

УДК 621.384

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ В НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА ПРИ $E_d \leq 2,5$ МЭВ

В.А. Цымбал¹, Н.Д. Масалитин¹, С.А. Письменецкий², В.Г. Рудычев²,
Е.В. Рудычев¹, А.Ф. Стоянов¹

¹Национальный Научный Центр «Харьковский физико-технический институт»
г. Харьков, ул. Академическая, 1, Украина

²Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

г. Харьков, пл. Свободы, 4, Украина

e-mail: rud@pht.univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 9 июня 2009 г.

Обобщены литературные данные и получены взвешенные значения сечения реакции ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ в интервале энергии (0,5-2,5)МэВ. В модельном подходе получены аналитические выражения для расчета спектра нейтронов, испускаемых толстой мишенью при энергиях дейтронов до 2,5 МэВ. Получена расчетная зависимость полного выхода нейтронов из толстой мишени от энергии, которая подобна известным из литературы в диапазоне $E_d = 1,5-2,5$ МэВ. Спектральные и угловые распределения нейтронов, а также значения полного выхода могут быть использованы для конструирования компактного нейтронного облучателя, в частности, для наработки короткоживущих терапевтических радионуклидов непосредственно вблизи мест их применения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дейтроны, бериллий, нейтронный генератор, спектр нейтронов, полный выход нейтронов.

THE CALCULATION OF ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ NEUTRON SOURCE CHARACTERISTICS AT $E_d \leq 2,5$ MEV

V.A. Tsymbal¹, N.D. Masalitin¹, S.A. Pismenetskiy², V.G. Rudychev², Y.V. Rudychev¹, A.F. Stoyanov¹

¹National Scientific Center, Kharkov Institute of Physics and Technology, Kharkov

1, Akademicheskaja st., 61108, Kharkiv, Ukraine

²V.N. Karazin Kharkov National University, Kharkov

4, Svoboda sq., 61077, Kharkiv, Ukraine

There are summarized some relevant nuclear data and weighted means have been obtained for the cross-section of the ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ reaction at (0.5-3)MeV. With some model bringing in the expressions have been obtained for the neutron spectra from the thick target up to 2.5MeV deuteron energy. The dependence is calculated of the total reaction yield, which is similar to known earlier, but decreases the expected value of yield to (7..11) times in the energy region $E_d = 1.5-2$ MeV. These spectra and angular distributions of outgoing neutrons so as a total reaction yield can be used to design the compact neutron irradiator, in particular, for producing of short-live radioactive nuclides for therapy directly near the places of their application.

KEY WORDS: neutron, deuteron, beryllium, neutron generator, neutron spectra.

РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ В НЕЙТРОННОГО ДЖЕРЕЛА ПРИ $E_d \leq 2,5$ MeV

В.О. Цимбал, М.Д. Масалітін, С.О. Письменецкий, В.Г. Рудичев, Є.В. Рудичев, О.Ф. Стоянов

Національний Науковий Центр «Харківський фізико-технічний інститут»

м. Харків, вул. Академічна, 1, Україна

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

м. Харків, пл. Свободи, 4, Україна

Узагальнено літературні дані і отримані зважені значення перерізу реакції ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ в інтервалі енергії (0,5-2,5)MeV. В модельному підході отримані аналітичні вирази для розрахунку спектру нейтронів, що емітуються товстою мішенню при енергіях дейтронів до 2,5MeV. Отримана розрахована залежність повного виходу нейтронів з товстої мішені від енергії, яка подібна до відомих з літератури в діапазоні $E_d = 1,5-2,5$ MeV. Спектральні і кутові розподіли нейтронів, а також значення повного виходу можуть бути використані для конструювання компактного нейтронного опромінювача, зокрема для напрацювання коротко існуючих терапевтичних радіонуклідів безпосередньо поблизу місця їх застосування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: дейтроны, бериллий, нейтронный генератор, спектр нейтронов, полный выход нейтронов.

