УДК 621.039

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО МИШЕНИ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ ПРОЕКТА DARIA

© 2022 г. Л. Н. Латышева^{*a*}, Н. М. Соболевский^{*a*, *}, Э. А. Коптелов^{*a*}

^аИнститут ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия *e-mail: sobolevs@inr.ru Поступила в редакцию 17.02.2022 г. После доработки 08.03.2022 г.

Принята к публикации 10.03.2022 г.

Методом Монте-Карло рассчитаны потоки нейтронов, испускаемых из мишеней различной геометрии и состава под действием пучка протонов низкой энергии (13 МэВ). Мишенью служит тонкий слой бериллия толщиной 1–2 мм либо трехмерная конструкция, включающая бериллий, медь и полиэтилен. Приводятся энергетические спектры нейтронов. Проведено сравнение с расчетами других авторов.

Ключевые слова: проект DARIA, пучок протонов, компактная мишень, выход нейтронов, энерговыделение, бериллий, медь, полиэтилен, метод Монте-Карло, транспортный код, МАГАТЭ. **DOI:** 10.31857/S1028096022110127

введение

Разработка компактных источников нейтронов на базе новых технологий линейных ускорителей (проект DARIA) в настоящее время широко обсуждается и рассматривается как актуальное направление нейтронной физики (например, https://www.atomic-energy.ru/news/2019/10/08/ 98067). Преимуществом этого проекта является отсутствие делящихся элементов, что обеспечивает экологическую чистоту и снимает необходимость серьезной охраны.

В настоящей работе при моделировании нейтронобразующей мишени учтены следующие соображения. Исходя из требования компактности габариты мишени не должны заметно превышать ~10 см по всем координатным осям. Мишенное устройство должно включать несущий элемент в виде достаточно толстого слоя металла, например, меди, который может также служить поглотителем протонов пучка. В целях замедления образующихся нейтронов, если это требуется, мишенное устройство может включать замедлитель, например, полиэтилен, как внешнюю оболочку сборки мишени.

Моделирование методом Монте-Карло выхода нейтронов из мишенных устройств под действием пучка протонов проводили с использованием разработанного в ИЯИ РАН транспортного кода SHIELD [1]. Информацию о коде SHIELD можно найти на сайте http://www.inr.ru/shield/, где описаны история его развития, физические модели и архитектура, а также области применения кода с подробным списком публикаций. Транспортный код SHIELD успешно применяется при моделировании процесса взаимодействия адронов и ядер со сложными макроскопическими мишенями [4–12], что является необходимым этапом широкого круга исследований в фундаментальной и прикладной ядерной физике.

Энергию протонов E_p в расчетах предполагали не выше 20–30 МэВ, фактически $E_p = 13$ МэВ. В качестве мишени рассматривали разные геометрические конфигурации, в частности тонкий слой бериллия толщиной 1–2 мм.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ КОНФИГУРАЦИЯ МИШЕНИ В ВИДЕ СЛОЯ БЕРИЛЛИЯ

Тонкий слой бериллия является адекватным источником нейтронов для компактных мишенных устройств, так как при взаимодействии протонов, а также других заряженных частиц с ядром Be-9 образуются один—два нейтрона. Информацию о конкретных ядерных реакциях с образованием нейтронов можно найти в базе данных EXFOR на сайте МАГАТЭ (https://www-nds. iaea.org/exfor/).

В случае мишени в виде слоя бериллия вычисляли отдельно полный выход нейтронов из слоя, а также выход "вперед", через переднюю поверх-



Рис. 1. Полный выход нейтронов (кружки) и выход вперед (точки) из слоя бериллия толщиной 0.126 см при энергии протонов 13 МэВ.

ность по направлению пучка протонов. Для слоя бериллия толщиной 0.126 см полный выход нейтронов при энергии протонов $E_p = 13$ МэВ и выход вперед равны, соответственно, 25 и 19 нейтронов на 10^4 первичных протонов, или 0.0025n/p и 0.0019n/p.

