 13) дает основание предположить, что в системе с ж/б стенками  $R_f$ -распределение должно быть равномерным или со слабо выраженным максимумом в ТВС 1.

Доминантное отношение для системы с исходными бетонными и ж/б стенками составляет 0,9974 и 0,9996 соответственно (рис. 14). В настоящее время не существует универсального критерия, позволяющего ранжировать исследуемые системы в соответствии с  $DR$ -значением. При сопоставлении результатов для однотипных систем значение доминантного отношения позволяет выявлять тенденции, обуславливающие проведение уточняющих расчетов с детальным анализом нейтронно-физических характеристик.

Полученные результаты демонстрируют необходимость расширения алгоритмических возможностей при моделировании переноса ней-

тронов в системах с доминантным отношением, близким к единице. Возможно, для таких систем целесообразно использование смешанных алгоритмов, поскольку использование только традиционного метода поколений при моделировании переноса нейтронов не позволяет получать истинные распределения ни при каких расчетных параметрах.

Основные сложности при обосновании полученных распределений обусловлены, прежде всего, недооцененной погрешностью расчета. Известно, что при моделировании методом поколений имеется устойчивая корреляция между соседними поколениями. Еще в 1970-е годы отмечалась некорректность вычисляемой погрешности в реакторных расчетах нейтронных потоков и функционалов с помощью методов Монте-Карло [2, 11, 13]. На сегодняшний день универсального метода корректного вычисления погрешности, пригодного для расчета распределений в любых реакторных системах, не существу-

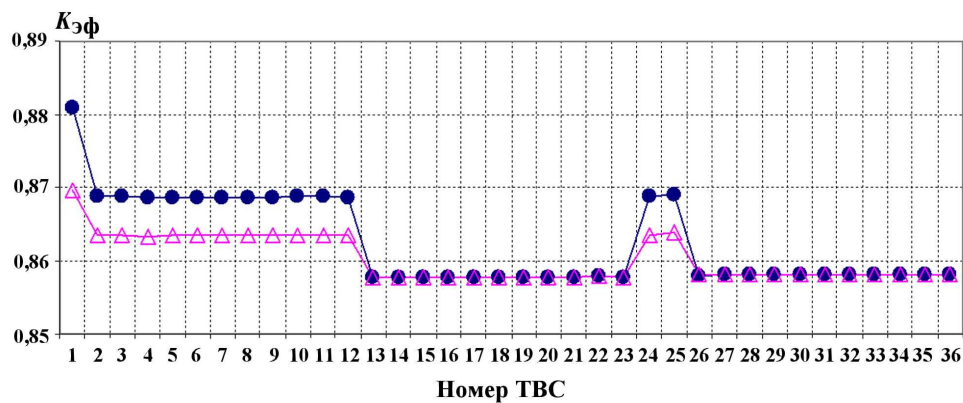


Рис. 12. Собственные коэффициенты размножения нейтронов в системе шахматная доска с бетонными (—●—) и ж/б (—△—) стенками

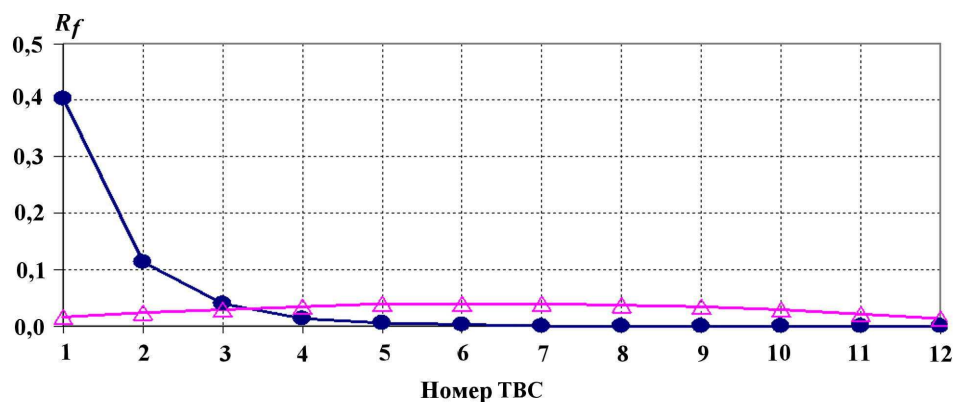


Рис. 13.  $R_f$ -распределение в бенчмарке шахматная доска с бетонными (—●—) и ж/б (—△—) стенками

ет. Изменение подхода к вычислению погрешности при расчете функционалов с использованием кодов Монте-Карло, увеличение погрешности как минимум на порядок при расчете нейтронных потоков в реакторных системах неоднократно обсуждались на международных форумах и рассматривались в научной литературе.

