

26. Борисов Г.А., Богуславский А.М. Модельное нейтронное поле на реакторе ИР-100. — В кн.: Научные труды НПО ВНИИФТРИ. Методы и аппаратура для точных измерений параметров ионизирующих излучений. М. 1987, с. 10—14.
27. Борисов Г.А., Севастьянов В.Д., Ярына В.П. и др. Создание отраслевой метрологической базы нейтронных измерений. — Тезисы докл. V Всес. сов. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях, 3—7 декабря 1990 г. М., НПО ВНИИФТРИ, 1990, с. 3—4.
28. Барабанов С.А., Борисов Г.А., Григорьев Е.И. и др. Нейтронные поля для исследований на реакторе ИР-100. — Атомная энергия, 1983, т. 54, вып. 2, с. 124—125.
29. Кошелев А.С., Маслов Г.Н., Одинцов Ю.М., Севастьянов В.Д. Источник тепловых нейтронов для калибровки детекторов «нулевой» толщины. — Приборы и техн. экспер., 1999, № 3, с. 19—26.
30. Neutron cross sections for reactor dosimetry, v. 1. Vienna: IAEA, 1978, p. 3—21.
31. Кошелев А.С., Маслов Г.Н., Одинцов Ю.М. Избранные пространственно-энергетические характеристики стационарного поля нейтронов снаружи активной зоны импульсного реактора БР-1. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1996, вып. 1, с. 38—48.
32. Севастьянов В.Д., Тарновский Г.Б., Езерский В.Ф. и др. Результаты аттестации пучка нейтронов Б-3 реактора БР-10. Докл. на сов. «Применение нейтронов ядерных реакторов в лучевой терапии. Состояние и перспективы». 17—19 октября 1995, Обнинск.

Поступила в Редакцию 22.12.99

УДК 539.125.5.164; 539.173.84

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ НЕЙТРОННОЙ АППАРАТУРЫ СУЗ ТРАНСПОРТНЫХ ЯЭУ

Севастьянов В.Д., Ярына В.П. (ВНИИФТРИ), Волков А.Е., Павлов В.Д.  
(Институт ядерных реакторов РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Для нормального функционирования систем управления и защиты транспортных ядерно-энергетических установок необходимо, чтобы детекторы этой системы были проградуированы по чувствительности в моделирующем поле нейтронов с характеристиками, идентичными (или близкими) параметрам спектра нейтронов в месте их размещения на установках. Это особенно важно для детекторов с материалом радиатора, сечение взаимодействия с нейтронами которого отлично от  $1/\nu$ .

Градуировка детекторов нейтронов СУЗ по чувствительности к нейтронам является обязательной процедурой при испытаниях и выпуске. Чувствительность детектора нейтронов с материалом радиатора, сечение поглощения нейтронов которого слабо отличается от закона  $1/\nu$ , определяется по соотношению  $\epsilon = I_n/\varphi_d$ , где  $I_n$  — нейтронная составляющая сигнала (отклик) детектора;  $\varphi_d$  — среднее значение условной плотности потока нейтронов на поверхности градуируемого детектора при облучении в поле нейтронов.

Для метрологического обеспечения нейтронных измерений при испытаниях и градуировке по чувствительности детекторов СУЗ ЯЭУ в Институте ядерных реакторов РНЦ «Курчатовский институт» создан и аттестован измерительный комплекс на базе стенда «Квант», состоящий из эталонного источника нейтронов ОИ-Т-34 и эталонной радиометрической установки КРОНАП-13. Активная зона стенда высотой 500 мм состоит из 175 ТВС, окруженных боковым экраном, и имеет компенсирующую группу в виде 94 поглощающих стержней. По ее периферии располагаются измерительные каналы, представляющие собой стальные трубы для размещения в них детекторов СУЗ, а также экспериментальный канал ИК-6 диаметром 85 мм, толщиной стенки трубы 3 мм (рис. 1).

