

СЕЧЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ТРИТИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НЕЙТРОНОВ С ЯДРАМИ ^{10}B

*Т. А. Иванова, И. П. Бондаренко, Б. Д. Кузьминов,
Н. Н. Семенова, А. И. Сергачев, В. А. Хрячков*

Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научный центр
Российской Федерации – Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского»,
Обнинск, Россия

Реакции с образованием трития важны с точки зрения безопасности при эксплуатации ядерно-энергетических установок. Изотоп ^{10}B широко используется на практике как для регулирования уровня мощности ядерных реакторов, так и для создания защиты от воздействия тепловых нейтронов. Среди процессов, приводящих к наработке трития при использовании ^{10}B , основным является реакция $^{10}\text{B}(n, \alpha t)^4\text{He}$. Разработанная в ФЭИ методика, использующая газообразную мишень, позволяет полностью поглотить энергию всех заряженных продуктов реакции и за счет этого обеспечить хорошее выделение событий, относящихся к изучаемой реакции, из фона.

Tritium production reactions are important for the safe service of a nuclear power plant. The isotope ^{10}B is widely used in practice both for leveling the power of a nuclear reactor and for building the shielding for thermal neutrons. The $^{10}\text{B}(n, \alpha t)^4\text{He}$ reaction is the main reaction that results in tritium recovery. The method developed to the IPPE, using gaseous target, allows one to absorb energy of all charged reaction products and select useful events for background.

PACS: 28.20.-v; 29.30.Ep; 29.40.Cs

ВВЕДЕНИЕ

В природе бор находится в виде двух изотопов — ^{10}B (19,9 %) и ^{11}B (80,1 %). ^{10}B имеет очень высокое сечение поглощения тепловых нейтронов (~ 3000 б), поэтому чистый бор и его сплавы применяют в атомных реакторах для регулирования уровня мощности. При поглощении нейтронов бором образуется тритий в реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha t)^4\text{He}$. Реакции с образованием трития важны с точки зрения безопасности при эксплуатации ядерно-энергетических установок. Тритий является β -излучателем в силу своих радиохимических свойств, легко растворяется в жидкости, попадает в организм человека, замещая легкий водород, наносит ущерб здоровью. Для адекватной оценки количества трития необходимо как можно точнее знать сечения реакций, приводящих к его наработке.

Существующие к настоящему времени экспериментальные данные о величине сечения реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha t)^4\text{He}$ немногочисленны и сильно различаются между собой как по абсолютной величине, так и по форме энергетической зависимости. Большие расхождения наблюдаются и в оценках сечения данной реакции, даваемых разными библиотеками ядерных данных.

1. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения сечения реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^4\text{He}$ проводились на ускорителе ЭГ-1 ГНЦ РФ – ФЭИ. Для получения моноэнергетических нейтронов использовалась реакция $D(d, n)$. Нейтроны генерировались в твердой титановой мишени, насыщенной дейтерием, толщиной 1 мг/см^2 , нанесенной на медную подложку.

Исследование сечения реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^4\text{He}$ проводилось с помощью ионизационной камеры с сеткой Фриша. Блок-схема камеры и использованной электроники показана на рис. 1.

Сигналы, снимаемые с анода и катода ионизационной камеры, после усиления подавались на оцифровщик формы импульсов, который превращал входной сигнал в последовательность чисел, соответствующих амплитудам входного сигнала в разные моменты времени. Оцифрованные сигналы сохранялись на жестком диске для дальнейшей обработки. В процессе обработки извлекалась информация об энергии зарегистрированной частицы, месте рождения частицы, типе частицы и направлении ее вылета относительно пучка падающих нейтронов. Данная информация позволяет значительно уменьшить фон от сопутствующих реакций.

