

УДК 539.173.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ НА НЕЙТРОННЫХ ПУЧКАХ ИБР-30 И ИБР-2

*Ю. В. Григорьев*

Физико-энергетический институт, Обнинск

*Ю. С. Замятнин, С. Б. Борзаков, В. Ю. Коновалов,  
И. Н. Русков\*, В. И. Фурман,*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна  
Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка

*Х. Файков-Станьчик*

Лодзинский университет, Лодзь, Польша

*Н. Б. Янева*

Институт ядерных исследований и ядерной энергетики, София, Болгария

ВВЕДЕНИЕ	216
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	217
Определение спинов	217
Определение радиационных ширин и других характеристик	218
Определение величины $\alpha = \sigma_\gamma / \sigma_f$	220
Изучение сечений деления минорных актинидов	222
Исследования запаздывающих нейтронов	224
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	224

---

\*Постоянное место работы: Институт ядерных исследований и ядерной энергетики, София, Болгария.

УДК 539.173.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ НА НЕЙТРОННЫХ ПУЧКАХ ИБР-30 И ИБР-2

*Ю. В. Григорьев*

Физико-энергетический институт, Обнинск

*Ю. С. Замятнин, С. Б. Борзаков, В. Ю. Коновалов,  
И. Н. Русков\*, В. И. Фурман,*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна  
Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка

*Х. Файков-Станьчик*

Лодзинский университет, Лодзь, Польша

*Н. Б. Янева*

Институт ядерных исследований и ядерной энергетики, София, Болгария

Представлена методика и основные результаты измерений, проведенных на импульсных реакторах ИБР-30 и ИБР-2. С использованием сцинтилляционных детекторов проведены измерения спектров множественности гамма-квантов из реакции радиационного захвата на изотопах  $^{48}\text{Ti}$ ,  $^{113,115}\text{In}$ ,  $^{117}\text{Sn}$ ,  $^{127}\text{J}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ ,  $^{165}\text{Ho}$ ,  $^{175}\text{Lu}$ ,  $^{177}\text{Hf}$ ,  $^{178}\text{Hf}$ ,  $^{185}\text{Re}$ ,  $^{187}\text{Re}$  и  $^{232}\text{Th}$ . Исследованные спектры множественности от первой до двенадцатой кратности использовались для определения сечения радиационного захвата и соответствующих резонансных параметров, а также для получения величины  $\alpha$  и изучения ее эффекта блокировки в реакциях деления на ядрах  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  для резонансной области энергий нейтронов. С помощью HP-Ge-детектора объемом  $80\text{ см}^3$  проведены измерения спинов резонансов изотопов  $^{113,115}\text{In}$ ,  $^{117}\text{Sn}$ ,  $^{185,187}\text{Re}$  и  $^{235}\text{U}$  по методу заселенности гамма-квантами низколежащих уровней, а также определены величины  $\alpha$   $^{235}\text{U}$  в области тепловых энергий нейтронов. С помощью нейтронных детекторов и  $(n, \gamma)$ -детектора измерены функции пропускания и самоиндикации на образцах-фильтрах  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{237}\text{Np}$  и  $^{238}\text{U}$  при разных температурах для определения нейтронных сечений, факторов резонансной блокировки и доплер-эффекта в диапазоне энергий нейтронов  $1\text{ эВ} \div 100\text{ кэВ}$ .

В экспериментах с использованием ионизационных камер измерены сечения деления минорных актинидов  $^{234}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$  и  $^{243}\text{Am}$  нейтронами с энергиями ниже барьера деления.

На 27-метровой пролетной базе с зеркальным нейтроноводом и механическим прерывателем нейтронов на реакторе ИБР-2 проведены измерения полного выхода и кривых распада запаздывающих нейтронов при делении  $^{233,235}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$  тепловыми и холодными нейтронами.

---

\*Постоянное место работы: Институт ядерных исследований и ядерной энергетики, София, Болгария.

