

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Ордена Ленина Сибирское отделение
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера СО РАН

А. С. Кузнецов, Г. Н. Малышкин, А. Н. Макаров,
И. Н. Сорокин, Ю. С. Суляев, С. Ю. Таскаев

ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ
ПО РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОНОВ
НА УСКОРИТЕЛЬНОМ ИСТОЧНИКЕ
ДЛЯ БОР-НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ

ИЯФ 2008-27

НОВОСИБИРСК
2008

**Первые эксперименты по регистрации нейтронов
на ускорительном источнике
для бор-нейтронозахватной терапии**

А.С. Кузнецов, И.Н. Сорокин, Ю.С. Суляев, С.Ю. Таскаев

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
630090, Новосибирск, Россия

Г.Н. Мальшкин

Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики, Снежинск

А.Н. Макаров

Новосибирский государственный университет
630090, Новосибирск, Россия

PACS: 29.25.Dz

В Институте ядерной физики СО РАН для широкого внедрения в клиническую практику бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей сооружен пилотный вариант ускорительного источника эпитепловых нейтронов, получен стационарный протонный пучок и осуществлена припороговая генерация нейтронов. В статье описываются результаты первых экспериментов по генерации нейтронов.

taskaev@inp.nsk.su

Бор-нейтронозахватная терапия [1] рассматривается как перспективный метод избирательного уничтожения злокачественных опухолей. Клинические испытания, проведенные на ядерных реакторах, продемонстрировали возможность лечения глиобластомы мозга и метастазы меланомы, не поддающиеся лечению другими способами [2, 3]. Для широкого внедрения этого метода в клиническую практику необходимы компактные и недорогие источники эпитепловых нейтронов. В 1998 году сотрудниками Института ядерной физики СО РАН (Новосибирск), Физико-энергетического института и Медицинского радиологического научного центра (Обнинск) был предложен источник эпитепловых нейтронов на основе электростатического ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и припорогового режима генерации [4]. При сбросе 10 мА протонного пучка энергией 1.915 МэВ на литиевую мишень в результате пороговой реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ (энергия порога 1.882 МэВ) предполагается генерировать поток нейтронов со средней энергией 40 кэВ, который после небольшого замедления может использоваться для проведения нейтронозахватной терапии. В настоящее время сооружен пилотный вариант источника [5], получен стационарный протонный пучок с энергией 1,92 МэВ и током до 3 мА и осуществлены первые эксперименты по генерации нейтронов. В статье описываются результаты этих экспериментов.

Генерация нейтронов осуществлялась при сбросе протонного пучка на литиевую мишень. На выходе из ускорителя протонный пучок имел размер около 2 см и характеризовался достаточно высокой стабильностью энергии (дисперсия менее 2 кэВ). Поскольку генерация нейтронов в результате реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ приводит к появлению радиоактивного изотопа ${}^7\text{Be}$, то для обеспечения возможности исследования активированной мишени ток протонного пучка на мишень был снижен коллиматором до величины ~100 мА. Использованная литиевая мишень представляла собой охлаждаемый водой тонкий медный диск диаметром 10 см, на который со стороны пучка был напылен слой лития толщиной 50 мкм [6]. Измерение нагрева охлаждающей жидкости позволяло судить о величине тока на мишень.

Для регистрации возникающего γ -излучения был изготовлен детектор на основе кристалла NaI $\text{Ø}6 \times 6$ см и фотоумножителя Photonis XP3312B, снабженный быстродействующим спектрометрическим АЦП, коллиматором и специальным программным обеспечением для анализа спектра γ -квантов.

Детектор обычно размещали на расстоянии 222 см под нейтроно-генерирующей мишенью и, помимо защиты свинцовым экраном с толщиной стенок ~10 см, при необходимости дополнительно закрывали борированным полиэтиленом. Входное отверстие коллиматора составляло 10×15 мм. Калибровка γ -спектрометра была осуществлена с помощью спектральной линии ^{40}K , регистрируемой в фоновом излучении, с помощью радиоизотопных источников ^{60}Co активностью $5.66 \cdot 10^7$ Бк с энергией γ -квантов 1173 и 1333 кэВ и ^{137}Cs активностью $2.15 \cdot 10^8$ Бк с энергией 662 кэВ. Калибровка показала энергетическую линейность спектрометрической системы и позволила установить, что имеющийся кристалл NaI обеспечивает энергетическое разрешение ~7% и полное поглощение достигается для ~37% попадающих в него γ -квантов с энергией 662 кэВ.

