

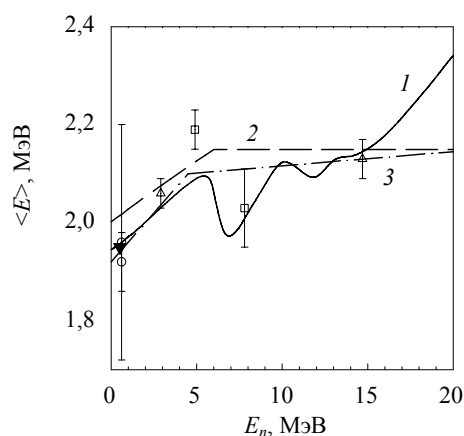
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 539.172.4

СРЕДНЯЯ ЭНЕРГИЯ СПЕКТРОВ МГНОВЕННЫХ НЕЙТРОНОВ ДЕЛЕНИЯ ^{237}Np И ^{241}Am

Маслов В.М. (ОИЭЯИ — Сосны, Республика Беларусь)

Использование ^{237}Np в ядерных реакторах или электроядерных установках потребует для этого ядра существенного уточнения нейтронных данных, в особенности спектров мгновенных нейтронов деления и их средней энергии. Экспериментальные спектры мгновенных нейтронов деления для реакции $^{237}\text{Np}(n, F)$ имеются лишь для ограниченного набора энергии налетающих нейтронов [1—4] (рис. 1). Теоретические методы анализа и предсказания таких спектров [5, 6] не в состоянии представить согласованную и детальную оценку зависимости спектров мгновенных нейтронов от энергии налетающих нейтронов в диапазоне $E_n = 0,5\text{—}20$ МэВ. Представляется многообещающим использование теоретического подхода, апробированного на примере $^{232}\text{Th}(n, F)$, $^{235}\text{U}(n, F)$ и $^{238}\text{U}(n, F)$ [7—9] для энергии нейтронов E_n как ниже, так и выше порога эмиссионного деления, когда наряду с реакцией деления первого шанса (n, f) возможна реакция эмиссионного деления (n, xnf) с вылетом до деления $x (\geq 1)$ нейтронов. Здесь (n, F) означает сумму реакций (n, f) и (n, xnf) . Таким образом были предсказаны спектры мгновенных нейтронов деления реакции $^{239}\text{Pu}(n, F)$ [10], их детальные экспериментальные исследования планируются в США и Франции [11].



Р и с. 1. Средняя энергия спектра мгновенных нейтронов деления для реакции $^{237}\text{Np}(n, F)$: 1 — настоящая работа; 2 — ENDF/B VII.0 [12]; 3 — JENDL-3.3 [13]; $\circ$ — [4]; $\square$ — [2]; $\triangle$ — [1]; $\blacktriangledown$ — [3]

В области энергии возбуждения эмиссионного деления вклад в наблюдаемые спектры мгновенных нейтронов деления вносят как пред-, так и постделительные нейтроны. Снижение средней энергии спектра мгновенных нейтронов деления вблизи порога реакций второго $^{237}\text{Np}(n, nf)$ и третьего шанса деления $^{237}\text{Np}(n, 2nf)$, подробно исследованное для ядер-мишеней ^{235}U и ^{238}U экспериментально, существенно зависит от относительного вклада в наблюдаемое сечение деления $^{237}\text{Np}(n, F)$ реакций первого $^{237}\text{Np}(n, f)$ и последующих шансов деления $^{237}\text{Np}(n, xnf)$. Постделительные мгновенные нейтроны испускаются первичными осколками деления. Анализ спектров мгновенных нейтронов реакций $^{232}\text{Th}(n, F)$, $^{235}\text{U}(n, F)$ и $^{238}\text{U}(n, F)$ показал, что многие их особенности скоррелированы с влиянием предделительных нейтронов (n, xnf) . Например, для $E_n > E_{n,2nf}$, где $E_{n,2nf}$ — порог реакции $(n, 2nf)$, ступенчатые особенности спектров мгновенных нейтронов реакций $^{238}\text{U}(n, F)$ и $^{232}\text{Th}(n, F)$ при энергии $\epsilon \sim 3\text{—}5$ МэВ обусловлены первым нейтроном реакции $(n, 2nf)$ [7, 8]. Особенности формы спектров, проявляющиеся в средней энергии $\langle E \rangle$, тесно связаны с шансовой структурой (n, xnf) наблюдаемых сечений деления. Делимость исходного составного ядра ^{238}Np существенно выше делимости ядер ^{239}U и ^{236}U , чем ядер-мишеней ^{238}U и ^{235}U соответственно, поэтому вариации средней энергии заведомо меньшего масштаба, но все же достаточно существенны, как видно из формы спектра мгновенных нейтронов для $E_n = 7,8$ МэВ [2], вблизи порога реакции $^{237}\text{Np}(n, nf)$.

