

# ВЛИЯНИЕ ДЕТАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИИ ЦЕННОСТИ НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТА ФУНКЦИОНАЛОВ НЕЙТРОННОЙ КИНЕТИКИ В ВОДЯНЫХ КРИТИЧЕСКИХ СБОРКАХ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Д.М. Архангельский, Ю.С. Дайченкова, М.А. Калугин, Д.С. Олейник, Д.А. Шкаровский

НИЦ «Курчатовский институт»  
123182, г. Москва, пл. Курчатова, 1



В работе на примере трёх критических экспериментов из сборника ICSBER с использованием программного комплекса MCU, реализующего метод Монте-Карло, проведено расчётное исследование влияния детализации функции ценности на точность расчёта эффективной доли запаздывающих нейтронов  $\beta_{eff}$  и времени генерации мгновенных нейтронов  $\Lambda$ .

В программном комплексе MCU функция ценности задаётся в кусочно-постоянном виде: расчётная модель разбивается на конечное число регистрационных объектов, в каждом из которых вычисляется ценность нейтронов. Затем полученные значения ценности используются при расчёте вышеречисленных функционалов, вследствие чего точность расчёта которых зависит от степени детализации.

Проведено исследование трёх типов пространственного разбиения функции ценности: аксиальное, радиальное и комбинированное.

Результаты численного моделирования показали, что аксиальная составляющая функции ценности нейтронов во всех экспериментах практически не оказывает влияния на точность вычисления  $\beta_{eff}$  и  $\Lambda$  – различие между полученными значениями составляет менее 1%. Радиальная составляющая оказывает существенное (до 15,9%) влияние на точность расчёта  $\Lambda$ , при этом почти никак не влияя на оценку  $\beta_{eff}$ . Использование комбинированного разбиения по сравнению с радиальным незначительно улучшает точность расчёта (< 1%).

**Ключевые слова:** метод Монте-Карло, MCU, функционалы кинетики, ценность нейтронов, время генерации, запаздывающие нейтроны.

Архангельский Д.М., Дайченкова Ю.С., Калугин М.А., Олейник Д.С., Шкаровский Д.А. Влияние детализации функции ценности на точность расчета функционалов нейтронной кинетики в водяных критических сборках методом Монте-Карло. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 2. – С. 5-14. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.01> .

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время метод Монте-Карло всё чаще применяется для решения задач переноса при расчёте ядерных реакторов [1]. Развитие технологий параллельных вы-

© Д.М. Архангельский, Ю.С. Дайченкова, М.А. Калугин, Д.С. Олейник, Д.А. Шкаровский, 2023

числений позволило рассматривать сложные трёхмерные системы, достичь высокого уровня прецизионности расчётов [2, 3].

Одной из актуальных задач в этом направлении является повышение точности вычисления оценок функционалов нейтронной кинетики – эффективной доли запаздывающих нейтронов  $\beta_{eff}$  и времени генерации мгновенных нейтронов  $\Lambda$  [4 – 6]. Ранее в программном комплексе MCU расчёт данных функционалов вёлся в предположении, что функция ценности является константой во всём фазовом объёме. Для программного комплекса MCU [7, 8] в настоящее время разрабатывается возможность учёта функции ценности нейтронов при вычислении  $\beta_{eff}$  и  $\Lambda$  [9, 10], реализованная в ряде других расчётных программ (TRIPOLI, MCNP [11, 12]). Функция ценности при этом представляется в дискретном разбиении – расчётная модель разбивается на конечное число регистрационных объектов, в каждом из которых вычисляются плотность генерации нейтронов и сопряженная ей функция.

Работа посвящена исследованию влияния степени детализации функции ценности на точность расчёта оценок  $\beta_{eff}$  и  $\Lambda$ .

В рамках исследования рассмотрены эксперименты с низкообогащенным ураном в составных системах с тепловым спектром, проводившиеся на легководных критических стендах ZR-6 (LCT-015) и «Стенд П» (LCT-053 и LCT-085) из сборника ICSBER [13].

Приводится краткое описание алгоритмов и методов, реализованных в MCU, описание расчётных моделей, анализ полученных результатов.

