

УДК 539.171.016

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ И ВЫХОДОВ ПРОТОНОВ ОТДАЧИ ИЗ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ ПЛЕНОК ПРИ ИХ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ

С.К. Андрухович¹, В.П. Божко², А.Н. Водин², С.Н. Олейник²,
С.А. Солдатов², Э.А. Рудак¹, О.И. Ячник¹

¹Институт Физики им. В.И. Степанова НАН Белоруссии, Минск, проспект Скорины 68, Беларусь

²ННЦ «Харьковский Физико-Технический Институт», 61108, г. Харьков, ул. Академическая 1, Украина

E-mail: olejniksn@kipt.kharkov.ua

Поступила в редакцию 5 ноября 2008г.

Разработана математическая модель взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами водорода, содержащихся в тонких пленках. На её базе создан компьютерный код “NP-Recoil” для расчета методом Монте-Карло спектров и выходов протонов отдачи, излучаемых с поверхности пленки. Алгоритм расчета основан на кинематике (n,p) – реакции и энергетических потерях протонов отдачи в пленке без учета многократного рассеяния протонов. Проведены расчеты спектров и выходов протонов отдачи из полиэтиленовых пленок для энергий нейтронов 1 – 15 МэВ под углами падения 0 - 90°. Получено удовлетворительное согласие полученных результатов с расчетами по программному коду MCNPX.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: быстрые нейтроны, протоны отдачи, спектры и выходы протонов, водородосодержащая пленка, математическая модель.

При облучении тонких водородосодержащих пленок (ВП) быстрыми нейтронами происходит их рассеяние на ядрах водорода и образование протонов отдачи, которые, в свою очередь, рассеиваются на ядрах пленки формируя спектр протонов, излучаемых с поверхности пленки ВП. Исследование механизмов формирования спектров протонов отдачи важно как с точки зрения фундаментальных аспектов ядерного взаимодействия, так и возможности их прикладного использования.

В спектрах протонов отдачи содержится информация о параметрах протон-протонных взаимодействий [1-5] которые, могут быть, в принципе, извлечена при обработке экспериментальных спектров. Прикладной характер исследований механизма формирования спектров протонов отдачи связан с возможностью разработки спектрометров быстрых нейтронов по протонам отдачи на основе поверхностно-барьерных Si(Au) детекторов [6 - 10]. Кроме того, расчет спектров и выходов протонов отдачи с поверхности ВП может быть полезен для оценки дозовых нагрузок на электронную аппаратуру и других объектов при проведении измерений в интенсивных полях быстрых нейтронов.

Для выделения из экспериментальных спектров нужной информации необходимо проводить моделирование спектров протонов отдачи, излучаемых с поверхности тонких ВП, а также моделировать амплитудные спектры, получаемые при регистрации протонов отдачи конкретным детектором. Существующие международные коды MCNPX [11], GEANT [12] и др. могут решать эти задачи. Однако их применение приводит к ряду проблем, связанных с их универсальностью. Это, прежде всего громоздкость таких программ и длительность расчетов с их помощью.

Авторами разработан оригинальный код, с помощью которого можно моделировать спектры и выходы протонов отдачи с тонких водородосодержащих пленок при их облучении быстрыми нейтронами. В представляемой версии кода процессы рассеяния протонов на ядрах пленки не учитываются. В алгоритм кода внесены ряд особенностей, которые приводят к существенному ускорению расчетов без потерь точности. Это позволяет проводить большой объем вычислений спектров протонов отдачи за короткое время, что значительно ускоряет анализ экспериментальных данных. Расчеты, проведенные по разработанному коду и по программе MCNPX, показали удовлетворительное согласие. Разработанный код является основой для моделирования процессов формирования и регистрации протонов отдачи в экспериментах с быстрыми нейтронами.