В настоящее время, в связи с резко возросшими потребностями в короткоживущих изотопах, используемых в медицине, возник интерес к различным видам генераторов нейтронов. Одним из возможных вариантов является использование реакции ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$, при этом в качестве источника дейтронов предполагается применение каскадного генератора с энергией до 2,5 МэВ, обладающего сравнительно небольшими габаритами. Для расчета эффективных мишенных устройств на современном уровне, включая отражатели и замедлители, предполагается использование таких программных пакетов как GEANT и MCNP. Однако в обширных базах данных указанных пакетов отсутствуют данные о сечениях образования нейтронов в реакции дейтронов на бериллии в диапазоне энергий дейтронов ниже 6 МэВ, а также детальные характеристики спектров и угловых распределений испускаемых нейтронов.

Целью настоящей работы является определение спектральных и угловых характеристик нейтронов, образующихся в реакции ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ при энергии дейтронов до 2,5 МэВ.

ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИИ ${}^9\text{Be}(d,n)$ КАК ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

Реакция ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ исследовалась физиками с начала 40-х годов прошлого века, в основном, по двум причинам. Во-первых, как источник быстрых нейтронов, не требующий высокоэнергетичных ускорителей, и, во-вторых, из-за сложного механизма ее протекания. Сложность механизма этой реакции связана с большим (для легких ядер) числом конечных состояний, которые представляют собой возбужденные уровни ${}^{10}\text{B}$ и имеют разную природу. Соответственно этому, механизм испускания нейтронов разных энергетических групп различен (срыв дейтрона, срыв тяжелой частицы, интерференция прямых и резонансных процессов [1,2]), что приводит к разным угловым распределениям и функциям возбуждения для этих групп. Но, несмотря на сложный спектр нейтронов, реакция ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ со времени создания первых циклотронов прочно заняла место среди интенсивных источников нейтронов, благодаря высокой термостойкости бериллиевых мишеней и относительно большому выходу нейтронов.

Рассмотрим условия протекания реакции ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ при энергиях дейтронов до 3 МэВ на основе имеющихся на сегодняшний день ядерных данных [3-5]. Энергия реакции составляет $Q=4,3613$ МэВ, уровни энергии E^* и спины J^π нижних возбужденных состояний ядра ${}^{10}\text{B}$ приведены в таблице 1. Там же указаны относительные интенсивности I_n групп испускаемых нейтронов по данным работы [3].

Таблица 1. Энергии, спины конечных состояний и относительные интенсивности групп нейтронов, испускаемых в реакции ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$.

Номер группы нейтронов	I	II	III	IV	V
E^* , МэВ	0	0,7183	1,740	2,154	3,587
J^π	3^+	1^+	0^+	1^+	2^+
I_n , отн. ед.[3]	0,296	0,366	0,046	0,201	0,091

Энергия нейтронов E_n , испускаемых в реакции, зависит от начальной энергии дейтрона E_d , энергии возбуждения конечного ядра E^* и угла вылета θ и может быть вычислена из следующего уравнения [3]:

$$Q - E^* = 1,1E_n - 0,8E_d - 0,28\sqrt{E_d E_n} \cos \theta. \quad (1)$$

Отметим, что 5 энергетических групп (см. табл.1) образуют линейчатый спектр, который можно зарегистрировать при использовании тонкой мишени, а в случае применения толстой мишени, наблюдается сплошной спектр нейтронов сложной природы [3].

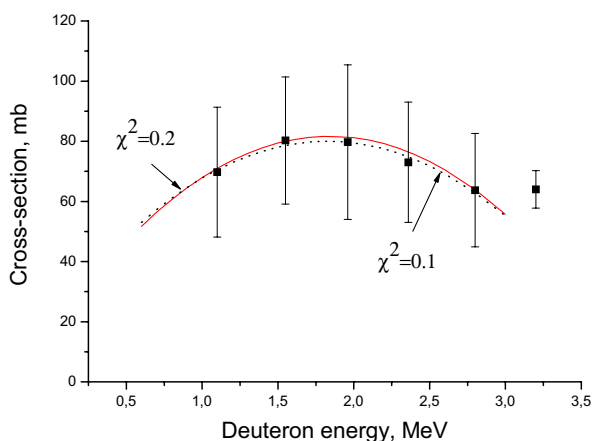


Рис. 1. Пример аппроксимации полного сечения реакции ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$, точки - усредненные данные работы [5].

