

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Conceptual Design of the International Fusion Materials Irradiation Facility IFMIF. Nuclear Fusion Project Annual Report on the Association Forschungszentrum Karlsruhe/EURATOM. 1995—1996. EUR 17512EN, 1997, p. 151—157.
2. Zouev Yu.N., Lartsev V.D., Chernukhin Yu.I. e.a. Feasibility of  $^3\text{HeD}$ ,  $^6\text{LiD}$  thermal-to-fusion neutron converters for fusion reactor materials testing. — In: IEEE/NPSS Symp. Fusion Engineering (SOFE-95), v. 1, University of Illinois, 1995, p. 49—52.
3. Барсанов В.И., Головачев М.Г., Дьяков А.А. и др. Атомный материаловедческий центр СФ НИКИЭТ и его экспериментально-методические возможности. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерная техника и технология, 1992, вып. 4, с. 3—18.
4. Almquist E. Fast neutron from T+D and T+Li reactions. — Can. J. Res., 1950, v. 28A, p. 433—448.
5. Napier B., Holland J., Howe S. e.a. Design of an in-core fast neutron generator. — Nucl. Instrum. Meth., 1976, v. 138, p. 463—465.
6. Miller W., Law W., Brugger R. Thermal neutron driven 14,1 MeV neutron generators. — Ibid., 1983, v. 216, p. 219—226.
7. Perry R.T., Parish T.A., Wilson W.B. A 14 MeV neutron source. — Fusion Technology, 1985, v. 8, № 1, pt 2B, p. 1454—1459.
8. Рождественский М.И., Точный Л.В., Чупова Л.М. Конвертирование тепловых нейтронов в быстрые с энергией 14,1 МэВ. — Атомная техника за рубежом, 1986, № 1, с. 22—26.
9. Peto G., Repelnik R. High-intensity 14-MeV deuterium-tritium neutron generators: present achievements and future potential. — Nucl. Sci. Engng, 1990, v. 106, p. 219—227.
10. Зуев Ю.Н., Кулинич Ю.А., Чернухин Ю.И. и др. Измерение эффективности  $^6\text{LiD}$ -конвертера тепловых нейтронов в быстрые нейтроны (DT)-, ( $^6\text{LiT}$ )-синтеза с энергией  $\sim 14$  МэВ в экспериментальном канале реактора ИВВ-2М: Препринт ВНИИТФ № 144, 1998.

Поступила в Редакцию 31.01.01

УДК 539.173.84

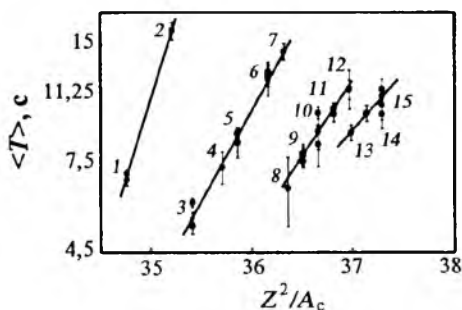
### ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ВЫХОДА И ПЕРИОДА ОТДЕЛЬНЫХ ГРУПП ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ ПРИ ДЕЛЕНИИ $^{239}\text{Pu}$ В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИИ ПЕРВИЧНЫХ НЕЙТРОНОВ 0,37—4,97 МэВ

*Ликсайкин В.М., Казаков Л.Е., Исаев С.Т., Королев Г.Г., Рощенко В.А., Тертычный Р.Г. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)*

Кинетика энергетических установок, работающих на основе цепной реакции деления ядер, во многом определяется характеристиками запаздывающих нейтронов, к которым в первую очередь следует отнести относительный выход  $a_i$  и период  $T_i$  отдельных групп. Поэтому к точности этих данных предъявляются повышенные требования. Известно, что точность любых оцененных ядерно-физических характеристик зависит не только от качества отдельного эксперимента, но и от числа экспериментов, результаты которых используются при оценке и выработке рекомендованных данных. При этом в зависимости от типа ядерно-физических констант используются различные критерии оценки надежности данных. В случае групповых параметров запаздывающих нейтронов ( $a_i$ ,  $T_i$ ) до сих пор нет процедуры усреднения данных, полученных в разных экспериментах, в качестве рекомендованных выбираются данные одного эксперимента [1]. Причиной такого положения, с одной стороны, является высокое качество экспериментальных данных [1], с другой, отсутствие процедуры усреднения в условиях сильной корреляции групповых параметров, относящихся как к одной определенной группе, так и принадлежащих разным группам. Кроме того, если даже пренебречь влиянием разных параметров эксперимента (время доставки образца в детектор нейтронов, время регистрации спада нейтронной активности, фоновые условия и др.) на корреляцию групповых параметров запаздывающих нейтронов, остается неопределен-

