

УДК 539.1.083

## Измерения величин $\alpha$ для $^{235}\text{U}$ на фильтрованных пучках нейтронов реактора Обнинской АЭС

ДВУХШЕРСТНОВ В. Г., КАЗАНСКИЙ Ю. А., ФУРМАНОВ В. М., ПЕТРОВ В. Л.

Чтобы предсказывать с приемлемой точностью коэффициенты конверсии или воспроизводства и время удвоения ядерного горючего в быстрых конвертерах или реакторах-размножителях, необходимо уточнить энергетическую зависимость отношения сечений радиационного захвата и деления ( $\alpha = \sigma_c/\sigma_f$ ) для изотопов урана и плутония.

В работе приведены результаты измерений величин  $\alpha$  для  $^{235}\text{U}$  на квазиодноэнергетических пучках нейтронов 2,0; 24,5; 140 кэВ [1] и «мягком» непрерывном спектре «борированного» пучка [2] уран-графитового реактора Обнинской АЭС и усреднения большинства имеющихся к настоящему времени экспериментальных данных в области 0,1—800 кэВ. Эти результаты сравниваются с данными дифференциальных экспериментов, оцененными данными и расчетами по различным системам констант. Об аналогичных измерениях  $\alpha$  для  $^{239}\text{Pu}$  и их методике сообщено в работах [3, 4].

Измерения на фильтрованных пучках нейтронов проведены с образцами металлического  $^{235}\text{U}$  90%-ного обогащения весом  $\sim 8$  и 12 г и эффективной толщиной  $\sim 0,004$  и  $0,006$  ядер/б, заваренными в оболочки из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм. Фон нейтронов и  $\gamma$ -квантов, возникающий вследствие процессов взаимодействия нейтронов пучка с ядрами образца урана, измерялся с помощью эквивалентного рассеивателя из свинца и макетов оболочек. В наихудшем случае (при измерениях с тонким образцом урана) отношение эффекта к сумме всех фонов, за исключением фона запаздывающего  $\gamma$ -излучения осколков деления в каналах регистрации  $\gamma$ -квантов и нейтронов (электроны и протоны отдачи с энергией  $> 0,6$  и  $> 1,8$  МэВ соответственно), составляло  $\sim 0,5$  и  $\sim 0,7$ . Калибровочные измерения выполнены на спектре подкадмиевых нейтронов с тонкими ( $\sim 1$  мг/см<sup>2</sup>) слоями  $^{235}\text{U}$  90%-ного обогащения и нормированы на величину  $\bar{\alpha}^{th}$ , вычисленную для этого спектра по оцененным сечениям радиационного захвата и деления, взятым из библиотек ядерных данных UKNDL [5] и ENDF/B-III [6]. Величина  $\bar{\alpha}^{th}$  для  $^{235}\text{U}$  с учетом неопределенностей в параметрах спектра нейтронов и сечений оказалась равной  $0,187 \pm 0,007$ .

В табл. 1 приведены величины  $\alpha$  для  $^{235}\text{U}$ , полученные из измерений на квазиодноэнергетических нейтронных пучках для трех энергетических групп с учетом поправок на примесные изотопы, рассеяние, поглощение и размножение нейтронов и  $\gamma$ -квантов в образцах урана, а также на немоноэнергетичность пучков по данным работы [1] и модифицированной системы констант БНАБ-26 (70) [7]. Приведенная в табл. 1 среднеквадратическая ошибка включает в себя неопределенности в величине  $\bar{\alpha}^{th}$ , в отношении  $\bar{\nu}/\bar{\nu}^{th}$  (по данным работы [8]) и в расчетных поправках, а также статистические ошибки измерений с учетом их корреляционных связей.

На рис. 1 показаны величины  $\alpha$  для образцов  $^{235}\text{U}$  различных толщин: измеренные на Sc-пучке реактора MTR [9], данные настоящей работы и вычисленные для спектра нейтронов 2-кэВ пика Sc-пучка реактора Обнинской АЭС [10] по данным дифференциальных измерений в ОИЯИ [11] и ORNL-RPI [12], а также по системам констант ENDF/B-II [13], БНАБ-26 [14] и модифицированной БНАБ-26 (70) [7]. Расчет зависимости величины  $\alpha$  от толщины образца проведен по алгоритму, описанному в работе [15]. Можно отметить удовлетворительное согласие между результатами экспериментальных работ и расчетом по модифицированной системе констант БНАБ-26 (70) и слабый эффект блокировки  $\alpha$  для образцов  $^{235}\text{U}$ , обычно используемых при измерениях в области энергий нейтронов в несколько килоэлектронвольт. Экстраполяция к нулевой толщине (сплошная линия) по данным экспериментальных работ, взятым с одинаковым статистическим весом, дает вели-