Измерение сечения реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^4\text{He}$ проводилось относительным методом. В качестве опорной реакции использовалась реакция $^{10}\text{B}(n, \alpha)$. Данный метод удобен тем, что обе реакции протекают на нашей мишени одновременно и в амплитудном распределении мы в состоянии выделить вклад каждой из них. Для вычисления сечения реакции

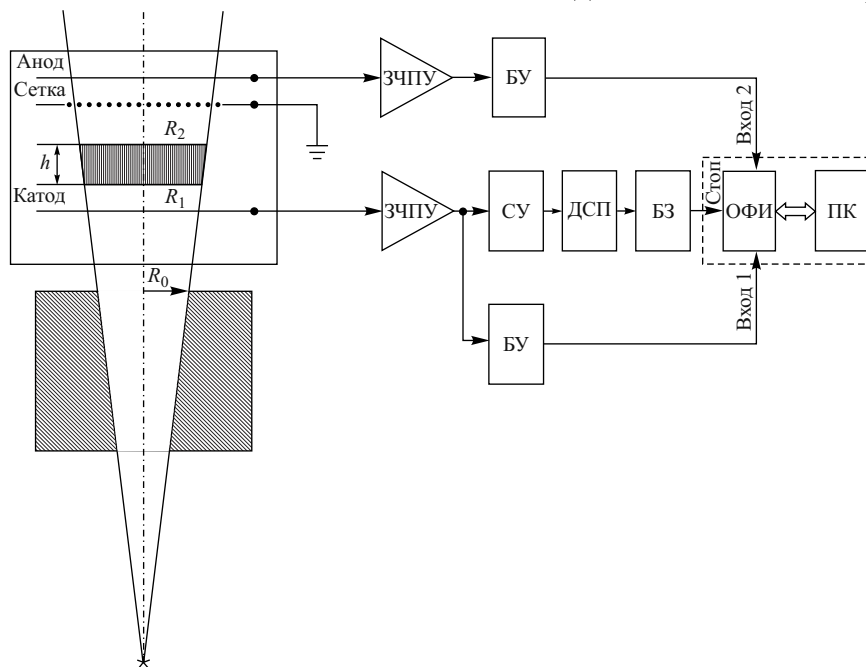


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: ЗЧПУ — зарядочувствительный предусилитель; БУ — быстрый усилитель; БЗ — блок задержки; ДСП — дискриминатор со следящим порогом; ОФИ — оцифровщик формы импульсов; СУ — спектрометрический усилитель; ПК — персональный компьютер

$^{10}\text{B}(n, \alpha t)^4\text{He}$ при энергии нейтронов ниже 5,6 МэВ использовались экспериментальные значения сечения реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)$, полученные в [1]. Проведенный анализ показал, что полученные в [1] экспериментальные данные для реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ лучше всего описываются оценкой, даваемой библиотекой JEF 2.2. Поэтому при расчете значений сечения реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha t)^4\text{He}$ для нейтронов с энергией больше 5,6 МэВ использовалось сечение реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)$, даваемое библиотекой JEF 2.2.

Камера заполнялась смесью 95 % Кг + 5 % ВФ₃. Бор, содержащийся в рабочем газе, служил мишенью, на которой протекала исследуемая реакция.

Использование коллимации быстрых нейтронов в сочетании с методами цифровой обработки сигналов позволило выделить в чувствительном объеме камеры газовую ячейку. Только события, рождающиеся внутри нее, принимались во внимание при определении сечения реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha t)^4\text{He}$. Отметим, что мониторинговая реакция $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ протекала на том же ядре и в той же газовой ячейке, что гарантировало правильное измерение отношения числа событий. Действительно, для мониторинговой реакции можно записать:

$$N_{\alpha} = N_{\text{B}} \sigma_{\alpha} F, \quad (1)$$

где N_{α} — число зарегистрированных событий реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$; N_{B} — число атомов ^{10}B в газовой ячейке; σ_{α} — сечение реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$; F — поток нейтронов. Число событий реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha t)^4\text{He}$ можно определить из следующего выражения:

$$N_T = N_{\text{B}} \sigma_T F, \quad (2)$$

где N_T — число зарегистрированных событий реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha t)^4\text{He}$; σ_T — сечение реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha t)^4\text{He}$. Решив систему уравнений (1) и (2) относительно σ_T , получим:

$$\sigma_T = \frac{N_T}{N_{\alpha}} \sigma_{\alpha}. \quad (3)$$

С практической точки зрения важно, что результат измерений σ_T не зависит ни от абсолютного числа атомов бора, ни от степени обогащения используемого образца.

