

Отношение коэффициентов реактивности  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{12}\text{C}$  и  $^{10}\text{B}$  к коэффициенту реактивности  $^{235}\text{U}$  в сборке БФС-31-4: 1 и 2 — расчет по ОСКАР-76 для гомогенной и гетерогенной модели; 3 и 4 — расчет по БНАБ-70 для гомогенной и гетерогенной модели;  $\circ$  — эксперимент

в работах [1, 10]. На рисунке представлены результаты этих расчетов для реальной структуры сборки (БФС-31-4) и ее гомогенной модели. Для других сборок расчетная разница между гомогенной и гетерогенной моделями на порядок меньше. Для  $^{12}\text{C}$  зависимость КР от размеров образца обусловлена в основном влиянием разблокировки окружающей среды, которое учитывалось в расчетах [11]. Как видно из рисунка, зависимость ОКР от размеров хорошо описывается расчетами, как это и отмечалось ранее [4].

#### Сравнение результатов измерений и расчетов ОКР

Сборка БФС	ОКР	Эксперимент	Расчет	
			БНАБ-70	ОСКАР-76
31-4	$^{239}\text{Pu}/^{235}\text{U}$	$1,192 \pm 0,015$	1,133	1,197
	$^{10}\text{B}/^{235}\text{U}$	$-0,74 \pm 0,02$	-0,590	-0,725
	$^{12}\text{C}/^{235}\text{U}$	$-0,0114 \pm 0,0005$	-0,0134	-0,0112
32-2	$^{239}\text{Pu}/^{235}\text{U}$	$1,260 \pm 0,015$	1,220	1,257
	$^{10}\text{B}/^{235}\text{U}$	$-0,895 \pm 0,015$	-0,733	-0,890
	$^{12}\text{C}/^{235}\text{U}$	$-0,0042 \pm 0,0003$	-0,0082	-0,0045
35-1	$^{239}\text{Pu}/^{235}\text{U}$	$1,49 \pm 0,02$	1,413	1,475
	$^{10}\text{B}/^{235}\text{U}$	$0,52 \pm 0,03$	-0,409	-0,452
	$^{12}\text{C}/^{235}\text{U}$	$-0,0226 \pm 0,0010$	-0,0218	-0,0238

В таблице приведены результаты расчетов ОКР, полученные по теории возмущений первого порядка (на рисунке это значения ОКР при  $\sigma_0 = \infty$ ). Поправки на гетерогенную структуру сборок внесены в расчет. Расчеты с использованием ОСКАР-76 значительно лучше согласуются

с результатами эксперимента. Это не удивительно, так как результаты экспериментов на сборках БФС-31 и БФС-33 использовались в процессе создания этой версии [7]. Таким образом, расхождения между рассчитанными и измеренными ОКР типичных делящихся, поглощающих и рассеивающих элементов объясняются наличием константной составляющей погрешности расчета.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дулин В. А. и др. «Атомная энергия», 1976, т. 40, вып. 5, с. 377.
2. Абагян Л. П. и др. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1964.
3. Абагян Л. П. и др. Препринт ФЭИ-325. Обнинск, 1974.
4. Кузин Е. Н. и др. Препринт ФЭИ-698. Обнинск, 1976.
5. Dargrouzet M., Chandat J., Fisher E. In: Proc. on Intern. Symp. on Physics of Fast Reactors. Tokyo, 16—19 Oct. 1973, v. 1, p. 537.
6. Николайшвили Ш. С. и др. В кн.: Труды трехсторон. сов.-белг.-гол. симп. по некоторым проблемам физики быстрых реакторов. М., изд. ЦНИИАтоминформ, 1970, т. 1, с. 192.
7. Усачев Л. Н. и др. В кн.: Труды конф. «Нейтронная физика». М., изд. ЦНИИАтоминформ, 1977, ч. IV, с. 27.
8. Дулин В. А. В кн.: Ядерные константы. Вып. 21. М., Атомиздат, 1976, с. 126.
9. Дулин В. А. «Атомная энергия», 1978, т. 45, вып. 2, с. 107.
10. Дулин В. А., Мамонтов В. Ф. Препринт ФЭИ-392. Обнинск, 1973.
11. Горбатов Н. Е. и др. [7], т. 2, докл. Д36.