аппроксимации полиномом второй степени экспериментальных сечений реакции ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ из работы [5] в интервале энергии 0,6..2,8МэВ. Точки – усредненные экспериментальные сечения, кривые получены вариацией коэффициентов полинома. Значения критерия χ^2 для двух наборов коэффициентов указаны на рисунке возле кривых. Т.е. достоверность данной аппроксимации по 5 точкам (для 4 степеней свободы) составляет не менее 98%. Окончательное выражение для полного сечения реакции ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ в зависимости от энергии дейтронов, полученное по экспериментальным значениям из [4, 5], имеет вид:

$$\sigma_{dn} = 15,85 + 71,48E - 19,4E^2, \quad (2)$$

где значения энергии E выражены в МэВ, σ - мб.

Угловые распределения выхода 2 наиболее энергичных групп нейтронов (группы I и II по табл.1) исследовались при $E_d = 1,88$ МэВ и $E_d = 2,35$ МэВ в работе [4]. Они представляют собой немонотонные зависимости, содержащие максимумы вблизи $\theta = 30^\circ$, характерные для прямых ядерных реакций, с подъемами

сечения в диапазоне углов $\theta = 90^\circ-150^\circ$. Угловое распределение полного выхода реакции по данным [5] практически изотропно во всем диапазоне исследованных углов.

Полный выход нейтронов реакции ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ ограничен малой глубиной пробега бомбардирующих дейтронов в бериллии, которая составляет около 50 мкм при $E_d=3$ МэВ [6]. С ростом энергии дейтронов увеличивается как сечение реакции, так и толщина используемой мишени бериллия, вследствие чего полный выход растет достаточно быстро и при $E_d=2$ МэВ достигает $\sim 10^8$ нейтрон/мкКл [7].

Количество образовавшихся нейтронов определяется сечением реакции, зависящим от энергии налетающих дейтронов, причем ниже

$E_d = 0,5$ МэВ было положено $\sigma = 0$. В мишени энергия дейтронов изменяется от E_{MAX} на поверхности до нуля на глубине полного пробега дейтронов, в основном, из-за ионизационных потерь.

ПРОЦЕДУРА РАСЧЕТА СПЕКТРОВ НЕЙТРОНОВ

Процедура определения спектрального состава и полного выхода нейтронов определяется как сечением, так и изменением энергии дейтронов по мере их проникновения в бериллий. На рис. 2 представлены зависимости изменения энергии дейтронов с различными начальными энергиями от глубины проникновения в бериллий. Данные получены при помощи широко используемого пакета SRIMM [8]. Диапазон энергий был выбран от 0,5 МэВ до E_{max} ($E_{max} = 1,75; 2,0; 2,25$ и $2,5$ МэВ). Нижняя граница 0,5 МэВ связана с тем, что по имеющимся данным при меньших энергиях сечение весьма мало, а при $E_d > (1,8 - 2,5)$ МэВ не представляет задачи настоящей работы.

Пусть дейтрон с энергией E падает на поверхность мишени из бериллия и проходит на глубину dx , потеряв при этом энергию dE . Тогда число образовавшихся нейтронов dN определяется соотношением

$$dN = n_{Be} \cdot \sigma(E) \cdot dx, \quad (3)$$

Рис. 2. Зависимость энергии дейтронов (с разными E_{MAX}) от глубины их проникновения в бериллий.