Целью работы является создание модели формирования спектров и выходов протонов отдачи из водородосодержащей пленки без учета процессов рассеяния протонов на ядрах пленки. В статье излагается основные элементы модели, представляются спектры и выходы протонов отдачи, рассчитанные для различных параметров модели, а так же проводится сравнение результатов расчета выполненные по разработанной модели и с помощью программы MCNPX.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Математическая модель формирования спектров протонов отдачи из ВП реализована в виде компьютерного кода “NP-Recoil”, написанном на языке ФОРТРАН. Расчет спектров и выходов протонов отдачи проведен без учета процессов рассеяния протонов отдачи на ядрах ВП для параллельного потока падающих нейтронов. Метод расчета выбран смешанным: процессы, связанные с актами (n,p)-рассеяния рассчитаны методом Монте-

Карло, а энергетические потери протонов отдачи в ВП – аналитически. Геометрическая форма пленки – диск диаметром d и толщиной h миллиметров. Общая схема вычислений следующая:

1. задание входных данных и параметров расчета,
2. розыгрыш энергии нейтрона E_n и координат падения на плоскость ВП,
3. определение толщины пленки Z_0 , на которой произойдет (n,p) – рассеяние,
4. определение параметров (n,p) – рассеяния,
5. определение траектории движения протонов отдачи в пленке,
6. определение энергетических потерь ΔE_p протона на толщине ΔR ВП,
7. определение энергии протона E_p , вылетающего с пленки,
8. вывод результатов расчета.

Пункты 2-7 циклически повторяются до тех пор, пока в розыгрыше не будут задействованы все нейтроны. Розыгрыш параметров модели производится с помощью стандартных (библиотечных) генераторов случайных чисел. В начале работы программы задаются данные по ВП и параметры входного потока нейтронов (спектральное и угловое распределение).

Моделирование процесса рассеяния нейтрона на ядрах водорода происходит в базовой декартовой системе координат. Однако на различных этапах вычислений производится переход к полярной системе координат, с помощью которой удобно проводить расчет траектории движения протона в ВП. На рис. 1 схематически изображен процесс рассеяния нейтрона на ядре водорода и основные геометрические параметры, которые используются в расчетах.

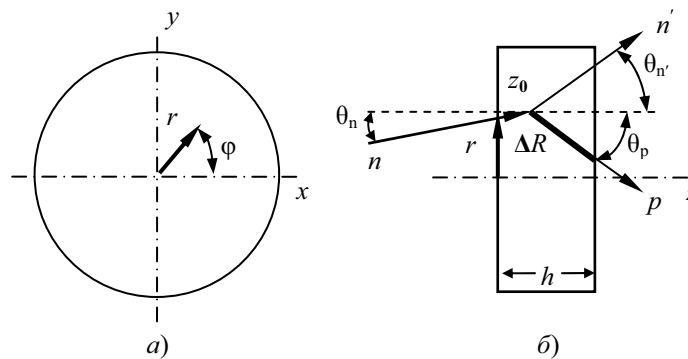


Рис. 1. Геометрия (n,p)-рассеяния.

Нейтрон n падает под углом θ_n на плоскость диска, на глубине z_0 рассеивается на ядре водорода под углом θ_n , а протон отдачи летит под углом θ_p с энергией E_p . Для построения модели выбрана прямоугольная система координат, в которой координаты (x, y) принадлежат плоскости диска ВП, изображенной на рис. 1.а, а координата z относится к толщине диска (рис. 1.б). Координата (x, y) входа нейтрона в плоскость диска определяется через полярную систему координат (r, φ) , в которой случайным образом разыгрываются координаты r и φ (см. рис. 1.а). При этом, декартовы координаты вычисляются как:

$$x = r \cos \varphi, \quad y = r \sin \varphi. \quad (1)$$

В программе задействованы два режима розыгрыша событий - по плоскости диска с равномерной плотностью падения нейтронов и падением нейтронов в центр диска ($x = y = 0$). Из сравнения результатов расчета этих двух режимов можно оценить вклад краевых эффектов в формировании спектров и выходов протонов отдачи. Для определения траектории движения протона используется полярная система координат (θ_p, φ_p) , где θ_p – азимутальный угол, а φ_p – полярный угол, которые отсчитывается от оси x и z соответственно. При этом траектория движения протона отдачи задается направляющими косинусами C_i [13]. Направляющие косинусы для нейтронов C_{xn} , C_{yn} и C_{zn} определяется соотношениями:

$$C_{xn} = \cos \varphi_n \cdot \sin \theta_n, \quad C_{yn} = \sin \varphi_n \cdot \sin \theta_n, \quad C_{zn} = \cos \theta_n. \quad (2)$$

