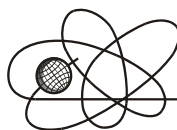




Российская Академия Наук

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



ИБРАЭ

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**NUCLEAR SAFETY
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № ИBRAE-2015-02

Preprint IBRAE-2015-02

П.А. Кизуб, Е.Ф. Митенкова

**ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ ДЕЛЕНИЯ В РАСЧЕТАХ
МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ
СЛАБОСВЯЗАННЫХ СИСТЕМ**

Москва
2015

Moscow
2015

Кизуб П.А. Источник нейтронов деления в расчетах методом Монте-Карло для слабосвязанных систем / П.А. Кизуб, Е.Ф. Митенкова, — (Препринт / Ин-т проблем безопас. развития атом. энергетики РАН, № IBRAE-2015-02). — М. : ИБРАЭ РАН, 2015. — 30 с. — Библиогр.: 11 назв. — 30 экз.

Корректность источника нейтронов деления приобретает особое значение в расчетах распределений нейтронно-физических характеристик при решении задач методом Монте-Карло. Для надкритических и подкритических систем рассматривается формирование источника нейтронов при разных расчетных параметрах. Анализируется устойчивость источника нейтронов и его чувствительность к статистическим параметрам в расчетах распределения скорости деления для слабосвязанных систем и твэльных ячеек. Приводятся сравнительные значения доминантного отношения, вычисленные методом шумовой матрицы и матрицы деления с помощью программы TDMCC.

©ИБРАЭ РАН, 2015

Kizub, P. Neutron source for loosely-coupled systems in Monte-Carlo criticality calculation / P.A. Kizub, E.F. Mitenkova— (Preprint / Nuclear Safety Institute RAS, May 2015, № IBRAE-2015-02). — Moscow : NSI RAS, 2015. — 30 p. — Bibliogr.: 11 items.

The neutron source correctness has a special significance in neutronic calculations using Monte Carlo methods. For supercritical and subcritical systems the evolution of neutron source is investigated for different calculation parameters. Stability and sensitivity of neutron source to variations of statistical parameters are analyzed for loosely-coupled systems and pin-cells. The calculation dominance ratios for pin-cells are obtained by fission matrix and noise propagation matrix methods using TDMCC program. The comparison of dominance ratio values is presented.

©Nuclear Safety Institute, 2015

Источник нейтронов деления в расчетах методом Монте-Карло для слабосвязанных систем

П.А. Кизуб, Е.Ф. Митенкова

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

115191, Москва, ул. Б. Тульская, 52

тел.: (495) 955-22-02, факс: (495) 955-20-29, эл. почта: mit@ibrae.ac.ru

Содержание

Введение	3
1 Представление источника нейтронов деления в MCNP	3
2 Ячеечные бенчмарк-расчеты задач на критичность методом Монте-Карло	5
2.1 Твэл с топливом одного обогащения	5
2.2 Твэл с топливом разного обогащения.....	6
3 Бенчмарк "шахматная доска"	12
3.1 Описание геометрии	12
3.2 Отображение SRC-источника при некорректных R_f -распределениях	12
3.3 Отображение SRC-источника при корректных R_f -распределениях	15
4 Особенности распределений нейтронов в системе "шахматная доска" с разными составами бетонных стенок	17
4.1 Вид R_f -распределения	17
4.2 Отображение SRC-источника в расчетах с ЖБ	18
4.3 Отображение SRC-источника в расчетах с ЖБ-1	20
4.4 Отображение SRC-источника в расчетах с ЖБ-2, 3	23
5 Особенности SRC-источника при больших значениях параметра генерации нейтронов.....	24
6 Доминантное отношение как характеристика "качества" системы	29
Выводы.....	29
Литература	30

Введение

Устойчивость и корректность распределения нейтронов деления (источника) является одним из важнейших факторов при решении задач на критичность методом Монте-Карло. В связи с этим анализ формируемого источника становится необходимым этапом расчета. В расчетах нейтронных потоков и соответствующих функционалов (как свертка потока с микроскопическими ядерными данными) особую значимость приобретает формирование источника с точки зрения его устойчивости.

В работе анализируется динамика источника в расчетах на критичность для трех систем [1], включающих:

- надкритическую систему – твэл с топливом одного обогащения,
- надкритическую систему – твэл с топливом разного обогащения,
- слабосвязанную подкритическую систему «шахматная доска».

Все расчеты выполнены с помощью MCNP5 [2].

1 Представление источника нейтронов деления в MCNP

При расчётах на критичность в MCNP источник (координаты (x, y, z) точек, где произошло деление) сохраняется в файл *srctp*. Обновление источника осуществляется в процессе расчёта в соответствии с заданными параметрами карты *PRDMP* [3]. Сформированный таким образом SRC-источник (соответствующий файл *srctp*) можно использовать для изучения динамики источника и мгновенного отображения распределения.

Файл с источником *srctp* обрабатывается при помощи вычислительного модуля *stat-SRC* [4], позволяющего представлять бинарные массивы в виде списка координат точек стартовых нейтронов. С помощью графического редактора *Gnuplot* [5] осуществляется выборка этих точек по направлению заданной оси. Если источник нейтронов анализируется вдоль оси z (например, по высоте твэла), то выборка точек происходит в порядке увеличения их z -координат с определением количества точек, попадающих в интервалы $(z, z+\Delta z)$. Результаты подсчета числа нейтронов для каждого интервала $(z, z+\Delta z)$ отображаются в виде гистограммы. Количество столбцов в гистограмме определяет задаваемый параметр N_{bins} .

При решении задач различной сложности необходим анализ гистограмм для разных значений N_{bins} , позволяющих проводить адекватную оценку качества источника. Так для задач со сложной геометрией и сильной гетерогенностью значение N_{bins} может оказаться большим, нежели для задач с простой геометрией.

Распределение *SRC*-источника исследуется для двух моделей твэла по его высоте (вдоль оси z) и для бенчмарка «шахматная доска» (вдоль оси x). В расчетах бенчмарка с числом нейтронов в поколении (N_{gen}) 20 000 все точки *SRC*-источника, начиная со статистики (*NPS*) 100 млн, приходятся на левую половину системы с координатами $-324 < x < -100$, включающих 12 топливных ячеек. Причем для достижения необходимого качества отображения *SRC*-источника не требуется большого количества разбиений по оси x . Для оценки среднего распределения нейтронов деления достаточно использовать гистограммы с $N_{bins} = 24$ (количество ячеек в каждом ряду системы). Поскольку все точки деления приходятся на 12 крайних левых ячеек, то *SRC*-источник качественно отражает распределение нейтронов деления уже для $N_{bins} = 8$ (рис. 1 а). Такое отображение источника позволяет оценивать распределение нейтронов деления в зависимости от статистики и отслеживать изменения *SRC*-источника в системе с увеличением статистики. Более частое разбиение (рис. 1 б-д) позволяет оценивать источник потвэльно. При необходимости подобный анализ *SRC*-источника может проводиться относительно любых заданных осей координат.

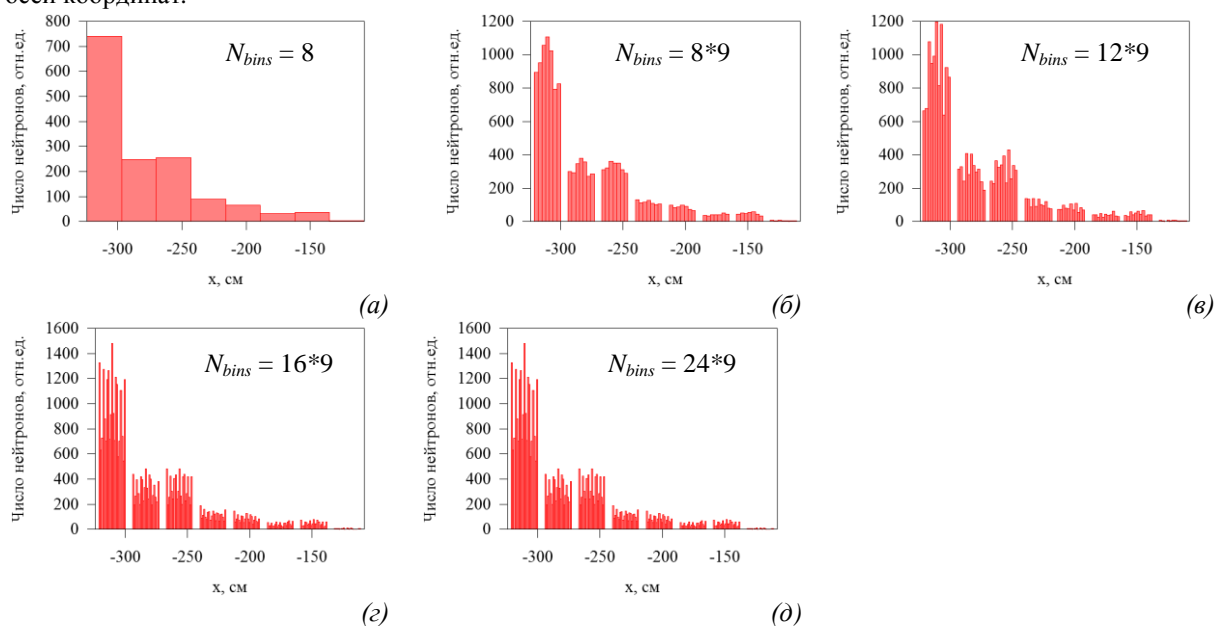


Рис. 1. *SRC*-источник для бенчмарка «шахматная доска» при $N_{gen} = 20\ 000$

2 Ячеечные бенчмарк-расчеты задач на критичность методом Монте-Карло

Для бенчмарков «шахматная доска» и твэл с топливом разного обогащения проводятся варианты расчеты на критичность с целью анализа динамики источника нейтронов деления. В качестве рассчитываемого функционала выбрана скорость деления нейтронов. Варьируются следующие параметры:

- число нейтронов в поколении,
- начальное распределение нейтронов деления (начальный источник),
- начальный набор псевдослучайных чисел.

Для дополнительного анализа такие же варианты расчеты выполняются для твэла с топливом одного обогащения.

2.1 Твэл с топливом одного обогащения

Распределение скорости реакции деления (R_f -распределение) и SRC -источник исследуются в твэле, состоящем из свежего диоксидного уранового топлива обогащением 3.5%, циркониевой оболочки и железных заглушек на концах. Высота твэла варьируется от 20 до 400 см. Модель в плане с размерами представлена на рис. 5.

Расчеты выполнены для бесконечной в плане квадратной решетки при $N_{gen} = 100\,000$ и равномерном начальном источнике ($SRC0$ -источник). Проведен высотный анализ для таких разбиений, чтобы концевика получились 5 или 10 см, а остальная часть имела бы равномерное разбиение:

- При 20 см – 5, 10 и 5 см (от низа).
- При 50 см – 5, 20, 20 и 5 см.
- При 100 см – 10 см, 4*20 см и 10 см.
- При 400 см – 10 см, 19*20 см и 10 см.

В результате R_f -распределения оказываются симметричными с выраженным максимумом в центре, что подтверждает корректность данных R_f -распределений (рис. 2). Коэффициент эффективного размножения нейтронов (K_{eff}) для данной системы составляет от 1.05 до 1.44 в зависимости от высоты твэла.

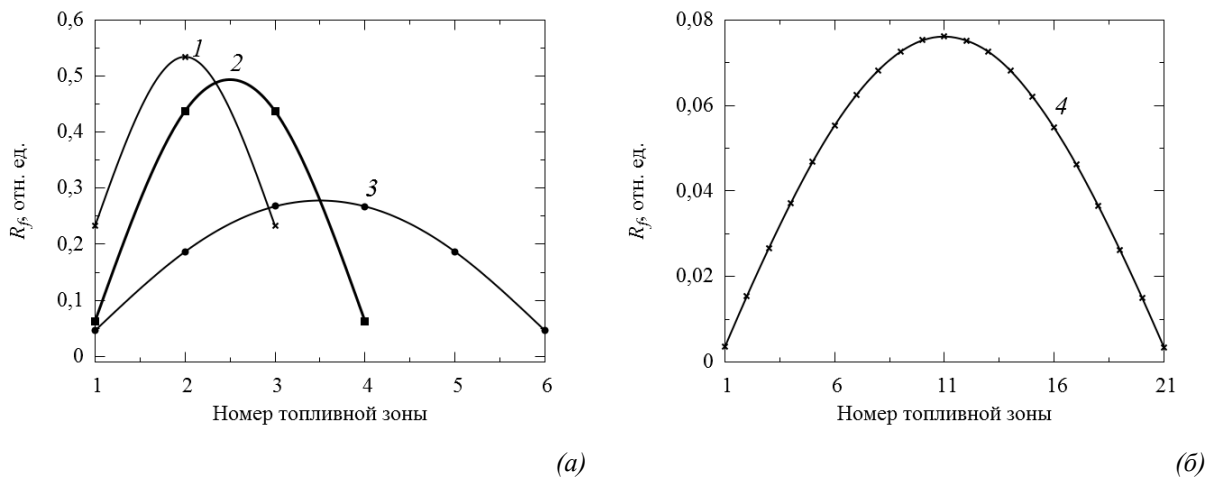


Рис. 2. R_f -распределение в твэле высотой 20 (1), 50 (2), 100 (3) и 400 см (4)

Распределение SRC -источника также как и R_f -распределение имеет симметричный вид относительно центра для всех выбранных высот, но для 20, 50 и 100 см наблюдается отличие, которое заключается в «подъемах» на краях твэла (рис. 3.). При отображении SRC -источника было использовано частое разбиение ($N_{bins} = 100$), что позволило увидеть изменения в распределении на концах твэла, вызванные наличием воды с трех сторон. Если уменьшить параметр N_{bins} до 10, то распределение сглаживается и фактически совпадает с соответствующим R_f -распределением (рис. 4.).

Таким образом, в расчетах твэла одного обогащения получены корректные R_f -распределения при корректных SRC -источниках.

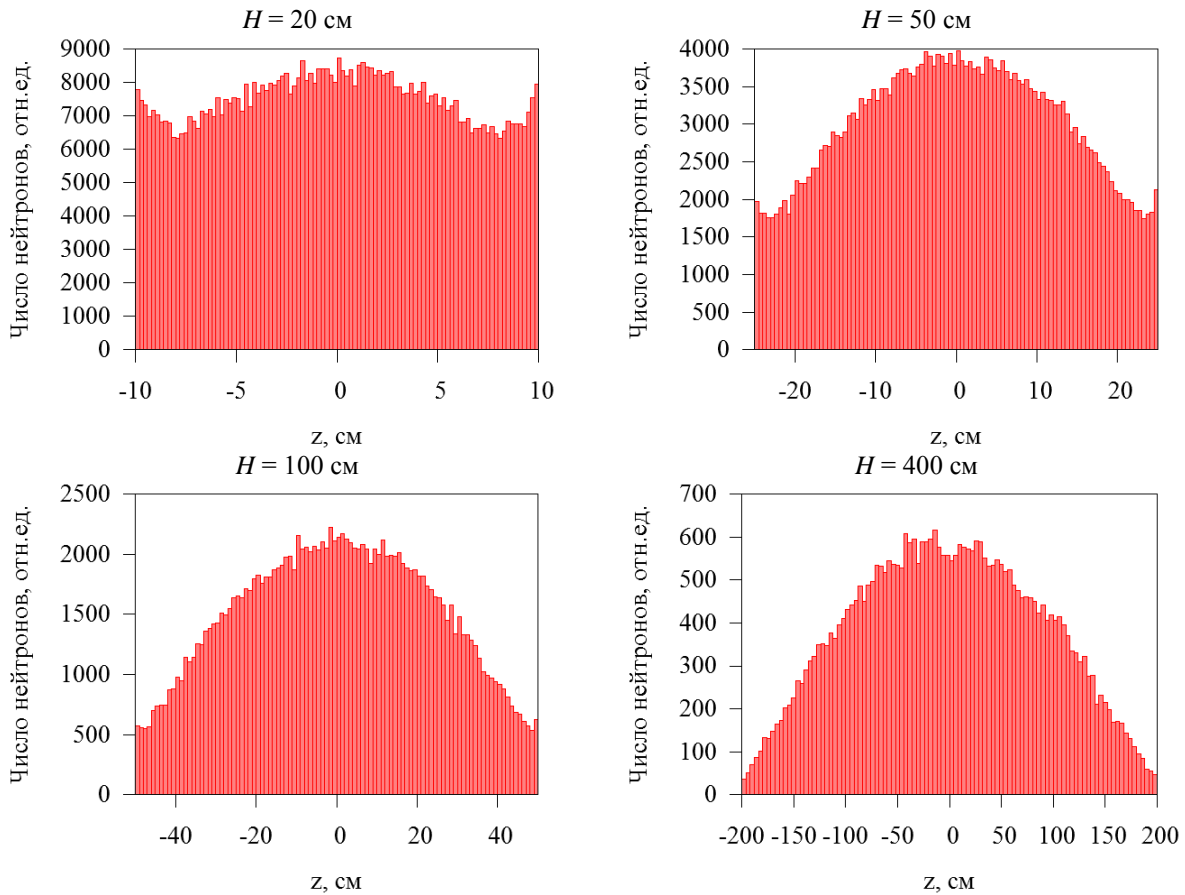


Рис. 3. SRC -источник в твэле разной высоты

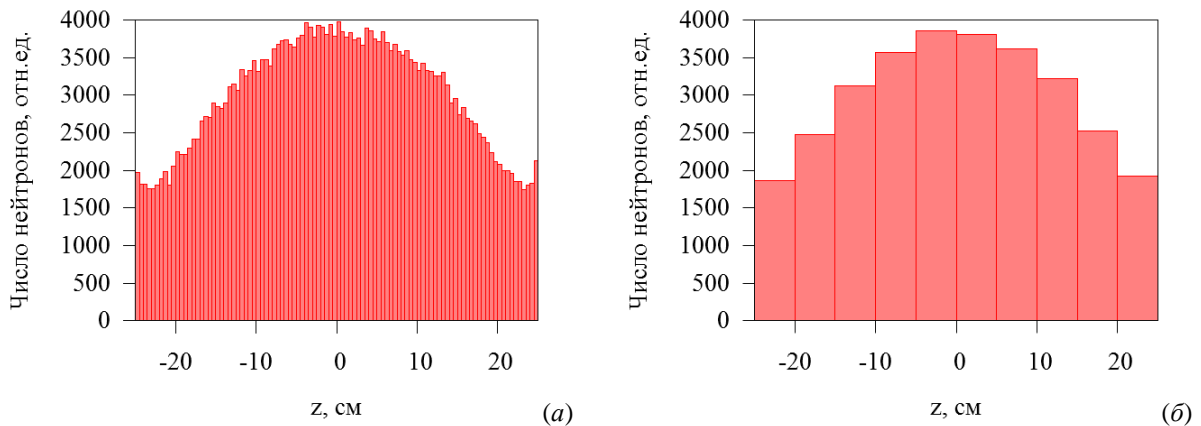


Рис. 4. Отображение SRC -источника в твэле высотой 50 см при $N_{bins} = 100$ (а) и 10 (б)