где n_{Be} число атомов ${}^9\text{Be}$ в 1 см^3 . Тогда число нейтронов $Y(E)$ в зависимости от энергии дейтронов E на интервале dE определяется выражением

$$Y(E) = \frac{dN(E)}{dE} = n_{Be} \cdot \sigma(E) \frac{dx}{dE}, \quad (4)$$

а полное число нейтронов N_s при изменении энергии дейтрона от E_{max} до 0,5 МэВ определяется соотношением:

$$N_s = n_{Be} \int_{0,5}^{E_{max}} \sigma(E) \frac{dx(E)}{dE} dE. \quad (5)$$

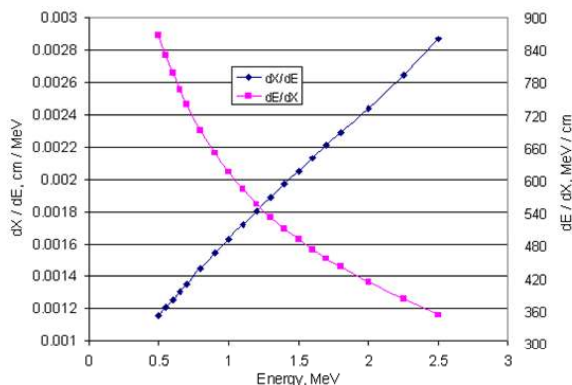


Рис. 3. Зависимости потерь dE/dx и обратной величины $(dE/dx)^{-1}$ от энергии дейтронов в бериллии.

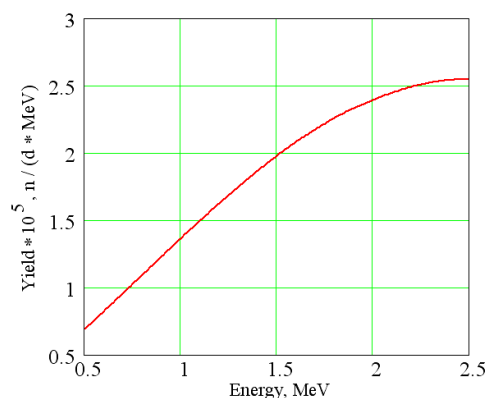


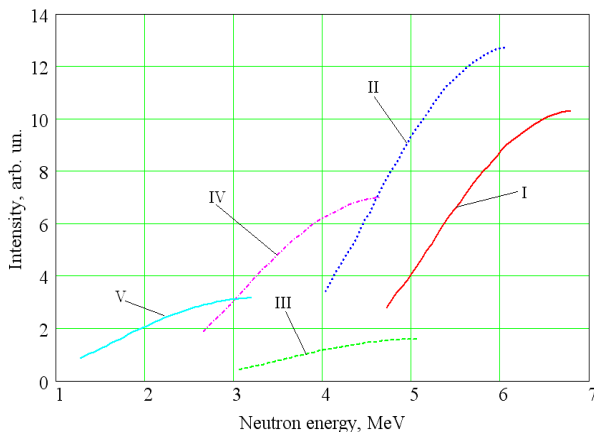
Рис. 4. Зависимость полного выхода нейтронов из толстой Be - мишени при изменении энергии дейтронов.

Отметим, что соотношения (4) и (5) можно переписать, используя зависимости ионизационных и ядерных потерь (dE/dx) от энергии, так что $dx/dE = 1/(dE/dx)$. На рис.3. показаны зависимости потерь dE/dx от энергии дейтронов (потери включают в себя как ионизационные, так и ядерные) и соответствующей этим потерям величины dx/dE . На рис. 4 показан выход нейтронов в зависимости от энергии дейтронов в

