

02;12

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

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

Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск  
Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики,  
Снежинск  
Новосибирский государственный университет, Новосибирск  
E-mail: taskaev@inp.nsk.su

*Поступило в Редакцию 17 октября 2008 г.*

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.

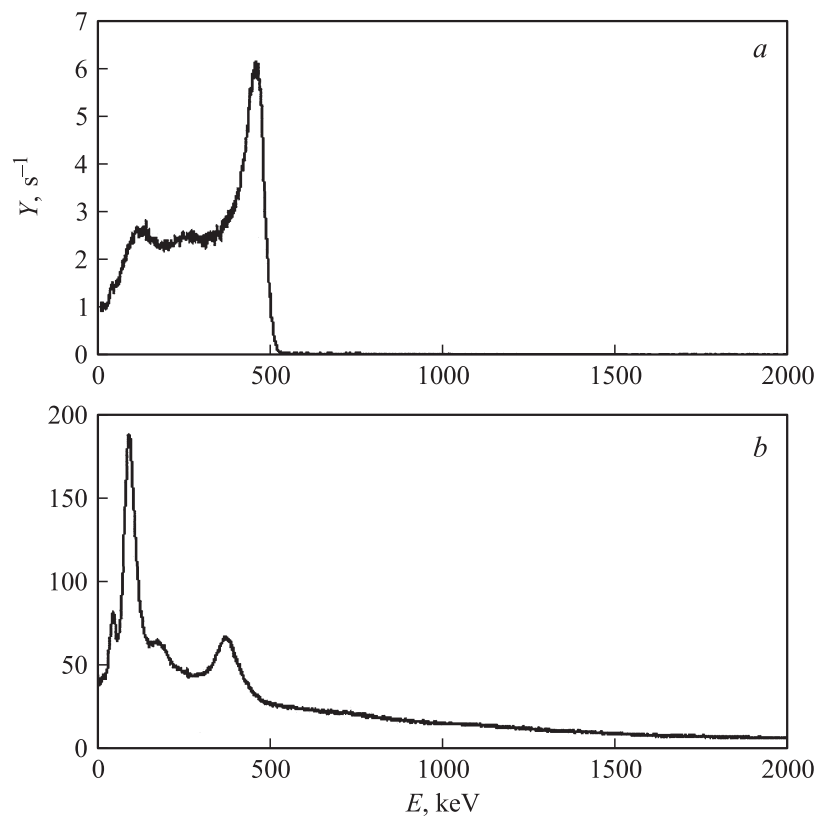
PACS: 29.25.Dz

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 поддающихся лечению другими способами [2,3]. Для широкого внедрения этого метода в клиническую практику необходимы компактные и недорогие источники эпитепловых нейтронов. В 1998 г.

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 MeV на литиевую мишень в результате пороговой реакции  ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$  (энергия порога 1.882 MeV) предполагается генерировать поток нейтронов со средней энергией 40 keV, 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 MeV 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 с дисперсией менее 2 keV. 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  $\sim 100 \mu\text{A}$ . Использованная литиевая мишень представляла собой охлаждаемый водой тонкий медный диск диаметром 10 см, на который со стороны пучка был напылен слой лития толщиной  $50 \mu\text{m}$  [6]. Измерение нагрева охлаждающей жидкости позволяло судить о величине тока на мишень.

Для регистрации возникающего  $\gamma$ -излучения был изготовлен детектор на основе кристалла NaI  $\varnothing 6 \times 6$  см и фотоумножителя Photonis XR3312B, снабженный быстродействующим спектрометрическим АЦП, коллиматором и специальным программным обеспечением для анализа спектра  $\gamma$ -квантов. Детектор обычно размещали на расстоянии 222 см под нейтроногенерирующей мишенью и, помимо защиты свинцовым экраном с толщиной стенок  $\sim 10$  см, при необходимости дополнительно закрывали борированным полиэтиленом. Входное отверстие коллиматора составляло  $10 \times 15$  мм. Калибровка  $\gamma$ -спектрометра была осуществлена с помощью спектральной линии  ${}^{40}\text{K}$ , регистрируемой в фоновом излучении, с помощью радиоизотопных источников  ${}^{60}\text{Co}$  активностью  $5.66 \cdot 10^7$  Вк с энергией  $\gamma$ -квантов 1173 и 1333 keV и  ${}^{137}\text{Cs}$



**Рис. 1.** Гамма-спектр при энергии протонов 1.7 MeV (a) и 1.92 MeV (b).

активностью  $2.15 \cdot 10^8$  Вq с энергией 662 keV. Калибровка показала энергетическую линейность спектрометрической системы и позволила установить, что имеющийся кристалл NaI обеспечивает энергетическое разрешение  $\sim 7\%$  и полное поглощение достигается для  $\sim 37\%$  попадающих в него  $\gamma$ -квантов с энергией 662 keV.

