

лучаемые сигналы. Количество и тип используемых сигналов определяются конкретным назначением датчика. Наименее изученными в этих методах являются сигналы, соответствующие РВГИ, и в частности, сигналы, соответствующие флюоресцентному излучению и когерентно рассеянному N_γ ГИ. Особенности малоуглового РВГИ описаны в работе [2]. По флюоресцентному принципу имеются лишь отдельные попытки его применения. Между тем в работе [2] показано, что просвечивая ОК излучением энергией слева и справа от скачка поглощения определяемых элементов и регистрируя рассеянное вперед излучение, соответствующее этой энергии, и флюоресцентное излучение определяемых элементов, можно получить достаточно информативную совокупность сигналов и избавиться от влияния как вариаций содержания мешающих элементов, так и неравномерности насыпки, вариаций крупности и других влияющих параметров. Главной особенностью сигналов N_γ при РВГИ является возможность получения при соответствующих условиях как роста, так и спада или инверсии при увеличении любого из параметров d , ρ или z ОК. Этим особенно ценным качеством обладают и сигналы N_γ , соответствующие когерентно рассеянному вперед γ -излучению.

Датчики совокупных измерений по методам 24—29, которые иногда называют двухлучевыми, приведены для пояснения возможностей объединения ВГИ и НГИ, флюоресцентного излучения, когерентного и некогерентного рассеивания как при ослаблении пучка, так и его обратном рассеивании или рассеивании вперед. Графики зависимостей сигналов от d , ρ и z этих методов помогут правильно оценить возможности и выбрать требуемые совокупности сигналов для решения тех или иных конкретных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. Киев: Наукова думка, 1975. 414 с.
2. Онищенко А.М. Использование рассеянного вперед гамма-излучения в радиоизотопном приборостроении. — Изотопы в СССР, 1981, № 1 (60), с. 34—41.

Поступила в Редакцию 15.12.94

УДК 539.17

АНАЛИЗ ОЦЕНЕННЫХ СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИЙ (n , $2n$), НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫХ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Грудзевич О.Т., Зеленецкий А.В. (ИАТЭ), Игнатюк А.В., Пащенко А.Б. (ФЭИ)

Потребности в ядерно-физических данных для расчета активации конструкционных материалов в ядерно-физических установках с высоким потоком нейтронов и трансмутации радиоактивных отходов удовлетворяются за счет создания специализированных библиотек активационных данных. Современные версии таких библиотек (ADL-3 [1], EAF-3 [2]) содержат 12—15 тыс. функций возбуждения реакций, вызванных нейтронами энергией до 20 МэВ.

Анализ предыдущих оценок сечений пороговых реакций [3], наиболее важных для определения долгоживущей активности термоядерного реактора, показал неудовлетворительное состояние большинства оценок, опирающихся на упрощенные теоретические модели или эмпирические систематики экспериментальных данных. В настоящей работе сделана попытка провести аналогичный анализ сечений реакции (n , $2n$) с учетом новых оценок, вошедших в библиотеку ADL-3.

Разделим эти реакции на три группы. В первую включим реакции, для которых имеются надежные экспериментальные данные в широком диапазоне энергии налетающих нейтронов, во вторую — реакции, для которых экспериментальные данные есть, в основном, для энергии нейтронов вблизи 14 МэВ, и, наконец, в третью группу — ре-

акции, для которых экспериментальных данных нет или имеются единичные данные. Некоторая работа по анализу и перенормировке экспериментальных данных проделана [4] и в некоторых случаях удалось устранить расхождения между результатами различных измерений, а также расчетов. Но тем не менее противоречия между данными различных авторов во многих случаях остались.

Оцененные сечения реакций можно считать удовлетворительными, если они согласованно описывают в широком диапазоне энергии нейтронов экспериментальные данные, совпадающие в пределах погрешностей, проанализированные и, если требуется, нормированные к современным стандартам. Этим критерием будем руководствоваться при определении качества сравниваемых оцененных сечений.

