

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ ПУЧКА ДЕЙТРОНОВ

*С.И. Прохорец, Е.В. Рудычев, Д.В. Федорченко, М.А. Хажмурадов*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,*  
*Харьков, Украина*  
*E-mail: khazhm@kipt.kharkov.ua*

Методом Монте-Карло проведено математическое моделирование нейтронного источника на основе реакции  ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$  для энергии 2,6 МэВ. Для расчетов были использованы модельные сечения, полученные при помощи программы TALYS. Получены спектральные и угловые характеристики нейтронного потока, которые могут быть использованы для оптимизации параметров нейтронного источника.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно разрабатываются источники нейтронов для различных фундаментальных и прикладных исследований. При этом для достаточно широкого круга задач применяются генераторы нейтронов с энергиями до 10 МэВ. Такие источники могут использоваться для производства медицинских радиоизотопов, нейтронной радиологии, активационного анализа, обнаружения взрывчатых веществ, а также в медицинских целях.

Их основой являются ускорители протонов и дейтронов [1, 2]. В частности, в ННЦ ХФТИ ведутся работы по созданию ускорителя дейтронов с энергией 3 МэВ [3]. Для генерации нейтронов в этом случае предполагается использование реакции  ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ .

Характеристики источника нейтронов существенным образом определяются параметрами мишени. Для анализа и оптимизации ее параметров на этапе проектирования наиболее эффективным является метод моделирования Монте-Карло. В настоящее время этот метод реализован во многих программных комплексах, однако далеко не все существующие пакеты позволяют моделировать процесс транспорта дейтронов. Прежде всего, это обусловлено отсутствием данных по сечениям реакций с участием дейтронов для энергий менее 6 МэВ в библиотеках сечений. Реализованные же в ряде программ аналитические методики расчета сечений зачастую дают неверные результаты в этом диапазоне энергий.

Одним из наиболее известных пакетов, в котором возможно моделировать процессы, связанные с взаимодействием дейтронов, является MCNPX [4]. Однако ряд исследователей (см. [5] и ссылки там же) отмечают, что используемая MCNPX полуэмпирическая модель неприменима для рассматриваемого диапазона энергий (меньше 10 МэВ). Для решения проблемы авторам пришлось модифицировать исходный код пакета, добавив возможность использования внешних библиотек сечений для дейтронов и корректный учет процессов транспорта дейтронов.

Другим известным и широко применяемым пакетом, позволяющим моделировать процессы с участием дейтронов, является GEANT4 [6]. Используемые в нем модели достаточно хорошо описывают адронные процессы при энергиях в несколько де-

сятков мегаэлектронвольт и выше [7]. Для расчета сечения рассеяния дейтронов в GEANT4 используется параметризация Трипази [8], которая является некорректной при низких энергиях. Анализ исходных кодов показал, что в GEANT4 процессы рассеяния дейтронов при энергиях менее 6 МэВ просто исключены из моделирования, так как для них программой генерируются нулевые сечения. Вместе с тем, GEANT4 допускает расширение путем создания соответствующих классов, описывающих процессы рассеяния. В частности, можно дополнить имеющуюся модель рассеяния дейтронов сечениями для интересующего нас диапазона энергий, и система корректно учтет их при моделировании. Это определило выбор GEANT4 в качестве средства моделирования.

В настоящей работе рассмотрено моделирование источника нейтронов на основе каскадного генератора дейтронов с энергией 2,6 МэВ при системы GEANT4 и библиотеки внешних сечений. К сожалению, в доступных на сегодняшний день библиотеках сечений экспериментальные данные для реакции  ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ , в интересующем нас диапазоне энергий, отсутствуют. Поэтому для моделирования было принято решение использовать модельные сечения, полученные при помощи программного кода TALYS [9]. Данный пакет использует целый ряд ядерных моделей и достаточно хорошо верифицирован. Также, вместе с программой TALYS распространяется библиотека сечений TENDL, однако для рассматриваемой реакции с энергией менее 6 МэВ она содержит недостаточно данных.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Для проведения моделирования система GEANT4 была дополнена модулем, описывающим взаимодействие дейтронов имеющих энергиею 0,5...6 МэВ с бериллиевой мишенью с использованием внешней библиотеки сечений. Библиотека содержала 56 модельных сечений в диапазоне 0,5...6 МэВ, полученных при помощи программы TALYS. Для промежуточных значений энергии сечения получались с линейной интерполяцией.