2.2 Твэл с топливом разного обогащения

Анализ распределений также проводится для твэла с топливом разного обогащения, находящегося в призме с водой (рис. 5). Геометрия и составы материалов выбраны согласно тестовой задаче, предложенной экспертной группой OECD NEA [1]. Твэл разбивается симметрично относительно плоскости $z = 0$ на 9 топливных зон, в каждой из которых размещается топливо обогащением 4.5% в зонах с 1 по 4 и с 6 по 9, а в 5 зоне – обогащением 0.7% (рис. 6).

Расчеты проводятся для бесконечной в плане квадратной решетки при равномерном $SRC0$ -источнике. Значение K_{eff} составляет ~ 1.34 .

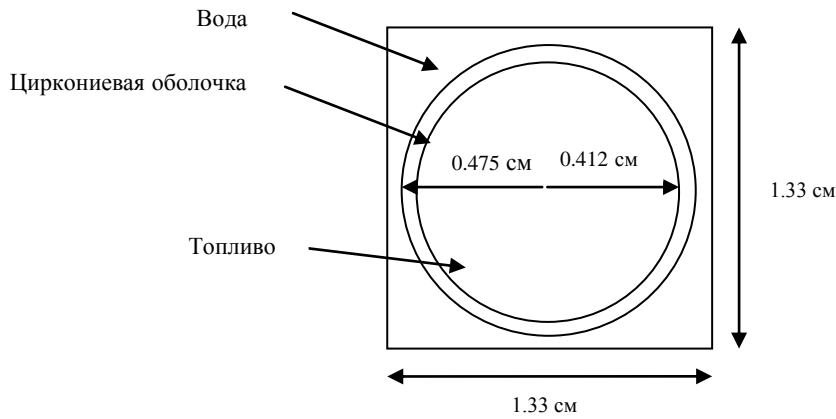


Рис. 5. Расчетная модель твэла в плане

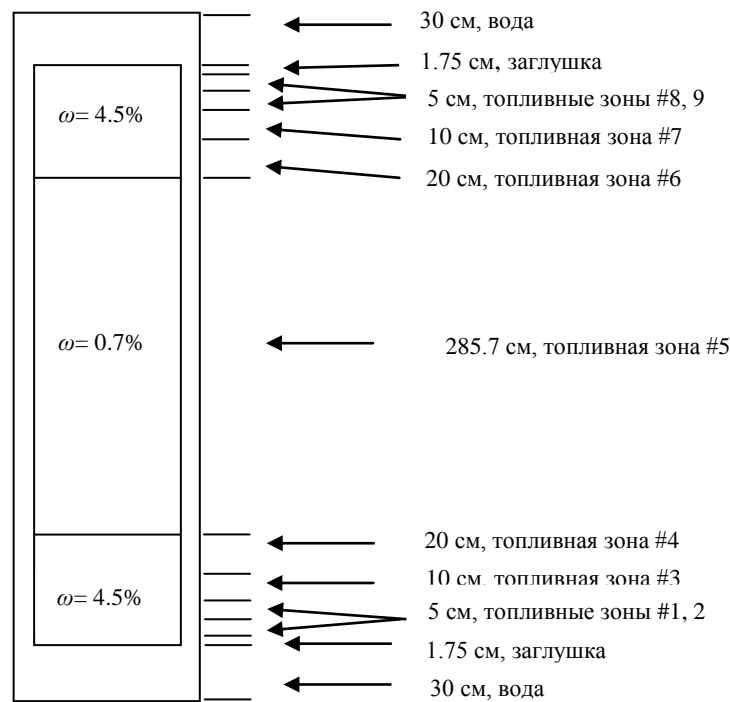


Рис. 6. Расчетная модель твэла по высоте

В расчетах симметричной модели (рис.6) при $N_{gen} = 10\,000$ получено несимметричное R_f -распределение (рис. 7). Для получения корректного результата были проведены расчеты с N_{gen} от 10 000 до 100 000 с различным начальным набором псевдослучайных чисел для нахождения оптимальных расчетных параметров. Такой расчет задается в MCNP с помощью карты *dbcn ... N* [3], позволяющей производить смещение начального псевдослучайного числа на N значений первых генерируемых историй. Полученные распределения представлены на рис. 8–10. На графиках изображены кривые, полученные в результате расчета без карты *dbcn ... N* (кривая «стандарт.») и в результате расчета с картами *dbcn ... 10, 13, 15* и *20* (кривые «*dbcn*») при $N_{gen} = 10\,000, 50\,000$ и $100\,000$ для $NPS = 2$ млрд. Также на графиках приведена кривая, отвечающая среднему распределению по всем значениям *dbcn* для определенного размера поколения.

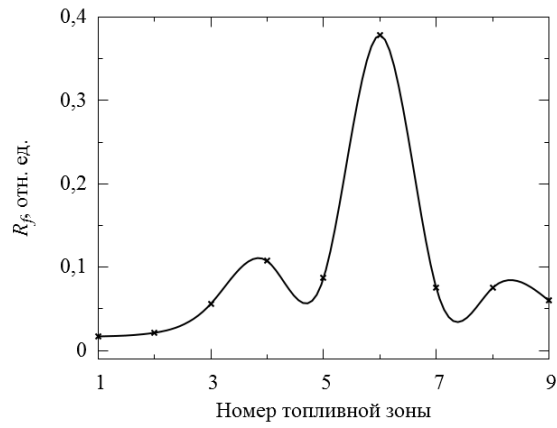


Рис. 7. R_f -распределение при $N_{gen} = 10\,000$

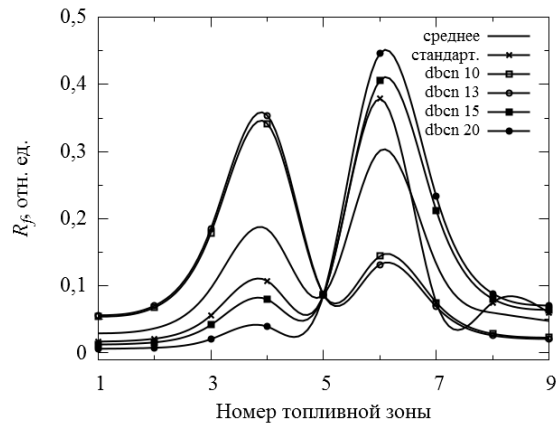


Рис. 8. R_f -распределение при $N_{gen} = 10\,000$ и различных $dbcn$

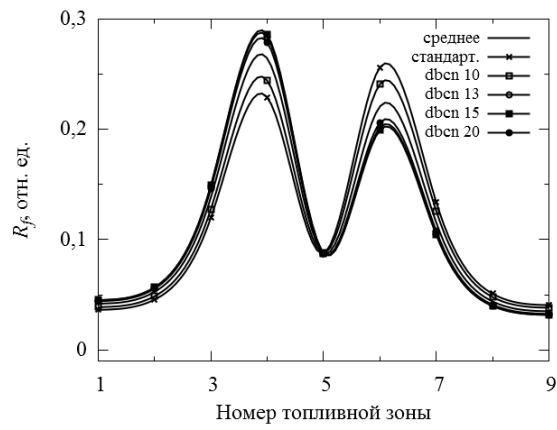


Рис. 9. R_f -распределение зоны при $N_{gen} = 50\,000$ и различных $dbcn$

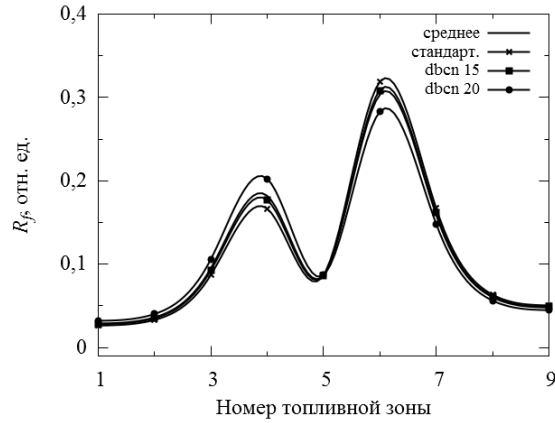
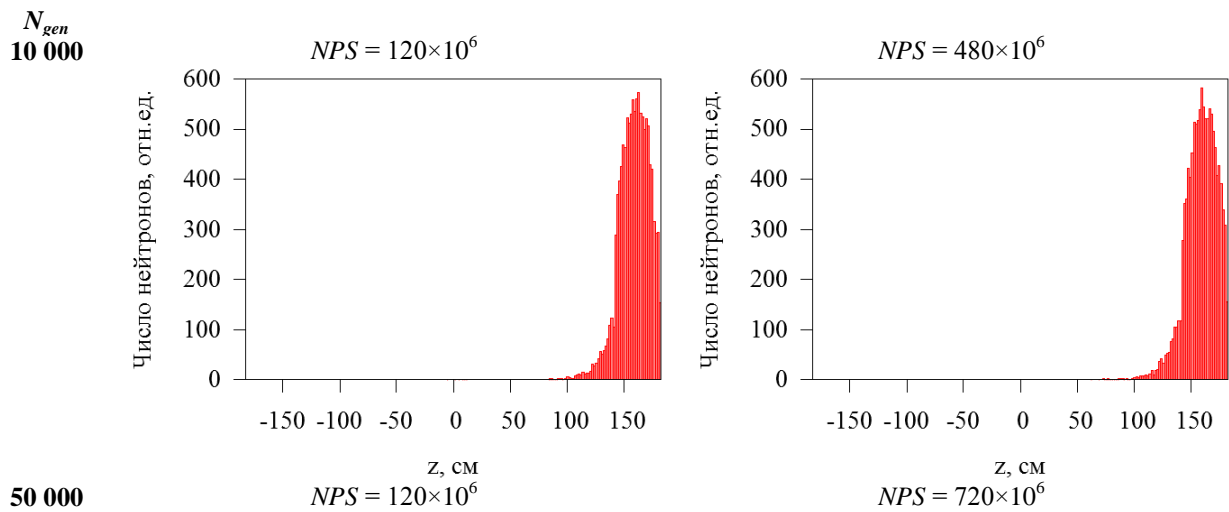


Рис. 10. R_f -распределение при $N_{gen} = 100\ 000n$ и различных $dbcn$

В результате при $N_{gen} = 10\ 000n$ кривая R_f -распределения имеет несимметричный вид для всех указанных значений в карте $dbcn$. При этом, характер кривой может меняться на противоположный в зависимости от значения $dbcn$: для $dbcn\ 10$ и 13 максимальное значение распределения приходится на четвертую зону, а для $dbcn\ 15$ и 20 – на шестую зону. Причем, в расчетах с одинаковым значением в карте $dbcn$, но с разным размером поколения также возможно получение максимальных значений R_f -распределения в разных топливных областях (например, для $dbcn\ 15$ в расчетах с $N_{gen} = 10\ 000$ и $50\ 000n$). Таким образом, в расчетах твэла с топливом разного обогащения при разных размерах поколения полученные R_f -распределения не имеют систематической зависимости от значения $dbcn$. Можно говорить о некотором случайном R_f -распределении для разных значений $dbcn$.

Вид SRC -источника для твэла с топливом разного обогащения (рис.11) имеет устойчивый несимметричный характер, причем даже при $N_{gen} = 100\ 000 - 200\ 000n$ и $NPS = 6.5$ млрд.



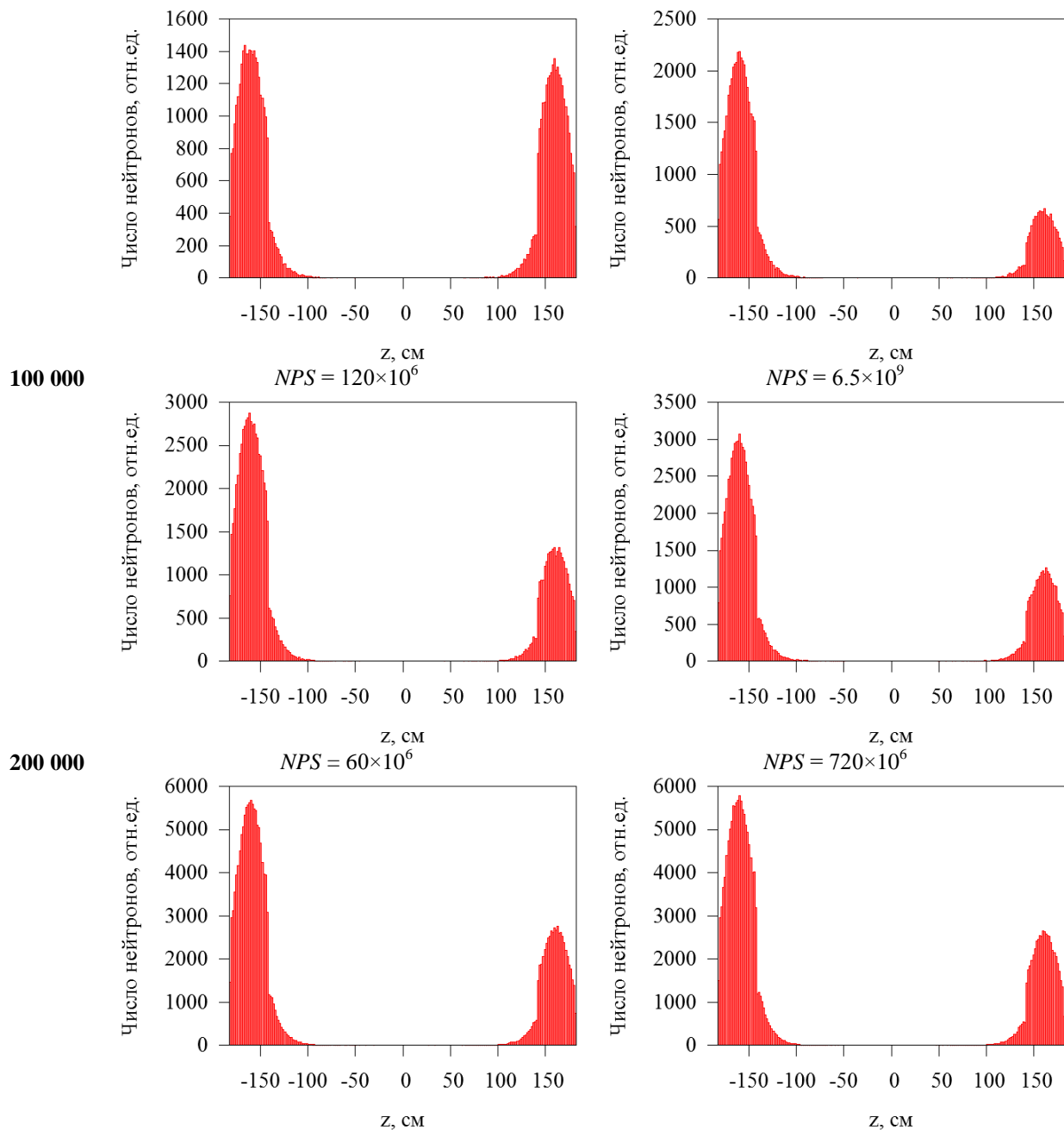


Рис. 11. Динамика SRC-источника в твэле с топливом разного обогащения при $N_{gen} = 10\ 000$, $50\ 000$, $100\ 000$ и $200\ 000$ н

Для исследования зависимости SRC-источника от высоты твэла проведен анализ распределений при уменьшенной в два раза высоте твэла ($H = 184.6$ см). Расчеты выполнены при $N_{gen} = 100\ 000$ н и равномерном SRCO-источнике для различных значений $dbcn$. Полученные SRC-источники для $NPS = 2 \times 10^9$ представлены на рис. 12.