Направляющие косинусы для протонов отдачи находятся как:

$$\left. \begin{aligned} C_{xp} &= \sin \theta_p \cdot \cos \varphi_p \cdot \cos \theta_n \cdot \cos \varphi_n - \sin \theta_p \cdot \sin \varphi_p \cdot \sin \varphi_n + \cos \theta_p \cdot \sin \theta_n \cdot \cos \varphi_n, \\ C_{yp} &= \sin \theta_p \cdot \cos \varphi_p \cdot \cos \theta_n \cdot \sin \varphi_n + \sin \theta_p \cdot \sin \varphi_p \cdot \cos \varphi_n + \cos \theta_p \cdot \sin \theta_n \cdot \sin \varphi_n, \\ C_{zp} &= \sin \theta_p \cdot \cos \varphi_p \cdot \cos \theta_n + \cos \theta_p \cdot \cos \theta_n. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Длина пути ΔR протона определяется трехмерной геометрией траектории движения протона отдачи:

- координатами точки рассеяния в пленке (x_1, y_1, z_1) ;
- направляющими косинусами (2), (3);
- координатами точки выхода протона из пленки (x_2, y_2, z_2) .

При этом:

$$\Delta R = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}. \quad (4)$$

Моделирование процессов прохождения нейтронов через вещество связано с протеканием ядерных реакций на ядрах вещества (упругое и неупругое рассеяния нейтронов, реакции (n,p), (n, α) и т.д.), которые приводят к изменению интенсивности и спектрального распределения первичных нейтронов [14]. Проведенный анализ сечений указанных реакций [15] показал, что поток и спектр первичных нейтронов изменяются незначительно. Поэтому в модели используется приближение, при котором поток и спектр нейтронов постоянен по толщине пленки. Это позволяет проводить равномерный розыгрыш (n,p) - событий по оси z, а конечные спектры и выходы протонов отдачи нормировать на коэффициент:

$$C_n = \sigma_{np} \cdot \frac{N_a}{A_{ВП}} \cdot \rho \cdot h \cdot k_H, \quad (5)$$

где σ_{np} - сечение (n,p) - реакции, $N_a = 6,02 \cdot 10^{23}$ - число Авогадро, $A_{ВП}$ - молекулярная масса, ρ - плотность, h - толщина, k_H - относительное содержание атомов водорода в ВП. Поскольку σ_{np} является функцией энергии нейтронов E_n , то нормировочный коэффициент также зависит от энергии нейтрона $C(E_n)$. В каждом акте (n,p) - рассеяния определяется энергия протона отдачи E_p в соответствии с кинематикой реакции [16]:

$$E_p = E_n \cdot \cos^2 \theta, \quad (6)$$

Протон с энергией E_p на промежутке пути ΔR теряет энергию ΔE . На выходе из пленки энергия протона определяется как:

$$E_p' = E_p(E_n, \theta_p) - \Delta E. \quad (7)$$

В случае, когда пробег протона $R \leq \Delta R$, то он не учитывается в конечном спектральном распределении протонов отдачи. Для упрощения алгоритма программы и ускорения счета вместо процедуры интегрирования удельных потерь протона dE/dx по траектории движения нами разработан метод, при котором потеря энергии протона ΔE определяется из зависимости полного пробега от энергии $R(E_p)$:

$$\Delta R = R_1(E_1) - R_2(E_2) = \int_{E_2}^{E_1} \frac{1}{\left(\frac{dE}{dx}\right)} dE. \quad (8)$$

На рис. 2 стрелками схематически изображена процедура определения энергетических потерь протона отдачи по кривой $R(E_p)$.

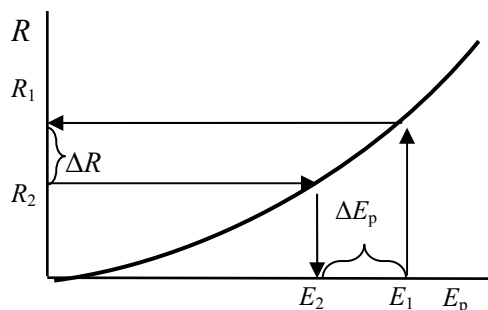


Рис. 2. Зависимость пробега протона от энергии.

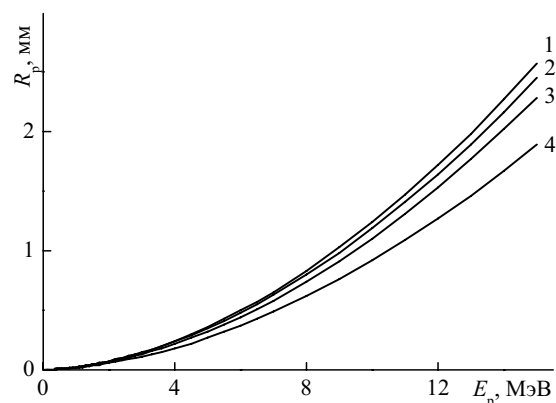


Рис. 3. Пробеги протонов в водородосодержащих средах.