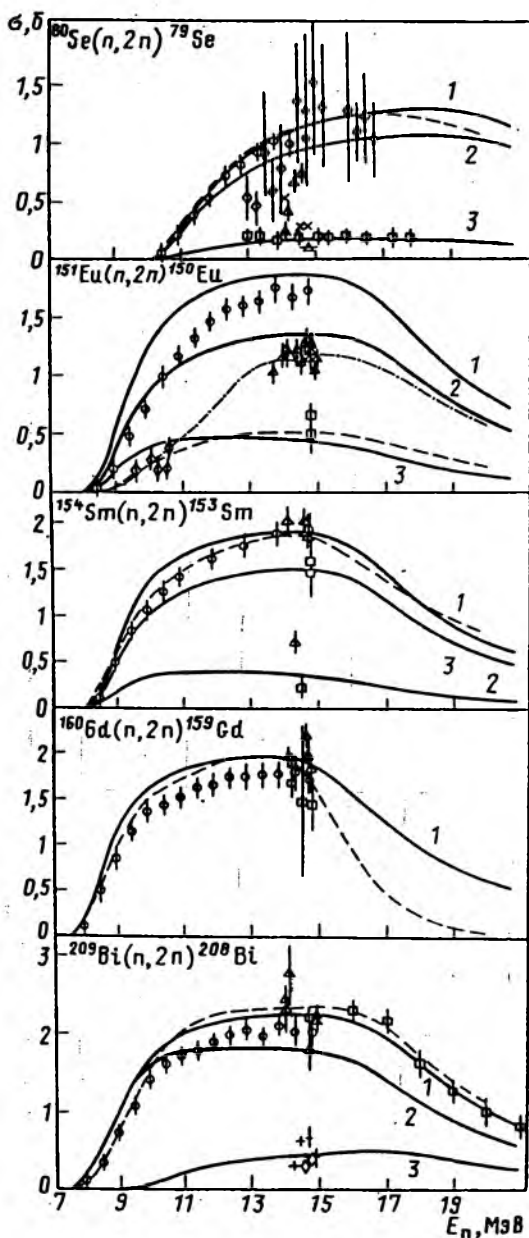
Функции возбуждения всех реакций рассчитаны по статистической модели в формализме Хаузера—Фешбаха с учетом вклада неравновесных процессов. Не предпринимались попытки варьирования параметров для лучшего описания экспериментальных данных. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными даст возможность сделать вывод о том, насколько достоверно можно предсказывать сечения реакции ($n, 2n$), и в полной мере использовать критерий определения качества оцененных данных. Данные из сравниваемых библиотек приводятся без изменений.

Реакции первой группы. Для всех реакций имеются экспериментальные данные [5], перекрывающие диапазон энергий нейтронов от порога реакции до 14 МэВ. Име-

ются также данные других авторов [6—16]. На рис. 1 приведены экспериментальные данные о суммарном и парциальных сечениях для основного (σ_g) и изомерных (σ_{m1}, σ_{m2}) состояний, соответствующие расчетные кривые и результаты оценок из библиотек EAF-3 и ADL-3. На рис. 1—3 кривая 1 — расчет суммарного сечения, 2 — σ_g , 3 — σ_{m1} , 4 — σ_{m2} . Поскольку библиотека ADL-3 основана на теоретических расчетах, то в случае использования неперенормированных расчетных данных ее результаты совпадают с одной из кривых 1—4.

$^{80}\text{Se}(n, 2n)^{79}\text{Se}$. Результаты расчетов совпадают с экспериментальными данными о сечении реакции [5] и с данными о σ_m [6—8]. Остается открытым вопрос об идентификации к конкретному состоянию данных [7], имеющих большие погрешности. Если предположить, что эти данные соответствуют σ_g , то ситуацию можно считать удовлетворительной. Оценки двух библиотек совпадают и хорошо описывают данные [5, 6, 8].

$^{151}\text{Eu}(n, 2n)^{150m}\text{Eu}$. Речь идет о возбуждении состояния с $T_{1/2} = 35,8$ года, $J^\pi = 5^-$, ко-



Р и с. 1. Сечения реакций первой группы: — — — — расчет: 1 — σ_g ; 2, 3, 4 — σ_g, σ_{m1} и σ_{m2} соответственно; — — — — оценка ADL-3 и EAF-3 соответственно; эксперимент: ^{80}Se — σ_g ○ [5], σ_m □ [4], ◇ [7], × [8]; ^{151}Eu — σ_g ○ [5], △ [4], ◇ [9] — сечения возбуждения состояния с $T_{1/2} = 35,8$ года и $J^\pi = 5^-$, □ [10] — то же с $T_{1/2} = 12,6$ ч и $J^\pi = 0^-$; ^{154}Sm — ^{154}Gd — σ_g ○ [5], △, □ [8]; ^{209}Bi — σ_g ○ [5], □ [11], △ [8], σ_m ◇ [12, 13], + [14—16]

