

ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕАЛИЗАЦИИ КОМПАРАТОРНОГО ВАРИАНТА КАЛИБРОВКИ ДЕТЕКТОРОВ МОЩНОСТИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ГАММА-ИСТОЧНИКА РЕАКТОРА БР-К1

А. С. Кошелев, В. Х. Хоружий, М. А. Овчинников, Г. Н. Пикулина

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл.

Представлены результаты измерений в рабочей области специализированного гамма-источника реактора БР-К1 с использованием детекторов мощности γ -дозы типа ВЭД-2, целевым ориентиром которых является разработка методики калибровки разнообразных детекторов мощности γ -излучения в компараторной редакции.

Ключевые слова: реактор БР-К1, специализированный гамма-источник, доза, мощность дозы, детектор мощности дозы, мера, компараторная калибровка.

POSSIBILITIES AND PROSPECTS OF REALIZING COMPARATIVE CALIBRATION OF GAMMA-RADIATION POWER DETECTORS IN THE FIELD OF SPECIALIZED GAMMA-SOURCE OF REACTOR BR-K1 / A. S. KOSHELEV, V. Kh. KHORUZHYY, M. A. OVCHINNIKOV, G. N. PIKULINA // There are presented the results of measurements performed in the work area of the BR-K1 specialized gamma-source with the use of γ -dose power detectors of VEhD type. The goal of these measurements is to develop the calibration technique of various detectors of γ -radiation power in a comparative interpretation.

Key words: BR-K1 reactor, specialized gamma-source, dose, dose rate, detector, dose power detector, measure, comparative calibration.

Введение

Специализированный гамма-источник (СГИ), созданный на базе реактора БР-К1, в обширной облучательной полости внутри активной зоны [1, 2] ориентирован, в первую очередь, на калибровку детекторов мощности γ -излучения в широком диапазоне изменения их чувствительности (от $\sim 10^{-5}$ Кл/Гр до $\sim 10^{-9}$ Кл/Гр), в условиях квазиизотропного поля композиционного компонентного состава (мгновенные γ -кванты деления и иных видов нейтронного взаимодействия, запаздывающие γ -кванты деления, мгновенные нейтроны деления), характеристически приближенного к полям радиационного нагружения ядерно-физических установок ВНИИЭФ.

Реализованная форма аттестации СГИ (поглощенная доза в воздухе вокруг координаты гео-

метрического центра рабочего пространства с формализмом перерасчета на все пространственные координаты СГИ) предопределяет в качестве основной интегральную форму калибровки (по полной поглощенной дозе за операционную процедуру) детекторов мощности γ -излучения.

Значительность долевого содержания запаздывающей γ -компоненты ($\sim 27\%$ вклада в полную поглощенную дозу от реакторных γ -квантов; $\sim 19\%$ существенно изменяющегося во времени вклада в интервале ~ 25 мин. работы реактора на стационарной мощности) обуславливает достаточно жесткую регламентацию формы реализации калибровочного энергопуска реактора (удержание стационарного уровня мощности в течение не менее 20 мин. с минимизированной длительностью выхода на мощность и ухода с нее) и порядка мониторинга итогового (используемого для оп-

ределения чувствительности калибруемого детектора) значения поглощенной дозы.

Ограничение оперативных возможностей реактора (достижение более высоких уровней мощности при установленном пределе по полному энерговыделению за пуск, позволяющее осуществлять калибровку детекторов с чувствительностью менее 10^{-9} Кл/Гр; операционно выигрышная замена достаточно длительного периода удержания стационарной мощности с ограничением по максимальному уровню $8 \cdot 10^{14}$ дел.Аз/с на более короткий и, соответственно, более мощный энергопуск в режиме генерирования импульсов на запаздывающих нейтронах) не существенно при выполнении калибровок штучного характера. При необходимости массового (до 10 детекторов и более одновременно) или часто осуществляемого (периодическая проверка, проверка перед ответственным использованием) калибровочного процесса использование интегрального варианта калибровки может оказаться практически нецелесообразным (избыточно трудоемким).

