

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ СЕЧЕНИЯ НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ НА ЖЕЛЕЗЕ

Б.В. Журавлёв, Н.Н. Титаренко

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»

249033, Калужская обл., Обнинск, пл. Бондаренко, 1



Представлены результаты тестирования сечения неупругого рассеяния нейтронов на железе, полученные при измерениях спектров неупруго рассеянных нейтронов при начальных энергиях 6, 7 и 8 МэВ, и численного моделирования в рамках статистической теории ядерных реакций и прямого взаимодействия. Дано описание методики проведения эксперимента и модельных расчетов. Анализируются спектры неупруго рассеянных нейтронов на железе, полученные в ходе экспериментов, в сопоставлении с расчетными данными. Новые измерения спектров неупругого рассеяния нейтронов и их анализ в рамках современных модельных представлений позволили сделать предложения по корректировке отечественной библиотеки рекомендуемых оцененных нейтронных данных БРОНД-2.2 и незначительной корректировке последней версии библиотеки БРОНД-3.

Ключевые слова: неупругое рассеяние нейтронов, спектры нейтронов, метод времени пролета, тестирование оцененных нейтронных данных.

ВВЕДЕНИЕ

Железо является основным конструкционным материалом различных ядерных установок, а также рассматривается в качестве стандарта по сечению образования γ -квантов с энергией 847 кэВ из реакции $^{56}\text{Fe}(n, n'\gamma)$. Вследствие эквивалентности с неупругим рассеянием эти данные являются также тестом для значений сечения неупругого рассеяния. Экспериментальных данных по неупругому рассеянию нейтронов в диапазоне начальных энергий от 5 до 15 МэВ крайне мало [1 – 6], а точность определения сечения образования γ -квантов с энергией 847 кэВ не соответствует требованиям, предъявляемым к стандартам [7], что хорошо видно на рис. 1, 2. Согласие между измерениями неудовлетворительное, и разные оценки отражают неопределенности в данных (табл. 1).

В то время как нейтронные сечения для стандартов стремятся к однопроцентной точности, лучшая точность для сечений образования γ -квантов с энергией 847 кэВ на железе составляет от 5 до 10%, а две относительно недавние оценки [10, 11] отличаются на 26%, причем обе заявляют о точности от 5 до 10%. Результаты измерений, выполненных в Лос-Аламосе [7], и экспериментов авторов при начальной энергии нейтронов 9,1 МэВ [3] указывают на необходимость увеличения сечения неупругого рассеяния на железе по сравнению с оценками ENDF/B-VI и

© *Б.В. Журавлёв, Н.Н. Титаренко, 2017*

БРОНД-2. Чтобы убедиться в этой необходимости, были обработаны и проанализированы прежние экспериментальные данные [14] и проведены новые расчеты спектров неупругого рассеяния нейтронов на железе при начальных энергиях нейтронов 6, 7 и 8 МэВ.

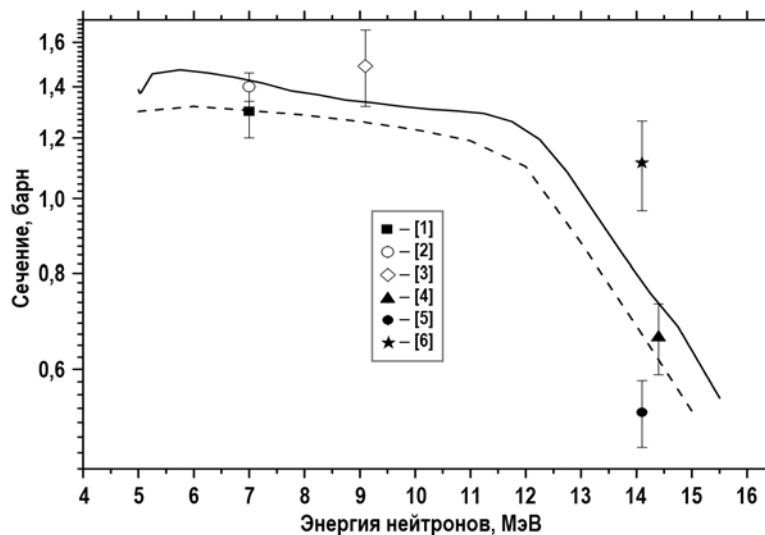


Рис. 1. Сечение неупругого рассеяния нейтронов на железе: сплошная кривая – ENDF/B-VI-8; штриховая – БРОНД 2.2

