

Рис. 2. Сигнал обратнорассеянного рентгеновского импульса от воздуха (1) и плотного отражателя (2), м: а — 2,5; б — 5; в — 10; г — 20

На рис. 2 приведены рассчитанные на ЭВМ М-4030 характеристики сигналов обратного рассеяния рентгеновского зондирующего импульса колоколообразной формы для границы воздух — бетон при  $b = 0,9$  м,  $\psi_0 = 45^\circ$ . Длительность импульса на полувысоте 15 нс, эффективная энергия 50 кэВ.

Таким образом, полученные формулы позволяют, не прибегая к моделированию методом Монте-Карло, получить амплитудно-временные характеристики обратнорассеянного рентгеновского сигнала в произвольной геометрии для коллимированного источника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климанов В. А. и др. Распространение ионизирующих излучений в воздухе. М., Атомиздат, 1979.
2. Зыков И. К., Варюченко С. Б. Ионизирующие излучения в авиационной и космической технике. М., Атомиздат, 1975.
3. Булатов Б. П., Андрушин Н. Ф. Обратнорассеянное  $\gamma$ -излучение в радиационной технике. М., Атомиздат, 1971.
4. Булатов Б. П. и др. Альбеда  $\gamma$ -излучения. М., Атомиздат, 1968.
5. Герчиков Ф. Л. Письма в ЖТФ, 1979, т. 5, № 18, с. 1124.

Поступило в Редакцию 18.08.80

УДК 621.039.526:621.039.51

## О получении групповых макроконстант для расчетов возмущений критичности реакторов

ДУЛИН В. А.

При расчете быстрых реакторов используется групповое приближение БНАБ [1]. Эффекты резонансной самоэкранировки учитываются путем усреднения сечений по энергии внутри группы с использованием асимптотического потока  $\varphi_a(u) \sim 1/\Sigma_t(u)$ . Это позволяет с достаточной точностью рассчитывать эффективный коэффициент размножения нейтронов  $k$  и скорость реакций, решая групповое уравнение для потока нейтронов  $\varphi^j$ . Сопряженное уравнение содержит те же групповые константы. В работе [2] показано, что решение такого группового сопряженного уравнения будет давать неверное значение для групповых ценностей  $\bar{\varphi}^{+j}$ , так как асимптотическое распределение ценности не совпадает с  $\varphi_a(u)$ :  $\varphi_a^+(u) \sim [v\Sigma_f(u)\vartheta + \Sigma_s(u)]/\Sigma_t(u)$ . Однако усреднение констант с весом  $\varphi_a^+(u)$  и использование их в групповом уравнении для ценности приводит к тому, что групповые уравнения для потока и ценности перестают быть сопряженными и значение  $k$  получается другим [2].

Покажем, что, используя билинейное усреднение констант [3, 4] и асимптотические распределения  $\varphi_a(u)$  и  $\varphi_a^+(u)$ , можно достигнуть той же точности в вычислении билинейных функционалов и  $k$ , которая достигается с  $\varphi_a(u)$  для линейных функционалов потока. Рассмотрим групповые уравнения для потока нейтронов и сопряженное ему уравнение в  $B^2$ -приближении. Для таких групповых уравнений  $k$  определяется как

$$k = \sum_{i=1}^G v\Sigma_f^i \varphi^i = \sum_{i=1}^G \chi^i \varphi^i. \quad (1)$$

Как известно, для нахождения  $\varphi^j$  решается система уравнений с усредненными по потоку константами:

$$\varphi^j = \frac{\chi^j + \sum_{i=1}^{j-1} \Sigma_{in}^{i \rightarrow j} \varphi^i + \Sigma_s^{j-1 \rightarrow j} \varphi^{j-1}}{\Sigma_a^j + \Sigma_s^{j \rightarrow j+1} + \Sigma_{in}^j + D^j B^2}. \quad (2)$$