Поступило в Редакцию 30.01.78

УДК 539.172.3

## Сопоставление сечений образования $^{115}\text{Cd}$ и $^{140}\text{Ba}$ при фотоделении $^{235}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$ , $^{237}\text{Np}$ и $^{239}\text{Pu}$

ГАНИЧ П. П., ЛОМОНОСОВ В. И., СИКОРА Д. И.

При исследовании процессов фотоделения трансуранических элементов представляет интерес знание выходов и сечений фотообразования осколков симметричного и асимметричного деления в зависимости от энергии  $\gamma$ -квантов. В настоящее время в работах [1—4] опубликованы данные по выходам продуктов фотоделения в максимуме и минимуме массового распределения осколков (или их отноше-

ние) как функции максимальной энергии фотонов для ядер  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$  и  $^{239}\text{Pu}$ . Для этих нуклидов в работах [1] приведены также сечения фотоделения в области гигантского резонанса.

Наличие таких данных позволило рассчитать полный выход осколков деления, выходы осколков  $^{140}\text{Ba}$  и  $^{115}\text{Cd}$  (нормированные к одному падающему на тормозную ми-



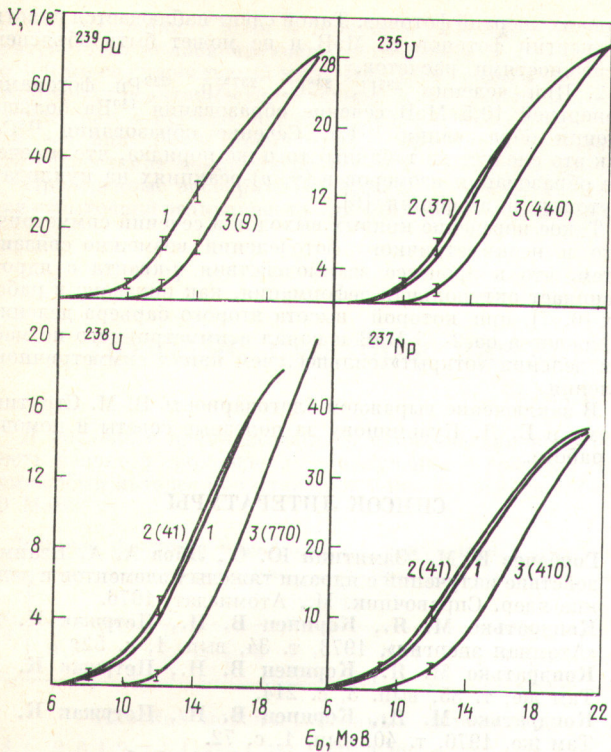


Рис. 1. Выход фотоделения (1), фотообразования  $^{140}\text{Ba}$  (2) и  $^{115}\text{Cd}$  (3). Для получения абсолютной величины выхода фотоделения значение ординаты необходимо умножить на  $3,9 \cdot 10^{-25}$

шью электрону) как функции максимальной энергии фотонов  $E_0$ , а из кривых выхода  $^{140}\text{Ba}$  и  $^{115}\text{Cd}$  — интегральные и дифференциальные сечения как функции энергии фотонов. Расчет проводили следующим образом. Полный выход осколков на один электрон  $Y_f(E_0)$  в зависимости от максимальной энергии фотонов  $E_0$  определяли по формуле

$$Y_f(E_0) = \int_{E_n}^{E_0} \sigma_{\gamma f}(E) P(E_0, E) dE.$$

Значения сечения фотоделения  $\sigma_{\gamma f}(E)$  взяты из работы [1], а протабулированные числа фотонов  $P(E_0, E) dE$  в спектре тормозного излучения из работы [5] ( $E_n$  — энергия порога фотоделения).

Выход отдельного осколка фотоделения  $Y_0(E_0)$  определяли из соотношения

$$Y_0(E_0) = \frac{Y(E_0), \%}{200} Y_f(E_0).$$

Данные процентного выхода осколков предварительно сглаживались по методу наименьших квадратов.