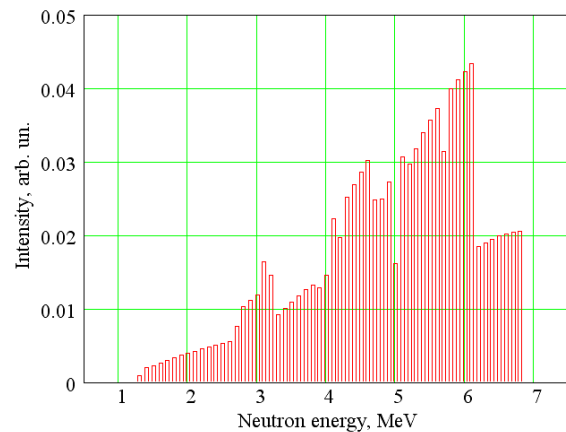
соответствии с соотношением (4) и полным сечением (2), полученным усреднением данных из работ [4, 5] для диапазона энергий 0,5 – 2,5 МэВ. Данные по потерям получены в пакете SRIMM [8]. Приведенная на рис.4 зависимость является основой для расчета распределения нейтронов по энергиям. При энергиях до 1,5 МэВ выход нейтронов линейно зависит от энергии дейтронов, так как и dx/dE , и полное сечение образования нейтронов линейно зависят от энергии. Дальнейшее замедление роста выхода нейтронов связано с уменьшением сечения образования нейтронов при увеличении энергии дейтронов.

СПЕКТРЫ НЕЙТРОНОВ, ИСПУСКАЕМЫХ ТОЛСТОЙ МИШЕНЬЮ

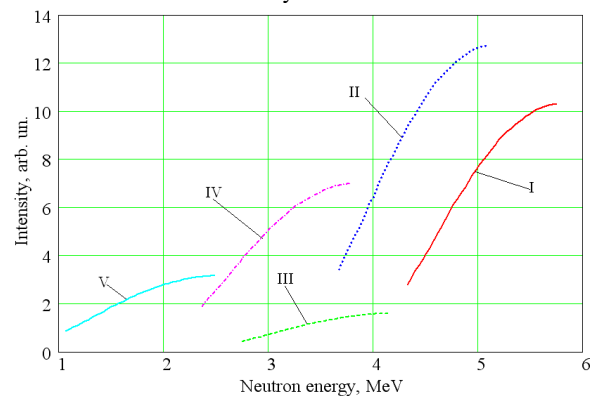
Отметим, что энергия дейтрона уменьшается от E_{\max} до 0,5 МэВ (область генерации нейтронов) по мере проникновения его в бериллий, соответственно изменяется интенсивность и энергия образующихся нейтронов. При заданном угле вылета θ образуется 5 групп нейтронов, энергии которых определяются соотношением (1), а интенсивность всех групп пропорциональна выходу нейтронов, определяемому соотношением (4), также



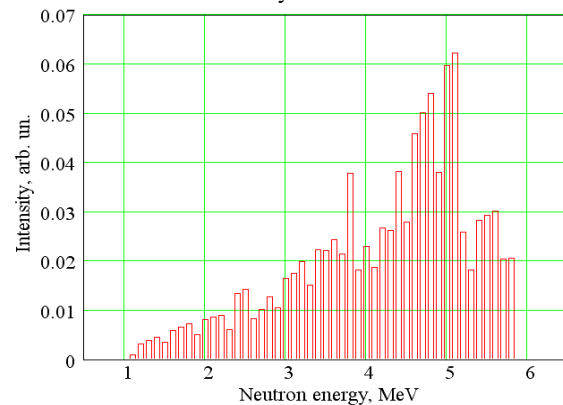
а-. угол 0°.



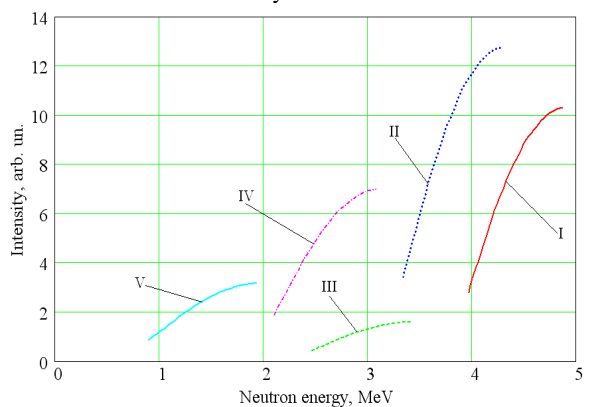
а-. угол 0°.