### МЕТОДИКА РАСЧЁТА

В программном комплексе MCU расчёт  $\Lambda$  и  $\beta_{eff}$  основан на их представлении в виде дробно-линейных функционалов ценности нейтронов

$$\Lambda = (\Psi^+, \tau(\mathbf{F} + \mathbf{B})\Psi) / (\Psi^+, (\mathbf{F} + \mathbf{B})\Psi), \quad (1)$$

$$\beta_{eff} = (\Psi^+, \mathbf{B}\Psi) / (\Psi^+, (\mathbf{F} + \mathbf{B})\Psi), \quad (2)$$

где  $\mathbf{F}$  – оператор генерации мгновенных нейтронов;  $\mathbf{B}$  – оператор генерации запаздывающих нейтронов;  $\tau$  – время жизни нейтрона;  $\Psi$  – плотность генерации нейтронов;  $\Psi^+$  – сопряженная плотности генерации функция, обладающая физическим смыслом ценности нейтронов [14, 15]. Таким образом, для получения оценок функционалов необходимо вычислить плотность генерации нейтронов и сопряженную ей функцию.

Однако, используя метод Монте-Карло, затруднительно получить обе эти функции в непрерывном виде. Поэтому расчётная модель разбивается на конечное число регистрационных объектов – совокупностей точек в фазовом пространстве, в которых регистрируются искомые функции. Так условно-критическую задачу можно представить в матричном виде

$$k_{eff}\Psi = \mathbf{T}\Psi, \quad (3)$$

где  $\Psi$  – вектор,  $i$ -ый компонент которого соответствует плотности генерации нейтронов в соответствующем объекте;  $\mathbf{T} = \mathbf{F} + \mathbf{B}$  – матрица, компонент  $T_{ij}$  которой имеет смысл среднего числа нейтронов, появившихся в объекте  $i$  в результате деления нуклида нейтроном, родившимся в объекте  $j$  [16, 17].

Функцию ценности нейтронов можно получить, решив сопряженное (3) уравнение

$$k_{eff}\Psi^+ = \mathbf{T}^T\Psi^+, \quad (4)$$

где транспонированная матрица  $\mathbf{T}^T$  имеет смысл сопряженного оператора.

Таким образом, полученная в результате моделирования методом Монте-Карло матрица делений  $\mathbf{T}$  транспонируется и используется для решения уравнения (4). В результате получаем вектор  $\Psi^+$  – функцию ценности нейтронов в разбиении по регистрационным объектам.

Полученные величины затем используются для получения оценок (1), (2), которые

зависят от степени детализации функции ценности.

Апробация используемой методики, показавшая согласие с экспериментальными данными, проведена в работе [18].

### ОПИСАНИЕ РАСЧЁТНЫХ МОДЕЛЕЙ

В данной работе рассматривались легководные критические стэнды ZR-6 (LCT-015) и «Стенд П» (LCT-053 и LCT-085) из сборника ICSBER.

Экспериментальная установка «Стенд П» представляет собой треугольную решётку твэлов, погруженных в заполненный водой бак из нержавеющей стали. В качестве замедлителя используется лёгкая вода. Критичность стэнда регулируется подбором уровня замедлителя. Твэлы в треугольной решётке расположены с шагом 1,27 см. Положение твэлов фиксируется нижней и верхней опорной решётками. В качестве топливной композиции используется диоксид урана –  $UO_2$ . Обогащение топлива в рассматриваемых вариантах LCT-053 и LCT-085 составляет 4,4 и 6,5% соответственно.

Продольное и поперечное сечения расчётной модели «Стенд П» приведены на рис. 1, 2.

