



МРНТИ 29.15.53

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2024-149-4-142-152>

Научная статья

## Влияние материального состава фильтров на пространственно-энергетическое распределение нейтронов на выходе горизонтального экспериментального канала исследовательского реактора ВВР-К

А.Ж. Несипбай\*

Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

(E-mail: a.nessipbay@inp.kz)

**Аннотация.** Данная статья исследует воздействие фильтров на пространственно-энергетическое распределение нейтронов в горизонтальных экспериментальных каналах исследовательского реактора ВВР-К. Во введении представлен обзор и роль реактора, особенностей горизонтальных каналов и их значения для научных исследований. Описаны основные типы фильтров, их назначение и ключевая роль в регулировании нейтронного спектра. Методология работы включает описание использованного метода, включая описание математической модели. Приведено описание материального состава и свойств рассмотренных фильтров. В разделе «Результаты и обсуждения» представлены результаты расчетов по пространственно-энергетическому распределению нейтронов на выходе горизонтального экспериментального канала реактора ВВР-К без фильтра и с различным составом фильтров. Анализируется влияние каждого типа фильтра на спектральные характеристики нейтронного потока, приводятся особенности каждого фильтра и практические аспекты его применения. Подчеркивается значимость полученных результатов для дальнейшей оптимизации радиационных условий нейтронного пучка реактора ВВР-К. В заключение дается краткое подведение итогов и планы на будущее по продолжению исследований, направленных на формирование терапевтического пучка нейтронов на реакторе ВВР-К.

**Ключевые слова:** борнейтронно-захватная терапия, исследовательский реактор, узел формирования пучка, эпитепловой спектр, тепловой спектр.

## Введение

Борнейтронно-захватная терапия (БНЗТ) – это метод лучевой терапии, который использует бор и тепловые нейтроны для лечения определенных типов рака, таких, как опухоли головного и шейного отделов. Во время процедуры пациенту вводятся стабильные соединения 10-бора, которые скапливаются в раковых клетках. Затем опухоль облучается тепловыми нейтронами, что приводит к делению бора и выбросу заряженных частиц, наносящих повреждения раковым клеткам [1,2].

Для БНЗТ необходимы пучки нейтронов подходящей энергии и интенсивности, а также низкий гамма-фон. При использовании ядерного реактора в качестве источника нейтронов для БНЗТ необходимо решить ряд проблем, и одной из них является формирование пучка нейтронов с заданными характеристиками. С целью получения оптимального пучка нейтронов требуется разработать и установить между источником нейтронов и пациентом узел формирования пучка (УФП) нейтронов. УФП предназначено для формирования требуемых радиационных характеристик пучка нейтронов в зоне облучения объекта. Обычно УФП содержит такие элементы, как: отражатель и замедлитель нейтронов, гамма-фильтр, фильтр тепловых нейтронов и коллиматор. Размеры и формаэлементов УФП зависят от технических и габаритных характеристик источника нейтронов [3,4].

*Замедлитель* должен иметь высокое сечение рассеяния быстрых нейтронов и низкие сечения рассеяния и поглощения тепловых нейтронов, также замедлитель не должен становиться источником сильного поля фотонов, даже если так, то их энергии должны быть низкими. Нейтроны, которые первоначально рассеиваются в замедлителе, могут просочиться наружу, не достигнув необходимых энергий. Эта потеря может быть существенно уменьшена, если окружить замедлитель отражателем [7].

*Отражатель* возвращает нейтроны, которые сначала сталкиваются в замедлителе, но утекают, не успев замедлиться, а также отражает нейтроны, которые не попадают в замедлитель, вылетая из источника. Кроме того, реакция  $(n,2n)$  в отражателе вносит значительный вклад в общее производство нейтронов. В качестве материалов отражателя могут быть рассмотрены графит, свинец, ВеО и вольфрам/молибден. Свинец с низким производством фотонов и низкой стоимостью является предпочтительным отражателем [3].

Для получения теплового нейтронного пучка с высоким качеством необходимо использовать фильтры эпитепловых и быстрых нейтронов. Поток быстрых нейтронов может быть наиболее эффективно уменьшен и преобразован в эпитепловой поток с помощью Al или его фтористых соединений. Кадмий, гадолиний и материалы, обогащенные В-10 или Li-6, имеют высокие тепловые сечения, но следует позаботиться о дополнительной генерации гамма-излучения (В, Gd, Cd) и быстрых нейтронов (Li). В дополнение к эпитепловым и быстрым нейтронам необходимо подавлять гамма-излучение. Pb и Bi являются обычными гамма-фильтрами, широко используемыми в пучковых каналах БНЗТ.

