

СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА УСКОРИТЕЛЬНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ VITA

*T. B. Шейн^{a, б, 1}, E. A. Берендеев^{a, б}, B. C. Дегтярев^{a, б},
A. M. Кошкарев^{a, б}, A. C. Кузнецов^{a, б},
C. C. Савинов^{a, б}, C. Ю. Таскаев^{a, б, в}*

^a Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

^в Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Для перспективной методики лечения злокачественных опухолей — бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) — в Институте ядерной физики СО РАН предложен и разработан ускорительный источник нейтронов VITA, включающий в себя ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией для получения пучка протонов, литиевую мишень для генерации нейтронов в реакции $^{7}\text{Li}(p, n)^{7}\text{Be}$ и систему формирования пучка нейтронов с замедлителем из фторида магния для получения терапевтического пучка нейтронов.

Представлены результаты сравнения данных численного моделирования пространственного распределения борной дозы и дозы гамма-излучения в водном фантоме с применением трех изготовленных систем формирования пучка нейтронов. Исследования проведены на ускорительном источнике нейтронов VITA в ИЯФ СО РАН с применением разработанного малогабаритного детектора, обеспечивающего измерение данных компонент доз ионизирующего излучения. Получено согласие результатов численного моделирования с результатами измерения. Для ускорительного источника нейтронов VITA, изготовленного и поставляемого в НМИЦ онкологии им. Н. Н. Блохина с целью проведения клинических испытаний методики БНЗТ в Российской Федерации и последующего лечения больных, методом численного моделирования проведена оптимизация системы формирования пучка с учетом размещенного оборудования, наличия конструкционных материалов и стены, разделяющей помещение установки и облучательную комнату. Приводится описание средств и материалов, использование которых позволило сформировать пучок нейтронов, удовлетворяющий требованиям БНЗТ, а также конструкции изготовленной системы формирования пучка нейтронов.

The accelerator-based neutron source VITA has been proposed and developed at the Budker Institute of Nuclear Physics (Novosibirsk, Russia) for boron neutron capture therapy (BNCT), which includes a vacuum-insulated tandem accelerator for proton beam production, a lithium target for neutron generation through the $^{7}\text{Li}(p, n)^{7}\text{Be}$ reaction, and a neutron beam shaping assembly with MgF_2 moderator for therapeutic beam generation.

¹E-mail: sychevatatyana@gmail.com

The paper presents the results of comparing numeric simulations results of boron dose and γ -ray dose spatial distributions in a water phantom for three different neutron beam shaping assemblies. The investigations were carried out at the accelerator-based neutron source VITA at BINP SB RAS using a small-size neutron detector to measure these components of ionizing radiation. The agreement between the measured and simulated results is obtained. For the accelerator-based neutron source VITA, which was manufactured and is being supplied to the Blokhin National Medical Research Center of Oncology in Moscow with the purpose of conducting clinical trials of the BNCT technique in the Russian Federation and subsequent patients treatment, the beam shaping assembly is optimized by numeric simulation method taking into account the equipment being placed, the presence of structural materials and a wall separating the installation room from the irradiation room. Description of the materials the use of which made it possible to form a neutron beam that meets the requirements of the BNCT and the design of the manufactured beam shaping assembly are presented.

PACS: 29.25.Dz

ВВЕДЕНИЕ

Бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) в настоящее время является одним из наиболее перспективных методов лечения онкологических заболеваний. БНЗТ позволяет проводить уничтожение злокачественных опухолей путем селективного накопления в клетках опухоли стабильного изотопа бор-10 и последующего облучения пациента потоком эпитеческих нейтронов. В результате поглощения нейтрона бором происходит ядерная реакция $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ с большим выделением энергии в пределах одной клетки, что приводит ее к гибели [1].

В ИЯФ СО РАН изготовлен ускорительный источник нейтронов VITA для проведения бор-нейтронозахватной терапии в Национальном медицинском исследовательском центре онкологии им. Н. Н. Блохина (Москва), который планируется ввести в эксплуатацию в 2025 г. с целью использования для лечения пациентов. Ускоритель оснащен системой формирования пучка с замедлителем из фторида магния для генерации терапевтического пучка нейтронов. Для введения БНЗТ в клиническую практику и создания индивидуального плана лечения каждого пациента разработана система дозиметрического планирования (СДП) VITA, не имеющая аналогов в Российской Федерации.

