

# Специализированный источник гамма-излучения, пространственно совмещенный с моделирующим опорным полем нейтронов МОП-К2

В. В. ГЕНЕРАЛОВА\*, А. П. ЖАНЖОРА\*, А. С. КОШЕЛЕВ\*\*,  
А. Т. НАРОЖНЫЙ\*\*

\* Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических  
и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: generalova@vniiftri.org  
\*\* ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров, Россия, e-mail: narozhnyi@expd.vniief.ru

*Метрологически исследован и аттестован специализированный источник гамма-излучения на основе контейнера горизонтальной загрузки в активной зоне реактора БР-К1. Источник предназначен для калибровки дозиметров и детекторов гамма-составляющей смешанного излучения.*

**Ключевые слова:** гамма нейтронное излучение, гамма-детектор, метрологические характеристики.

*Specialized gamma radiation source based on horizontally loading container in BR-K1 reactor core was investigated and metrologically certified. The source is intended for calibration of dosimeters and detectors of mixed radiation gamma component.*

**Key words:** gamma neutron radiation, gamma detector, metrological characteristics.

Исследовательский реактор БР-К1 с металлической активной зоной (АЗ) в настоящее время работает в режиме регулируемых по мощности и длительности энергопусков и используется как метрологическая установка в составе отраслевой базы нейтронных измерений [1]. На основе этого реактора создан, метрологически аттестован во ВНИИФТРИ комплекс моделирующих опорных полей нейтронов МОП-К2 с диапазонами воспроизведения дифференциального спектра нейтронов  $10^{-10}$  — 18 МэВ и флюенса нейтронов  $10^7$  —  $10^{15}$  нейтр · см<sup>-2</sup>. Установка допущена к применению в качестве рабочего эталона [2] при проведении исследований радиационного воздействия нейтронного излучения на различные объекты, градуировке радиометрической, спектрометрической и дозиметрической аппаратуры. В 2008 г. на реакторе БР-К1 проведена метрологическая аттестация специализированного источника  $\gamma$ -излучения, пространственно совмещенного с МОП-К2. Общий вид реактора представлен на рис. 1.

Активная зона реактора БР-К1 имеет форму полого цилиндра внешним диаметром 620 мм, длиной в сомкнутом положении 750 мм и с горизонтальной ориентацией центральной оси. Диаметр осевой полости для облучаемых объектов равен 365 мм. Материалом АЗ служит сплав урана (содержит 36 % <sup>235</sup>U) с молибденом (9 % массового содержания) общей массой 1500 кг. Активная зона состоит из пяти автономных блоков, собранных из кольцевых элементов делящегося материала и заключенных в заполненные гелием герметичные чехлы из нержавеющей стали. Неподвижные блоки НБ-1п, НБ-1л, НБ-2 образуют фиксированный сегмент активной зоны, а подвижные АБ, ПБ, СБ, ИБ (с бериллием), РБ-1, РБ-2 (из латуни) образуют позиционно изменяемый сегмент активной зоны и функционально являются органами регулирования реактивности и защиты.

Основные элементы аварийной защиты — подвижные блоки АБ, СБ — имеют фиксированные базы перемещения и возможность возврата в исходное положение в режиме

свободного падения по направляющим. Блок ПБ предназначен для грубой регулировки реактивности (компенсации вносимого объектами облучения возмущения реактивности); в геометрии формирования опорного  $\gamma$ -поля этот блок не доходит до неподвижного блока НБ-2 на 30 мм. Прецизионное регулирование реактивности в генерируемых энергопусках обеспечивается перемещением блоков ИБ, РБ-1, РБ-2 с помощью шаговых двигателей и широкодиапазонной системы их частотного управления.

При генерировании энергопусков реактора, ориентированных на формирование  $\gamma$ -поля специализированного источника  $\gamma$ -излучения (СГИ), подвижный блок ИБ выдвигается в положение, симметричное блоку СБ, и в регулировании реактивности не используется. Неизменность и симметричность положений блоков ИБ и СБ в процессе энергопуска реактора обеспечивает единообразие мониторинга энерговыделения в активной зоне с помощью штатных никелевых мониторов, независимо от положений других подвижных блоков (ПБ, РБ-1, РБ-2).

Для загрузки исследуемых объектов во внутризонную облучательную полость используется контейнер горизонтальной загрузки (КГЗ), расположенный на стенде загрузки реактора. Этот стенд обеспечивает загрузку КГЗ в активную зону реактора и удаление его на расстояние до 6 м от поверхности АЗ. Формообразующий кожух КГЗ оснащен экраном из естественного карбида бора толщиной 0,1 г/см<sup>2</sup>. Полость внутри кожуха имеет диаметр 310 мм, длину 360 мм.