При билинейном усреднении  $D(u)$ ,  $\Sigma_t(u)$  и  $\Sigma_s(u) f(u-u')$  усредняются билинейно;  $v\Sigma_f(u)$  — только по потоку;  $\chi(u)$  — только по ценности. Используя вместо усредненных по потоку констант, усредненные билинейно и различающиеся на  $\delta\Sigma_a^j$ ,  $\delta\Sigma_s^{j \rightarrow j+1}$ ,  $\delta D^j$  и  $\delta\chi^j$ , можно потребовать, чтобы значение  $\varphi^j$  осталось прежним. Это будет означать, что и  $k = \sum_{i=1}^G v\Sigma_f^i \varphi^i$  также останется прежним.

Величины  $\delta\Sigma_a^j$  и  $\delta D^j$  с достаточной точностью получаются при использовании  $\varphi_a(u)$  и  $\varphi_a^+(u)$ . Переопределим сечение упругого замедления и форму спектра деления таким образом, чтобы  $\varphi^j$  не изменились. Приравняв правые части уравнения (2) к сечениям, усредненным по потоку и билинейно, получаем для нахождения  $\delta\Sigma_s^{j-1 \rightarrow j}$  и  $\delta\chi^j$  следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \delta\Sigma_s^{k-1 \rightarrow k} &= (\varphi^k/\varphi^{k-1}) (\delta\Sigma_a^k + \delta D^k); \\ \delta\Sigma_s^{j-1 \rightarrow j} &= (\varphi^j/\varphi^{j-1}) (\delta\Sigma_a^j + \delta D^j + \delta\Sigma_s^{j \rightarrow j+1}); \\ \delta\chi^n &= \varphi^n (\delta\Sigma_a^n + \delta\Sigma_s^{n \rightarrow n+1} + \delta D^n); \quad (n \leq i < k). \end{aligned}$$

Результаты экспериментов, расчетов и билинейные поправки отношений КР элементов к КР  $^{235}\text{U}$ 

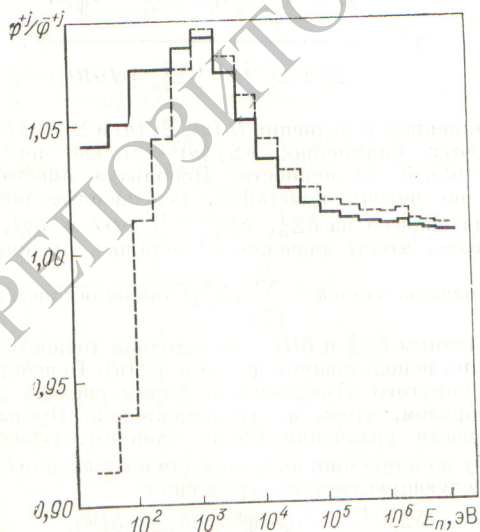
Сборка ZPR	Элемент	Эксперимент	Расчеты		Билинейная поправка
			ОСКАР-76	БНАБ-78	
VI-6	$^{239}\text{Pu}$	$1,370 \pm 0,028$	1,343	1,360	0,015
	$^{238}\text{U}$	$-0,084 \pm 0,005$	-0,0876	-0,0898	-0,0008
	$^{10}\text{B}^*$	$-1,255 \pm 0,035$	-1,242	1,122	-0,107
	$^{12}\text{C}^*$	$0,0033 \pm 0,0004$	0,0041	0,0022	0,0012
VI-7	$^{239}\text{Pu}$	$1,244 \pm 0,025$	1,244	1,235	-0,002
	$^{238}\text{U}$	$-0,078 \pm 0,003$	-0,0722	-0,0734	+0,003
	$^{10}\text{B}$	$-0,98 \pm 0,04$	-0,983	-0,904	-0,078
	$^{12}\text{C}$	$-0,0061 \pm 0,0008$	-0,0067	-0,0071	0,0009

\* Данные для близкой по составу сборки БФС-39 [7].

