

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 539.17

УСКОРИТЕЛЬ РТМ-70 КАК ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ И ФОТОНОВ**С. С. Бельшев, А. Н. Ермаков, А. А. Кузнецов, И. В. Макаренко, В. В. Ханкин***(кафедра общей ядерной физики; НИИЯФ)*

E-mail: kuznets@depni.sinp.msu.ru

Проанализирована возможность использования разрезного микротрона РТМ-70 для создания импульсного источника фотонов и нейтронов. Методом компьютерного моделирования получены оптимальные параметры предложенных источников.

Введение

В последнее время в науке, а также в промышленных приложениях и в медицине наблюдается большой интерес к созданию компактных источников нейтронов и фотонов. Существующий в НИИЯФ МГУ разрезной микротрон РТМ-70 [1] позволяет создать импульсные нейтронные и фотонные источники. Цель настоящей работы — исследовать возможные характеристики фотонного и нейтронного источника на основе ускорителя РТМ-70.

Микротрон РТМ-70 является уникальным компактным ускорителем электронов с максимальной энергией пучка 70 МэВ. Основные характеристики ускорителя приведены в табл. 1.

Для практического применения необходимо изучить влияние параметров установки на характеристики вторичных пучков, такие как их интенсивность, угловые и спектральные распределения. Для решения данной задачи был разработан программный комплекс с использованием библиотек GEANT4 [2] и поставлен компьютерный эксперимент.

Таблица 1

Основные характеристики ускорителя РТМ-70

Энергия электронов на выходе ускорителя	14.9–67.7 МэВ
Ширина энергетического спектра электронов	200 кэВ
Импульсный ток выведенного пучка	до 10 мА
Длительность импульса	2–20 мкс
Частота следования импульсов	до 150 Гц

Импульсный источник фотонов

Тормозное излучение электронов в мишени из материала с большим номером Z является одним из самых распространенных источников фотонов. Обычно применяется мишень-конвертер из вольфра-

ма. Для увеличения интенсивности фотонного пучка в качестве материала мишени-конвертера предлагается использовать естественную смесь изотопов урана.

Для моделирования прохождения электронов через мишени из различных веществ была написана программа с использованием библиотек GEANT4, которая позволяет задавать геометрию установки и изменять характеристики пучка электронов. На рис. 1 показана схема модельного эксперимента.

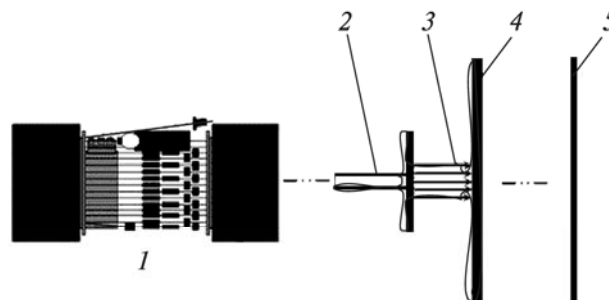


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — ускоритель РТМ-70, 2 — выходной канал ускорителя, 3 — пучок электронов, 4 — тормозная мишень, 5 — детектор

В табл. 2 приведены параметры моделирования фотонного источника. На первом этапе была выполнена серия вычислений для выбора оптимальной толщины тормозной мишени из урана, при которой выход фотонов максимален. На рис. 2 показан график зависимости выхода фотонов с энергией больше 0.1 МэВ (кривая 1) и с энергией больше 8 МэВ (кривая 2) в зависимости от толщины урановой мишени.

