

Рис. 4. Дозовый фактор накопления в двухслойной цилиндрической защите из свинца и воды ( $\mu L_{Pb} = 7$ ):

кривые — расчет с помощью полуэмпирических рекомендаций; точки — расчет методом Монте-Карло; —,  $\circ$  —  $R = \mu^{-1} H_2O$ ; — — — —  $R = \infty$ ; 1, 2, 3 — расчет с помощью рекомендаций работ [1, 4], [1, 5] и [1, 2] соответственно; 4, 5 — однослойная защита из свинца и воды

блока;  $Z$  — порядковый номер элемента материала блока [1].

На рис. 2—4 представлены некоторые результаты, полученные с использованием этих рекомендаций. Анализ полученных данных показал, что эмпирические

формулы из работ [4, 5], использованные в совокупности с приведенным выражением, позволяют с удовлетворительной точностью аппроксимировать зависимость фактора накопления рассеянного  $\gamma$ -излучения в двухслойных цилиндрических блоках защиты от их радиуса. Расхождение результатов расчетов, проведенных с помощью эмпирических рекомендаций и методом Монте-Карло, не превышает 30% при толщине защиты  $\mu L \leq 15$ . Исключение составляют композиции, включающие свинец, в области  $E > 3,0 \div 3,5$  МэВ. В этих случаях наилучшее соответствие достигается при использовании эмпирических формул работы [2] (наибольшие расхождения составляют около 30% при  $\mu L = 10$ , с ростом  $\mu L$  в области  $\mu L > 10$  погрешность возрастает).

Следует предположить, что подобная закономерность наблюдается и для других материалов при энергии  $\gamma$ -излучения более высокой, чем минимум в ходе зависимости полного коэффициента ослабления от энергии.

Поступило в Редакцию 7/VII 1976 г.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бродер Д. Л. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 35, вып. 6, с. 437.
2. Бродер Д. Л. и др. В кн.: Вопросы физики защиты реакторов. Вып. 1. М., Госатомиздат, 1963, с. 198.
3. Miyasaka Sh., Tsuruo A. «Nucl. Sci. and Technol.», 1966, v. 3, N 9, p. 393.
4. Бродер Д. Л. В кн.: Руководство по радиационной защите для инженеров. М., Атомиздат, 1972, с. 192.
5. Бюнеман Д., Рихтер Г. Там же, с. 186.

УДК 621.039.519:539.125.5.03

## О применении в реакторных экспериментах источника нейтронов с управляемой интенсивностью

СЛОВСКИЙ О. А., МАТУСЕВИЧ Е. С., ТРЫКОВ О. А.

Появившиеся в последние годы разработки малогабаритных источников нейтронов с изменяемым на несколько порядков выходом нейтронов (выключающиеся источники) [1] могут быть широко использованы в реакторных экспериментах. Целью настоящей работы является иллюстрация возможности использования такого источника при измерении отрицательной реактивности. Выключающийся  $Po - Be$ -источник \* представлял собой цилиндрическую стальную герметичную ампулу размером  $20 \times 150$  мм, в которой расположены собственно источник и электромагнит управления передвижением стержня из бериллия. Цилиндрическое кольцо из сплава, содержащего полоний, является активной частью источника. При подаче тока в электромагнит бериллиевый стержень вводится за время  $t_{\text{ф}} \approx 0,015$  с в кольцо. Частота включения — выключения источника может изменяться от 0 до 5 Гц. Интенсивность источника  $\sim 10^6$  нейтр./с. Форма импульса и спектры нейтронов для включенного и выключенного

источников показаны на рис. 1, а, б. Отношение фона к эффекту ( $\gamma$ ) составляет  $\sim 0,013$ , причем  $\geq 70\%$  фона, по-видимому, обусловлено загрязнением поверхности бериллия плутонием, на что указывает близость спектров для включенного и выключенного источников при  $E > 2$  МэВ.

**Измерение отрицательной реактивности.** Среди многих методов измерения отрицательной реактивности широко распространен метод сброса стержня [2]. В интегральном варианте этого метода после «сброса» измеряется интеграл по времени от счета детектора [3]. В рамках точечной модели кинетики реактора метод сброса аналогичен методу «стреляющего» источника [4], в котором одно показание детектора относится к подкритическому реактору с внешним источником, а другое — к реактору после «выстреливания» или «выключения» источника. Популярность метода сброса обусловлена в значительной мере тем, что он не предъявляет высоких требований к эффективности детектора.

У метода выключения источника есть, однако, существенное преимущество, заключающееся в его меньшей чувствительности к месту расположения детектора, которая обусловлена тем, что удаление (выключение) источника не связано с изменением состава

\* Источник нейтронов с электромеханическим управлением интенсивностью разработан Н. Я. Скрипко и Г. А. Антоновым.