При заданных  $\delta\Sigma_a^i$  и  $\delta D^i$  ( $n \leq i \leq k$ ) изменения сечения упругого замедления и  $\delta\chi^n$  находятся решением этой системы уравнений. Решая сопряженное уравнение с измененными таким образом константами, получаем групповые ценности  $\varphi^{+j}$ , с помощью которых можно столь же адекватно описать эксперименты по возмущению критичности реакторов с использованием теории возмущений, сколь адекватным является описание скоростей реакций и критичности.

Значение  $\delta\Sigma_a^j$  определяется соотношением

$$\delta\Sigma_a^j = \frac{1}{\varphi^j \varphi^{+j}} \left[ \int_{u_{j-1}}^{u_j} \Sigma_t(u) \varphi(u) \varphi^+(u) du - \int_{u_{j-1}}^{u_j} \Sigma_s(u) \varphi(u) du \int_u^{u+r} \varphi^+(u') f(u-u') du' \right]$$



Отношение групповых ценностей, рассчитанных с билинейно усредненными константами, к рассчитанным с константами, усредненными по потоку, для сборок ZPR-VI-6 (—) и ZPR-VI-7 (---)

$$-\varphi^{+j} \int_{u_{j-1}}^{u_j} \Sigma_a(u) \varphi(n) du \Big]$$

Вычисление  $\delta\Sigma_a^j$  с использованием  $\varphi_a(u)$  и  $\varphi_a^+(u)$  может быть проведено в возрастном приближении, что соответствует полной корреляции (ПК) между  $\varphi(u)$  и  $\varphi^+(u)$  в двойном интеграле и в приближении отсутствия корреляции (ОК) [5]. Прямые расчеты показали, что для резонансов с  $\Gamma_n > \Gamma_a$  точнее приближение ОК, а для  $\Gamma_a > \Gamma_n$  — приближение ПК.

На рисунке приведено отношение  $\varphi^{+j}/\varphi^{+j}$  групповых ценностей, показывающее их изменение при использовании измененных констант (приближение ОК) [6]. Расчеты проводились для  $k=20$ ,  $n=4$ . По-видимому, физически наиболее оправданным является переопределение сечения замедления до энергии несколько сот килоэлектронвольт, т. е. до энергии, где резонансная структура сечений поглощения основных поглотителей исчезает.

В таблице показаны оцененные измеренные и рассчитанные по стандартной методике отношения коэффициентов реактивности (КР)  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{12}\text{C}$  к КР  $^{235}\text{U}$  для сборок ZPR-IV-6 и 7. Отмечавшееся около 10 лет назад расхождение между измеренными и рассчитанными по системе БНАБ-70 отношениями [8, 9] количественно объясняется переходом к новой системе констант БНАБ-78, введением поправок на гетерогенную структуру критических сборок [5] и учетом погрешности группового приближения, проведенного в настоящей работе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абагян Л. П. и др. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1964.
2. Николаев М. Н., Николаева Н. А. — В кн.: Труды Физико-энергетического института. М., Атомиздат, 1974, с. 136.
3. Pitterle T., Maynard C. — Trans. Amer. Nucl. Soc., 1965, v. 1, p. 205.
4. Белл Д., Глестон С. Теория ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1974, с. 242.
5. Дулин В. А. Возмущение критичности реакторов и уточнение групповых констант. М., Атомиздат, 1979.
6. Mc. Knight R. — Nucl. Sci. Engng, 1977, v. 62, N 2, p. 309.
7. Голубев В. П. и др. — Доклад на Междунар. симп. МАГАТЭ/АЯЭ по физике быстрых реакторов. Экс-ан-Прованс, 24—28 сент. 1979, № SM-244/79.
8. Орлов В. В. и др. Препринт ФЭИ-306. Обнинск, 1972.
9. Дулин В. А. и др. Препринт ФЭИ-313. Обнинск, 1972.

Поступило в Редакцию 01.10.80