

# Разработка и исследование алгоритмов расчета слабосвязанных систем методом Монте-Карло



Олейник Д. С.  
(ИЯР, РНЦ «Курчатовский институт»)



## **Введение.**

---

Метод Монте-Карло часто применяется при решении задач, связанных с анализом ядерной безопасности размножающих нейтроны систем.

Главным достоинством метода Монте-Карло является то, что он позволяет проводить моделирование взаимодействия излучения с веществом на основе информации из файлов оценённых ядерных данных (т. е. используются наиболее точные данные без дополнительных приближений и огрублений) в системах со сложной геометрией.

С математической точки зрения однородное уравнение переноса можно представить в виде интеграла по фазовым координатам, численное решение которого находится с помощью метода Монте-Карло.



## **Особенности моделирования методом Монте-Карло.**

---

С ростом мощности вычислительных средств всё чаще стали рассматриваться системы, описывающие реальные полномасштабные объекты использования атомной энергии: энергетические реакторы, хранилища отработавшего ядерного топлива.

При расчёте методом Монте-Карло существует проблема оценки систематических и статистических погрешностей вычисления эффективного коэффициента размножения и других функционалов потока нейтронов.



## **Цель работы.**

---

Цель работы: разработка и тестирование алгоритмов и программного обеспечения, на основе статистических критериев, которые бы позволили получать надежные оценки нейтронно-физических характеристик и их статистических погрешностей при расчетах методом Монте-Карло слабосвязанных систем и полномасштабных моделей энергетических реакторов.



## **Постановка задачи.**

Уравнение плотности генерации нейтронов деления в условно критическом реакторе можно записать в виде

$$k_{\text{эф}} \Psi = H \Psi$$

Решение однородного уравнения переноса нейтронов методами Монте-Карло сводится к статистическому моделированию итерационного процесса:

$$\mathbf{U}_n = H \frac{\mathbf{U}_{n-1}}{(\mathbf{e}, \mathbf{U}_{n-1})}$$

$\mathbf{U}_n$  – функции распределения источников нейтронов деления в поколениях с номерами  $n$ , а  $\mathbf{U}_0$  – функция распределения нейтронов нулевого поколения.

В данном случае различают два рода систематических погрешностей.



## **Постановка задачи.**

---

Параметры моделирования методом Монте-Карло, задаваемые пользователем:

- **$M$**  – количество нейтронов в поколении;
- $\psi_0$  – функция распределения нейтронов нулевого поколения;
- **$I$**  – число первых неактивных поколений, не используемых для оценки функционалов;
- **$L$**  – число активных поколений, используемых для оценки функционалов.



## **Систематическая погрешность 1-го рода.**

Систематическая погрешность 1-го рода возникает из-за нелинейности итерационного процесса.

Систематическая погрешность 1-го рода  $= \Delta_1 = \frac{\delta_M}{M}$ ,  
где

$\delta_M$  – параметр системы,  $M$  – число нейтронов в поколении.

Для оценки систематической погрешности 1-го рода влияния на значения функционалов и выбора оптимального числа нейтронов в поколении была разработана программа на основе выведенной асимптотической формулы:

$$\Delta_{1a} = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{l=1}^n \langle \delta r_n \delta k_{n-l} \rangle}{k_{эф}}$$

где  $r_n$ ,  $k_n$  – оценки функционала и  $k_{эф}$  на  $n$ -м поколении,  $\delta r_n = r_n - \langle r_n \rangle$ ,  $\delta k_n = k_n - \langle k_n \rangle$ .



## **Систематическая погрешность 2-го рода.**

---

Систематическая погрешность 2-го рода оказывает влияние на значение функционалов потока нейтронов, когда начальное распределение нейтронов в системе сильно отличается от реального.

Систематическая погрешность 2-го рода убывает с ростом числа промоделированных поколений.

Систематическая погрешность 2-го рода мало влияет на оценки функционалов, когда:

- Начальное распределение близко к реальному;
- Если не брать в расчет оценки, полученные на первых поколениях, в которых распределение нейтронов в системе все еще сильно отличается от реального.



## **Статистическая погрешность.**

---

Статистическая погрешность оценок функционалов потока нейтронов вычисляется не корректно, если не учитываются корреляции между оценками функционалов на соседних поколениях.

Решение: На этапе обработки результатов расчёта объединять оценки функционалов на соседних поколениях объединяются в серии так, чтобы оценки функционалов на соседних сериях были независимыми.