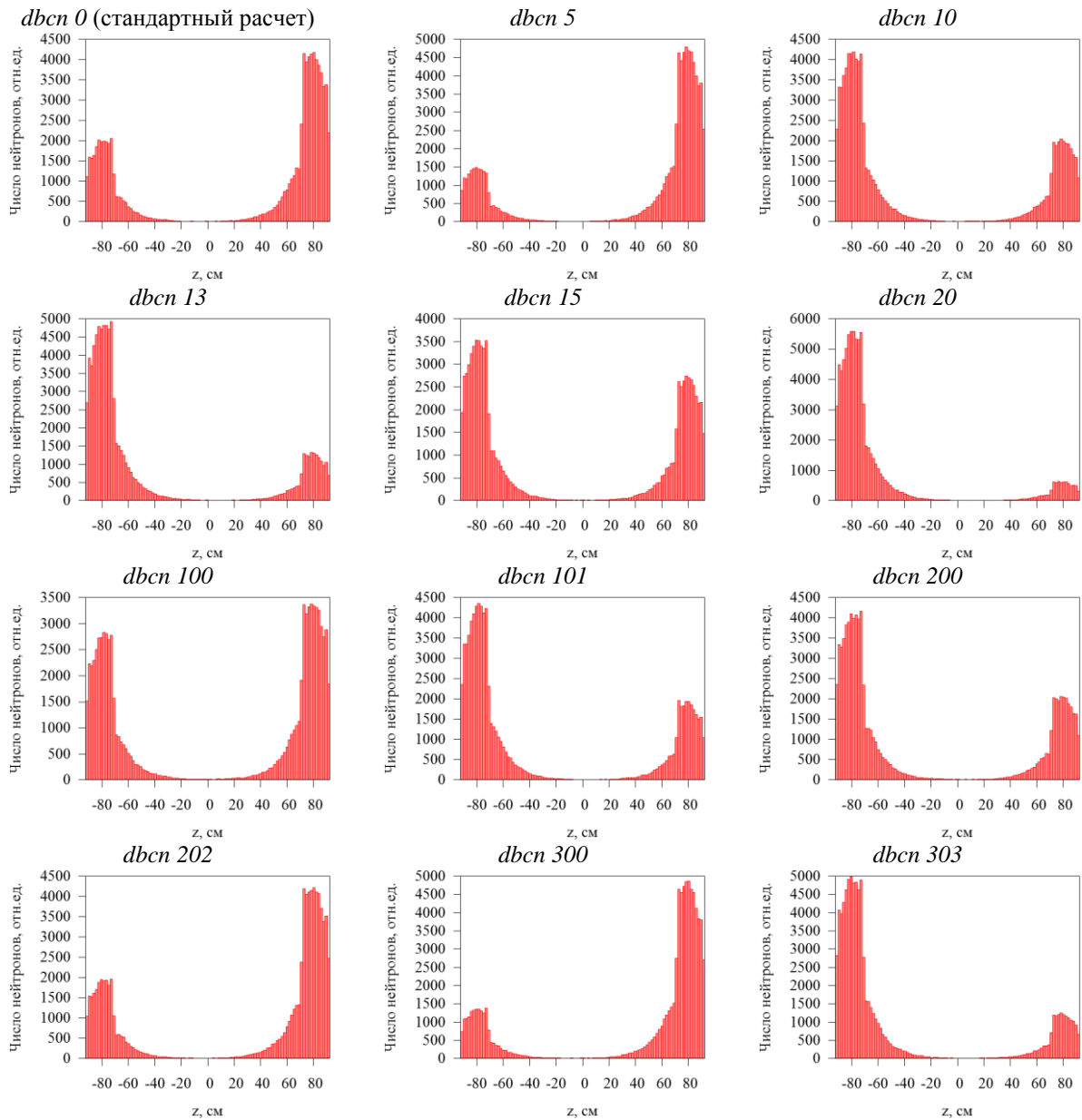


Рис. 12. Динамика SRC-источника при $N_{gen} = 100\ 000$ для разных $dbcn$

Для представленных значений $dbcn$ получены различные SRC-источники – с максимумом в верхней части твэла ($dbcn\ 0, 5, 202$ и 300) или в нижней части твэла ($dbcn\ 10, 13, 15, 20, 101, 200$ и 303). При определенных значениях $dbcn$ можно говорить о симметричном или почти симметричном распределении SRC-источника ($dbcn\ 100$). Таким образом, при различных значениях $dbcn$ подтверждается случайность в распределении SRC-источника для твэла высотой ~ 180 см аналогично R_f -распределению для твэла высотой ~ 360 см.

Исходя из анализа полученных SRC-источников твэла, можно предположить, что использующийся алгоритм формирования и выбора источников нейтронов деления нуждается в доработке.

3 Бенчмарк «шахматная доска»

В работе также исследуются распределения скорости деления и источника нейтронов деления для бенчмарка «шахматная доска» [1].

3.1 Описание геометрии

Бенчмарк «шахматная доска» (рис.13) состоит из трех рядов, в которых в шахматном порядке размещены ТВС и ячейки, заполненные водой. Систему, длина которой 7280 мм, ограничивают с трех сторон бетонные стенки толщиной 400 мм, а с четвертой стороны – слой воды толщиной 300 мм. Квадратная ТВС размером 270 мм с твэлами, размещенными по квадратной решетке 15×15 с шагом 14 мм, находится в стальном кожухе толщиной 5 мм с зазором 25 мм, заполненным водой. В качестве топлива используется свежее диоксидурановое топливо с обогащением 3.5%. Расчеты проводятся для трехмерной модели с потвэльным описанием геометрии. Все характеристики твэлов взяты из [1]. Высота твэлов – 3600 мм, высота стенок- 4200 мм.

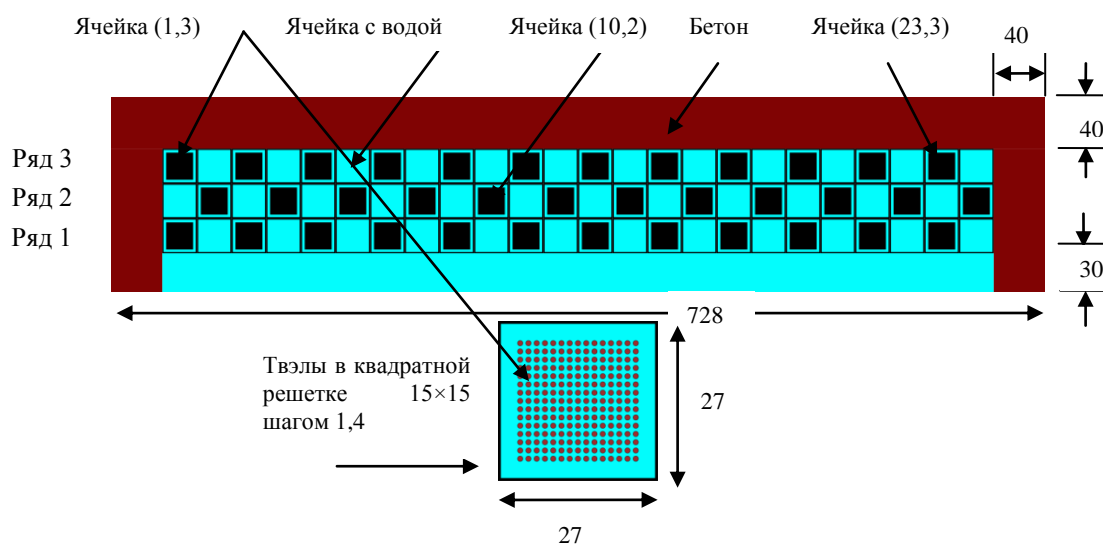


Рис. 13. Расчетная модель бенчмарка «шахматная доска» в плане

3.2 Отображение SRC-источника при некорректных R_f -распределениях

Для бенчмарка «шахматная доска» R_f -распределение и SRC-источник исследуются вдоль оси x . Нормированное R_f -распределение в зависимости от номера топливной ячейки для третьего ряда системы представлено на рис. 14. Кривые 2 и 3 отвечают устойчивым некорректным распределениям, когда значение в ячейке (1,3) составляет существенно меньше корректного значения ~ 0.4 [6 – 8] (кривая 1), начиная с $NPS = 200$ млн. Данные кривые зависимости получены в расчетах при $N_{gen} = 400$ и 1000 и равномерном SRC0-источнике.

Расчеты бенчмарка проводятся для разного задания начального источника:

- Равномерное (наиболее естественен при выборе расчетных параметров)
- Слева (полезен для уменьшения количества циклов, необходимых для выхода на известный корректный результат, $SRC0_{слева}$)
- Справа – ячейка (23,1) (для исследования динамики распределений, $SRC0_{справа}$).

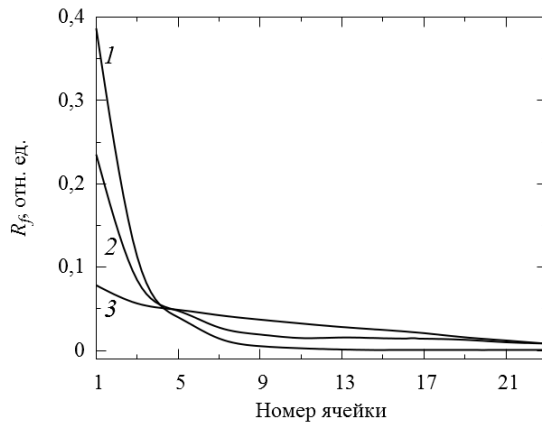


Рис. 14. Корректное (1) и некорректные (2, 3) R_f -распределения в системе «шахматная доска»

Анализ динамики SRC -источника для $N_{gen} = 400$ и $1000n$ проводится при равномерном $SRCO$ -источнике и $SRCO_{справа}$, для изучения влияния данного расчетного параметра на качество распределений (рис.15-17). В результате, в обоих случаях, получен крайне неустойчивый SRC -источник. Его вид меняется от статистики к статистике, но при этом получены устойчивые R_f -распределения.

Таким образом, устойчивые некорректные R_f -распределения в расчетах бенчмарка «шахматная доска» получены при неустойчивых некорректных SRC -источниках.