Methodical aspects and results of the main measurements, conducted on pulsed reactors IBR-30 and IBR-2 are presented. Measurements of the multiplicity spectra of gamma-quanta from the neutron capture reaction on the isotopes  $^{48}\text{Ti}$ ,  $^{113,115}\text{In}$ ,  $^{117}\text{Sn}$ ,  $^{127}\text{J}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ ,  $^{165}\text{Ho}$ ,  $^{175}\text{Lu}$ ,  $^{177}\text{Hf}$ ,  $^{178}\text{Hf}$ ,  $^{185}\text{Re}$ ,  $^{187}\text{Re}$ , and  $^{232}\text{Th}$  had been done with scintillation detectors. These spectra with multiplicity from one to twelve were used for determination of the capture cross-section and according resonance parameters and for obtaining the alpha-value and study of its blocking effect in the fission of  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  in the resonance neutron energy area. With the aid of HP-Ge-detector, that has the volume  $80\text{ cm}^3$ , the measurements were performed of resonance spins of isotopes  $^{113,115}\text{In}$ ,  $^{117}\text{Sn}$ ,  $^{185,187}\text{Re}$ , and  $^{235}\text{U}$  by the low-lying level population method in the thermal neutron energy area. The transmission and self-indication functions of filter samples  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{237}\text{Np}$ , and  $^{238}\text{U}$  were measured with neutron and  $(n, \gamma)$  detectors with different temperatures for determination the neutron cross-sections, resonance blocking factors and Doppler effect in the neutron energy range from 1 eV to 100 keV. The ionization chambers were used as detector of fission in the fission cross-section measurements of the minor actinides  $^{234}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ , and  $^{243}\text{Am}$  by the neutrons with energy below the fission barrier.

On the IBR-2 reactor on the channel with mirror neutron guide and neutron chopper the measurements of total yields and decay curve of the delayed neutrons from fission of  $^{233,235}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$  by thermal and cold neutrons were performed.

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых атомных реакторов типа БН-800, БРЕСТ и др. требует повышения точности нейтронных сечений и других ядерных констант реакторных материалов на уровне погрешности 1–5 % для делящихся ядер, 3–7 % для конструкционных материалов и 5–15 % для продуктов деления. Новая информация о ядерных данных необходима также для совершенствования теоретических моделей ядерных реакций и структуры ядер. Кроме того, уточнение ядерных данных важно для реализации различных проектов трансмутации радиоактивных отходов и повышения ядерной безопасности энергетических атомных реакторов. Эти задачи стимулировали в последние годы экспериментальные исследования по уточнению ядерных данных на нейтронных пучках ИБР-30 и ИБР-2 в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований.

Экспериментальные работы велись по нескольким направлениям при работе ИБР-30 в бустерном режиме (длительность нейтронной вспышки на полувысоте 4 мкс, частота следования нейтронных вспышек 100 Гц, средняя тепловая мощность 10 кВт).

На 500- и 121-метровых пролетных базах ИБР-30 на спектрометрах «Ромашка» с 16 кристаллами NaI(Tl) объемом 36 л [1] и «Парус» с 16-секционным жидкостным  $(n, \gamma)$ -детектором объемом 80 л [8] проводились измерения спектров множественности гамма-квантов из реакции радиационного захвата на изотопах  $^{48}\text{Ti}$ ,  $^{113,115}\text{In}$ ,  $^{117}\text{Sn}$ ,  $^{127}\text{J}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ ,  $^{165}\text{Ho}$ ,  $^{175}\text{Lu}$ ,  $^{177}\text{Hf}$ ,  $^{178}\text{Hf}$ ,  $^{185}\text{Re}$ ,  $^{187}\text{Re}$  и  $^{232}\text{Th}$ . Исследованные спектры множественности от первой до двенадцатой кратности использовались для определения сечения радиационного захвата и соответствующих резонансных параметров, а также

для получения величины  $\alpha$  и изучения ее эффекта блокировки в реакции деления на ядрах  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  для резонансной области энергий нейтронов.

С помощью HP-Ge-детектора объемом  $80\text{ см}^3$  [5] были проведены двухмерные измерения амплитудных и временных спектров для изотопов  $^{113,115}\text{In}$ ,  $^{117}\text{Sn}$ ,  $^{185,187}\text{Re}$  и  $^{235}\text{U}$  на пролетных базах 60, 123 и 500 м ИБР-30 и на 29-метровой пролетной базе ИБР-2 с целью определения спинов резонансов по методу заселенности  $\gamma$ -квантами низколежащих уровней, а также для определения величины  $\alpha$   $^{235}\text{U}$  в области тепловых энергий нейтронов.