В данной работе описаны результаты валидации данных расчета дозового распределения нейтронного и гамма-излучения системой дозиметрического планирования VITA, а также представлены результаты проведенной с помощью численного моделирования оптимизации конструкции системы формирования пучка с замедлителем из MgF_2 , выполненной с учетом рекомендаций МАГАТЭ [1], для энергии протонов 2,3 МэВ и тока 7 мА. Приводится описание конструкции изготовленной системы формирования пучка нейтронов.

1. ВАЛИДАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ СДП VITA

Экспериментальные исследования проведены на ускорительном источнике нейтронов VITA в ИЯФ СО РАН [2, 3]. Генерация нейтронов происходит в литиевой мишени в реакции $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Система формирования пучка и водный фантом P3D01 расположены в горизонтальном тракте пучка.

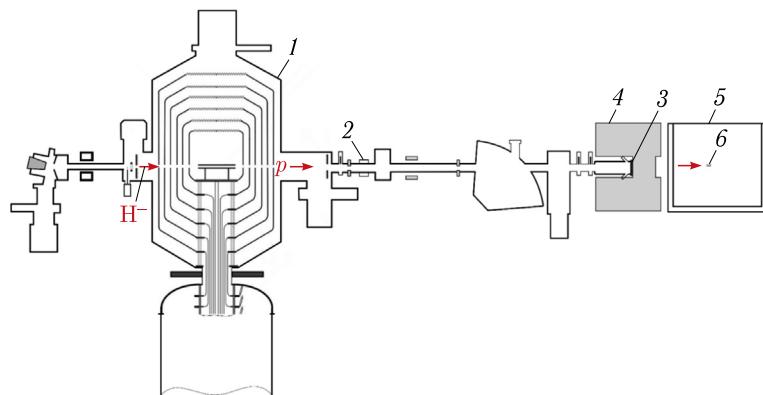


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 — ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией; 2 — бесконтактный датчик тока; 3 — литиевая мишень; 4 — система формирования пучка; 5 — водный фантом; 6 — детекторы нейтронов и гамма-излучения

Измерения пространственных распределений борной дозы и дозы гамма-излучения в водном фантоме проведены с помощью двух гамма- и нейtronных детекторов с литьевыми полистирольными сцинтилляторами, один из которых обогащен бором [10, 11]. Детекторы установлены на площадке, перемещаемой по всему внутреннему объему фантома.

В БНЗТ общая поглощенная доза представляет собой сумму четырех компонентов [7]: «борной дозы», «азотной дозы», дозы быстрых нейтронов, дозы гамма-излучения.

В данной работе 3D-расчеты всех четырех компонентов дозы проведены на воксельной модели водного фантома с ребром 8 мм с помощью программы СДП VITA с использованием кода переноса нейтронов и гамма-излучения NMC методом Монте-Карло [4].

Для проведения измерений выбрана следующая методика. Сначала проводят измерения при энергии протонов 2,1 МэВ и токе 1 мА, так как при такой энергии протонов генерируемые в реакции $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ нейтроны характеризуются средней энергией 100 кэВ [6] и достаточно глубоко проникают в воду в отсутствие замедлителя, формируя максимум плотности тепловых нейтронов на некоторой глубине, что позволяет, совместив максимумы расчетного и измеренного распределений, точно определить положение датчика относительно поверхности водного фантома. Совместная по амплитуде расчетные и измеренные распределения, определяют коэффициент для перевода скорости счета детектора в мощность дозы. Для дозы гамма-излучения также учитывается смещение, обусловленное излучением ускорителя. Эти же коэффициенты применяются для перевода скорости счета детектора в дозу и для других систем формирования пучка: с замедлителем из оргстекла и для разработанной нами ранее системы формирования пучка с замедлителем из MgF_2 и висмутовым фильтром гамма-излучения на выходе системы формирования пучка. Затем проводится сравнение расчетных и экспериментальных значений.