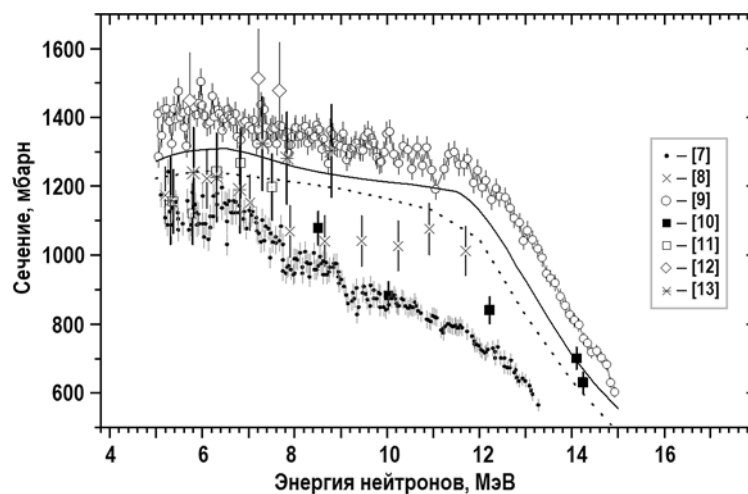


Рис. 2. Сечение образования γ -квантов с энергией 847 кэВ в реакции $^{56}\text{Fe}(n, n'\gamma)$: сплошная кривая – ENDF/B-VI-8; штриховая – БРОНД-2.2

Таблица 1

Оцененные значения сечений неупругого рассеяния нейтронов для ^{56}Fe при начальной энергии 14,5 МэВ

Библиотека	Сечение, мбарн	Отличие от ENDF/B-VI, %
ENDF/B-VI	681	0.0
БРОНД-2	610	-10.4
JEFF-3	724	6.3
JENDL-3.3	672	1.3

ЭКСПЕРИМЕНТ

Спектры нейтронов, неупруго рассеянных на железе, измерены при начальных энергиях 6, 7 и 8 МэВ. Измерения спектров выполнены спектрометром нейтронов по времени пролета на базе импульсного перезарядного ускорителя ЭГП-10М ГНЦ РФ-ФЭИ. Блок-схема эксперимента представлена на рис. 3.

Для генерации нейтронов с энергией от 6 до 8 МэВ использовалась реакция $D(d, n)^3He$. При исследуемых энергиях сечение сопутствующей реакции $D(d, pr)D$ и максимальная энергия нейтронов из этой реакции малы – при начальной энергии нейтронов 8 МэВ выход нейтронов (Y) сопутствующей реакции составляет 0,3% с максимальной энергией этих нейтронов 1,2 МэВ. Использовалась газовая мишень диаметром 10 мм и длиной 40 мм. Входное окно мишени выполнено из молибденовой фольги толщиной 50 мкм. Для дна мишени, в котором тормозится пучок ускоренных дейтронов, использовался платиновый диск толщиной 0.5 мм. Давление дейтерия в мишени составляло 760 мм Нг. В таблице 2 приведены относительные выходы нейтронов из конструкции мишени, обладающих энергией 0.5 МэВ, при угле рассеяния 0° к направлению ускоренных дейтронов.

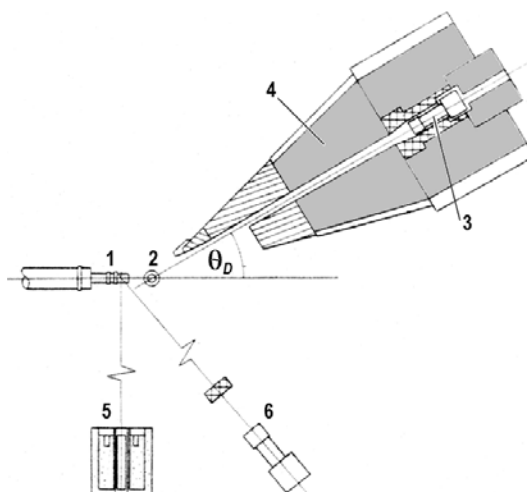


Рис. 3. Блок-схема эксперимента для измерения спектров неупругого рассеяния быстрых нейтронов: 1 – мишень; 2 – образец; 3 – детектор нейтронов (θ_D – угол рассеяния); 4 – защита детектора; 5 – всеволновый счетчик; 6 – мониторный детектор

Таблица 2

Относительные выходы нейтронов из конструкции мишени

E_d , МэВ	Y , %	$E_n(0^\circ)$ из $D(d, n)$, МэВ
3.17	0.8	6.0
4.08	1.7	7.0
5.06	3.2	8.0

Из представленных в таблице результатов видно, что вклады фоновых нейтронов в исследуемые спектры неупруго рассеянных нейтронов при энергии 6 и 7 МэВ пренебрежимо малы, и результирующие спектры получались как разница измерений с образцом и без образца. При начальной энергии 8 МэВ проводились дополнительные измерения с вакуумированной мишенью с образцом и без образца.

Исследуемый образец из железа устанавливался на расстоянии 16 см от мишени по направлению пучка дейтронов. Образец – полый цилиндр с размерами

$d_{\text{внеш}} = 45$ мм, $d_{\text{внут}} = 30$ мм, $h = 45$ мм. В эксперименте использовался также образец из полиэтилена ($d = 10$ мм, $h = 50$ мм), предназначенный для определения абсолютной нормировки сечения рассеяния нейтронов на железе относительно сечения (n, p)-рассеяния.

