

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-2-174-178>
УДК 621.039

МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА НЕЙТРОНОВ ДЛЯ БОР-НЕЙТРОН ЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ НА БАЗЕ РЕАКТОРА ВВР-К

А. Ж. Несіпбай, Д. С. Сайранбаев, Ш. Х. Гизатулин, А. А. Шаймерденов*

РГП «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан

** E-mail для контактов: aashaimerdenov@gmail.com*

В статье представлены конструкция устройства формирования пучка нейтронов, предназначенная для горизонтального канала реактора ВВР-К, и ее описание. Приведены результаты расчетного моделирования методом Монте-Карло устройства формирования пучка нейтронов. Показана эффективность устройства с точки зрения нейтронных характеристик и дан сравнительный анализ соответствия полученных характеристик рекомендуемым МАГАТЭ.

Ключевые слова: пучок нейтронов, БНЗТ, устройство формирования пучка нейтронов, реактор ВВР-К, Монте-Карло.

ВВЕДЕНИЕ

Бор-нейтрон захватная терапия (БНЗТ) представляет собой перспективный метод лечения раковых заболеваний, основанный на специфическом захвате нейтронов бором в опухолевых тканях. Этот метод является разновидностью нейтронно-активационной терапии, в которой бор, предварительно введенный в организм пациента, поглощает нейтроны и в результате вызывает локальное излучение, которое разрушает раковые клетки, минимизируя при этом воздействие на здоровые ткани [1, 2].

Одной из важнейших особенностей БНЗТ является её высокая точность и эффективность в лечении опухолей, которые трудны для лечения традиционными методами, такими как хирургия, радиотерапия или химиотерапия. На базе ядерного реактора происходит создание потока нейтронов, который используется для активации борных соединений в организме. Это сочетание ядерных технологий и медицинской практики открывает новые возможности для борьбы с различными видами рака [1, 2].

Ключевым аспектом эффективного применения БНЗТ является разработка и совершенствование устройства формирования пучка нейтронов (УФПН). Нейтронный пучок, создаваемый на базе ядерного реактора, должен обладать высокой интенсивностью и оптимальной энергией для максимального поглощения бором и минимального воздействия на окружающие здоровые ткани. Для этого разрабатываются специальные устройства формирования пучка нейтронов, которые могут обеспечить необходимые характеристики пучка нейтронов, направляемые на опухоль [3–11].

В статье показана конструкция УФПН, предназначенная для горизонтального канала реактора ВВР-К. Приведены результаты расчетного моделирования устройства формирования пучка нейтронов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является горизонтальный нейтронный канал реактора ВВР-К с устрой-

ством формирования терапевтического пучка нейтронов (рисунок 1) [12]. Горизонтальный канал представляет собой алюминиевую трубу диаметром 100 мм и длиной 3300 мм, заполненную воздухом. Центральная ось канала соответствует центральной плоскости активной зоны реактора ВВР-К. Канал снабжен защитной заслонкой, которая представляет собой диски, заполненные бетоном с добавками карбида бора, которые поочередно сдвигаются в массив защиты реактора, открывая доступ в горизонтальный канал.

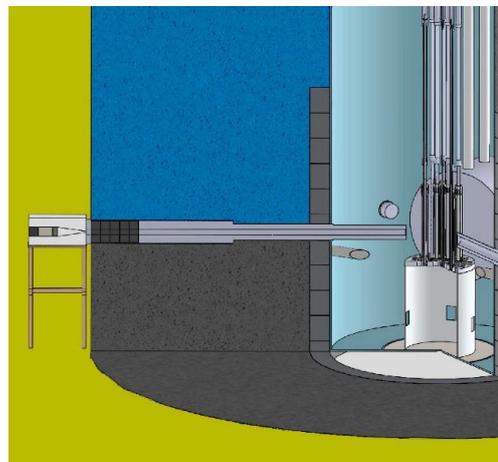


Рисунок 1. Горизонтальный канал реактора ВВР-К и устройство формирования пучка нейтронов

