

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ФУНКЦИИ
ВОЗБУЖДЕНИЯ РЕАКЦИИ $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$
В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ НЕЙТРОНОВ 4–7,35 МэВ**

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

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

Изучение взаимодействия нейтронов с легкими ядрами представляет интерес с точки зрения понимания механизмов ядерных реакций. Ядра фтора занимают особое место, поскольку в перспективных реакторах, работающих на расплавленных солях, фтор присутствует в активной зоне в огромных количествах и способен заметно влиять на кинетику цепной реакции. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования сечения реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ для нейтронов в диапазоне от 4 до 7,35 МэВ.

The interaction of neutrons with light nuclei is interesting for nuclear reaction mechanism understanding. Fluorine nuclei cross-section data are of a great importance due to the usage of fluorine-containing salts in advanced nuclear reactors. Their active zone is filled up with molten salts, and so fluorine cross-section affects nuclear chain reaction kinetics. The experimental investigation of $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ reaction cross-section in 4–7.35 MeV energy region is represented in this work.

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

ВВЕДЕНИЕ

Одной из перспективных ядерных технологий является солевой реактор. В этом типе реактора расплав солей (фторидов) урана или тория является одновременно и топливом, и теплоносителем. Это обеспечивает отличный теплосъем и возможность очистки и замены топлива без остановки реактора. При такой конструкции реактора в активной зоне находится большое количество ядер фтора, которые находятся в непосредственном контакте с делящимися ядрами и, следовательно, подвергаются воздействию незамедленных нейтронов, возникающих при делении тяжелых ядер. В таких условиях взаимодействие быстрых нейтронов с ядрами фтора может заметно влиять на кинетику реактора.

Нашей целью было исследование сечения реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$. Экспериментальные данные для сечения этой реакции сильно отличаются в работах разных авторов. Оценки, даваемые различными библиотеками ядерных данных, в свою очередь, также заметно отличаются друг от друга. Для уточнения данных был разработан новый, низкофоновый метод, позволяющий измерять выход продуктов изучаемой реакции напрямую. С использованием этого метода были проведены подробные измерения энергетического хода сечения реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$.

1. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

В настоящей работе измерения сечения реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ были выполнены на ускорителе ЭГ-1 ГНЦ РФ – ФЭИ. Нейтроны генерировались в реакции $\text{D}(d, n)$ на твердой титановой мишени толщиной $0,97 \text{ мг/см}^2$. Измерения были выполнены в интервале энергий нейтронов от 4,0 до 7,35 МэВ.

Исследования сечения проводились с помощью детектора, представляющего собой двойную ионизационную камеру. Одна часть камеры являлась ионизационной камерой с сеткой Фриша и служила для спектрометрии событий, связанных со взаимодействием нейтронов с ядрами фтора. Другая плоскопараллельная камера служила для регистрации осколков деления ^{238}U , которые использовались для мониторинга нейтронного потока (рис. 1).

Сигналы с различных электродов камеры усиливались и затем оцифровывались с помощью оцифровщика формы импульсов LeCroy 2262. Дальнейшая обработка сигналов проводилась программным путем с использованием алгоритмов цифровой обработки сигналов. В процессе обработки извлекалась информация об амплитудах анодного и катодного сигналов, а также моментах начала и окончания этих сигналов. Совместный анализ этой информации позволял определить энергию заряженных частиц, место возникновения события в межэлектродном пространстве и тип регистрируемой частицы.