С помощью нейтронных детекторов в виде батарей из  $^{10}\text{B}$ -,  $^3\text{He}$ -счетчиков и жидкостного 16-секционного  $(n, \gamma)$ -детектора измерены функции пропускания и самоиндикации на образцах-фильтрах  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{237}\text{Np}$  и  $^{238}\text{U}$  при разных температурах для определения нейтронных сечений, факторов резонансной блокировки и доплер-эффекта в диапазоне энергий нейтронов  $1\text{ эВ} \div 100\text{ кэВ}$ .

На 15- и 60-метровых пролетных базах ИБР-30 измерены сечения деления минорных актинидов  $^{234}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$  и  $^{243}\text{Am}$  нейтронами с энергиями ниже барьера деления с помощью ионизационных камер.

На 27-метровой пролетной базе с зеркальным нейтроноводом и механическим прерывателем нейтронов при работе ИБР-2 на мощности 1,5 МВт, частоте нейтронных вспышек 5 Гц и их длительности 240 мкс проведены исследования полного выхода и кривых распада запаздывающих нейтронов при делении  $^{233,235}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$  тепловыми и холодными нейтронами. В качестве детектора запаздывающих нейтронов использовалась батарея  $^3\text{He}$ -счетчиков в замедлителе.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

**Определение спинов.** Спины резонансных состояний были получены в основном методом множественности гамма-квантов. В полученных спектрах разных кратностей  $k$ , где  $k$  менялось от 1 до 8, определена площадь под резонансными пиками и получена доля актов захвата  $p_k = S_k / \sum_k S_k$ , соответствующая одновременной регистрации детектором  $k$  гамма-квантов, и средние значения кратностей  $\langle k \rangle = \sum_k k p_k$  для каждого резонанса. Таким образом определены спины сотен возбужденных уровней для ядер, отмеченных выше [2–4]. На рис. 1 приводятся результаты для ядра  $^{149}\text{Sm}$ .

Для определения спинов по методу заселенности низколежащих состояний ядра каскадом гамма-квантов проведены двухмерные измерения амплитудных и временных спектров с помощью HP германиевого детектора для обогащенных изотопов In ( $^{115}\text{In}$  до 99,9 %, а  $^{113}\text{In}$  до 87,2 %) и для естественных образцов In и Re.

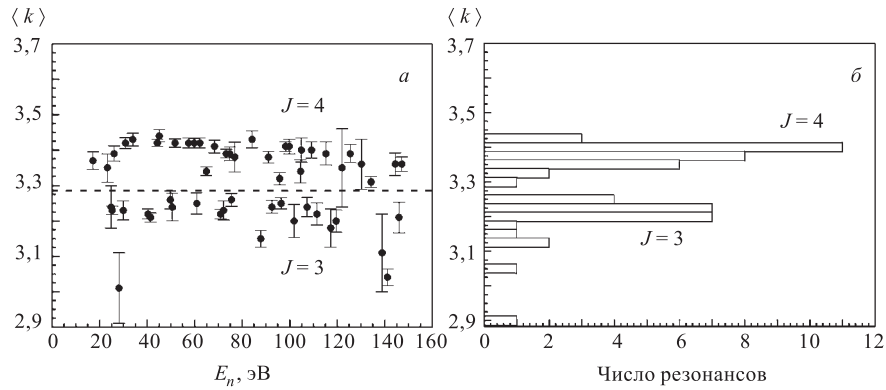


Рис. 1. Экспериментальные средние кратности  $\langle k \rangle$  для резонансов  $^{149}\text{Sm}$ : а) в диапазоне энергий 20 ÷ 160 эВ; б) в зависимости от числа резонансов

Таблица 1. Отношения интенсивностей гамма-линий и спины для резонансов  $^{115}\text{In}$

$E$ , эВ	$J$	$R_1 = I(273)/I(186,2)$	$R_2 = I(171/5)/I(186,2)$
1,457	5	$0,82 \pm 0,01$	$0,40 \pm 0,01$
3,85	4	$1,37 \pm 0,05$	$0,75 \pm 0,03$
9,07	5	$0,79 \pm 0,03$	$0,42 \pm 0,02$
12,04	4	$1,12 \pm 0,10$	$0,91 \pm 0,08$
22,73	5	$0,88 \pm 0,08$	$0,61 \pm 0,05$
39,6	5	$0,87 \pm 0,06$	$0,55 \pm 0,04$

В случае  $^{115}\text{In}$  изучались отношения интенсивностей гамма-переходов для энергий 186,2 и 273,0 кэВ и триплета 171 ÷ 175 кэВ, для изотопа  $^{113}\text{In}$  брались отношения интенсивностей гамма-переходов с энергиями 287,4; 341; 307 кэВ. Отношения интенсивностей этих линий разделяются на две группы в зависимости от спина резонанса, что видно из табл. 1 и 2. Впервые определены спины для изотопа  $^{113}\text{In}$  [5].