Определение сечения фотообразования осколка  $\sigma_{\gamma 0}(E)$  заключалось в последовательном решении уравнения

$$Y_0(E_0) = \int_{E_n}^{E_0} \sigma_{\gamma 0}(E) P(E_0, E) dE$$

при различных значениях  $E_0$ .

На рис. 1—3 приведены результаты расчетов  $Y_f(E_0)$  (кривая 1) и значения  $Y_0(E_0)$ ,  $\sigma_{\gamma_{\text{инт}}}(E)$ ,  $\sigma_{\gamma 0}(E)$  (кривые 2 и 3), умноженные на коэффициенты, указанные на рисунках (цифры в скобках). Как видно из рисунков, кривые 2 фотообразования  $^{140}\text{Ba}$  совпадают в пределах погрешностей с соответствующими кривыми фотоделения  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{237}\text{Np}$ .

Сечения образования  $^{140}\text{Ba}$  и  $^{115}\text{Cd}$  при  $E = 10,5$  МэВ

Реакция	$\sigma_{\gamma 0}(E)^{140}\text{Ba}$ , мб	$\sigma_{\gamma 0}(E)^{115}\text{Cd}$ , мкб	$\frac{10^{-3} \sigma_{\gamma 0}(E)^{115}\text{Cd}}{\sigma_{\gamma f}(E)}$
$^{235}\text{U}(\gamma, f)$	$2,55 \pm 0,8$	$102 \pm 30$	1,6
$^{238}\text{U}(\gamma, f)$	$1,43 \pm 0,4$	$23 \pm 6$	0,5
$^{237}\text{Np}(\gamma, f)$	$3 \pm 0,1$	$120 \pm 40$	1,06
$^{239}\text{Pu}(\gamma, f)$	$5,7 \pm 1,8$	$180 \pm 60$	0,95

Для  $^{239}\text{Pu}$  в работе [4] приведено отношение выходов

$$K(E_0) = Y_0(E_0)_{^{115}\text{Cd}} / Y_0(E_0)_{^{140}\text{Ba}}$$

как функции максимальной энергии фотонов. В предположении, что и для  $^{239}\text{Pu}$  формы кривых, характеризующих зависимость интегрального и дифференциального сечений фотообразования  $^{140}\text{Ba}$ , совпадают по виду с кривыми фотоделения, можно сопоставить относительные выходы  $Y'_0(E_0)$ , относительные сечения  $\sigma'_{\gamma 0}(E)$  фотообразования  $^{115}\text{Cd}$  с соответствующими функциями фотоделения  $^{239}\text{Pu}$  (см. рис. 1—3 для  $^{239}\text{Pu}$ ).

Относительный выход фотообразования  $^{115}\text{Cd}$  определяли из соотношения

$$Y'_0(E_0) = K(E_0) Y_f(E_0),$$

относительные значения функций  $\sigma'_{\gamma 0}(E)$  и  $\sigma'_{\gamma_{\text{инт}}}(E)$  определяли аналогично  $\sigma_{\gamma 0}(E)$  и  $\sigma_{\gamma_{\text{инт}}}(E)$ .

Относительная погрешность в определении выхода осколков  $\Delta Y_0(E_0) / Y_0(E_0)$  принималась равной относительной погрешности в измерении процентного выхода