Камеры заполнялись смесью 95 % Kг + 5 % CF_4 , находящейся под давлением 3 бар. Фтор, содержащийся в рабочем газе, служил мишенью для налетающих нейтронов. Ис-

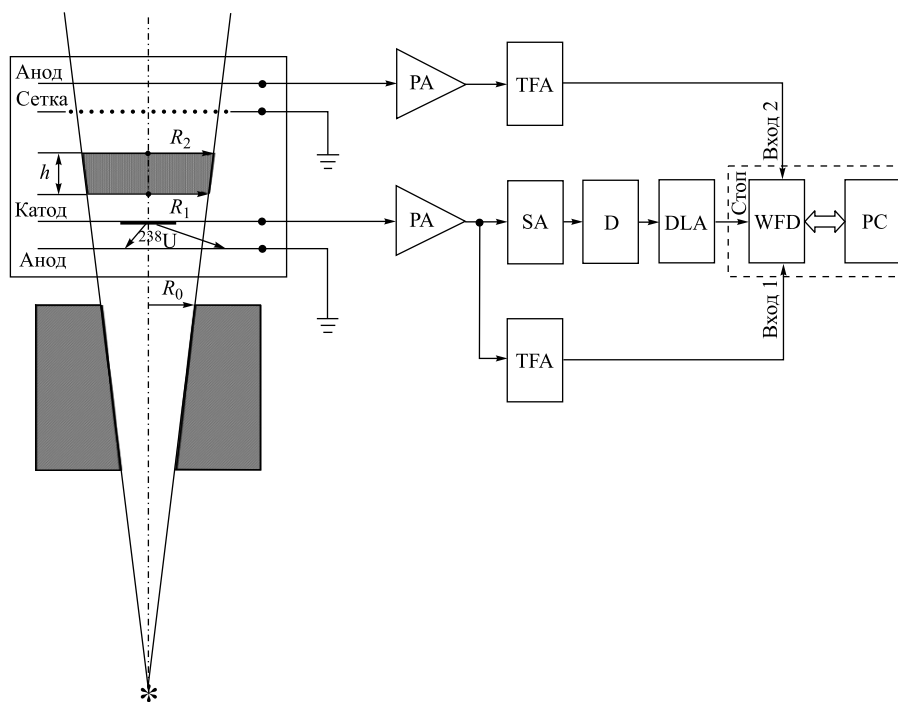


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: PA — зарядочувствительный предусилитель; TFA — быстрый усилитель; D — дискриминатор со следящим порогом; DLA — блок задержки; SA — спектрометрический усилитель

пользование газовой мишени позволило значительно увеличить число ядер в изучаемом образце и, следовательно, сократить время измерений. Применение методов коллимации быстрых нейтронов в сочетании с методами цифровой обработки сигналов позволило отбирать для анализа только те события, которые рождались внутри газовой ячейки, находящейся внутри чувствительного объема камеры. Преимуществом такого подхода является, в частности, то, что при правильном выборе размеров и положения газовой ячейки удастся почти полностью подавить стеночный эффект. Кроме того, для фиксированной ячейки число атомов фтора в мишени может быть легко определено с использованием простейших газовых законов.

Как уже отмечалось ранее, время нарастания анодного сигнала несет в себе информацию о типе регистрируемой частицы. Действительно, если взять, например, α -частицу и протон одной энергии, то длина пробега, а с ней и время собирания заряда для протона окажутся значительно больше, чем для α -частицы. В данной работе удалось использовать этот принцип для разделения частиц по типу и за счет этого фон, возникающий из-за паразитных реакций, протекающих в рабочем газе и на электродах детектора, удалось заметно уменьшить. На рис. 2 показан спектр анодных сигналов, снимаемых с детектора,