В классических спектрометрах, использующих твердую мишень, определение значения N_T сталкивается со значительными трудностями. При использовании твердой мишени одна или две частицы, образовавшиеся в результате реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha t)^4\text{He}$, могут вылететь в сторону подложки (рис. 2, а). В этом случае в чувствительном объеме детектора будет оставлена не вся энергия возникших продуктов реакции. Причем может изменяться

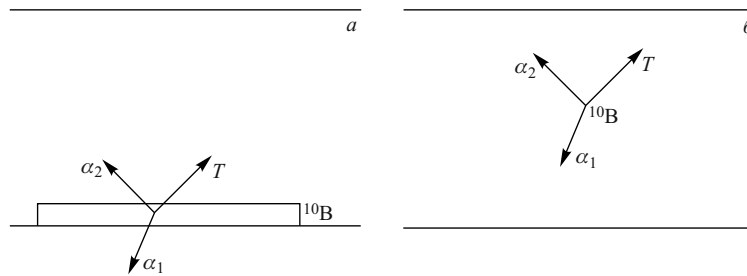


Рис. 2. а) Схема вылета частиц при использовании твердой мишени; б) схема вылета частиц при использовании газообразной мишени

не только количество частиц, попавших в чувствительный объем камеры, но и энергия, которой обладает каждая из них. В этих условиях оставленная в детекторе энергия, а следовательно, и амплитуда сигнала, снимаемого с детектора, может изменяться в широких пределах. В таких условиях события, соответствующие реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha t)^4\text{He}$, не будут локализоваться в виде пика и будут смешиваться с событиями, соответствующими попаданию ^7Li из реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ в чувствительный объем камеры (рис. 3).

При использовании газообразной мишени все три образовавшиеся частицы полностью тормозятся в чувствительном объеме детектора, и, таким образом, амплитуда сигнала будет пропорциональна сумме кинетических энергий всех продуктов реакции, которая равна $E_n - Q$, где $Q = 0,328$ МэВ, E_n — энергия нейтронов, при этом в амплитудном спектре будет формироваться пик, соответствующий событиям реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha t)^4\text{He}$ (см. рис. 3).

Метод формирования газовой ячейки внутри чувствительного объема ионизационной камеры обладает дополнительными преимуществами, которые заключаются в том, что существует возможность 1) значительно подавить стеночный эффект, 2) снизить фон от электродов камеры, 3) определить число атомов изучаемого вещества, используя простейшие газовые законы.

На рис. 3 приведены спектры анодных сигналов для твердой и газообразной мишеней, расположенных в ионизационной камере.

Из рис. 3 видно, что в силу причин, изложенных выше, пик, соответствующий реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha t)^4\text{He}$, не наблюдается. Напротив, в случае использования газообразной мишени вклад реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha t)^4\text{He}$ представлен в виде четко выделяемого пика, площадь которого может быть определена с хорошей точностью.