Эталонный источник ОИ-Т-34 использовали для калибровки по чувствительности специального радиометра

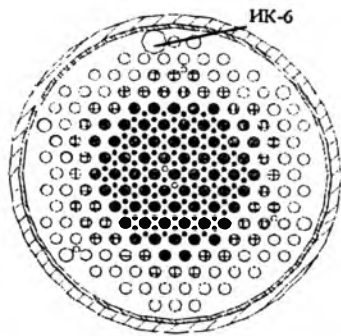
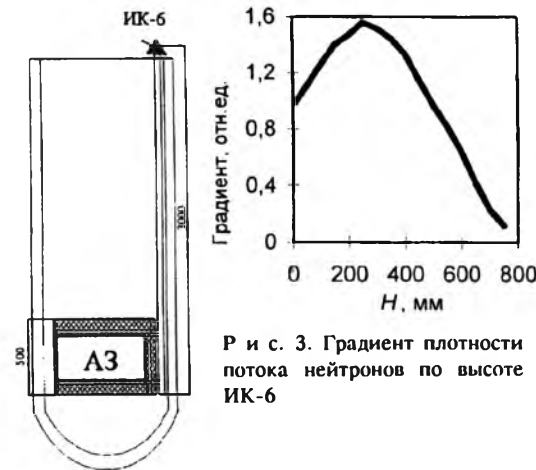
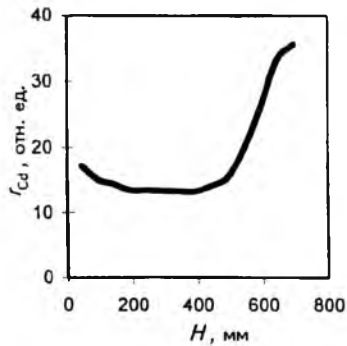


Рис. 1. Расположение ИК-6 в активной зоне стенда «Квант»



Р и с. 3. Градиент плотности потока нейтронов по высоте ИК-6

Р и с. 2. Вертикальный разрез стенда «Квант»



Р и с. 4. Кадмиевое отношение для детектора из меди по высоте ИК-6

нейтронов с активационными детекторами из меди и диспрозия, который применяли для измерения условной плотности потока нейтронов  $\varphi_d$  при градуировке детекторов нейтронов СУЗ. Он включает в себя моделирующее опорное поле нейтронов стенда «Квант» и радиометр-монитор. Моделирующее опорное поле представляет собой цилиндрическое пространство диаметром 79 мм, длиной 200 мм в экспериментальном канале ИК-6, нижняя граница которого находится на расстоянии 200 мм от дна канала (рис. 2). Энергетический спектр нейтронов в нем близок спектру нейтронов ЯЭУ в месте размещения градуируемых детекторов СУЗ. Характеристики нейтронного поля определяли нейтронно-активационным методом. Топография поля нейтронов показана на рис. 3, 4. В измерениях использовали 16 активационных и делительных детекторов (см. таблицу), среди которых были и детекторы тепловых нейтронов «нулевой» толщины из золота, меди и лютетия [1]. Последние нечувствительны к анизотропии потока нейтронов и не деформируют спектр нейтронов в исследуемой точке поля. Наведенную активность и число делений в детекторах

измеряли на радиометрическом комплексе Государственного специального эталона единиц плотности потока и флюенса нейтронов для области измерений на ядерно-физических установках [2]. Погрешность определения наведенной активности в детекторах составляла 2—5% при доверительной вероятности 0,95.

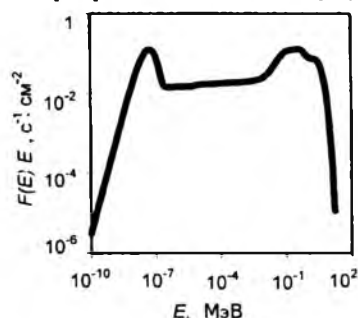
Результаты согласования сечений ядерных реакций при восстановлении спектра моделирующего опорного поля ОИ-Т-34

| Ядерная реакция         | Толщина фильтра |                       | Скорость реакции, с <sup>-1</sup> (эксперимент) | Сечение, мб            |                        | Отклонение, % |
|-------------------------|-----------------|-----------------------|-------------------------------------------------|------------------------|------------------------|---------------|
|                         | Cd, мм          | В, г·см <sup>-2</sup> |                                                 | Эксперимент            | Расчет                 |               |
| 1                       | 2               | 3                     | 4                                               | 5                      | 6                      | 7             |
| <sup>239</sup> Pu(n, f) | 1               | 0,4                   | 0,419·10 <sup>-14</sup>                         | 1275                   | 1246                   | -2,33         |
| <sup>239</sup> Pu(n, f) |                 | 1                     | 0,304·10 <sup>-14</sup>                         | 925,1                  | 922,7                  | -0,26         |
| <sup>235</sup> U(n, f)  |                 |                       | 0,176·10 <sup>-13</sup>                         | 5456                   | 5183                   | -3,33         |
| <sup>197</sup> Au(n, γ) | 1               |                       | 0,129·10 <sup>-12</sup>                         | 0,3926·10 <sup>5</sup> | 0,4126·10 <sup>5</sup> | 4,84          |
| <sup>197</sup> Au(n, γ) |                 |                       | 0,630·10 <sup>-13</sup>                         | 0,1919·10 <sup>5</sup> | 0,2006·10 <sup>5</sup> | 4,35          |
| <sup>197</sup> Au(n, γ) |                 |                       | 0,159·10 <sup>-12</sup>                         | 0,4854·10 <sup>5</sup> | 0,4680·10 <sup>5</sup> | -3,7          |
| <sup>63</sup> Cu(n, γ)  | 1               |                       | 0,348·10 <sup>-14</sup>                         | 1039                   | 1043                   | -1,51         |
| <sup>63</sup> Cu(n, γ)  |                 |                       | 0,299·10 <sup>-15</sup>                         | 90,99                  | 90,85                  | -0,14         |
| <sup>63</sup> Cu(n, γ)  |                 |                       | 0,347·10 <sup>-14</sup>                         | 1056                   | 1059                   | 0,25          |

