

УДК 539.17,539.143

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ (p,n) РЕАКЦИИ ДЛЯ ЯДЕР В ДИАПАЗОНЕ $40 < A < 239$

© 2019 г. С. Ю. Ториллов¹, *, Н. А. Мальцев¹, Р. Б. Панин¹, В. И. Жеребчевский¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Санкт-Петербургский государственный университет”, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: s.torilov@spbu.ru

Поступила в редакцию 12.11.2018 г.

После доработки 08.04.2019 г.

Принята к публикации 27.05.2019 г.

В представленном исследовании проведен анализ имеющихся на сегодняшний день экспериментальных данных для функций возбуждения (p,n) реакций для ядер в массовом диапазоне $40 < A < 239$. Предложенная систематика рассматривает три участка функции возбуждения — равновесный, и два интервала, включающих предравновесные процессы, что позволяет использовать различную параметризацию для достижения лучшего согласия предсказаний систематики с экспериментальными данными.

DOI: 10.1134/S0367676519090291

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие наблюдается значительный рост объема экспериментальных результатов для ядерных реакций, доступных в соответствующих базах данных, например EXFOR [1]. Это позволяет проводить комплексный анализ данных с применением параметрических моделей. Необходимость такого анализа обусловлена, в основном, двумя причинами. Во-первых, в ряде случаев, результаты, полученные в разных исследованиях, плохо согласуются друг с другом, причем сделать однозначный вывод об ошибочности тех или иных результатов на основании представленной процедуры измерения иногда не представляется возможным. Во-вторых, несмотря на обширность экспериментальных данных, все еще существуют значительные пробелы в данных о функциях возбуждения (ФВ) некоторых ядер, особенно для значений энергии входного канала больше 20 МэВ. Учитывая значительный интерес к таким реакциям со стороны прикладных исследований (например, производство изотопов для ядерной медицины [2, 3]), необходимо иметь возможность оценки выхода интересующих изотопов, без применения программ анализа, требующих опыта исследовательской работы (TALYS, EMPIRE, PRECO, ALICE и др.). В тоже время, для исключения ошибочных данных или выделения аномальных областей для дальнейшего исследования, было бы желательно получить алгоритм анализа, который содержал бы физические

модели, а не основывался на простой полиномиальной подгонке.

На сегодняшний день существует значительное количество систематик для (n,p) реакций, как для выделенных значений энергии, так и для функциональных зависимостей, хотя и в очень ограниченной области энергий (см. работу [4] и ссылки в ней), но сравнительно мало для (p,n) реакций, хотя этот процесс является ключевым для многих прикладных задач. В настоящей работе проведен феноменологический анализ данных, позволяющий получить ФВ (p,n) реакции от порога, до энергий, порядка 60 МэВ для массовых чисел ядер-мишеней $40 < A < 239$.

1. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Как было показано в работе [5], для определенных энергий налетающих протонов, сечение (p,n) реакции можно описать с помощью сравнительно простой полуэмпирической систематики. В указанной работе были выбраны значения энергии 7.5, 12.4 и 24.8 МэВ. Для энергий 7.5 и 12.4 МэВ была использована функция, основанная на формуле равновесной эмиссии нейтрона (для 12.4 МэВ была учтена возможность открытия канала $(p,2n)$). Для энергии 24.8 МэВ сечение было получено на основе формулы для предравновесной эмиссии. Таким образом, можно заключить, что, по крайней мере для энергий до 12 МэВ, в рассмотренной реакции ключевую роль играют равновесные процессы. Кроме того,

энергия 12.4 МэВ, примерно соответствует максимуму большинства ФВ для рассматриваемого диапазона. Было показано, что для указанных точек имеет место очень хорошее согласие с экспериментальными данными, однако, учитывая существенное различие функций от массового числа, описывающих сечение, интерполяция для промежуточных значений энергии в данном подходе оказалась недопустима.

С другой стороны, в работе [6] были проанализированы зависимости сечений для (p, n) реакции от энергии падающих протонов. Оказалось, что в ФВ ядер с массовыми числами в пределах от $A = 11$ до $A = 238$, при отображении в логарифмическом масштабе по обоим осям, может быть выделено два прямолинейных участка, которые мы обозначим PE1 и PE2. Также в работе [6] был сделан вывод о значительном предравновесном вкладе для этих участков. Участок PE1 располагался приблизительно от 11 до 25 МэВ, PE2 от 25 до 60 МэВ. Такое поведение ФВ хорошо согласуется с теоретическим расчетом (например, на основе экситонной модели [7]). Главным преимуществом предложенного авторами подхода оказалась возможность простой параметризации угла наклона обоих участков. Однако получить абсолютное значение сечения такой подход не позволял. Таким образом, представляет интерес получить общую систематику для имеющихся на сегодняшний день экспериментальных данных, когда сечение воспроизводится в широком энергетическом диапазоне.