ность, связанная с недостаточной информацией о характере спектра первичных нейтронов. Основная информация об относительном выходе и периоде полураспада ядер-предшественников, накопленная к настоящему времени, относится, в основном, к тепловым, быстрым нейтронам (реакторные спектры нейтронов, включая и спектр нейтронов деления) и нейтронам реакции  $T(d, n)^4\text{He}$  (14 МэВ) [2].

До настоящего времени отдельные наборы групповых параметров запаздывающих нейтронов ( $a_i, T_i$ ) тестировали, в основном, путем сравнения полученной на их основе зависимости реактивности от асимптотического периода реактора с экспериментальными данными. В рамках такого подхода в работе [3] на основе экспериментов на исследовательском реакторе UARR (США) было показано, что групповые параметры для  $^{235}\text{U}$ , полученные в работе [1], удовлетворительно описывают его кинетику. Они позволяют предсказать реактивность системы с погрешностью 3% на основе измерений асимптотического периода реактора. В то же время групповые параметры из библиотеки данных ENDF/B VI, полученные в рамках микроскопического подхода [4], дают заниженные на 2—47% значения реактивности при ее изменении от  $+0,8\beta_{\text{эф}}$  до  $-0,8\beta_{\text{эф}}$ .



Р и с. 1. Зависимость среднего периода полураспада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов от параметра делимости ядра  $Z^2/A_c$ : 1—15 —  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{229}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{232}\text{U}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{242m}\text{Am}$ ,  $^{241}\text{Am}$  соответственно (данные взяты из компиляции [2])

нейтронов при делении тяжелых ядер моноэнергетическими нейтронами, поскольку именно анализ экспериментальных данных в терминах среднего периода полураспада позволяет установить и исследовать характер энергетической зависимости групповых параметров.

Целью настоящей работы являлось измерение энергетической зависимости относительного выхода запаздывающих нейтронов и периода полураспада их ядер-предшественников при делении ядер  $^{239}\text{Pu}$  в диапазоне энергии первичных нейтронов от 0,37 до 5 МэВ.

Экспериментальный метод. Групповые параметры запаздывающих нейтронов при делении  $^{239}\text{Pu}$  измеряли на установке, сконструированной на базе электростатического ускорителя КГ-2,5. Источником моноэнергетических нейтронов служили реакции генерации нейтронов на заряженных ионах  $T(p, n)^3\text{He}$  и  $D(d, n)^3\text{He}$ . Энергетические спектры нейтронов реакции  $T(p, n)^3\text{He}$ , усредненные по объему исследуемого образца  $^{239}\text{Pu}$ , рассчитаны с помощью программы MCNP [6] (рис. 2). В расчетах учтены все возможные эффекты, искажающие форму энергетического распределения первичных нейтронов (геометрия опыта, толщина нейтронной мишени, эффекты многократного рассеяния нейтронов на конструкционных материалах установки и др.).

В работе [5] отмечается, что каждому делящемуся под действием нейтронов составному ядру соответствует определенный средний период полураспада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов. На рис. 1 представлена зависимость среднего периода полураспада от параметра  $Z^2/A_c$  при делении тория, урана, плутония и америция быстрыми нейтронами. Средний период полураспада предшественников запаздывающих нейтронов в дополнение к зависимости реактивности от асимптотического периода реактора может служить надежным критерием оценки групповых параметров. В связи с этим значительный интерес представляют исследования энергетической зависимости среднего периода полураспада предшественников запаздывающих

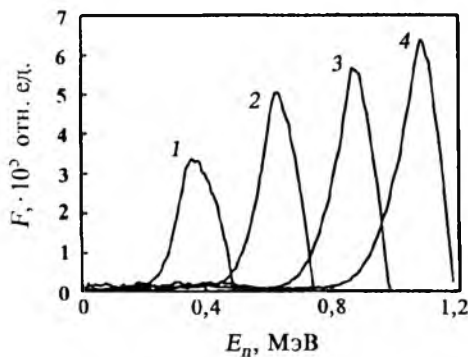
Процедура измерения заключалась в циклическом облучении образца  $^{239}\text{Pu}$  с последующим измерением временной зависимости спада активности запаздывающих нейтронов [7]. Образец с позиции облучения в детектор нейтронов доставляли с помощью пневматического устройства. Время доставки образца составляло в среднем 150 мс. Зависимость спада активности измеряли в течение 720 с. Время облучения было выбрано равным 15, 180 и 300 с.