Окончание таблицы

| 1                            | 2 | 3   | 4                      | 5                     | 6                      | 7     |
|------------------------------|---|-----|------------------------|-----------------------|------------------------|-------|
| $^{238}\text{U}(n, f)$       |   | 0,4 | $0,150 \cdot 10^{-15}$ | 45,65                 | 47,86                  | 4,62  |
| $^{58}\text{Ni}(n, p)$       |   |     | $0,548 \cdot 10^{-16}$ | 16,68                 | 15,77                  | -5,73 |
| $^{27}\text{Al}(n, \alpha)$  |   |     | $0,347 \cdot 10^{-18}$ | 0,1056                | 0,1066                 | 0,95  |
| $^{93}\text{Nb}(n, 2n)$      |   |     | $0,210 \cdot 10^{-18}$ | $0,639 \cdot 10^{-1}$ | $0,6436 \cdot 10^{-1}$ | 0,7   |
| $^{176}\text{Lu}(n, \gamma)$ |   |     | $0,322 \cdot 10^{-11}$ | $0,981 \cdot 10^6$    | $0,9837 \cdot 10^6$    | 0,2   |
| $^{32}\text{S}(n, p)$        |   |     | $0,320 \cdot 10^{-16}$ | 9,738                 | 9,685                  | -0,55 |
| $^{237}\text{Np}(n, f)$      |   | 0,4 | $0,941 \cdot 10^{-15}$ | 286,4                 | 291,2                  | 1,65  |

Скорость ядерной реакции для нуклида-мишени в детекторах рассчитывали по методикам [3, 4]. Спектр нейтронов восстанавливали по программе КАСКАД [5]. Корректность восстановления спектра по этой программе проверяли путем сравнения измеренных интегральных сечений ядерных реакций, индуцированных в детекторах нейтронами и рассчитанных по восстановленному спектру нейтронов и дифференциальным сечениям, имеющимся в библиотеке программы (см. таблицу). Среднеквадратичное отклонение сечений ядерных реакций составляет 3%, что свидетельствует о хорошем качестве восстановления спектра. Дифференциальный энергетический спектр нейтронов показан на рис. 5. Установленные на дату аттестации ОИ-Т-34 характеристики моделирующего опорного поля в точке аттестации (215 мм от дна канала ИК-6 по оси) следующие:



Р и с. 5. Дифференциальный энергетический спектр нейтронов в моделирующем опорном поле

|                                                                      |                   |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Усредненная по спектру энергия нейтронов, МэВ . . .                  | 0,406             |
| Плотность потока нейтронов, $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ :   |                   |
| быстрых . . .                                                        | $1,47 \cdot 10^9$ |
| эпитепловых . . .                                                    | $2,46 \cdot 10^8$ |
| тепловых (максвелловских) . . .                                      | $2,32 \cdot 10^8$ |
| условная (весткотовская) . . .                                       | $7,40 \cdot 10^8$ |
| в диапазоне энергии $10^{-10} - 18$ МэВ . . .                        | $3,25 \cdot 10^9$ |
| Эффективная температура тепловых нейтронов, $^{\circ}\text{C}$ . . . | 85                |
| Мощность кермы нейтронов, $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$ . . .     | 2,62              |

Погрешность приведенных значений не превышает 5—10% для доверительной вероятности 0,95. Установленные характеристики моделирующего опорного поля ОИ-Т-34 соответствуют току канала измерения мощности стенда «Квант»  $(1 \pm 0,03) 10^{-5}$  А.