Увеличение выхода фотонов на графиках связано с увеличением потерь энергии электронами на излучение при прохождении вещества мишени. Положение максимума определяет оптимальную толщину тормозной мишени. При дальнейшем возрастании толщины мишени наблюдается спад, обусловленный

Таблица 2
Характеристики моделируемой установки

Энергия электронов	50 МэВ
Радиус пучка электронов	4 мм
Число электронов, упавших на мишень	10^7
Материал мишени	природная смесь изотопов урана ^{238}U (99.2745%), ^{235}U (0.7200%)
Радиус мишени	8 мм
Толщина тормозной мишени	0.1–5.5 мм
Расстояние от выходного окна ускорителя до тормозной мишени	20 мм
Расстояние от тормозной мишени до детектора	50 мм
Радиус детектора	50 мм
Плотность вещества мишени	19.1 г/см ³
Молярная масса вещества мишени	238.029 г/моль

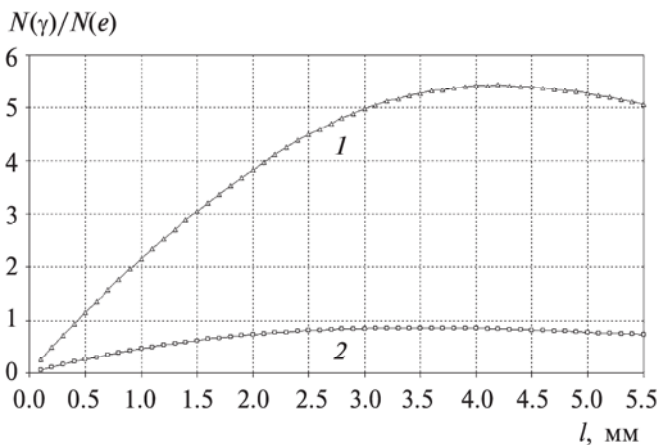


Рис. 2. Зависимость выхода фотонов от толщины урановой мишени для случаев: 1 — энергия фотонов $E_{ph} > 0.1$ МэВ; 2 — $E_{ph} > 8$ МэВ. $N(\gamma)$ — количество фотонов, попавших на детектор; $N(e)$ — количество электронов, попавших на мишень; l — толщина мишени

поглощением гамма-излучения и рассеянием электронов и фотонов. Оптимальная толщина мишени для максимального выхода фотонов с энергией больше 8 МэВ составляет 3.5 мм. Для этой толщины мишени было рассчитано угловое распределение тормозных фотонов. На рис. 3 показаны спектры тормозных фотонов от пучка электронов с энергией 50 МэВ. Спектры тормозного излучения получены на расстоянии 5 см от тормозной мишени. Детектор разбит на девять колец в зависимости от полярного угла вылета фотонов θ из мишени (от 2 до 41°). Регистрировались фотоны, попавшие в каждое кольцо детектора.

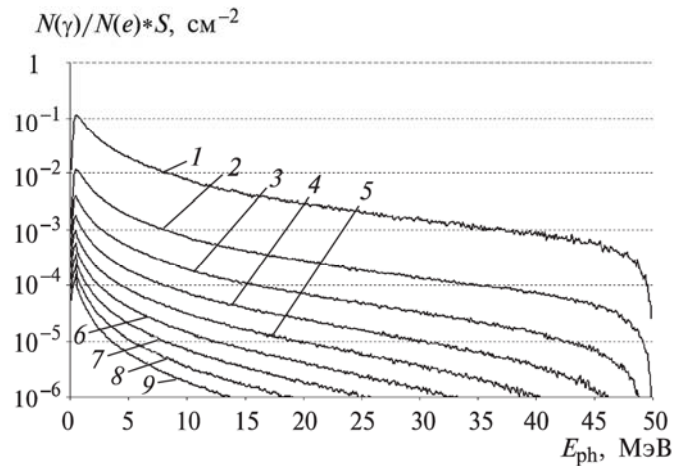


Рис. 3. Спектры тормозных фотонов для разных углов наблюдения θ : 2° (1), 4–6° (2), 9–11° (3), 14–16° (4), 19–21° (5), 24–26° (6), 29–31° (7), 34–36° (8), 39–41° (9). $N(\gamma)$ — количество фотонов, попавших на детектор; $N(e)$ — количество электронов, попавших на тормозную мишень; S — площадь кольца детектора; E_{ph} — энергия фотонов

Из графика видно сильное изменение спектра фотонов при различных углах их вылета. Например, относительный выход фотонов с энергией 10 МэВ в случае вылета фотонов в конус с угловым расстройом $2\theta = 4^\circ$ на три порядка больше, чем когда фотоны летят в угол от 39 до 41°. Поэтому при проведении экспериментов, в которых исследуемый образец облучается тормозным излучением, необходимо подбирать размеры этого образца в соответствии с угловыми распределениями фотонов. Также для наиболее эффективного облучения нужно очень точно выставлять образец на оси пучка.

