

раздел ФИЗИКА

УДК 621.384.633:539.125.52

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2023.4.9

СОСТАВНОЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТОЛКНОВИТЕЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ НА БАЗЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ P-7M

© М. В. Гладких, Н. В. Смольников, А. Е. Овсенов*,
М. Н. Аникин, А. Г. Наймушин, И. И. Лебедев,
И. В. Ломов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, Томская область, 634050 г. Томск, пр. Ленина, 30.

*Email: aeo3@tpu.ru

Ускорители частиц играют важную роль в современной физике, медицине и промышленности, обеспечивая доступ к высокоэнергетическим пучкам различных заряженных частиц. Одним из ключевых аспектов использования ускорителей является их потенциал в качестве источников нейтронов. Нейтроны имеют особую значимость в различных областях исследований, таких как ядерная физика, медицинская диагностика и терапия, промышленные приложения и безопасность ядерной энергетики. В данной работе произведено моделирование источника нейтронов и экспериментального канала циклического ускорителя P-7M, определены энергетические и угловые характеристики пучка нейтронов.

Ключевые слова: циклический ускоритель, экспериментальный канал, мишень, нейтронный пучок, энергетическое распределение, угловое распределение, аппроксимация.

Введение

На сегодняшний момент в ТПУ работает и активно используется циклический ускоритель P-7M [1]. Однако проблема отсутствия как универсальной модели источника нейтронов, так и полноценной модели экспериментальных каналов стоит особенно остро в следствие того, что ускоритель используется в целях нейтронной терапии [2]. Выявление закономерностей формирования пучка нейтронного излучения и дальнейшая постройка модели источника на основе данных закономерностей позволили бы существенно упростить и ускорить работы, связанные с оценкой дозовых нагрузок на пациента.

Поэтому целью данной работы является разработка модели нейтрон-генерирующей мишени и экспериментального канала циклического ускорителя P-7M.

Теоретические основы

На циклотронах нейтроны обычно получают при облучении бериллиевой или литиевой мишени пучком дейтронов или протонов с энергиями в интервале от 8 до 50 МэВ. При этом энергетический спектр нейтронов простирается практически от нуля до энергии, близкой к энергии падающих на мишень дейтронов.

Определение спектра нейтронного излучения являлось и является актуальной задачей для ядерной физики. Еще в 1952 г. Б. Е. Уаттом были получены спектры деления ядер U^{235} , которые были аппроксимированы по формуле (1).

$$x_W(E, a, b) = \frac{2}{\sqrt{\pi T E_v}} \cdot \sinh \sqrt{\frac{4EE_v}{T^2}} \cdot \exp \left[-\frac{E_v + E}{T} \right]. \quad (1)$$

Данная формула хорошо описывала спектр деления в диапазоне от 0.075 МэВ до 17 МэВ [3].

Средняя энергия испускаемых нейтронов E для спектра Уатта равна сумме средней энергии по Максвеллу E плюс кинетическая энергия полностью ускоренного осколка деления E_v . В пределе E_v , стремящейся к 0, формула Уатта сводится к формуле Максвелла.

Описание спектра нейтронов с помощью формулы Уатта на основе не реакции деления, а (d,n) или (p,n)-реакций представляется возможным, однако следует заменить кинетическую энергию осколков деления на нуклон на среднюю кинетическую энергию продуктов реакции. Данная замена возможна, поскольку при нахождении и аппроксимации спектра деления и спектра реакции (d,n) или (p,n) используется кинематическая модель реакции.

Помимо энергетических характеристик, изучение угловых распределений нейтронов, получаемых на ускорителях, является важной задачей в области исследований ядерной физики. Это связано с тем, что угловое распределение нейтронов определяет характер распространения излучения и его взаимодействия с окружающей средой, что является ключевым фактором для эффективной работы во многих сферах.

К. А. Вивер в своей работе экспериментально получил и описал угловые распределения для различных типов мишени в широком диапазоне энергий дейтронов (рис. 1) [4].

Из рис. 1 видно, что имеет место анизотропия рассеяния нейтронов при любой энергии пучка дейтронов, однако выход нейтронов увеличивается с увеличением энергии налетающих частиц.