Данные расчетов и измерений с учетом переводных коэффициентов для борной дозы и дозы гамма-излучения приведены на рис. 2. Результаты проведенных иссле-

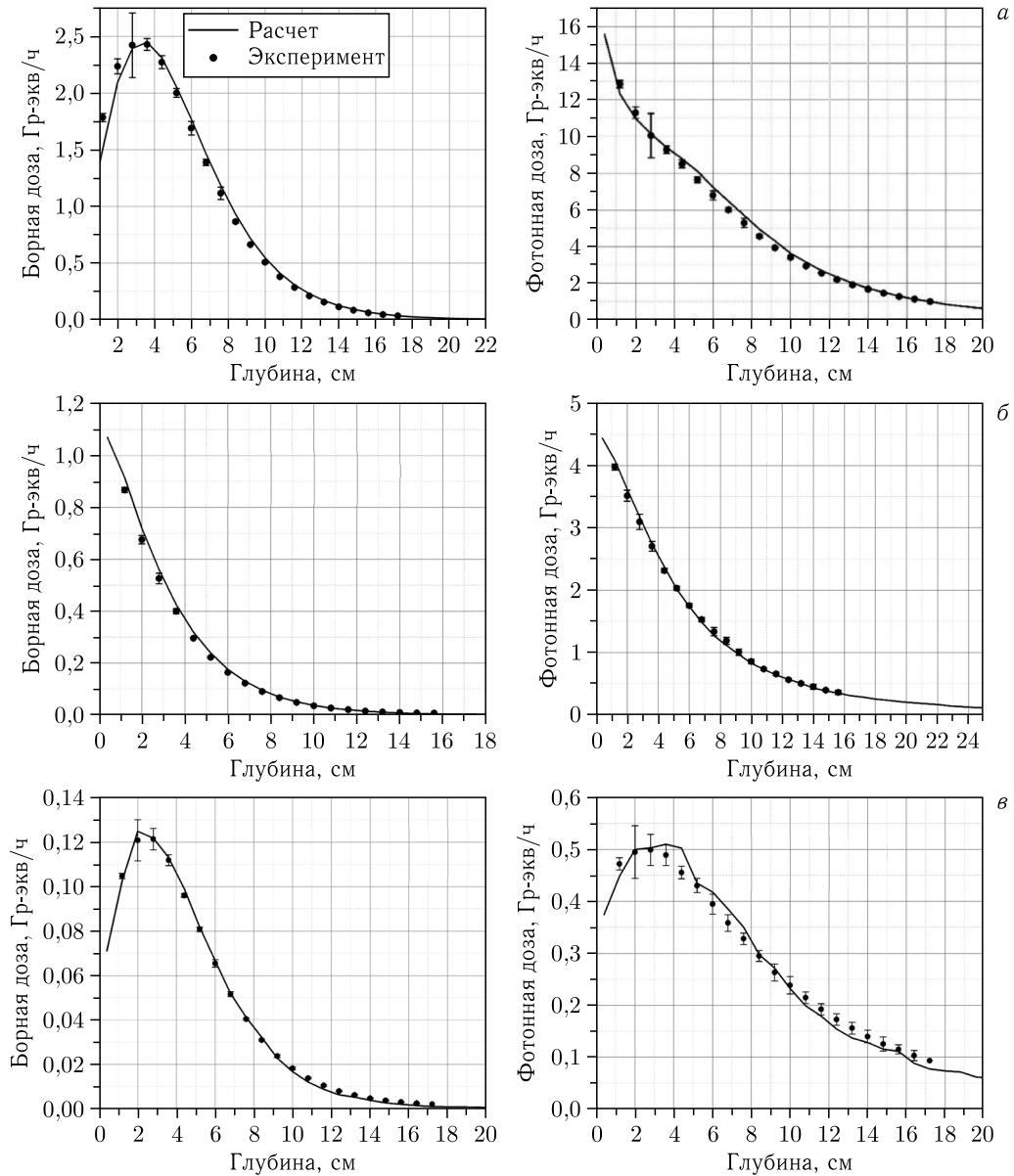


Рис. 2. Результаты измерения и моделирования распределения борной дозы и дозы гамма-излучения для трех систем формирования пучка при токе 1 мА: а) мишенный узел, энергия протонов 2,1 МэВ; б) мишенный узел с замедлителем из оргстекла, энергия протонов 2,1 МэВ; в) мишенный узел и система формирования пучка с замедлителем MgF_2 и висмутовым фильтром на выходе

данный демонстрируют хорошее согласие между измеренным и расчетным глубинным распределениями борной дозы и дозы гамма-излучения. Отклонение расчетных

и экспериментальных данных для борной дозы и дозы гамма-излучения не превышает 5 %, что сравнимо со статистической погрешностью.

2. СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА УСКОРИТЕЛЬНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ VITA

Результаты проведенных исследований показали хорошее согласие между измеренным и расчетным глубинным распределениями борной дозы и дозы гамма-излучения. При этом, если использовать изготовленную систему формирования пучка (СФП) с замедлителем из фторида магния в ускорительном источнике нейтронов VITA, поставляемом в Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н. Н. Блохина (Москва), то параметры пучка нейтронов при энергии протонов 2,3 МэВ и токе 7 мА не в полной мере удовлетворяют рекомендуемым МАГАТЭ значениям [1], они приведены в таблице (столбец СФП — исходный проект). Видно, что для того, чтобы параметры СФП в воздухе соответствовали рекомендациям МАГАТЭ, необходимо уменьшить отношение теплового потока к эпитеческому, дозу быстрых нейтронов на единицу эпитеческого потока, дозу гамма-излучения на единицу эпитеческого потока.

В связи с этим принято решение о внесении конструкционных изменений в СФП и применении дополнительных фильтров. Для уменьшения количества тепловых нейтронов решено использовать кадмиеевую фольгу толщиной 0,2 мм, для уменьшения количества быстрых нейтронов — полиэтилен с примесью лития толщиной 0,5 см, а для уменьшения гамма-излучения — фильтр из висмута толщиной 0,2 см. На увеличение доли эпитеческих нейтронов и уменьшение дозы гамма-излучения повлияло увеличение высоты графитового отражателя в передней полусфере пучка на 5 см и удаление из модели всех конструкционных элементов из титана, кроме внешнего корпуса СФП, а также увеличение размеров фторида магния. Дальнейшее снижение дозы гамма-излучения получено за счет замены полиэтилена с литием в передней полусфере пучка на свинец и увеличения толщины висмутового фильтра до 0,5 см. Модели СФП на разных этапах проектирования приведены на рис. 3. Параметры пучка нейтронов финальной версии СФП (см. рис. 3, б) полностью соответствуют рекомендациям МАГАТЭ (см. таблицу).

Параметры системы формирования пучка в воздухе на разных этапах проектирования в сравнении с рекомендуемыми МАГАТЭ величинами

Показатель качества	Скорость потока эпитеческих нейтронов φ_{epi} , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Отношение теплового потока к эпитеческому $\varphi_{\text{th}}/\varphi_{\text{epi}}$	Доза быстрых нейтронов на единицу эпитеческого потока $D_H/\int \varphi_{\text{epi}}(t) dt$, $\text{Гр} \cdot \text{см}^2$	Доза γ -излучения на единицу эпитеческого потока $D_\gamma/\int \varphi_{\text{epi}}(t) dt$, $\text{Гр} \cdot \text{см}^2$
Рекомендуемое МАГАТЭ значение	$\geq 5 \cdot 10^8$	$\leq 0,05$	$\leq 7 \cdot 10^{-13}$	$\leq 2 \cdot 10^{-13}$
Оптимизированная СФП	$7,26 \cdot 10^8$	0,028	$5,9 \cdot 10^{-13}$	$1,98 \cdot 10^{-13}$

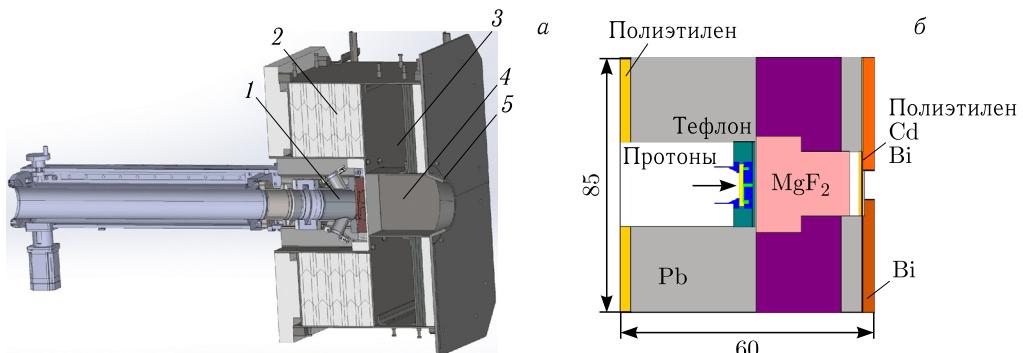


Рис. 3. а) Вид системы формирования пучка нейтронов, спроектированной для НМИЦ онкологии им. Н. Н. Блохина: 1 — мишенный узел с литиевой мишенью; 2 — отражатель из свинца; 3 — отражатель из реакторного графита; 4 — замедлитель из кристаллов фторида магния; 5 — коллиматор из вольфрама. б) Модель оптимизированной СФП (размеры в см)