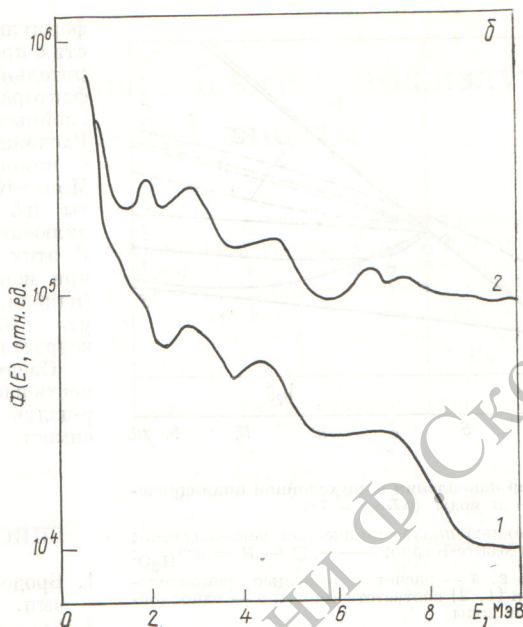
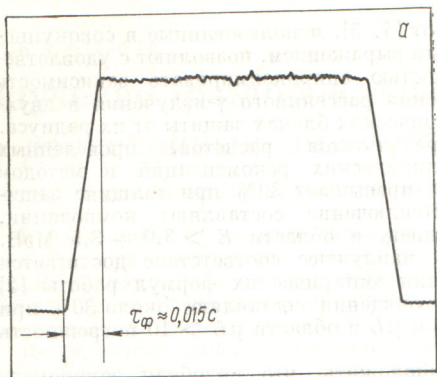


Рис. 1. Импульс нейтронов (а) [частота переключения 1 Гц] и спектр нейтронов  $P_0$  — Ве-источника (б) в выключенном (1) и включенном (2) состояниях (значения потока уменьшены в 10 раз)

и конфигурации зоны. Следовательно, возмущения потока нейтронов в месте расположения детектора минимальны.

Измерения отрицательной реактивности методами выключения источника и сброса стержня проведены на быстрой критической сборке с бериллиевым отражателем [5]. Изменения реактивности создавались удалением либо части топлива, либо части отражателя. Детектирующая система состояла из шести импульсных борных счетчиков нейтронов, расположенных по окружности вокруг реактора, радиус которой существенно больше радиуса реактора с отражателем, и двух таких же счетчиков, размещенных в наиболее «чувствительных» к изменению конфигурации реактора точках: в активной зоне на расстоянии 0,8 радиуса от центра и за отражателем рядом с областью отражателя, которая удалалась для возмущения реактивности. Источник нейтронов находился в центре реактора. Поскольку при  $\gamma \neq 0$  выключение источника неэквивалентно его удалению, реактивность в интегральном варианте метода определялась из выражения, которое легко получить из уравнений точечной кинетики с эффективными параметрами:

$$\rho^* = \left[ n(0)(1-\gamma) \sum_{i=1}^T a_i/\lambda_i \right] / \left[ \int_0^T n(t) dt - \gamma T n(0) \right], \quad (1)$$

где  $n(0)$  — скорость счета детектора в реакторе с источником;  $n(t)$  — скорость счета после выключения источника;  $T$  — время счета, значение которого определяется из условия

$$T \gg 1/\lambda_{i_{\min}}; \int_0^T n(t) dt - \gamma T n(0) > 0. \quad (2)$$

Остальные обозначения общеприняты.

В таблице сравниваются значения реактивности, измеренные методами сброса и выключения источника

группой из шести детекторов ( $\bar{\rho}^*$ ), детектором в активной зоне ( $\rho_{a.z}^*$ ) и детектором вблизи отражателя ( $\rho_{отр}^*$ ) для разных возмущений реактивности (погрешности  $\bar{\rho}^*$  обусловлены разбросом значений реактивности по шести детекторам, в то время как  $\rho_{a.z}^*$  и  $\rho_{отр}^*$  есть средние квадратические погрешности, определяемые статистикой счета детекторов).

Из таблицы видно, что в отличие от метода сброса стержня, результаты которого сильно зависят от расположения детекторов, метод выключения источника оказывается нечувствительным к пространственному

Значение отрицательной реактивности для системы детекторов нейтронов  $\beta_{эф}$

Метод измерения	$\bar{\rho}^*$	$\rho_{a.z}^*$	$\rho_{отр}^*$
Первое возмущение			
Сброс стержня	$0,828 \pm 0,003$	$1,064 \pm 0,008$	$0,982 \pm 0,004$
Выключенный источник	$0,814 \pm 0,009$	$0,812 \pm 0,014$	$0,812 \pm 0,009$
Второе возмущение			
Сброс стержня	$2,169 \pm 0,012$	$3,735 \pm 0,056$	$2,979 \pm 0,026$
Выключенный источник	$2,06 \pm 0,07$	$2,04 \pm 0,13$	$2,02 \pm 0,07$
Третье возмущение			
Сброс стержня	$4,129 \pm 0,030$	$10,20 \pm 0,19$	$6,84 \pm 0,07$
Выключенный источник	$4,00 \pm 0,23$	$4,08 \pm 0,29$	$3,85 \pm 0,30$

расположению детекторов для исследуемой критической сборки. Следует заметить, что повышение эффективности детекторов и интенсивности источника значительно уменьшает погрешность измерения данным методом.