В качестве аттестуемой области СГИ в контейнере горизонтальной загрузки выбрана условно ограниченная область пространства в форме параллелепипеда 100×50×100 мм над установочной площадкой, фиксированного по центру отверстия в ней (рис. 2).

В качестве средств метрологического обеспечения при аттестации источника единицы мощности поглощенной дозы вторичный эталон единицы мощности поглощенной дозы

фотонного ионизирующего излучения в стандартных материалах ВЭТ 38-7—94 ( $\delta = 1,2\%$ ,  $P = 0,95$ ) ВНИИФТРИ [3];

рабочий эталон — твердотельные детекторы СО ДТС-0,01/1,0 (далее по тексту «детекторы») [3], аттестованные в единицах поглощенной дозы в воде (погрешность аттестации  $\delta = 5\%$ ,  $P = 0,95$  при измерении оптической плотности детекторов на спектрофотометре Specord M40 ВНИИФТРИ);

спектрофотометр для измерений оптической плотности в видимой и ультрафиолетовой (УФ) областях спектра ( $\delta \leq 0,3\%$ ,  $P = 0,95$ ) Specord M40 ВНИИФТРИ;

спектрофотометр для измерений оптической плотности в видимой и УФ-областях спектра СФ-46 ( $\delta \leq 0,5\%$ ,  $P = 0,95$ ) РФЯЦ-ВНИИЭФ;

штатные приборы, входящие в комплект пульта управления реактора БР-К1 РФЯЦ-ВНИИЭФ;

рабочий эталон первого разряда — радиометрическую установку КРОНА-1-3-1 РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Детекторы располагали на трех горизонтальных плоскостях, параллельных установочной площадке. Нижняя плоскость, совмещенная с поверхностью установочной площадки, принята за условный «нуль» по высоте, средняя плоскость, совмещенная с осью КГЗ, отстоит на 25 мм от нижней, а верхняя — на 50 мм. Схема расположения детекторов на

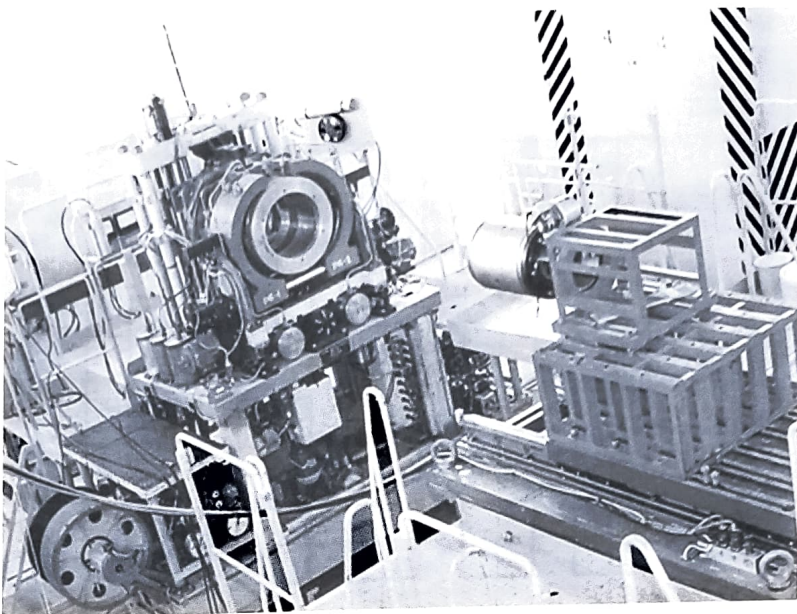


Рис. 1. Общий вид реактора БР-К1

горизонтальных плоскостях показана на рис. 3. Ряд 1 детекторов ориентирован параллельно малому фланцу конструкции и является ближним к нему. Центр детекторов РЗМЗ фиксировался на расстоянии 60 мм от внутреннего торца кожуха КГЗ по центру отверстия в установочной площадке.

При метрологическом исследовании поля СГИ количество детекторов, размещенных на трех плоскостях, варьировали в зависимости от проводимого эксперимента. Все облучения детекторов сопровождалось облучением двух никелевых мониторов, установленных в конструктивно фиксированных позициях в КГЗ, и контролем текущих значений мощности (в относительных единицах) по показаниям штатной аппаратуры реактора БР-К1.

Оптическую плотность облученных детекторов измеряли спустя 24 ч на спектрофотометре СФ-46 РФЯЦ-ВНИИЭФ, а для некоторых детекторов измерения повторяли спустя 14 дней на спектрофотометре Specord M40 ВНИИФТРИ. После введения поправки на регрессию оптической плотности вычисляли значения поглощенных доз при измерении на двух упомянутых приборах и результаты сравнивали между собой. При этом среднее квадратическое отклонение (СКО) отношения поглощенных доз не превышало 1,8%. При градуировке стандартных образцов СКО результатов измерений также составляло 1,8%. Следовательно, можно полагать, что поглощенные дозы, измеренные с применением этих двух спектрофотометров, идентичны.