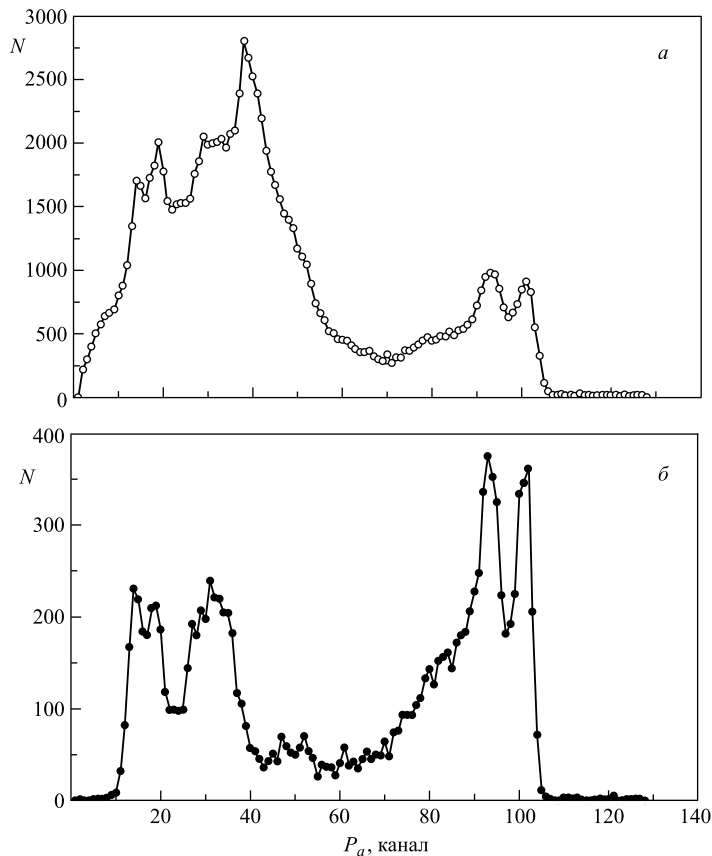


Рис. 2. *а*) Спектр сигналов, снимаемых с анода ионизационной камеры; *б*) тот же спектр после отбора событий

и тот же спектр после подавления фона. В полученном после подавления фона спектре наблюдается ряд линий, соответствующих разным каналам реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$. Отметим, что наблюдаемые пики соответствуют случаю вылета α -частицы в направлении движения падающих нейтронов. Функция отклика спектрометра при регистрации продуктов реакции, протекающей на легком ядре, имеет сложную форму. Кинетическая энергия продуктов реакции всегда равна сумме энергии падающих нейтронов и энергии реакции. Однако в зависимости от угла разлета α -частицы и остаточного ядра (^{16}N) эта энергия по-разному распределяется между продуктами реакции. В процессе работы было обнаружено, что сигнал, производимый α -частицей, всегда пропорционален ее энергии, в то время как для остаточного ядра велик амплитудный дефект и много энергии теряется в упругих столкновениях, не приводящих к ионизации среды, в которой оно движется. При этом если α -частица испускается в направлении движения падающих нейтронов, то она уносит большую часть кинетической энергии, а на долю остаточного ядра, для которого велик амплитудный дефект, приходится лишь небольшая энергия. Такие события формируют отчетливый пик в энергетическом спектре. Если же в направлении движения нейтронов испускается остаточное ядро, то значительная часть энергии не пойдет на ионизацию и амплитуда сигнала окажется меньше. Такие события, также принадлежащие изучаемому каналу реакции, будут лежать левее указанного четкого пика, и их также необходимо учитывать при определении сечения реакции.

Схема уровней остаточного ядра показана на рис. 3. Из нее видно, что уровни можно условно разбить на две группы — основное состояние и находящиеся вблизи него уровни с 1-го по 3-й. К другой группе мы можем отнести все более высоко лежащие уровни. Эти две группы состояний разделены энергетической щелью в 3 МэВ, что позволяет разделить их в энергетическом спектре, несмотря на описанный ранее эффект, связанный с амплитудным дефектом. Определение дифференциального сечения для каждого канала реакции, связанного с заселением определенного возбужденного состояния остаточного ядра, является сложной математической задачей.