Начало процедуры задается начальной энергией протона E_1 , которая соответствует значению полного пробега R_1 . Значение R_2 находится из соотношения $\Delta R = R_1 - R_2$, где ΔR задается геометрией прохождения протона отдачи в пленке (4). По величине полного пробега R_2 определяется соответствующая ему энергия протона E_2 . Таким образом, величина потери энергии протона на толщине пленки ΔR находится как $\Delta E = E_1 - E_2$.

Зависимость $R(E_p)$ вводится в вычисления в виде массива данных, которые заранее рассчитываются с помощью программы TRIM [17] для ВП заданного состава. В таблице представлены характеристики распространенных водородосодержащих материалов, для которых рассчитаны зависимости полных пробегов от энергии протонов, указанных на рис. 3.

Таблица

Характеристики водородосодержащих веществ

| № | Название | ρ , г·см ⁻³ | Состав |
|---|------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 1 | парафин | 0,89 | H (66 %) + C (33 %) |
| 2 | вода | 1,0 | H (66 %) + O (33 %) |
| 3 | полиэтилен | 1,0 | H (66 %) + C (33 %) |
| 4 | майлар | 1,40 | H (36 %) + C (45 %) + O (18 %) |

Выход протонов отдачи в зависимости от угла его вылета θ_p определяется дифференциальным сечением рассеяния протонов [18]:

$$\frac{d\sigma}{d\theta_p} = \sigma(\theta_p) = \frac{\sigma_{tot}}{4\pi} \left[\frac{1 + 2C^2 \cos^2 \theta_p}{1 + \frac{2}{3} C^2} \right], \quad (9)$$

где параметр $C = E_n/90$, E_n в МэВ.

Полное сечение (n,p)-реакции определяется [16]:

$$\sigma_{tot} = \frac{3.9}{(1.22 - 0.06E_n)^2 + \frac{E_n}{2}} + \frac{1.3}{((0.27 + 0.06E_n)^2 + \frac{E_n}{2})}, \quad (10)$$

где σ_{tot} в барнах, а энергия нейтрона E_n в МэВ.

На основании (9) и (10), с учетом (7), формируется выход протонов отдачи Y_p , который определяется как полное число протонов вышедших из пленки:

$$Y_p = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \left(\frac{dN}{dE} \right)_p dE. \quad (11)$$

Рассчитанные спектры и выходы протонов отдачи при необходимости нормируется на полное число нейтронов упавших на пленку и (или) на интервал энергий протонов.

РАСЧЕТНЫЕ СПЕКТРЫ И ВЫХОДЫ ПРОТОНОВ ОТДАЧИ

Созданная модель позволяет рассчитывать угловые и энергетические зависимости спектров и выходов протонов отдачи, наблюдаемых при облучении ВП потоком быстрых нейтронов. Как правило, используются пленки содержащие, помимо водорода, ядра кислорода и углерода. Характеристики ряда таких материалов представлено в таблице 1. Они незначительно различаются по величине удельных энергетических потерь и, соответственно, пробегов (см. рис. 3), однако могут существенно отличаться по содержанию водорода (например, полиэтилен и майлар). Представленные ниже зависимости, рассчитаны для полиэтиленовых пленок диаметром $d = 20$ мм, кроме того рассчитана зависимость выхода протонов от диаметра. При этом все спектры и выходы нормировались на полное число нейтронов N_{tot} , разыгрываемых в процессе моделирования. Для спектров $N_{tot} = 10^7$, а для выходов протонов $N_{tot} = 10^6$. Нейтроны облучали ВП как правило под углом $\theta_n = 0^\circ$, с равномерной плотность распределения по поверхности пленки (кроме рис. 8).