Таблица 1  
Величины  $\alpha$  для  $^{235}\text{U}$ , полученные из измерений на пучках нейтронов

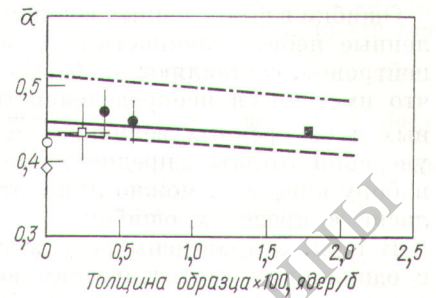
Толщина образца $^{235}\text{U}$ , ядер/б	Энергия нейтронов, кэВ		
	1,5—2,3	22,9—25,4	123—151
0,004	$0,468 \pm 0,033$	$0,361 \pm 0,038$	$0,214 \pm 0,030$
0,006	$0,454 \pm 0,031$	—	—

чину  $\bar{\alpha}_0 = 0,452 \pm 0,008$ , которая почти на 17% выше, чем рассчитанная по системе констант ENDF/B-II; на 13% ниже, чем по БНАБ-26, и в пределах 3% согласуется с расчетом по модифицированной БНАБ-27 (70).

На рис. 2 приведены данные по  $\alpha$  для  $^{235}\text{U}$  в области энергий нейтронов 20–30 кэВ. Сравнение экспериментальных данных, полученных для практически равных ширин энергетических групп нейтронов, указывает на удовлетворительное согласие результатов настоящей работы и работ [16–20]. Расчет эффекта блокировки в области 20–30 кэВ показал, что этот эффект составляет  $\sim 1\%$  для образцов толщиной 0,004 ядер/б, использованных в настоящей работе и в работе [18], и достигает  $\sim 6\%$  для образцов работы [17]. Сплошной линией показан результат усреднения данных по  $\alpha$ , взятых с одинаковым статистическим весом. Перед усреднением была внесена поправка на блокировку в те результаты, где этот эффект  $> 1\%$ . В среднем наша кривая в пределах 2% согласуется с новыми данными, полученными в работе [28], и лежит на 4% ниже оцененных данных по  $\bar{\alpha}$  из работ [26] и [27], вошедших в библиотеки ENDF/B-III и KEDAK-III, на 12% ниже данных системы констант ENDF/B-II и работы [29].

На рис. 3 показаны данные по  $\alpha$  для  $^{235}\text{U}$  в области энергий нейтронов 100–200 кэВ. Величина  $\alpha$  (см. табл. 1), полученная из измерений на Si-пучке нейтронов с энергией 140 кэВ для интервала 123–151 кэВ, в пределах ошибок согласуется с данными дифференциальных экспериментов на электростатических ускорителях [17, 18] и фотонейтронном источнике [21]. Сплошной линией изображен результат усреднения с одинаковым статистическим весом экспериментальных данных по  $\alpha(E)$  после внесения поправок на эффект блокировки. Для результатов работ [17, 30, 31] он оказался 4–6% и  $< 1\%$  для данных [18] и настоящей работы. Полученная кривая  $\bar{\alpha}(E)$  для интервала 100–200 кэВ лежит в среднем на 4% ниже кривых, рекомендованных в работах [26 и 27], на 2–3% выше данных модифицированной системы констант БНАБ-27 (70) [7] и библиотеки ENDF/B-II [13], на 4% выше данных работы [29].

В табл. 2 приведены результаты измерений и расчетов интегральной величины  $\bar{\alpha}$  для образцов  $^{235}\text{U}$  толщиной  $\sim 0,004$  ядер/б на «мягком» непрерывном спектре «борированного» пучка нейтронов реактора Обнинской АЭС [2]. Расчеты выполнены с учетом эффектов блокировки.



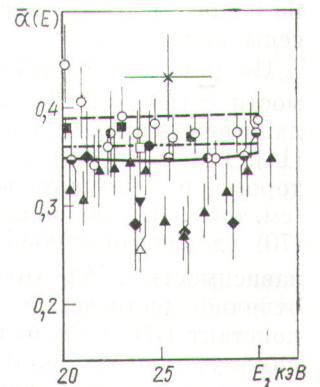
Р и с. 1. Зависимость величин  $\bar{\alpha}$  от толщины образца  $^{235}\text{U}$  для нейтронов с энергией около 2 кэВ.