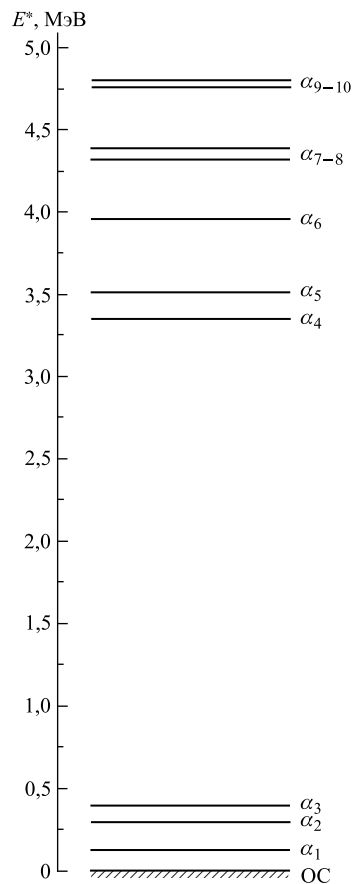


Рис. 3. Схема уровней ядра ^{16}N

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 и 5 показаны предварительные значения сечения реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$, полученные в данной работе. На рис. 4 приведено сравнение полученных данных с экспериментальными данными, доступными из литературы [1–5]. На рис. 5 показано сравнение полученных данных с оцененными данными из различных библиотек (ENDF/B VII,

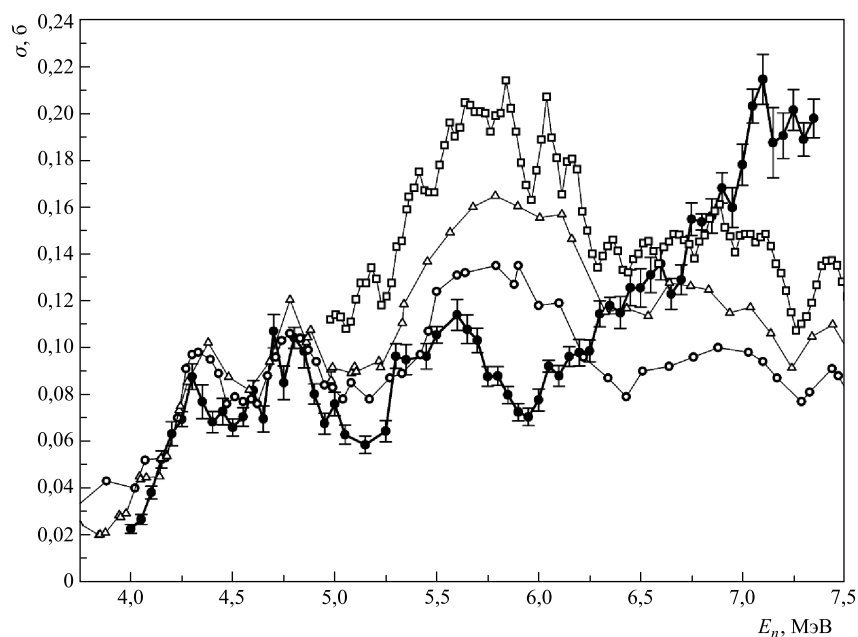


Рис. 4. Сечение реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ в сравнении с экспериментальными данными. Темные кружки — данные настоящей работы; светлые кружки — данные [1]; треугольники — [3]; квадраты — [2]