Радиометр-монитор, служащий для оперативного мониторингирования плотности потока нейтронов в моделирующем опорном поле, состоит из ионизационной камеры КНК-53М, установленной в канале ИК-5, электронного тракта и источника питания ионизационной камеры с высоким напряжением. Электронный тракт включает линию связи и цифровой измеритель тока в составе реактиметра ПИР-4. Плотность потока нейтронов  $3,25 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$  соответствует току радиометра-монитора  $10^{-5}$  А.

Эталонная радиометрическая установка КРОНАИ-13 служит для периодического контроля правильности работы радиометра-монитора эталонного источника. Установка включает в себя гамма-спектрометр и активационные детекторы из кадмия, меди и золота.

Гамма-спектрометр выполнен двухканальным. В первом канале использован блок детектирования с германиевым детектором (ДГДК-80В), во втором — со сцинтилляционным кристаллом NaI(Tl) размером 63×63 мм. Он включает в себя также вспомогательные средства: защиту из свинца для каждого блока детектирования, оснастку к каждому блоку детектирования для фиксированного размещения активационных детекторов либо градуировочных радионуклидных  $\gamma$ -источников и набора источников  $\gamma$ -излучения ОСГИ № 059. Гамма-спектрометр выполнен на базе блоков системы КАМАК под управлением ЭВМ типа IBM PC. Аппаратурные амплитудные спектры обрабатываются по программе EXPRESS-91. Аттестованными характеристиками спектрометра являются чувствительность  $S(E)$  к внешнему  $\gamma$ -излучению в телесный угол  $4\pi$  ср для точечного радионуклидного источника в диапазоне энергии 0,06—3 МэВ и погрешность определения чувствительности  $\delta S(E)$  при доверительной вероятности 0,95. Установленная в процессе аттестации погрешность  $\delta S(E)$  составила не более 2—3% для указанного диапазона энергии  $\gamma$ -излучения. Спектрометр измеряет активность детектора в диапазоне 100— $10^6$  Бк с погрешностью 3—5% при доверительной вероятности 0,95.

Установка КРОНА с активационным детектором из кадмия предназначена для определения условной плотности потока нейтронов в моделирующем опорном поле в диапазоне  $10^6$ — $7 \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>. Детектор из кадмия марки К-00 выполнен в форме диска диаметром 10, толщиной 0,5 мм. Он является нейтронно-чувствительным элементом установки и в процессе облучения в моделирующем опорном поле активизируется по реакции  $^{111}\text{Cd}(n, n')^{111m}\text{Cd}$ . Затем после облучения измеряется наведенная активность  $^{111m}\text{Cd}$ . Условная плотность потока нейтронов ( $\varphi_{yc}$ ), усредненная за время облучения детектора, рассчитывается по соотношению  $\varphi_{yc} = n_0/\xi$ , где  $n_0$  — скорость счета импульсов в пике полного поглощения  $\gamma$ -излучения энергией 245 кэВ продукта реакции  $^{111m}\text{Cd}$  на конец времени облучения детектора нейтронами;  $\xi$  — чувствительность установки к нейтронам на дату ее аттестации ( $\xi = 3,26 \cdot 10^{-7}$  см<sup>-2</sup>). Погрешность определения условной плотности потока нейтронов с применением описанного метода не превышает 10% при доверительной вероятности 0,95.

Установка КРОНА с активационными детекторами из меди и золота серийно выпускаемого набора типа АКН-Т диаметром 10 мм, толщиной 4,4 и 35,6 мг/см<sup>2</sup> соответственно предназначена для абсолютного определения плотности потока нейтронов в моделирующем опорном поле в диапазоне энергии нейтронов  $10^{-10}$ —18 МэВ. Детекторы из золота и меди являются чувствительным элементом установки. В процессе облучения в моделирующем опорном поле они активируются по реакциям  $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$  и  $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$ . Продукт активации  $^{198}\text{Au}$  имеет следующие характеристики распада: постоянная распада  $\lambda = 2,9768 \cdot 10^{-6}$ ·с<sup>-1</sup>, энергия  $\gamma$ -излучения  $E = 0,412$  МэВ, эмиссия  $\gamma$ -излучения энергией  $E\eta_E = 0,956$ . Соответствующие значения для  $^{64}\text{Cu}$  составляют:  $\lambda = 1,5159 \cdot 10^{-5}$ ·с<sup>-1</sup>;  $E = 0,511$  МэВ;  $\eta_E = 0,343$ . Процедура измерения плотности потока нейтронов ( $\varphi$ ) в моделирующем опорном поле источника состоит в облучении  $i$ -го активационного детектора в течение определенного периода времени ( $t_0$ ), измерении наведенной активности в  $i$ -м детекторе и расчете плотности потока нейтронов по формуле

$$\varphi = \frac{A_0^i}{S^i(E)N_s^i\sigma^i(1 - \exp(-\lambda t_0^i))},$$

где  $A_0^i$  — активность продукта активации в  $i$ -м детекторе на конец времени его облучения нейтронами;  $S^i(E)$  — чувствительность гамма-спектрометра установки к  $\gamma$ -из-