**Определение радиационных ширин и других характеристик.** Одновременные измерения спектров времени пролета для радиационного захвата и рассеяния нейтронов с помощью спектрометра «Ромашка» дали возможность оценить радиационные ширины для многих резонансов. Как известно, площади под резонансами в спектрах радиационного захвата и рассеяния нейтронов описываются формулами

$$S_\gamma = \Pi(E)\varepsilon_\gamma A\Gamma_\gamma/\Gamma, \quad (1)$$

$$S_n = \Pi(E)\varepsilon_n A\Gamma_n/\Gamma, \quad (2)$$

Таблица 2. Отношения интенсивностей гамма-линий и спины для резонансов  $^{113}\text{In}$ 

$E$ , эВ	$J$	$R_1 = I(287,4)/I(307)$	$R_2 = I(341)/I(307)$
1,80	4	$2,52 \pm 0,13$	$1,22 \pm 0,08$
4,70	5	$1,2 \pm 0,08$	$0,84 \pm 0,05$
14,6	5	$1,88 \pm 0,08$	$0,97 \pm 0,05$
21,55	4	$2,31 \pm 0,16$	$1,26 \pm 0,08$
24,99	5	$1,87 \pm 0,11$	$0,82 \pm 0,05$
32,24	5	$1,76 \pm 0,11$	$1,04 \pm 0,06$
44,71	—	—	—
45,30	—	—	—
70,29	4	$2,69 \pm 0,42$	$1,58 \pm 0,15$
91,59	5	$1,78 \pm 0,25$	$0,65 \pm 0,04$

где  $\Pi(E)$  — поток нейтронов с резонансной энергией  $E$  на единичный интервал энергии за время измерений на всю площадь образца;  $A$  — площадь, соответствующая резонансному провалу на кривой пропускания;  $\varepsilon_\gamma, \varepsilon_n$  — эффективность регистрации актов рассеяния и захвата нейтронов.

Зная значения  $S_n/S_\gamma, \varepsilon_\gamma, \varepsilon_n$  и  $\Gamma_n$ , можно получить радиационные ширины. Эту новую методику определения ширин можно рассмотреть на примере изотопа  $^{149}\text{Sm}$ . Отношение эффективностей  $\varepsilon_\gamma/\varepsilon_n$  в случае  $^{149}\text{Sm}$  равнялось  $0,58 \pm 0,08$  и находилось из эксперимента путем проведения нормировки по пяти низколежащим, хорошо разрешенным и сильным резонансам, для которых довольно точно известны  $\Gamma_n$  и  $\Gamma_\gamma$  (их значения определялись по другой методике для большей точности). При этом считалось, что эффективности регистрации гамма-квантов  $\varepsilon_\gamma$  и  $\varepsilon_n$  практически не меняются от резонанса к резонансу.

При определении параметров резонансов в значения  $S_n$  и  $S_\gamma$  вводились поправки, учитывающие вклады регистрации актов захвата в канале рассеяния (4%) и актов рассеяния в канале захвата (от 5 до 15% в зависимости от энергии нейтронов).

Значения энергий резонансов и радиационных ширин получены в области энергии до 270 эВ [4]. Удалось определить около 40 ранее неизвестных ширин. Наблюдаются значительно меньшие флуктуации ширин по сравнению с данными из BNL-325, и нет систематической тенденции роста значений ширин с увеличением энергии возбужденных состояний. Кроме спинов и радиационных ширин, определялись по необходимости нейтронные ширины и средние характеристики резонансных уровней, т. е. расстояния между уровнями и силовые функции.

Резонансные параметры отмеченных выше изотопов включены в справочник ядерных данных [13].