Нейтроны регистрировались сцинтилляционным детектором с кристаллом стильбена ($d = 40$ мм, $h = 40$ мм) и фотоумножителем ФЭУ-143. Для уменьшения фона детектор размещался в массивной защите и использовалась электронная дискриминация гамма-лучей. Эффективность детектора ε определялась следующим образом: сначала методом времени пролета измерялся спектр мгновенных нейтронов спонтанного деления ^{252}Cf , при этом в качестве источника нейтронов использовалась специально спроектированная быстрая ионизационная камера деления в той же геометрии эксперимента; затем из сравнения измеренного и стандартного спектров [16] находилась эффективность детектора.

Для контроля выхода нейтронов из мишени, стабильности спектрометра и качества импульсного пучка использовался мониторный детектор на основе быстрого пластического сцинтиллятора и фотоумножителя ФЭУ-82, с помощью которого регистрировались пики нейтронов и γ -квантов из мишени. Выход нейтронов из мишени контролировался всеволновым счетчиком, расположенным на расстоянии 300 см от мишени, не чувствительным к γ -излучению и обладающим не зависящей от энергии нейтронов эффективностью и высокой стабильностью. Системы регистрации, накопления и обработки экспериментальной информации спектрометра подробно описаны в [15].

Сечения рассеяния нейтронов определялись из нормировки на сечение (n,p)-рассеяния, известного с точностью около 1%, согласно выражению

$$\sigma(\theta, E_n) = N(\theta, E_n) \cdot (\varepsilon(E_{n,p})/\varepsilon(E_n)) \cdot (\sigma_{n,p}(\theta_{n,p})/N_{n,p}) \cdot (N_m^{n,p}/N_m) \cdot (M_H/M), \quad (1)$$

где $\sigma_{n,p}(\theta_{n,p}) = \sigma_{n,p} \cdot \cos(\theta_{n,p})/\pi$ – дифференциальное сечение (n,p)-рассеяния под углом $\theta_{n,p}$; $N(\theta, E_n)$, $N_{n,p}$ – количества зарегистрированных событий в измеренных спектрах при энергии E_n и в пике рассеяния на полиэтиленовом образце; ε – эффективность детектора нейтронов; N_m , $N_m^{n,p}$ – количества событий, зарегистрированных монитором; M , M_H – количества ядер в исследуемом образце железа и водорода в полиэтиленовом образце соответственно. Поправки на многократное рассеяние и ослабление нейтронов в образце рассчитывались методом Монте-Карло.

Результаты измерений спектров неупруго рассеянных нейтронов на ядрах железа при начальных энергиях 6, 7 и 8 МэВ представлены на рис. 4. Погрешности измерения включают в себя статистическую ошибку, которая изменялась от 4 до 15% в зависимости от энергии нейтронов, ошибку мониторирования 3% и ошибку нормировки 3.5%.

МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

Для правильной экстраполяции измеренных спектров от минимальной энергии регистрируемых нейтронов к нулевой потребовалось проведение модельных расчетов. Расчеты спектров неупруго рассеянных нейтронов выполнены в рамках моделей равновесного и предравновесного распада возбужденных ядер и прямого взаимодействия. Для описания равновесной части дифференциальных сечений использован математический формализм Хаузера-Фешбаха статистической теории ядерных реакций, точно учитывающий законы сохранения спина и четности, а также характеристики низколежащих уровней остаточного ядра [17]. Следует отметить, что ядро ^{56}Fe имеет хорошо исследованную структуру уровней вплоть до энергии 5 МэВ, что является хорошим основанием для определения модельных параметров плотности ядерных уровней ^{56}Fe , возбуждаемых в нейтронном канале, в интервале энергии возбуждения от 5 до 8 МэВ. Параметры плотности ядерных уровней ^{56}Mn и ^{53}Cr ,

возбуждаемых в протонном и α -каналах, определялись по имеющимся экспериментальным данным для низколежащих уровней и нейтронных резонансов [18]. Расчет предравновесной эмиссии нейтронов выполнен в рамках экситонной модели [19], в которой учтены поверхностные, оболочечные и парные эффекты. Вклад прямых переходов рассчитывался методом сильной связи каналов.