Коллиматоры внутри защитного экрана должны отражать нейтроны обратно в пучок. Поэтому используются материалы нейтроноотражающего типа. Коллиматоры, используемые вблизи выхода пучка, являются разделителями пучка и должны поглощать, а не отражать нейтроны. Сменные выходные коллиматоры с различными диаметрами внутренних отверстий могут использоваться для ограничения окончательного размера и расходимости пучка, подаваемого на место лечения пациента. Эти коллиматоры изготавливаются с использованием В4С или 6Li2CO3, диспергированных в полиэтилене [7].

### Методы исследования

В качестве источника нейтронов рассматривался исследовательский реактор ВВР-К, снабженный десятью горизонтальными экспериментальными каналами (ГЭК) для вывода пучков нейтронов [5,6].

Горизонтальный экспериментальный канал представляет собой трубу с внутренним диаметром 100 мм и длиной 3300 мм. Часть канала длиной 753 мм открытым концом сварена во внешнюю обечайку. Остальная часть этих каналов находится в чугунной и бетонной защите. Ось канала лежит в центральной (по высоте) плоскости активной зоны. Канал снабжен защитной заслонкой (шибер), который представляет собой диски, заполненные бетоном с добавками карбида бора. Диски поочередно сдвигаются в массив защиты реактора, открывая доступ в горизонтальный канал.

УФП представляет собой отдельный или комбинацию фильтров, установленных внутри ГЭК, вплотную к активной зоне (Рисунок 1). Диаметр фильтра составляет 100 мм, а его толщина варьируется в зависимости от материала. Описание рассмотренных вариантов фильтров приведено в таблице 1.

Таблица 1. Свойства материалов фильтров

Материал	Размеры, мм	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Агрегатное состояние
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100, 150, 200, 500	3,98	твердое
Al	200	2,70	твердое
Cd	1	8,65	твердое
C <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	200	2,20	твердое
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	30	2,11	твердое

В расчетах были рассмотрены различные варианты фильтров, менялся материальный состав, размеры и расположение фильтров в горизонтальном канале.

Моделирование УФП с разным материальным составом, установленным в горизонтальном канале реактора ВВР-К, проводилось с помощью транспортного кода MCNP6 [9,10]. В расчетах использовалась библиотека ядерных данных ENDF/B-VIII.0 [11]. Транспортный код MCNP (Monte Carlo N-Particle transport code), разработанный в Лос-Аламосской национальной лаборатории США, широко используется для решения задач,

связанных с моделированием переноса частиц в сложной среде, в таких областях, как ядерная энергетика, ядерная медицина, радиационная защита, ядерная безопасность и др. Точность расчетов Монте-Карло зависит как от точности описания компьютерной модели (геометрии и материалов), так и от количества смоделированных нейтронных историй. Статистическая погрешность метода Монте-Карло пропорциональна  $1/\sqrt{N}$ , где  $N$  – число смоделированных нейтронных историй. MCNP6 позволяет моделировать транспорт нейтронов ("N"), фотонов ("P"), электронов ("E"), протонов ("H") как отдельно, так и в комбинации (типа "N, P"), в средах, описываемых полномасштабной 3D-геометрией, заданной в виде операторов пересечения, объединения и дополнения различных заданных пользователем поверхностей (описываемых уравнениями порядка до 4-го). MCNP6 позволяет проводить различные расчеты, которые могут представлять вычисленную величину, интегрированную по энергетическому спектру нейтронов. Все расчеты являются функциями времени и энергии, нормированными на одну сгенерированную частицу.