В практике метрологического обеспечения измерений при множественном характере калибровочных процедур получили распространение так называемые компараторные методы, основанные на сопоставлении (сличении) показаний калибруемого детектора и детектора, принимаемого в качестве меры, в условиях адекватности воздействующих факторов [3]. Опыт применения компараторных методов свидетельствует о незначительности, как правило, вносимой дополнительной погрешности в воспроизводимую мерой величину.

В условиях достаточности аппаратно-методического обеспечения удалось оперативно организовать и осуществить цикл измерений по схеме компараторного варианта калибровки на примере вакуумно-эмиссионных детекторов γ -квантов типа ВЭД-2 [4]. Значимые подробности экспериментальной процедуры, основные результаты измерений, инструментарий и результаты анализа полученных данных, определяющие возможности и перспективы внедрения компараторного варианта в практику калибровки детекторов мощности γ -излучения с использованием СГИ реактора БР-К1, и являются предметом рассмотрения настоящей статьи.

Специализированный гамма-источник реактора БР-К1

Специализированный источник γ -излучения сформирован в штатном контейнере горизонталь-

ной загрузки (КГЗ) для внутризонной облучательной полости реактора. Общий вид реактора со стороны КГЗ в исходном положении представлен на рис. 1.

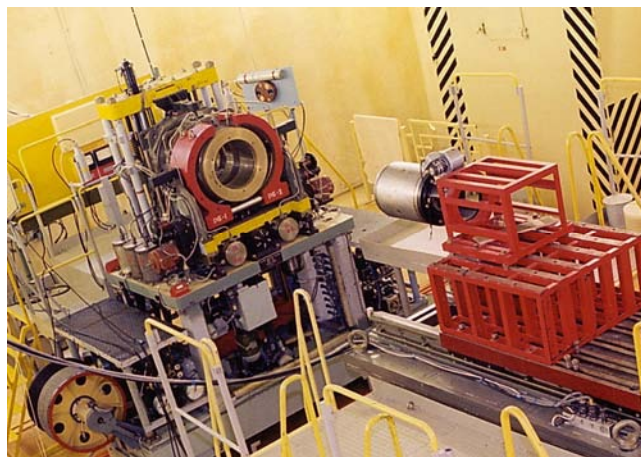


Рис. 1. Общий вид реактора БР-К1 с КГЗ в исходном состоянии

Формообразующий кожух КГЗ одновременно выполняет функцию фильтрации тепловых нейтронов, образование которых возможно в присутствии водородосодержащих материалов внутри КГЗ. Фильтрующий элемент – мелкодисперсионный порошок карбида бора естественного изотопного содержания толщиной по $^{10}\text{В}$ порядка $0,1 \text{ г/см}^2$. Пространство внутри КГЗ имеет форму цилиндра диаметром ~ 310 мм, длиной ~ 360 мм.

СГИ представляет собой геометрически конкретизированный фрагмент пространства в форме параллелепипеда с размерами $(100 \times 100 \times 50)$ мм, фиксация которого внутри КГЗ обеспечивается с использованием специальной технологической оснастки, несущая конструкция которой представлена на рис. 2. Пространственный объем СГИ меньше пространственного объема КГЗ в ~ 430 раз.

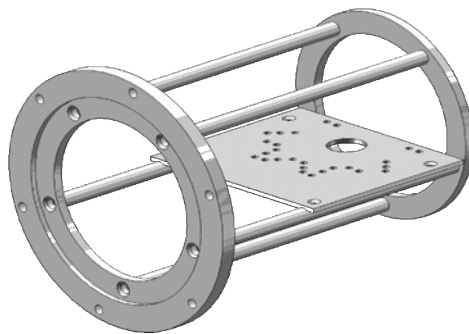


Рис. 2. Несущая конструкция технологической оснастки СГИ

Регламентно ограниченному уровню полного энергоснабжения $1 \cdot 10^{18}$ делений в активной зоне реактора (далее «дел.АЗ») соответствует полная поглощенная доза в регламентно установленной процедуре интегральной калибровки ~ 620 Гр (воздух). Изменение дозового параметра по центральной осевой КГЗ практически линейно с коэффициентом деградации $\sim 2,5$ %/см. В отсутствие выраженной осевой асимметрии изменение дозового параметра перпендикулярно центральной осевой не превышает 0,5 %/см.