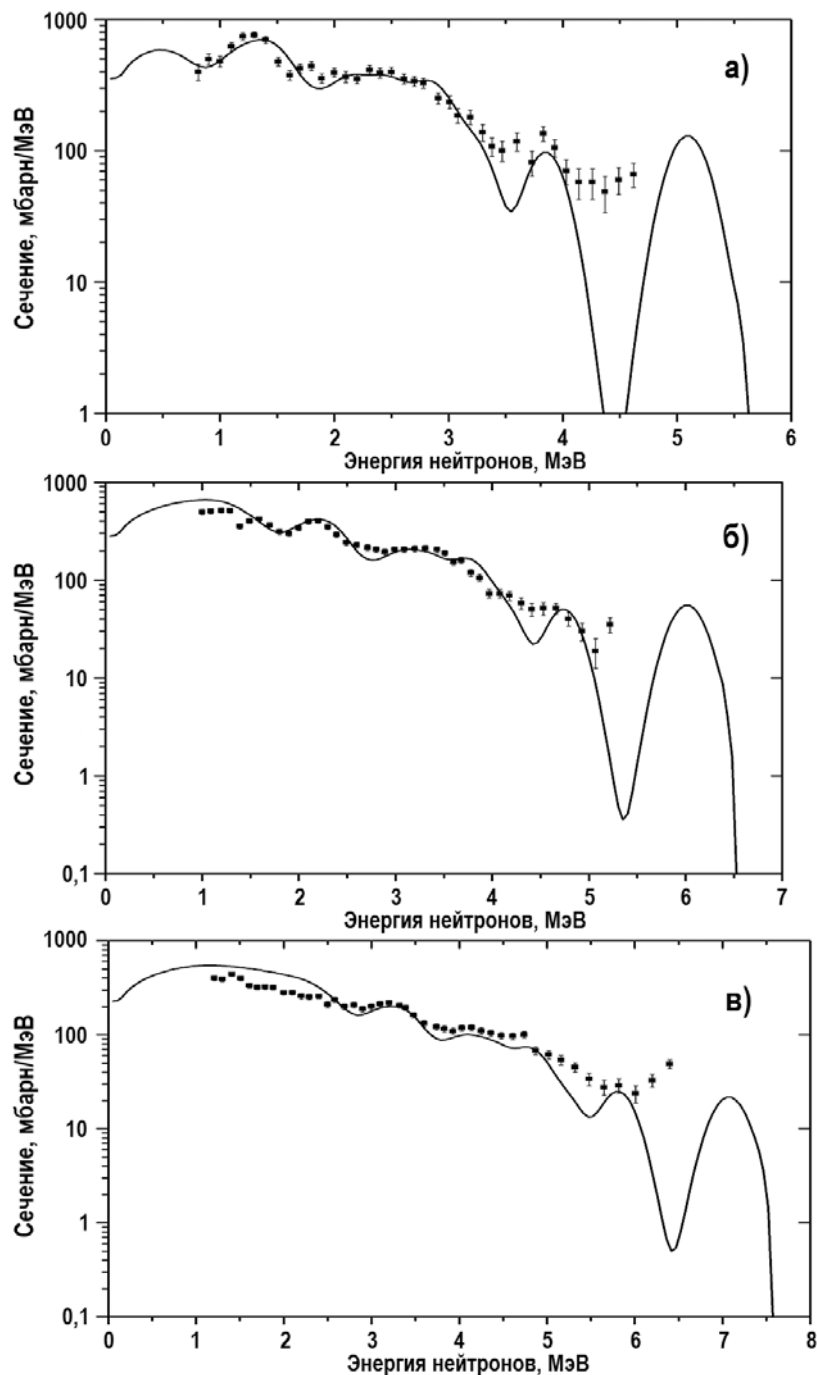


Рис. 4. Спектры неупруго рассеянных нейтронов на железе с начальной энергией а) – 6 МэВ; б) – 7 МэВ; в) – 8 МэВ (символы – эксперимент, кривая – расчет)

Все расчеты в рамках оптико-статистических моделей равновесного и предравновесного распадов возбужденных ядер проведены по модернизированной программе GNASH [20], позволяющей проследить за распадом возбужденного составного ядра с учетом эмиссии нейтронов, протонов, α -частиц и γ -квантов. Для нейтронов и протонов использовался оптический потенциал [21], для α -частиц – [22]. Рассчитанные спектры для сравнения с экспериментальными данными усреднялись по энергии возбуждения согласно нормальному распределению. Дисперсия распределения соответствовала разрешению спектрометра. Для корректной экстраполяции экспериментальных данных рассчитанные спектры нормировались на результаты измерений. Результаты расчетов для всех трех начальных энергий нейтронов показаны на рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В целом отмечается удовлетворительное согласие расчетов и эксперимента. Наблюдаемые различия при высоких энергиях рассеянных нейтронов связаны, видимо, с процедурой выделения в эксперименте упругого рассеяния и некоторым отличием реальной функции отклика спектрометра и используемой при усреднении расчетных спектров. Превышение расчета над экспериментом при начальной энергии нейтронов 8 МэВ для рассеянных нейтронов около 2 МэВ может быть связано как с погрешностью в измерении из-за увеличения фона, так и с неопределенностью в плотности ядерных уровней ^{56}Fe , используемой в расчете, в переходной области между дискретными уровнями и континуумной частью спектра возбуждений.

Результаты проинтегрированных по энергии сечений неупругого рассеяния нейтронов представлены в табл. 3 и на рис. 7, 8.

Таблица 3

Сечения неупругого рассеяния нейтронов на железе

E_0 , МэВ	6.0	7.0	8.0	7.0 [1]	7.0 [2]	9.1 [3]
σ , барн	1.52 ± 0.14	1.49 ± 0.12	1.45 ± 0.12	1.3 ± 0.1	1.40 ± 0.06	1.49 ± 0.17

Видно, что полученные результаты согласуются в пределах погрешностей с данными других работ при близких начальных энергиях нейтронов, представленных в библиотеке экспериментальных данных EXFOR [1 – 3].