**Определение величины  $\alpha = \sigma_\gamma/\sigma_f$ .** Спектрометрия множественности излучений позволяет одновременно регистрировать несколько процессов взаимодействия нейтронов с ядрами (деление, радиационный захват и рассеяние нейтронов) и в ряде случаев разделять их. В последние годы эта методика использовалась для изучения формы спектров множественности гамма-лучей в отдельных разрешенных резонансах  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{235}\text{U}$  и в энергетических группах при исследовании процессов деления и радиационного захвата, а также для определения и уточнения величины  $\alpha$  на спектрометрах «Ромашка» и «Парус». Из экспериментальных временных спектров после вычитания фоновых составляющих получались исходные спектры кратности совпадений от 1 до 12 кратностей для энергетических групп в диапазоне энергий  $2,15 \div 2150$  эВ, для 80 резонансов  $^{239}\text{Pu}$  в области энергий  $7 \div 313$  эВ и 165 резонансов  $^{235}\text{U}$  до 150 эВ [1, 6–8]. Для разделения исходных спектров кратности на захватную и делительную части использовались спектры кратности разрешенных резонансов с малыми и большими делительными ширинами соответственно. Из этих спектров кратности формировались стандартные спектры захвата и деления, которые применялись при разделении исходных спектров кратностей. Разделение суммарных спектров кратности на две части позволяет определить величину  $\alpha$  по формуле

$$\alpha = \sigma_\gamma/\sigma_f = N_\gamma\varepsilon_f/N_f\varepsilon_\gamma = \Sigma K_{i\gamma}\varepsilon_f/\Sigma K_{if}\varepsilon_\gamma, \quad (3)$$

где  $\sigma_\gamma, \sigma_f$  — сечения радиационного захвата и деления;  $N_\gamma, N_f$  — суммарное число отсчетов гамма-квантов захвата и деления;  $\varepsilon_f, \varepsilon_\gamma$  — эффективность регистрации захватных и делительных гамма-квантов;  $K_{i\gamma}, K_{if}$  —  $i$ -я кратность радиационного захвата и деления. Погрешности в величине  $\alpha$  определялись в основном ошибками при разложении исходных спектров кратности на составляющие части от деления и радиационного захвата. Погрешности из-за неопределенностей в эффективностях регистрации гамма-лучей существенно меньше, поскольку отношение  $Q = \varepsilon_f/\varepsilon_\gamma$  близко к единице. На рис. 2 приведены для примера экспериментальные значения величины  $\alpha$   $^{239}\text{Pu}$ , где для сравнения приводятся также расчетные данные, полученные по программе ГРУКОН на основе последних оценок констант  $^{239}\text{Pu}$  в библиотеках BROND-2, ENDF/B-6, JENDL-3. Расчет величины  $\alpha$  был сделан также и в межрезонансных энергетических интервалах. Как видно из рис. 2, расчетные значения  $\alpha$  в разных библиотеках отличаются друг от друга на  $5 \div 30\%$ , а в отдельных резонансах — на  $50 \div 100\%$ . Экспериментальные значения  $\alpha$  отличаются от расчетных при малых и больших значениях, когда вклад радиационного захвата или деления в суммарном спектре кратности мал, а неопределенность сильно возрастает при разложении спектра на составляющие части по принятым стандартным спектрам. Эти неопределенности уменьшаются при определении экспериментальных и расчетных значений  $\alpha$  в широких энергетических группах (табл. 3) благодаря наличию большого количества

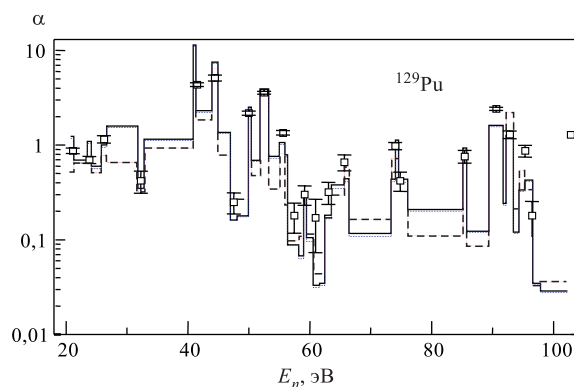


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные значения  $\alpha$ . Светлые квадраты — эксперимент; сплошная кривая — ENDF/B-6; штриховая — JENDL-3; точечная — BROND-2

Таблица 3. Экспериментальные и расчетные значения  $\alpha$  для энергетических групп  $^{239}\text{Pu}$