Аппаратурно-методические составляющие калибровочной процедуры

В специализированном подразделении ВНИИЭФ, ориентированном на разработку и изготовление контрольно-измерительной аппаратуры для ядерно-физических установок института, с использованием функциональных модулей ИМТК (измерительный модуль токовой камеры из состава канала контроля мощности реакторных установок) был скомпонован в общем приборном корпусе типа Ratiopac PRO и программно оформлен четырехканальный измеритель малых токов (ИТМ4) для одновременной синхронной регистрации нейтронных и γ -детекторов с токовой формой отклика (промышленные ионизационные газонаполненные и вакуумированные камеры, ориентированные на регистрацию нейтронной и фотонной составляющих реакторного излучения).

Рабочий диапазон измеряемых ИМТК токов – от 10^{-12} до 10^{-3} А произвольной полярности. Для управления ИМТК и архивирования регистрационных файлов использован персональный компьютер уровня Pentium IV со специальным управляющим программным обеспечением. Для визуального контроля процесса регистрации использован ЖК-монитор 17" XGA (1024×768).

Программное обеспечение, разработанное для управления ИТМ4, выполняет следующие функции:

- задание конфигурации аппаратурного комплекта с возможностью изменения числа используемых модулей ИМТК;

- установку параметров связи между персональным компьютером и комплектующими измерительными модулями; задание адресов модулей, тестирование обмена;

- задание дискретизации измерений по текущему времени с фиксированным шагом 100 мс в регулируемом регистрационном интервале от 100 мс до 1 с;

- прием данных на персональный компьютер от модулей ИМТК и сохранение зарегистрированной информации в файлах на жестком диске компьютера;

- отображение на экране монитора измеренных значений тока (в цифровой и графической формах) и текущего заряда (только в числовой форме), определяемого как сумма предшествующих токовых значений.

Программа разработана в среде визуального объектно-ориентированного программирования DELPHI-2006; функционирует под управлением ОС Microsoft Windows 2000/XP и выше.

Неотъемлемой составляющей методического инструментария является периодически совершенствуемая программа расчета изменения мощности дозы в СГИ при осуществлении энергопусков реактора преимущественно стационарного характера. В расширенном варианте основные положения расчетного подхода представлены в [5].

В настоящее время в качестве основной расчетной модели прецизионного отображения функционала мощности поглощенной дозы в СГИ выбрана модель с использованием временных зависимостей выхода запаздывающих γ -квантов в форме, предложенной Петровым [6]. Для реализации избранной расчетной процедуры разработана соответствующая FORTRAN-версия компьютерной программы DOZA с жесткой фиксацией требуемых входных параметров.

Входными параметрами для программы DOZA являются фиксированное значение дозы от поглощенных в воздухе мгновенных (*prompt*) γ -квантов в расчете на одно деление в АЗ реактора $D_p = 4,968 \cdot 10^{-16}$ Гр/дел.АЗ; фиксированное значение дозы от поглощенных в воздухе запаздывающих (*delay*) γ -квантов в расчете на одно деление в АЗ $D_d = 1,853 \cdot 10^{-16}$ Гр/дел.АЗ; зависимость скорости делений в рассматриваемом пуске реактора $P_{exp}(t)$, которая может быть дана в произвольной нормировке.

Программа вычисляет следующие физические величины, нормированные на одно деление в АЗ:

- мощность дозы мгновенных γ -квантов

$$I_p(t) = D_p p(t),$$

$$p(t) = P_{exp}(t) / \int P_{exp}(\tau) d\tau,$$

где $p(t)$ – нормированная на единицу скорость делений в АЗ;

– мощность дозы запаздывающих γ -квантов

$$I_d(t) = D_d \int_0^t g(\tau) p(t - \tau) d\tau,$$

$$g(t) = G(t) / \int G(\tau) d\tau,$$

где $g(t)$ – нормированный на единицу временной выход энергии запаздывающих γ -квантов;