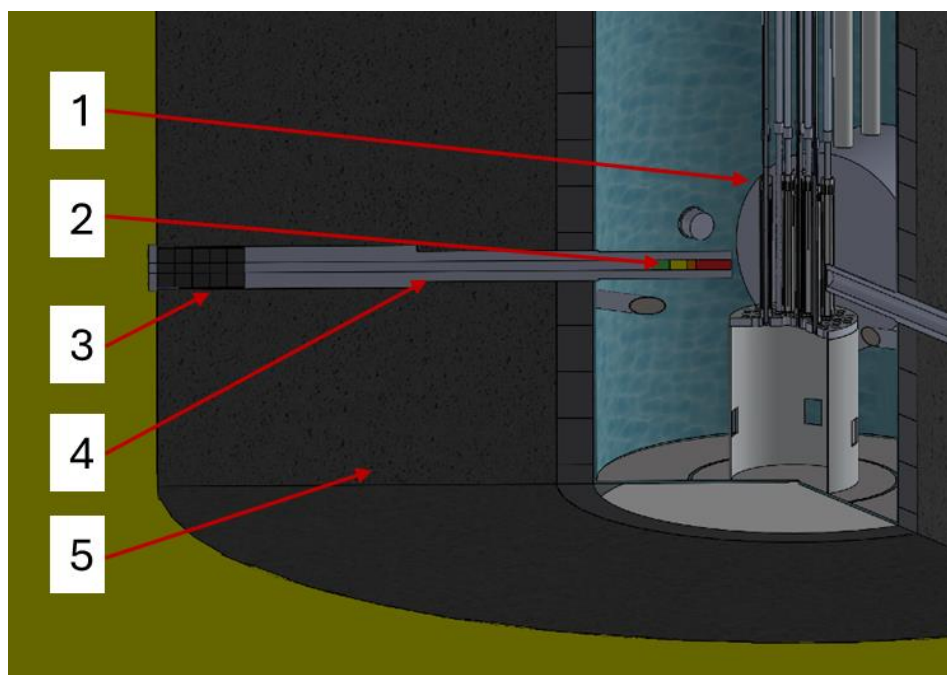


Рисунок 1. Трехмерная модель реактора ВВР-К с горизонтальным экспериментальным каналом: 1 – активная зона реактора; 2 – фильтры; 3 – диски защитной заслонки; 4 – ГЭК; 5 – бетонная защита.

Каждый входной файл включал 500 циклов, составленных из 50 неактивных и 450 активных циклов с 100 000 историй на цикл. При моделировании учитывались реальный состав активной зоны реактора, выгорание топлива в ТВС и отравление бериллиевого отражателя нейтронов. Кроме этого, расчетная модель была составлена гетерогенной, что позволяет получить более точные результаты.

## Результаты и обсуждения

Согласно рекомендации МАГАТЭ [7], терапевтические пучки нейтронов должны удовлетворять требованиям, приведенным в таблице 2. Причем рассматриваются два типа пучка: с тепловым и эпитепловым спектром нейтронов. Основное внимание уделяется двум основным критериям пучка нейтронов – это интенсивность и качество. Интенсивность пучка будет основным фактором, определяющим время лечения пациентов. Качество пучка связано с типами, энергиями и относительными интенсивностями всех присутствующих излучений. Принято следующее разбиение нейтронов по энергиям: быстрые нейтроны  $E > 10$  кэВ, эпитепловые нейтроны  $0,5$  эВ  $< E < 10$  кэВ, тепловые нейтроны  $E < 0,5$  эВ.

Таблица 2. Рекомендации параметров МАГАТЭ для нейтронного пучка БНЗТ [7].

Тепловой спектр для БНЗТ		Эпитепловой спектр для БНЗТ	
Параметр	Рекомендованное значение	Параметр	Рекомендованное значение
$\Phi_{\text{тепл}}$ ( $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ )	$> 10^9$	$\Phi_{\text{эпитепл}}$ ( $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ )	$> 10^9$
$\Phi_{\text{тепл/общ}}$	$> 0,9$	$\Phi_{\text{эпитепл/тепл}}$	$> 20$
$D_{\text{(эпитепл+быстр)}/\Phi_{\text{тепл}}}$ ( $\text{Гр}\cdot\text{см}^2$ )	$< 2\cdot 10^{-13}$	$D_{\text{быстр}/\Phi_{\text{эпитепл}}}$ ( $\text{Гр}\cdot\text{см}^2$ )	$< 2\cdot 10^{-13}$
$D_{\text{гамма}/\Phi_{\text{тепл}}}$ ( $\text{Гр}\cdot\text{см}^2$ )	$< 2\cdot 10^{-13}$	$D_{\text{гамма}/\Phi_{\text{эпитепл}}}$ ( $\text{Гр}\cdot\text{см}^2$ )	$< 2\cdot 10^{-13}$