$E_{\text{lim}}$ , эВ	$\alpha_{\text{фл}}$ (фильтр 1 мм)	$\alpha$ (без фильтра)	BNAB	BROND-2	ENDF/B-6	JENDL-3
4,65–10	—	$0,88 \pm 0,04$	0,85	0,30	0,48	0,47
10–21,5	0,57	$0,60 \pm 0,03$	0,68	0,57	0,84	0,80
21,5–46,5	1,07	$1,45 \pm 0,04$	1,07	1,04	1,54	1,48
46,5–100	0,35	$0,52 \pm 0,02$	0,57	0,44	0,50	0,48
100–215	0,53	$0,80 \pm 0,03$	0,87	0,61	0,71	0,68
215–465	0,56	—	0,93	0,84	0,82	0,79
465–1000	0,59	$0,80 \pm 0,04$	0,83	0,97	0,88	0,87
1000–2150	0,69	$0,72 \pm 0,03$	0,89	0,93	1,00	1,10

резонансов. Экспериментальные погрешности величины  $\alpha$  в отдельных резонансах составляют  $2 \div 12\%$ . В энергетических группах погрешности равны  $3 \div 6\%$ .

Использование жидкостного детектора установки «Парус» для измерения спектров кратности позволило исследовать эффект резонансной блокировки и доплер-эффект в величине  $\alpha$  делящихся изотопов. Для этого проведены измерения времяпролетных спектров от 1-й до 15-й кратности при наличии на нейтронном пучке образцов-фильтров различной толщины. Коэффициент резонансной блокировки  $\alpha$  и его температурную зависимость можно определить



по формуле

$$\alpha_{\text{bl}} = \frac{\alpha f_{\gamma}(\theta)}{f_f(\theta)} = \frac{\alpha \int_0^{\infty} T_{\gamma}(x) dx}{\int_0^{\infty} T_f(x) dx} = \frac{\int_{\Delta E}^{\infty} \int_0^{\infty} \sigma_{\gamma} e^{-\sigma x} dE dx}{\int_{\Delta E}^{\infty} \int_0^{\infty} \sigma_f e^{-\sigma x} dE dx}, \quad (4)$$

где  $f_{\gamma}$ ,  $f_f$  — коэффициенты резонансной блокировки в сечениях захвата и деления величины  $\alpha$ ;  $x$  — толщина образца-фильтра;  $T_{\gamma}$ ,  $T_f$  — функции самоиндикации в радиационном захвате и делении;  $\alpha$  — величина при отсутствии образца-фильтра на нейтронном пучке;  $\theta$  — температура образца-фильтра.

Влияние резонансной блокировки до сих пор слабо исследовано. Измерения блокировки были проведены для двух тонких металлических дисков  $^{239}\text{Pu}$ , обогащенного до 99,9%. Образцы-фильтры толщиной 0,3, 0,5, 1 и 2,3 мм по очереди помещались в пучок нейтронов перед  $(n, \gamma)$ -детектором.

В табл. 3 приведены экспериментальные значения величины  $\alpha$  в группах для открытого пучка и при наличии в пучке образца-фильтра толщиной 1 мм, а также расчетные значения для открытого пучка, полученные на основе оцененных данных разных библиотек.

Как видно из табл. 3, расчетные значения  $\alpha$  для разных библиотек отличаются друг от друга на 5 ÷ 60%, что, по-видимому, отражает различия экспериментальных данных в разных работах. Экспериментальные погрешности величины  $\alpha$  составляют 5 ÷ 10%. Наблюдается эффект уменьшения  $\alpha$  на 5 ÷ 40% за счет резонансной блокировки, что можно объяснить более сильной резонансной блокировкой на узких, со спином  $J = 1$  резонансах с большим значением  $\alpha$  по сравнению с широкими делительными резонансами со спином  $J = 0$  и с малыми значениями  $\alpha$ . Детали эксперимента и результаты приводятся в [8].

**Изучение сечений деления минорных актинидов.** Измерения времяпролетных спектров проводились на импульсном бустере ИБР-30. В качестве детектора осколков деления использовались ионизационные камеры различной конструкции, содержащие от 2,2 мг ( $^{243}\text{Am}$ ) до 1,5 г ( $^{237}\text{Np}$ ) исследуемого изотопа и одну мишень из  $^{235}\text{U}$  для измерения потока и калибровки по энергии.