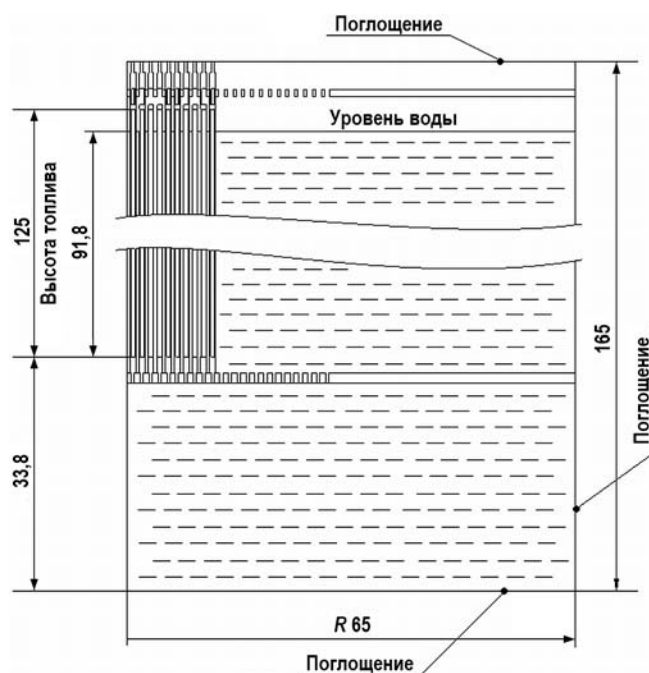


Рис. 1. Продольное сечение расчётной модели «Стенд П»

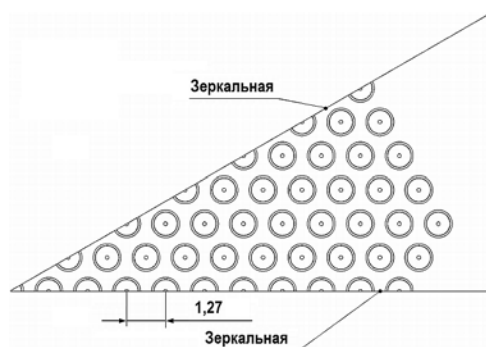


Рис. 2. Поперечное сечение расчётной модели «Стенд П»

Аналогично «Стенду П» экспериментальная установка нулевой мощности ZR-6 состоит из сборки твэлов, погруженной в бак из нержавеющей стали. В качестве замедлителя используется лёгкая вода с добавлением борной кислоты (5,8 г/л). Шаг треугольной решётки твэлов – 1,27 см, топливо –  $UO_2$  обогащением 4,4% вес.

Продольное и поперечное сечения расчётной модели ZR-6 приведены на рис. 3, 4.

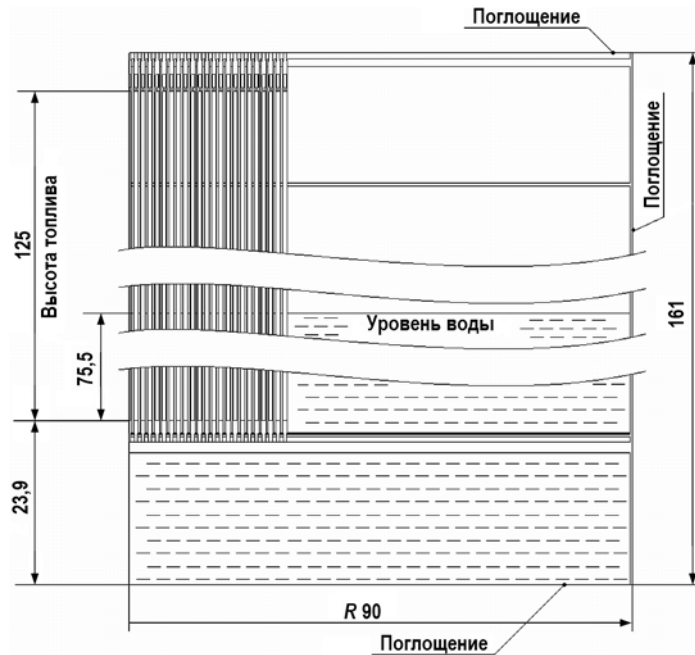


Рис. 3. Продольное сечение расчётной модели ZR-6

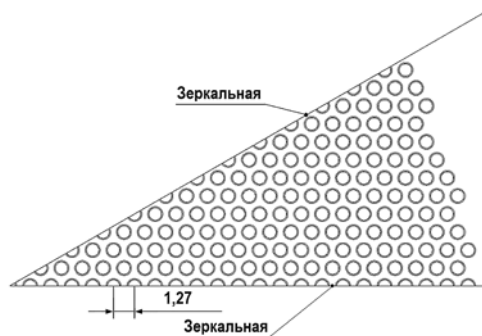


Рис. 4. Поперечное сечение расчётной модели ZR-6

В рамках проводимого исследования топливные столбы твэлов были разбиты на регистрационные объекты [19, 20] различными способами. Аксиальное разбиение осуществляется выделением десяти слоёв по высоте топливного столба. В радиальном разбиении каждому топливному столбу соответствует уникальный регистрационный объект. Комбинированное разбиение представляет собой комбинацию радиального и аксиального разбиений. Угол симметрии всех представленных моделей – 30 градусов.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТОВ

Рассмотрим результаты расчётов  $\beta_{eff}$  и  $\Lambda$  с учётом и без учёта функции ценности с различной степенью детализации функции ценности нейтронов.