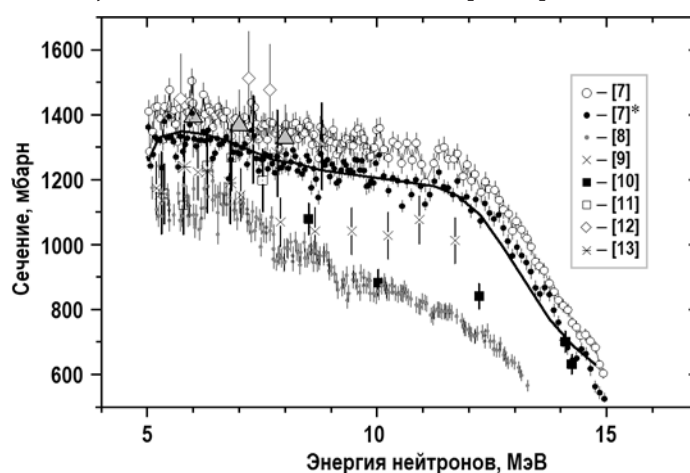


Рис. 5. Сечение образования γ -квантов с энергией 847 кэВ в реакции $^{56}\text{Fe}(n, n'\gamma)$: кривая – БРОНД-3; Δ – полученные данные; [7]* – данные [7], скорректированные авторами в 2013 г. (EXFOR-14118)

На рисунке 5 представлены данные по сечению образования γ -квантов с энер-

гией 847 кэВ в реакции $^{56}\text{Fe}(n, n'\gamma)$. Данные настоящей работы (как и оценки библиотек БРОНД-2.2 и БРОНД-3) умножены на коэффициент 0.918 (доля ^{56}Fe в естественном составе железа) для корректного сравнения сечений образования γ -квантов с энергией 847 кэВ в реакции $^{56}\text{Fe}(n, n'\gamma)$ с неупругим рассеянием на железе. Видно, что полученные результаты согласуются в пределах погрешностей измерения с данными работы по измерению сечения образования γ -квантов с энергией 847 кэВ в реакции $^{56}\text{Fe}(n, n'\gamma)$, выполненной в Лос-Аламосе [7], и очень хорошо согласуются с новыми данными, полученными на фотонейтронном источнике nELBE [23] (рис. 6).

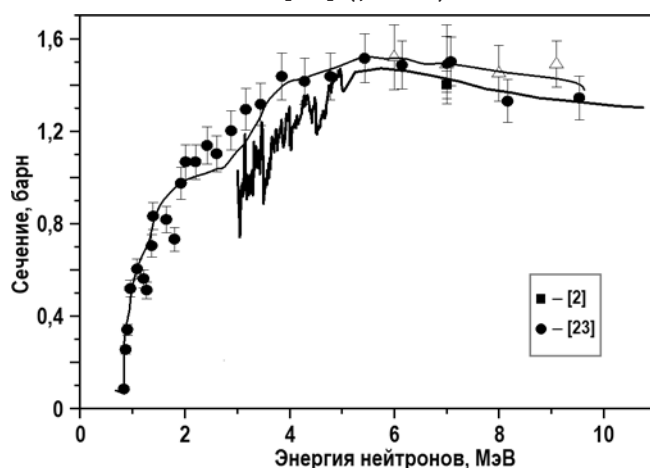


Рис. 6. Сечение неупругого рассеяния нейтронов на ^{56}Fe : Δ – данная работа; верхняя кривая – расчет по программе TALYS [23]; нижняя кривая – БРОНД-3

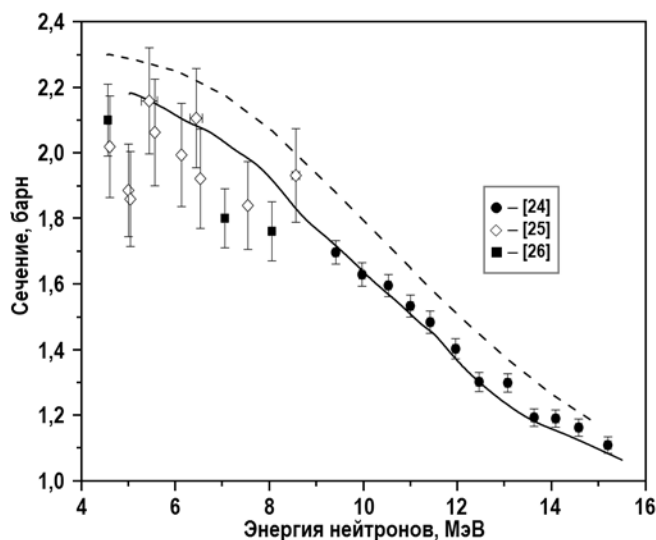


Рис. 7. Сечение упругого рассеяния нейтронов на железе: штриховая кривая – БРОНД-2.2; сплошная кривая – БРОНД-3

На рисунке 7 сравниваются оцененные данные по упругому рассеянию на железе с результатами экспериментальных работ, представленных в библиотеке EXFOR [24 – 26]. Библиотека БРОНД-2.2 приблизительно на ту же величину переоценивает экспериментальные данные по упругому рассеянию нейтронов на железе в интервале энергий от 5 до 15 МэВ, что и недооценивает в неупругом рассеянии в сравнении с настоящими данными и данными работ [7, 23]. Взаимная корректировка

сечений упругого и неупругого рассеяний нейтронов на железе приведет к сохранению сечения полного взаимодействия, измеренного с хорошей точностью. Оценка неупругого рассеяния на железе в библиотеке БРОНД-3 существенно лучше согласуется с данными работы [7], скорректированными авторами в 2013 г. (EXFOR-14118), но результаты этой работы и работы [23] указывают на возможность некоторой корректировки оцененных данных в сторону их увеличения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектры неупруго рассеянных на железе нейтронов измерены при начальной энергии 6.0, 7.0 и 8.0 МэВ.