Рассмотрен вариант дизайна устройства формирования пучка нейтронов, который располагается за защитной заслонкой горизонтального канала реактора ВВР-К (внешнее расположение). Устройство формирования пучка нейтронов представляет собой параллелепипед высотой и шириной по 300 мм, глубиной 600 мм (рисунок 2). Внутри устройства установлен замедлитель (рассеиватель) быстрых нейтронов, который расположен сразу за защитной заслонкой горизонтального канала и предназначен для дальнейшего снижения энергии нейтронов до терапевтического диапазона. Далее располагается замедлитель те-

пловых нейтронов, и фильтр гамма-излучения, для соответственно термализации быстрых нейтронов и отсеечения гамма-квантов. Затем устанавливается коллиматор, который предназначен для сужения диаметра пучка нейтронов с диаметра 100 мм до 10 мм. Все перечисленные компоненты устройства окружаются биологической защитой из борированного полиэтилена марки ПБ-3.

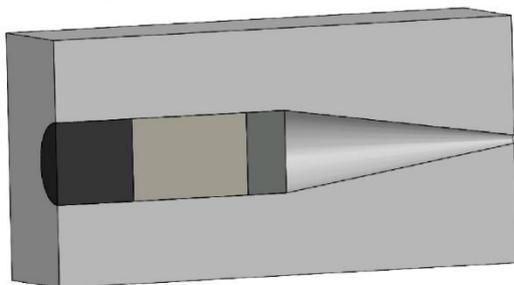


Рисунок 2. Трехмерная модель устройства формирования терапевтического пучка нейтронов

В данной статье рассматривается УФПН, установленный на выходе из горизонтального канала реактора ВВР-К и содержащий графитовый фильтр толщиной 75 мм и диаметром 100 мм, а также бор-полиэтиленовый коллиматор длиной 400 мм и диаметром 10 мм.

Нейтронно-физические расчеты проведены с применением программного средства MCNP6 [13], где были воспроизведены в деталях геометрия и материалы всех элементов активной зоны. Программное средство MCNP (Monte Carlo N-Particle transport code) широко используется для моделирования процессов переноса различных частиц в сложных средах. Решение уравнения переноса нейтронов основано на методе Монте-Карло, что позволяет осуществлять прецизионные расчеты. Метод крайне полезен при решении сложных задач, которые невозможно смоделировать программой, основанной на детерминистском методе. Для каждой частицы моделируются случайные события. Совокупность отдельных событий, носящих статистический характер, составляет полную картину происходящего процесса. Точность расчетов методом Монте-Карло зависит от точности описанной модели (геометрия и материальный состав), а также от количества смоделированных историй взаимодействия частиц с веществом. Статистическая погрешность метода Монте-Карло пропорциональна $1/N^{1/2}$, где N – количество рассматриваемых историй.

В расчетах использовалась библиотека ядерных констант ENDF/B-VII.1 [14]. Каждый входной файл содержал 400 циклов, состоящих из 40 неактивных и 360 активных циклов, по 100 000 записей в каждом цикле. Статистическая погрешность расчетов не превышала 5%. Плотность потоков нейтронов и мощность дозы γ -излучения рассчитывались за устройством формирования пучка нейтронов для первого варианта и за защитной заслонкой для второго вариан-

та. В соответствии с [2] плотность потоков нейтронов определялась в трех энергетических интервалах: от 0 до 0,5 эВ (тепловые), от 0,5 эВ до 10 кэВ (эпитепловые), от 10 кэВ до 20 МэВ (быстрые). Поглощающая доза γ -излучения рассчитывалась с помощью подсчета энерговыделения и использования функционала F6, нормированного на мощность реактора 6 МВт ($4,34 \cdot 10^{17}$ н/с). Затем полученное значение умножалось на константу ($1,602 \cdot 10^{-10}$) для конвертации МэВ/г в Гр.