Первичная обработка экспериментальных данных заключалась в суммировании временных зависимостей спада интенсивности запаздывающих нейтронов, полученных в отдельных циклах измерений. Суммарные кривые анализировали с помощью итерационного метода наименьших квадратов в целях получения оценки относительного выхода  $a_i$  и периода  $T_i$  [7].

В процессе обработки экспериментальных данных была получена информация о коэффициентах корреляции оцениваемых групповых параметров  $a_i$  и  $T_i$ , которую использовали в дальнейшем при усреднении наборов групповых параметров, соответствующих определенной энергии первичных нейтронов.

Результаты и их обсуждение. Относительный выход и период отдельных групп запаздывающих нейтронов приведены в табл. 1 в традиционном 6-групповом представлении, в табл. 2 представлена матрица корреляций групповых параметров  $a_i$  и  $T_i$  при делении  $^{239}\text{Pu}$  нейтронов энергией 0,37 МэВ. Средняя энергия первичных нейтронов и ее среднеквадратичное отклонение были оценены на основе энергетического распределения, полученного в работе [6].

На рис. 3 групповые параметры представлены в виде зависимости среднего периода полураспада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов от средней энергии первичных нейтронов  $\langle T \rangle (E_n)$ . Наряду с данными настоящей работы на рис. 3 приведены результаты других авторов, взятые из компиляции [2]. Как правило, групповые параметры в этих работах были получены на реакторном спектре нейтронов (спектр нейтронов деления). Среднюю энергию первичных нейтронов определяли на основе процедуры усреднения по спектру первичных нейтронов с использованием сечения деления в качестве весового коэффициента [8, 9]. Учитывая форму энергетического распределения первичных нейтронов в этих работах и приблизительно линейный характер зависимости  $\langle T \rangle (E_n)$ , можно отметить удовлетворительное согласие среднего периода полураспада настоящей работы с данными работ [1, 10, 11] в диапазоне энергии нейтронов тепловые—быстрые. В то же время наблюдается значительное расхождение данных с данными [1, 2, 13]. Средний период  $\langle T \rangle$  при делении  $^{239}\text{Pu}$  нейтронами энергией 3,8, 5,5, 6,5, 7, 7,5, 7,8 МэВ по данным работы [13] составляет 11,39, 11,47, 10,92, 11,86, 10,2 и 12,87 с соответственно. Диапазон изменения энергии первичных нейтронов в настоящей работе и работе [13] лишь частично перекрывается. Но учитывая хорошее согласие энергетической зависимости среднего периода полураспада настоящей работы и [1, 10, 11], трудно найти объяснение значительному увеличению  $\langle T \rangle$  при повышении энергии первичных нейтронов в работе [13]. Однако, принимая во внимание, что средний период полураспада предшественников запаздывающих нейтронов увеличивается с уменьшением массы компаунд-ядра, открытие канала эмис-



Р и с. 2. Энергетическое распределение первичных нейтронов реакции  $T(p, n)^3\text{He}$ , усредненное по объему исследуемого образца: 1—4 — 0,37, 0,624, 0,859, 1,059 МэВ соответственно

Т а б л и ц а 1. Относительный выход запаздывающих нейтронов и период полураспада их ядер-предшественников при делении  $^{239}\text{Pu}$  моноэнергетическими нейтронами