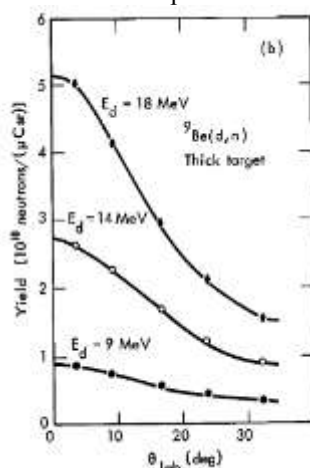
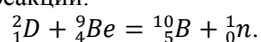


Рис. 1. Угловое распределение образования нейтронов, для дейтронов с энергией 9, 14 и 18 МэВ на толстой бериллиевой мишени.

В Томском политехническом университете с 1959 г. работает и активно используется циклический ускоритель Р-7М. Циклотрон Р-7М с диаметром полюсов магнита 1.2 м является прототипом серии циклотронов У-120 и предназначен для ускорения ионов. Главными преимуществами циклотрона Р-7М является возможность ускорения ионов в широком диапазоне масс и энергий. Для дейтронов на данном ускорителе максимальный ток пучка достигает 50 мкА, а диапазон энергий пучка — от 9 до 14 МэВ. Циклотрон служит источником ускоренных дейтронов для инициирования реакции:



При бомбардировке бериллиевой мишени дейтронами с энергией 13.6 МэВ образуется поток быстрых нейтронов со средней энергией ~ 6.3 МэВ. Для медицинского применения используется сложный коллиматор. Апертура поля облучения регулируется съёмным полиэтиленовым коллиматором, как показано на рис. 2, и может варьироваться от $6 \times 6 \text{ см}^2$ до $15 \times 15 \text{ см}^2$ [1].

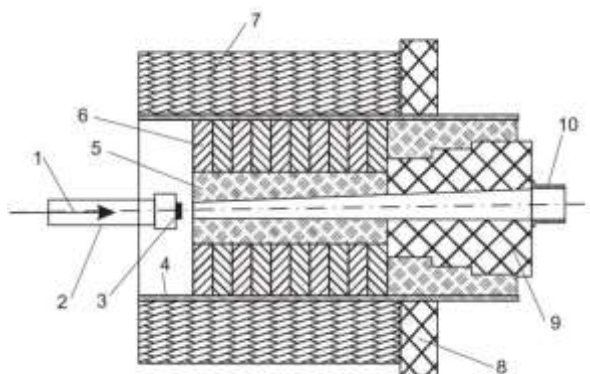


Рис. 2. Коллиматор нейтронного пучка:
1 — пучок дейтронов; 2 — канал ионного пучка; 3 — Be-мишень; 4 — железная труба;
5 — полиэтиленовый коллиматор; 6 — железные диски; 7 — бетонная стена;
8 — радиационная защита из полиэтилена; 9 — съёмный полиэтиленовый коллиматор;
10 — конус.

Расчетная модель

Формирование модели было решено проводить в программе PHITS, которая осуществляет нейтронно-физические расчеты методом Моне-Карло [5].

Модель мишени представляет собой диск диаметром 5 см и толщиной 5 мм, расположенный в точке $z = 4 \text{ см}$ и перпендикулярный оси Z . Пучок ионов, диаметром 2 см, летит с отметки $z = -5 \text{ см}$, а направление ионного пучка — направление вдоль оси Z , перпендикулярно мишени (рис. 3). Регистрационная область находится на расстоянии 0.1 см от мишени.

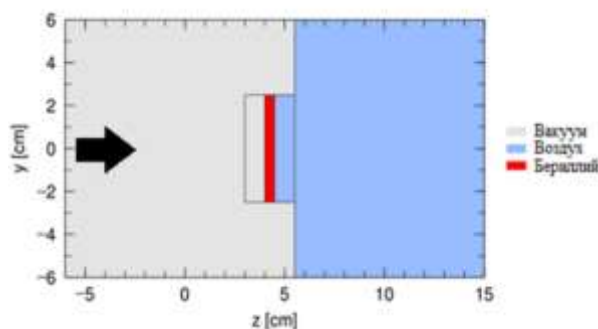


Рис. 3. Расчетная модель в PHITS.

С помощью сформированной модели произведен расчет пространственного, энергетического и углового распределения нейтронов в 300 групповом приближении для энергии дейтронов 13.6 МэВ. Для данного спектра произведена аппроксимация с помощью функций распределения Максвелла и Уатта. Угловые распределения аппроксимировались с помощью распределения Лапласа.