Рекомендации МАГАТЭ для пучков нейтронов, используемых для БНЗТ, приведены в [2], и к ним предъявляются следующие требования (для эпитепловых пучков нейтронов):

- $\Phi_{\text{thermal}}(\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1})$: $>10^9$
- $\Phi_{\text{epithermal}}/\Phi_{\text{thermal}}$: >20
- $D_{\text{fast}}/\Phi_{\text{epithermal}}(\text{Гр} \cdot \text{см}^2)$: $<2 \cdot 10^{-13}$
- $D_{\text{gamma}}/\Phi_{\text{epithermal}}(\text{Гр} \cdot \text{см}^2)$: $<2 \cdot 10^{-13}$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения возможности внедрения БНЗТ на реакторе ВВР-К рассмотрен один из пяти радиальных горизонтальных экспериментальных каналов (ГЭК). В первую очередь для понимания влияния устройства формирования пучка нейтронов на пространственно-энергетическое распределение нейтронов были определены радиационные характеристики ГЭК без устройства. Энергетические спектры нейтронов и фотонов без устройства показаны на рисунке 3. Распределение плотности потока нейтронов внутри ГЭК показано на рисунке 4. Максимальная плотность потока тепловых, эпитепловых и быстрых нейтронов составляет $6,0 \cdot 10^8$, $1,7 \cdot 10^8$, $2,8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, соответственно. Из рисунков видно, что доля тепловых нейтронов в интегральном спектре нейтронов составляет 0,57, доля эпитепловых нейтронов – 0,16, доля быстрых нейтронов – 0,27. Интенсивность плотности потока нейтронов по длине ГЭК уменьшается на два порядка.

Предварительные результаты по влиянию материального состава фильтров на пространственно-энергетическое распределение нейтронов на выходе горизонтального экспериментального канала исследовательского реактора ВВР-К приведены в [15].

В таблице 1 приведены результаты расчетов с постепенным формированием разработанного дизайна УФПН при его внешнем расположении. Конфигурация 1 соответствует распределению плотности потока нейтронов сразу за защитной заслонкой горизонтального канала реактора ВВР-К без устройства. Конфигурация 2 аналогична предыдущему варианту, только значения приведены для расстояния 600 мм от защитной заслонки (длина УФПН). Конфигурация 3 соответствует варианту, когда установлено УФПН с коллиматором, но в котором отсутствует фильтр. Конфигурация 4 – это конечный вариант, соответствующий установленному УФПН с коллиматором и фильтром. Расчеты показали, что использование сэн-

двич-экранов (фильтров) для получения близкого к рекомендуемому энергетическому распределению нейтронов и наличие коллиматора приводит к значительному снижению интенсивности нейтронов, что является недостаточным для БНЗТ.