$E_n$ , МэВ	Номер группы							Средний период полураспада, с
	$i$	1	2	3	4	5	6	
$0,37 \pm 0,06$	$\alpha_i$	0,037 $\pm 0,001$	0,295 $\pm 0,006$	0,212 $\pm 0,005$	0,319 $\pm 0,005$	0,103 $\pm 0,003$	0,034 $\pm 0,001$	$10,36 \pm 0,15$
	$T_i$	52,09 $\pm 0,41$	22,34 $\pm 0,11$	5,26 $\pm 0,07$	2,06 $\pm 0,04$	0,543 $\pm 0,015$	0,218 $\pm 0,006$	
$0,62 \pm 0,06$	$\alpha_i$	0,037 $\pm 0,001$	0,295 $\pm 0,007$	0,217 $\pm 0,006$	0,321 $\pm 0,007$	0,096 $\pm 0,003$	0,034 $\pm 0,001$	$10,47 \pm 0,17$
	$T_i$	53,19 $\pm 0,49$	22,44 $\pm 0,12$	5,30 $\pm 0,08$	2,09 $\pm 0,04$	0,568 $\pm 0,019$	0,214 $\pm 0,008$	
$0,86 \pm 0,06$	$\alpha_i$	0,037 $\pm 0,001$	0,289 $\pm 0,005$	0,216 $\pm 0,005$	0,322 $\pm 0,005$	0,102 $\pm 0,003$	0,034 $\pm 0,001$	$10,27 \pm 0,13$
	$T_i$	53,81 $\pm 0,41$	22,19 $\pm 0,10$	5,25 $\pm 0,07$	2,06 $\pm 0,03$	0,547 $\pm 0,016$	0,217 $\pm 0,006$	
$1,06 \pm 0,06$	$\alpha_i$	0,038 $\pm 0,001$	0,292 $\pm 0,004$	0,214 $\pm 0,004$	0,320 $\pm 0,004$	0,101 $\pm 0,002$	0,035 $\pm 0,001$	$10,37 \pm 0,11$
	$T_i$	53,51 $\pm 0,33$	22,23 $\pm 0,09$	5,11 $\pm 0,05$	2,15 $\pm 0,03$	0,555 $\pm 0,012$	0,215 $\pm 0,005$	
$3,27 \pm 0,14$	$\alpha_i$	0,038 $\pm 0,001$	0,271 $\pm 0,007$	0,220 $\pm 0,006$	0,332 $\pm 0,008$	0,104 $\pm 0,003$	0,035 $\pm 0,001$	$10,06 \pm 0,19$
	$T_i$	55,29 $\pm 1,45$	22,23 $\pm 0,29$	5,11 $\pm 0,13$	2,16 $\pm 0,06$	0,547 $\pm 0,016$	0,216 $\pm 0,006$	
$3,81 \pm 0,11$	$\alpha_i$	0,038 $\pm 0,001$	0,247 $\pm 0,004$	0,227 $\pm 0,004$	0,348 $\pm 0,005$	0,105 $\pm 0,002$	0,035 $\pm 0,001$	$9,68 \pm 0,11$
	$T_i$	56,19 $\pm 0,53$	22,51 $\pm 0,14$	5,22 $\pm 0,07$	2,09 $\pm 0,03$	0,552 $\pm 0,012$	0,217 $\pm 0,005$	
$4,27 \pm 0,11$	$\alpha_i$	0,038 $\pm 0,001$	0,243 $\pm 0,005$	0,230 $\pm 0,005$	0,348 $\pm 0,006$	0,106 $\pm 0,003$	0,035 $\pm 0,001$	$9,65 \pm 0,14$
	$T_i$	56,68 $\pm 0,65$	22,49 $\pm 0,18$	5,31 $\pm 0,08$	2,10 $\pm 0,04$	0,554 $\pm 0,016$	0,217 $\pm 0,006$	
$4,81 \pm 0,13$	$\alpha_i$	0,039 $\pm 0,001$	0,238 $\pm 0,004$	0,228 $\pm 0,004$	0,355 $\pm 0,005$	0,105 $\pm 0,003$	0,035 $\pm 0,001$	$9,62 \pm 0,11$
	$T_i$	57,49 $\pm 0,49$	22,54 $\pm 0,14$	5,32 $\pm 0,07$	2,10 $\pm 0,03$	0,554 $\pm 0,014$	0,217 $\pm 0,005$	
$4,97 \pm 0,13$	$\alpha_i$	0,039 $\pm 0,001$	0,243 $\pm 0,006$	0,232 $\pm 0,006$	0,341 $\pm 0,008$	0,109 $\pm 0,004$	0,036 $\pm 0,001$	$9,59 \pm 0,16$
	$T_i$	58,17 $\pm 0,65$	22,04 $\pm 0,19$	4,92 $\pm 0,09$	2,17 $\pm 0,05$	0,553 $\pm 0,019$	0,217 $\pm 0,008$	