На рис. 1 приведены измеренные спектры γ -квантов при энергии протонов 1.7 МэВ, ниже порога реакции с выходом нейтронов, и при энергии 1.92 МэВ. На спектре допорогового режима видна яркая спектральная линия с энергией 477 кэВ, связанная с возбуждением ядер лития протонами. В режиме генерации нейтронов дополнительно появляются γ -кванты от поглощения нейтронов конструкционными материалами установки, но в основном – от поглощения нейтронов иодом в сцинтиляторе детектора, что было выяснено путем дополнительного обкладывания детектора борированным полиэтиленом, существенно ослабляющим поток нейтронов.

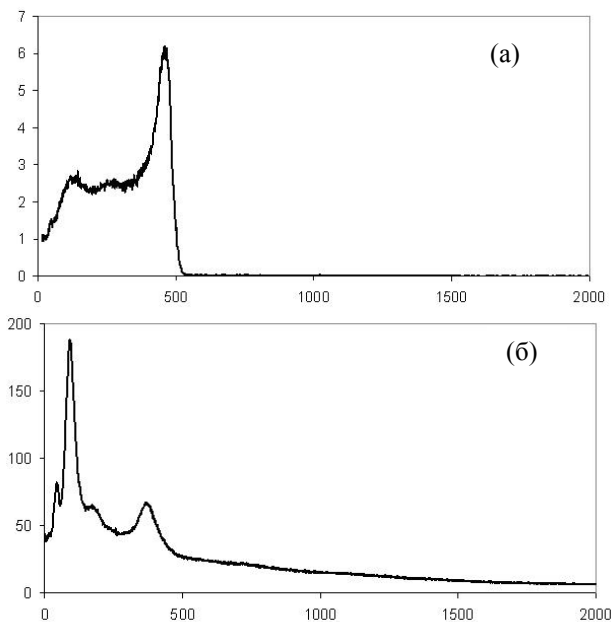


Рис. 1. Гамма-спектр при энергии протонов 1.7 МэВ (а) и 1.92 МэВ (б).

Высокая чувствительность детектора NaI к нейтронам позволила использовать его и в качестве активационного детектора. Образующийся в результате захвата нейтрона изотоп ^{128}I имеет период полураспада 25 минут. В 6.4% случаев распад идет за счет электронного захвата безо всякого излучения, в 93.6% – β^- распад с испусканием электрона с энергией до 2.12 МэВ. Помимо радиоизотопа ^{128}I в сцинтиляторе также появляется радиоизотоп ^{24}Na со скоростью на уровне 2% от скорости появления ^{128}I . На рис. 2 приведен спектр, регистрируемый активированным детектором после генерации нейтронов. Такой спектр характерен для β^- распада. Из скорости счета и времени генерации нейтронов была определена скорость активации детектора, а с помощью расчета, выполненного методом Монте-Карло, – ток протонного пучка, который получился равным 140 μA .

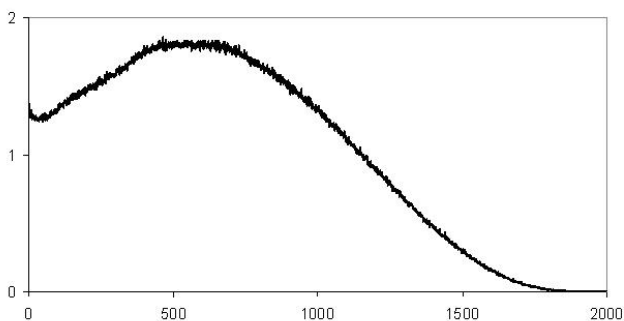


Рис. 2. Гамма-спектр активированного детектора.

Поскольку получение каждого нейтрона в результате реакции $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$ сопровождается появлением радиоактивного ядра ^7Be с периодом полураспада 53 дня, то по остаточной активности литиевой мишени был определен полный выход нейтронов. После окончания генерации нейтронов мишеный узел был снят, мишень с литиевым слоем вынута и помещена над NaI детектором на расстоянии 21 см. На измеренном γ -спектре активированной мишени присутствует интенсивный пик 477 кэВ γ -квантов от распада бериллия. Измеренная скорость счета в этом пике составила 4.1 события в секунду. С учётом того, что только 37% γ -квантов образуют пик полного поглощения, найдено, что мишень излучает $2.6 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ γ -квантов, и активность бериллия получается $2.6 \cdot 10^5$ Бк. В данном эксперименте облучению мишени током 140 μA в течение 7 минут предшествовало облучение током, примерно, в 2 раза меньшим в течение 6 минут. Расчеты дают, что активация мишени достигнет величины $2.7 \cdot 10^5$ Бк. Видно хорошее согласие между экспериментально измеренной и расчетной активностью. Укажем, что полный выход нейтронов в этом эксперименте был $2 \cdot 10^{12}$.