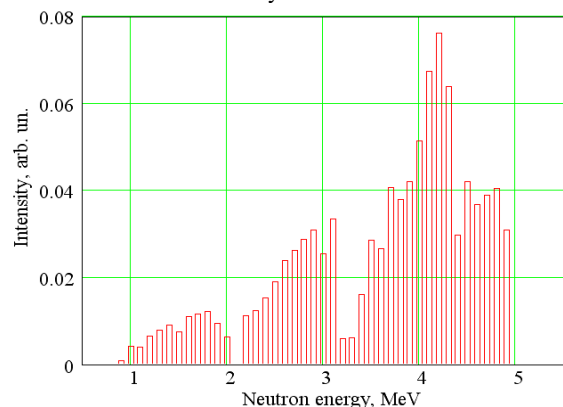
б-. угол 90°.



б-. угол 90°.



в-. угол 180°.



в-. угол 180°.

Рис.5. Интенсивность нейтронов в зависимости от их энергии, вылетающих под разными углами, для каждой из 5 групп.

Рис.6. Полный выход нейтронов под разными углами в зависимости от их энергии.

зависит от энергии дейтрона. На рис. 5а-5в представлены зависимости интенсивности выхода нейтронов от их

энергии для 5 основных групп, соответствующих основному состоянию и нижним возбужденным уровням ядра ^{10}B . Энергия исходных дейтронов $E_{\text{max}} = 2,5$ МэВ, а углы вылета нейтронов 0° , 90° и 180° относительно направления движения дейтронов, соответственно. Из данных, приведенных на рис.5 видно, что энергии нейтронов, вылетающих в передние углы значительно больше, чем вылетающих в заднюю полусферу. Так как интервалы энергий для разных групп перекрываются, то используя процедуру обработки спектров, описанную в [9], получим спектральные распределения с шагом по энергии 0,1 МэВ, приведенные на рис. 6а-6в в виде гистограмм. Отметим, что изменение энергии дейтронов E_{max} вызывает перераспределение нейтронов по углам вылета. На рис. 7 показана зависимость средней энергии нейтронов от угла вылета для энергий дейтронов 2 и 2,5 МэВ. Из приведенных данных следует, что с увеличением энергии дейтронов энергия нейтронов, вылетающих в заднюю полусферу, уменьшается.

На рис. 8 приведены данные о полном выходе нейтронов из реакции $^9\text{Be}(d,n)^{10}\text{B}$ в зависимости от энергии дейтронов по литературным данным [10, 11] в сравнении с полученной нами по (4). Как видно из рисунка, разброс данных при $E \approx 2$ МэВ достаточно велик и не позволяет сделать однозначного заключения о полном выходе нейтронов из толстой мишени. На основе наших расчетов выход нейтронов $^9\text{Be}(d,n)^{10}\text{B}$ реакции количественно составляет при $E_d = 2,0$ МэВ $1,6 \times 10^8$ н/мкКл.

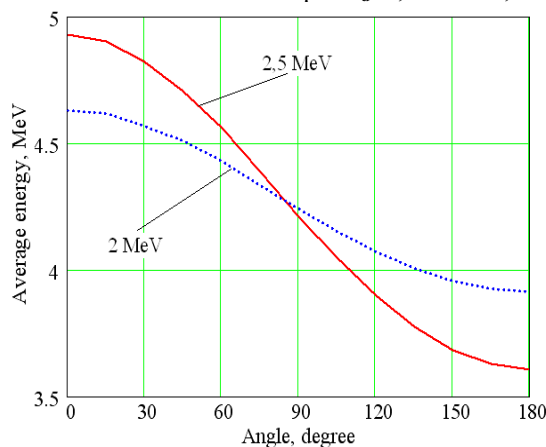


Рис. 7. Зависимость средней энергии нейтронов от угла вылета для энергий дейтронов 2 и 2,5 МэВ.