Импульсный источник нейтронов

Используя ускоритель РТМ-70, можно создать высокоэффективный импульсный нейтронный источник с изотропным распределением нейтронов. В этом случае также целесообразно использовать

Таблица 3
Характеристики моделируемой установки

Энергия электронов	50 МэВ
Радиус пучка электронов	4 мм
Число запущенных электронов	10^5
Материал мишени	природная смесь изотопов урана ^{238}U (99.2745%), ^{235}U (0.7200%)
Радиус мишени	4–20 мм
Толщина мишени	0.5–60 мм
Расстояние от выходного окна ускорителя до тормозной мишени	20 мм

тормозную мишень из урана. В мишени генерируется тормозное излучение. Нейтроны образуются в результате фотоядерных реакций (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ и реакции фотоделения урана. В расчете принималось, что при реакции фотоделения в среднем вылетает 2.4 нейтрона на один акт деления. Для исследования влияния параметров мишени на интенсивность нейтронного пучка была написана программа с использованием библиотек GEANT4. Входными данными для программы являются сечения фотоядерных реакций (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ [3], ре-

акции фотоделения (γ, F) урана [4] и параметры экспериментальной установки:

- энергия, интенсивность, пространственное распределение и форма электронного пучка;
- форма, размеры и материал мишени;
- расстояния между мишенью и выходным окном ускорителя.

Сечения реакций, используемые при расчете, показаны на рис. 4. Параметры экспериментальной установки показаны в табл. 3.

Для получения оптимальной толщины и радиуса

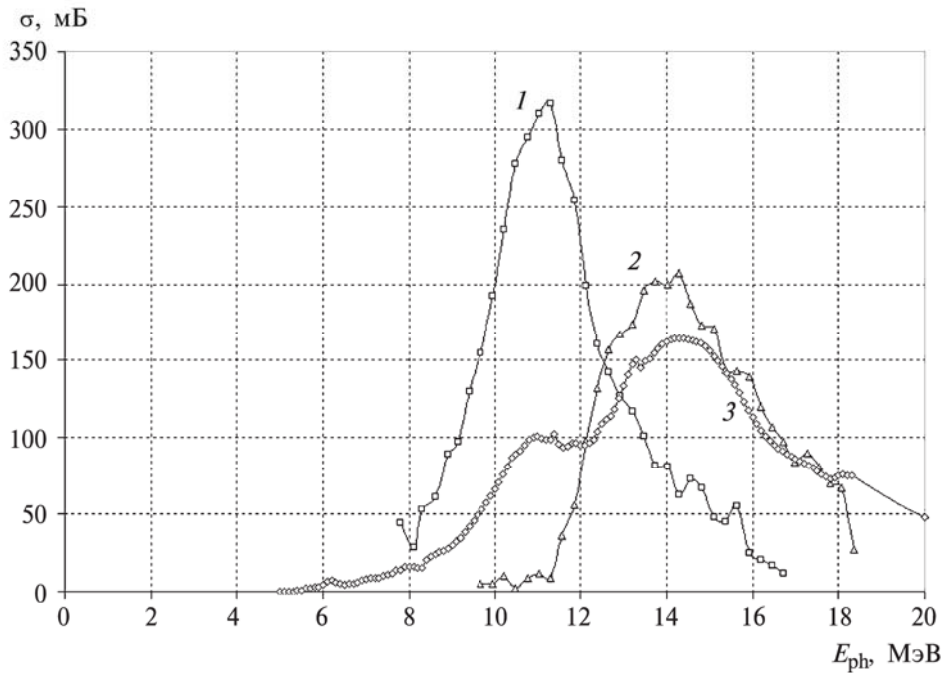


Рис. 4. Сечения σ фотоядерных реакций (γ, n) (1), $(\gamma, 2n)$ (2) и реакции фотоделения (γ, F) (3) для урана (^{238}U). E_{ph} — энергия фотонов