Установлено, что неравномерность поглощенной дозы по оси РЗМ1-РЗМ5 на высоте 25 мм от установочной пло-

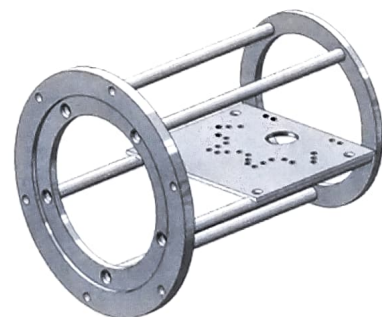


Рис. 2. Внешний вид конструкции с установочной площадкой

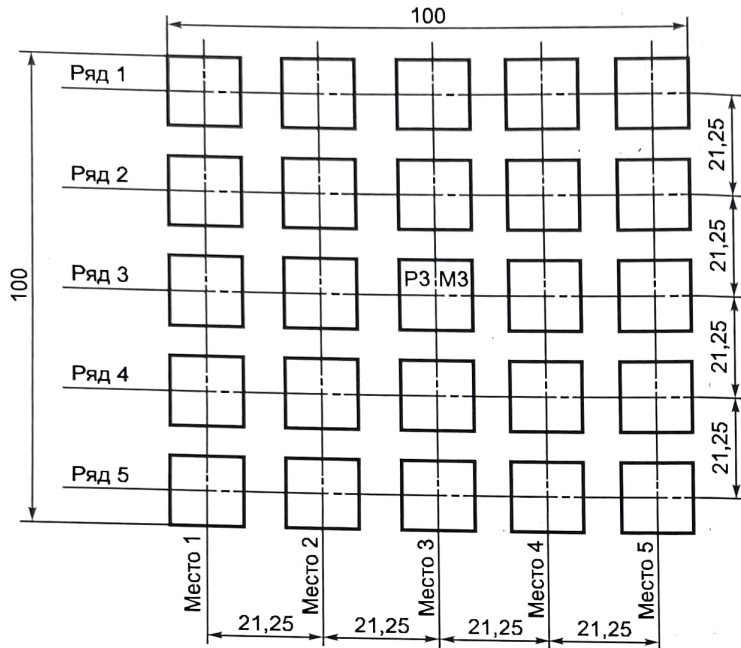


Рис. 3. Схема расположения детекторов на горизонтальных плоскостях

щадки, совпадающей с осью КГЗ, не превышает 3 % и может быть описана в относительных единицах полиномом третьей степени

$$H = 6 \cdot 10^{-7} z^3 - 1 \cdot 10^{-4} z^2 + 2 \cdot 10^{-3} z + 1,0679,$$

где  $H$  — неравномерность поля  $\gamma$ -излучения;  $z$  — расстояние от центра детектора в позиции Р1М3.

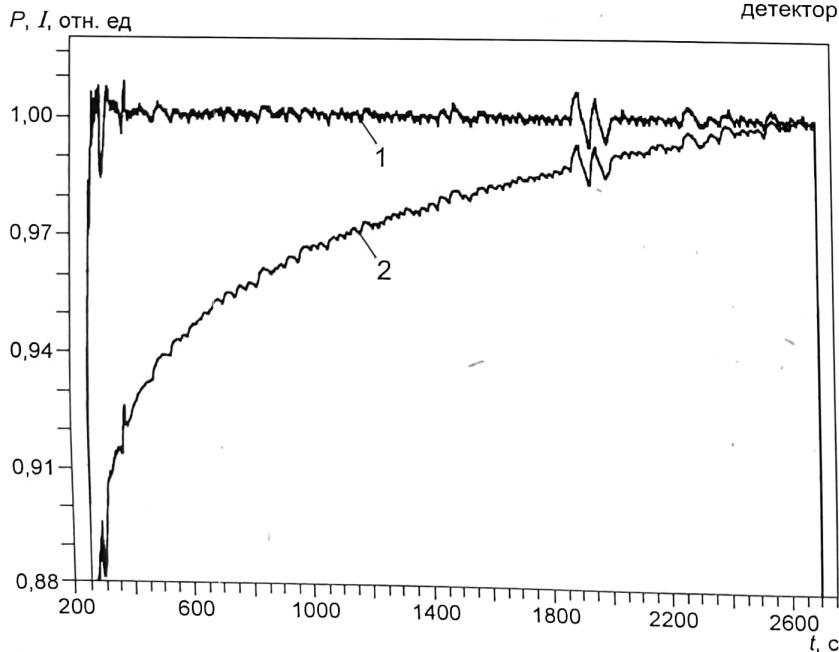


Рис. 4. Сравнительное изменение во времени мощности реактора (1) и тока (2) вакуумно-эмиссионного детектора в энергопуске стационарного типа

Также установлено, что поглощенная доза  $\gamma$ -излучения прямо пропорциональна показаниям никелевых мониторов в интервале 130—310 Гр и не зависит от мощности поглощенной дозы в диапазоне 0,05 — 0,3 Гр/с. Полученный результат позволяет с помощью единого числового множителя в изученном интервале доз определять численные значения поглощенных доз в реализованном энергопуске по показаниям никелевых мониторов.