Файлы оцененных нейтронных ядерных данных ENDF/B VII.0 [12], JENDL-3.3 [13] и BROND [14] для ядра ^{237}Np игнорируют влияние предделительных нейтронов (n, xnf) на среднюю энергию спектров мгновенных нейтронов (см. рис. 1). Такие спектры вблизи порога деления исследованы в двух опытах [3, 4]. При более высокой энергии налетающих нейтронов $E_n \leq E_{n,nf}$ экспериментальные оценки средней энергии [1, 2] противоречивы. При энергии $E_n \geq E_{n,nf}$, где $E_{n,nf}$ — порог реакции (n, nf) , теоретическая оценка спектров мгновенных нейтронов деления для ре-

акции $^{237}\text{Np}(n, F)$ может быть получена с помощью моделирования вклада пред- и постделительных нейтронов.

Модель для расчета спектров мгновенных нейтронов. Для расчета спектров мгновенных нейтронов реакции $^{237}\text{Np}(n, F)$ для $E_n > E_{n, \text{nf}}$ использовали статистическую модель [7—10]. Вклад безэмиссионного/эмиссионного деления и эксклюзивные спектры нейтронов реакций $^{237}\text{Np}(n, xnf)$ определены согласованным описанием сечений деления $^{237}\text{Np}(n, F)$ и реакции $^{237}\text{Np}(n, 2n)^{236}\text{Np}$ [15]. Энергетическая зависимость спектров мгновенных нейтронов деления $^{237}\text{Np}(n, F)$ для $\varepsilon < E_{\text{th}} \sim E_n - B_f$, где B_f — эффективный барьер деления ^{237}Np , определяется делимостью остаточного ядра ^{237}Np . Относительный вклад реакций (n, nf) и $(n, 2nf)$ в сечение деления $^{237}\text{Np}(n, F)$ значительно ниже, чем в случае реакций $^{235}\text{U}(n, F)$, тем не менее первый и второй предделительные нейтроны заметно влияют на форму спектров мгновенных нейтронов деления.

В области энергии падающих нейтронов E_n , превышающей порог эмиссионного деления, спектр мгновенных нейтронов есть суперпозиция спектра предделительных k -нейтронов $d\sigma_{n, xnf}^k/d\varepsilon$ реакций (n, xnf) , где $k \leq x$, и спектров $S_{A+2-x}(\varepsilon, E_n)$ постделительных нейтронов ($A = 237$), испаряющихся из осколков деления [7—10]. Индекс x означает множественность для шанса деления ядер ^{238}Np , ^{237}Np , ^{236}Np и ^{235}Np после эмиссии $(x-1)$ предделительных нейтронов.

Спектры $S_{A+2-x}(\varepsilon, E_n)$ нейтронов, испаряющихся из осколков деления, рассчитывали как сумму двух распределений Уатта, соответствующих легкому и тяжелому осколкам, отношение кинетической энергии в момент эмиссии нейтронов к кинетической энергии после полного ускорения осколков $\alpha = 0,808$ для ^{238}Np , ^{237}Np , ^{236}Np и ^{235}Np [16]. Для определения числа постделительных нейтронов $\nu_x(E_n)$ выше порога эмиссионного деления использовали низкоэнергетические данные о множественности мгновенных нейтронов деления для ядер нептуния и систематику [17].

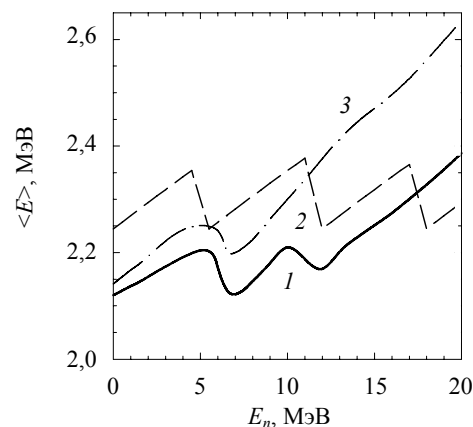
Оценки ENDF/B VII.0 [12] и JENDL-3.3 [13], основанные на расчетах по модели [18], некорректно моделируют спектр предделительных нейтронов и не могут предсказать вариацию средней энергии спектров мгновенных нейтронов деления в зависимости от E_n .