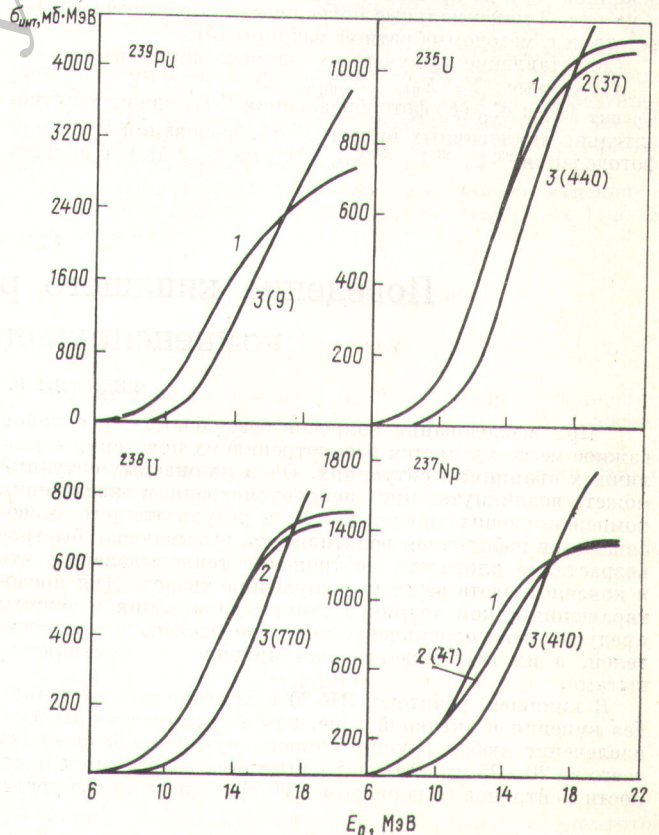
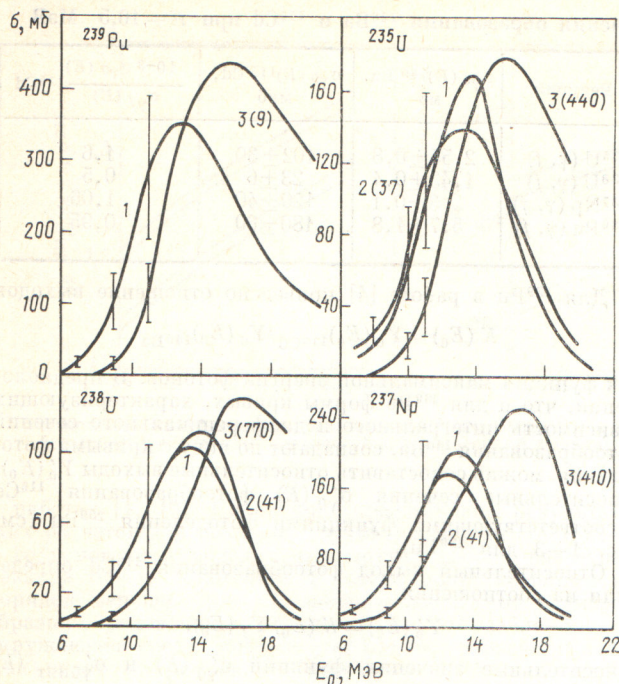


Рис. 2. Интегральные сечения фотоделения (1), фотообразования  $^{140}\text{Ba}$  (2) и  $^{115}\text{Cd}$  (3)





Р и с. 3. Дифференциальные сечения фотоделения [1] (1), фотообразования  $^{140}\text{Ba}$  (2) и  $^{115}\text{Cd}$  (3). Для  $^{239}\text{Pu}$  кривая 3 — в отн. ед.

осколков [1] и не превышала  $\pm 10\%$ . Указанные в таблице и на рис. 3 максимальные погрешности определяли в соответствии с методом обратной матрицы [5].

Сопоставление полученных данных показывает:  
1. Кривые  $Y_0(E_0)$ ,  $\sigma_{\gamma\text{инт}}(E)$ ,  $\sigma_{\gamma_0}(E)$ ,  $Y_0'(E_0)$ ,  $\sigma_{\gamma\text{инт}}'(E)$  и  $\sigma_{\gamma_0}'(E)$  фотообразования  $^{115}\text{Cd}$  сдвинуты относительно аналогичных кривых фотообразования  $^{140}\text{Ba}$  или фотоделения  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  на 2—3 МэВ в область

больших энергий фотонов. Такой сдвиг наблюдается вплоть до энергий фотонов 12 МэВ и не может быть объяснен погрешностями расчетов.