На рис. 4 представлены зависимости выходов протонов отдачи от энергии налетающих нейтронов для трех толщин пленки h . Как видно из рис. 4 при энергиях нейтронов, превышающих значения соответствующие максимальному пробегу протонов отдачи, зависимости выходов протонов $Y(E_n)$ перестают линейно возрастать от E_p . Это связано с тем, что эффективность конвертирования нейтронов в протоны отдачи оптимальна для толщин полиэтиленовых пленок $h = 0,32; 1,1$ и $2,28$ мм, которые соответствуют максимальному пробегу протонов отдачи с энергиями $E_p = 5, 10$ и 15 МэВ соответственно (см. рис. 3). Такие зависимости позволяют предварительно оценивать значения толщин пленок, необходимых для проведения экспериментов. На рис. 5 представлены спектры протонов отдачи, рассчитанные для энергий налетающих нейтронов $E_n = 5, 10$ и 15 МэВ и $h = 0,32;$

1,1 и 2,28 мм соответственно, для потока нейтронов равномерно распределенного по поверхности мишени с $\theta_n = 0^\circ$. Спектры имеют куполообразный характер с максимальной энергией протонов $E_p^{max} = E_n$.

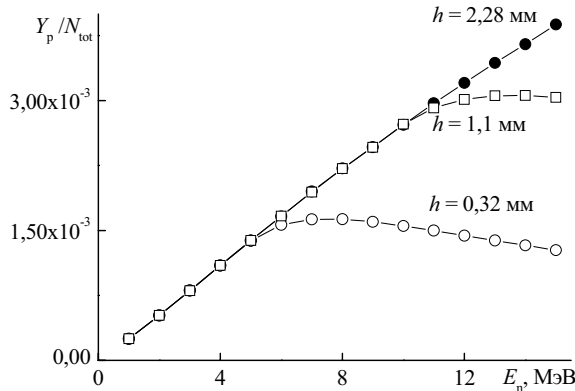


Рис. 4. Выходы протонов отдачи.

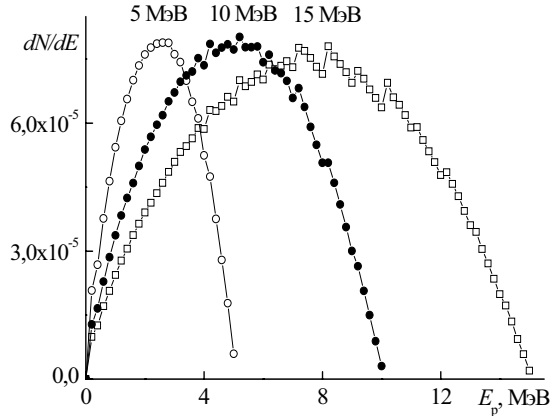


Рис. 5. Спектры протонов отдачи.

Зависимость выходов протонов отдачи от угла падения нейтронов θ_n на плоскость ВП представлено на рис. 6. Кривые рассчитаны для трех указанных на рисунке энергий нейтронов и соответствующих им оптимальным толщинам пленки. С увеличением угла θ_n интенсивность излучаемых с поверхности пленки протонов отдачи уменьшается в соответствии с увеличением эффективной толщины пленки под заданным углом падения нейтронов и остановкой протонов отдачи в толще материала пленки.

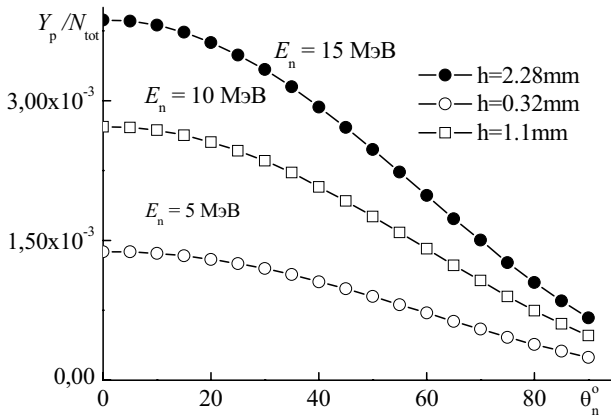


Рис. 6. Зависимости выходов протонов отдачи от θ_n .

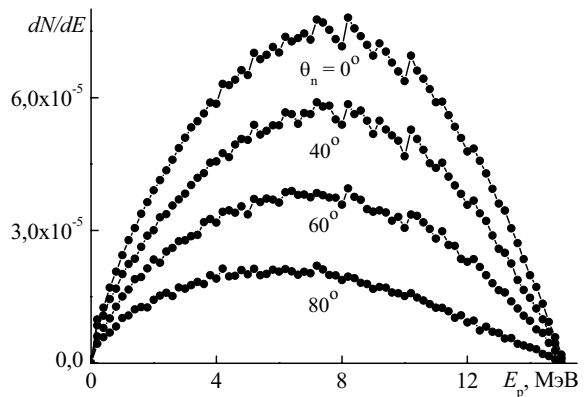


Рис. 7. Спектры протонов отдачи.