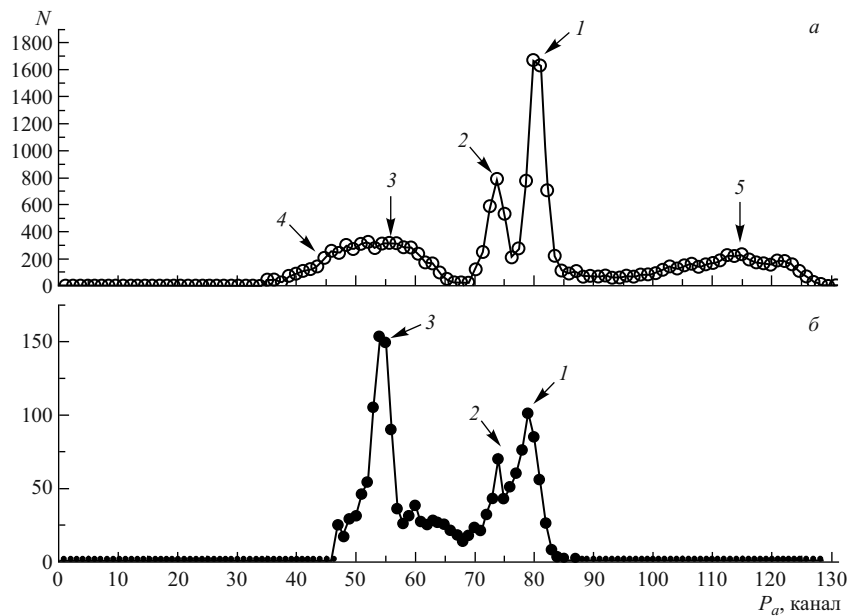


Рис. 3. Амплитудный спектр сигналов с анода ионизационной камеры: а) при использовании твердой мишени [2]: 1 — $^{10}\text{B}(n, \alpha_0)$; 2 — $^{10}\text{B}(n, \alpha_1)$; 3 — $^{10}\text{B}(n, t)$; 4 — ^7Li ; 5 — $^7\text{Li} + \alpha$; б) при использовании газообразной мишени: 1 — $^{10}\text{B}(n, \alpha_0)$; 2 — $^{10}\text{B}(n, \alpha_1)$; 3 — $^{10}\text{B}(n, t)$

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерения были выполнены для 11 различных энергий нейтронов в интервале от 4,1 до 7,1 МэВ. На рис. 4 показаны значения сечения реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^4\text{He}$, полученные в настоящей работе. На рисунке приведены данные других авторов [3–9], а также оцененные данные из библиотек ENDF/B VII и JENDL.

Анализ результатов показывает, что полученные в данном эксперименте значения сечения реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^4\text{He}$ лежат значительно ниже, нежели оценки, даваемые библиотеками ENDF/B VII и JENDL. Причем различие между полученными данными и оценками не ограничивается только уровнем сечения. В новых экспериментальных данных отчетливо видна немонотонность в функции возбуждения изучаемой реакции. Так, в ней наблюдаются максимумы в сечении для энергий нейтронов $\sim 4,5$ и $\sim 6,3$ МэВ и провал для энергии 5,3 МэВ. Имеющиеся оценки дают гладкую кривую для хода сечения во всем исследуемом диапазоне энергий нейтронов. Аналогичная ситуация, заключающаяся в несовпадении полученных данных как по уровню, так и по форме энергетической зависимости, наблюдается и при их сравнении с данными, полученными другими авторами [3–9]. Исключением являются данные, полученные в работе [5]. Несмотря на то, что они лежат значительно ниже данных всех остальных авторов, включая данные настоящей работы, в форме функции возбуждения наблюдаются те же структуры, что и в нашем эксперименте. Заметно меньшее сечение, полученное в [5], можно объяснить, если проанализировать данные для реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$, полученные в той же работе. Их сравнение с данными, полученными в [1], показывает, что они также занижены. Отношение же сечения реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^4\text{He}$ к сечению реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ оказывается