## Методика.

Процесс моделирования методом Монте-Карло выстраивается в следующую последовательность:





## **Тесты.**

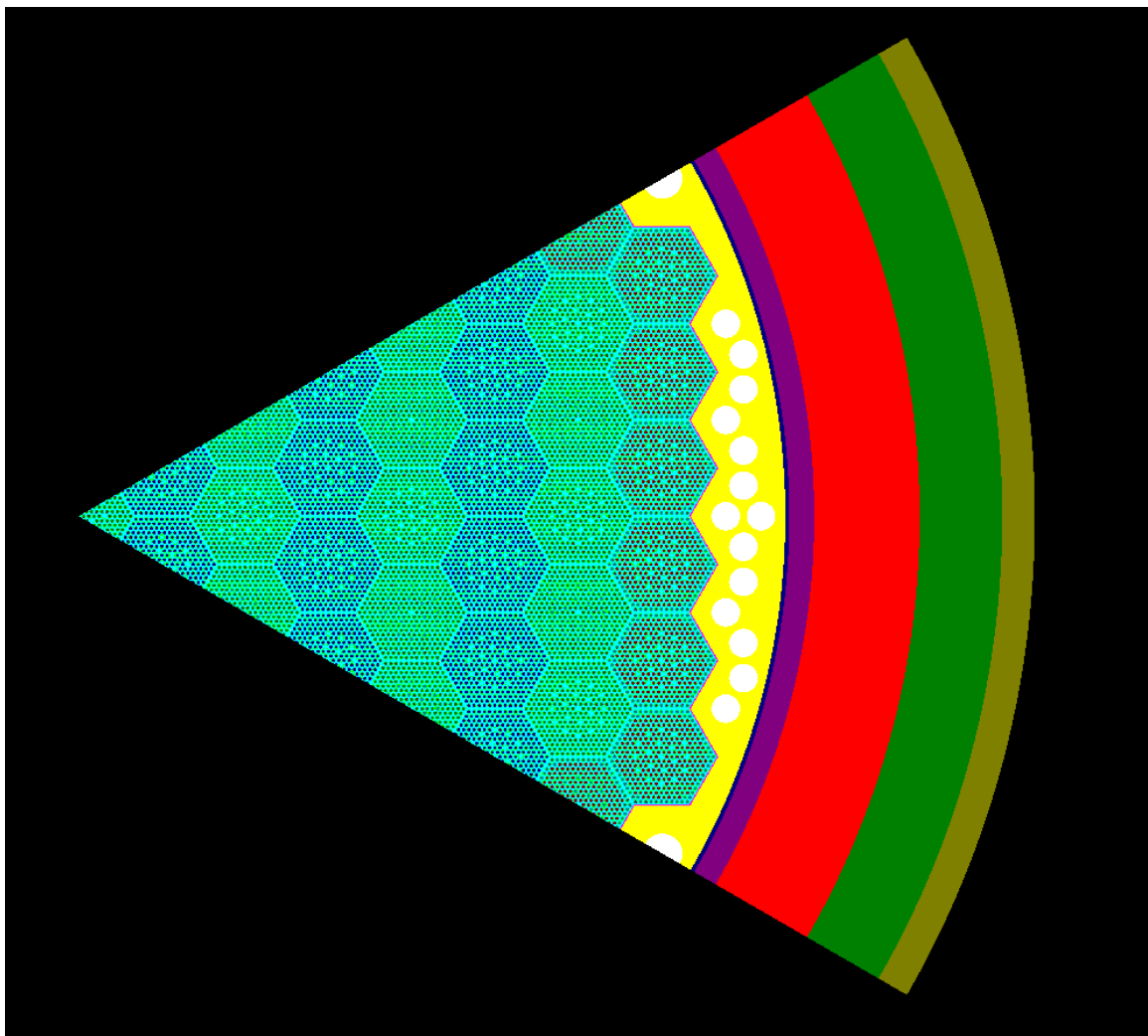
---

Усовершенствованная методика расчета методом Монте-Карло систем размножающих нейтроны была проверена на различных тестах:

- На ряде тестов, предложенных международной группой OECD/NEA по проблемам расчета слабосвязанных систем;
- На примере расчета полномасштабных двумерных моделей ВВЭР-1000;
- На примере расчета каскадного подкритического жидкосолевого реактора – пережигателя минорных актинидов.