$N_{gen} = 400n$

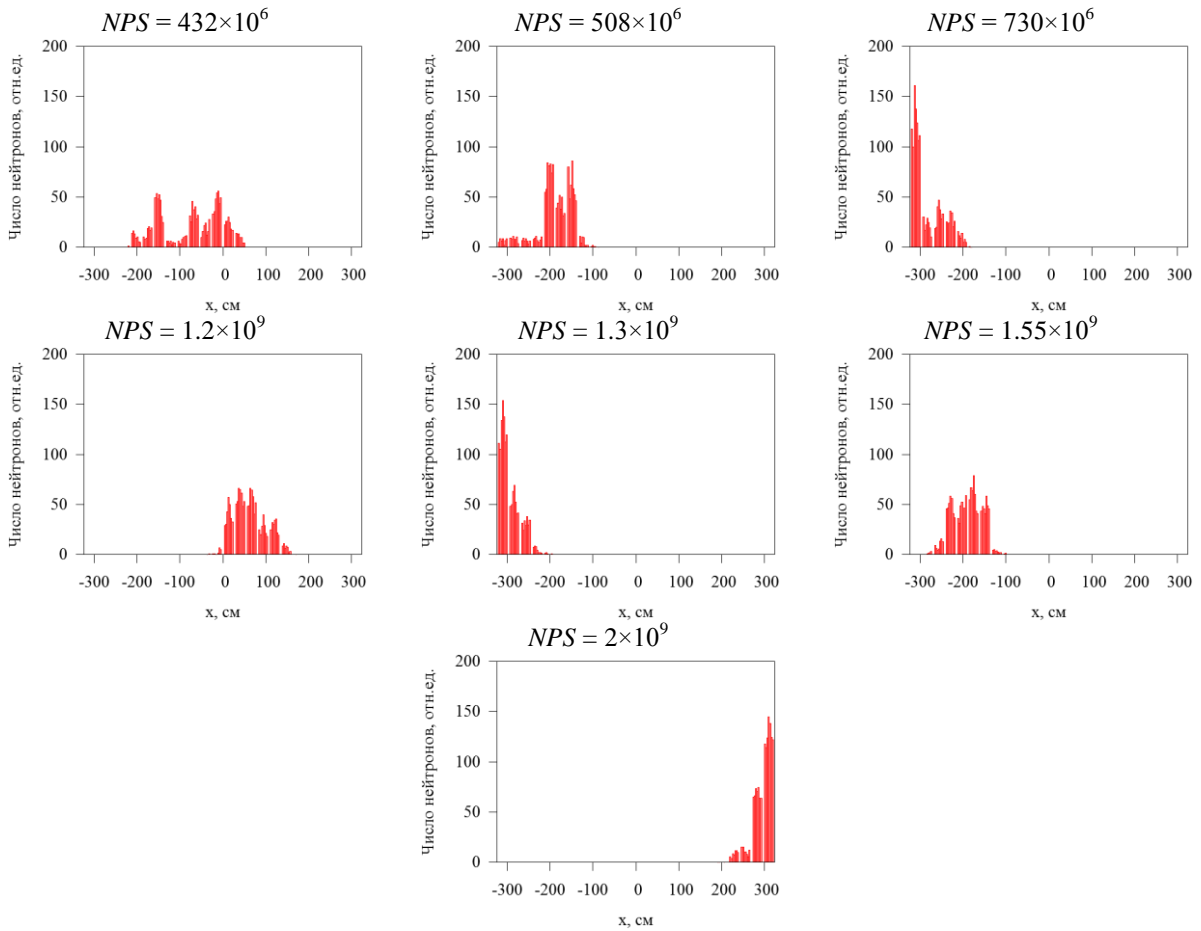


Рис. 15. Динамика SRC -источника при $N_{gen} = 400n$

$N_{gen} = 1000н$, $SRC0_справа$

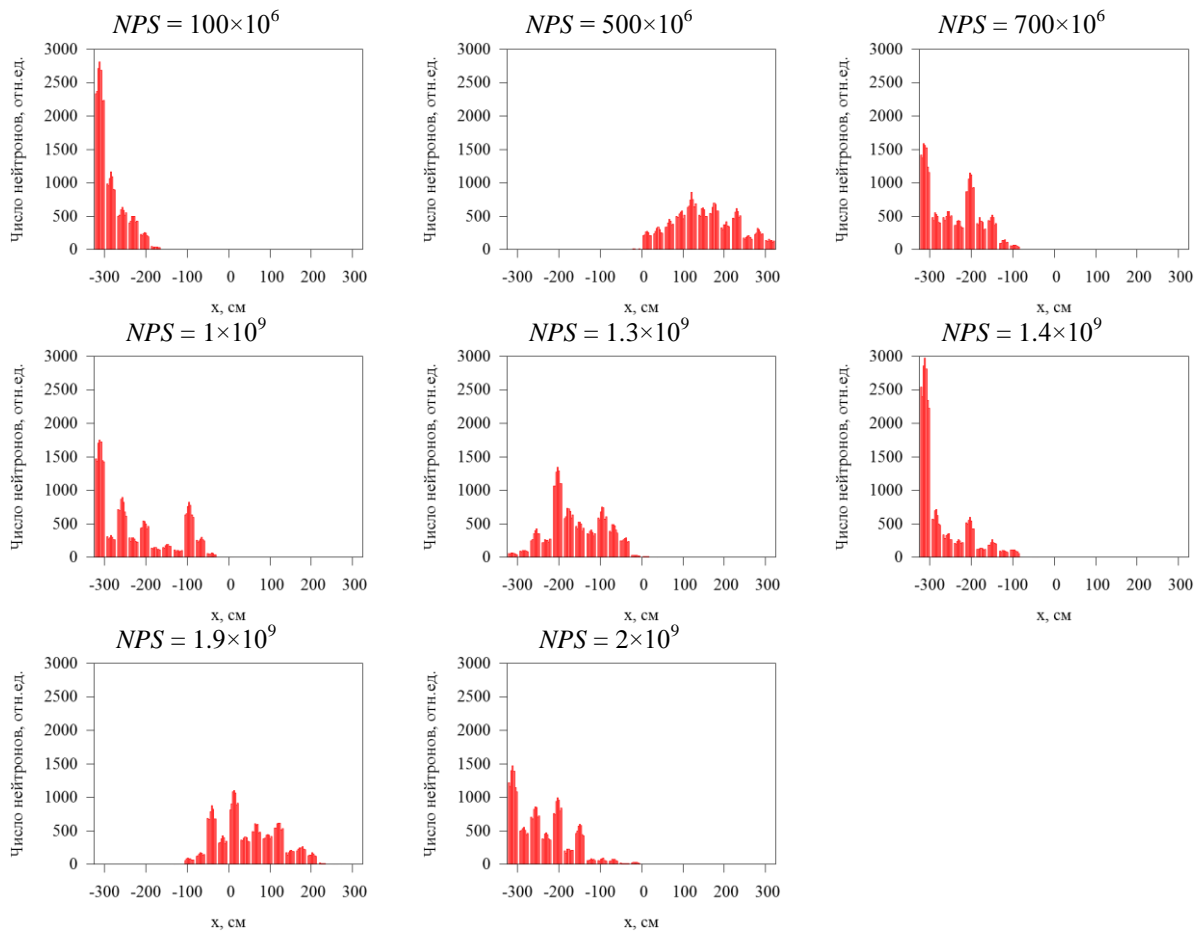
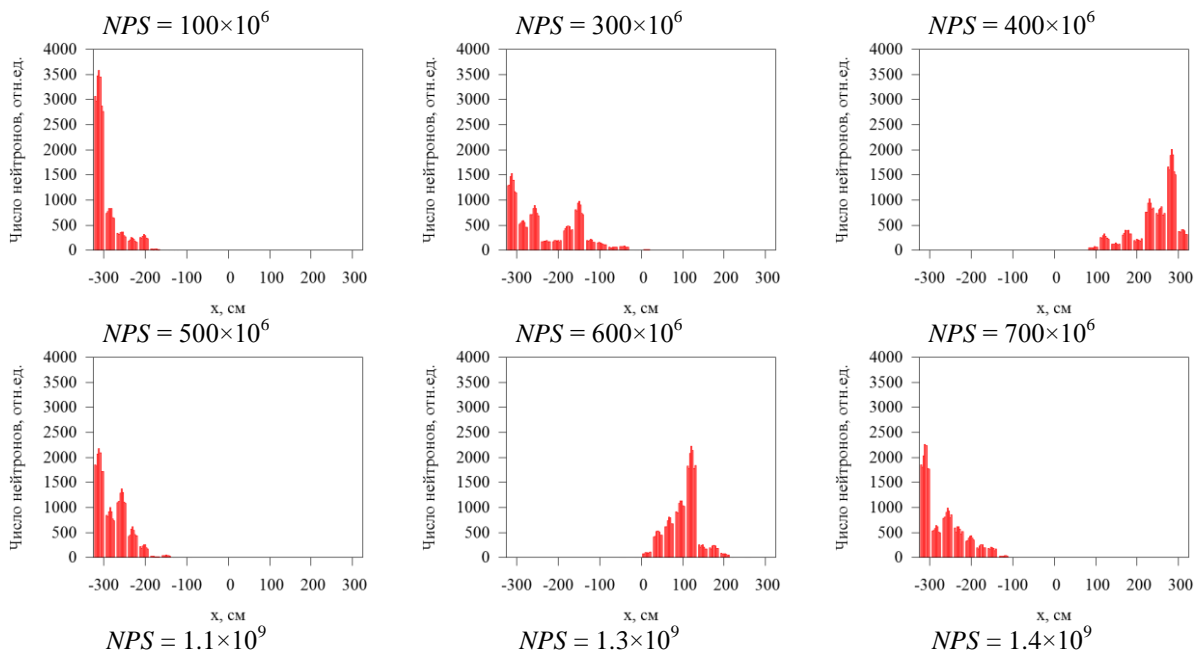


Рисунок 16 Динамика SRC -источника при $N_{gen} = 1000н$ и $SRC0_справа$

$N_{gen} = 1000н$



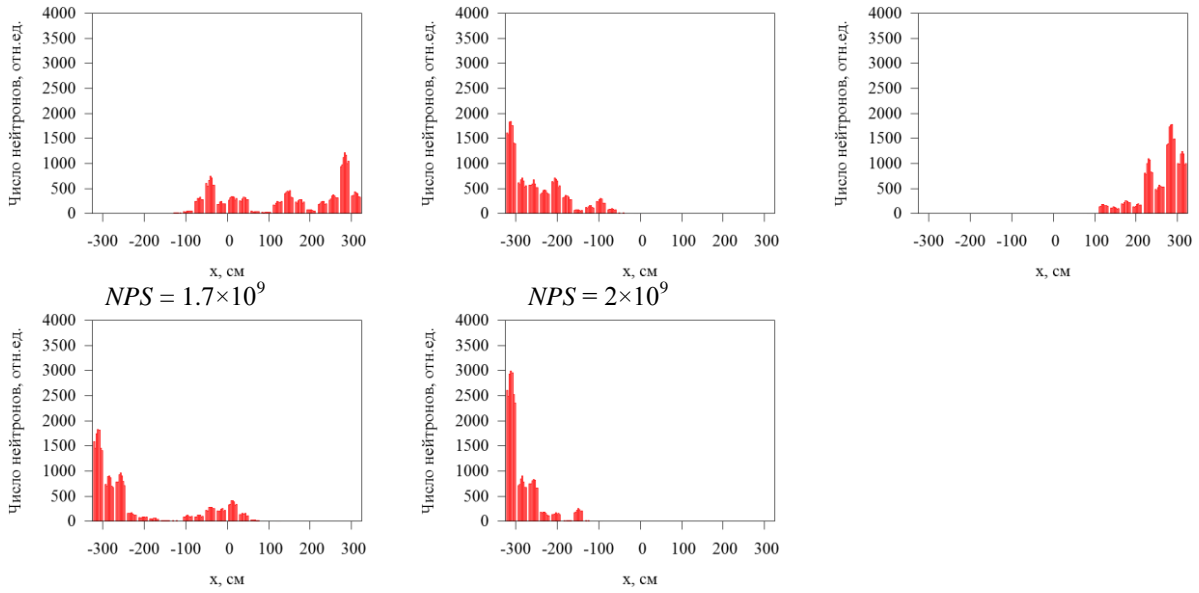


Рис. 17. Динамика SRC-источника при $N_{gen} = 1000n$

$N_{gen} = 2500n$

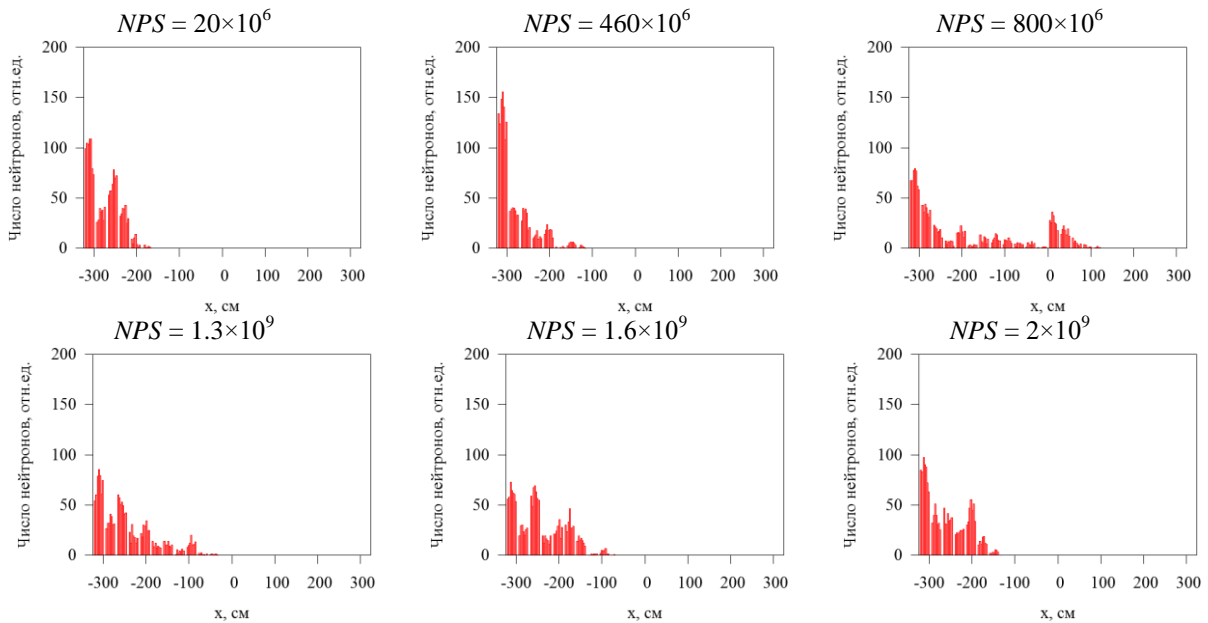


Рис. 18. Динамика SRC-источника при $N_{gen} = 2500n$

В расчетах при $N_{gen} = 2500n$ SRC-источник качественно изменился: наибольшая часть точек деления на протяжении всего расчета приходится на левую половину системы (рис.18), но при этом вид распределения не становится устойчивым.

3.3 Отображение SRC-источника при корректных R_f -распределениях

В расчетах бенчмарка «шахматная доска» при $N_{gen} = 20\,000n$ и равномерном SRC0-источнике получено устойчивое корректное R_f -распределение, начиная уже с $NPS = 100$ млн. Корректное R_f -распределение соответственно оказывается и при $N_{gen} = 100\,000$ и $200\,000$ (рис. 19). Только при таких размерах поколения нужно учитывать особенности расчетов, связанные с необходимым числом активных поколений для получения корректного результата. Данная проблема рассматривается в разделе 5.

На рис. 20 представлена динамика SRC-источника при $N_{gen} = 20\,000n$ и равномерном SRC0-источнике. Его вид устойчив и соответствует корректному R_f -распределению, также начиная с $NPS = 100$ млн.

Таким образом, устойчивое корректное R_f -распределение в расчетах бенчмарка «шахматная доска» получено при устойчивом корректном SRC-источнике.

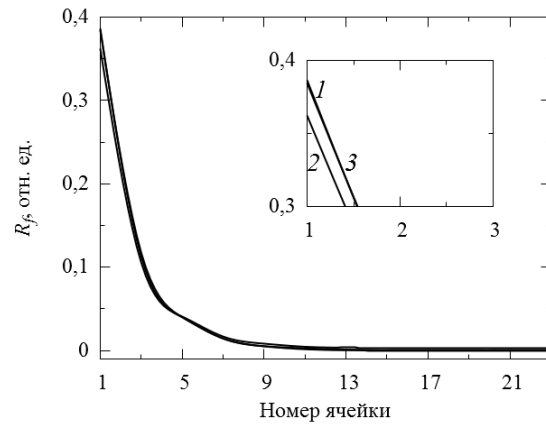


Рис. 19. Корректное R_f -распределение в бенчмарке «шахматная доска» при $N_{gen} = 20\,000$ (1), $100\,000$ (2) и $200\,000$ н (3)

$N_{gen} = 20\,000$ н

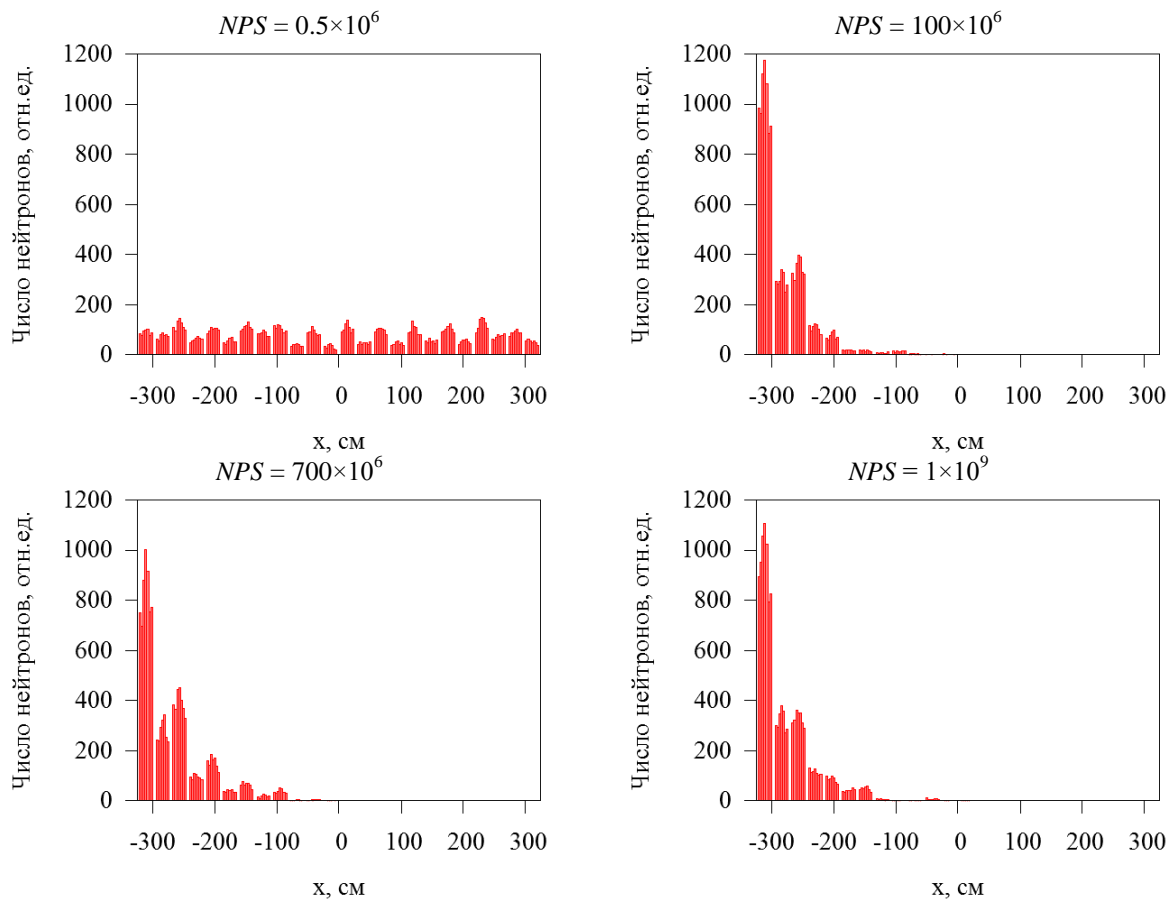


Рис. 20. Динамика SRC-источника при $N_{gen} = 20\,000$ н

4 Особенности распределений нейтронов в системе «шахматная доска» с разными составами бетонных стенок

4.1 Вид R_f -распределения

Для системы «шахматная доска» проводятся исследования чувствительности R_f -распределения и SRC -источника к малым изменениям материального состава бетонных стенок, окружающих систему с трех сторон. Вместе с базовым бетоном (указанным в бенчмарке *OECD NEA*) также рассматривается материал *ЖБ* (железобетон, используемый для выгородки ВВЭР), *ЖБ-1* (железобетон без магния), *ЖБ-2* и *ЖБ-3* (*ЖБ-2* без магния). Изотопный состав бетонных стенок указан в таблице 1.