Проведены расчеты спектров в рамках статистической теории ядерных реакций и прямого взаимодействия с возбуждением коллективных состояний.

Полученные результаты согласуются в пределах погрешностей с данными работ [7] и [23], указывая на необходимость корректировки оценки данных библиотеки БРОНД-2.2 для сечения неупругого рассеяния на железе в сторону его увеличения и, возможно, небольшой корректировки оценки БРОНД-3.

Литература

1. Thomson D.B. Nuclear level densities and reaction mechanisms from inelastic neutron scattering. // Phys. Rev. – 1963. – Vol. 129. – PP. 1649-1659.
2. Towle J.N., Owens R.O. Absolute level densities from neutron inelastic scattering. // Nucl. Phys. A. – 1967. – Vol. 100. – PP. 257-266.
3. Бирюков Н.С., Журавлев Б.В., Корнилов Н.В., Пляскин В.И., Руденко А.П., Сальников О.А., Трыкова В.И. Угловые и энергетические распределения неупругорассеянных нейтронов с начальной энергией 9,1 МэВ. / Труды Межд. конференции по нейтронной физике (Киев, 9-13 июня 1975 г.). – М.: ЦНИИАтоминформ, 1976. – Т. 4. – С. 118-123.
4. Сальников О.А., Ловчикова Г.Н., Девкин Б.В., Труфанов А.М., Котельникова Г.В. Дифференциальные сечения неупругого рассеяния нейтронов на ядрах Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Y, Zr, Nb, W, Bi. // ВАНТ. Сер. «Ядерные Константы». – 1971. – Т. 7. – С. 102-112.
5. Orphan V.J. Gamma-ray production cross-sections for iron from 0.86 to 16.7 MeV. // Nuclear Science and Engineering. – 1975. – Vol. 57. – PP. 309-316.
6. Fujita I. Inelastic scattering of 14 MeV neutrons by medium weight nuclei. // J. of Nuclear Science and Technology. – 1973. – Vol. 9. – PP. 301-309.
7. Nelson R.O., Fotiades N., Devlin M., Becker J.A., Garrett P.E., Younes W. Cross-section standards for neutron-induced gamma-ray production in the MeV energy range. / Proc. of the Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Santa Fe, USA, 26 September – 1 October 2004. – AIP Conference Proceedings, 2005. – Part 1. – PP. 838-841.
8. Voss F., Cierjacks S., Kropp L. Cross-section of gamma-ray production for iron. Report KFK – 1494, Karlsruhe, 1971.
9. Dickens J.K., Fu C.Y. Cross-section of gamma-ray production on iron in neutron energy range from 0.8 to 20 MeV. Report ORNL-TM-11671, Oak Ridge, 1990.
10. Simakov S.P., Pavlik A., Vonach H., Hlavac S. Evaluation of cross-section gamma-ray production for iron. IAEA Report INDC (ССР)-413, Vienna, 1998.
11. Савин М.В., Ливке А.В., Звенигородский А.Г. Оценка полных сечений образования гамма-квантов при неупругом взаимодействии быстрых нейтронов с ядрами железа. // ВАНТ. Сер. «Ядерные Константы». – 1999. – Вып. 2. – С. 77-90.
12. Drake D.M., Hopkins J.C. Gamma-ray production cross-section on iron. // J. Nucl. Sci. Eng. – 1970. – Vol. 40. – PP. 294-303.
13. Lachkar J., Sigand J. Cross-section (n, n γ) for natural iron. // Nucl. Sci. Eng. – 1974. – Vol. 55. – PP. 168-175.
14. Журавлев Б.В., Корнилов Н.В., Барыба В.Я., Трыкова В.И. Спектры нейтронов, неупруго рассеянных ядрами Fe и Nb при начальных энергиях 6, 7, 8 МэВ. – Отчет ФЭИ ЭФ-1569. –

Физико-энергетический институт, Обнинск. 1978.

15. Деменков В.Г., Журавлев Б.В., Лычагин А.А., Трыкова В.И. Многодетекторный спектрометр быстрых нейтронов по времени пролета. // Приборы и техника эксперимента. – 1995. – № 3. – С. 43-49.

16. Mannhart W. Evaluation of the ^{252}Cf fission neutron spectrum between 0 and 20 MeV. Report IAEA TECDOC-410, Vienna, 1987.