Для первичного анализа спектра генерируемых нейтронов мы использовали пузырьковые детекторы BDT и BD100R (Bubble Technology Industries, Canada). Детектор BDT представляет собой прозрачную колбу диаметром 19 мм, длиной 145 мм и весом 58 г, заполненную полимером с вкраплениями перегретой жидкости, состав которой подобран так, что детектор имеет максимальную чувствительность в области нейтронов тепловых энергий: $\sim 10^{-3}$ пузырьков/нейтрон·см². Детектор BD100R, наоборот, чувствителен к нейтронам с энергией более 100 кэВ. В проведенных экспериментах в детекторе BDT (рис. 3) образовывалось в 15 – 20 раз больше пузырьков, чем в детекторе BD100R. Такое соотношение соответствует расчетному спектру со средней энергией 40 кэВ, реализуемому в припороговом режиме.



Рис. 3. BDT детекторы после генерации нейтронов.

Также в этих экспериментах была проверена способность мишени обеспечить эффективный теплосъем: 318 Вт/см² при температуре поверхности лития ниже 180 °С. Хотя ток был сильно ограничен, но поскольку не использовали развертку пучка по мишени, то плотность тока была всего в 2 раза меньше проектной. Визуально каких-либо существенных изменений в литиевом слое не было обнаружено, что указывает на отсутствие значительного испарения из-за поддержания температуры лития ниже температуры плавления вследствие эффективного теплосъема.

Таким образом, в Институте ядерной физики СО РАН успешно осуществлена генерация нейтронов на ускорительном источнике тепловых нейтронов, специально сконструированном для размещения в онкологических клиниках для проведения бор-нейтронозахватной терапии. С помощью γ -детектора, на основе NaI сцинтиллятора, был определен выход нейтронов и измерен спектр сопутствующего γ -излучения. Измеренный выход нейтронов $2.6 \cdot 10^9$ с⁻¹ при токе 140 μ А хорошо согласуется с расчетом. Предварительное заключение о спектре нейтронов, согласующееся с теоретическим предсказанием, сделано с использованием пузырьковых

детекторов. В ближайшее время предполагается провести точные измерения спектра нейтронов времяпролетной методикой и сформировать терапевтический пучок эпитепловых нейтронов.

Авторы выражают благодарность Б.Ф. Баянову и Л.В. Желнову за подготовку литиевой мишени, Ю.И. Бельченко, А.Л. Санину, С.Г. Константинову, К.И. Меклеру, В.В. Широкову за обеспечение работы ускорителя, В.Я. Чудаеву за помощь в калибровке детектора, А.А. Иванову и А.В. Бурдакову за содействие в проведении экспериментов и за ценные обсуждения.

Работа выполнена при частичной поддержке Международного научно-технического центра (проект № 3605).

Литература

- [1] *Locher G.* // Am. J. Roentgenol. Radium Ther. 1936. V. 36. P. 1-13.
- [2] *Hatanaka H.* // Basic Life Sci. 1990. V. 54. P. 15-21.
- [3] *Hatanaka H., Nakagawa Y.* // Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 1994. V. 28. P. 1061-1066.
- [4] *Bayanov B., Belov V., Bender E., et al.* // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 1998. V. 413. P. 397-426.
- [5] *Kudryavtsev A., Belchenko Yu., Burdakov A., et al.* // Rev. Sci. Instr. 2008. V. 79. 02C709.
- [6] *Bayanov B., Belov V., Kindyuk V., Oparin E., Taskaev S.* // Applied Radiation and Isotopes. 2004. V. 61. P. 817-821.

*А.С. Кузнецов, Г.Н. Малышкин, А.Н. Макаров,
И.Н. Сорокин, Ю.С. Суляев, С.Ю. Таскаев*

**Первые эксперименты по регистрации нейтронов
на ускорительном источнике
для бор-нейтронозахватной терапии**

*A.S. Kuznetsov, G.N. Malyshkin, A.N. Makarov,
I.N. Sorokin, Yu.S. Sulyaev, S.Yu. Taskaev*

The first experiments of the neutrons registration
at the accelerating source
for boron-neutron capture therapy

ИЯФ 2008-27

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 3.10. 2008 г.

Сдано в набор 9.10. 2008 г.

Подписано в печать 10.10. 2008 г.

Формат 60х90 1/16 Объем 0.5 печ.л., 0.4 уч.-изд.л.

Тираж 115 экз. Бесплатно. Заказ № 27

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11