**Измерения ценности.** Возможность дистанционного выключения источника облегчает измерение такого реакторного функционала, как ценность нейтронов деления, по методу измерения роста мощности реактора с введенным источником. Поскольку спектр нейтронов  $Po - Be$ -источника отличается от спектра деления, было измерено пространственное распределение ценности нейтронов этого источника, которая на рис. 2 сравнивается с ценностью нейтронов источника  $^{252}Cf$ . Ввиду слабой зависимости ценности нейтронов от энергии пространственные распределения совпадают в пределах погрешности эксперимента.

Выключающийся источник может найти применение в импульсных методиках исследования реакторов, где не требуется анализа времени, сравнимого со временем жизни мгновенных нейтронов. Несомненное преимущество источника — небольшие размеры, позволяющие помещать его в активной зоне без заметных возмущений ее характеристик. Использование выключающегося источника при пусках упрощает процедуру набора критических масс.

Авторы признательны Н. Д. Тюфякову за полезные обсуждения и постоянное внимание к работе, С. П. Сазонову, К. М. Котову, В. В. Владимирову, А. Л. Шмотину, М. Ю. Зайцеву, В. Д. Цвераве и Л. М. Разиной за помощь в проведении измерений и обработке данных.

Поступило в Редакцию 26/VII 1976 г.

УДК 621.039.562:621.039.566

## Внутриреакторная высокотемпературная малогабаритная ионизационная камера

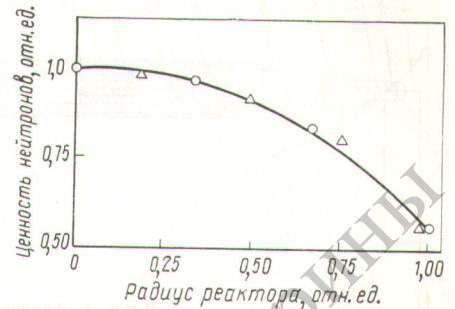
ЕМЕЛЬЯНОВ И. Я., АЛЕКСЕЕВ В. И., ЛИПИН В. Ф., ОЛЬШЕВСКИЙ В. П., ПОСТНИКОВ В. В.,  
РЫБАКОВ Ю. В., СТЕКЛОВ В. О.

Повышение экономической эффективности ядерных энергетических установок неразрывно связано с повышением единичной мощности блоков АЭС, с ростом средних удельных тепловых нагрузок ядерного топлива. Поскольку рост последних осуществляется в определенной степени в результате снижения запасов между предельно допустимыми и номинальными нагрузками, а нормы по ядерной и радиационной безопасности АЭС становятся все более жесткими, необходимо значительно повысить требования к точности и надежности датчиков, предназначенных для контроля энергораспределения в реакторе.

Внутриреакторные ионизационные камеры давно и с успехом используются в системах контроля, управления и защиты многих реакторов [1, 2]. Эти камеры безынерционны, имеют сравнительно большой сигнал, обладают при необходимости спектральной чувствительностью, соответствующей энергетической зависимости сечений деления ядерного топлива, а при использовании импульсного и флюктуационного режимов перекрывают широкий диапазон изменения мощности реактора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kenneth H. e. a. In: Proc. Amer. Nucl. Scientific National Topical Meeting «Neutron Sources and Application». Conf.-71 0402, v. 2. Georgia, 19—21 Apr. 1971, p. 190.
2. Кипин Дж. Физические основы кинетики ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1967.
3. Hogan W. «Nucl. Sci. and Engng», 1960, v. 8, p. 518.
4. Jankowski F. e. a. «Nucl. Sci and Engng», 1957, v. 2, p. 288.
5. Бондаренко И. И. и др. III Женевск. конф., 1964. Докл. СССР № 362.



Р и с. 2. Ход ценности нейтронов по радиусу критической сборки:

△ — измерения с источником  $^{252}Cf$ ; ○ — настоящая работа ( $Po - Be$ -источник)

Габариты внутриреакторных камер невелики: наружные диаметры некоторых образцов не превышают 4 мм [3]. Оснащенные регенерирующими покрытиями, камеры слабо изменяют свою чувствительность в течение длительной эксплуатации [4, 5].

Основной недостаток токсовых внутриреакторных ионизационных камер — сравнительно низкая надежность, что связано с высокими требованиями к сопротивлению изоляции ( $> 5 \cdot 10^7$  Ом) при высокой температуре и большой плотности нейтронного и  $\gamma$ -потоков. Так, для наиболее отработанных камер интенсивность отказов составляет ~15% в год, отмечаются также временные увеличения тока камер, способные привести к ложным срабатываниям системы защиты реактора от превышения мощности [6].

Чтобы повысить надежность внутриреакторных ионизационных камер, в ряде случаев применяют линии связи с охранным электродом, выполненные из триаксиального кабеля с двумя оболочками и центральной жилой их нержавеющей стали, взаимно изолированными спрессованной окисью магния [7]. Однако в этих камерах отсутствует охранный электрод в рабочем