Полученные в измерениях времяпролетные спектры деления преобразовывались в зависимость сечения деления от энергии нейтронов. Кроме того, в области энергий нейтронов, где времяпролетное разрешение было достаточным для разрешения отдельных резонансов, определены площади  $\sigma_0 \Gamma_f$  и делительные ширины  $\Gamma_f$  этих резонансов. Для  $^{234}\text{U}$  эти параметры определялись методом площадей, а для  $^{237}\text{Np}$  и  $^{243}\text{Am}$  — методом формы. Подробно процедура обработки экспериментальных данных описана в работе [9].

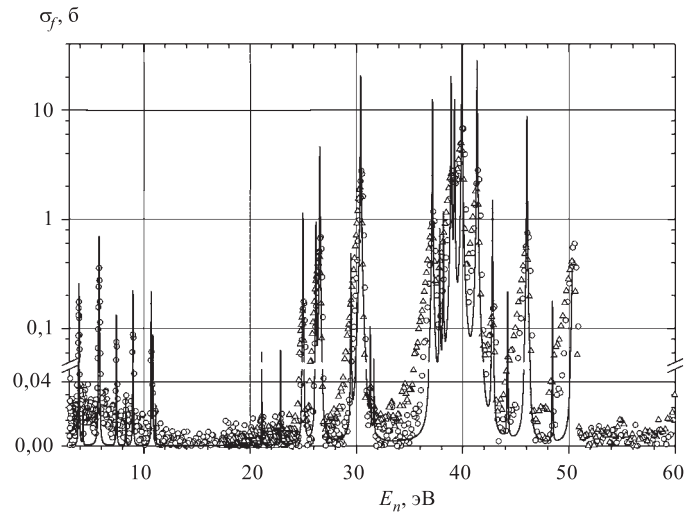


Рис. 3. Сечение деления  $^{237}\text{Np}$ : кружки — разрешение 40 нс/м; треугольники — разрешение 70 нс/м; сплошная линия — расчет

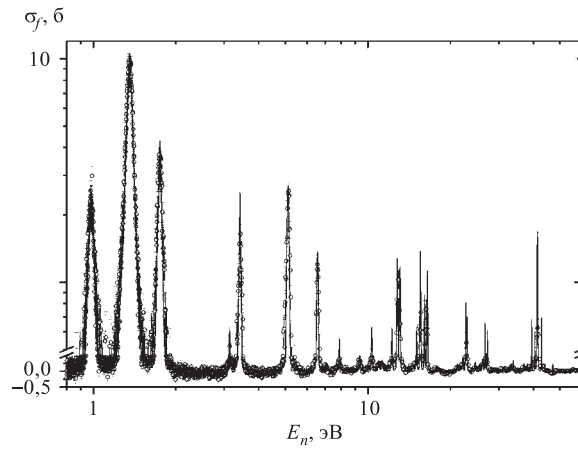


Рис. 4. Сечение деления  $^{243}\text{Am}$ : точки — эксперимент; сплошная линия — расчет

Сечения деления  $^{234}\text{U}$  определены в диапазоне энергий  $1 \div 1000$  эВ [10], для  $^{237}\text{Np}$  в области энергий  $1 \div 60$  эВ (см. рис.3). Погрешности определения сечения в резонансах не превышают 4% и обусловлены в основном статистической точностью калибровочных измерений.

На рис.4 представлены результаты измерений сечения деления  $^{243}\text{Am}$  [11]. Точками обозначены сечения, полученные непосредственно из вре-

микролетного спектра, а линией — восстановленные в одноуровневом приближении.

**Исследования запаздывающих нейтронов.** На импульсном реакторе ИБР-2 проведены исследования характеристик запаздывающих нейтронов (ЗН) [12]. В их числе измерения относительных выходов ЗН, образовавшихся в результате деления  $^{233}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{237}\text{Np}$  тепловыми нейтронами, а также после деления  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  холодными нейтронами. При этом выход ЗН в делении  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами использовался в качестве стандарта. Особое внимание было уделено измерениям с  $^{237}\text{Np}$ , которые проведены впервые. Этот изотоп предполагается использовать в энергетических установках нового поколения. При этом пришлось преодолевать значительные экспериментальные проблемы, поскольку  $^{237}\text{Np}$  создает высокий нейтронный фон в результате  $(\alpha, n)$ -реакции, а сечение деления тепловыми нейтронами составляет всего 20 мб (подбарьерное деление).