лучению продукта активации для  $i$ -го детектора;  $N_{\text{я}}^i$  — число ядер нуклида-мишени в  $i$ -м детекторе;  $\sigma^i$  — сечение активации нуклида-мишени в  $i$ -м детекторе в спектре нейтронов моделирующего опорного поля (см. таблицу);  $\lambda^i$  — постоянная распада для продукта активации в  $i$ -м детекторе.

Погрешность определения плотности потока нейтронов  $\delta\varphi$  рассчитывали по формуле

$$\delta\varphi = 1,1\sqrt{(\delta A_0^i)^2 + [\delta S^i(E)^2 + (\delta N_{\text{я}}^i)^2 + (\delta\sigma^i)^2 + (\delta\lambda^i)^2 + (\delta t_0^i)^2]}.$$

Она составляла не более 8%. Созданный измерительный комплекс был использован для градуировки по чувствительности к нейтронам ионизационных камер, подвесок ионизационных камер СУЗ ЯЭУ с требуемой для практики точностью измерений. Как отмечалось, градуировка осуществлялась в моделирующем опорном поле ОИ-Т-34 с применением специального радиометра нейтронов с активационными детекторами из меди и диспрозия, проградуированного в моделирующем опорном поле эталонного источника нейтронов, активационные детекторы которого выполнены в виде полосок из тонкой фольги толщиной 0,2 мм и длиной, равной длине окружности в сечении градуированного детектора нейтронов. В процессе градуировки устанавливали непосредственно на поверхности детектора.

Градуировка осуществлялась по согласованным с ВНИИФТРИ методике определения плотности потока нейтронов при испытании детекторов нейтронов по чувствительности к нейтронам в канале ИК-6 стенда «Квант» и методике испытаний контрольных образцов детекторов по чувствительности к нейтронам в канале ИК-6 стенда «Квант».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошелев А.С., Одинцов Ю.М., Маслов Г.Н., Севастьянов В.Д. Источник тепловых нейтронов для калибровки детекторов «нулевой» толщины. — Приборы и техника экспер., 1999, № 3, с. 19—26.
2. Васильев Р.Д., Ярына В.П., Севастьянов В.Д. Государственный специальный эталон единицы плотности потока нейтронов для области измерений на ядерно-физических установках. — Измерит. техника, 1974, № 7, с. 10—14.
3. Методические указания МИ 1393-86. Характеристики реакторных нейтронных полей. Методика нейтронно-активационных измерений. М., ВНИИФТРИ, 1986, с. 1—21.
4. Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Маслов Г.Н. Стандартное поле нейтронов в центре активной зоны БИР-2. — Атомная энергия, 1994, т. 76, вып. 1, с. 55—61.
5. Кошелев А.С., Маслов Г.Н., Одинцов Ю.М., Севастьянов В.Д. Измерение температуры нейтронов детекторами из меди и лютетия. — Тезисы докл. VII. Рос. научной конференции «Защита от ионизирующих излучений ядерно-технических установок», 22—24 сентября 1998, Обнинск, с. 173—175.
6. Кошелев А.С., Маслов Г.Н., Петров В.Ю. КАСКАД — комплексная вычислительная программа для метода интегральных нейтронных детекторов. — Тезисы докл. V Всес. сов. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях, 3—7 декабря 1990 г. М., НПО ВНИИФТРИ, 1990, с. 116—117.

Поступила в Редакцию 22.12.99

УДК 539.172.2

### ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СЕЧЕНИЯ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ В ОБЛАСТИ ГИГАНТСКОГО ДИПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА

Белов А.Г., Гангрский Ю.П. (ОИЯИ), Гудима К.К. (Институт физики,  
Молдавия), Зузаан П. (Университет, Улан-Батор, Монголия)

Фотоядерные реакции занимают особое место в ядерной физике. Это объясняется их особенностями. Во-первых, взаимодействие  $\gamma$ -излучения с ядрами является электромагнитным, что позволяет провести корректное описание процесса [1]. В результате