На рис. 1 приведены измеренные спектры  $\gamma$ -квантов при энергии протонов 1.7 MeV, ниже порога реакции с выходом нейтронов, и при энергии 1.92 MeV. На спектре допорогового режима видна яркая

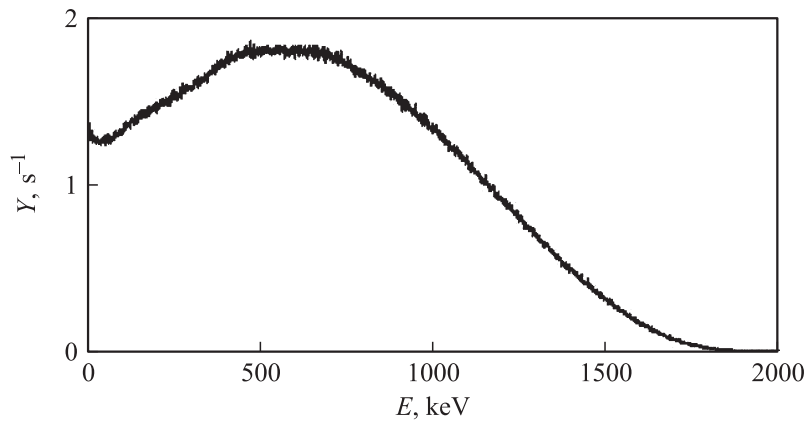


Рис. 2. Гамма-спектр активированного детектора.

спектральная линия с энергией 477 keV, связанная с возбуждением ядер лития протонами. В режиме генерации нейтронов дополнительно появляются  $\gamma$ -кванты от поглощения нейтронов конструкционными материалами установки, но в основном — от поглощения нейтронов йодом в сцинтиляторе детектора, что было выяснено путем дополнительного обкладывания детектора борированным полиэтиленом, существенно ослабляющим поток нейтронов. Высокая чувствительность детектора NaI к нейтронам позволила использовать его и в качестве активационного детектора. Образующийся в результате захвата нейтрона изотоп  $^{128}\text{I}$  имеет период полураспада 25 min. В 6.4% случаев распад идет за счет электронного захвата без всякого излучения, в 93.6% —  $\beta^-$ -распад с испусканием электрона с энергией до 2.12 MeV. Помимо радиоизотопа  $^{128}\text{I}$  в сцинтиляторе также появляется радиоизотоп  $^{24}\text{Na}$  со скоростью на уровне 2% от скорости появления  $^{128}\text{I}$ . На рис. 2 приведен спектр, регистрируемый активированным детектором после генерации нейтронов. Такой спектр характерен для  $\beta^-$ -распада. Из скорости счета и времени генерации нейтронов были определены скорость активации детектора, а с помощью расчета, выполненного методом Монте-Карло, — ток протонного пучка, который получился равным 140  $\mu\text{A}$ .

Поскольку получение каждого нейтрона в результате реакции  ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$  сопровождается появлением радиоактивного ядра  ${}^7\text{Be}$  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  $\gamma$ -спектре активированной мишени присутствует интенсивный пик 477 keV  $\gamma$ -квантов от распада бериллия. Измеренная скорость счета в этом пике составила 4.1 события в секунду. С учетом того, что только 37%  $\gamma$ -квантов образуют пик полного поглощения, найдено, что мишень излучает  $2.6 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$   $\gamma$ -квантов, и активность бериллия получается  $2.6 \cdot 10^5 \text{ Bq}$ . В данном эксперименте облучению мишени током 140  $\mu\text{A}$  в течение 7 min предшествовало облучение током примерно в 2 раза меньшим в течение 6 min. Расчеты дают, что активация мишени достигнет величины  $2.7 \cdot 10^5 \text{ Bq}$ . Видно хорошее согласие между экспериментально измеренной активностью и расчетной. 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 mm, длиной 145 mm и весом 58 g, заопленную полимером с вкраплениями перегретой жидкости, состав которой подобран так, что детектор имеет максимальную чувствительность в области нейтронов тепловых энергий:  $\sim 10^{-3} \text{ bubbles/neutron-cm}^2$ . Детектор BD100R, наоборот, чувствителен к нейтронам с энергией более 100 keV. В проведенных экспериментах в детекторе BDT образовывалось в 15–20 раз больше пузырьков, чем в детекторе BD100R. Такое соотношение соответствует расчетному спектру со средней энергией 40 keV, реализуемому в припороговом режиме.

Также в этих экспериментах была проверена способность мишени обеспечить эффективный теплосъем: 318 W/cm<sup>2</sup> при температуре поверхности лития ниже 180°C. 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, на ускорительном источнике эпитепловых нейтронов, специально сконструированном для размещения в онкологических клиниках для проведения бор-нейтронозахватной терапии, успешно осуществлена генерация нейтронов. С помощью  $\gamma$ -детектора на основе NaI сцинтиллятора был определен выход нейтронов и измерен спектр сопутствующего  $\gamma$ -излучения. Измеренный выход нейтронов  $2.6 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$  при токе  $140 \mu\text{A}$  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).

## Список литературы

- [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. P. 02C709.
- [6] *Bayanov B., Belov V., Kindyuk V., Oparin E., Taskaev S.* // Applied Radiation and Isotopes. 2004. V. 61. P. 817–821.