Результаты расчётов экспериментов LCT-085, LCT-053, LCT-015, а также величина кор-

рекции оценок с использованием ценности нейтронов приведены в табл. 1 – 3. На рисунках 5, 6 показаны графики нормированных радиальных и аксиальных зависимостей плотности генерации нейтронов и функции ценности для всех рассмотренных экспериментов.

Таблица 1

**Результаты расчётов эксперимента LCT-085 case 13**

Тип разбиения	$\beta_{eff}$		$\Lambda$	
	Значение, рсм	$\Delta$ , %	Значение, $10^{-5}$ с	$\Delta$ , %
Без учёта ценности	815,6	–	3,1	–
Аксиальное	816,2	–0,1	3,1	0,1
Радиальное	822,1	–0,8	2,7	15,7
Комбинированное	822,4	–0,9	2,7	15,9

Таблица 2

**Результаты расчётов эксперимента LCT-053 case 11**

Тип разбиения	$\beta_{eff}$		$\Lambda$	
	Значение, рсм	$\Delta$ , %	Значение, $10^{-5}$ с	$\Delta$ , %
Без учёта ценности	804,3	–	3,3	–
Аксиальное	806,6	–0,3	3,3	0,6
Радиальное	810,4	–0,8	2,9	14,5
Комбинированное	812,7	–1,0	2,8	15,3

Таблица 3

**Результаты расчётов эксперимента LCT-015 163/161**

Тип разбиения	$\beta_{eff}$		$\Lambda$	
	Значение, рсм	$\Delta$ , %	Значение, $10^{-5}$ с	$\Delta$ , %
Без учёта ценности	778	–	2,72	–
Аксиальное	783	–0,6	2,60	2,0
Радиальное	783	–0,6	2,46	10,3
Комбинированное	788	–1,2	2,44	11,5

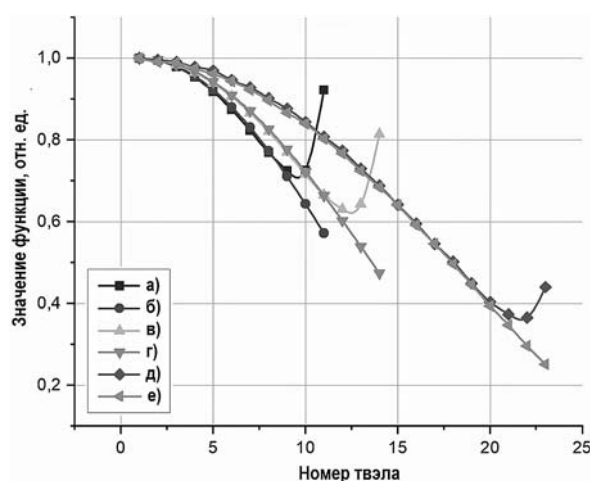


Рис. 5. Радиальные составляющие плотности генерации и ценности нейтронов: а) – плотность генерации в LCT-085; б) – ценность в LCT-085; в) – плотность генерации в LCT-053; г) – ценность в LCT-053; д) – плотность генерации в LCT-015; е) – ценность в LCT-015