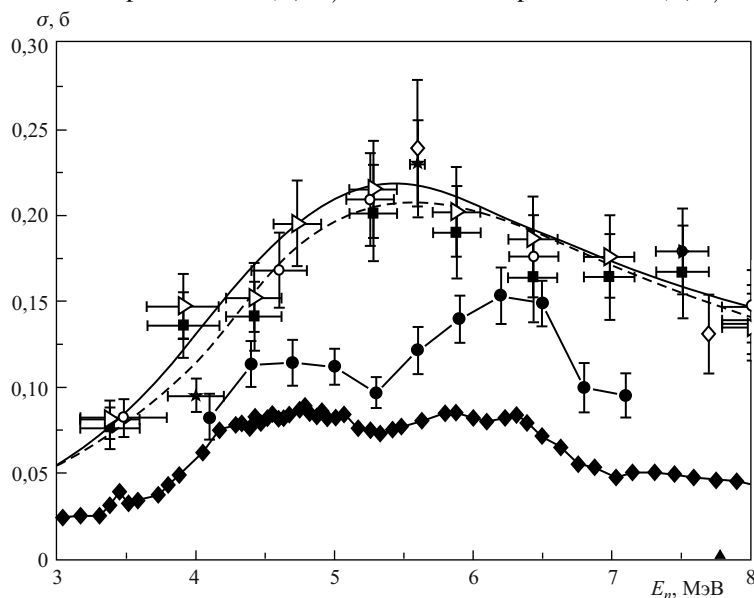


Рис. 4. Сечение реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^4\text{He}$ в сравнении с экспериментальными данными и теоретическими оценками: темные кружки — данные настоящей работы; квадраты — [4]; светлые кружки — [9]; темные ромбы — [5]; темные треугольники — [6]; светлые ромбы — [7]; звездочки — [8]; светлые треугольники — [3]; сплошная кривая — ENDF/B VII; штриховая — JENDL

практически одинаковым. Можно предположить, что в [5] присутствовала некая систематическая ошибка, связанная с определением эффективности регистрации событий или с определением нейтронного потока. Относительное же поведение обеих рассматриваемых реакций в [5] было измерено правильно.

Для разрешения сложившегося противоречия между экспериментальными данными разных авторов и оценками, приводимыми библиотеками, необходимы новые экспериментальные и расчетные усилия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Giorginis G., Khryachkov V. A.* The Cross Section of $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ Reaction Measured in the MeV Energy Range // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 562. P. 737–740.
2. *Giorginis G., Khryachkov V. A.* The Effect of Particle Leaking and Its Implications for Measurements of the (n, α) Reaction on Light Elements by Using Ionisation Chambers // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 538. P. 550–558.
3. *Woelfe R. et al.* Measurement of $^{10}\text{B}(n, t)^2\text{He}$ Reaction Cross Section in the Energy Range of 2.5 to 10.6 MeV Diffusion of Tritium in Boron Carbide // J. Radiochimica Acta. 1986. V. 40. P. 113–116.
4. *Qaim S. M. et al.* Determination of $(n, \text{Charge Particle})$ Reaction Cross Section for FRT. Relevant Materials // Conf. on Nuclear Data for Basic and Applied Science. Santafe, 1985. V. 1. P. 97–100.
5. *Davis E. A. et al.* The Disintegration of ^{10}B and ^{19}F by Fast Neutrons // Nucl. Phys. 1961. V. 27. P. 448–466.
6. *Lippincott E. P., Pitner A. L., Kellogg L. S.* Measurement of $^{10}\text{B}(n, t)$ Cross Section in Fast Neutron Spectrum // Trans. Am. Nucl. Soc. 1973. V. 17. P. 494–495.
7. *Frye Jr. G., Gammel J. H.* $^{10}\text{B}(n, t2\alpha)$ and $^{10}\text{B}(n, dn'2\alpha)$ Reaction for 6–20 MeV Neutrons // Phys. Rev. 1956. V. 103. P. 328–334.
8. *Wyman M. E., Fryer E. M., Thorpe M.* (n, t) Cross Sections for B-10, B-11 and Be-9 // Phys. Rev. 1958. V. 112. P. 1264–1271.
9. *Suhaimi A.* Studies of (n, t) Reaction on Light Nuclei // Conf. on Nuclear Data for Science and Technology. Mito, 1988. P. 225–232.

Получено 30 октября 2012 г.