2. При делении  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  фотонами с энергией 10,5 МэВ сечение образования  $^{140}\text{Ba}$  больше сечения образования  $^{115}\text{Cd}$ . Сечение образования  $^{115}\text{Cd}$  (как это следует из таблицы) того же порядка, что и сечение образования изомеров в  $(\gamma, n)$ -реакциях на нуклидах плутония и америция [6].

Такое поведение кривых выходов и сечений симметричного и несимметричного фотоделения возможно связано с тем, что в процессе взаимодействия  $\gamma$ -кванта с ядром возникает октугольная деформация, как показано в работах [6, 7], при которой высота второго барьера деления понижается на 2—3 МэВ и канал асимметричного по массам деления «открыт» сильнее, чем канал симметричного деления.

В заключение выражаем благодарность В. М. Струтинскому и Б. Д. Кузьминову за полезные советы и помощь в работе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбачев В. М., Замятин Ю. С., Лбов А. А. Взаимодействие излучений с ядрами тяжелых элементов и деление ядер. Справочник. М., Атомиздат, 1976.
2. Кондратько М. Я., Коринец В. Н., Петржак К. А. «Атомная энергия», 1973, т. 34, вып. 1, с. 52.
3. Кондратько М. Я., Коринец В. Н., Петржак К. А. Там же, т. 35, вып. 3, с. 214.
4. Кондратько М. Я., Коринец В. Н., Петржак К. А. Там же, 1976, т. 40, вып. 1, с. 72.
5. Богданкевич О. В., Николаев Ф. А. Работа с пучком тормозного излучения. М., Атомиздат, 1964.
6. Поликанов С. М. Изомерия формы атомных ядер. М., Атомиздат, 1977.
7. Strutinsky V. «Nucl. Phys.», 1967, v. A95, p. 420; «Rev. Mod. Phys.», 1972, v. 44, p. 320.

Поступило в Редакцию 27.11.78  
В окончательной редакции 03.05.79

УДК 621.039.58

## Поведение кипящего реактора при извлечении компенсирующих поглотителей

ФЕДЯКИН Р. Е., КОЗИН Е. В.

При исследовании вопросов безопасности реакторов важное место уделяется рассмотрению их поведения в различных аварийных ситуациях. Одна из опасных ситуаций может возникнуть при непредусмотренном извлечении компенсирующих поглотителей, в результате чего высвобождается избыточная реактивность, вызывающая быстрое возрастание плотности нейтронов и тепловыделения, что в конечном счете ведет к разрушению твэлов. Для предотвращения такой аварии в схемах управления и защиты предусмотрено ограничение скорости извлечения поглотителей, а их перемещение, как правило, осуществляется шагами.

В кипящем реакторе ВК-50 в критическом состоянии без кипения в активной зоне, как и в реакторах ВВЭР\*, извлечение любой группы компенсирующих поглотителей всего на 20—25 мм приводит к быстрому возрастанию плотности нейтронов (с периодом  $< 20$  с). Однако после дости-

жения режима развитого кипения реакция активной зоны на извлечение компенсирующих поглотителей значительно ослабевает.

Эксперименты с извлечением компенсирующих поглотителей проводили при низком ( $P = 1,5$  МПа) и высоком ( $P = 7$  МПа) давлении в реакторе. Мощность реактора была равна соответственно 16 и 110—130 МВт, а среднее объемное паросодержание в активной зоне составляло  $\sim 25$  и  $34\%$ .

Группы компенсирующих поглотителей (по 3 штуки в каждой) сначала на периферии, а затем в центре активной зоны извлекали непрерывно со скоростью 2,5 мм/с. Исходное положение компенсирующих поглотителей соответствовало области их наибольшей эффективности. Поглотители извлекали на 300 мм, при этом средняя скорость увеличения реактивности составляла  $1,7 \cdot 10^{-4}$  1/с. В результате в течение двух минут была введена избыточная реактивность  $\sim 2\%$ . Несмотря на это, в процессе извлечения поглотителей мощность реактора возрастала с периодом 4—5 мин и увеличилась всего на 25% при низком давлении и на 15% — при высоком.

\* Сидоренко В. А. Вопросы безопасности работы реакторов ВВЭР. М., Атомиздат, 1977, с. 89