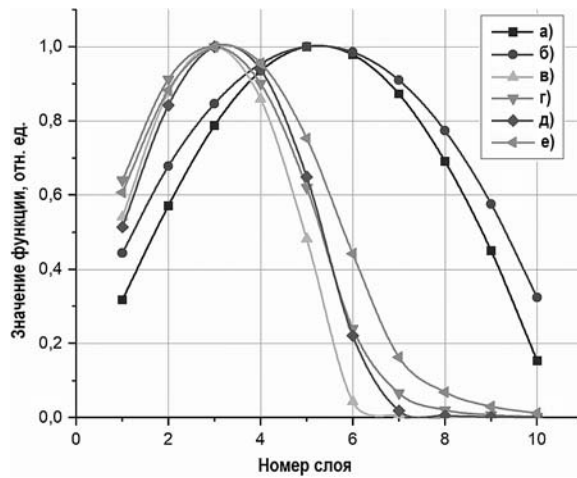


Рис. 6. Аксиальные составляющие плотности генерации и ценности нейтронов: а) – плотность генерации в LCT-085; б) – ценность в LCT-085; в) – плотность генерации в LCT-053; г) – ценность в LCT-053; д) – плотность генерации в LCT-015; е) – ценность в LCT-015

Согласно полученным результатам, во всех экспериментах можно выделить следующие закономерности: вклад радиального разбиения функции ценности превалирует над вкладом аксиального. В частности, при расчёте  $\Lambda$  учёт функции ценности слабо влияет на точность вычисления  $\beta_{eff}$ . Для объяснения полученных результатов необходимо рассмотреть графики радиальных и аксиальных зависимостей плотности генерации и ценности нейтронов.

Во всех радиальных распределениях наблюдается резкий скачок плотности генерации нейтронов на периферии сборки, который возникает в результате роста водно-уранового отношения на границе с отражателем. Нейтроны, родившиеся в области с высокой ценностью, могут попасть в отражатель и, вернувшись, с большой вероятностью будут поглощены во внешнем ряду твэлов, в области с низкой ценностью. Для получения достоверного значения  $\Lambda$  большое время жизни таких нейтронов должно войти в итоговую оценку с весом – ценностью, так как произведенные ими вторичные нейтроны обладают малой ценностью ввиду высокой вероятности утечки. Увеличение отношения плотности генерации нейтронов на периферии и в центре сборки приводит к увеличению эффекта от учёта ценности [21, 22]. Таким образом, принятие в расчёт функции ценности нейтронов позволяет скорректировать оценку времени генерации мгновенных нейтронов вплоть до 16%.

Монотонности аксиальных распределений плотности генерации и ценности нейтронов совпадают на всём промежутке, вследствие чего учёт функции ценности не вносит существенной корректировки в оценку  $\Lambda$  (до 2%).

Комбинированное разбиение по сравнению с радиальным незначительно увеличивает точность оценок ( $\approx 1\%$ ) в результате малого влияния радиального разбиения

Стоит отметить, что учёт функции ценности оказывает слабое влияние на точность расчёта  $\beta_{eff}$  ( $\approx 1\%$ ) в результате достаточно «мягкого» спектра системы. Различие в энергии мгновенных и запаздывающих нейтронов быстро нивелируется вследствие хороших замедляющих свойств среды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложено краткое описание реализованных в программном комплексе MSU алгоритмов учёта функции ценности при расчёте эффективной доли запаздывающих нейтронов и времени генерации мгновенных нейтронов.

Проведено исследование влияния степени детализации функции ценности на точ-

ность вычисления рассматриваемых функционалов в трёх видах разбиения: аксиальном, радиальном и комбинированном.

Анализ результатов расчётов показал, что радиальное разбиение оказывает решающий вклад в увеличение точности оценок времени генерации мгновенных нейтронов (до 16%) в результате скачка плотности генерации нейтронов на периферии сборки. Периферийные нейтроны с малой ценностью рождаются во многом нейтронами, которые вернулись из отражателя и обладают большим временем жизни. Для получения корректных оценок, время их жизни должно входить в итоговую оценку с весом в виде функции ценности в точке поглощения.

Аксиальное разбиение ввиду одинаковой монотонности исследуемых функций не вносит существенного вклада в увеличение точности оценок, вследствие чего комбинированное распределение вносит поправку в оценки, почти идентичную радиальной.

Влияние учёта функции ценности на точность расчёта эффективной доли запаздывающих нейтронов мало ( $\approx 1\%$ )  $\beta_{eff}$  во всех вариантах в силу хороших замедляющих свойств системы – разница в энергиях между мгновенными и запаздывающими нейтронами быстро нивелируется.

Таким образом, увеличение детализации функции ценности нейтронов необходимо в периферийных областях, в которых наблюдается резкое изменение спектра нейтронов.