Расчеты параметров нейтронно-производящей мишени производились на основе трехмерной модели, включающей бериллиевую мишень, коллиматор и систему охлаждения. Собственно мишень представляет собой бериллиевый цилиндр радиусом 4,9

и высотой 24,5 см. Для увеличения выхода нейтронов мишень содержит торцевое конусное отверстие радиусом 4 и глубиной 20 см. Внутри мишени находится канал системы охлаждения диаметром 2 мм, заполненный водой. Мишень окружена графитовым коллиматором радиусом 30 и высотой 30 см. Геометрия модели представлена на Рис.1.

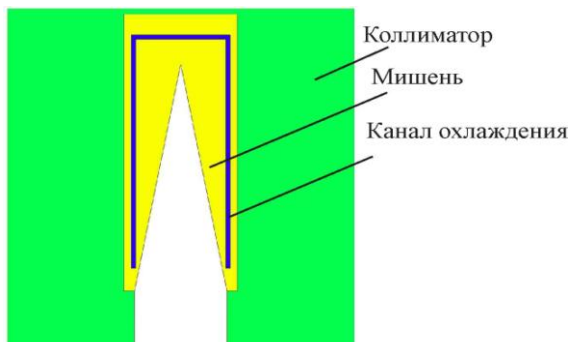


Рис.1. Геометрия нейтронно-производящей мишени

При моделировании на мишень направлялся моноэнергетический поток дейтронов с энергией 2,6 МэВ. При этом рассчитывались спектральные и угловые характеристики нейтронов, образующихся в мишени за счет реакции  ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ . Результаты расчетов представлены на Рис.2, 3.

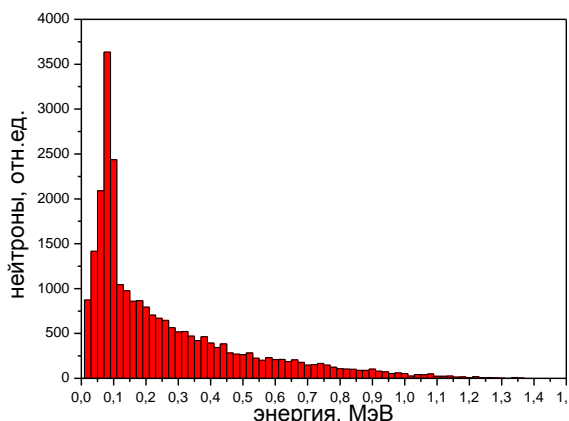


Рис.2. Спектр нейтронов в мишени

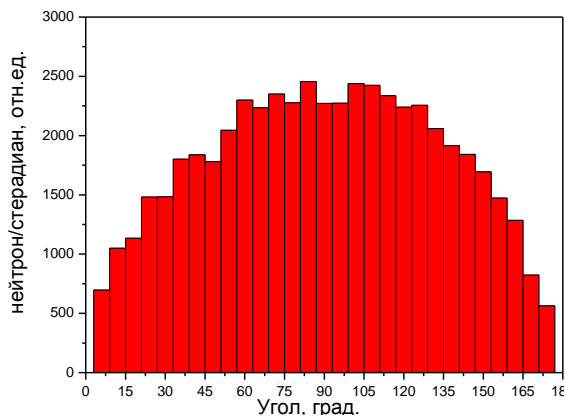


Рис.3. Плотность углового распределения бериллиевой мишени

Максимум потока нейтронов находится в интервале от 60 до 80 кэВ, а максимум углового распределения лежит вблизи угла 90° относительно пучка первичных дейтронов. Расчеты показывают, что выход нейтронов составляет 0,0258 на один дейтрон.

В результате расчетов были также получены пространственные распределения нейтронов в мишени и отражателе, представленные на Рис.4. Полученные распределения позволяют выделить зону с максимальной плотностью нейтронного потока и соответственно оптимизировать расположение каналов в коллиматоре, предназначенных для проведения активационного анализа при наработке медицинских изотопов. Зона с максимальной плотностью нейтронов формируется в бериллиевой мишени не только за счет реакций  ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ , но и за счет  ${}^9\text{Be}(n,2n){}^8\text{Be}$ , и поэтому не совпадает с областью вблизи конусной поверхности мишени.