На основе полученных угловых и энергетических распределений создана упрощенная модель источника нейтронов на расстоянии 0.1 см от мишени. Данная модель добавлена в модель экспериментального канала (рис. 4).

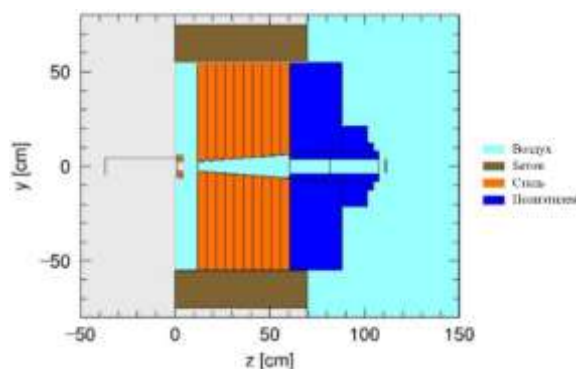


Рис. 4. Сечение расчетной модели экспериментального канала.

Модель представляет из себя бетонное кольцо с вставками из стальных дисков и полиэтилена. Так же в модели присутствует коллимирующее устройство из полиэтилена с квадратным отверстием со стороной 7.5 см. Источник нейтронов расположен вместе с координатой по оси Z = 4.5 см. Расчетная область расположена вместе с координатой по оси Z = 110.7 см.

Результаты расчетов

В результате расчетов получены энергетические распределения потока нейтронов, полученных при различных энергиях пучка дейтронов (11, 13.6, 15 МэВ). Произведен расчет углового распределения плотности потока нейтронов на расстоянии 0.1 см от мишени в 50 групповом приближении.

Для спектра нейтронов, полученного при использовании дейтронов с энергией 13.6 МэВ, произведена аппроксимация с помощью функций распределения Максвелла и Уатта (рис. 5).

Средняя энергия нейтронов при бомбардировке Ве-мишени дейтронами с энергией 13.6 МэВ составила 4.96 МэВ, при аппроксимации по Максвеллу 4.86 МэВ, при аппроксимации по Уатту 4.88 МэВ. Наиболее вероятная энергия составила 3.3 МэВ, при аппроксимации по Максвеллу 3.17 МэВ, при аппроксимации по Уатту 3.41 МэВ. Коэффициент множественной детерминации для распределения Максвелла составил $R^2 = 0.977$, а для распределения Уатта – $R^2 = 0.986$, что говорит о сходимости модели.

Также проведена аппроксимация полученных угловых распределений с помощью распределения Лапласа (рис. 6).

Коэффициент множественной детерминации для распределения Лапласа составил $R^2 = 0.975$, что также говорит о сходимости модели.

Полученные данные позволяют сформировать упрощенную модель источника нейтронов.

На рис. 7 представлено пространственное распределения нейтронов при расчете на основе упрощенной модели.

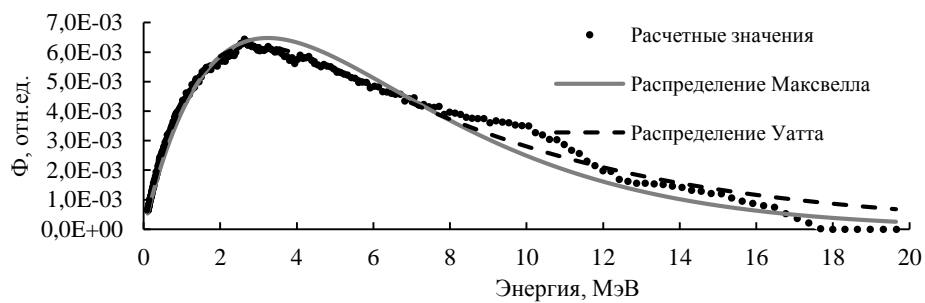


Рис. 5. Энергетическое распределение потока нейтронов, при бомбардировке Ве-мишени дейтронами с энергией 13.6 МэВ.