### Благодарность

Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов ОВК НИЦ «Курчатовский институт», <http://computing.nrcki.ru/>.

### Литература

1. *Соболь И.М.* Численные методы Монте-Карло. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973. – 312 с.
2. *Воеводин В.В., Воеводин Вл.В.* Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
3. *Эндрюс Г.Р.* Основы многопоточного, параллельного и распределенного программирования: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 512 с.
4. *Lewins J.R.* The Use of the Generation Time in Reactor Kinetics. // Nuclear Science and Engineering. – 1960. – Vol. 7. – PP. 122-126. DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE60-A29080>.
5. *Кипин Дж.Р.* Физические основы кинетики ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1967. – 431 с.
6. *Хетрик Д.* Динамика ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1975. – 400 с.
7. *Kalugin M.A., Oleynik D.S., Shkarovsky D.A.* Overview of the MCU Monte Carlo Software Package. // – Annals of Nuclear Energy. – 2015. – Vol. 82. PP. 54-62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.032>.
8. *Gurevich M.I., Kalugin M.A., Oleynik D.S., Shkarovsky D.A.* Estimation of Some Neutron Physics Characteristics by Monte Carlo Method Using the Importance Function. // Annals of Nuclear Energy. – 2019. – Vol. 130. – PP. 388-393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.02.047>.
9. *Brun E., Damian F., Diop C.M., Dumonteil E., Hugot F.X., Jouanne C., Zoia A.* TRIPOLI-4®, CEA, EDF and AREVA Reference Monte Carlo Code. // Annals of Nuclear Energy. – 2014. – PP. 151-160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.053>.
10. *Hendricks J.S. et al.* MCNPX User's Manual, Version 2.5.0. LA-UR-05-2675. – 2005.
11. *Гуревич М.И., Олейник Д.С., Шкаровский Д.А.* Адаптация программы MCU-PD к параллельным вычислениям на многопроцессорных компьютерах. // ВАЯТ. Сер. Физика ядерных реакторов. – 2009. – Вып. 4. – С. 66-77.
12. *Kalugin M.A., Oleynik D.S., Sukhino-Khomenko E.A.* Evaluation of the systematic error of Monte Carlo calculations of neutron-physical properties using a multiprocessor

computer. // Atomic Energy. – 2011. – Vol. 111 (2). – PP. 79-85. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-011-9457-6>.

13. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, 2002.

14. Золотухин В.Г., Майоров Л.В. Оценка параметров критичности реакторов методом Монте-Карло. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 120 с.

15. Brown F.B., Kiedrowski B.C., Wilson P.P.H. Adjoint-weighted tallies for k-eigenvalue calculations with continuous-energy Monte Carlo. // Nuclear Science and Engineering. – 2011. – Vol. 168 (3). – PP. 226-241. DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE10-22>.

16. Oleynik D.S. Monte Carlo Calculation of Weakly Coupled Systems. // Atomic Energy. – 2005. – Vol. 99. – No. 4. – PP. 694-701. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-006-0002-y>.

17. Brown F.B., Carney S.E., Kiedrowski B.C., Martin W.R. Fission Matrix Capability for MCNP, Part I – Theory. // Mathematics & Computation. – 2013, Sun Valley, ID, Report LA-UR-13-20429, Talk LA-UR-13-23152. DOI: <https://doi.org/10.1051/snmc/201403502>.

18. Гуревич М.И., Шкаровский Д.А. Расчет переноса нейтронов методом Монте-Карло по программе MCU. Уч. пособ. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 154 с.

19. Гуревич М.И., Шкаровский Д.А. Расчет переноса нейтронов методом Монте-Карло по программе MCU в примерах. Уч. пособ. – М.: МФТИ, 2018. – 160 с.

20. Михайлов Г.А., Рогазинский С.В. Весовые методы Монте-Карло для приближенного решения нелинейного уравнения Больцмана. // Сибирский математический журнал. – 2002. – Т. 43. – Вып. 3. – С. 496-503.

21. Михайлов Г.А. Оптимизация весовых методов Монте-Карло. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 240 с.

Поступила в редакцию 14.01.2023 г.