Для БНЗТ необходимо создать достаточное поле тепловых нейтронов в меченных бором опухолевых клетках в заданном объеме мишени. Это означает, что для целевых объемов, расположенных далеко под поверхностью, как правило, лучше всего подходят эпитепловые пучки нейтронов, а для целевых объемов, расположенных вблизи поверхности, достаточно тепловых пучков нейтронов. Связано это с тем, что эпитепловой пучок нейтронов, проникая в ткань, создает поле излучения с максимальным тепловым потоком на глубине 2-3 см, который затем экспоненциально уменьшается. Проникновение пучка можно увеличить за счет повышения средней энергии эпитепловых нейтронов и направления пучка вперед, особенно при малых размерах пучка [8,12].

Исходный энергетический спектр нейтронов за защитной заслонкой ГЭК показан на рисунке 2. Доля тепловых нейтронов в интегральном спектре нейтронов составляет 0.57%, доля эпитепловых нейтронов – 0.16%, доля быстрых нейтронов – 0.27%.

Рассмотрены разные варианты материалов фильтров УФП для улучшения нейтронных характеристик ГЭК реактора ВВР-К. Отдельно была рассмотрена возможность создания пучка тепловых (Рисунок 3, варианты 1-3) и эпитепловых нейтронов (Рисунок 3, варианты 4-6), с характеристиками, близкими к рекомендациям МАГАТЭ (таблица 2), в части энергетического спектра нейтронов. Наиболее приемлемые полученные результаты расчетов приведены в таблице 3.

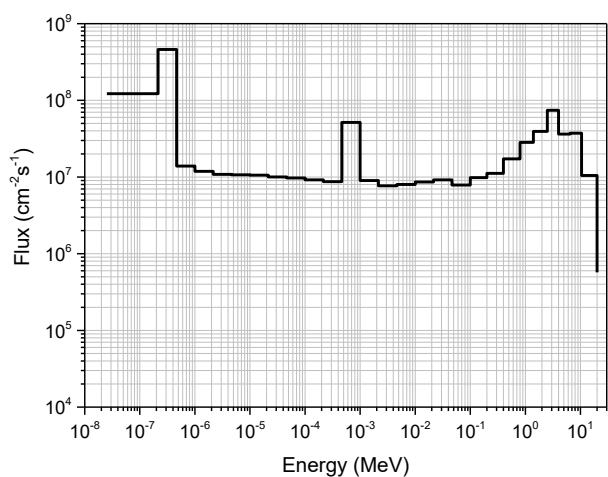
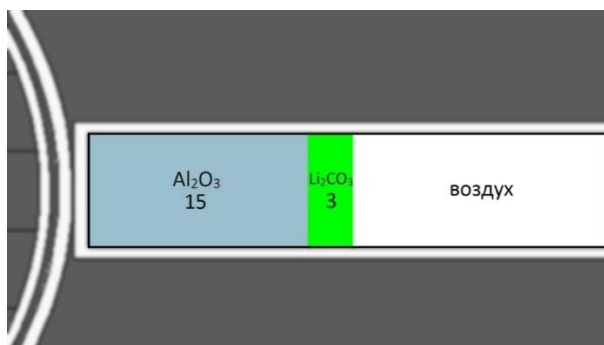
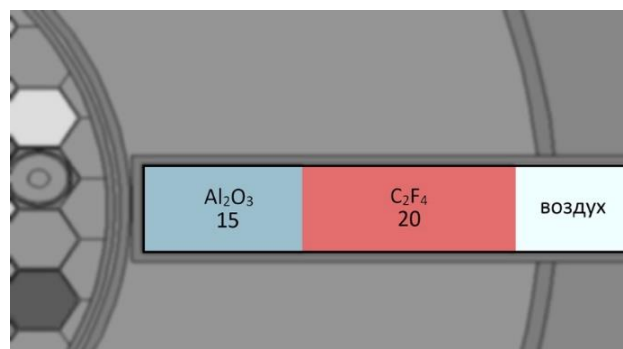


Рисунок 2. Энергетический спектр нейтронов на выходе из ГЭК реактора ВВР-К.