Т а б л и ц а 2. Корреляционная матрица групповых параметров запаздывающих нейтронов, полученная для деления  $^{239}\text{Pu}$  нейтронами энергией 0,37 МэВ

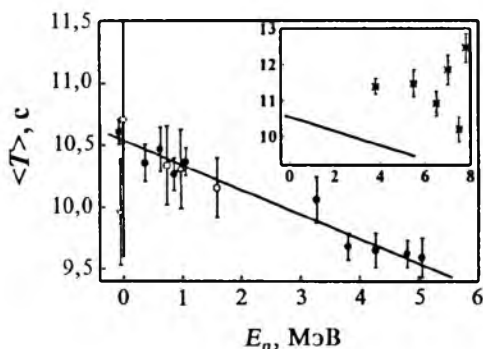
Параметр	$a_1$	$T_1$	$a_2$	$T_2$	$a_3$	$T_3$	$a_4$	$T_4$	$a_5$	$T_5$	$a_6$	$T_6$
$a_1$	1											
$T_1$	0	1										
$a_2$	0	0,77	1									
$T_2$	0	-0,18	0,09	1								
$a_3$	0	0,26	0,41	0,33	1							
$T_3$	0	-0,13	-0,16	0,65	-0,22	1						
$a_4$	0	0,43	0,6	0,45	-0,07	0,51	1					
$T_4$	0	0,08	0,14	0,01	-0,46	0	0,12	1				
$a_5$	0	0,08	0,11	0,06	0,02	0,03	-0,05	0,19	1			
$T_5$	0	0,04	0,06	0,05	0,01	0,05	-0,07	0,09	0	1		
$a_6$	0	0,01	0,02	0,01	0	0	0	0,03	-0,01	0	1	
$T_6$	0	0,01	0,02	0,01	0	0	0	0,04	-0,01	0	0	1

сионного деления ( $n, n'$ ) может привести к некоторому росту среднего периода полураспада, начиная с энергии нейтронов ~ 6 МэВ. Следует также отметить, что авторы работы [12] не предоставили информацию о спектре первичных нейтронов. Если предположить, что измерения в этой работе проводили на спектре нейтронов деления, то расхождение данных настоящей работы с данными работы [12] существенно уменьшается.

Наблюдается значительное отличие групповых параметров настоящей работы и библиотеки ENDF/B VI [14]. При делении  $^{239}\text{Pu}$  тепловыми и быстрыми нейтронами средний период полураспада предшественников запаздывающих нейтронов  $\langle T \rangle$ , полученный на основе данных из библиотеки ENDF/B VI, равен 9,66 и 9,21 с соответственно, что существенно ниже всей совокупности данных на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что если обсуждать полученные результаты в терминах среднего периода полураспада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов, то наблюдается значительное уменьшение этой величины при увеличении энергии первичных нейтронов от тепловой до 5 МэВ. При этом изменение среднего периода в указанном диапазоне энергии нейтронов составляет ~ 10%. Однако следует отметить, что хорошее согласие данных об энергетической зависимости среднего периода полураспада является необходимым условием надежности данных о групповых параметрах запаздывающих нейтронов ( $a_i, T_i$ ), но, по-видимому, недостаточным. Как было показано [3], групповые параметры должны удовлетворять критерию сохранения масштаба изменения реактивности на всей шкале изменения асимптотического периода реактора — от положительных значений до отрицательных.

Реактивность критической системы в зависимости от периода переходного процесса может быть представлена с помощью «уравнения обратных часов»



Р и с. 3. Энергетическая зависимость среднего периода полураспада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов при делении  $^{239}\text{Pu}$ : ● — настоящая работа; ○ — [1]; □ — [10]; △ — [11]; ▽ — [12]; \* — [13]

$$\rho = \frac{\Lambda}{T_R} + \sum_{i=1}^6 \frac{(\beta_i)_{\text{эф}}}{1 + \lambda_i T_R},$$

где  $\Lambda$  — время генерации мгновенных нейтронов;  $T_R$  — асимптотический период;  $\lambda_i$  — постоянная распада, индекс  $i$  соответствует номеру группы запаздывающих нейтронов.