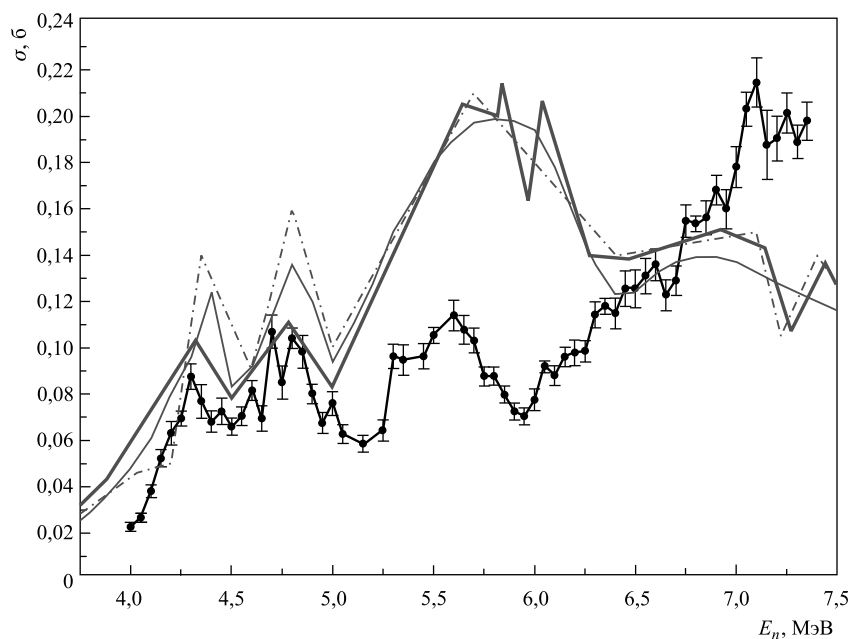


Рис. 5. Сечение реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ в сравнении с экспериментальными данными. Кривая с темными кружками — данные настоящей работы; жирная кривая — JENDL 4, ROSFOND2010; тонкая кривая — BROND 2.2; штрихпунктирная кривая — ENDF/B VII, JEFF 3.1, SENDL 3.1

BROND, JENDL). Для энергий нейтронов меньше 5,2 МэВ полученное сечение удовлетворительно описывается всеми оценками. В интервале энергий от 5,2 до 6 МэВ оценки лежат на 20–30 % выше полученных значений сечения. В целом для энергий нейтронов ниже 6 МэВ наши данные неплохо совпадают с данными, полученными в [1]. Для энергий нейтронов больше 6 МэВ в нашем эксперименте наблюдается резкий рост сечения, который не воспроизводится оценками. Более того, это резкое возрастание сечения отсутствует в данных, полученных другими авторами, включая данные [1]. Предварительный анализ показал, что за возрастание полного сечения в этом диапазоне энергий ответственны каналы, связанные с заселением верхних уровней возбуждения остаточного ядра (α_4 и более высокие). Сечение же каналов реакции, связанных с заселением низколежащих состояний в этой области, ведет себя плавно с тенденцией к понижению сечения с увеличением энергии возбуждения, в целом повторяя ход сечения, даваемый в [1].

Проведенный анализ работы [1] показал, что авторы не могли учитывать каналы, проявляющиеся в низкоэнергетической части спектра из-за большого фона от паразитных реакций, а также событий, соответствующих регистрации продуктов реакции, протекающих на боре-10 (в работе использовался газ BF_3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе использован ряд новых методических приемов, позволяющих существенно снизить фон и улучшить надежность определения количества событий, соответствующих реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$. По степени подавления фона данная установка значительно превосходит использовавшиеся ранее методики, применявшиеся для исследования этой реакции. В работе были получены данные о величине сечения реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ в диапазоне энергий нейтронов от 4 до 7,35 МэВ. Показано, что в области энергий выше 5,2 МэВ наблюдается значительное отличие полученных данных от оценок, даваемых различными библиотеками. Расхождение полученных данных с данными других авторов может быть объяснено тем, что в предыдущих экспериментальных работах было недооценено влияние каналов реакции, связанное с заселением возбужденных состояний остаточного ядра с высокой энергией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Davis E. A. et al.* The Disintegration of B10 and F19 by Fast Neutrons // Nucl. Phys. 1961. V. 27. P. 448–466.
2. *Bass R. et al.* Fast Neutron Excitation Function by Activation Techniques // Report from Euratom-Countries + Euratom to EANDC. 1966. No. 66. P. 6–9.
3. *Smith D. L., Meadows J. W., Whalen J. F.* Cross Sections for F-19(n, p)O-19 and F-19(n, α)N-16 from Threshold to 9 MeV // Nucl. Sci. Eng. 1981. V. 77. P. 256–260.
4. *Marion J. B., Brugger R. M.* Neutron-Induced Reactions in Fluorine // Phys. Rev. 1955. V. 100. P. 69–74.
5. *Bostrom N. A., Hudspeth E. L., Morgan I. L.* Excitation Curve for F-19(n, α)N-16 // Phys. Rev. 1955. V. 99. P. 643–648(PA4).

Получено 30 октября 2012 г.