#### Авторы

Архангельский Даниил Максимович, лаборант-исследователь, студент

E-mail: [Arkhangelskiy\\_DM@nrcki.ru](mailto:Arkhangelskiy_DM@nrcki.ru)

Дайченкова Юлия Сергеевна, младший научный сотрудник, аспирант

E-mail: [Daichenkova\\_YuS@nrcki.ru](mailto:Daichenkova_YuS@nrcki.ru)

Калугин Михаил Александрович, зам. руководителя комплекса, д-р техн. наук

E-mail: [Kalugin\\_MA@nrcki.ru](mailto:Kalugin_MA@nrcki.ru)

Олейник Дмитрий Сергеевич, начальник лаборатории

E-mail: [Oleynik\\_DS@nrcki.ru](mailto:Oleynik_DS@nrcki.ru)

Шкаровский Денис Александрович, начальник отдела, канд. физ.-мат. наук

E-mail: [Shkarovkiy\\_DA@nrcki.ru](mailto:Shkarovkiy_DA@nrcki.ru)

UDC 621.039.51

## **The Effect of the Importance Function Resolution on the Accuracy of Calculating the Functionals of the Neutron Kinetics in Water Critical Assemblies by Monte Carlo Method**

Arkhangelsky D.M., Daichenkova Yu.S., Kalugin M.A., Oleynik D.S., Shkarovsky D.A.

Kurchatov Institute NRC

1 Kurchatov Sq., 123182 Moscow, Russia

#### ABSTRACT

The paper considers a computational study of the importance function effect on the accuracy of calculating the effective fraction of delayed neutrons,  $\beta_{eff}$  and generation



time of instantaneous neutrons using the MCU Monte Carlo code based on the example of three criticality experiments from the ICSBEP handbook.

In the MCU code, the importance function has a piecewise constant form: the computational model is broken down into a finite number of registration objects, and the neutron importance is calculated in each. The obtained importance values are used then to calculate the kinetic functionals due to which the calculation accuracy for the latter depends on the resolution.

Three types of the importance function spatial partition (axial, radial, combined) have been studied.

The numerical simulation results have shown that the axial component of the neutron importance function in all experiments has practically no effect on the calculation accuracy for  $\beta_{eff}$  and  $\Lambda$ : the difference between the obtained values is less than 1 %. The radial component has a notable effect (of up to 15.9 %) on the  $\Lambda$  calculation accuracy while having almost no effect on the  $\beta_{eff}$  estimate. Using combined partition, as compared with radial partition, improves the calculation accuracy insignificantly (< 1%).

**Key words:** Monte Carlo method, MCU, kinetic functionals, importance function, generation time, delayed neutrons.

Arkhangelsky D.M., Daichenkova Yu.S., Kalugin M.A., Oleynik D.S., Shkarovsky D.A. The Effect of the Importance Function Resolution on the Accuracy of Calculating the Functionals of the Neutron Kinetics in Water Critical Assemblies by Monte Carlo Method. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 2, pp. 5-14; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.01> (in Russian).

#### REFERENCES

1. Sobol I.M. *Numerical Monte Carlo Methods*. Moscow. Nauka Publ., 1973, 312 p. (in Russian).
2. Voevodin V.V., Voevodin V.I. *Parallel Computing*. Saint-Petersburg. BHV-Petersburg Publ., 2002, 608 p. (in Russian).
3. Andrews G.R. *Fundamentals of Multithreaded, Parallel and Distributed Programming*. Moscow. Williams Publ., 2003, 512 p. (in Russian)
4. Lewins J.R. The Use of the Generation Time in Reactor Kinetics. *Nuclear Science and Engineering*. 1960, v. 7, pp. 122-126; DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE60-A29080>.
5. Kipin J.R. *Physical Fundamentals of Nuclear Reactor Kinetics*. Moscow. Atomizdat Publ., 1967, 431 p. (in Russian).
6. Hetrick D.L. *Dynamics of Nuclear Reactors*. Moscow. Atomizdat Publ., 1975, 400 p. (in Russian).
7. Kalugin M.A., Oleynik D.S., Shkarovsky D.A. Overview of the MCU Monte Carlo Software Package. *Annals of Nuclear Energy*. 2015, v. 82, pp. 54-62; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.032>.
8. Gurevich M.I., Kalugin M.A., Oleynik D.S., Shkarovsky D.A. Estimation of Some Neutron Physics Characteristics by Monte Carlo Method Using the Importance Function. *Annals of Nuclear Energy*. 2019, v. 130, pp. 388-393; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.02.047>.
9. Brun E., Damian F., Diop C.M., Dumonteil E., Hugot F.X., Jouanne C., Zoia A. TRIPOLI-4®, CEA, EDF and AREVA Reference Monte Carlo Code. *Annals of Nuclear Energy*. 2014, pp. 151-160; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.053>.
10. Hendricks J.S. et al. *MCNPX User's Manual, Version 2.5.0*. LA-UR-05-2675. – 2005.
11. Gurevich M.I., Oleynik D.S., Shkarovsky D.A. Adaptation of the MCU-PD program to parallel computing on multiprocessor computers. *VANT. Ser. Fizika Yadernykh Reaktorov*. 2009, iss. 4, pp. 66-77 (in Russian).
12. Kalugin M.A., Oleynik D.S., Sukhino-Khomenko E.A. Evaluation of the Systematic Error of Monte Carlo Calculations of Neutron-Physical Properties Using a Multiprocessor