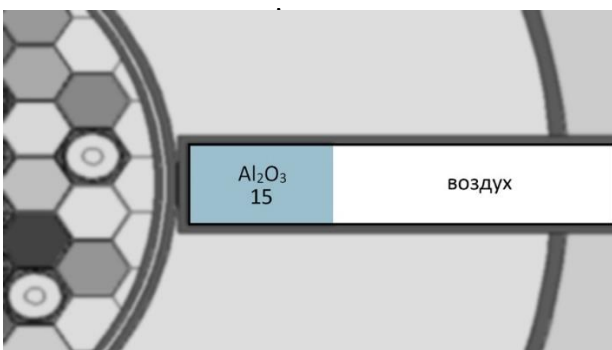
На рисунке 3 показаны варианты рассмотренных фильтров, их свойства и размеры указаны в таблице 1.



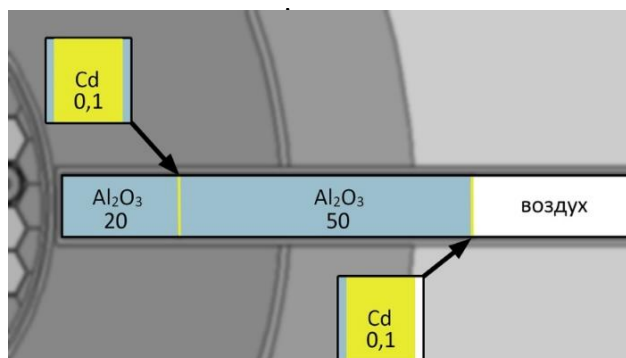
Вариант 1



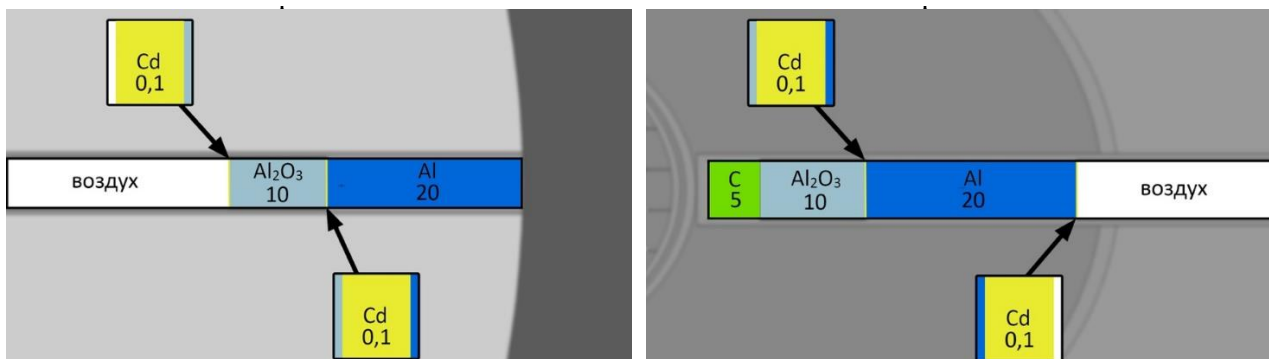
Вариант 2



Вариант 3



Вариант 4



Вариант 5  
Вариант 6  
Рисунок 3. Дизайны рассмотренных фильтров.

Таблица 3. Энергетическое распределение нейтронов на выходе из ГЭК с разными комбинациями фильтров.

Тепловой спектр				$\Phi_{\text{тепл/общ}}$
Вариант №	Тепловые	Эпитепловые	Быстрые	
1	$12,0 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7$	$2,3 \cdot 10^7$	0,77
2	$1,4 \cdot 10^7$	$0,1 \cdot 10^7$	$0,2 \cdot 10^7$	0,79
3	$17,0 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^7$	$3,3 \cdot 10^7$	0,76
Эпитепловой спектр				$\Phi_{\text{эпитепл/тепл}}$
Вариант №	Тепловые	Эпитепловые	Быстрые	
4	$8,15 \cdot 10^4$	$4,52 \cdot 10^4$	$4,28 \cdot 10^4$	0,77
5	$3,12 \cdot 10^5$	$3,19 \cdot 10^6$	$3,34 \cdot 10^6$	0,79
6	$3,21 \cdot 10^6$	$4,97 \cdot 10^6$	$5,15 \cdot 10^6$	0,76

Таблица 4. Полученные и рекомендованные МАГАТЭ характеристики УФПН.