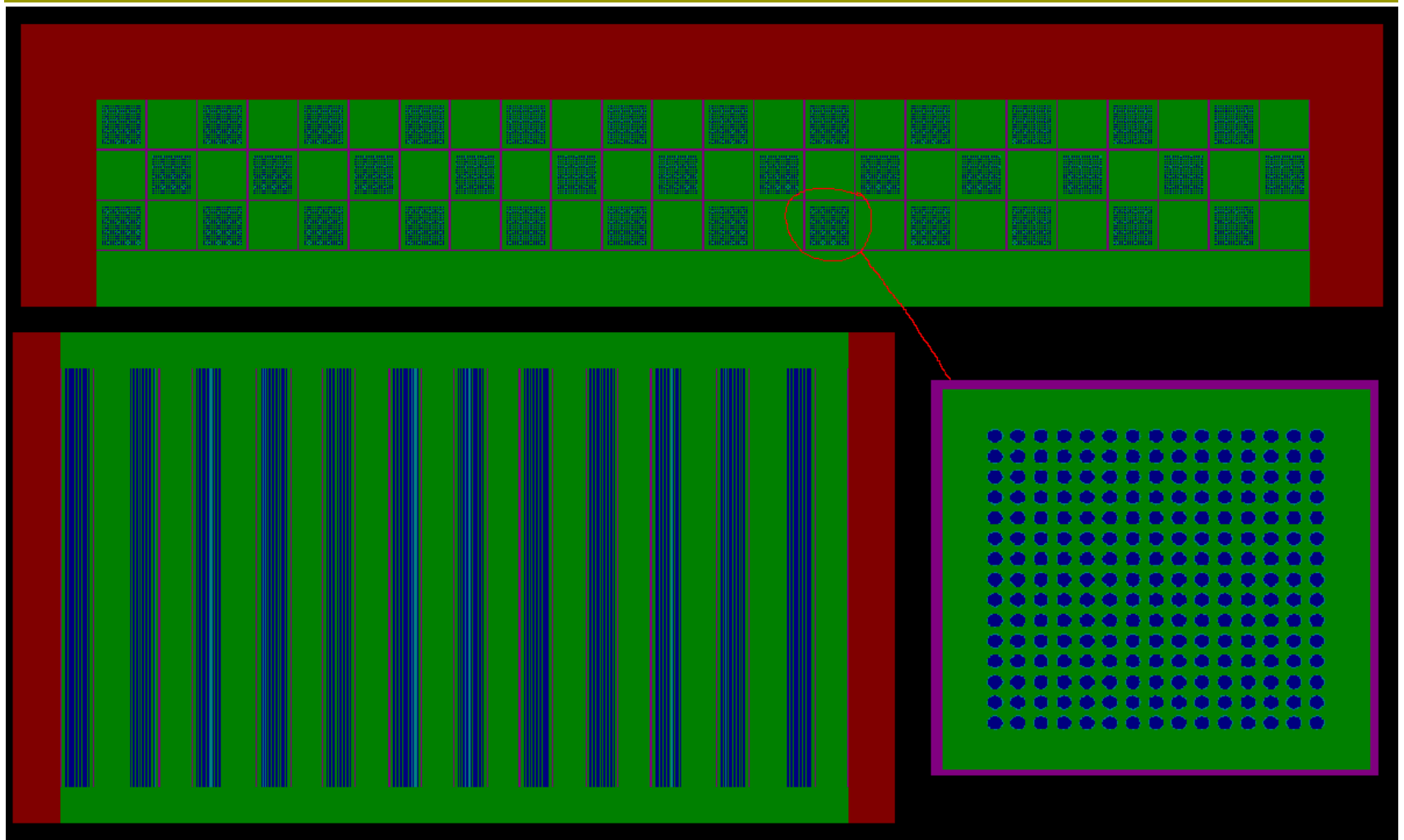


## **Тесты. 2D ВВЭР-1000.**





## Тесты. 3D checkerboard storage of assemblies.





## **Результаты. Систематическая погрешность 1-го рода.**

Сист. погрешность 1-го рода при расчете скорости реакции деления для одной из конфигураций ВВЭР-1000 при  $M = 200$ , вычисленная по асимптотической формуле.