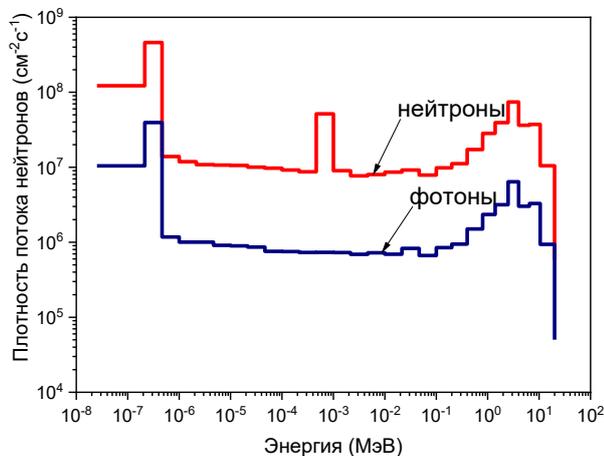


Рисунок 3. Энергетические спектры нейтронов и фотонов на выходе ГЭК

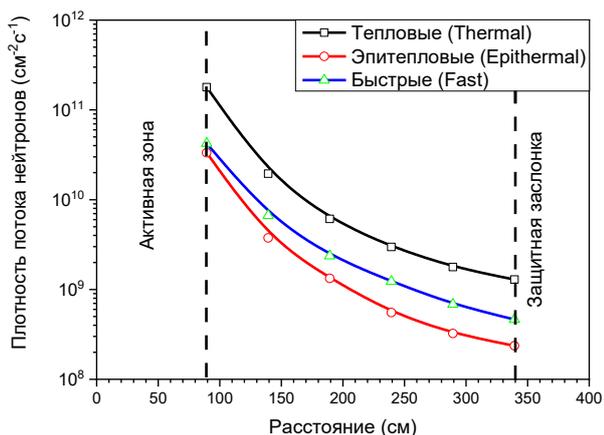


Рисунок 4. Распределение плотности потока нейтронов внутри ГЭК

Разработанное устройство формирования пучка нейтронов снижает долю тепловых нейтронов до 21%, эпитепловых – повышает до 73%, быстрых – снижает до 6% (при сравнении с конфигурацией 2). Из таблицы видно, что устройство, которое формирует наиболее приемлемое энергетическое распределение нейтронов в зоне облучения, снижает плотность потока нейтронов на порядок, так как оно достаточно больших размеров (длина 600 мм) и имеет сэндвич-фильтры.

Таблица 1. Энергетическое распределение плотности потока нейтронов на выходе УФПН

№ конф.	Конфигурация УФПН	Плотность потока нейтронов, см ⁻² ·с ⁻¹		
		<0,5 эВ	0,5 эВ – 10 кэВ	> 10 кэВ
1	без устройства (за шибером)	7,7·10 ⁸	1,6·10 ⁸	3,3·10 ⁸
2	без устройства (на расстоянии 600 мм)	6,0·10 ⁸	6,0·10 ⁷	2,6·10 ⁸
3	с устройством (только коллиматор)	4,7·10 ⁸	1,2·10 ⁸	2,9·10 ⁸
4	с устройством (коллиматор и фильтр)	2,1·10 ⁷	7,0·10 ⁷	5,2·10 ⁶

Мощность поглощенной дозы гамма-излучения без УФПН составляет 10,4 мГр/с, а с УФПН – 1,8 мГр/с. На рисунке 5 приведено влияние толщины свинцового фильтра на гамма-компоненту реакторного излучения на выходе из УФПН. Из рисунка видно, что 50 мм свинцового фильтра является оптимальной толщиной, позволяющей снизить гамма-компоненту до $7 \cdot 10^{-11}$ Гр·см².

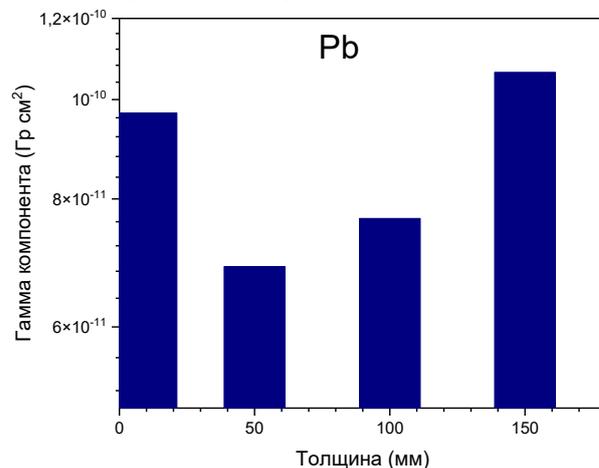


Рисунок 5. Зависимость мощности поглощенной дозы гамма-излучения от толщины свинцового фильтра

Таким образом, полученные радиационные характеристики пучка эпитепловых нейтронов горизонтального канала реактора ВВР-К являются близкими к рекомендуемым МАГАТЭ значениям для применения в БНЗТ. Однако, в дальнейшем требуется оптимизация конструкции устройства формирования пучка нейтронов. Одним из вариантов оптимизации может быть перемещение УФПН внутрь горизонтального канала, ближе к активной зоне, что позволит нивелировать снижение интенсивности нейтронного потока при использовании сэндвич-экранов (как видно из рисунка 4 интенсивность потока нейтронов в начале горизонтального канала и в конце различаются на порядки). Еще одним вариантом оптимизации может быть изменение компоновки активной зоны реактора и создание внутрореакторного нейтронотода с отсечением гамма-составляющей реакторного излучения. Кроме этого, следует рассмотреть возможность создания пучка нейтронов с преимущественно тепловым спектром для применения БНЗТ в приповерхностных случаях терапии. Такой вариант выглядит более достижимым с точки зрения выполнения рекомендаций МАГАТЭ [2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан дизайн устройства формирования пучка нейтронов для горизонтального экспериментального канала реактора ВВР-К с внешним расположением (за защитной заслонкой). Проведено расчетное моделирование устройства методом Монте-Карло и определены его основные радиационные характеристики. В результате получен пучок нейтронов со следующими характеристиками:

