

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ РЕАКЦИИ ${}^7\text{Li}(d,n){}^8\text{Be}^*$

Т. А. Быков, Г.Д. Верховод, С.Ю. Таскаев,
Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия,
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Аннотация

В ИЯФ СО РАН для проведения перспективной методики лечения злокачественных опухолей предложен и создан ускорительный источник нейтронов на основе нового типа ускорителя заряженных частиц - ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией. На ускорителе получают пучок протонов или дейтронов с широким диапазоном тока от 1 нА до 10 мА и энергии от 0,6 до 2,2 МэВ и генерируют нейтроны с различным спектром – холодные, тепловые, эпитепловые, надэпитепловые, моноэнергетические и быстрые.

С использованием литиевой мишени толщиной 88 мкм был измерен спектр быстрых нейтронов реакции ${}^7\text{Li}(d,n){}^8\text{Be}$ при энергиях пучка дейтронов от 1 до 2 МэВ. Для измерения спектра был использован спектрометр-дозиметр UNSD-15 Mobile (НИЦ «Курчатовский институт», ООО «Центр АЦП»). В ходе исследований была проведена калибровка оборудования и измерен спектр быстрых нейтронов на расстоянии 2 и 5 метров от литиевой мишени вдоль оси пучка нейтронов.

В работе представлены результаты измерений в виде графиков энергетического спектра быстрых нейтронов, а также выводы о проведении дальнейшего изучения спектра реакции ${}^7\text{Li}(d,n){}^8\text{Be}$ и его углового распределения.

ВВЕДЕНИЕ

Бор-нейтронозахватная терапия является перспективным методом для лечения злокачественных опухолей. Он обеспечивает избирательное разрушение опухолевых клеток путем предварительного накопления внутри них стабильного бора-10 и последующего облучения эпитепловыми нейтронами. В результате поглощения нейтрона бором происходит ядерная реакция с выделением энергии в ячейке.

Для БНЗТ в Институте ядерной физики СО РАН был предложен и разработан оригинальный ускорительный источник нейтронов. Источник нейтронов состоит из трех основных блоков: 1) электростатического тандемного ускорителя протонов оригинальной конструкции (тандемный ускоритель с вакуумной изоляцией) для получения стационарного пучка протонов с энергией до 2,3 МэВ и током до 10 мА.; 2) литиевая мишень для генерации протонов в пороговой реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$; и 3) система генерации пучка терапевтических нейтронов для формирования пучка надтепловых нейтронов для терапии. Установка показана на Рис. 1.

Еще одной особенностью ускорительного источника ВИТА является возможность генерации не только

эпитепловых нейтронов, но также и пучка дейтронов. Это дает множество возможностей для научных исследований, в том числе изучение спектра быстрых нейтронов реакции ${}^7\text{Li}(d,n){}^8\text{Be}$

Для измерения энергетического спектра нейтронов реакции ${}^7\text{Li}(d,n){}^8\text{Be}$ в лаборатории БНЗТ ИЯФ используется спектрометр-дозиметр UNSD-15 Mobile (НИЦ «Курчатовский институт», ООО «Центр АЦП»). В состав оборудования входит детектор быстрых нейтронов и гамма-излучения, малогабаритный промышленный компьютер со встроенным в него блоком высокочастотного аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и блоком питания для высоковольтного модуля детектора (Рисунок 2.). Технические характеристики представлены на Рисунке 3.

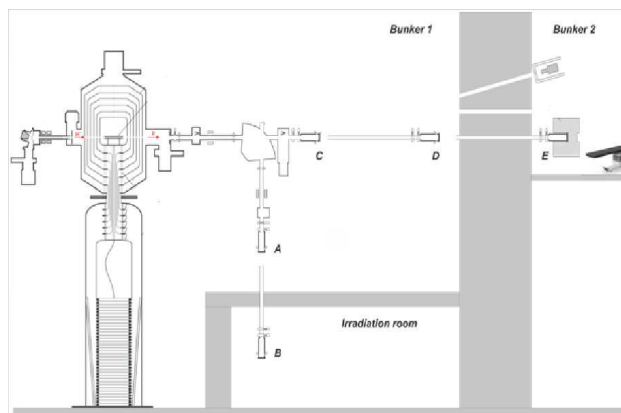


Рисунок 1: Схема экспериментальной установки.