торое согласно [17] является основным состоянием ядра ^{150}Eu . Поэтому на рис. 1 приведены σ_g анализируемых библиотек, а экспериментальные данные [4, 9] следует сравнивать с расчетной кривой 2. Видно, что она удовлетворительно описывает данные при $E_n = 14$ МэВ и значительно расходится с современными данными [9] при $E_n = 9\text{--}11$ МэВ. Данные библиотеки EAF-3 ошибочно идентифицированы, поскольку сложилась ситуация, когда символом m обозначены экспериментальные данные для основного состояния. Оценка ADL-3 выполнена после появления данных [9] и их учитывает.

$^{154}\text{Sm}(n, 2n)^{153}\text{Sm}$. Современные экспериментальные данные в большинстве случаев согласуются хорошо, за исключением отдельных точек. Теоретическая кривая удовлетворительно описывает энергетическую зависимость и сечение. Обе оценки совпадают в пределах 10% во всем диапазоне энергии.

$^{160}\text{Gd}(n, 2n)^{159}\text{Gd}$. Ситуация аналогична предыдущей, за исключением того, что оценки значительно различаются при энергии нейтронов больше 14 МэВ. При $E_n < 14$ МэВ обе оценки совпадают между собой и с экспериментальными данными [5].

$^{209}\text{Bi}(n, 2n)^{208}\text{Bi}$. Кроме данных о сечении требуемой реакции [5, 8, 11], есть данные о парциальном сечении σ_m [12, 16]. Теоретическая модель хорошо описывает оба типа данных без какой-либо подгонки. Обе оценки совпадают в пределах 15% во всей области энергии.

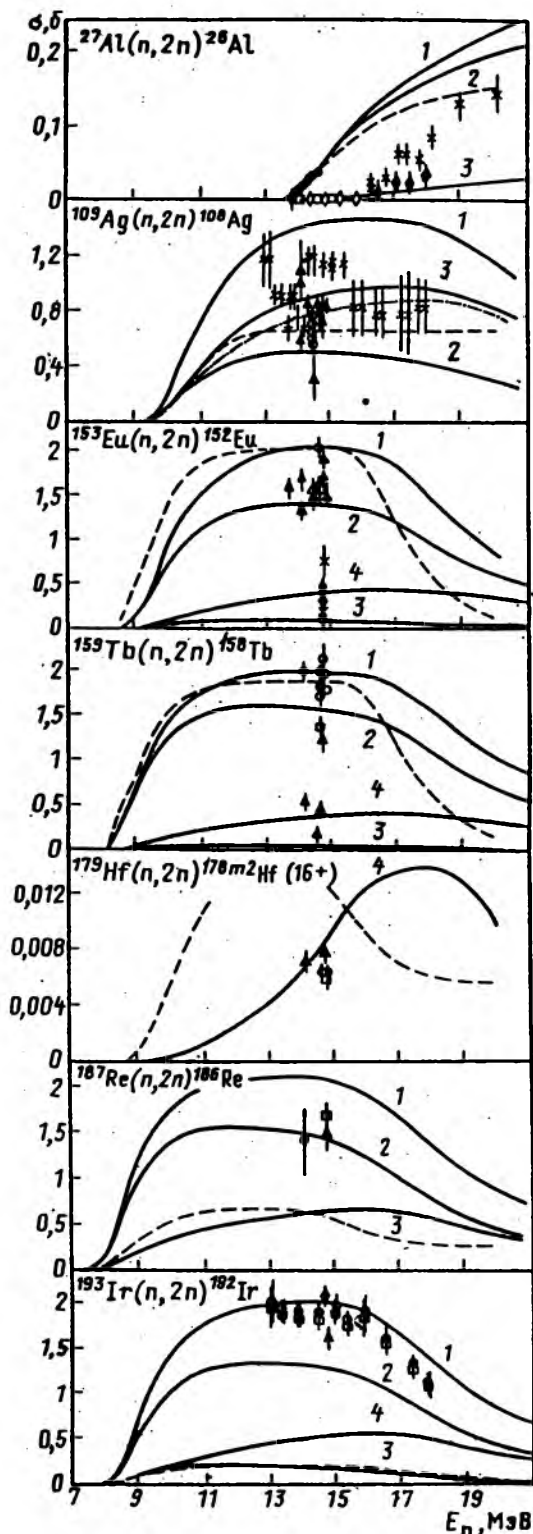
Таким образом, для всех реакций первой группы имеется хорошее согласие результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными и сравниваемых оцененных сечений, за исключением $^{151}\text{Eu}(n, 2n)$. Не отдавая преимущества какой-либо из оценок, можно считать, что обе они удовлетворительны и перечисленные реакции следует исключить из списка неудовлетворительно оцененных [3].