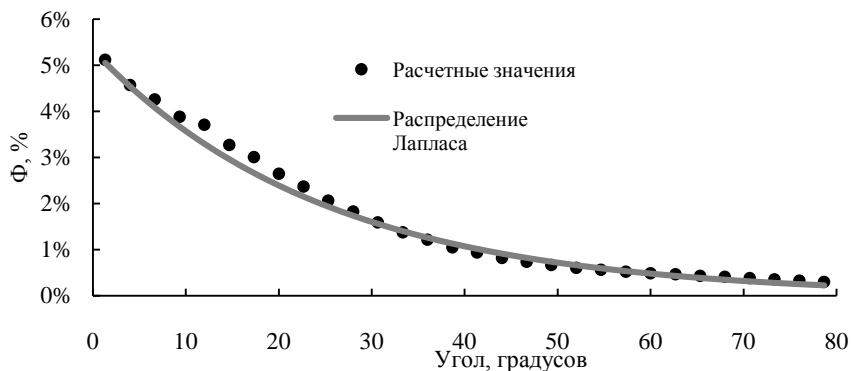


Рис. 6. Угловые распределения потока нейтронов.

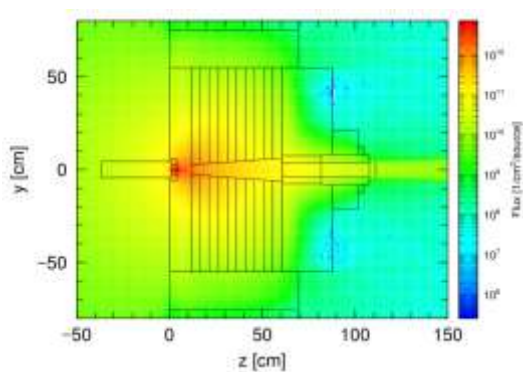


Рис. 7. Пространственное распределение нейтронов.

Кроме пространственных распределений получены энергетические распределения на расстоянии 100 см от источника нейтронов, представленные на *рис. 8*.

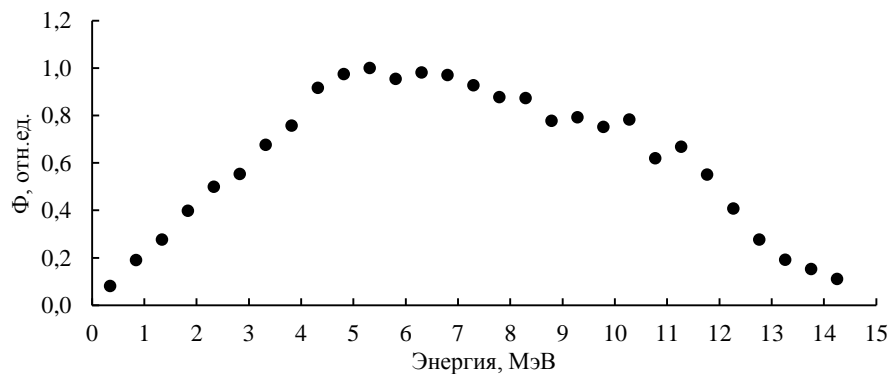


Рис. 8. Энергетическое распределение потока нейтронов на срезе экспериментального канала.

Средняя энергия нейтронов при на расстоянии 100 см от источника составила 7.1 МэВ, а наиболее вероятная энергия – 5.4 МэВ. Суммарная плотность потока нейтронов всех энергий составила $1.21 \cdot 10^8$ нейтрон \cdot см⁻²с⁻¹.

На рис. 9 представлены угловые распределения потока нейтронов для моделей на основе упрощенного источника.

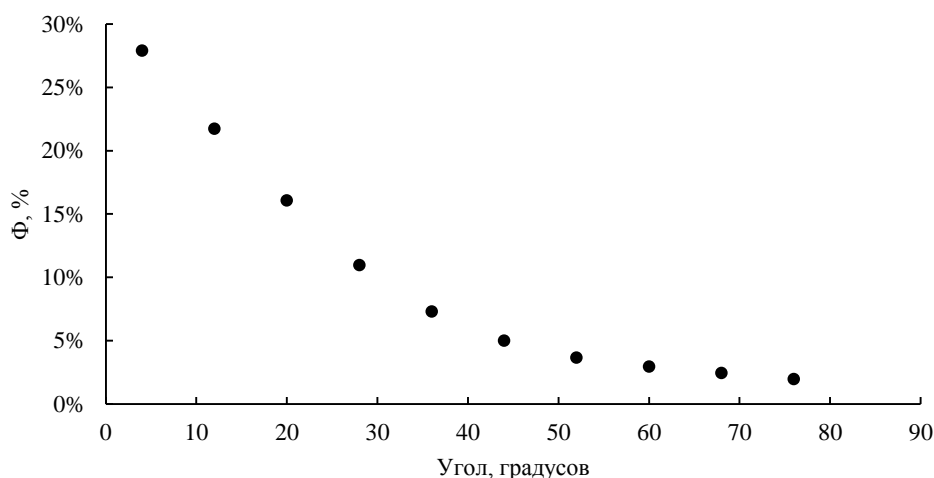


Рис. 9. Угловое распределение потока нейтронов на срезе экспериментального канала.