Если пренебречь членом, связанным с мгновенными нейтронами, и учесть, что величину  $(\beta_i)_{\text{эф}}$  можно аппроксимировать  $\beta_{\text{эф}} a_i$  [16], то реактивность можно представить в виде

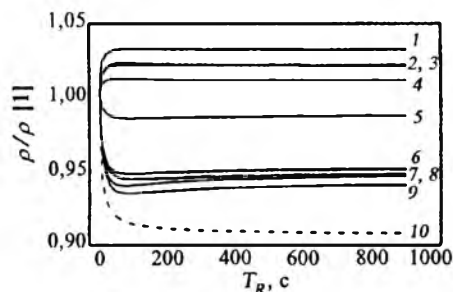
$$\rho = \beta_{\text{эф}} \sum_{i=1}^6 \frac{a_i}{1 + \lambda_i T_R},$$

где  $a_i$  — относительный выход  $i$ -й группы.

Сравнительный анализ различных наборов групповых параметров запаздывающих нейтронов может быть выполнен на основе зависимости отношения реактивностей, полученных на их основе, от асимптотического периода

$$\frac{\rho}{\rho'} = \frac{\sum_{i=1}^6 a_i / (1 + \lambda_i T_R)}{\sum_{i=1}^6 a'_i / (1 + \lambda'_i T_R)}$$

При этом полагается, что значения  $\beta_{\text{эф}}$  одинаковы для обоих рассматриваемых наборов групповых параметров. В рамках такого подхода в настоящей работе был выполнен сравнительный анализ настоящих экспериментальных данных и соответствующих данных из библиотеки ENDF/B VI [14] с данными [1]. Из рис. 4 видно, что данные ENDF/B VI [14] дают заниженную более чем на 8% оценку по сравнению с [1]. Они соответствуют делению  $^{239}\text{Pu}$  быстрыми нейтронами энергией 0,5 МэВ. Ход энергетической зависимости среднего периода полураспада, полученной интерполяцией данных в диапазоне энергии первичных нейтронов 1,06—3,27 МэВ, согласуется с данными [1], измеренными на спектре нейтронов деления со средней энергией 1,59 МэВ. Отчетливо прослеживается энергетическая зависимость реактивности, построенной по данным настоящей работы, которая выражается в ее уменьшении примерно на 7% при увеличении энергии первичных нейтронов от 0,37 до 4,97 МэВ. Такое поведение реактивности, как уже было отмечено, коррелирует с 7%-ным уменьшением среднего периода полураспада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов при увеличении энергии первичных нейтронов от 0,37 до 4,97 МэВ. Если расширить рассматриваемый диапазон изменения энергии первичных нейтронов присоединением к нему «тепловой точки», то относительное изменение реактивности повысится и составит по данным настоящей работы 10%. В связи с этим следует сделать следующее важное замечание. Большинство авторов работ, измеряющих относительный выход и период запаздывающих нейтронов при делении ядер нейтронами спектра деления, не предоставили информацию о спектре первичных нейтронов, ограничившись лишь замечанием,



Р и с. 4. Отношение реактивности, полученной на основе групповых параметров запаздывающих нейтронов при делении  $^{239}\text{Pu}$  быстрыми нейтронами из настоящей работы (—) и ENDF/B VI (---) [14], к реактивности [1] (спектр нейтронов деления): 1—9 — 0,62, 0,37, 1,06, 0,86, 3,27, 3,81, 4,24, 4,81, 4,97 МэВ соответственно; 10 — [14]

примерно на 7% при увеличении энергии первичных нейтронов от 0,37 до 4,97 МэВ. Такое поведение реактивности, как уже было отмечено, коррелирует с 7%-ным уменьшением среднего периода полураспада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов при увеличении энергии первичных нейтронов от 0,37 до 4,97 МэВ. Если расширить рассматриваемый диапазон изменения энергии первичных нейтронов присоединением к нему «тепловой точки», то относительное изменение реактивности повысится и составит по данным настоящей работы 10%. В связи с этим следует сделать следующее важное замечание. Большинство авторов работ, измеряющих относительный выход и период запаздывающих нейтронов при делении ядер нейтронами спектра деления, не предоставили информацию о спектре первичных нейтронов, ограничившись лишь замечанием,