Реакции второй группы. Функции возбуждения реакций этой группы могут быть оценены только с привлечением теоретических расчетов, поскольку экспериментальные данные имеются для узкого диапазона энергии нейтронов вблизи 14 МэВ. Здесь, как и в первой группе, будем использовать информацию о суммарном и парциальных сечениях реакции для того, чтобы, демонстрируя согласованное описание экспериментальных данных, считать оцененные кривые более надежными. Данные об анализируемых сечениях приведены на рис. 2.

$^{27}\text{Al}(n, 2n)^{26}\text{Al}$. Имеются экспериментальные данные о суммарном [18] и парциальных сечениях: σ_m — [8, 19, 20], σ_g — [21]. Данные [18] и [21] хорошо согласуются между собой с учетом того, что, как показывают расчеты, при $E_n = 14$ МэВ суммарное сечение равно σ_g . Трудность верификации оцененных кривых по экспериментальным данным заключается в близости порога реакции к 14 МэВ. Мы считаем, что оценка EAF-3 немного занижена в области 20 МэВ, ввиду того что она описывает данные по σ_m .

$^{109}\text{Ag}(n, 2n)^{108m}\text{Ag}$. Экспериментальные данные о σ_m проанализированы и перенормированы в работе [4]. Есть также данные о парциальном сечении σ_g в диапазоне $E_n = 13\text{--}18$ МэВ [8, 22, 23], однако они не пересмотрены с учетом выводов работы [4]. Оценки библиотек удовлетворительно совпадают при 14 МэВ, но имеют различные энергетические зависимости. Видимо, оценка ADL-3, полученная после небольшой перенормировки расчетной кривой, является предпочтительной.

$^{153}\text{Eu}(n, 2n)^{152}\text{Eu}$. Расчетные кривые удовлетворительно описывают данные о σ_g , σ_{m1} , σ_{m2} [4, 10, 24—28]. Оценки сечения совпадают при 14 МэВ, но различаются при другой энергии. Оценка ADL-3 представляется нам предпочтительной ввиду того,



Р и с. 2. Сечения реакций второй группы:

^{27}Al — σ , $\circ$ [18], σ_m $\times$ [8], $\square$ [19], $\diamond$ [20], σ_g + [21]; ^{109}Ag — σ_m $\circ$ [4], σ_g Δ [8], $\times$ [22], + [23]; ^{153}Eu — σ , $\circ$ [11], σ_g $\square$ [11], $\sigma_g + \sigma_{m2}$ Δ [4], σ_{m2} $\diamond$ [10, 24–26], $\sigma_m + \sigma_{m2}$ $\times$ [27, 28]; ^{159}Tb — σ , $\circ$ [4], σ_g $\square$ [26], σ_m Δ [11, 26]; ^{179}Hf — σ_{m2} Δ , $\circ$, $\square$ [4]; ^{187}Re — σ , $\square$ [28], Δ [29], σ_g $\circ$ [30]; ^{193}Ir — $\sigma_g + \sigma_m$ $\circ$ [31], $\square$ [32], Δ [33], σ_g $\diamond$ [34]

что, как показывает анализ для реакций первой группы, используемый подход удовлетворительно описывает энергетическую зависимость сечений. Оценка EAF-3, видимо, завышена в области $E_n < 13$ МэВ.

$^{159}\text{Tb}(n, 2n)^{158}\text{Tb}$. Ситуация аналогична предыдущей. Расчетные кривые хорошо описывают данные о парциальных сечениях [4, 10, 26]. Обе оценки близки до энергии 16 МэВ.