Изменение спектральных зависимостей протонов отдачи от угла θ_n , которые рассчитаны для параметров модели указанных ранее, представлены на рис. 7. С увеличением угла падения нейтронов форма спектров протонов изменяется незначительно, а интенсивность падает в соответствии с результатами, представленными на рис. 6.

На рис. 8 представлены зависимости выходов протонов отдачи от диаметра ВП, рассчитанные для $E_n = 15$ МэВ, $h = 2,28$ мм и $\theta_n = 0^\circ$. Квадратиками отмечена кривая, рассчитанная для случая равномерного распределения нейтронов по поверхности пленки, а кружками для случая падения нейтронов в центр диска ($x = y = 0$). Эти зависимости важны для понимания вклада краевых эффектов в формирование интенсивности протонов отдачи. Отмеченные эффекты становятся существенными, когда диаметр диска ВП сравним с длиной пробега протонов с максимальной энергией.

На рис. 9 представлены зависимости выходов протонов отдачи от толщины пленки. Они рассчитаны для трех указанных энергий падающих нейтронов с $\theta_n = 0^\circ$, равномерно распределенных по площади диска диаметром $d = 20$ мм. Как видно из рис. 9 при достижении оптимальной для данной энергии нейтронов толщины пленки ($h = 0,32; 1,1$ и $2,28$ мм), кривые выходов протонов отдачи выходят на плато. Такое поведение выходов протонов соответствует приближению, по которому поток нейтронов постоянен по толщине пленки. Представленные на рис. 4 – 9 спектры и выходы протонов чрезвычайно важны для планирования экспериментов с протонами отдачи, а также для проектирования регистрирующих протоны отдачи устройств (например, детекторов и спектрометров быстрых нейтронов).

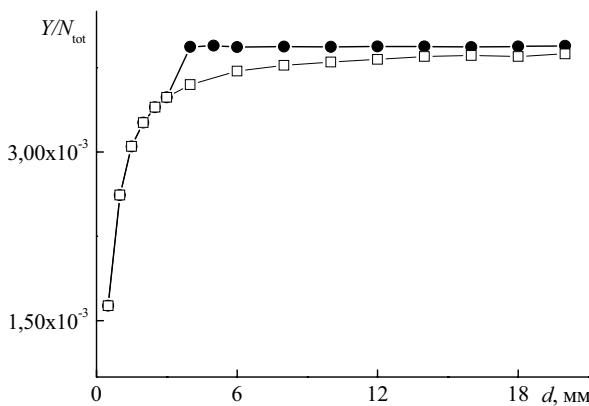


Рис. 8. Выходы протонов отдачи.

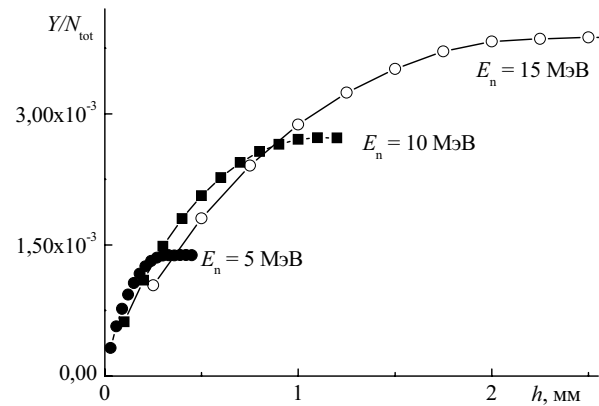


Рис. 9. Выходы протонов отдачи.

СРАВНЕНИЕ С ПРОГРАММОЙ MCNPX

Приведенные выше спектры и выходы протонов отдачи характеризуют возможности кода “NP-Recoil”, созданным на базе нашей модели. Однако, что бы убедиться в правильности наших вычислений, было проведено их сравнение с результатами расчетов по известному программному коду MCNPX [11]. Расчеты, представленные на рис. 10 и рис. 11, проведены для энергии налетающих нейтронов $E_n = 14$ МэВ, бомбардирующих полиэтиленовую пленку $h = 2,28$ мм и $d = 20$ мм. Нейтроны облучали ВП по оси диска ($x = y = 0$), под углом к нормали диска $\theta_n = 0^\circ$. Светлыми точками представлены результаты расчетов по программе MCNPX, а черными – расчеты по коду “NP-Recoil”. Спектры и выходы протонов отдачи нормировались на величину N_{tot} .