Для конкретных систем с учетом особенностей их компоновки предлагаются различные методы оценки поправочных коэффициентов для корректировки (всегда в сторону увеличения) вычисляемых погрешностей. В частности, в [12] рассматривается возможность использования формулы, содержащей отношение площади модели к площади миграции в среде, которое обратно пропорционально отличию доминантного отношения от единицы. Для систем с доминантным отношением, близким к единице, проблема вычисления погрешности еще больше

усложняется. Для бенчмарка *шахматная доска* с ж/б стенками поправочный коэффициент приводит к расширению границ доверительного интервала ( $\sigma^*$ ) почти в 20 раз. Аппроксимируемая в пределах только  $3\sigma^*$ -интервала кривая  $R_f$ -распределения может рассматриваться в качестве реального распределения с максимумом в ТВС 1 (рис. 15).

В настоящей версии TDMCC, так же как в известных зарубежных кодах Монте-Карло MCNP-4, MCNP-5 и KENO, погрешность вычисляемых функционалов представляется только на основе среднеквадратичного отклонения результатов от среднего без учета корреляции соседних поколений. В большей степени подобная корреляция проявляется в расчетах слабосвязанных систем, что в результате может приводить к смещению оценок локальных функционалов и недооценке их погрешности.

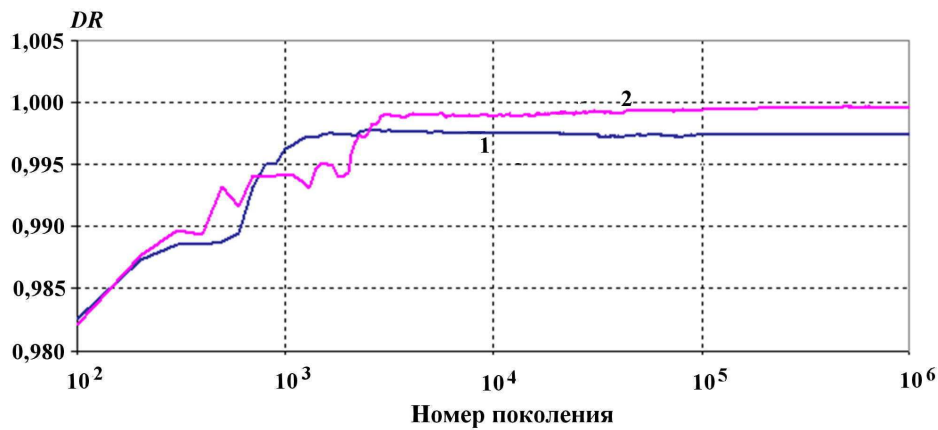


Рис. 14. Изменение  $DR$  в зависимости от статистики в бенчмарке *шахматная доска* с бетонными (1) и ж/б (2) стенками

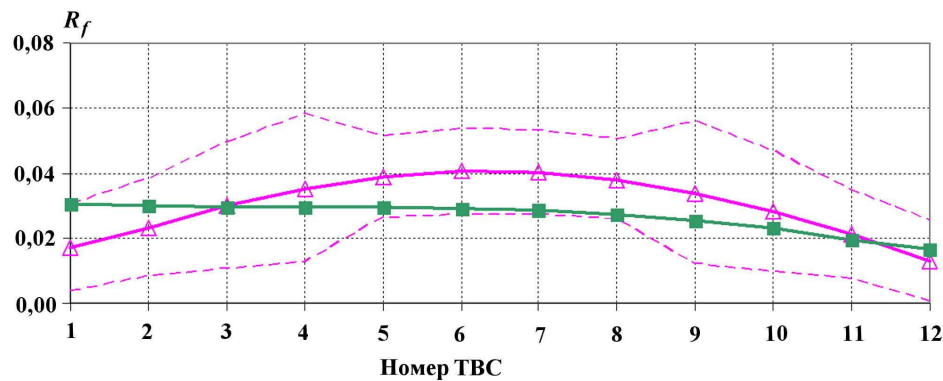


Рис. 15. Кривые  $R_f$ -распределения бенчмарка *шахматная доска* с ж/б стенками:  $\text{---}\triangle\text{---}$  — расчетная;  $\text{---}\text{---}\text{---}$  — окаймляющие  $3\sigma^*$ -интервал;  $\text{---}\blacksquare\text{---}$  — аппроксимируемая