Рисунок 2: Комплект спектрометра (мобильный автономный вариант).

Параметр	Типовое значение	Фактическое значение
Энергетический диапазон измерения нейтронного излучения	0,025 эВ – 15 МэВ	0,025 эВ – 15,4 МэВ
Энергетический диапазон измерения гамма-излучения	50 кэВ – 8 МэВ	100 кэВ – 8,5 МэВ
Диапазон измерения мощности эффективной дозы смешанных гамма-нейтронных полей	$\sim (2,0 \cdot 10^{-1} \pm 3,0 \cdot 10^3)$ мкЗв/час	$\sim (2,0 \cdot 10^{-1} \pm 3,0 \cdot 10^3)$ мкЗв/час
Коэффициент блокировки гамма-квантов	Не менее 1000 при рабочей нагрузке и диапазоне каналов 20÷1024	Не менее 1000 при рабочей нагрузке и диапазоне каналов 27÷1024
Рабочая нагрузка спектрометра	Не более $5 \cdot 10^3$ импульсов/с	Не более $22 \cdot 10^3$ импульсов/с
Энергетическое разрешение спектрометра по ^{239}Pu -Be	Менее 10 %	5 %
Ширина канала спектрометра в энергиях электрона	$\sim 0,0075$ МэВ/канал	$\sim 0,00825$ МэВ/канал

Рисунок 3: Технические характеристики.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В марте 2023 года были проведены эксперименты по измерению энергетического спектра быстрых нейтронов реакции $^7\text{Li}(d,n)^8\text{Be}$. В результате планирования эксперимента было решено разместить детектор на расстоянии 4м за бетонной стеной толщиной 1,5м (Рисунок 4.). Энергия пучка дейтронов во время измерения составляла 1 МэВ, ток пучка- 2 мкАч. Результаты измерений представлены на Рисунке 5.



Рисунок 4: Ускорительный тракт (рисунок слева), расположение детектора (рисунок справа).

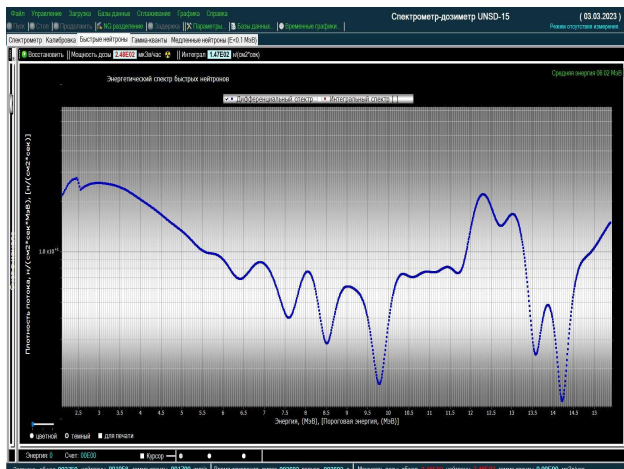


Рисунок 5: Спектр быстрых нейтронов.

Из графика видны пик энергетического спектра при 12,5 МэВ, возможный пик при 3 МэВ, сглаженный обработкой, а также возможный пик при энергии 16 МэВ или более. Из полученных результатов видно, что некоторые области спектра “не прорисованы” (пунктирные области графика на Рисунке 5). Это связано с недостаточной статистикой в данных диапазонах энергий. Для получения качественного результата было принято решение изменить конфигурацию эксперимента и переместить детектор на расстояние 2м от литиевой мишени. Полученные графики для разных энергий представлены на Рисунке 6.