Энергетические спектры полного выхода нейтронов и выхода вперед для слоя бериллия толщиной 0.126 см согласно коду SHIELD представлены на рис. 1. Данные для мишени в виде слоя бериллия представляют интерес для сравнения с результатами работы [2]. Приведем оценку выхода нейтронов на основе рис. 4 в [2] и сравним с полученными результатами. Исходные данные для сравнения: 1 Кл = 6.24×10^{18} элементарного электрического заряда (каждый протон в пучке несет один элементарный заряд). Размерность оси ординат на рис. 4 в [2] представлена как "Neutron Yield, $n/(mC \times 10^{-12})$ ". При энергии протона 13 МэВ и толшине слоя бериллия в пределах 1-2 мм ордината на рис. 4 [2] составляет 25. Отсюда можно вычислить выход нейтронов NY из слоя бериллия на один протон:

$$NY = 25[n/(6.24 \times 10^{18} \times 10^{-3} \times 10^{-12})] =$$

= (25/6.24)×10⁻³n = 0.004n.

Таким образом, выход нейтронов согласно рис. 4 [2] равен 0.004 нейтрона на протон. То есть выход нейтронов согласно [2] равен 0.004n/p и, следовательно, имеет тот же порядок величины, что и в расчетах по коду SHIELD: 0.0025n/p и 0.0019n/p. Различие в величине выхода нейтронов не превышает полутора—двух раз и можно объяснить использованием для расчетов разных транспортных кодов (SHIELD и PHITS), а также деталями задания входных данных для расчета.



Рис. 2. Конфигурация мишени при толщине слоя Ве 1 (а) и 2 мм (б).

ДРУГИЕ БОЛЕЕ СЛОЖНЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ КОНФИГУРАЦИИ МИШЕНИ

Геометрия и химический состав компактной мишени был выбран исходя из понимания задач и





Рис. 3. Спектры выхода нейтронов, соответствующие толщине слоя Ве 1 (а) и 2 мм (б), при энергии протонов 13 МэВ. Выходы равны, соответственно, 0.0023 и 0.0026 нейтронов на протон.

целей Проекта DARIA, а также в результате обсуждения с сотрудниками ИЯИ РАН, участвующими в Проекте. Было принято, что габариты компактной мишени не должны превышать 10 см. Была предусмотрена полиэтиленовая оболочка для замедления нейтронов, если требуется, а также толстый слой меди в качестве несущего элемента мишенного устройства и, при необходимости, поглотителя протонов пучка.

Была принята геометрия мишени в виде цилиндра. Диаметр цилиндра 10 см, его высота вдоль оси Z 6 см. Ось Z совпадает с осью точечного пучка протонов с энергией 13 МэВ, который входит непосредственно в слой бериллия (минуя полиэтилен) (рис. 2). Внутри цилиндрической мишени находятся: слой полиэтилена толщиной 1.5 см (плотность 0.78 г/см³), цилиндрический слой бериллия толщиной 0.1 или 0.2 см и радиусом 3.5 см, цилиндрический объем меди толщиной 2.9 или 2.8 см и радиусом 3.5 см. Энергетические спектры выхода нейтронов из мишеней представлены на рис. 3.

Было также вычислено энерговыделение в каждом материале мишени для обоих вариантов конфигурации мишени, показанных на рис. 2. Результаты представлены в табл. 1 и 2. Длина пробега протона $E_p = 13$ МэВ до остановки в бериллии равна 0.2321 г/см², или 0.1256 см ([3], стр. 95). Поэтому при толщине слоя бериллия 1 мм часть протонов проходит сквозь бериллий в медь.