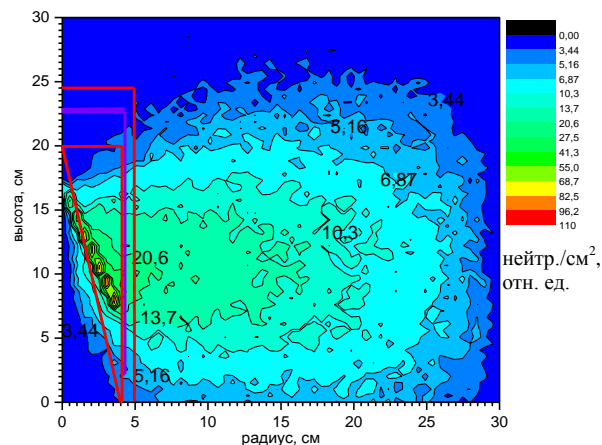


Рис.4. Пространственное распределение нейтронов для мишени и отражателя

## ВЫВОДЫ

В настоящей работе рассмотрена методика моделирования нейтронно-производящей мишени с использованием реакции  ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$  для энергии дейтронов 2,6 МэВ. При помощи прямого моделирования методом Монте-Карло получены спектры нейтронного излучения, а также его угловые характеристики. Результаты расчетов могут быть использованы для оптимизации генератора нейтронов при его применении в активационном анализе, наработке изотопов для медицинских целей и т.п.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. R.W. Hamm. Status of the LANSART<sup>TM</sup> Neutron Generators // *Reprint of the presentation given at the 5th World Conference on Neutron Radiography*. Berlin, Germany. 1996, June 17-20, p.10.
2. C. Zhang, Z.Y. Guo, A. Schempp, J.E. Chen, J.X. Fang. Design of a high current RFQ for neutron production // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A521*. 2004, p.326-331.
3. С.А. Вдовин, Е.В. Гусев, П.А. Демченко, Н.Г. Шулика. Линейный ускоритель дейтронов для элементного анализа // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2010, №2(53), с.29-33.
4. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code / J.F. Breisemeister, ed. LA-13709-M. Los Alamos National Laboratory: Los Alamos, NM, 2000.

5. P. Sauvan, J. Sanz, F. Ogando. New capabilities for Monte Carlo simulation of deuteron transport and secondary products generation // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A614*. 2010, p.323-330.
6. J. Apostolakis, M. Asai, A.G. Bogdanov, H. Burkhardt, et. al. Geometry and physics of the Geant4 toolkit for high and medium energy applications // *Radiation Physics and Chemistry*. 2009, v.78, p.859-873.
7. T. Koi, D.H. Wright, G. Folger, V. Ivantchenko, et al. Validation of Hadronic Models in Geant4 // *Hadronic Shower Simulation Workshop Aip. Conf. Proc.* March 19, 2007, v.896, p.21-30.
8. R.K. Tripathi, F.A. Cucinotta, J.W. Wilson. *Universal parameterization of absorption cross-sections - Light systems*. NASA Technical Paper TP-1999-209726, 1999.
9. A.J. Koning, S. Hilaire and M.C. Duijvestijn. TALYS-1.0 // *Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology*. April 22-27, 2007, Nice, France / editors O. Bersillon, F. Gunsing, E. Bauge, R. Jacqmin, and S. Leray. EDP Sciences, 2008, p. 211-214.

*Статья поступила в редакцию 25.09.2011 г.*

## **SIMULATION OF THE NEUTRON SOURCE BASED ON DEUTERON BEAM**

*S.I. Prokhorets, E.V. Rudychev, D.V. Fedorchenko, M.A. Khazhmuradov*

Monte Carlo mathematical simulation of the neutron source based on the reaction  ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$  for the energy 2.6 MeV is presented. For the calculations we have used the model cross sections calculated using TALYS software codes. Spectral and angular characteristics of the neutron flux were obtained, which can be used to optimize the parameters of the neutron source.

## **МОДЕЛЮВАННЯ ДЖЕРЕЛА НЕЙТРОНІВ НА ОСНОВІ ПУЧКА ДЕЙТРОНІВ**

*С.І. Прохорець, Є.В. Рудичев, Д.В. Федорченко, М.А. Хажмурадов*

Методом Монте-Карло проведено математичне моделювання нейтронного джерела на основі реакції  ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$  для енергії 2,6 МеВ. Для розрахунків були використані модельні перерізи, які було отримано за допомогою програми TALYS. Одержані спектральні й кутові характеристики нейтронного потоку, які можуть використовуватися для оптимізації параметрів нейтронного джерела.