Таблица 1. Материальный состав бетонных стенок

Изотоп	Базовый бетон $\rho=2.2 \text{ г/см}^3$	<i>ЖБ</i> $\rho=2.02 \text{ г/см}^3$	<i>ЖБ-1</i> $\rho=1.71 \text{ г/см}^3$	<i>ЖБ-2</i> $\rho=2.2 \text{ г/см}^3$	<i>ЖБ-3</i> $\rho=2.2 \text{ г/см}^3$
Fe54	–	7.713×10^{-4}	8.683×10^{-4}	6.293×10^{-5}	6.535×10^{-5}
Fe56	–	1.210×10^{-2}	1.362×10^{-2}	9.518×10^{-4}	9.884×10^{-4}
Fe57	–	2.795×10^{-4}	3.147×10^{-4}	2.161×10^{-5}	2.243×10^{-5}
Fe58	–	3.692×10^{-5}	4.156×10^{-5}	2.805×10^{-6}	2.912×10^{-6}
Ti46	–	–	–	1.499×10^{-5}	1.556×10^{-5}
Ti47	–	–	–	1.323×10^{-5}	1.373×10^{-5}
Ti48	–	–	–	1.285×10^{-4}	1.335×10^{-4}
Ti49	–	–	–	9.225×10^{-6}	9.580×10^{-6}
Ti50	–	–	–	8.657×10^{-6}	8.989×10^{-6}
Ca40	1.197×10^{-1}	4.162×10^{-2}	4.686×10^{-2}	2.025×10^{-3}	2.102×10^{-3}
Ca42	7.987×10^{-4}	2.778×10^{-4}	3.127×10^{-4}	1.287×10^{-5}	1.336×10^{-5}
Ca43	1.667×10^{-4}	5.796×10^{-5}	6.525×10^{-5}	2.623×10^{-6}	2.724×10^{-6}
Ca44	2.575×10^{-3}	8.956×10^{-4}	1.008×10^{-3}	3.961×10^{-5}	4.113×10^{-5}
Ca46	4.938×10^{-6}	1.717×10^{-6}	1.933×10^{-6}	7.265×10^{-8}	7.544×10^{-8}
Ca48	2.308×10^{-4}	8.029×10^{-5}	9.038×10^{-5}	3.255×10^{-6}	3.380×10^{-6}
K39	–	–	–	1.417×10^{-3}	1.472×10^{-3}
K40	–	–	–	1.778×10^{-7}	1.847×10^{-7}
K41	–	–	–	9.730×10^{-5}	1.010×10^{-4}
Si28	9.799×10^{-2}	1.183×10^{-1}	1.331×10^{-1}	1.126×10^{-2}	1.169×10^{-2}
Si29	4.962×10^{-3}	5.988×10^{-3}	6.741×10^{-3}	5.502×10^{-4}	5.714×10^{-4}
Si30	3.294×10^{-3}	3.975×10^{-3}	4.475×10^{-3}	3.531×10^{-4}	3.667×10^{-4}
Al27	–	1.308×10^{-2}	1.473×10^{-2}	2.165×10^{-3}	2.249×10^{-3}
Mg24	–	8.822×10^{-2}	–	1.614×10^{-3}	–
Mg25	–	1.112×10^{-2}	–	1.962×10^{-4}	–
Mg26	–	1.230×10^{-2}	–	2.077×10^{-4}	–
Na23	–	4.352×10^{-4}	4.899×10^{-4}	7.665×10^{-4}	7.959×10^{-4}
O16	5.978×10^{-1}	5.236×10^{-1}	5.895×10^{-1}	3.973×10^{-2}	4.126×10^{-2}
C	9.617×10^{-2}	–	–	4.412×10^{-4}	4.582×10^{-4}
H1	7.638×10^{-2}	1.668×10^{-1}	1.878×10^{-1}	8.413×10^{-3}	8.736×10^{-3}

В результате расчетов с *ЖБ* и *ЖБ-2*, 3 характер полученных кривых R_f -распределения совпадает с базовым бетоном, и максимальное значение также приходится на ячейку (1,3). В расчетах бенчмарка с *ЖБ-1* при размере поколения от 20 000 до 100 000н и разном $SRC0$ -источнике получено качественно другое R_f -распределение (рис. 21) с выраженным максимумом в центральной ячейке. С точки зрения физики такое распределение вызывает сомнение, поскольку несколько ячеек центральной области имеют сходное расположение с одинаковыми граничными условиями.

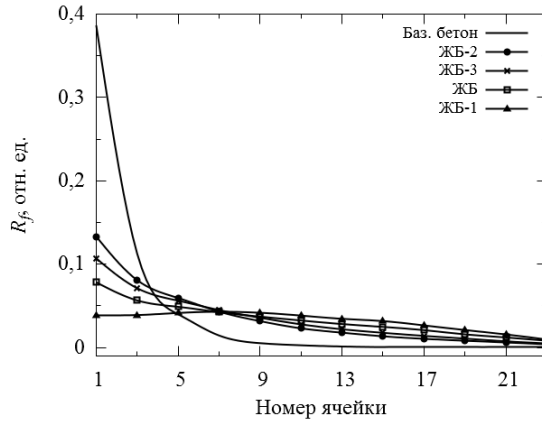


Рис. 21. R_f -распределение в бенчмарке «шахматная доска» для разных составов бетонных стенок

4.2 Отображение SRC-источника в расчетах с ЖБ

Распределение SRC-источника для базового бетона устойчиво и корректно при $N_{gen} = 20\ 000n$, начиная со статистики $NPS = 100$ млн:

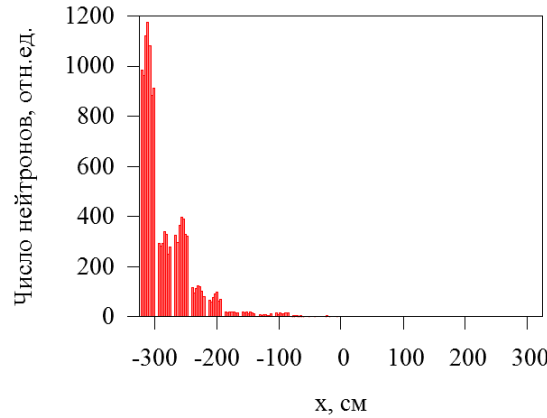
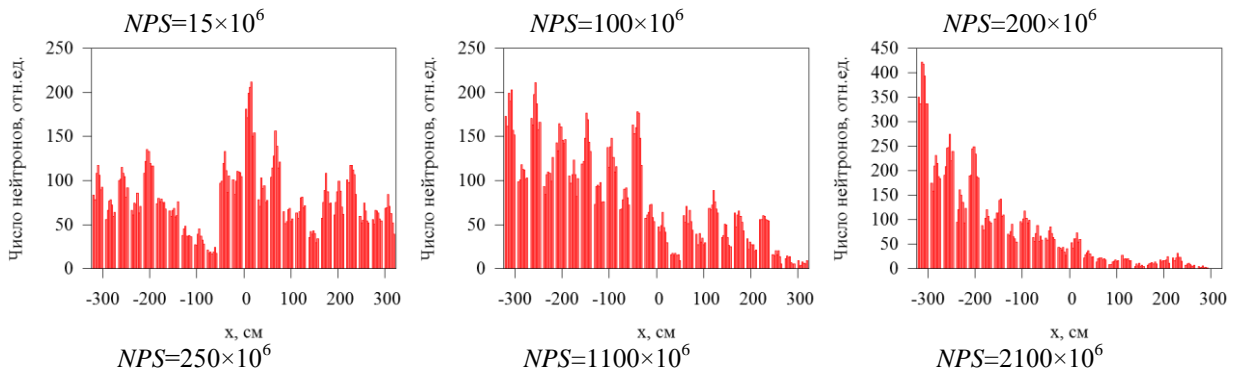


Рис. 22. SRC-источник с бетоном при $N_{gen} = 20\ 000n$ и $NPS = 100$ млн

В расчетах с ЖБ при $N_{gen} = 20\ 000n$ SRC-источник неустойчив и имеет некорректный вид даже для $NPS = 2.1$ млрд (рис. 23). Причем для SRC0 слева динамика источника также показывает неустойчивость и некорректность (рис. 25). Корректный SRC-источник получен при $N_{gen} = 50\ 000n$ (рис.24). Таким образом, в расчетах с ЖБ SRC-источник оказывается более чувствительным к расчетным параметрам и $20\ 000n$ в поколении становится не достаточным для получения устойчивого источника.

$N_{gen} = 20\ 000n$



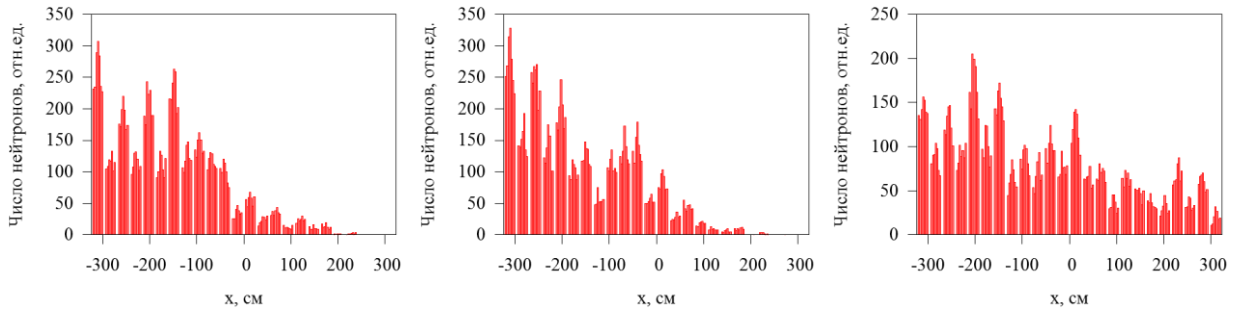


Рис. 23. Динамика SRC-источника с ЖБ при $N_{gen} = 20\ 000$

$N_{gen} = 50\ 000$

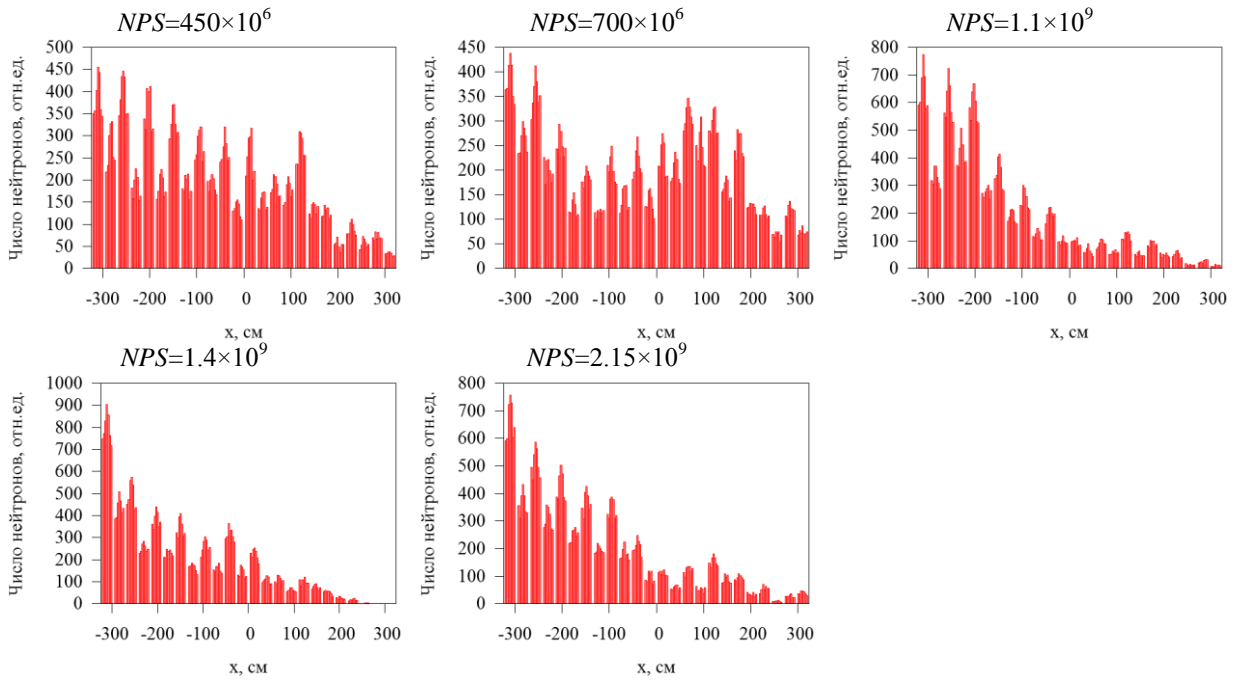
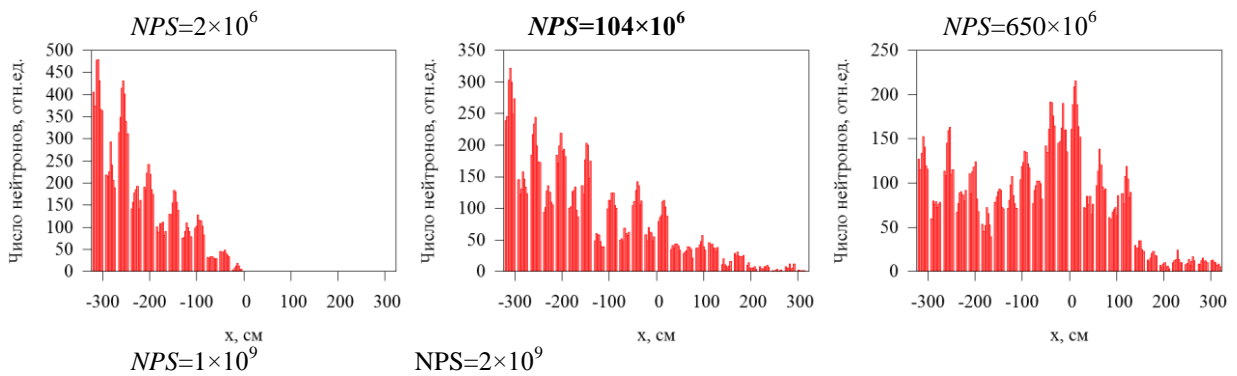


Рис. 24. Динамика SRC-источника с ЖБ при $N_{gen} = 50\ 000$

$N_{gen} = 20\ 000$, SRC0_слева



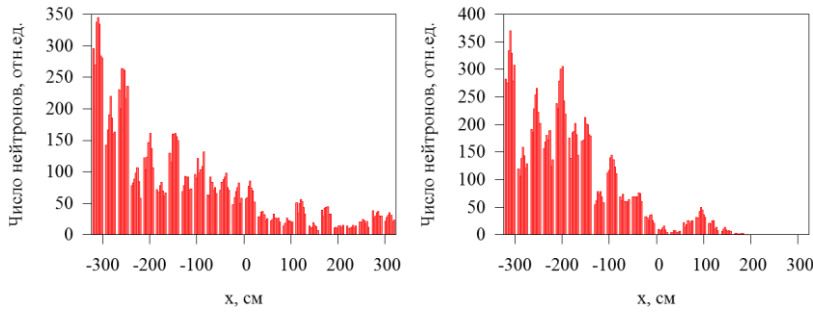


Рис. 25. Динамика SRC-источника с ЖБ при $N_{gen} = 20\ 000н$ и $SRC0_слева$

4.3 Отображение SRC-источника в расчетах с ЖБ-1

Распределение SRC-источника с ЖБ-1 неустойчиво при $N_{gen} = 20\ 000н$ как с равномерным SRC0-источником (рис. 26) так и с $SRC0_слева$ (рис. 30). Для более продолжительного анализа динамики SRC-источника проводятся расчеты при $N_{gen} = 20\ 000$ и $50\ 000н$ с наработанным SRC0-источником ($SRC0_нараб.$), т.е. с источником, сформированным в результате предварительных расчетов. Последующая динамика SRC-источника показывает также неустойчивость и некорректность распределения (рис. 27, 28). При этом SRC-источник меняется в зависимости от статистики также и при $N_{gen} = 100\ 000н$ (рис. 29).