Тепловой БНЗТ				
Вариант №	$\Phi_{\text{тепл}}$ ( $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ )	Рек-ные значения $\Phi_{\text{тепл}}$ ( $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ )	$\Phi_{\text{тепл/общ}}$	Рек-ные значения $\Phi_{\text{тепл/общ}}$
1	$12,0 \cdot 10^7$	$>10^9$	0,77	$>0,9$
2	$1,4 \cdot 10^7$		0,79	
3	$17,0 \cdot 10^7$		0,76	
Эпитепловой БНЗТ				
Вариант №	$\Phi_{\text{тепл}}$ ( $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ )	Рек-ные значения $\Phi_{\text{тепл}}$ ( $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ )	$\Phi_{\text{эпитепл/тепл}}$	Рек-ные значения $\Phi_{\text{эпитепл/тепл}}$
4	$8,15 \cdot 10^4$	$>10^9$	1,3	$>20$
5	$3,12 \cdot 10^5$		10,2	
6	$3,21 \cdot 10^6$		1,6	

Из таблиц 3 и 4 видно, что первые три варианта позволяют сформировать пучок нейтронов с достаточно близкими характеристиками к рекомендуемому для теплового пучка нейтронов. Доля тепловых нейтронов составляет около 80%. Однако интенсивность нейтронов на порядок ниже.

Формирование эпитеплового пучка нейтронов оказалось затруднительным, так как применение комбинации фильтров приводит к значительному снижению интенсивности нейтронов (на несколько порядков ниже, чем рекомендуется) и поэтому применение такого пучка в дальнейшем является нецелесообразным.

## **Заключение**

Результаты расчетов показали, что на ГЭК реактора ВВР-К возможно создать пучок нейтронов с тепловым спектром, имеющий близкие нейтронные характеристики к рекомендуемому МАГАТЭ. Однако требуется дальнейшая модификация УФП, которая позволит улучшить нейтронные характеристики на выходе из ГЭК. Рассмотренные несколько десятков вариантов дизайна УФП с целью создания пучка нейтронов с эпитепловым спектром не дали результата.

В дальнейшем будут продолжены работы по поиску наиболее оптимального варианта дизайна УФП.

## **Благодарность**

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).

## **Список литературы**

1. W.A. Sauerwein et al., Neutron capture therapy: principles and applications, Springer Science Business & Media (2012). - **книга**
2. R.F. Barth et al., Boron neutron capture therapy of cancer: current status and future prospects, Clin. Canc. Res. 11 (2005) 3987. <https://doi.org/10.1158/1078-0432.CCR-05-0035> - **журнал на англ. языке**
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> - **журнал на англ. языке**
4. 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](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3384-9_11). - **книга**
5. [Bauyrzhan A.B., Koltochnik S.N., Aitkulov M.T., Dyussambayev D. S., Shaimerdenov A.A., Mukhametuly B., Burtebaev N.T. Neutron-physical parameters at the outlet of the WWR-K reactor beam tube // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials, 2019, 3(3), 219-22. DOI: 10.29317/ejpfm.2019030303 - **журнал на англ. языке**
6. D. Sairanbaev, S. Koltochnik, A. Shaimerdenov, M. Tulegenov, Y. Kenzhin, K. Tsuchiya Time History of Performance Parameters of WWR-K Reactor during Gradual Replacement of the Water Reflector by a Beryllium One // Russian Physics Journal. – Vol. 63, Issue 12. – 2021. – p. 2165-2177. DOI: 10.1007/s11182-021-02286-6]. - **журнал на рус. языке**



7. Advances in boron neutron capture therapy / International Atomic Energy Agency, 2023, 433 p.

8. Koivunoro, H.; Kankaanranta, L.; Seppälä, T.; Haapaniemi, A.; Mäkitie, A.; Joensuu, H. Boron neutron capture therapy for locally recurrent head and neck squamous cell carcinoma: An analysis of dose response and survival. *Radiother. Oncol.* 2019, 137, 153–158. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2010.09.057-

**журнал на англ.языке**

9. MCNP6 User's Manual - Los Alamos National Laboratory, LA-CP-13-00634, 2013

10. M. B. Chadwick, M. Herman, P.Obložinský, M.E. Dunn, Y. Danon et al. "ENDF/B-VII.1: Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariance's, Fission Product Yields and Decay Data Library for Nuclear Science and Technology", *Nucl. Data Sheets, Volume 110*, (2011). - **журнал на англ.языке**