## Заключение

По итогам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Знание доминантного отношения и энтропии Шеннона способствует улучшению прогнозирования и обоснованию распределений функционалов.
2. Реализация в программе TDMCC двух методов вычисления доминантного отношения, учитывающих особенности компоновки исследуемых систем, повышает надежность расчета доминантного отношения.
3. Распределения скоростей реакций в системе шахматная доска с доминантным отношением, близким к единице, наглядно демонстрируют имеющиеся ограничения в расчетах нейтронных потоков методом поколений. Возможно, для подобных систем повышение надежности вычисляемых функционалов можно обеспечить с помощью гибридных методов, включающих специально разработанные алгоритмы Монте-Карло, базирующиеся на использовании матрицы деления, и детерминистские подходы.

## Список литературы

1. *Соболь И. М.* Численные методы Монте-Карло. М.: Наука, 1973.
2. *Armishaw M., Blomquist R., Naito Y. et al.* Source Convergence in Criticality Safety Analyses. No 5431. OECD/NEA, 2006.
3. *Carney S. E., Brown F.B., Kiedrowski B. C., Martin W. R.* Fission Matrix capability for MCNP. Part I — Theory // M&C. Sun Vallue, Idaho. May 5—9, 2013.
4. *Sutton T. M., Romano P. K., Nease B. R.* On-the-fly Monte Carlo dominance ratio calculation using the Noise Propagation Matrix progress // Nuclear Science and Technology. 2011. Vol. 2. P. 749—756.
5. *Nease B., Brown F., Ueki T.* Dominance ratio calculations with MCNP // Int. Conf. on the Physics of Reactors. Switzerland. September 14—19, 2008.
6. Программа: TDMCC (Time-Dependent Monte Carlo Code). Свидетельство о гос. регистрации №2010614412 // Электронный бюллетень. 2010. № 2. <http://www.fips.ru>.
7. *Brown F. B.* On the use of Shannon entropy of the fission distribution for assessing convergence of Monte Carlo criticality calculations // PHYSOR-2006. Vancouver, Canada. September 10—14, 2006.
8. Source Convergence Benchmark 1: Checkerboard storage of assemblies / Ed. by N. Smith. OECD/NEA, 2002.
9. *Олейник Д. С.* Расчет слабосвязанных систем методом Монте-Карло // Атомная энергия. 2005. Т. 99. Вып. 4. С. 256—264.
10. *Митенкова Е. Ф., Колташев Д. А., Кузуб П. А.* Распределение скорости реакции деления в слабосвязанной системе для тестовой модели "Шахматная доска" // Там же. 2014. Т. 116. Вып. 6. С. 345—349.
11. *Майоров Л. В.* Оценки смещения результатов при расчете реакторов и хранилищ ядерного топлива методом Монте-Карло // Там же. 2005. Т. 99. Вып. 4. С. 243—256.
12. *Городков С. С.* Быстрая оценка погрешности распределения нейтронов в большом реакторе при расчете методом Монте-Карло // Там же. 2007. Т. 103. Вып. 2. С. 115—119.
13. *Blomquist R., Nouri A., Armirshaw M. et al.* OECD/NEA source convergence benchmark program: overview and summary of results // Proc. of the 7th Int. Conf. on Nuclear Criticality Safety. Tokai, Ibaraki, Japan. October 20—24, 2003. OECD/NEA, 2003. Vol. 1. P. 278—282.
14. *Машкович В. П., Кудрявцева А. В.* Защита от ионизирующих излучений. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1995.
15. *Бродер Д. Л., Зайцев Л. Н., Комочков М. Н. и др.* Бетон в защите ядерных установок. М.: Атомиздат, 1973.

Статья поступила в редакцию 20.03.15.

TDMCC CODE APPLICATION TO SOLVE PROBLEMS WITH A DOMINANT RATIO CLOSE TO ONE / E. F. Mitenkova, T. V. Semenova (the RAS IBRAE, Moscow; FSUE "RFNC-VNIIEF", Sarov, Nizhny Novgorod region).

New capabilities of the TDMCC code for the analysis of the fission rate distribution in weakly coupled systems are presented. The methods implemented in the TDMCC code to calculate the dominant ratio and Shannon's entropy are considered. For systems with the dominant ratio value close to 1, the relation between the convergence rate of functionals and Shannon's entropy is demonstrated. An example is given, in which underestimation of errors in the calculated functionals and the specifics of the algorithms used to solve the criticality problems lead to inconsistent results in various options of computations with small variations of the original system parameters.

*Keywords:* Monte Carlo method, method of generations, a weakly coupled system, dominant ratio, Shannon entropy.

---