Результаты работ: ■ — [9]; □ — [11]; ○ — [12]; ◇ — [13]; — — — — [7]; - - - - - [14]; ● и — — — — настоящая работа

по системе констант БНАБ-26 (70), БНАБ-26 и ее комбинации с данными дифференциальных измерений на ORELA [32].

Вычисленные и измеренные величины Таблица 2  $\bar{\alpha}$  для спектра нейтронов борированного пучка

Сечения захвата и деления		Вычисленные величины $\bar{\alpha}$ $^{235}\text{U}$
0,1–100 кэВ	< 0,1 и > 100 кэВ	
БНАБ-26 (70) [7]	БНАБ-26 (70)	0,345
БНАБ-26 [14]	БНАБ-26	0,397
ORELA [32]	БНАБ-26	0,336
Измеренная величина $\bar{\alpha} = 0,362 \pm 0,022$		



Р и с. 2. Данные по  $\bar{\alpha}$  для  $^{235}\text{U}$  в области энергий нейтронов 20–30 кэВ.

Результаты работ: ○ — [16]; ⊙ — [17]; ▲ — [18]; ■ — [19]; □ — [20]; △ — [22]; × — [23]; ◆ — [24]; ⊕ — [25]; — — — — [26] и [27]; — — — — [13]; ● и — — — — настоящая работа

Ошибки в вычисленных величинах  $\bar{\alpha}$ , обусловленные неопределенностями в знании спектра нейтронов, составляют ~3%. Из табл. 2 видно, что имеющиеся неопределенности в вычисленных и измеренных величинах  $\bar{\alpha}$  не позволяют уверенно отдать предпочтение какому-либо набору констант, можно лишь отметить их согласие в пределах ошибок.

В табл. 3 приведены результаты усреднения с одинаковым статистическим весом большинства имеющихся к настоящему времени экспериментальных данных по  $\alpha(E)$  для  $^{235}\text{U}$  в области энергий нейтронов 0,1—800 кэВ. Приведенные ошибки являются среднеквадратическими отклонениями от полученных средних величин  $\bar{\alpha}(E)$ . Ниже приводится список работ с названиями лабораторий и энергиями нейтронов (кэВ), данные которых вошли в наше усреднение:

[24], ИАЭ	24; 140; 250	[23], LLRL	0,1—10
[22], ФЭИ	24; 250	[9], INC	2
[30], LASL	200—800	[25], ОИЯИ	0,1—30
[34], LASL	200—800	[32], ORNL	0,1—100
[17], ORNL	20—700	[18], ФЭИ	20—800
[33], ОИЯИ	1—30	[19], ИАЭ	5—50; 130
[20], ФЭИ	24	[24], KFZK	8—60
[16], ORNL	20—600	[29], ORNL	0,1—200
[12], ORNL	0,1—3,0	[35], ORNL	0,1—10
[11], ОИЯИ	0,1—30	[36], ИТЭФ	0,2—7
[34], ИАЭ	0,1—5	[28], ФЭИ	10—80

Настоящая работа, ФЭИ . . . . . 2; 24,5; 140

Перед усреднением в данные по  $\alpha(E)$  из работ [9, 17, 30, 31], полученные из измерений с толстыми образцами, где эффект блокировки  $\alpha$ , по нашим оценкам, превосходит 1%, были внесены поправки.

На рис. 4 показаны энергетические зависимости  $\bar{\alpha}(E)$  для  $^{235}\text{U}$  в области 0,1—800 кэВ: данные групповых систем констант БНАБ-26 [14], БНАБ-26 (70) для расчета ядерных реакторов и результаты нашего усреднения (см. табл. 3). В целом система констант БНАБ-26 (70) удовлетворительно описывает полученную зависимость  $\bar{\alpha}(E)$ , хотя для нескольких групп отличие достигает 8—13%. Данные системы констант БНАБ-26 надо рассматривать, по-видимому, лишь как иллюстрацию того, как изменились наши представления об энергетической зависимости  $\alpha(E)$  для  $^{235}\text{U}$  за истекшие 11 лет.