Computer. *Atomic Energy*. 2011, v. 111 (2). pp. 79-85; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-011-9457-6> .

13. *International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments*, NEA/NSC/DOC(95)03, 2002.

14. Zolotukhin V.G., Majorov L.V. *Evaluation of Reactor Criticality Parameters by the Monte Carlo Method*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1984, 120 p. (in Russian).

15. Brown F.B., Kiedrowski B.C., Wilson P.P.H. Adjoint-Weighted Tallies for K-Eigenvalue Calculations with Continuous-Energy Monte Carlo. *Nuclear Science and Engineering*. 2011. v. 168 (3). pp. 226-241; DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE10-22> .

16. Oleynik D.S. Monte Carlo Calculation of Weakly Coupled Systems. *Atomic Energy*. 2005, v. 99. iss. 4. pp. 694-701; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-006-0002-y> .

17. Brown F.B., Carney S.E., Kiedrowski B.C., Martin W.R. Fission Matrix Capability for MCNP, Part I – Theory. *Mathematics & Computation*. 2013, Sun Valley, ID, Report LA-UR-13-20429, Talk LA-UR-13-23152; DOI: <https://doi.org/10.1051/snmc/201403502> .

18. Gurevich M.I., Shkarovsky D.A. *Calculation of Neutron Transfer by the Monte Carlo Method According to the MCU Program*. Study guide. Moscow. NRNU MEPhI Publ., 2012, 154 p. (in Russian).

19. Gurevich M.I., Shkarovsky D.A. *Calculation of Neutron Transfer by the Monte Carlo Method According to the MCU Program in Examples*. Study guide. Moscow. MIPT Publ., 2018, 160 p. (in Russian).

20. Mihajlov G.A., Rogazinskij S.V. Monte Carlo Weight Methods for Approximate Solution of the Nonlinear Boltzmann Equation. *Sibirsky Matematichesky Zhurnal*. 2002, v. 43, iss. 3, pp. 496-503; DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1015467719806> (in Russian).

21. Mihajlov G.A. *Optimization of Monte Carlo Weight Methods*. Moscow. Nauka Publ., 1987, 240 p. (in Russian).

#### Authors

Daniil M. Arkhangelsky, Laboratory Assistant, Student

E-mail: [Arkhangelskiy\\_DM@nrcki.ru](mailto:Arkhangelskiy_DM@nrcki.ru)

Yuliya S. Daichenkova, Junior Researcher, PhD Student

E-mail: [Daichenkova\\_YuS@nrcki.ru](mailto:Daichenkova_YuS@nrcki.ru)

Mikhail A. Kalugin, Deputy Head of the Complex for Scientific Work, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: [Kalugin\\_MA@nrcki.ru](mailto:Kalugin_MA@nrcki.ru)

Dmitry S. Oleynik, Head of Laboratory

E-mail: [Oleynik\\_DS@nrcki.ru](mailto:Oleynik_DS@nrcki.ru)

Denis A. Shkarovsky, Head of Department, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: [Shkarovkiy\\_DA@nrcki.ru](mailto:Shkarovkiy_DA@nrcki.ru)