$N_{gen} = 20\ 000н$

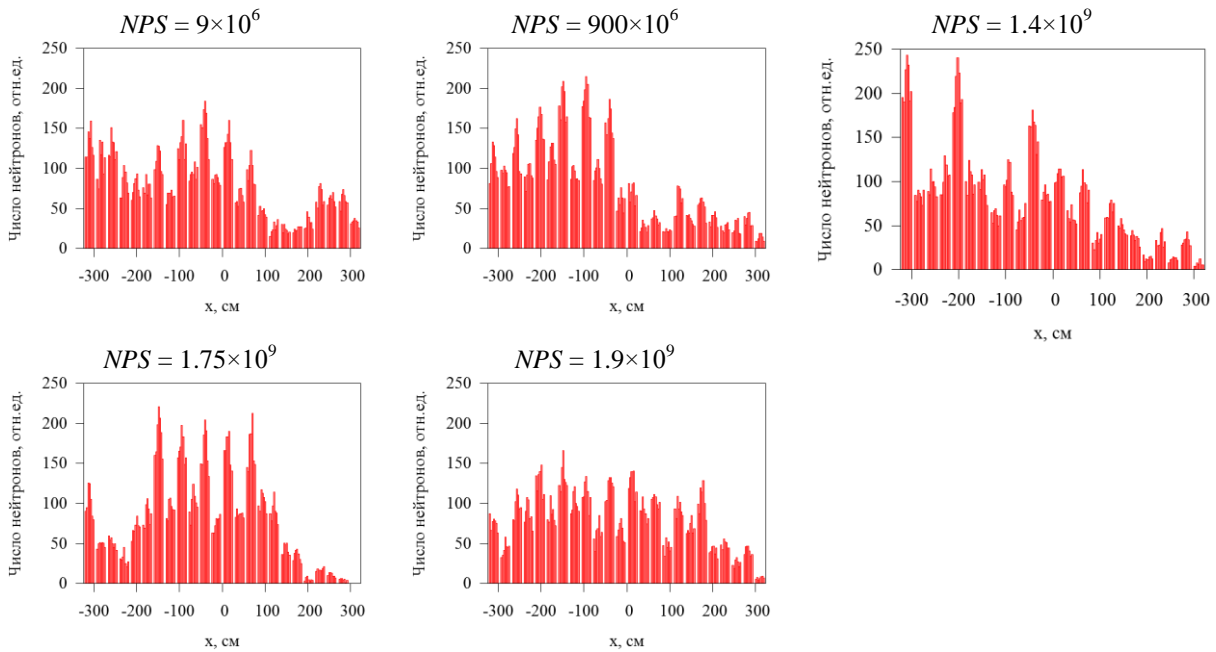


Рис. 26. Динамика SRC-источника с ЖБ-1 при $N_{gen} = 20\ 000н$

$N_{gen} = 20\ 000$ н, $SRC0_{нараб.}$

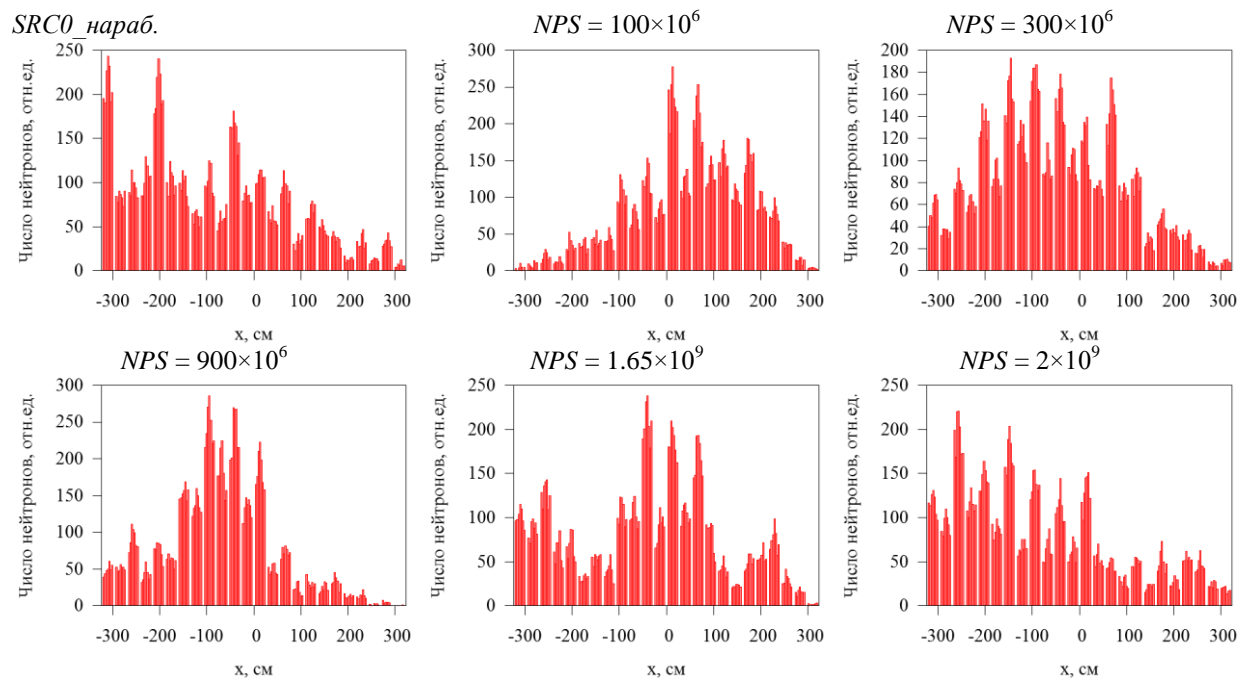
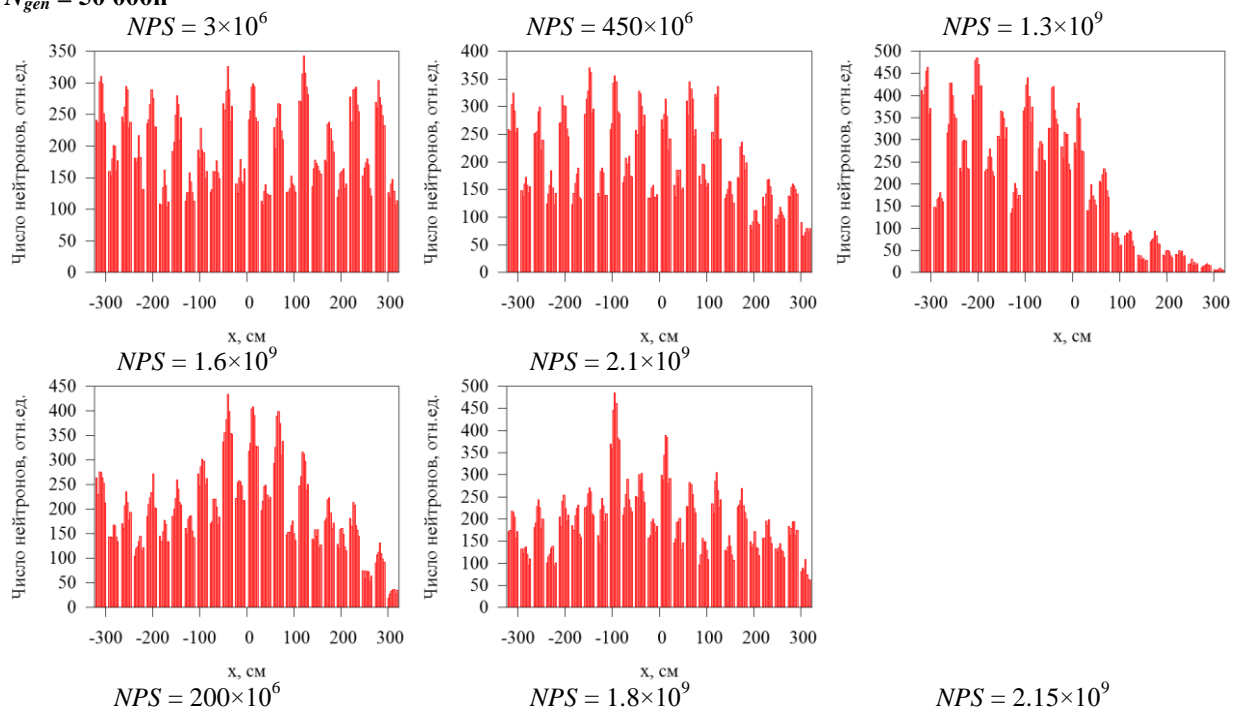


Рис. 27. Динамика SRC-источника с ЖБ-1 при $N_{gen} = 20\ 000$ н и $SRC0_{нараб.}$

$N_{gen} = 50\ 000$ н



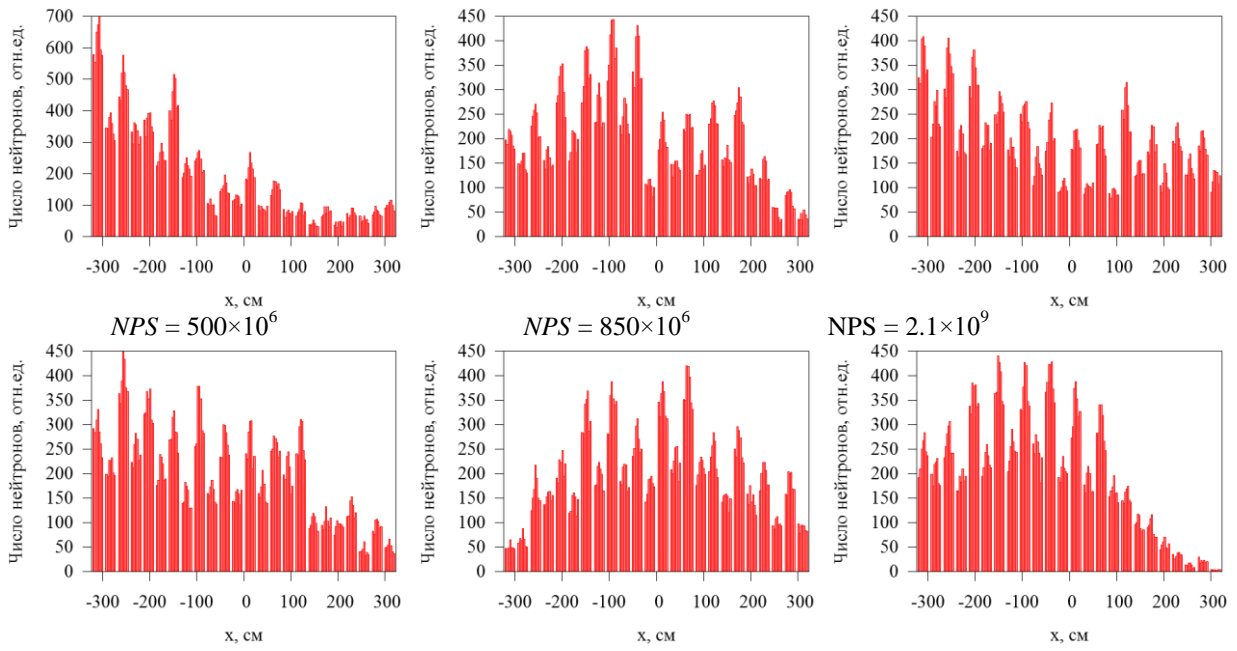


Рис. 28. Динамика SRC-источника с ЖБ-1 при $N_{gen} = 50\ 000n$ в расчете с продолжением

$N_{gen} = 100\ 000n$

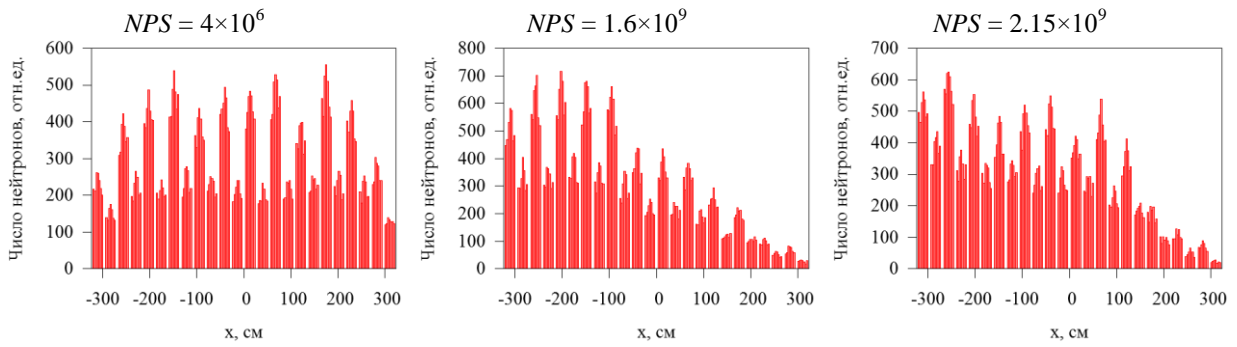


Рис. 29. Динамика SRC-источника с ЖБ-1 при $N_{gen} = 100\ 000n$

$N_{gen} = 20\ 000n$, SRC0_слева.

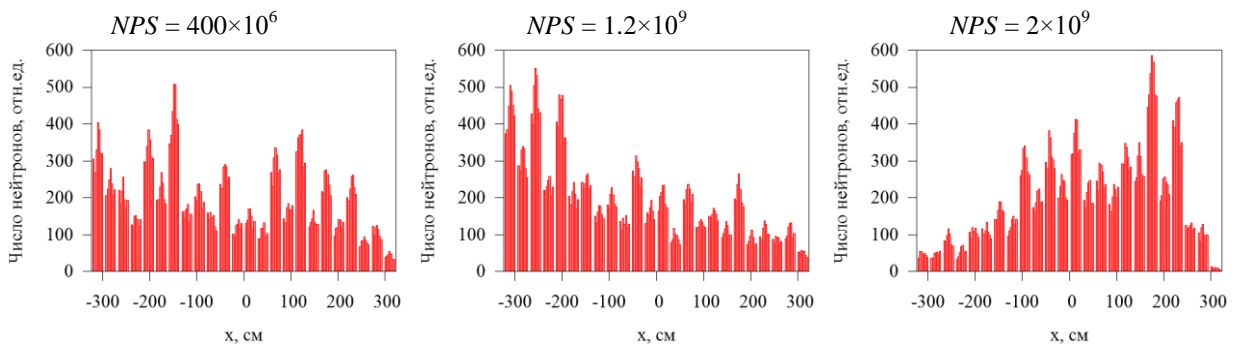


Рис. 30. Динамика SRC-источника с ЖБ-1 при $N_{gen} = 20\ 000n$ и SRC0_слева

4.4 Отображение SRC-источника в расчетах с ЖБ-2, 3

Анализ динамики SRC-источника в расчетах с ЖБ-2, 3 при $N_{gen} = 20\ 000н$ и равномерном SRCO-источнике показывает, что большая часть всех делений приходится на левую половину системы, начиная с $NPS = 300 - 500$ млн (рис. 31, 32). В системе с координатами $200 < x < 300$ делений практически нет. Устойчивость SRC-источника обуславливает и устойчивость соответствующего R_f -распределения.