Авторы считают, что принятая процедура усреднения и выбора рядов данных несовершенна, а полученная зависимость  $\bar{\alpha}(E)$

Результаты усреднения данных по  $\alpha(E)$  для  $^{235}\text{U}$

Таблица 3

$E_{\text{мин}} - E_{\text{макс}}$ , кэВ	$\bar{\alpha} \pm \Delta\bar{\alpha}$	$E_{\text{мин}} - E_{\text{макс}}$ , кэВ	$\bar{\alpha} \pm \Delta\bar{\alpha}$
0,1—0,2	0,641±0,048	10—20	0,380±0,012
0,2—0,3	0,499±0,025	20—30	0,350±0,009
0,3—0,4	0,484±0,026	30—40	0,360±0,007
0,4—0,5	0,359±0,009	40—50	0,344±0,010
0,5—0,6	0,300±0,015	50—60	0,314±0,014
0,6—0,7	0,411±0,016	60—70	0,296±0,015
0,7—0,8	0,439±0,017	70—80	0,296±0,024
0,8—0,9	0,488±0,032	80—90	0,295±0,022
0,9—1,0	0,580±0,041	90—100	0,292±0,016
1—2	0,410±0,013	100—200	0,246±0,010
2—3	0,413±0,027	200—300	0,208±0,007
3—4	0,414±0,035	300—400	0,173±0,006
4—5	0,386±0,020	400—500	0,154±0,005
5—6	0,329±0,019	500—600	0,140±0,007
6—7	0,391±0,021	600—700	0,127±0,011
7—8	0,372±0,030	700—800	0,124±0,007
8—9	0,394±0,030		
9—10	0,356±0,027		

не является оцененной, рекомендованной кривой для ее использования в реакторных расчетах. Однако выявленные расхождения нашей кривой с библиотекой констант БНАБ-26 (70) указывают на необходимость пересмотра групповых данных по  $\alpha(E)$ , полученных в 1969—1970 гг. на основе дифференциальных данных тех лет и анализа интегральных экспериментов на критических сборках ZPR-III.

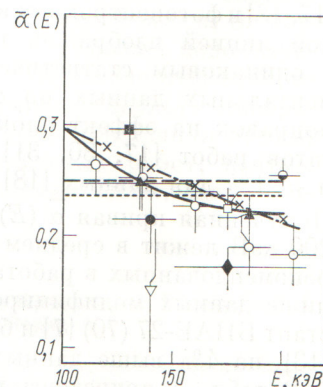
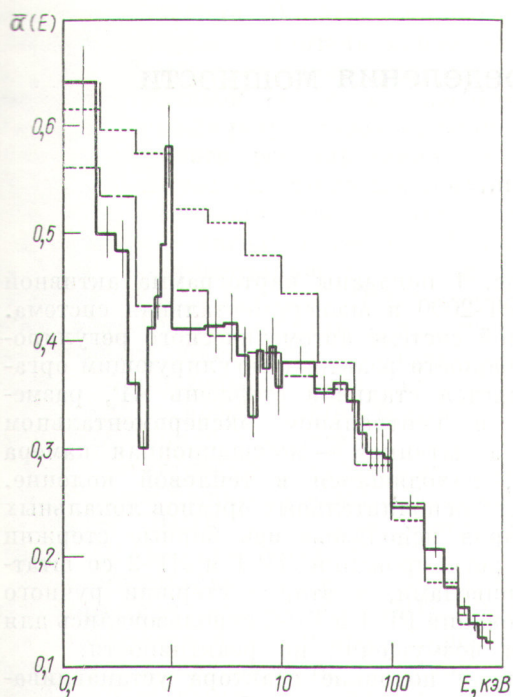


Рис. 3. Данные по  $\bar{\alpha}$  для  $^{235}\text{U}$  в области энергий нейтронов 100—200 кэВ.

Результаты работ:  $\ominus$  — [16];  $\circ$  — [17];  $\blacktriangle$  — [18];  $\blacksquare$  — [19];  $\nabla$  — [21];  $\blacklozenge$  — [30];  $\square$  — [31];  $\text{---}$  — [7] и [13];  $\text{---}$  — [6] и [26];  $\text{---}$  — [14];  $\times$  — [27];  $\bullet$  и  $\text{---}$  — настоящая работа



Р и с. 4. Энергетическая зависимость  $\bar{\alpha}$  для  $^{235}\text{U}$  в области энергий 0,1—800 кэВ. Результаты работ:

— — — [7]; ..... — [14]; — — — настоящая работа

В заключение авторы выражают благодарность В. В. Орлову за внимание к работе, В. Н. Кононову, В. А. Дулину, С. П. Белову, Е. Н. Кузину, Е. А. Плаксину и А. Г. Колпачеву за неоценимую помощь, советы и замечания на различных этапах работы.