Эволюция вклада предделительных нейтронов реакции (n, nf) при $E_n = 7,8$ МэВ [2] и $E_n = 14,7$ МэВ [1] обусловлена увеличением пороговой энергии $E_{\text{th}} \sim E_n - B_f$ для эмиссии высокоэнергетических предделительных нейтронов. Оценки спектров мгновенных

нейтронов деления ENDF/B VII.0 [12] и JENDL-3.3 [13] это обстоятельство игнорируют. Оценка БРОНД [14] совпадает с оценкой ENDF/B VII.0 [12].

Расчетная зависимость $\langle E \rangle$ для $^{237}\text{Np}(n, F)$, полученная в настоящей работе, аналогична наблюдаемой для спектров мгновенных нейтронов Z -четных ядер-мишеней [7—10]. Настоящая оценка $\langle E \rangle$ для безэмиссионного деления поддерживается данными [2] при $E_n = 7,8$ МэВ. Спектры мгновенных нейтронов деления при $E_n = 14,7$ МэВ [1] также хорошо воспроизводятся в данной модели, тогда как оценка [12] существенно искажает форму наблюдаемого спектра.

Для реакции $^{241}\text{Am}(n, F)$ спектры мгновенных нейтронов деления экспериментально не исследованы. Широко используемые расчеты по модели [18] не позволяют обоснованно воспроизвести влияние предделительных нейтронов на спектры мгновенных нейтронов деления даже в случае наиболее подробно исследованной реакции $^{238}\text{U}(n, F)$ [19]. Для энергии налетающих нейтронов выше порога реакции $^{241}\text{Am}(n, F)$ оценки средней энергии $\langle E \rangle$ [12, 20], полученные по модели [18], существенно различаются (рис. 2). Это обусловлено не столько различными оценками энерговыделения и кинетической энергии осколков, сколько некорректным определением шансов эмиссионного деления для реакции $^{241}\text{Am}(n, F)$ [12] и необоснованными приближениями, использованными при расчете спектров предделительных нейтронов [12, 20]. Обоснованность относительного вклада реакций $^{241}\text{Am}(n, f)$ и $^{241}\text{Am}(n, nf)$ в полное сечение деления $^{241}\text{Am}(n, F)$, предсказанных исследованиями [20, 21], подтверждена экспериментальными данными для реакции $^{241}\text{Am}(n, 2n)$ [22]. Это позволяет считать обоснованной и оценку влияния предделительных нейтронов на спектры и среднюю энер-



Р и с. 2. Средняя энергия спектра мгновенных нейтронов деления для реакции $^{241}\text{Am}(n, F)$: 1 — настоящая работа; 2 — ENDF/B VII.0 [12]; 3 — [20]

гию мгновенных нейтронов деления в реакции $^{241}\text{Am}(n, F)$, полученные с помощью рассматриваемой модели (см. рис. 2).

Заключение. Анализ спектров мгновенных нейтронов деления реакции $^{237}\text{Np}(n, F)$ показал, что особенности наблюдаемых спектров для $E_n = 7,8$ МэВ и $E_n = 14,7$ МэВ могут быть скоррелированы с влиянием предделительных нейтронов, испускаемых в реакциях (n, xnf) . Предсказанные вариации средней энергии мгновенных нейтронов деления должны иметь существенное значение для нейтронно-физических расчетов активной зоны с высокоэнергетическим нейтронным спектром. Влияние предделительных нейтронов на среднюю энергию мгновенных нейтронов реакции $^{237}\text{Np}(n, F)$, а также реакции $^{241}\text{Am}(n, F)$ существенно, однако слабее, чем для реакции $^{235}\text{U}(n, F)$, особенно вблизи порога реакций (n, xnf) . Это связано с большим вкладом безэмиссионного деления для реакций $^{237}\text{Np}(n, F)$ и $^{241}\text{Am}(n, F)$ в наблюдаемые сечения и спектры мгновенных нейтронов деления.