$^{179}\text{Hf}(n, 2n)^{178m2}\text{Hf}$. Оценка ADL-3 этого парциального сечения является результатом расчетов по методу [29] и совпадает с экспериментальными данными [4]. Оценка EAF-3 имеет иную энергетическую зависимость, полученную по суммарному сечению. Показано [35], что функция возбуждения такого высокоспинового изомера, как $^{178m2}\text{Hf}(16^+)$, не должна иметь столь резкого нарастания именно из-за высокого спина изомера. Поэтому оценка ADL-3, по нашему мнению, является предпочтительной.

$^{187}\text{Re}(n, 2n)^{186m}\text{Re}$. Экспериментальные данные о суммарном [28, 29] и парциальном сечениях [30] в целом согласуются между собой и удовлетворительно описываются теоретической моделью. Оценки парциального сечения σ_m близки, совпадая при $E_n = 14$ МэВ. Здесь, как и в предыдущем случае, заметна разница энергетических зависимостей сравниваемых оценок.

$^{193}\text{Ir}(n, 2n)^{192m2}\text{Ir}$. Экспериментальных данных о требуемом парциальном сечении нет. Однако данные о сумме $\sigma_g + \sigma_{m1}$ [31–33] описываются без проблем, что позволяет надеяться на надежность предсказания сечения σ_{m2} (кривая 4). Немного хуже описываются данные [34], которые не согласуются с результатами [31–33]. Оценка EAF-3 основана на систематике изомерных отношений, недостаточно точно предсказывающей изомерные сечения.

Точность оценок сечений реакций второй группы ниже, чем первой, однако хорошее описание экспериментальных данных для реакций первой группы теоретическими кривыми, а также имеющиеся данные для второй группы позволяют считать, что оценка ADL-3 является достаточно надежной. Таким образом, все перечисленные реакции, за исключением, может быть, $^{193}\text{Ir}(n, 2n)^{192m2}\text{Ir}$, также следует исключить из списка [3]. Заключение по этой реакции можно сделать после измерений σ_{m2} .

Реакции третьей группы. Оцененные данные сравниваемых библиотек приведены на рис. 3 вместе с экспериментальными данными. Методики оценки, как уже можно было видеть из предыдущего анализа, в двух библиотеках различны. Так, при создании ADL-3 получаемые по теоретическим моделям сечения реакции $(n, 2n)$ не требовали нормировки. Оцененные сечения, особенно парциальные, из EAF-3 в большинстве случаев, судя по комментариям [2], основаны на нормировке расчетных кривых к экспериментальным данным или систематикам сечений.

$^{37}\text{Cl}(n, 2n)^{36}\text{Cl}$. Результаты оценок различаются более чем в 5 раз, например, при 14 МэВ. Несмотря на то, что оценка ADL-3 получена по методу, работоспособность которого продемонстрирована, а оценка EAF-3 — в упрощенном подходе [39], имеющем серьезные недостатки, расхождения оценок столь большие, что требуется проведение измерений.

$^{40}\text{Ar}(n, 2n)^{39}\text{Ar}$, $^{138}\text{La}(n, 2n)^{137}\text{La}$. Оценки сечений этих реакций значительно различаются вблизи порога реакции. Энергетическая зависимость сечений EAF-3 кажется нам искаженной с учетом предыдущего обсуждения.

$^{82}\text{Kr}(n, 2n)^{81}\text{Kr}$. Одна точка в парциальном сечении σ_m [36] хорошо описывается модельным расчетом (кривая 3). Оценки сечения близки в надпороговой области, совпадают при 14 МэВ и различаются на 30% при более высокой энергии. Для практических целей оцененные кривые можно считать удовлетворительными.