В данной работе ФВ была разбита на три области: равновесная (от порога реакции до энергий порядка 11 МэВ) и две области, соответствующие участкам, определенным в работе [6] – PE1 и PE2.

Для вычисления сечения в равновесной области использовалась формула:

$$\sigma_{\text{eq}} = K\sigma \sum_i \frac{\Gamma_n}{\Gamma_i}, \quad (1)$$

где K – нормирующий множитель, σ – сечение образования компаунд-ядра, Γ_i – ширина распада в допустимый канал (в частности, $i = n$ – распад в нейтронный канал). В данной работе рассматривались только каналы с вылетом нейтрона и протона. Таким образом, для протонной и нейтронной ширины, соответственно, имеем:

$$\Gamma_p = \int_0^{E_c - B_p} \varepsilon P(\varepsilon) \rho(E) d\varepsilon, \quad (2)$$

$$\Gamma_n = \int_0^{E_c - B_n} \varepsilon \rho(E) d\varepsilon. \quad (3)$$

Здесь E_c – энергия возбуждения компаунд-ядра, ε – энергия вылетающей частицы, B_i – энергия связи нейтрона ($i = n$) или протона ($i = p$), $P(\varepsilon)$ –

коэффициент проницаемости кулоновского барьера, $\rho(E)$ – плотность уровней остаточного ядра при энергии возбуждения $(E_c - B_i - \varepsilon)$.

Коэффициент проницаемости записан в виде, предложенном в работе [8]:

$$P(\varepsilon) = \begin{cases} 1 & \text{при } \varepsilon \geq V_{\text{coul}} \\ \frac{\varepsilon}{V_{\text{coul}}} & \text{при } \varepsilon < V_{\text{coul}} \end{cases}. \quad (4)$$

Высота кулоновского барьера определяется выражением:

$$V_{\text{coul}} = 1.03 \frac{Z-1}{A^{1/3} + 1} \left(1 - \frac{1.13}{A^{1/3}} \right). \quad (5)$$

Где Z и A – заряд и массовое число ядра мишени, соответственно.

Плотность уровней определяли в виде:

$$\rho(E) = \frac{\exp(E/T)}{T}, \quad (6)$$

где T – ядерная температура, которую определяли из выражения $aT^2 - T = E$. Параметр плотности уровней был выбран в приближении Бардина [9] $a = A/22$.

Сечение образования компаунд-ядра описывали в виде:

$$\sigma = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l+1) T_l. \quad (7)$$

Коэффициент проницаемости T_l был выбран в рамках оптической систематики [10].

Коэффициент K определяли из подгонки по экспериментальным данным. Для энергий выше 7.5 МэВ он был выбран в виде:

$$K = K1 + K2 \cdot \varepsilon, \quad (8)$$

$$K1 = 1.0 - K2 \cdot 7.5, \quad (9)$$

$$K2 = (F - 1)/3.5, \quad (10)$$

$$F = \frac{1}{\left(0.0595 - 0.2218 \frac{A - 2Z}{A} \right) \left(1 + A^{1/3} \right)^2}. \quad (11)$$

Для энергий ниже 7.5 МэВ коэффициент K определяли в виде:

$$K = (K1 + K2\varepsilon)^{1/3}, \quad (12)$$

$$K1 = -K2 \cdot Q1, \quad (13)$$

$$K2 = \frac{1}{7.5 - Q1}, \quad (14)$$

$$Q1 = Q(1 + 1/A), \quad (15)$$

где Q – энергия реакции.