Таким образом, можно утверждать, что корректная оценка спектров предделительных нейтронов, испускаемых в реакции (n, xnf) , и простое моделирование спектров нейтронов из осколков деления позволяют воспроизвести экспериментальные спектры мгновенных нейтронов деления и предсказать вариацию средней энергии нейтронов деления для реакций $^{237}\text{Np}(n, F)$ и $^{241}\text{Am}(n, F)$ под действием нейтронов энергией до 20 МэВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойков Г.С., Дмитриев В.Д., Свирин М.И. и др. Спектры нейтронов при делении ^{237}Np под действием нейтронов с энергией 2,9 МэВ и 14,7 МэВ. — Ядерная физика, 1994, т. 57, вып. 12, с. 2126—2136.
2. Труфанов А.М., Ловчикова Г.Н., Сухих С.Э. и др. Энергетические распределения нейтронов деления ^{237}Np . — Там же, 1992, т. 55, вып. 2, с. 289—303.
3. Kornilov N.V., Kagalenko A.B., Baryba V.Ya. e.a. Inelastic neutron scattering and prompt neutron spectra for ^{237}Np . — In: Proc. of Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology. Trieste, Italy, May 19—24, 1997, p. 577—579.
4. Than Win, Baba M., Ibaraki M. e.a. Measurement of prompt fission neutron spectrum of Neptunium-237 for 0.62 MeV. — J. Nucl. Sci. Technol., 1999, v. 36, p. 486—494.
5. During I., Marten H., Ruben A. e.a. Systematic of fission neutron data. — In: Nuclear Data for Neutron Emission in the Fission Process. Proc. Consult. Meeting. INDS(NDS)-251. Vienna: IAEA, 1990, p. 159—170.
6. Vladuca G., Tudora A., Morillon B. e.a. Inner barrier shape symmetries in ^{237}Np neutron data up to 40 MeV incident energies. — Nucl. Phys. A, 2006, v. 767, p. 112—137.
7. Maslov V.M., Porodzinskij Yu.V., Baba M. e.a. Prompt fission neutron spectra of ^{238}U and ^{232}Th above emissive fission threshold. — Phys. Rev. C, 2004, v. 69, p. 034607(1)—34607(13).
8. Maslov V.M., Kornilov N.V., Kagalenko A.B. e.a. Prompt fission neutron spectra of ^{235}U above emissive fission threshold. — Nucl. Phys. A, 2005, v. 760, p. 274—302.
9. Maslov V.M. ^{235m}U and ^{235}U neutron-induced fission. — In: Abstracts of Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology. Nice, France, April 22—27, 2007, p. 54.
10. Маслов В.М. Спектры мгновенных нейтронов деления ^{239}Pu . — Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 3, с. 119—124.
11. Haight R. Nuclear data research at Los Alamos Neutron Science Center. — In: Abstracts of Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology. Nice, France, April 22—27, 2007, p. 68.
12. Chadwick M., Obložinskij P., Herman M. e.a. ENDF/B VII.0: next generation evaluated data library for nuclear science and technology. — Nucl. Data Sheets, 2006, v. 107, № 12, p. 2931—3060.
13. Shibata K., Kawano T., Nakagawa T. e.a. Japanese evaluated nuclear data library, version 3 revision-3: JENDL-3.3. — J. Nucl. Sci. Technol., 2002, v. 39, p. 1125—1199.
14. BROND-2. Library of Recommended Evaluated Neutron Data. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1991, вып. 2, с. 1—155.
15. Игнатьюк А.В., Корнилов Н.В., Маслов В.М. и др. Изомерное отношение и сечение реакции $^{237}\text{Np}(n, 2n)$. — Атомная энергия, 1987, т. 63, вып. 2, с. 110—118.
16. Корнилов Н.В., Кагаленко А.Б., Хамбш Ф.-Й. Расчет спектров мгновенных нейтронов деления на основе новой систематики экспериментальных данных. — Ядерная физика, 1999, т. 62, с. 209—220.
17. Малиновский В.В. Полуэмпирический расчет среднего числа мгновенных нейтронов. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1987, вып. 2, с. 25—40.
18. Madland D., Nix J. New calculation of prompt fission neutron spectra and average prompt neutron multiplicities. — Nucl. Sci. Engng, 1982, v. 81, p. 213—271.
19. Маслов В.М. Спектры мгновенных нейтронов деления ^{238}U . — Ядерная физика, 2008, т. 71, № 1, с. 11—27.
20. Maslov V.M., Porodzinskij Yu.V., Klepatskij A.B. e.a. Evaluation of neutron data for Americium-241. INDC(BLR)-005/G. Vienna: IAEA, 1996.
21. Маслов В.М. Анализ сечений деления изотопов америция. — Атомная энергия, 1988, т. 64, вып. 5, с. 422—430.
22. Vieira D., Jandel M., Bredeweg T. e.a. Neutron capture and $(n, 2n)$ measurements on ^{241}Am . — In: Abstracts of Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology. Nice, France, April 22—27, 2007, p. 31.

Поступило в Редакцию 15.06.07