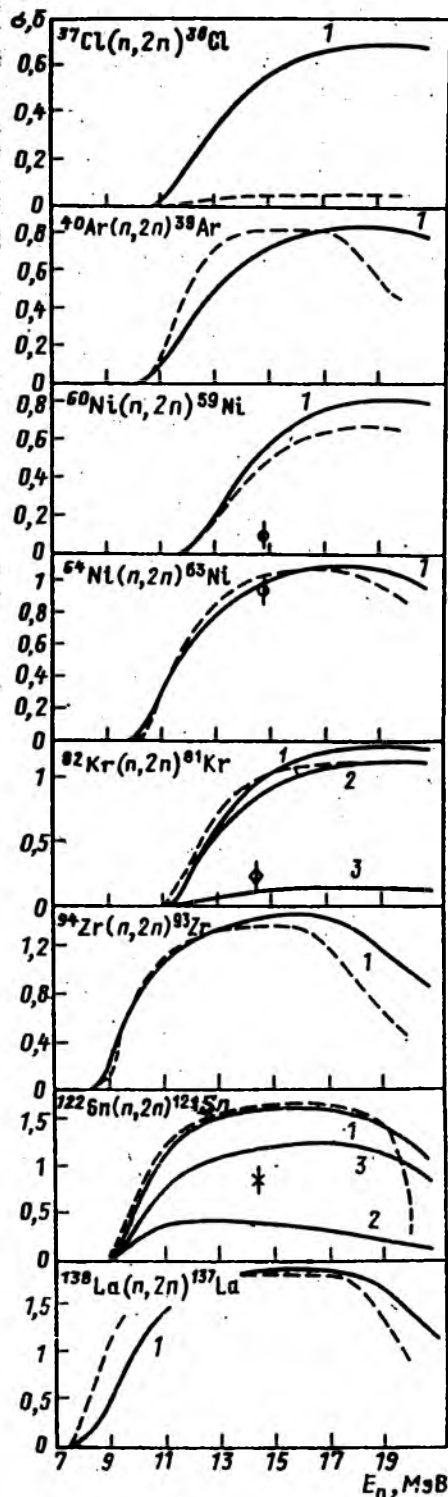
$^{60}\text{Ni}(n, 2n)^{59}\text{Ni}$. Для описания экспериментального сечения [37] требуются столь значительные искажения параметров моделей, что это значение проигнорировано в обеих оценках, ибо затруднительно отдать предпочтение какой-либо. Скорее всего, кривые оценок обозначают коридор значений сечений. Однако едва ли ситуацию можно считать удовлетворительной.

$^{64}\text{Ni}(n, 2n)^{63}\text{Ni}$. Обе оцененные кривые совпадают достаточно хорошо во всем интервале энергии и описывают данные [37].

$^{94}\text{Zr}(n, 2n)^{93}\text{Zr}$, $^{122}\text{Sn}(n, 2n)^{121}\text{Sn}$. Оцененные кривые совпадают до 14 МэВ.

Из восьми реакций данной группы оценки достаточно близки для реакций $^{82}\text{Kr}(n, 2n)^{81}\text{Kr}$, $^{94}\text{Zr}(n, 2n)^{93}\text{Zr}$, $^{122}\text{Sn}(n, 2n)^{121}\text{Sn}$, $^{60}\text{Ni}(n, 2n)^{59}\text{Ni}$ и $^{64}\text{Ni}(n, 2n)^{63}\text{Ni}$, имеют различную энергетическую зависимость для $^{40}\text{Ar}(n, 2n)^{39}\text{Ar}$ и $^{138}\text{La}(n, 2n)^{137}\text{La}$ и значительно различаются для реакции $^{37}\text{Cl}(n, 2n)^{36}\text{Cl}$. Судя по результатам анализа, для реакций предыдущих групп оценки первых пяти сечений можно считать удовлетворительными, последних трех — неудовлетворительными.

Заключение. На основании сравнительного анализа оцененных сечений из двух библиотек активационных данных, результатов теоретических расчетов и экспери-



Р и с. 3. Сечения реакций третьей группы: σ , $\circ$ [36], σ_m , $\diamond$ [37], $\times$ [38]