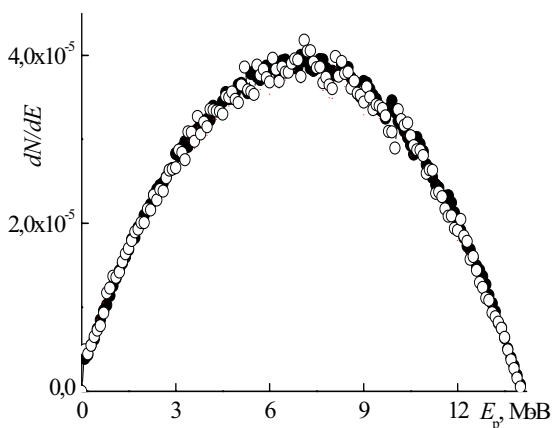


Рис. 10. Спектры протонов отдачи.

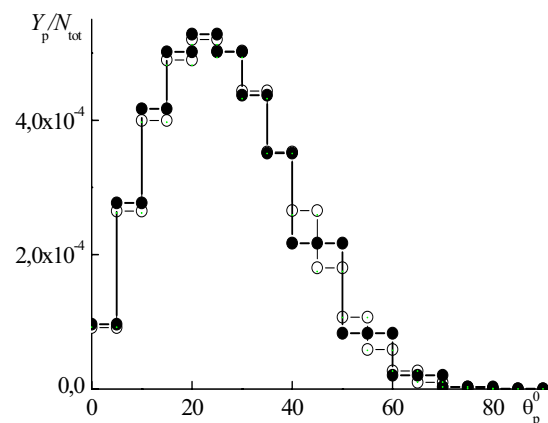


Рис. 11. Угловое распределение выходов протонов отдачи.

На рис. 10 представлены спектры протонов отдачи. На рис. 11 представлены угловые зависимости выходов протонов отдачи, рассчитанные в интервале углов выхода протонов из пленки $\theta_{p,i}, \theta_{p,i} + \Delta\theta_p$, где шаг $\Delta\theta_p = 5^\circ$. Расчет с помощью кода MCNPX для $\theta_p \geq 40^\circ$ проведен с шагом $\Delta\theta_p = 10^\circ$.

Как видно из рис. 10 и рис. 11 кривые, рассчитанные по MCNPX и нашему коду “NP-Recoil” совпадают, с точностью до статистических разбросов точек. Это является свидетельством того, что код “NP-Recoil” адекватно отображает процесс (n,p)-рассеяния в тонких ВП. Следует отметить, что ресурсы ЭВМ, необходимые для таких расчетов по кодам “NP-Recoil” и MCNPX существенно различаются. С помощью “NP-Recoil” можно проводить расчеты спектров и выходов протонов отдачи примерно в 50 раз быстрее, чем с помощью кода MCNPX. Это связано с применением методов по ускорению расчета процессов (n,p)-рассеяния, изложенных выше.