С учетом данных, приведенных в [4], поглощенной дозе от  $\gamma$ -излучения 1 Гр в позиционной координате РЗМ3 сопутствует флюенс нейтронов  $7,2 \cdot 10^{11}$  нейтр  $\cdot$  см $^{-2}$  со средней энергией спектра 0,77 МэВ.

С использованием рабочего экземпляра вакуумно-эмиссионного детектора типа ВЭД-2-03 [5] была осуществлена практическая проверка применения СГИ как инструмента для калибровки  $\gamma$ -детекторов данного типа. Принимая во внимание сопоставимость размеров аттестованного пространства СГИ и области чувствительности ВЭД-2-03 (диаметр электродов 42 мм, длина электродной секции 64 мм), использовали два варианта ориентационного расположения детектора в поле СГИ: вдоль оси Z и поперек нее с совмещением геометрических центров СГИ и области чувствительности детектора. Установлено, что различие в показаниях детектора для реализованных конфигураций не превышает 2 %. Предварительный анализ экспериментальных данных показывает возможность связи интегральных характеристик поля СГИ

(в греях) и детектора типа ВЭД-2-03 (в кулонах) в рамках модели нивелирования возмущения поля СГИ материалами детектора фактически без выхода за границы установленной погрешности поглощенной дозы СГИ, равной 15 % в доверительном интервале 0,95.

На рис. 4 в сопоставимой форме приведены зависимости изменения мощности  $P$  реактора в энергопуске стационарного типа (время выхода на стационарный уровень мощности 200 с, выдержка 2500 с, сброс мощности 50 с) и тока  $I$  детектора ВЭД-2-03 от времени. Расчетные оценки\*, выполненные с использованием рекомендаций [6, 7] по выходу запаздывающих  $\gamma$ -квантов деления, показали удовлетворительное согласие (непротиворечивость) характера изменения в ходе реализации энергопуска тока детектора ВЭД-2-03 (эксперимент) и совокупной мощности поглощенной дозы (расчет с учетом мгновенной и запаздывающей составляющей  $\gamma$ -излучения делений и нейтронных взаимодействий в АЗ реактора).

Таким образом, на реакторе БР-К1 проведены измерения поглощенных доз  $\gamma$ -излучения в контейнере горизонтальной загрузки, размещенном в центральном экспериментальном канале активной зоны реактора. Результаты измерений позволили аттестовать выбранный ограниченный объем в качестве специализированного источника  $\gamma$ -излучения, пространственно совмещенного с моделирующим опорным полем нейтронов МОП-К2. Создание такого источника с известными метрологическими характеристиками позволяет проводить калибровку широкого спектра  $\gamma$ -дозиметров и  $\gamma$ -детекторов, используемых

\* Расчеты проведены сотрудником РФЯЦ-ВНИИЭФ В. Х. Хоружим.

## К юбилею института

---

на исследовательских и промышленных ядерных установках и в радиационных технологиях, а также материаловедческие исследования.

### Л и т е р а т у р а

1. **Колесов В. Ф.** Аperiodические импульсные реакторы: Монография в 2 т. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007. Т. 1.
2. **ГОСТ 8.105—80.** ГСИ. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений плотности потока и флюенса нейтронов на ядерно-физических установках.
3. **Обеспечение** единства измерений в радиационных технологиях / Под общей ред. П. А. Красовского. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2007.

4. **Севастьянов В. Д., Кошелев А. С., Маслов Г. Н.** Характеристики полей нейтронов. Источники мгновенных нейтронов деления, генераторы 14 МэВ нейтронов, исследовательские и энергетические реакторы, устройства, конвертирующие нейтронное излучение: Справ. пособие / Под ред. В. Д. Севастьянова. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2007.

5. **Чукляев С. В., Грудский М. Я., Артемьев В. А.** Вторично-эмиссионные детекторы ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1995.

6. **Кипин Дж. Р.** Физические основы кинетики ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1967.

7. **Петров Ю. И.** Гамма-излучение осколков  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  // Атомная энергия. 1959. Т. 7. Вып. 2. С. 168.

*Дата принятия 28.10.2009 г.*