Измерения проведены методом периодического облучения образца без его перемещения. При этом одним и тем же детектором регистрируются мгновенные и запаздывающие нейтроны деления. Основным преимуществом этого метода является то, что неопределенности в измерении абсолютной эффективности детектора, нейтронного потока, массы образца не влияют на точность определения выхода ЗН. Полученные результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4. Значения  $\beta_0 = \nu_a/\nu$  (в процентах) для различных энергий налетающих нейтронов и их отношения (в скобках) к величине стандарта  $\beta_0[^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)]$  для  $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{237}\text{Np}$

Изотоп	$E_n = 0,003$ эВ	$E_n = 0,023$ эВ
$^{235}\text{U}$	$0,683 \pm 0,021$ (1,004 $\pm$ 0,009)	$0,680 \pm 0,021$ (1,000)
$^{233}\text{U}$	$0,274 \pm 0,009$ (0,403 $\pm$ 0,006)	$0,267 \pm 0,009$ (0,393 $\pm$ 0,006)
$^{239}\text{Pu}$	$0,227 \pm 0,011$ (0,334 $\pm$ 0,013)	$0,234 \pm 0,008$ (0,344 $\pm$ 0,004)
$^{237}\text{Np}$	—	$0,506 \pm 0,030$

Впервые проведены с рекордной точностью прецизионные измерения и анализ кривых распада ЗН для  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  в интервале времени после облучения 5 ÷ 730 мс. Измерения характеристик ЗН другими методами в указанном интервале приводят к большим неопределенностям.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Георгиев Г. П. и др. Установка для измерения нейтронных сечений и множественности излучений при взаимодействии нейтронов с ядрами. Сообщение ОИЯИ Р3-88-55. Дубна, 1988; Nucl. Instr. Meth. A. 1992. V. 313. P. 266.

2. Григорьев Ю. В. и др. Параметры нейтронных резонансов  $^{117}\text{Sn}$ . Препринт ФЭИ, 2445. Обнинск, 1995.
3. Georgiev G. P., Panajotova N. G., Grigoriev Yu. V. Neutron Resonance Parameters of  $^{177}\text{Hf}$ . JINR Preprint E3-96-9. Dubna, 1996.
4. Георгиев Г. П. и др. Определение параметров нейтронных резонансов  $^{149}\text{Sm}$  в области энергий 20–300 эВ // ВАНТ, сер. «Ядерные константы». 1999, вып. 1. С. 3–14.
5. Григорьев Ю. В. и др. Гамма-излучение в нейтронных резонансах  $^{113,115}\text{In}$ . Препринт ФЭИ, 2440. Обнинск, 1995; Определение спинов изотопов индия по интенсивности гамма-линий // ВАНТ, сер. «Ядерные константы». 1996. Вып. 2. С. 69–72.
6. Григорьев Ю. В., Георгиев Г. П., Станчик Х. Измерение спектров кратности излучения и величины  $\alpha$  для урана-235. Препринт ФЭИ, 2397. Обнинск, 1994.
7. Григорьев Ю. В. и др. Измерение спектров кратности гамма-лучей и величины  $\alpha$  для плутония-239 в области энергий 2–2150 эВ // ЯФ. 1999. Т. 62, вып. 5. С. 1–10.
8. Grigoriev Yu. V. Investigation of a Resonance Self-Shielding Effect in the  $\alpha$  Value of  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  in Energy Range 4.65–2150 eV // Proc. of the VII Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Dubna, May 13–16, 1999.
9. Борзаков С. Б. и др. // ЯФ. 1999. Т. 62, вып. 5. С. 933.
10. Борзаков С. Б. и др. Сообщение ОИЯИ Р3-97-398. Дубна, 1997.
11. Florek M. et al. Neutron Induced Fission Cross-Section of  $^{243}\text{Am}$  in the Energy Range from 0.8 to 50 eV // Proc. of the 14 Intern. Workshop on Nuclear Fission Physics, Obninsk, 2000. P. 243.
12. Borzakov S. B. et al. // Phys. of Atom. Nucl. 2000. V. 63. No. 4. P. 530.
13. Low Energy Neutron Physics. Tables of Neutron Resonance Parameters / Eds. S. I. Suhoruchkin et al. 2000. V. 16B.