ментальных данных в настоящей работе показано, что 17 из 20 считавшихся ранее неудовлетворительно оцененными сечений реакций (n , $2n$), наиболее важных при наработке долгоживущей активности в термоядерном реакторе, можно считать удовлетворительными. Судя по результатам работы, список [3] не учитывает результаты современных исследований в этой области и требует пересмотра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грудзевич О.Т. и др. Каталог библиотеки ADL-3. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1993, т. 3, 4.
2. Kopecky J., Nierop D. Contents of EAF-3. Rep. ECN-1-91-53.2, 1991.
3. Activation Cross-Sections for the Generation of Long-Lived Radionuclides Importance in Fusion Reactor Technology. Rep. INDC(NDS)-232/L, 1990.
4. Vonach H., Vagner M. Ibid.
5. Frehaut J., Mosinsky G. — In: Proc. Conf. «Nucl. Cross-sections and Technology». Washington, 1975, p. 855.
6. Grochuski W. e.a. — Acta Phys. Polonica, 1975, v. B6, p. 139.
7. Bormann M. e.a. Rep. EANDC(E)-76, 1976, p. 51.
8. Бычков В.М. и др. Сечения пороговых реакций, вызываемых нейтронами. М.: Энергоиздат, 1982.
9. Qaim S. e.a. — Appl. Radiat. Isot., 1992, v. 43, 9, p. 1065.
10. Qaim S. e.a. — Nucl. Phys., 1974, v. A224, p. 319.
11. Veesser L.R. e.a. — Phys. Rev., 1977, v. C16, p. 1792.
12. Salaita G.N. e.a. — J. Inorg. Nucl. Chem., 1973, v. 35, p. 2139.
13. Garg K.C. e.a. — Indian J. Pure and Applied Phys., 1979, v. 17, p. 525.
14. Monnard E. e.a. — Comptes Rendus, 1966, v. 263, p. 712.
15. Hannapel L. e.a. — Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., 1979, v. 167, p. 289.
16. Глаголев В. и др. — ЖЭТФ, 1959, т. 36, с. 1046.
17. Evaluated Nuclear Structure Data File. BNL, file as of Nov. 30, 1989.
18. Iwasaki S. e.a. — In: Proc. Intern. Conf. «Nuclear Data for Science and Technology», 1988, Mito, Japan.
19. Mani G.S. e.a. — Nucl. Phys., 1960, v. 19, p. 535.
20. Arnold D.M. e.a. — EXFOR11520.003.
21. Sasao M. e.a. — Phys. Rev., 1987, v. C35, p. 2327.
22. Augustyniak V. e.a. — Nucl. Phys., 1975, v. A247, p. 231.
23. Cuzzocrea P. e.a. — Nuovo Cimento, 1968, v. B54, p. 53.
24. Bari A. e.a. EXFOR10431030.
25. Salaita G. e.a. — In: Proc. 2nd Intern. Conf. «Nucl. Methods in Environment Research», Columbia, USA, 1974, p. 95.
26. Rama Prasad e.a. — Nucl. Phys., 1969, v. A125, p. 57.
27. Wille R.G. e.a. — Phys. Rev., 1960, v. 118, p. 242.
28. Khurana C.S. e.a. — Nucl. Phys., 1961, v. 28, p. 560.
29. Дружинин А.А. и др. — Ядерная физика, 1967, т. 5(1), с. 18.
30. Karam R. e.a. EXFOR12179003.
31. Herman M. e.a. Rep. INDC(NDS)-103, p. 40.
32. Herman M. e.a. — Nucl. Phys., 1984, v. A430, p. 69.
33. Дружинин А.А. и др. — Ядерная физика, 1971, т. 14(4), с. 682.
34. Qaim S.M. — Nucl. Phys., 1972, v. A185, p. 614.
35. Грудзевич О.Т., Зеленецкий А.В., Игнатюк А.В., Пащенко А.В. Согласованное описание выходов изомеров в нейтронных реакциях: Препринт ФЭИ-2307, 1993.
36. Kondaiah E. e.a. — Nucl. Phys., 1968, v. A120, p. 337.
37. Bowers D. e.a. EXFOR13132002.
38. Lulic S. e.a. — Nucl. Phys., 1968, v. A119, p. 517.
39. Грудзевич О.Т., Зеленецкий А.В., Игнатюк А.В., Пащенко А.В. Библиотека ядерно-физических данных для расчета активации и трансмутации. — Атомная энергия, 1994, т. 76, с. 127—130.

Поступила в Редакцию 23.12.93

УДК 539.172.4

ПОЛНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ СЕЧЕНИЯ И СРЕДНИЕ РЕЗОНАНСНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗОЛОТА

Пуртов О.А., Литвинский Л.Л., Мурзин А.В., Новоселов Г.М.
(Институт ядерных исследований АН Украины)

В настоящее время наиболее интенсивными источниками нейтронов в области промежуточной энергии $E_n \leq 0,5$ МэВ являются фильтрованные пучки реакторов [1, 2]. Для их получения используют нейтронные фильтры из моноизотопных элементов