11. Brown D. A., Chadwick M. B., Capote R., Kahler A. C., Trkov A., Herman M.W. end et. al. ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections. New Standards and Thermal Scattering Data. *Nuclear Data Sheets* 2018; (148): 1–142. DOI: 10.1016/j.nds.2018.02.001 - **журнал на англ.языке**

12. Lan, T.L.; Chou, F.I.; Lin, K.H.; Pan, P.S.; Lee, J.C.; Huang,W.S.; Liu, Y.M.; Chao, Y.; Chen, Y.W. Using salvage Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) for recurrent malignant brain tumors in Taiwan. *Appl. Radiat. Isot.* 2020, 160, 109105. DOI: 10.1016/j.apradiso.2020.109105 - **журнал на англ.языке**

13. Menéndez, P.; Pereira, M.; Casal, M.; González, S.; Feld, D.; Santa Cruz, G.; Kessler, J.; Longhino, J.; Blaumann, H.; Rebagliati, R.J.; et al. BNCT for skin melanoma in extremities: Updated Argentine clinical results. *Appl. Radiat. Isot.* 2009, 67, S50–S53. DOI: 10.1016/j.apradiso.2009.03.020 - **журнал на англ.языке**

**A.Zh. Nessipbay**

The Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

(E-mail: a.nessipbay@inp.kz)

### **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**

**Abstract.** This paper investigates the effect of filters on the spatial-energy distribution of neutrons in the horizontal experimental channels of the WWR-K research reactor. The introduction presents an overview and the role of the reactor, the features of the horizontal channels and their importance for scientific research. The main types of filters, their purpose and key role in neutron spectrum control are described. The methodology of the work includes a description of the method used, including a description of the mathematical model. The material composition and properties of the considered filters are described. In the section 'Results and Discussion', the results of the calculations on the spatial-energy distribution of neutrons at the outlet of the horizontal experimental channel of the WWR-K reactor without a filter and with different composition of filters are presented. The influence of each type of filter on the spectral characteristics of the neutron flux is analysed, the peculiarities of each filter and practical aspects of its application are given. The significance of the results obtained for further optimisation of radiation conditions of the WWR-K neutron beam is emphasised. In conclusion, a brief summary of the results and future plans for the continuation of research aimed at the formation of a therapeutic neutron beam at the WWR-K reactor are given.

**Keywords:** boron neutron capture therapy, research reactor, beam forming unit, epithermal spectrum, thermal spectrum.

**А.Ж.Несіпбай**

*Ядролық Физика Институты, Алматы, Қазақстан*

*(E-mail: a.nessipbay@inp.kz)*

**ССР-Қ зерттеу реакторының көлденең тәжірибелік арнасының шығысындағы нейтрондардың кеңістіктік-энергетикалық таралуына сүзгілердің материалдық құрамының әсері**

**Аңдатпа.** Бұл мақалада ССР-Қ зерттеу реакторының көлденең тәжірибелік арналарындағы нейтрондардың кеңістіктік-энергетикалық таралуына сүзгілердің әсері қарастырылады. Кіріспе бөлімінде реактордың жалпы көрінісі мен рөлін, көлденең арналардың ерекшеліктерін және олардың ғылыми зерттеулерге әсері туралы шолу жасалынды. Сүзгілердің негізгі түрлері, олардың тағайындалуы және нейтрондық спектрді реттеудегі шешуші рөлі сипатталған. Жұмыстың әдістемесі математикалық модельдің сипаттамасын қоса алғанда, қолданылатын әдістің ерекшелігін қамтиды. Қарастырылып отырған сүзгілердің материал құрамы мен қасиеттерінің сипаттамасы берілген. «Нәтижелер мен талқылаулар» бөлімінде сүзгілерсіз және сүзгілердің әртүрлі құрамы бар ССР-Қ реакторының көлденең тәжірибелік арнасының шығысындағы нейтрондардың кеңістіктік-энергетикалық таралуы бойынша есептеулердің нәтижелері берілген. Әрбір сүзгі түрінің нейтрон ағынының спектрлік сипаттамаларына әсері талданады, әрбір сүзгінің ерекшеліктері және оны қолданудың практикалық аспектілері келтірілген. Алынған нәтижелердің ССР-Қ реакторының нейтрондық сәулесінің сәулелену жағдайларын одан әрі оңтайландыру үшін маңыздылығы атап өтілді. Қорытындылай келе, ССР-Қ реакторында емдік нейтрондық сәулені құруға бағытталған зерттеулерді жалғастыру бойынша қысқаша қорытынды және болашаққа жоспарлар берілген.