- плотность потока эпитепловых нейтронов – $0,7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;
- отношение плотности потока эпитепловых нейтронов к тепловым – 3,5;
- доля эпитепловых нейтронов – 0,73;
- отношение мощности поглощенной дозы гамма-излучения к плотности потока эпитепловых нейтронов – $0,7 \cdot 10^{-12} \text{ Гр} \cdot \text{см}^2$.

Полученные характеристики пучка нейтронов не полностью соответствуют рекомендуемому, однако, они являются близкими. В дальнейшем требуется оптимизация и/или доработка конструкции устройства формирования пучка нейтронов. Оптимизация может заключаться в перемещении УФПН внутрь горизонтального канала, ближе к активной зоне, а также изменении компоновки самой активной зоны. Поиск оптимальной конструкции УФПН и технических решений продолжается.

Финансирование

Настоящая работа была выполнена при финансовой поддержке МЭ РК в рамках НТП «Развитие новых научных исследований в области радиационного материаловедения, конструкционных материалов, наноматериалов на исследовательском реакторе ВВР-К» (ИРН №BR20081011).

ЛИТЕРАТУРА // REFERENCES

1. Wang S, Zhang Z, Miao L and Li Y (2022) Boron Neutron Capture Therapy: Current Status and Challenges. *Front. Oncol.* 12:788770. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.788770>
2. Advances in boron neutron capture therapy. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2023. 433 p.
3. E. Bavarnegin, Y. Kasesaz; and F.M. Wagner Neutron beams implemented at nuclear research reactors for BNCT. *Journal of Instrumentation* Volume 12, May 2017 P05005 <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/05/P05005>
4. Moss, R.L. (1993). Review of Reactor-Based Neutron Beam Development for BNCT Applications. In: Soloway, A.H., Barth, R.F., Carpenter, D.E. (eds) *Advances in Neutron Capture Therapy*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2978-1_1
5. Kumada, H., Sakae, T. & Sakurai, H. Current development status of accelerator-based neutron source for boron neutron capture therapy // *EPJ Techn Instrum* 10, 18 (2023). <https://doi.org/10.1140/epjti/s40485-023-00105-5>
6. Postuma, I.; González, S.; Herrera, M.S.; Provenzano, L.; Ferrarini, M.; Magni, C.; Protti, N.; Fatemi, S.; Vercesi, V.; Battistoni, G.; et al. A Novel Approach to Design and Evaluate BNCT Neutron Beams Combining Physical, Radiobiological, and Dosimetric Figures of Merit // *Biology*. – 2021. – V. 10. – P. 174. <https://doi.org/10.3390/biology10030174>
7. Moss, R.L., Stecher-Rasmussen, F., Ravensberg, K., Constantine, G., Watkins, P. (1992). Design, Construction and Installation of an Epithermal Neutron Beam for BNCT at the High Flux Reactor Petten. In: Allen, B.J., Moore, D.E., Harrington, B.V. (eds) *Progress in Neutron Capture Therapy for Cancer*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3384-9_11
8. M. Monshizadeh, Y. Kasesaz, H. Khalafi, S. Hamidi MCNP design of thermal and epithermal neutron beam for BNCT at the Isfahan MNSR // *Progress in Nuclear Energy*. – 2015. – V. 83. – P. 427–432 <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.05.004>
9. Naonori Hu, Hiroki Tanaka, Ryo Kakino, Syuushi Yoshikawa, Mamoru Miyao, Kazuhiko Akita, Teruhito Aihara, Keiji Nihei & Koji Ono Improvement in the neutron beam collimation for application in boron neutron capture therapy of the head and neck region // *Scientific Reports*. – 2022. – V. 12. – P. 13778. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17974-7>
10. Li G, Jiang W, Zhang L, Chen W and Li Q Design of Beam Shaping Assemblies for Accelerator-Based BNCT With Multi-Terminals // *Front. Public Health*. – 2021. – V. 9. – P. 642561. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.642561>
11. Hang, S., Tang, X., Shu, D. et al. Monte Carlo study of the beam shaping assembly optimization for providing high epithermal neutron flux for BNCT based on D–T neutron generator // *J Radioanal Nucl Chem*. – 2016. – V. 310. – P. 1289–1298. <https://doi.org/10.1007/s10967-016-5001-4>
12. A. Shaimerdenov, D. Sairanbayev, Sh. Gizatulina, A. Nessipbay, Zh. Bugubay, D. Nugumanov, S. Sakhiyev, WWR-K reactor LEU core design optimization for improving the experimental characteristics // *Annals of Nuclear Energy*. – 2024. – V. 195. – P. 110174. ISSN 0306-4549 <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.110174>
13. C.J. Werner, J.S. Bull, C.J. Solomon, et al., ‘MCNP6.2 Release Notes’, LA-UR-18-20808 (2018).
14. Brown DA, Chadwick MB, Capote R, Kahler AC, Trkov A, Herman MW end et. al. ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data. // *Nuclear Data Sheets*. – 2011. – V. 112. – P. 2887–2996
15. А.Ж. Несипбай Влияние материального состава фильтров на пространственно-энергетическое распределение нейтронов на выходе горизонтального экспериментального канала исследовательского реактора ВВР-К // *Physics. Astronomy Series / Серия Физика. Астрономия*. – 2024. № 149(4). С. 142–152. [Nessipbay, A. Influence of material composition of filters on spatial-energy distribution of neutrons at the outlet of the horizontal experimental channel of WWR-K Research Reactor // *Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Physics. Astronomy series*, – 2024. – V. 149(4). – P. 142–152. (In Russ.)] <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2024-149-4-142-152>