$N_{gen} = 20\ 000н$

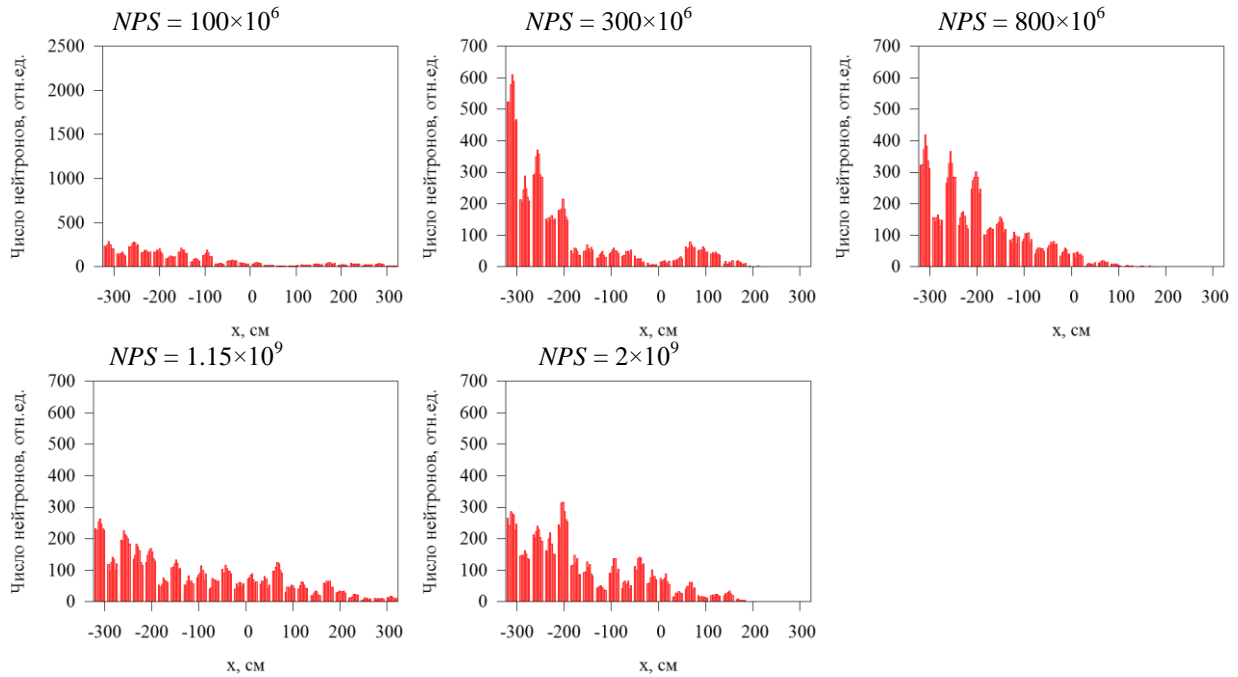


Рис. 31. Динамика SRC-источника с ЖБ-2 при $N_{gen} = 20\ 000н$

$N_{gen} = 20\ 000н$

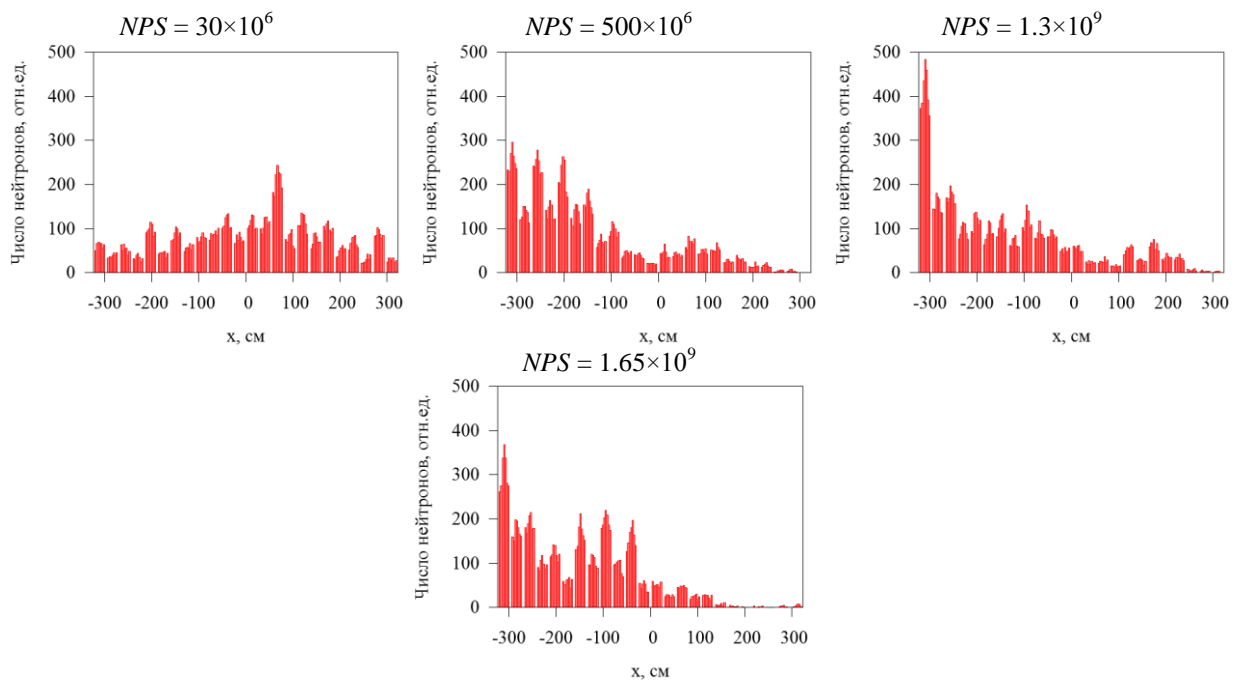


Рис. 32. Динамика SRC-источника с ЖБ-3 при $N_{gen} = 20\ 000н$

5 Особенности SRC-источника при больших значениях параметра генерации нейтронов

В работе показаны особенности расчетов бенчмарка «шахматная доска» с большим числом нейтронов в поколении. Представлены динамики SRC-источников для базового бетона при $N_{gen} = 100\ 000$, $200\ 000$ и $400\ 000$ н и равномерном SRC0-источнике.

В результате SRC-источник оказывается устойчивым и корректным, начиная с $NPS = 200$, 300 и 700 млн при $N_{gen} = 100\ 000$, $200\ 000$ и $400\ 000$ н, соответственно (рис. 33, таблица 2), в отличие от расчетов при $N_{gen} = 20\ 000$ н, когда SRC-источник устойчив, уже начиная с $NPS = 100$ млн.

$N_{gen} = 100\ 000$ н

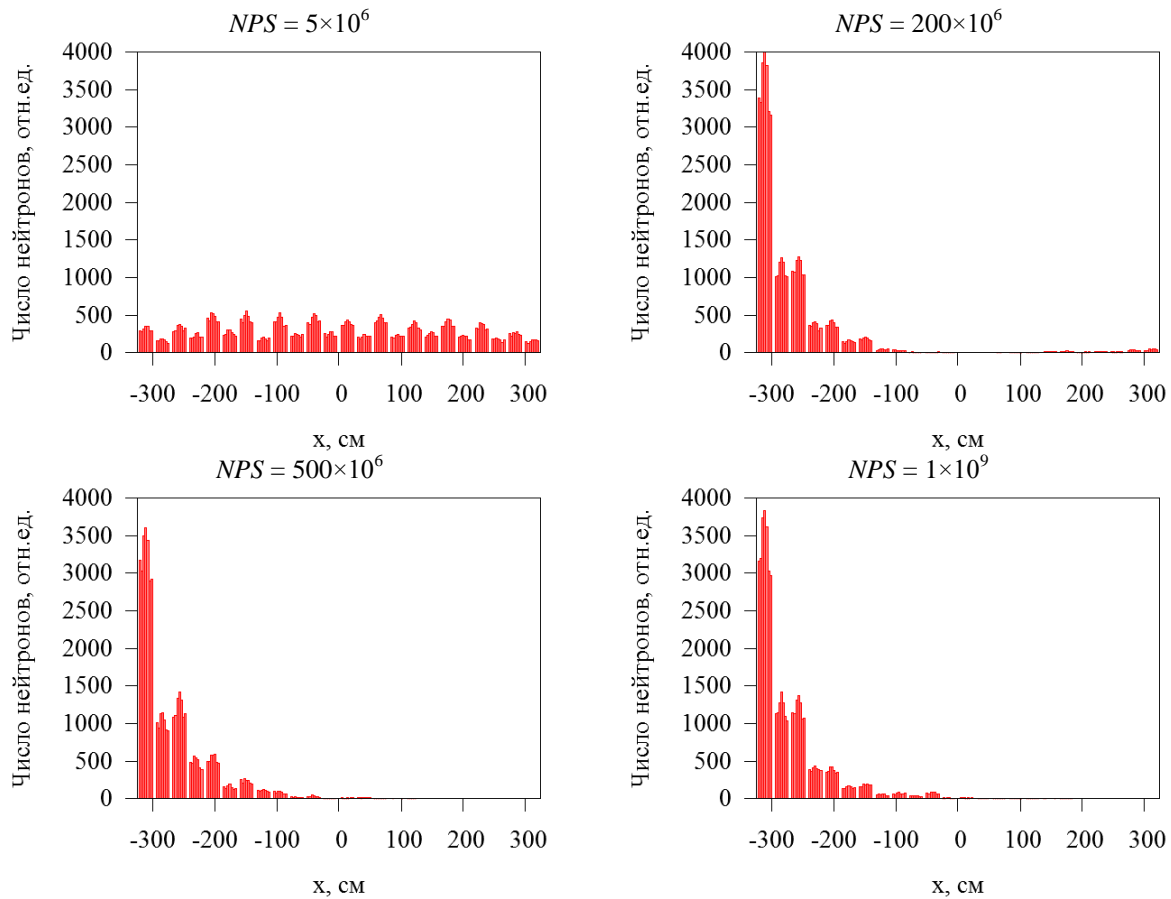
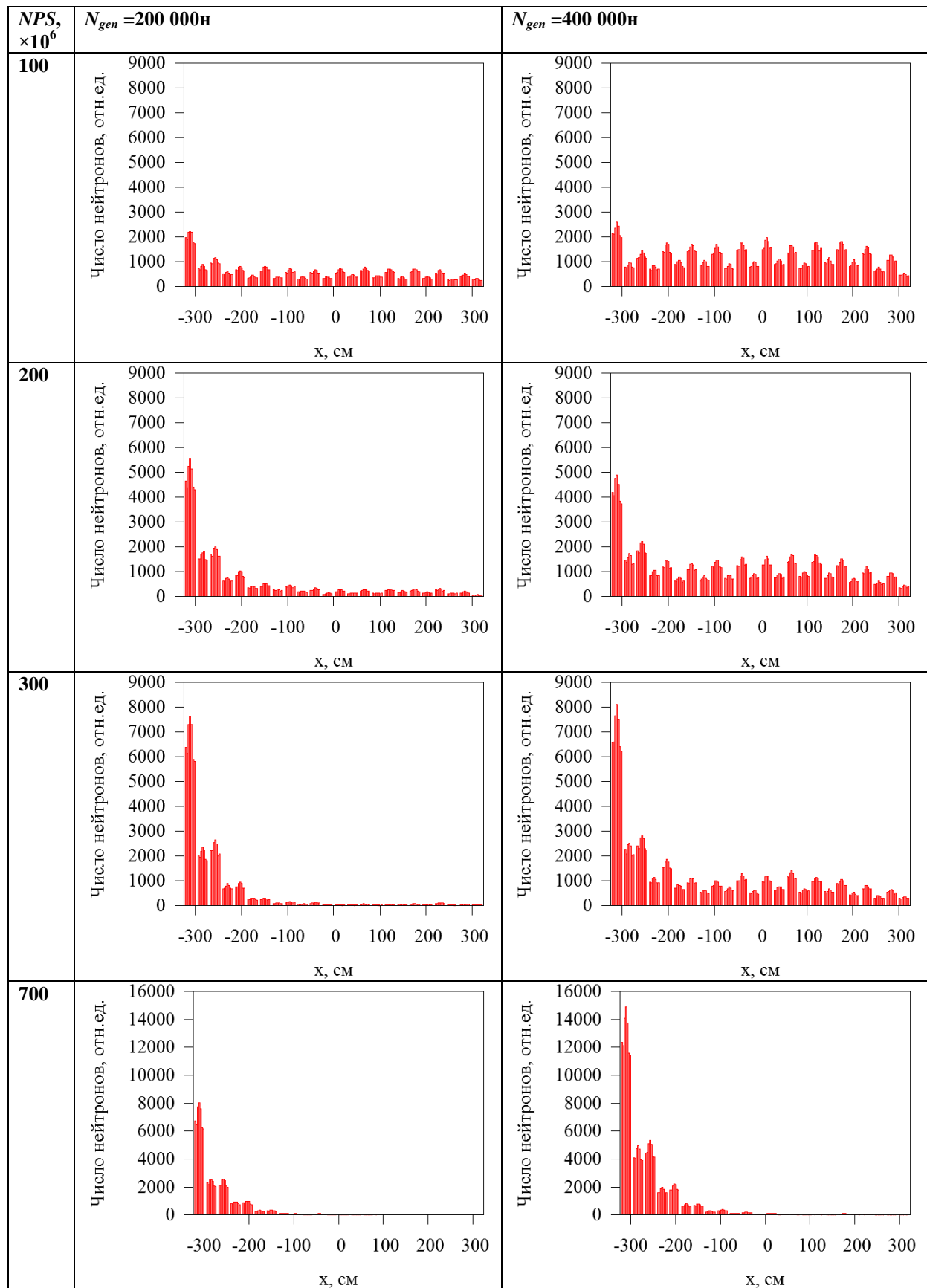


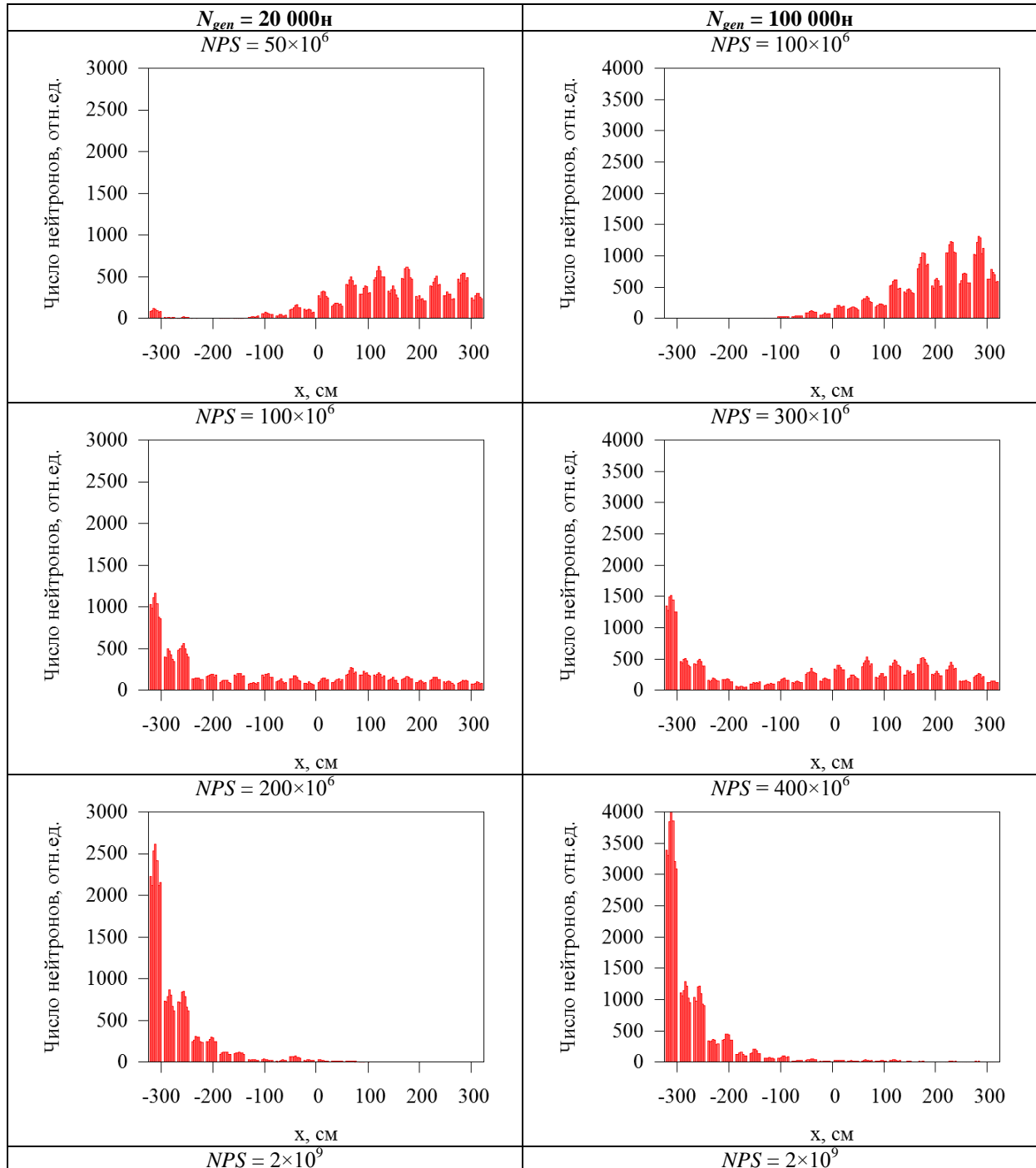
Рис. 33. Динамика SRC-источника для базового бетона при $N_{gen} = 100\ 000$ н

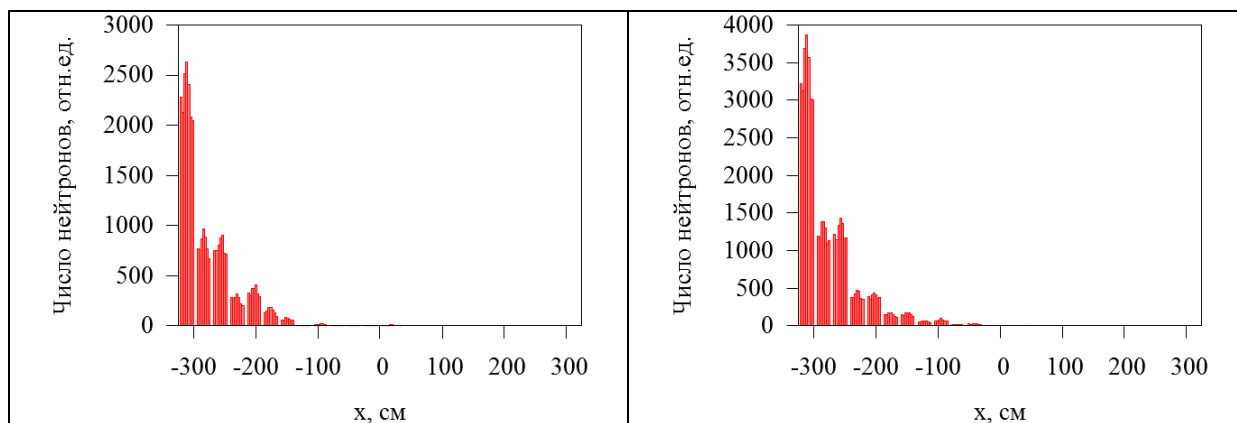
Таблица 2. Динамика SRC-источника для базового бетона при $N_{gen} = 200\ 000$ и $400\ 000$ н



При сравнении распределений при $N_{gen} = 20\ 000$ и $100\ 000$ с $SRC0_справа$ наблюдается особенность расчетов с большим размером поколения (таблица 3). Анализ показывает явную зависимость статистики (числа активных поколений), необходимой для перераспределения точек деления из правой в левую половину системы, от размера поколения. В расчетах при $N_{gen} = 20\ 000$ необходимо ~ 200 млн историй для получения корректного SRC-источника, а в расчетах при $N_{gen} = 100\ 000$ – это ~ 400 млн историй.