На основании результатов численного моделирования переноса нейтронов и гаммаизлучения проведено проектирование системы формирования пучка нейтронов для Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н. Н. Блохина (Москва), ее трехмерное изображение представлено на рис. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика БНЗТ начинает входить в клиническую практику по всему миру. В ИЯФ СО РАН изготовлен ускорительный источник нейтронов VITA для проведения борнейтронозахватной терапии в Национальном медицинском исследовательском центре онкологии им. Н. Н. Блохина (Москва) с целью использования для лечения пациентов. Ускоритель оснащен СФП с замедлителем из фторида магния для формирования терапевтического пучка нейтронов. Для введения БНЗТ в клиническую практику и создания индивидуального плана лечения каждого пациента разработана система дозиметрического планирования VITA. Результаты валидации данных расчета СДП VITA с использованием трех систем формирования пучка показали, что отклонение между расчетными и экспериментальными значениями для борной дозы и дозы гамма-излучения для всех экспериментов не превышает 5 %. С помощью численного моделирования проведена оптимизация конструкции системы формирования пучка для НМИЦ онкологии им. Н. Н. Блохина с учетом рекомендаций МАГАТЭ. В работе представлено описание средств и материалов, с помощью которых удалось сформировать пучок нейтронов, соответствующий рекомендациям МАГАТЭ, а также конструкции изготовленной СФП нейтронов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Advances in Boron Neutron Capture Therapy. International Atomic Energy Agency. Vienna, 2023. 416 p.

2. Таскаев С.Ю. Разработка ускорительного источника эпитетловых нейтронов для борнейтронозахватной терапии // ЭЧАЯ. 2019. Т. 50, вып. 5. С. 657–669.
3. Таскаев С.Ю. Ускорительный источник нейтронов VITA. М.: Физматлит, 2024. 248 с.
4. Yurov D., Anikeev A., Bredikhin S., Frolov S., Lezhnin S., Prikhodko V. Parameters Optimization in a Hybrid System with a Gas Dynamic Trap Based Neutron Source // Fusion Engin. Design. 2012. V.87. P. 1684–1692.
5. Dymova M., Taskaev S., Richter V., Kuligina E. Boron Neutron Capture Therapy: Current Status and Future Perspectives // Cancer Commun. 2020. V. 40. P. 406–421.
6. Lee C.L., Zhou X.L. Thick Target Neutron Yields for the $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$ Reaction near Threshold // Nucl. Instr. Meth. B. 1999. V. 152. P. 1–11.
7. Neutron Capture Therapy: Principles and Applications. Springer, 2012.
8. Zaidi L., Kashaeva E., Lezhnin S., Malyshkin G., Samarin S., Sycheva T., Taskaev S., Frolov S. Neutron-Beam-Shaping Assembly for Boron Neutron-Capture Therapy // Phys. At. Nucl. 2017. V. 80. P. 60–66.
9. Zaidi L., Belgaid M., Taskaev S., Khelifi R. Beam Shaping Assembly Design of $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$ Neutron Source for Boron Neutron Capture Therapy of Deep-Seated Tumor // Appl. Radiat. Isotopes. 2018. V. 139. P. 316–324.
10. Bykov T., Kasatov D., Koshkarev A., Makarov A., Porosev V., Savinov G., Shchudlo I., Taskaev S. A Multichannel Neutron Flux Monitoring System for a Boron Neutron Capture Therapy Facility // J. Instrum. 2019. V. 14. P. 12002.
11. Bykov T., Kasatov D., Koshkarev A., Makarov A., Porosev V., Savinov G., Shchudlo I., Taskaev S., Verkhovod G. Initial Trials of a Dose Monitoring Detector for Boron Neutron Capture Therapy // J. Instrum. 2021. V. 16. P01024.

Получено 28 октября 2024 г.