Таблица 1. Энерговыделение в каждом материале мишени на 10⁴ первичных протонов с энергией 13 МэВ при толщине слоя Ве 1 мм

Материал	Ионизационные потери, МэВ	Ядра отдачи, МэВ	Энергия возбуждения, МэВ
CH ₂ N	0.168750×10^2	0	0
Be	0.754683×10^5	0.229731×10^3	0
Cu	0.543181×10^5	0.423659×10^{1}	0.6632×10^2
Сумма	0.129803×10^{6}	0.233967×10^3	0.6632×10^2

Таблица 2. Энерговыделение в каждом материале мишени на 10⁴ первичных протонов с энергией 13 МэВ при толщине слоя Ве 2 мм

Материал	Ионизационные потери, МэВ	Ядра отдачи, МэВ	Энергия возбуждения, МэВ
CH ₂ N	0.225372×10^2	0	0
Be	0.129782×10^{6}	0.280651×10^3	0
Cu	0	0	0
Сумма	0.129804×10^{6}	0.280651×10^{3}	0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено моделирование методом Монте-Карло мишенных устройств Проекта DARIA. Представлены числовые данные о выходе нейтронов для разных конфигураций мишени при энергии протонов $E_p = 13$ МэВ, а также энергетические спектры нейтронов. Сравнение с данными [2] о выходе нейтронов из тонкого слоя бериллия показывает согласие по порядку величины. Различие в величине выхода не превышает полутора—двух раз и может объясняться использованием для расчетов разных транспортных кодов (SHIELD и PHITS), а также деталями задания входных данных для расчета.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 г.)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Dementyev A.V., Sobolevsky N.M. // Rad. Measur. 1999.
 V. 30. Iss. 5. P. 553. https://doi.org/10.1016/S1350-4487(99)00231-0
- Subbotina V.V., Pavlov K.A., Kovalenko N.A., Konik P.I., Voronin V.V., Grigoriev S.V. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2021. V. 1008. P. 165462. https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165462
- 3. *Немец О.Ф., Гофман Ю.В.* Справочник по ядерной физике. Киев: Наук. думка, 1975. 416 с.

- Соболевский Н.М., Латышева Л.Н., Кузнецов Н.В., Панасюк М.И., Подзолко М.В. // Космические исследования. 2021. Т. 59. С. 306. https://doi.org/10.31857/S0023420621030109
- Norbury J.W., Latysheva L., Sobolevsky N. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2019. V. 947. P. 162576. https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162576
- Gavrilov S.A., Latysheva L.N., Lebedev S.G., Sobolevsky N.M., Feschenko A.V. // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2018. V. 12. Iss. 5. P. 1041. https://doi.org/10.1134/S1027451018050257
- Rybakov A.S., Demikhov E.I., Kostrov E.A., Litvin V.S., Sobolevsky N.M., Latysheva L.N., Borisenko N.G. // Laser Particle Beams. 2019. V. 37. P. 25. https://doi.org/10.1017/S0263034619000077
- Latysheva L.N., Sobolevsky N.M., Koptelov E.A., Ilić R.D. // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2019. V. 9. P. 1126. https://doi.org/10.1134/S1027451015060142
- Titarenko Yu.E., Batyaev V.F., Pavlov K.V. et al. // Atomic En. 2014. V. 117. P. 19. https://doi.org/10.1007/s10512-014-9882-4
- Gudowska I., Kempe J., Sobolevsky N. // Rad. Protect. Dosimetry. 2006. V. 122. P. 483. https://doi.org/10.1093/rpd/ncl472
- Gudowska I., Kopec M., Sobolevsky N. // Rad. Protect. Dosimetry. 2007. V. 126. P. 652. https://doi.org/10.1093/rpd/ncm132
- Norbury J.W., Slaba T.C., Aghara S. et al. // Life Sci. Space Res. 2019. V. 22. P. 98. https://doi.org/10.1016/j.lssr.2019.07.003

Monte Carlo Simulation of the DARIA Project Compact Neutron Source Target

L. N. Latysheva¹, N. M. Sobolevsky^{1, *}, E. A. Koptelov¹

¹Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, 117312 Russia *e-mail: sobolevs@inr.ru

The Monte Carlo method is used to calculate the fluxes of neutrons emitted from targets of various geometry and composition under the action of a low-energy (13 MeV) proton beam. The target is a thin beryllium layer 1-2 mm thick or a three-dimensional structure including beryllium, copper, and polyethylene. The energy spectra of neutrons are given. A comparison with the calculations of other authors is presented.

Keywords: DARIA project, proton beam, compact target, neutron yield, energy release, beryllium, copper, polyethylene, Monte Carlo method, transport code, IAEA.