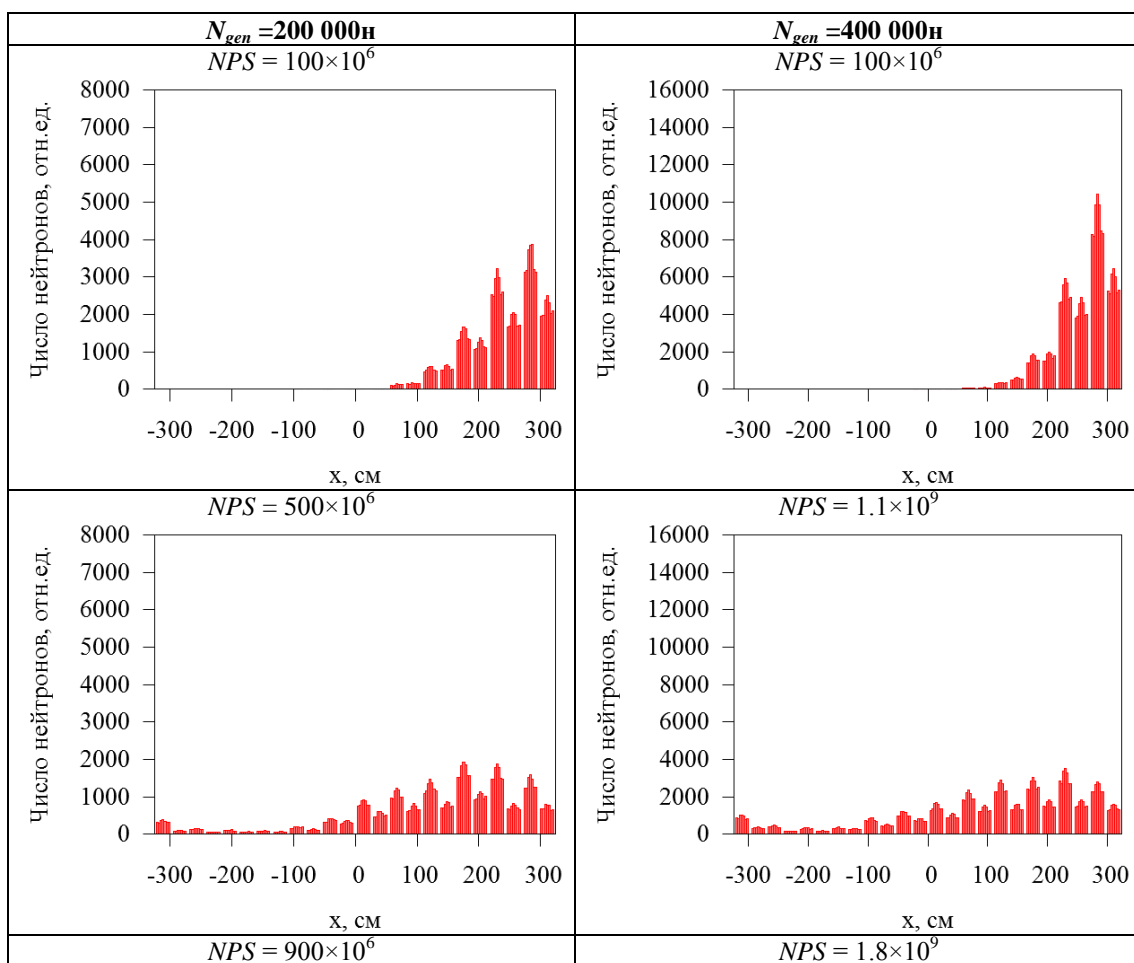
Таблица 3. Динамика SRC-источника для базового бетона при $N_{gen} = 20\ 000$ и $100\ 000$ и $SRC0_справа$

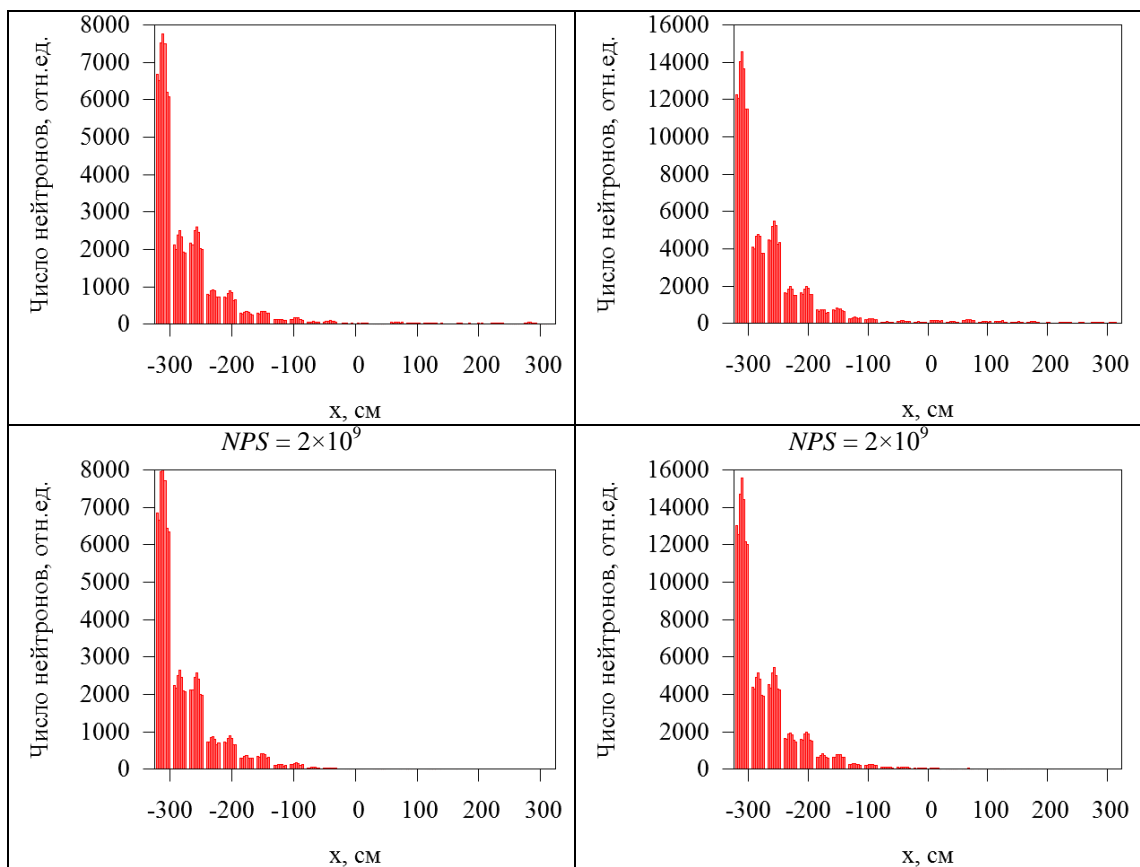




В расчетах при $N_{gen} = 200\ 000$ и $400\ 000$ н для *SRC0_справа* также прослеживается пропорциональная зависимость числа поколений, необходимых для получения определенного распределения SRC-источника, от размера поколения (таблица 4). Так если при $N_{gen} = 200\ 000$ н нужно $NPS = 500$ млн для появления точек деления в крайних левых топливных ячейках, то при $N_{gen} = 400\ 000$ н – это $NPS = 1.1$ млрд. Для перераспределения всех точек деления в крайние левые ячейки необходимо $NPS = 900$ млн и 1.8 млрд при $N_{gen} = 200\ 000$ и $400\ 000$ н, соответственно. Аналогичные зависимости оказываются для значений скорости реакции деления в ячейке (1,3). Таким образом, при увеличении размера поколения становится необходимым существенное увеличение числа историй, что требует использование более мощных вычислительных ресурсов.

Таблица 4. Динамика SRC-источника для базового бетона при $N_{gen} = 200\ 000$ и $400\ 000$ н и *SRC0_справа*





Корректный и устойчивый, начиная с $NPS = 100$ млн, SRC -источник при $N_{gen} = 200\ 000$ и $400\ 000$ н получен для $SRC0_слева$ (рис. 34).

$N_{gen} = 200\ 000$ и $400\ 000$ н, $SRC0_слева$

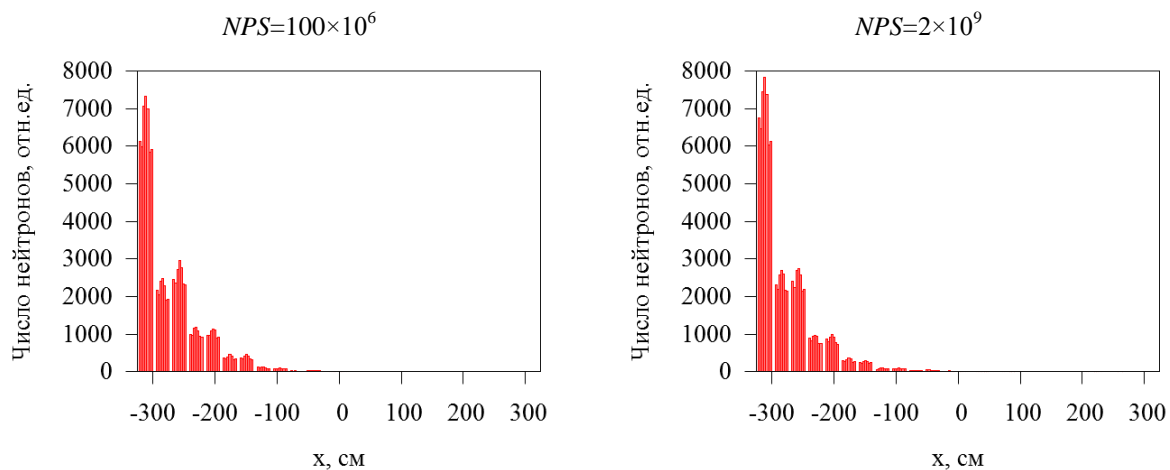


Рис. 34. Динамика SRC -источника для базового бетона при $N_{gen} = 200\ 000$ н и $SRC0_слева$

6 Доминантное отношение как характеристика «качества» системы

Корректность расчетов на критичность зависит от разных факторов, включающих и устойчивость источника нейтронов деления. В нейтронно-физических расчетах обоснование корректности полученных результатов, связанных с распределением, требует отдельного рассмотрения. Системы различной компоновки, гетерогенности и др. характеризуются разными значениями параметра «доминантное отношение». Доминантное отношение (DR) определяется в виде отношения двух собственных значений матрицы деления нейтронов (наибольшего и следующего за ним). Последнее десятилетие специалистами Монте-Карло разрабатываются методы с использованием DR , позволяющие судить о «качестве» системы с точки зрения устойчивости и корректности решения.

На практике используются разные способы вычисления DR , каждый из которых имеет свои особенности, связанные с компоновкой системы и ее разбиением. В коде TDMCC [9] реализованы два метода:

- Методом шумовой матрицы ($NPMM$, *Noise Propagation Matrix Method* [10]),
- Методом матрицы деления (FMM , *Fission Matrix Method* [11]).

Метод матрицы деления заключается в накладывании на систему сетки размером $n \times m = N$, что приводит к получению N ячеек, в каждой из которых считается количество нейтронов деления. Для сформированной таким образом матрицы деления стандартными алгебраическими способами вычисляется спектр и находится отношение второго собственного значения к первому, т.е. непосредственно DR .

Метод шумовой матрицы, изначально рассматриваемый как «экспресс-метод» [10], в котором для нахождения DR определяются только наибольшие по модулю собственные значения.

В работе значение DR рассчитывается для ячейки, представляющей бесконечную в плане решетку твэла (раздел 2.1). Высота твэла варьируется от 20 до 100 см. Для формирования матрицы деления используется аксиальное разбиение твэла на зоны размером $h = 10$ см.

В качестве примера в таблице 5 представлены сравнительные значения DR для твэла с топливом одного обогащения.

Таблица 5. Сравнительные значения DR для бесконечной решетки твэла

Твэл с топливом обогащения, $w = 3.5\%$						
H , см	h , см	N_{gen} , н	$NPS, \times 10^9$	DR		$(DR^{NPMM} - DR^{FMM}) / DR^{NPMM},$ %
				$NPMM$	FMM	
20	10	20 000	3.18	0.401	0.391	2.5
50		20 000	3.12	0.787	0.759	3.6
100		20 000	2.56	0.954	0.914	4.2
		100 000	0.4	0.957	0.914	4.5

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- Значение DR увеличивается при увеличении высоты твэла. Так для $H = 100$ см получено значение большее в ~ 2.4 раза, чем для $H = 20$ см.
- Значение DR оказывается больше в расчетах методом $NPMM$, чем в расчетах методом FMM для всех приведенных высот. При этом отличие в значениях растет с увеличением высоты твэла – от $\sim 2.5\%$ для $H = 20$ см до $\sim 4.5\%$ для $H = 100$ см.

Следует отметить, что в расчетах твэла с топливом разного обогащения наблюдаются заметные отличия в значениях DR для методов $NPMM$ и FMM . Расчет DR -значений для более сложных систем требует дальнейших исследований, связанных с изучением зависимости получаемых значений от компоновки и параметров разбиения системы в расчетах доминантного отношения, а также уточнением алгоритмов, реализуемых в методах $NPMM$ и FMM .

Выводы

Проведенный анализ динамики источника нейтронов деления показывает:

1. Прямое отображение распределения нейтронов деления (SRC -источник) позволяет судить о достаточности выбранных расчетных параметров.

2. Устойчивость *SRC*-источника является необходимым условием получения корректных функционалов. При неустойчивом *SRC*-источнике для бенчмарка «шахматная доска» с *ЖБ-1* наблюдается некорректное R_f -распределение.
3. Устойчивость *SRC*-источника не является достаточным условием получения корректных функционалов. При устойчивом *SRC*-источнике для твэла разного обогащения наблюдается некорректное (несимметричное) R_f -распределение в симметричной задаче.
4. Доминантное отношение не дает оценки «качества» системы с точки зрения ее устойчивости и корректности.

Приведенные результаты для *SRC*-источников и значений доминантного отношения подтверждают необходимость дальнейших исследований с использованием как доминантного отношения, так и новых нейтронно-физических характеристик, которые позволят осуществить адекватную оценку «качества» системы.

Литература

1. Blomquist R., Amirshaw M., Hanlon D. e.a. Source Convergence in Criticality Safety Analysis, Phase I: Results of Four Test Problems // OECD NEA. – 2006. – №. 5431
2. X-5 Monte Carlo Team, "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code", version 5, April 2003.
3. X-5 Monte Carlo Team, "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code", version 5, volume II: user's guide, chapter 3, April 2003, – В-2 с.
4. Митенкова Е.Ф., Новиков Н.В. «Технология прецизионных расчетов для решения нейтронно-физических задач ядерных реакторов» // Известия Российской Академии Наук, 2004, №2, с.72–86.
5. <http://www.gnuplot.info/> (О проекте Gnuplot).
6. Smith N. et al. OECD/NEA Source Convergence Benchmark 1: Checkerboard storage of assemblies // AEA Technology, UK, 2002
7. Митенкова, Е.Ф., Колташев, Д.А., Кизуб, П.А. Распределение скорости реакции деления в слабосвязанной системе для тестовой модели «шахматная доска» // Атомная энергия. – 2014. – Т.116. – №6. – С.345–349.
8. Кизуб П.А., Митенкова Е.Ф. Особенности распределения скорости деления в слабосвязанных системах в расчетах методом Монте-Карло / Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики: сб. докладов «НЕЙТРОНИКА-2014» – Обнинск, ФГУП ГНЦ РФ–ФЭИ (в печати).
9. Программа: TDMCC (Time-Dependent Monte Carlo Code). Свидетельство о гос. Регистрации №2010614412. «ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ».
10. Sutton T.M., Romano P.K. and Nease B.R. On-the-Fly Monte Carlo Dominance Ratio Calculation Using the Noise Propagation Matrix // Progress in Nuclear Science and Technology – 2011. – vol. 2. pp.749 – 756.
11. Dufek J. Accelerated Monte Carlo Eigenvalue Calculations / XIII Meeting on Reactor Physics Calculations in the Nordic Countries, 29-30 March 2007, Sweden.