Зависимости сечения от величины энергии для областей PE1 и PE2 считали, как и в работе [6], линейными, в соответствующих логарифми-

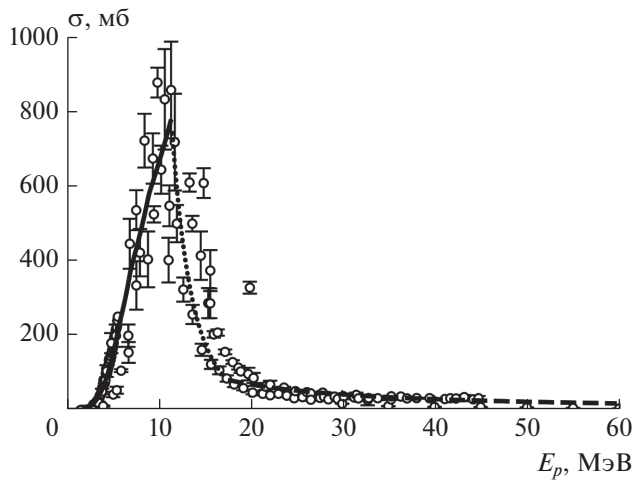


Рис. 1. Равновесный и предравновесные вклады в ФВ реакции $^{75}\text{As}(p,n)$. Сплошная линия – равновесный вклад (область EQ), точки – первая “линейная” область (PE1), пунктир – вторая “линейная” область (PE2). Кружки – экспериментальные результаты [1].

ческих шкалах. Далее, полученные зависимости нормировали на известное сечение из работы [5], после чего осуществляли сшивку всех областей в непрерывную функцию возбуждения, как показано на рис. 1, где приведено сечение для ФВ реакции $^{75}\text{As}(p,n)$. Равновесный участок (EQ) показан сплошной линией, а “линейные” области – точками (PE1) и пунктиром (PE2).

2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В данной работе было проанализировано 120 ФВ для ядер, в указанном диапазоне масс. Примеры сравнения сечения, вычисленного на основе предложенной систематики, с экспериментальными ФВ приведены на рис. 2. Рассмотрены ядра ^{51}V (рис. 2а), ^{65}Cu (рис. 2б), ^{117}Sn (рис. 2в) и ^{197}Au (рис. 2г). Как видно, имеет место хорошее согласие полученных результатов расчета с экспериментальными данными.

На рис. 3 представлены графики отношения сечения, усредненного по рассматриваемому