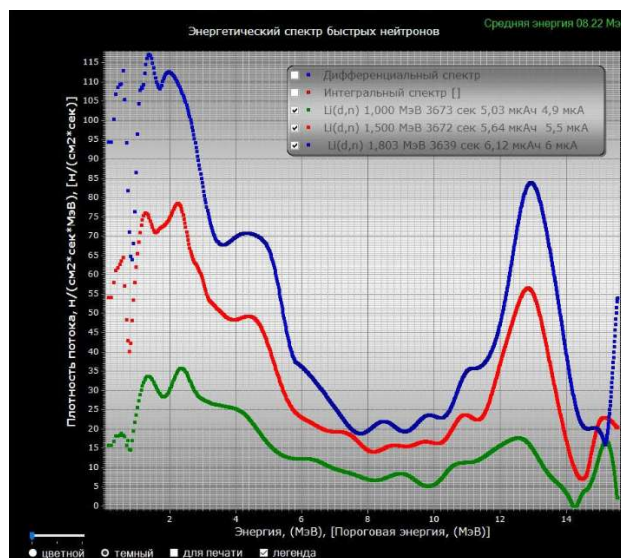


Рисунок 6: Спектры быстрых нейтронов на расстоянии 2 метра от литиевой мишени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН предложен и разработан ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, обеспечивающий получение мощного стационарного пучка протонов или дейтронов с энергией, изменяемой в диапазоне от 0,3 до 2,3 МэВ, с током, изменяемым от 0,5 до 10 мА. Пучок ионов отличается высокой монохроматичностью и стабильностью энергии (0,1 %) и высокой стабильностью тока (до 0,4 %). На выходе из ускорителя пучок ионов имеет диаметр 10 ± 1 мм, угловую расходимость $\pm 1,5$ мрад, нормализованный геометрический эмиттанс $\varepsilon_{\text{norm}} = 0,2$ мм·мрад.

В результате серии экспериментов на ускорителе БНЗТ ИЯФ были получены спектры нейтронов быстрых реакций на расстоянии от двух до четырех метров от литиевой мишени. После сравнения полученных данных с теоретическими было принято решение провести дальнейшие исследования спектра реакции в расширенном диапазоне энергий спектрометра до 20 МэВ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 19 72 30005, <https://rscf.ru/project/19-72-30005>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] S. Taskaev *et al.*, “Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target”, *Biology*, vol. 10, 350, 2021. doi: 10.3390/biology10050350
- [2] G. Verkhovod, D. Kasatov, Ia. Kolesnikov, A. Koshkarev, A. Makarov, I. Shchudlo, T. Sycheva, S. Savinov, S. Taskaev. *Verification of a beam of epithermal neutrons for boron-neutron capture therapy*. Proc. of the XXVII Russian Particle Accelerator Conference, Alushta, Russia, September 26th - October 2st, 2021, MOPSA47.
- [3] M. Ahmed *et al.* (Eds.), *Advances in Boron Neutron Capture Therapy*. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, June 2023. ISBN: 978-92-0-132723-9
- [4] S. Taskaev *et al.*, “Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target”, *Biology*, vol. 10, 350, 2021. doi: 10.3390/biology10050350
- [5] Д.А. Касатов и др., “Регистрация тока, сопутствующего ионному пучку в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией”, *Письма в ЖТФ*, том 41, стр. 74-80, 2015. doi: 10.1134/S1063785015020078
- [6] Д.А. Касатов и др., “Источник быстрых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишени”, *ПТЭ*, № 5, стр. 5-9, 2020. doi: 10.31857/S0032816220050158
- [7] Konstantin V. Mitrofanova , Vladimir M. Piksaikin, Konstantin I. Zolotarev, Andrey S. Egorov, and Dmitrii E. Gremyachkin. *The energy spectrum of neutrons from $7\text{Li}(d,n)8\text{Be}$ reaction at deuteron energy 2.9 MeV*. EPJ Web of Conferences 146, 11041 (2017).