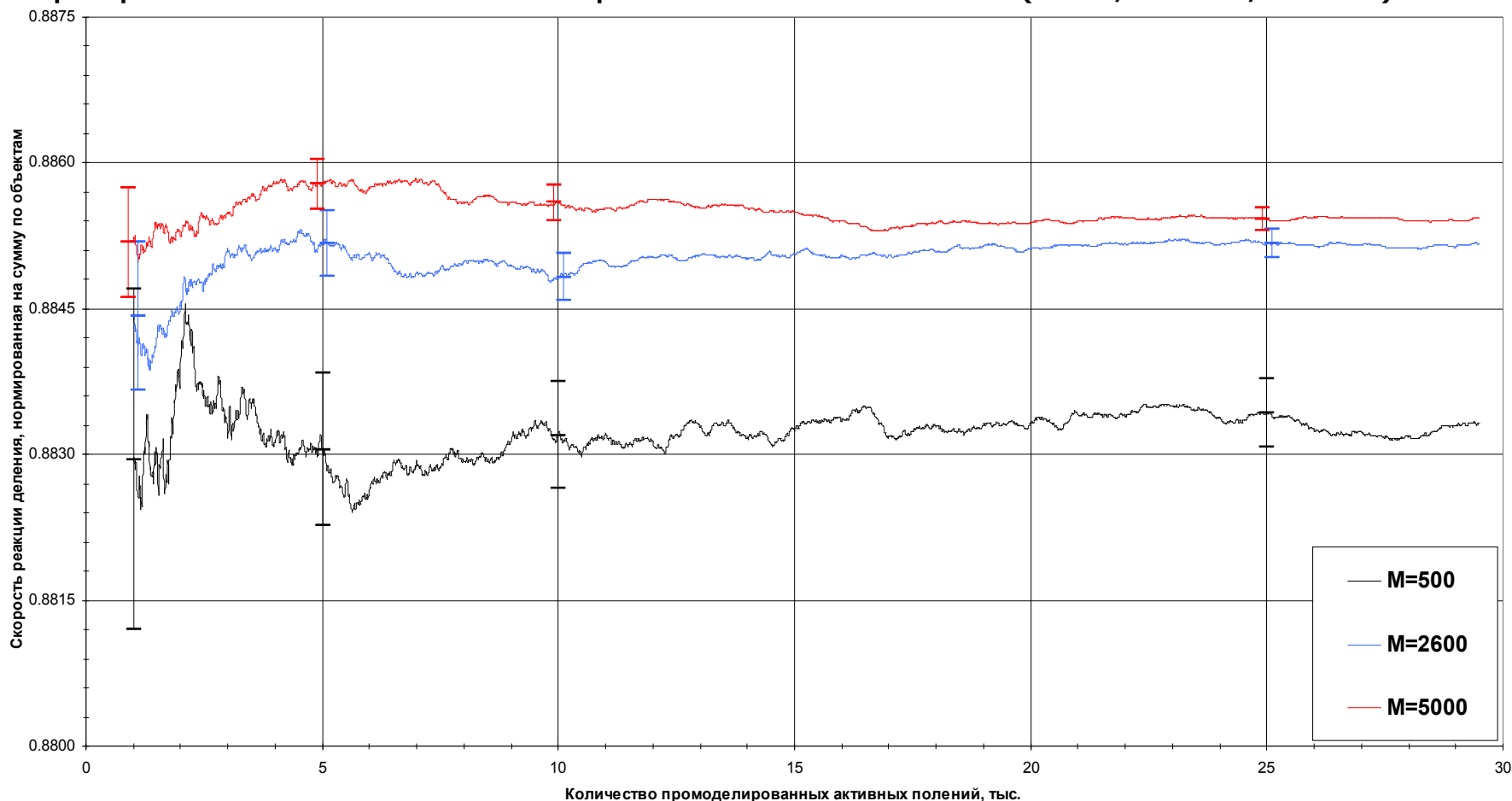
Скорость реакции деления	Теоретическая оценка смещения, %	Скорость реакции деления (расчет с теоретической поправкой)
46	6	44
125 27	4 7	120 25
81 116	0 5	81 110
152 87 81	-4 3 5	160 84 76
158 88 110	-6 -1 4	169 89 104
113 107 118 90	-8 -5 2 4	123 113 115 86
73 185 116 119	-8 -7 0 3	80 199 116 114
113 112 118 72	-8 -4 2 3	123 117 115 69
159 85 103	-6 0 3	170 86 100
153 85 73	-4 3 4	161 83 71
81 112	0 4	82 108
125 26	4 5	121 25
46	5	44

Скорректированные расчеты почти совпадают с вычислениями, выполненными при больших значениях  $M$ ,