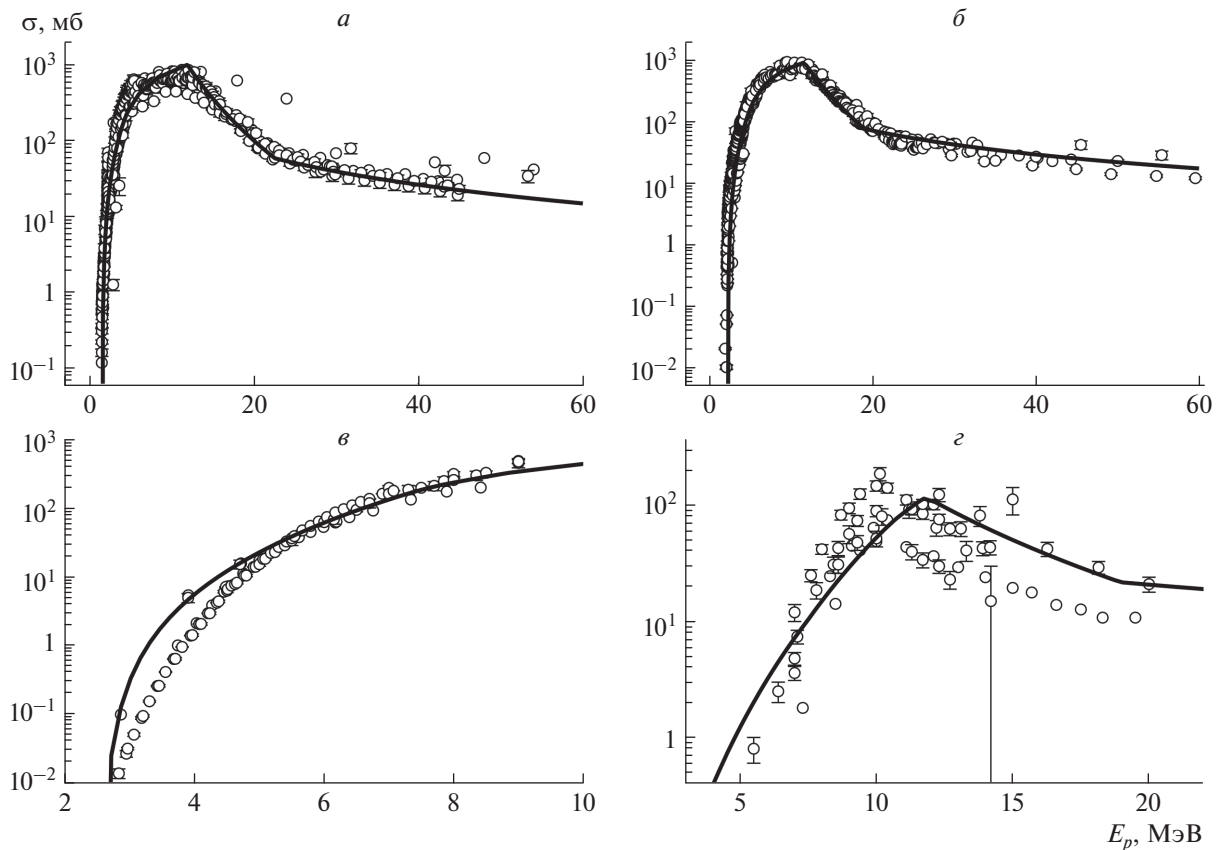


Рис. 2. Сравнение результатов, полученных в рамках рассматриваемой в работе систематики (сплошная линия) с экспериментальными данными (кружки). а – Мишень ^{51}V , б – мишень ^{65}Cu , в – мишень ^{117}Sn , г – мишень ^{197}Au . Экспериментальные данные взяты из базы EXFOR [1].

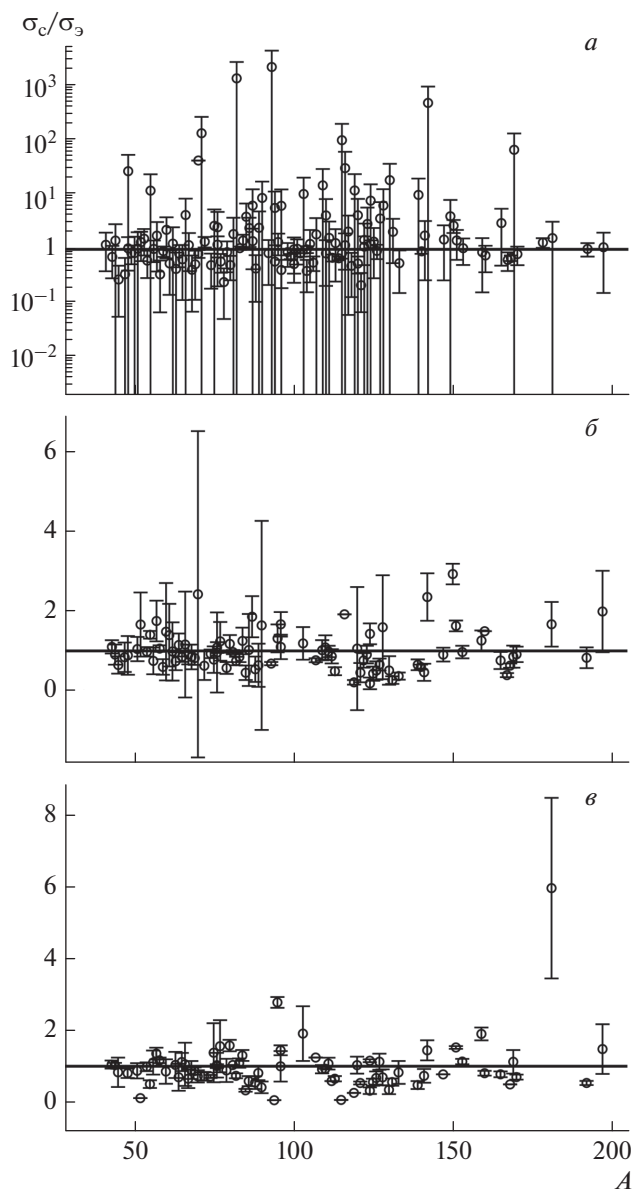


Рис. 3. Отношение усредненного сечения, полученного в рамках систематики настоящей работы σ_c к экспериментальному σ_3 . *a* – Сечение усреднено по области EQ, *б* – сечение усреднено по области PE1, *в* – сечение усреднено по области PE2.