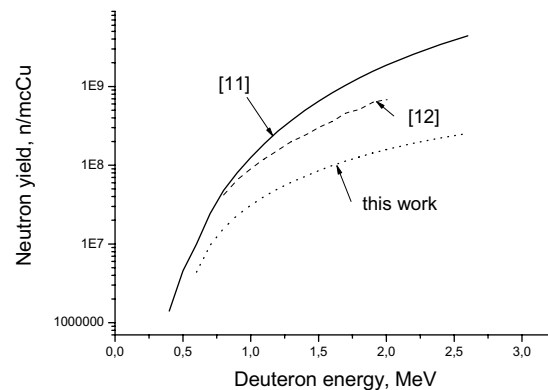


Рис. 8. Зависимости полного выхода нейтронов от энергии дейтронов, полученные в настоящей работе, и результаты, приведенные в [11,12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные данные по сечению реакции $^9\text{Be}(d,n)^{10}\text{B}$ использованы для получения аппроксимационной зависимости полного сечения этой реакции от энергии в диапазоне $E_d = 0,5..2,5$ МэВ. С использованием сделанной аппроксимации в модельном подходе рассчитаны спектр нейтронов и полный выход реакции из толстой мишени. Полученная зависимость полного выхода нейтронов $^9\text{Be}(d,n)^{10}\text{B}$ из толстой мишени от энергии отличается от ранее опубликованных расчетных прогнозов [10, 11] и позволяет оценить выход нейтронов g на 1 мкКл падающих дейтронов при $E_d = 2,0$ МэВ как $g = 1,6 \times 10^8$ н/мкКл. Спектры нейтронов и угловые распределения полного выхода могут быть использованы для конструирования компактного нейтронного облучателя, в частности, для наработки короткоживущих терапевтических радионуклидов непосредственно вблизи мест их применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Srivastava M.L. Jah J.P. Some aspects of heavy particle stripping in low-lying levels of ^{10}B //Indian J. Pure and Appl. Phys. – 1975. Vol.13, №4. - P.243-245.
2. Zwiaglinski B., Saganek A. et al. Direct and resonance processes in $^9\text{Be}(d,p)$ and $^9\text{Be}(d,t)$ at low energies //Nucl. Phys.- 1975. Vol.A250, №1. - P.93-105.
3. Власов Н.А. Нейтроны, изд.2-е перераб., - М.: Наука, 1971.
4. Bardes R., Owen G.E. Angular distributions of the $^9\text{Be}(d,n)^{10}\text{B}$ neutrons //Phys.Rev. 120, 1369, 6011.
5. Siemssen R.H., Cosack M., Felst R. Reaction mechanism study of $1p=1$ stripping processes on nucleiof the $1p$ shell.1.The reactions $^9\text{Be}(d,n)^{10}\text{B}$, $^{10}\text{B}(d,n)^{11}\text{C}$ and $^{11}\text{B}(d,n)^{12}\text{C}$ //Nucl. Phys. 69, 209, 6507.
6. О.Ф. Немец, Ю.В.Гофман. Справочник по ядерной физике, Киев, 1975.
7. 7 Кирьянов Г.И. Генераторы быстрых нейтронов. - М.: Энергоатомиздат, 1990.
8. Berger M.J. et al. Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles, ICRU-49, International Commission on Radiation Units, Bethesda, MD, USA (1993).
9. С.А. Письменецкий, В.Б. Пышкин, В.Г. Рудычев, Е.В. Рудычев, Спектральные характеристики отработавшего ядерного топлива ВВЭР-1000, предназначенного для сухого хранения //Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. Сер. Фізична “Ядра, частинки, поля. – 2007. - №784. - Вип. 4(36). - С.117-120.
10. Бекурц К., Виртц К. Нейтронная физика. - М.:Атомиздат, 1968.
11. Баянов Б.Ф., Белов В.П., Таскаев С.Ю. Нейтроногенерирующая мишень ускорительного источника нейтронов для нейтронозахватной терапии. Препринт ИЯФ 2005-4, Новосибирск, 2005.