Поступила в Редакцию 23/IX 1974 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузин Е. Н. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 35, вып. 6, с. 391.
2. Двухшерстнов В. Г. и др. Препринт ФЭИ-328, Обнинск, 1972.
3. Двухшерстнов В. Г. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 2, с. 131.
4. Двухшерстнов В. Г. и др. Препринт ФЭИ-285, Обнинск, 1971.
5. Parker's Evaluated data from the 1968 UK, Nucl. Data Library,  $^{235}\text{U}$  data, DFN-65.
6. Evaluated Nuclear Data File (ENDF/B) Version III,  $^{235}\text{U}$  data, Mat-1157, 1972.

7. Абагян Л. П. и др. In: Proc. IAEA Symp. «Nuclear Data for Reactors — 1970». Helsinki, 15—19 June 1970, v. II, p. 667.
8. Manero F., Konshin V. «Atomic Energy Rev.», 1972, v. 10, p. 637.
9. Smith J., Reeder S. «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1970, v. 13, p. 300.
10. Двухшерстнов В. Г. и др. «Атомная энергия», 1972, т. 33, вып. 1, с. 577.
11. Рябов Ю. В. и др. «Атомная энергия», 1968, т. 24, вып. 4, т. 351.
12. De Saussure G. e.a. ORNL-TM-1804, 1967.
13. Evaluated Nuclear Data File (ENDF/B) Version II,  $^{235}\text{U}$  data, Mat-1102, 1970.
14. Абагян Л. П. и др. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1964.
15. Воронаев А. И. и др. Препринт ФЭИ-247, Обнинск, 1971.
16. Lottin A. e.a. In: Proc. IAEA Symp. «Nucl. Data for Reactors—1966». Paris, 17-21 Oct. 1966, v. II, p. 233.
17. Weston L. e.a. «Nucl. Sci. and Engng», 1964, v. 20, p. 80.
18. Кононов В. Н. и др. «Атомная энергия», 1972, т. 32, вып. 1, с. 85.
19. Воротников П. Е. и др. В сб.: Труды конф. «Нейтронная физика». Т. I. Киев, «Наукова думка», 1972, с. 314.
20. Ваньков А. А., Ставиский Ю. Я. «Атомная энергия», 1965, т. 19, вып. 1, с. 41.
21. Спивак П. Е. и др. «Атомная энергия», 1956, № 3, с. 21.
22. Андреев В. Н. «Атомная энергия», 1958, т. 4, вып. 2, с. 185.
23. Czirr J., Lindsey J. In: Proc. IAEA Symp. «Nuclear Data for Reactor—1970». Helsinki, 15-19 June 1970, v. I, p. 331.
24. Bandl R. e.a. «Nucl. Sci. and Engng», 1972, v. 48, p. 324.
25. Куров М. А. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 30, вып. 3, с. 258.
26. Alter H., Dunford C. AI-AEC-MEMO-12916, 1970.
27. Schatz V. KFK-1629 EANDC (E) 151 «U», June 1973.
28. Кононов В. Н. и др. В сб.: Ядерные константы. Вып. 15. М., Атомиздат, 1974, с. 12; «Атомная энергия», 1975, т. 38, вып. 2, с. 82.
29. Gwin R. e.a. «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1972, v. 15, p. 481; EXFOR Library, AN 10267, 1973.
30. Diven B. e.a. «Phys. Rev.», 1958, v. 109, p. 144.
31. Hopkins J., Diven B. «Nucl. Sci. and Engng», 1962, v. 12, p. 169.
32. De Saussure G. e.a. «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1971, v. 14, p. 370.
33. Van Shi-Di e.a. In: Proc. IAEA. Symp. «Physics and Chemistry of Fission». Vienna, 1965, v. 1, p. 287.
34. Мурадян Г. В. и др. [23], p. 357.
35. Perez R. V. e.a. «Nucl. Sci. and Engng», 1973, v. 52, p. 46.
36. Болотский В. П. и др. В сб.: Труды конф. «Нейтронная физика». Т. 4. Обнинск, изд. ОНТИ ФЭИ, 1974, с. 49.