**Түйінді сөздер:** бор нейтрондарын басып алу терапиясы, зерттеу реакторы, сәуле түзу қондырғысы, эпитемиялық спектр, жылу спектрі.

## References

1. W.A. Sauerwein et al., Neutron capture therapy: principles and applications, Springer Science Business & Media (2012)
2. R.F. Barth et al., Boron neutron capture therapy of cancer: current status and future prospects, Clin. Canc. Res. 11 (2005) 3987. <https://doi.org/10.1158/1078-0432.CCR-05-0035>
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:10.1088/1748-0221/12/05/P05005>
4. 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](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3384-9_11)
5. [Bauyrzhan A.B., Koltochnik S.N., Aitkulov M.T., Dyussambayev D. S., Shaimerdenov A.A., Mukhametuly B., Burtbaev N.T. Neutron-physical parameters at the outlet of the WWR-K reactor beam tube // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials, 2019, 3(3), 219-22. DOI: 10.29317/ejpfm.2019030303

6. D. Sairanbaev, S. Koltochnik, A. Shaimerdenov, M. Tulegenov, Y. Kenzhin, K. Tsuchiya Time History of Performance Parameters of WWR-K Reactor during Gradual Replacement of the Water Reflector by a Beryllium One // Russian Physics Journal. – Vol. 63, Issue 12. – 2021. – p. 2165-2177. DOI: 10.1007/s11182-021-02286-6]

7. Advances in boron neutron capture therapy / International Atomic Energy Agency, 2023, 433 p.

8. Koivunoro, H.; Kankaanranta, L.; Seppälä, T.; Haapaniemi, A.; Mäkitie, A.; Joensuu, H. Boron neutron capture therapy for locally recurrent head and neck squamous cell carcinoma: An analysis of dose response and survival. *Radiother. Oncol.* 2019, 137, 153–158. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2010.09.057

9. MCNP6 User's Manual - Los Alamos National Laboratory, LA-CP-13-00634, 2013

10. M. B. Chadwick, M. Herman, P. Obložinský, M.E. Dunn, Y. Danon et al. "ENDF/B-VII.1: Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariance's, Fission Product Yields and Decay Data Library for Nuclear Science and Technology", *Nucl. Data Sheets*, Volume 110, (2011)

11. Brown D. A., Chadwick M. B., Capote R., Kahler A. C., Trkov A., Herman M.W. end et. al. ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections. New Standards and Thermal Scattering Data. *Nuclear Data Sheets* 2018; (148): 1–142. DOI: 10.1016/j.nds.2018.02.001

12. Lan, T.L.; Chou, F.I.; Lin, K.H.; Pan, P.S.; Lee, J.C.; Huang, W.S.; Liu, Y.M.; Chao, Y.; Chen, Y.W. Using salvage Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) for recurrent malignant brain tumors in Taiwan. *Appl. Radiat. Isot.* 2020, 160, 109105. DOI: 10.1016/j.apradiso.2020.109105

13. Menéndez, P.; Pereira, M.; Casal, M.; González, S.; Feld, D.; Santa Cruz, G.; Kessler, J.; Longhino, J.; Blaumann, H.; Rebagliati, R.J.; et al. BNCT for skin melanoma in extremities: Updated Argentine clinical results. *Appl. Radiat. Isot.* 2009, 67, S50–S53. DOI: 10.1016/j.apradiso.2009.03.020

### Сведения об авторах:

**Несипбай А.Ж.** – хат-хабар авторы, Атом энергиясының қауіпсіздік мәселелері зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Ядролық Физика Институты, Ибрагимова көш., 1, 050032, Алматы, Қазақстан

**Nessipbay A.Zh.** – corresponding author, Junior Researcher at the Laboratory of Atomic Energy Safety Problems, The Institute of Nuclear Physics, 1 Ibragimov str, 050032, Almaty, Kazakhstan

**Несипбай А.Ж.** – автор для корреспонденции, младший научный сотрудник лаборатории проблем безопасности атомной энергии, Институт ядерной физики, ул. Ибрагимова, 1, 050032, Алматы, Казахстан.



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).