Из рис. 9 видно, что 66% всех нейтронов на срезе экспериментального канала после коллиматора распространяются в секторе ± 20 градусов.

Заключение

В ходе выполнения работы была создана модель Ве-мишени и экспериментального канала ускорителя Р-7М, рассчитаны энергетические распределения потока нейтронов для дейтронов различной энергии. С увеличением энергии дейтронов наиболее вероятная энергия нейтронов увеличивается с 4.98 МэВ до 6.06 МэВ.

Установлено, что имеет место анизотропия рассеяния плотности потока нейтронного излучения, т.к. 66% нейтронов излучается в секторе ± 20 градусов.

Проведена аппроксимация полученных энергетических и угловых характеристик методом наименьших квадратов по формулам Уатта и Лапласа. Коэффициент множественной детерминации составил $R_E^2 = 0.98$ и $R_\theta^2 = 0.99$.

Произведен расчет пространственного, энергетического и углового распределения потока нейтронов в экспериментальном канале циклического ускорителя Р-7М.

Расчетная в программном комплексе PHITS плотность потока нейтронов всех энергий составила $1.21 \cdot 10^8$ нейт. \cdot см⁻²с⁻¹.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корпоративный портал ТПУ – История лаборатории. URL: <https://portal.tpu.ru/departments/laboratory/lprv/history>
2. Зырянов Б. Н., Мусабаява Л. И., Летов В. Н., Лисин В. А. Дистанционная нейтронная терапия. М.: ТГУ, 1990. 300 с.
3. Watt В. E. Energy Spectrum of Neutrons from Thermal Fission of U 235 // Physical Review. 1952. Vol. 6 (87). P. 1037–1041.
4. Weaver K. A. et al. Neutron Spectra from Deuteron Bombardment of D, Li, Be, and C // Nuclear Science and Engineering. 1973. Vol. 1(52). P. 35–45.
5. Sato T. et al. Recent Improvements of Particle and Heavy Ion Transport code System: PHITS // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 153. Art. 06008.

Поступила в редакцию 15.12.2023 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2023.4.9

**COMPOSITE SOURCE FOR SIMULATION OF COLLISION REACTIONS
BASED ON THE R-7M CYCLIC ACCELERATOR**

© **M. V. Gladkikh, N. V. Smolnikov, A. E. Ovsenev*, M. N. Anikin,
A. G. Naimushin, I. I. Lebedev, I. V. Lomov**

*National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin Pr., 634050 Tomsk, Tomsk Oblast, Russia.*

**Email: aeo3@tpu.ru*

Particle accelerators play an important role in modern physics, medicine and industry, providing access to high-energy beams of various charged particles. One of the key aspects of using accelerators is their potential as neutron sources. Neutrons are of particular importance in various fields of research such as nuclear physics, medical diagnostics and therapy, industrial applications, and nuclear power safety.

On cyclotrons, neutrons are usually obtained by irradiating a beryllium or lithium target with a beam of deuterons or protons with energies in the range from 8 to 50 MeV. In this case, the energy spectrum of neutrons extends practically from zero to an energy close to the energy of deuterons incident on the target.

At the moment, the R-7M cyclotron is operating and actively used at TPU. However, the problem of the absence of both a universal neutron source model and a full-fledged model of experimental channels is especially acute, due to the fact that the accelerator is used for neutron therapy. Revealing the regularities in the formation of a neutron radiation beam and further building a source model based on these regularities would significantly simplify and speed up the work related to the assessment of dose loads on the patient.

Therefore, the purpose of this work was to develop a model of the neutron source and experimental channel of the R-7M cyclotron.

Keywords: cyclotron, experimental channel, target, neutron beam, energy development, angular development, approximation.

Received 15.12.2023 г.