17. Hauser W., Feshbach H. The inelastic scattering of neutrons. // Phys. Rev. – 1952. – Vol. 87. – PP. 366-377.

18. ENSDF - Библиотека оцененных данных по ядерной структуре и распаду. Электронный ресурс: <http://www-nds.iaea.or.at/> (дата доступа 11.01.2017).

19. Kalbach C. Preequilibrium exciton model. // Z. Phys. A, – 1997. – V. 283. – PP. 40-65.

20. Young P.G., Arthur E.D., Chadwick M.B.. Comprehensive nuclear model calculations: theory and use of the GNASH code. / Proc. of IAEA Workshop on Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors Physics, Design and Safety. Trieste, Italy, 15 April – 17 May 1996. Ed. Oblozinsky P. – Singapore: World Sci. Publ. Ltd., 1998. – Vol. 1. – 227 p.

21. Koning A.J., Delaroche J.D. Phenomenological optical model potentials for neutrons and protons. // Nucl. Phys. A. – 2003. – Vol. 713. – PP. 231-239.

22. Avrigeanu V., Hodgson P.I., Avrigeanu M. Global optical potentials for emitted alpha particles. // Phys. Rev. C. – 1994. – Vol. 49. – PP. 2136-2146.

23. Beyer R., Schwengner R., Hannaske R., Junghans A.R., Massarczyk R., Anders M., Bemmerer D., Ferrari A., Hartmann A., Kogler T., Roder M., Schmidt K., Wagner A. Inelastic scattering of fast neutrons from excited states in ^{56}Fe . // Nuclear Physics A. – 2014. – Vol. 927. – PP. 41-53.

24. Schmidt D., Mannhart W. Elastic and inelastic neutron scattering on elemental iron. Report PTB-N-20, Braunschweig, 1994.

25. Kinney W.E., Perey F.G. Neutron elastic and inelastic scattering cross sections for ^{56}Fe in the energy range 4.19 to 8.56 MeV. Report ORNL-4515, Oak Ridge, 1970.

26. Holmquist B., Wiedling T. Neutron elastic scattering cross sections: experimental data and optical model cross section calculations. // Nucl. Phys. A. – 1968. – Vol. 38. – PP. 403-413.

Поступила в редакцию 07.02.2017 г.

Авторы

Журавлев Борис Васильевич, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.,

E-mail: zhurav@ippe.ru

Титаренко Николай Николаевич, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.

E-mail: titan@ippe.ru

UDC 621.039

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF NEUTRON INELASTIC SCATTERING CROSS SECTION ON IRON

Zhuravlev B.V., Titarenko N.N.

JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»

1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

The experimental verification of neutron inelastic scattering cross section on iron have been performed on the basis of neutron inelastic spectra measurements at neutron incident energies of 6.0, 7.0 and 8.0 MeV and their calculations in the framework of nuclear reactions statistical theory and direct interaction. Cross sections of neutron reactions present great interest in the context of nuclear technology. Iron is a structural material for different nuclear energy plant and has been proposed as gamma-ray cross-section standard. In spite of a big efforts agreement between the various measurements is poor and various data evaluations reflect this situation. The measurements of the inelastic scattering neutron spectra were performed by the time-of-flight fast-neutron spectrometer on the base of the EGP-10M pulsed tandem accelerator of the Institute for Physics and Power Engineering (IPPE, Obninsk). An analysis of measured data have been performed with use of the Hauser-Feshbach mathematical formalism of the statistical model for equilibrium emission, preequilibrium model and direct mechanism of nuclear reactions. The results of present work agree in the limits of the measurement errors with data of work on the measurement of gamma-ray production cross-sections performed in Los Alamos [7] and with new data obtained at the photo-neutron source nELBE [23]. The obtained results show on need of correct of library of recommended evaluated neutron data BROND-2.2 for inelastic scattering cross section on iron in the direction of their increase and possible small correct of library of recommended evaluated neutron data BROND-3.

Key words: inelastic neutron scattering, neutron spectra, time-of-flight method, verification of evaluated neutron data.

REFERENCES

1. Thomson D.B. Nuclear level densities and reaction mechanisms from inelastic neutron scattering. *Phys. Rev.*, 1963, v. 129, pp. 1649-1659.
2. Towle J.N., Owens R.O. Absolute level densities from neutron inelastic scattering. *Nucl. Phys. A*, 1967, v. 100, pp. 257-266.
3. Biryukov N.S., Zhuravlev B.V., Kornilov N.V., Plyaskin V.I., Rudenko A.P., Sal'nikov O.A., Trykova V.I. Angular and energy distribution of inelastic scattering neutrons at initial energy of 9.1 MeV. Proc. Int. Conf. on Neutron Physics (Kiev, 9 – 13 June 1975). Moscow. CNIIAtominform Publ., 1976, v. 4, pp. 118-123 (in Russian).
4. Sal'nikov O.A., Lovchikova G.N., Devkin B.V., Trufanov A.M., Kotel'nikova G.V. Differential neutron inelastic cross sections on nuclei of Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Y, Zr, Nb, W, Bi. *VANT. Ser. Yadernye Konstanty*. 1971, v. 7, pp. 102-112 (in Russian).
5. Orphan V.J. Gamma-ray production cross-sections for iron from 0.86 to 16.7 MeV. *Nuclear Science and Engineering*, 1975, v. 57, pp. 309-316.
6. Fujita I. Inelastic scattering of 14 MeV neutrons by medium weight nuclei. *J. of Nuclear Science and Technology*, 1973, v. 9, pp. 301-309.
7. Nelson R.O., Fotiades N., Devlin M., Becker J.A., Garrett P.E., Younes W. Cross-section standards for neutron-induced gamma-ray production in the MeV energy range. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Santa Fe, USA, 26 September – 1 October