## Результаты. Систематическая погрешность 1-го рода.

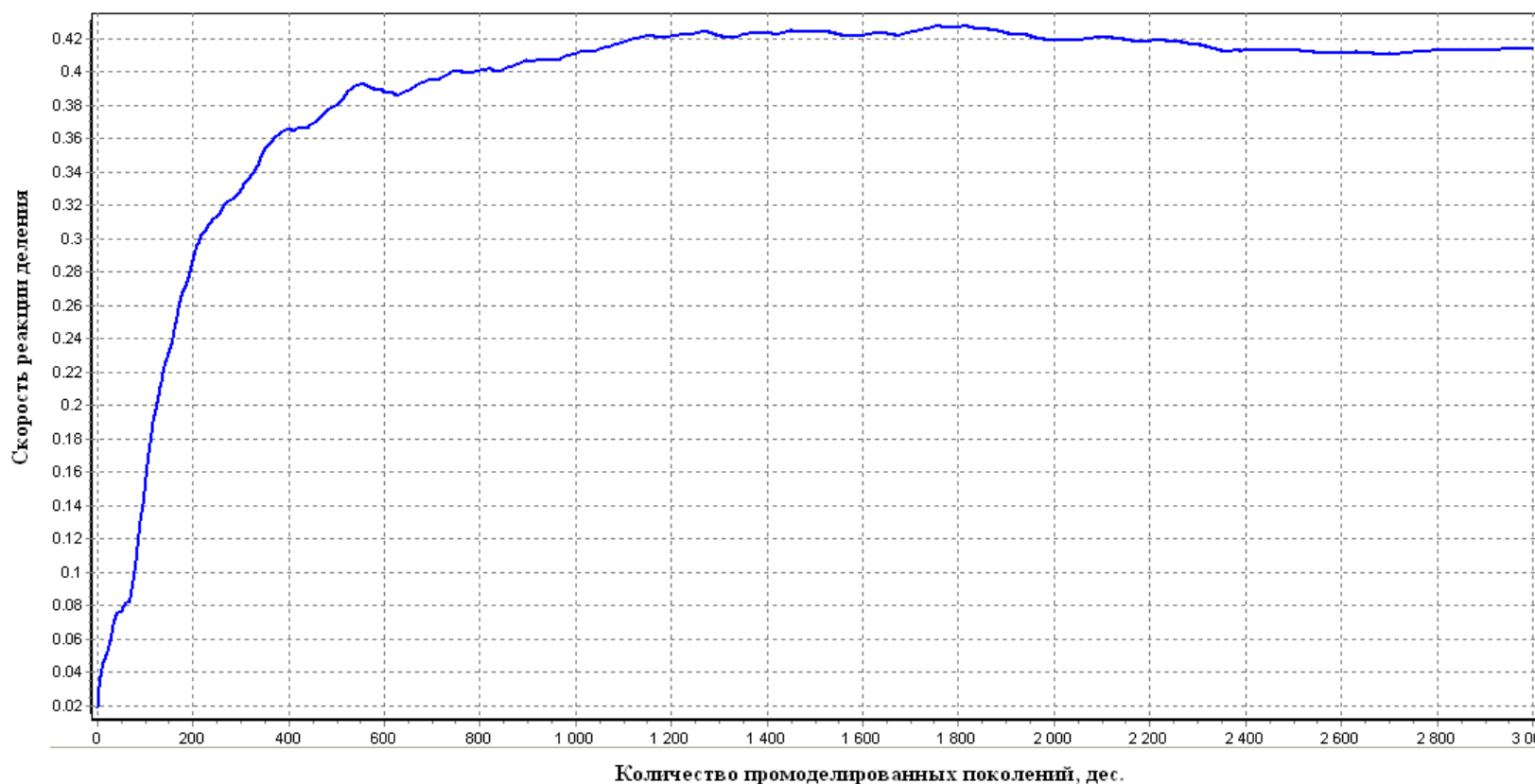
Зависимость оценки  $k_{эф}$  от количества промоделированных поколений для модели трёхмерного хранилища (тест OECD/NEA) при различном числе нейтронов в поколении (500, 2600, 5000).





## **Результаты. Систематическая погрешность 2-го рода.**

Иллюстрация систематической погрешности 2-го рода при расчёте скорости реакции деления в кассете, в которой происходит наибольшее количество делений, для модели трёхмерного хранилища (тест OECD/NEA) при  $M = 5000$ .







## **Заключение.**

Таким образом в рамках представленной работы:

- была усовершенствована методика, используемая в пакете MCU и предназначенная для математического моделирования переноса нейтронов в слабосвязанных системах;
- были разработаны статистические критерии, позволяющие достоверно оценивать статистические и систематические погрешности расчета;
- были разработаны алгоритмы и программное обеспечение для оценки статистических и систематических погрешностей;
- было проведено тестирование и проверка эффективности разработанной методики, алгоритмов и программного обеспечения на ряде тестовых задач;
- был выполнен анализ результатов тестирования и сравнение их с результатами, полученными по другим программам и/или другими научными группами.



## **Заключение.**

---

Проверка эффективности и тестирование разработанных алгоритмов и программ показали, что разработанная методика, алгоритмы и программное обеспечение позволяют существенно ускорить выбор параметров моделирования методом Монте-Карло, повысить точность и достоверность оценок нейтронно-физических характеристик, делать обоснования расчетных данных более надежными.