что данные относятся к быстрым нейтронам, хотя хорошо известно, что средняя энергия первичных нейтронов в зависимости от конкретной установки может значительно изменяться. Так, в экспериментах на критической сборке Godiva (США) [1] энергия первичных нейтронов, усредненная по сечению деления  $^{239}\text{Pu}$ , составила 1,59 МэВ. В то же время средняя энергия первичных нейтронов в эксперименте на реакторе VIPER (Великобритания) [10] равна 0,74 МэВ. Указанная разница 0,85 МэВ (при условии отсутствия в указанных экспериментах систематических погрешностей) согласно нашим данным должна привести к 1,7%-ной разнице в соответствующих значениях среднего периода полураспада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов, что реально наблюдается (1,8%). Таким образом, отсутствие в публикуемых работах информации о спектре первичных нейтронов вносит дополнительную неопределенность к указанным в работах погрешностям относительного выхода и периода запаздывающих нейтронов, что, несомненно, приведет к увеличению неопределенности в расчетах реактивности реактора.

**Заключение.** Полученные в настоящей работе результаты, несомненно, должны быть использованы при выработке рекомендованных данных для реакторов с промежуточным спектром нейтронов, который отличается как от теплового, так и быстрого (спектр нейтронов деления).

Измеренные в настоящей работе данные о спаде интенсивности будут использованы для получения наборов групповых констант, которые соответствуют развиваемой в настоящее время 8-групповой модели, основанной на универсальном наборе постоянных распада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов для разных делящихся систем [15].

Настоящая работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и администрации Калужской области, грант № 00-02-96004.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Keepin G., Wimet T., Zeigler R. Delayed neutrons from fissionable isotopes of uranium, plutonium and thorium. — J. Nucl. Energy, 1957, v. 6, p. 1—21.
2. Spriggs G., Campbell J. A summary of Measured Delayed Neutron Group Parameters. Report LA-UR-98-918, Rev. 1, June 6, 1998, p. 1—42.
3. Spriggs G. In-pile measurements of the decay constants and relative abundances of delayed neutrons. — Nucl. Sci. Engng, 1993, v. 114, p. 342—351.
4. Brady M., England T. Delayed neutron data and group parameters for 43 fissioning systems. — Ibid., 1989, v. 103, p. 129—135.
5. Piksaikin V., Isaev S. Correlation Properties of Delayed Neutrons from Fast Neutron Induced Fission. Report INDC(ССР)-415, October, 1998, IAEA, Vienna, Austria, p. 1—13.
6. Тертычный Р., Шорин В. Программа для расчета характеристик ускорительных источников нейтронов: Препринт ФЭИ 2743, 1998, с. 1—20.
7. Пиксайкин В.М., Балакшев Ю.Ф., Исаев С.Г. и др. Измерение относительных выходов запаздывающих нейтронов и периодов полураспада их предшественников при делении  $^{237}\text{Np}$  быстрыми нейтронами. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1997, вып. 1—2, с. 18—25.
8. Tuttle R. Delayed neutron data for reactor physics analysis. — Nucl. Sci. Engng, 1975, v. 56, p. 37—56.
9. Кипин Дж. Физические основы кинетики ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1967.
10. Besant C., Challen P., McTaggart M. e.a. Absolute yields and group constants of delayed neutrons in the fast fission of  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  and  $^{239}\text{Pu}$ . — Br. Nucl. Energy Soc., 1977, v. 16, № 2, p. 161—176.
11. Rose H., Smith R. Delayed neutron investigations with the ZEPHYR fast reactor, part II — the delayed neutrons arising from fast fission in  $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  and  $^{232}\text{Th}$ . — J. Nucl. Energy, 1957, v. 4, p. 133—142.
12. Waldo R., Karam R., Meyer R. Delayed neutron yields: time dependent measurements and a predictive model. — Phys. Rev. C, 1981, v. 23, № 3, p. 1113—1127.
13. Максютенко Б. Запаздывающие нейтроны из  $^{239}\text{Pu}$ . — Ядерная физика, 1963, т. 15, вып. 2, с. 848—853.
14. ENDF-102, Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File ENDF-6, 1991.
15. Spriggs G., Campbell J., Piksaikin V. An 8-Group Delayed Neutron Model Based on a Consistent Set of Half-Lives. Report LA-UR-98-1619, March 28, 1999, p. 1—19.
16. Stevenson J. Delayed neutron parameter requirements for reactor physics purposes. — In: Proc. of the Specialists' Meeting on Delayed Neutron Properties. September 15—19, 1986, University of Birmingham, England, p. 1—20.