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель формирования спектров и выходов протонов отдачи из водородосодержащих пленок без учета многократного рассеяния протонов. На основе этой модели создан компьютерный код “NP-Recoil”, с помощью которого можно оперативно проводить расчеты спектральных и угловых зависимостей протонов отдачи, излучаемых с поверхности ВП при ее облучении быстрыми нейтронами. Адекватность модели процессам (n,p) – рассеяния в тонких пленках проверена с помощью кода MCNPX. Разработанная модель является основой для проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований процессов (n,p) – и (p,p) – рассеяния.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований при Министерстве образования и науки Украины (договор № Ф14/265-2007) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Ф07К-066).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L.H. Johnston and D.E. Young Proton-proton scattering at 10 MeV // Phys. Rev. – 1959. - Vol. 116, № 3-4. - P. 989-991.
2. Р. Вильсон Нуклон-нуклонные взаимодействия / Перевод с англ. Под ред. В.П. Желепова. - М.: Мир, 1965. - 303 с.
3. M.H. McGregor, R.A. Arndt and R.M. Wright Determination of the nucleon-nucleon scattering matrix. X. (p,p) and (n,p) analysis from 1 to 450 MeV // Phys. Rev. – 1969. - Vol. 182, №5. - P. 1714-1728.
4. N. Jarmie, R.E. Brown, R.L. Hutson and J.L. Detch Accurate proton-proton differential cross sections near 10 MeV // Phys. Rev. Let. – 1970. - Vol. 24, №5. - P. 240-242.
5. J. Holdeman, P. Signell and M. Sher Discrepancies in the low energy proto-proton scattering data // Phys. Rev. Let. 1970. - Vol. 24, №5. – P. 243-245.
6. S.N. Olejnik, N.A. Shlyakhov, V.P. Bozhko Restoring of fast neutron energetic spectra on the basis of amplitude distribution of signal measured single crystal neutron spectrometer // ВАНТ, серия «Ядерно-физические исследования». - 2000. - №2(36). - С. 18-21.
7. S.N. Olejnik, V.P. Bozhko, A.N. Vodin Modeling main characteristics of fast neutron detector based on recoil protons with the Monte-Carlo method // ВАНТ, серия "Ядерно-физические исследования" - 2002. - № 2(40). - С. 36-39.
8. С.Н. Олейник, В.П. Божко, А.Н. Водин Расчет функций отклика детектора быстрых нейтронов по протонам отдачи методом Монте-Карло // 52 Международное совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра: Тез. докл. – М., 2002. - С. 333.
9. В.П. Божко, А.Н. Водин, С.Н. Олейник, Е.В. Шептуленко Влияние структуры чувствительного слоя поверхностно-барьерного Si-детектора на функции отклика спектрометра быстрых нейтронов // Известия РАН. Серия Физическая. - 2005. - Т. 69, № 1. - С. 42-46.
10. В.П. Божко, А.Н. Водин, С.Н. Олейник Рассеяние протонов отдачи на ядрах спектрометра быстрых нейтронов на основе Si(Au)-детектора // 56 Международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра: Тез. докл. - Саров, Россия, 2006. - С. 305.
11. <http://mcnpx.lanl.gov/>
12. <http://www.geant.net/>
13. Г. Корн, Т. Корн Справочник по математике. - М.: Наука, Глав. ред. физ.-мат. литературы, 1972. - 831 с.
14. Н.А. Власов Нейтроны. - М.: Наука, 1971 - 552 с.
15. Curves and Tables of Neutron Cross Sections / Report by eds. T. Nakagawa, T. Asami and T. Yoshida, JAERI-M 90-099, - 1990, 486 p.
16. О.Ф. Немец, Ю.В. Гофман Справочник по ядерной физике. – Киев: Наукова Думка, 1975. - 415 с.
17. J.F. Ziegler. TRIM-91 / Report IBM Research. 28-0. - New York. - 1991.
18. Б.В. Рыбаков, В.А. Сидоров Спектрометрия быстрых нейтронов / Под ред. Н.А. Власова. - М.: Издательство Главного Управления по использованию атомной энергии при Совете Министров СССР, 1958. - 176 с.

MODELLING OF RECOIL PROTON SPECTRA AND YIELDS FROM HYDROGENOUS FILMS AT IRRADIATION BY FAST NEUTRONS

S.K. Andruhovich¹, V.P. Bozhko², A.N. Vodin², S.N. Olejnik², S.A. Soldatov², E.A. Rudak¹, O.I. Jachnik¹

¹V.I. Stepanov Institute of Physics National Academy of Sciences of Belarus, Skoriny av., 68, Minsk, Belarus

²NSC "Kharkov Institute of Physics and Technology", Akademichna str. 1, Kharkov, Ukraine

E-mail: olejniksn@kipt.kharkov.ua

The mathematical model of fast neutron interaction with hydrogen nuclei containing in thin films is developed. The computer code "NP-Recoil" is created to calculate the recoil proton spectra and yields by the Monte-Carlo method. The algorithm is based on the (n,p)-reaction kinematics and recoil proton energy losses in the film without taking into account the multiple proton scattering. The calculations of recoil proton spectra and yields from the polyethylene films are carried out for the neutron energy 1 – 15 MeV at angles 0 - 90°. It is found that the received results are satisfactorily conformed to the calculations by the MCNPX code.

KEYWORDS: fast neutrons, recoil protons, proton spectra and yields, hydrogenous film, mathematical model.