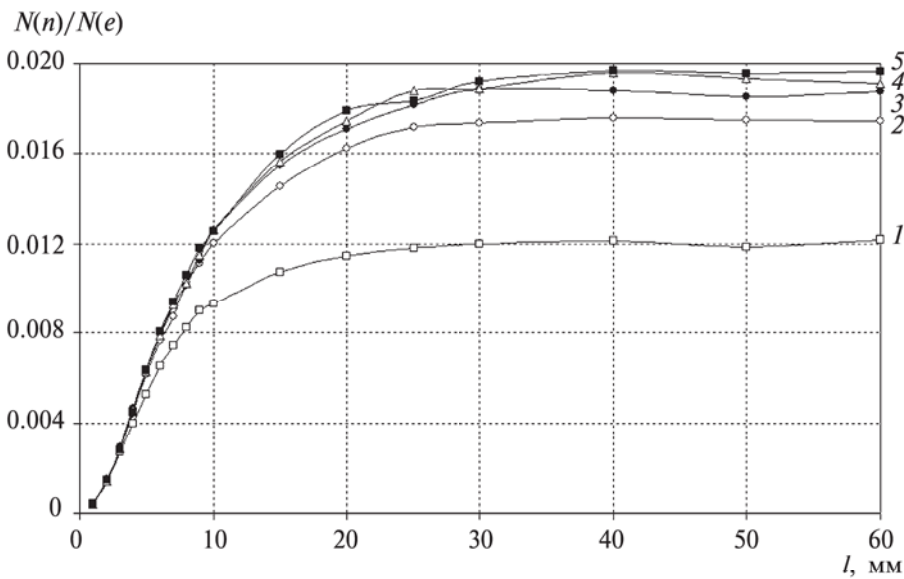


Рис. 5. Зависимость количества нейтронов $N(n)$, полученных в мишени, отнесенных к количеству электронов $N(e)$, упавших на мишень, для различной толщины l и радиуса мишени $r = 4$ мм (1), 8 мм (2), 12 мм (3), 16 мм (4), 20 мм (5)

мишени, при которых выход нейтронов максимален, проводилась серия компьютерных экспериментов, в которых варьировались радиус и толщина урановой мишени. Результаты моделирования приведены на рис. 5.

Из рисунка видно, что для эффективной генерации нейтронов достаточно использовать мишень с радиусом 12 мм и толщиной 30 мм. При этом коэффициент конверсии электронов в нейтроны составляет порядка 0.02. При существующих параметрах ускорителя (табл. 1) это может дать изотропный поток порядка 10^{10} нейтронов в каждом нейтронном сгустке.

Вывод

Показана возможность использования разрезного микротрона РТМ-70 для создания импульсно-

го источника фотонов и нейтронов. С помощью разработанного программного комплекса получены оптимальные параметры предложенных источников.

Литература

1. Гришин В.К., Ермаков А.Н., Ишханов Б.С. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2002. № 5. С. 74 (Moscow University Physics Bulletin. 2002. N 5. P. 90).
2. GEANT4 User's Guide. <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>.
3. Veysiere A., Beil H., Bergere R. et al. // Nucl. Phys. 1973. **A199**. P. 45.
4. Varlamov V.V., Ejimkin N.G., Surgutanov V.V. et al. // Fotojadernye Dannye (Photonuclear Data), Photofission of Uranium-235, 238. Moscow State Univ., 1987.

Поступила в редакцию
13.09.06