**ССР-Қ РЕАКТОРЫНА НЕГІЗДЕЛГЕН БОР-НЕЙТРОНДЫ ТҮСІРУ ТЕРАПИЯСЫ
ҮШІН НЕЙТРОНДЫҚ СӘУЛЕНІ ПІШІНДЕУ ҚҰРЫЛҒЫСЫНЫҢ
МОНТЕ-КАРЛО СИМУЛЯЦИЯСЫ**

Ә. Ж. Несіпбай, Д. С. Сайранбаев, Ш. Х. Гизатулин, Ә. А. Шаймерденов*

ҚР ЭМ «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: aashaimerdenov@gmail.com*

Мақалада ССР-Қ реакторының көлденең арнасына арналған нейтрондар шоғырын қалыптастыру құрылғысының дизайны және оның сипаттамасы келтірілген. Нейтрондар шоғырын қалыптастыру құрылғысының Монте-Карло әдісімен есептелген модельдеу нәтижелері келтірілген. Құрылғының тиімділігі нейтрондық сипаттамалар тұрғысынан көрсетілген және алынған сипаттамалардың ұсынылған АЭХА-ның сәйкестігіне салыстырмалы талдау берілген.

***Түйінді сөздер:** нейтрондар шоғыры, БНҰТ, нейтрондар шоғырын қалыптастыру құрылғысы, ССР-Қ реакторы, Монте-Карло.*

**MONTE CARLO SIMULATION OF A NEUTRON BEAM SHAPING ASSEMBLY
FOR BORON-NEUTRON CAPTURE THERAPY BASED ON THE WWR-K REACTOR**

A. Z. Nessipbay, D. S. Sairanbayev, Sh. Kh. Gizatulin, A. A. Shaimerdenov*

RSE "Institute of Nuclear Physics" ME RK, Almaty, Kazakhstan

** E-mail for contacts: aashaimerdenov@gmail.com*

The article presents the design of a neutron beam shaping assembly designed for the horizontal beam of the WWR-K reactor and its description. The results of computational modeling by the Monte Carlo method of a neutron beam shaping assembly are presented. The effectiveness of the assembly in terms of neutron characteristics is shown and a comparative analysis of the compliance of the obtained characteristics with the recommended IAEA is given.

***Keywords:** neutron beam, BNCT, beam shaping assembly, WWR-K reactor, Monte Carlo*