интервалу, полученного в рамках данной систематики, к экспериментальному. Рисунок 3*a* соответствует участку равновесного вклада (EQ), 3*б* – участку PE1, 3*в* – участку PE2. Как можно видеть, наибольшее отклонение для рассматриваемой систематики приходится на область малых энергий. Это может быть обусловлено большой экспериментальной погрешностью вследствие малой величины сечения, а также, в некоторых случаях, наблюдается расхождение с предсказанием в области, лежащей значительно ниже кулоновского барьера (как это можно видеть на при-

мере ядра ^{117}Sn , рис. 2*в*). Для ряда ядер было обнаружено, что в областях, близких к порогу реакции, имеет место систематический сдвиг по энергии представленных в EXFOR экспериментальных данных, приводящий к появлению ненулевого сечения ниже энергии порога. Помимо возможной ошибки в экспериментальной процедуре, это может быть объяснено погрешностью в сканировании экспериментальных результатов. Вместе с тем, нужно отметить, что систематика удовлетворительно описывает области, связанные с предравновесной эмиссией.

Из анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1) Выбор для систематики точки нормировки 12.4 МэВ следует считать неудачным, так как данная точка оказывается “разбросанной” вблизи области максимума, что приводит к резкому ухудшению качества описания функции возбуждения для ядер с высоким значением Q для реакций с выходом двух нейтронов. Таким образом, гораздо предпочтительнее для систематики использовать точку с энергией около 15 МэВ.

2) Для первой “линейной” области (PE1) мы наблюдаем несколько более узкий интервал энергий, чем это было предположено в работе [6]. Оценки показывают, что он примерно соответствует диапазону от 13 до 20 МэВ.

3) Наблюдается ряд ядер, для которых систематика дает существенные отклонения. Условно все отклонения можно разбить на две группы. Во-первых, когда отклонение обусловлено тем, что максимум функции возбуждения лежит при энергиях больших 12 МэВ. Это приводит к существенному занижению сечения в области PE1. Примерами таких отклонений являются случаи с мишенями $^{70,73}\text{Ge}$, ^{76}Se , ^{86}Sr . Во-вторых, имеют место отклонения при описании равновесного спектра, особенно в области максимума. Это может быть объяснено более сложным, чем предположено, поведением функции плотности уровней. Примерами таких ядер являются ^{87}Sr , ^{87}Rb , ^{119}Sb . Значительные ошибки в предравновесной области получены только для ядер $^{117,119,124}\text{Sn}$, ^{131}Xe , ^{133}Cs , ^{150}Nd и ^{167}Er для участка PE1 и ^{52}Cr , ^{85}Rb , ^{94}Zr , ^{95}Mo , ^{115}In , ^{181}Ta и указанных выше изотопов олова для PE2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют хорошо описать зависимость сечения (p,n) реакции от энергии налетающего протона. Таким образом, такой подход может быть использован для оценки выходов из реакций для многокомпонентных мишеней, применяемых в прикладных задачах.

Следует отметить существенное расхождение с систематикой для изотопов олова, а также ядер

^{85}Rb , ^{94}Sr , ^{130}Te и ^{150}Nd . Учитывая важность (p,n) реакции на олове для получения изотопов, необходимых для прикладных задач, а также то, что данные в базе NNDC по этим элементам не всегда согласуются друг с другом, можно сделать вывод о необходимости дополнительного исследования ФВ для этих ядер в широком диапазоне энергий.

С.Ю. Торилов благодарит за поддержку грант СПбГУ 11.42.669.2017.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zerkina V.V., Pritychenko B.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2018. V. 888. P. 31.
2. *Жеребчевский В.И., Алексеев И.Е., Гриднев К.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. С. 975; *Zherebchevsky V.I., Alekseev I.E., Gridnev K.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2016. V. 80. P. 888.
3. *Thisgaard H., Jensen M.* // Appl. Rad. Isot. 2009. V. 67. P. 34.
4. *Luo J., Tuo F., Zhou F., Kong X.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 2008. V. 266. P. 4862.
5. *Broeders C.H.M., Konobeyev A.Y.* // Radiochim. Acta. 2008. V. 96. P. 387.
6. *Elmaghraby E.K., Said S.A., Asfour F.I.* // Ann. Nucl. Energy. 2009. V. 36. P. 1070.
7. *Gadioli E., Gadioli Erba E., Sona P.G.* // Nucl. Phys. A. 1973. V. 217. P. 1549.
8. *Dostrovsky I., Frakenkel Z., Friedlander G.* // Phys. Rev. 1959. V. 116. P. 683.
9. *Bardeen J.* // Phys. Rev. 1937. V. 51. P. 799.
10. *Murthy K.H.N., Gupta S.K., Chatterjee A.* // Z. Phys. A. 1982. V. 305. P.73.