2004. AIP Conference Proceedings, 2005, part 1, pp. 838-841.
8. Voss F., Cierjacks S., Kropp L. Cross-section of gamma-ray production for iron. Report KFK-1494, Karlsruhe, 1971.
 9. Dickens J.K., Fu C.Y. Cross-section of gamma-ray production on iron in neutron energy range from 0.8 to 20 MeV. Report ORNL-TM-11671, Oak Ridge, 1990.
 10. Simakov S.P., Pavlik A., Vonach H., Holavac S. Evaluation of cross-section gamma-ray production for iron. IAEA IAEA Report INDC (CCP)-413, Vienna, 1998.
 11. Savin M.V., Livke A.V., Zvenigorodskiy A.G. Evaluation of total gamma-ray production cross sections at inelastic interaction of fast neutrons with nuclei of iron. *VANT. Ser. Yadernye Konstanty*. 1999, v. 2, pp. 77-90 (in Russian).
 12. Drake D.M., Hopkins J.C. Gamma-ray production cross-section on iron. *J. Nucl. Sci. Eng.*, 1970, v. 40, pp. 294-303.
 13. Lachkar J., Sigand J. Cross-section (n, n γ) for natural iron. *Nucl. Sci. Eng.*, 1974, v. 55, pp. 168-175.
 14. Zhuravlev B.V., Kornilov N.V., Baryba V.Ya., Trykova V.I. Neutron inelastic scattering spectra on nuclei of Fe and Nb at initial energies of 6, 7, 8 MeV. Report IPPE EF-1569. Obninsk. 1978 (in Russian).
 15. Demenkov V.G., Zhuravlev B.V., Lychagin A.A., Trykova V.I. Spectrometer of fast neutrons by time-of-flight method. *Pribery i Tekhnika Experimenta*, 1995, v. 3, pp. 43-49 (in Russian).
 16. Mannhart W. Evaluation of the ²⁵²Cf fission neutron spectrum between 0 and 20 MeV. Report IAEA TECDOC-410, Vienna, 1987.
 17. Hauser W., Feshbach H. The Inelastic Scattering of Neutrons. *Phys. Rev.*, 1952, v. 87, pp. 366-377.
 18. ENSDF - Library of evaluated data on nuclear structure and decay. Available at: <http://www.nds.iaea.or.at/> (accessed 11 Jan 2017).
 19. Kalbach C. Preequilibrium exciton model. *Z. Phys. A*, 1997, v. 283, pp. 40-65.
 20. Young P.J., Arthur E.D., Chadwick M.D. Comprehensive nuclear model calculations: theory and use of the GNASH code. Proc. of IAEA Workshop on Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors Physics, Design and Safety, Trieste, Italy, 15 April – 17 May 1996. Ed. Oblozinsky P. Singapore. World Sci. Publ. Ltd., 1998, v. 1, 227 p.
 21. Koning A.J., Delaroche J.D. Phenomenological optical model potentials for neutrons and protons. *Nucl. Phys. A*, 2003, v. 713, pp. 231-239.
 22. Avrigeanu V., Hodgson P.I., Avrigeanu M. Global optical potentials for emitted alpha particles. *Phys. Rev. C*, 1994, v. 49, pp. 2136-2146.
 23. Beyer R., Schwengner R., Hannaske R., Junghans A.R., Massarczyk R., Anders M., Bemmerer D., Ferrari A., Hartmann A., Kogler T., Roder M., Schmidt K., Wagner A. Inelastic scattering of fast neutrons from excited states in ⁵⁶Fe. *Nucl. Phys. A*, 2014, v. 927, pp. 41-53.
 24. Schmidt D., Mannhart W. Elastic and inelastic neutron scattering on elemental iron. Report PTB-N-20, Braunschweig, 1994.
 25. *Kinney W.E., Perey F.G.* Neutron elastic and inelastic scattering cross sections for ⁵⁶Fe in the energy range 4.19 to 8.56 MeV. Report ORNL-4515, Oak Ridge, 1970.
 26. Holmquist B., Wiedling T. Neutron elastic scattering cross sections: experimental data and optical model cross section calculations. *Nucl. Phys. A*, 1968, v. 38, pp. 403-413.

Authors

Zhuravlev Boris Vasil'evich, Chief Researcher, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: zhurav@ippe.ru

Titareno Nikolai Nikolaevich, Leading Researcher, Cand.Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: titan@ippe.ru