– суммарную мощность дозы

$$I(t) = I_p(t) + I_d(t);$$

– дозу мгновенных γ -квантов, реализуемую к текущему моменту времени t

$$D_p(t) = \int_0^t I_p(\tau) d\tau;$$

– дозу запаздывающих γ -квантов, реализуемую к текущему моменту времени t

$$D_d(t) = \int_0^t I_d(\tau) d\tau.$$

Для текущего расчета $G(t)$ используется следующая система аналитических представлений:

$$G(t) = 1,271 \cdot 10^{-5} t^{-1,558}, \quad 5 \cdot 10^{-8} < t < 10^{-3} \text{ с};$$

$$G(t) = 0,6 \exp(-0,4839t), \quad 10^{-3} < t < 1 \text{ с};$$

$$G(t) = 0,18(1,78 \exp(-3,14t) + 1,83 \exp(-0,545t) + \exp(-0,091t)), \quad 1 < t < 10 \text{ с};$$

$$G(t) = 0,0626(2,18 \exp(-0,159t) + \exp(-0,0239t)), \quad 10 < t < 60 \text{ с};$$

$$G(t) = 1,145 t^{-1,05}, \quad 60 < t < 7200 \text{ с};$$

$$G(t) = 42,6 t^{-1,45}, \quad 7200 < t < 39600 \text{ с}.$$

Расчет учитывает быструю часть выхода запаздывающих γ -квантов при $t < 1$ мс по аналогии с мгновенными γ -квантами с использованием нор-

мировки $\int_{5 \cdot 10^{-8}}^{10^{-3}} G(\tau) d\tau = 0,269$. При $t > 1$ мс интег-

рирование в выражении для $I_d(t)$ осуществляется численно. Для численного вычисления всех интегралов используются квадратурные формулы Гаусса [7] с шагом по времени $\sim 0,1$ с. Вычисление $P_{\text{exp}}(t)$ в промежуточных точках по времени проводится с помощью линейной интерполяции.

Файл входных данных $P_{\text{exp}}(t)$ формируется с использованием регистрационного файла канала контроля мощности реактора, оформленного с ис-

пользованием одного из четырех ИМТК ИМТ4 и детекторного блока с ионизационной газонаполненной нейтронно-чувствительной камерой КНК-4.

Постановка и результаты эксперимента. Анализ. Обсуждение

Для получения необходимого объема экспериментальных данных было осуществлено два энергопуска стационарного типа и два энергопуска квазиимпульсного типа.

В первом энергопуске стационарного типа измерения проводились только с детектором ВЭД-2-03 № 072, чувствительность которого ($4,28 \cdot 10^{-9}$ Кл/Гр) была определена ранее в калибровке интегрального типа. Период выхода на стационарный уровень ~ 35 с, стационарная мощность $\sim 3,7 \cdot 10^{14}$ дел.АЗ/с с выдержкой в течение ~ 900 с, полное энерговыделение за пуск $\sim 3,5 \cdot 10^{17}$ дел.АЗ. Позиционное размещение детектора ВЭД-2-03 № 072, соответствующее таковому в калибровке интегрального типа, иллюстрирует рис. 3,а. Фиксация детектора осуществлялась после совмещения центра его электродной секции с геометрическим центром СГИ.

Во втором энергопуске стационарного типа измерения проводились с двумя детекторами ВЭД-2-03 (№ 072 и № 093). Ранее установленное в калибровке интегрального типа значение чувствительности детектора ВЭД № 093 $4,25 \cdot 10^{-9}$ Кл/Гр. Период выхода на стационарный уровень ~ 25 с, стационарная мощность $\sim 2,8 \cdot 10^{14}$ дел.АЗ/с с выдержкой в течение ~ 1200 с, полное энерговыделение за пуск $\sim 3,5 \cdot 10^{17}$ дел.АЗ. Позиционное размещение детекторов ВЭД-2-03 № 072 и № 093 иллюстрирует рис. 3,б. Фиксация детекторов осуществлялась после совмещения центров их электродных секций с радиальной осевой, проходящей через геометрический центр СГИ.

В первом энергопуске квазиимпульсного типа (импульс на запаздывающих нейтронах с автоматическим сбросом органов регулирования реактивности (ОРР) по заданному заранее пороговому уровню мощности) повторялись измерения с детекторами ВЭД № 072, 093 без изменения их позиции в предшествующем энергопуске стационарного типа. Период разгона реактора на асимптотическом участке ~ 45 с, мощность на момент сброса ОРР $\sim 3,0 \cdot 10^{15}$ дел.АЗ/с, полное энерговыделение за пуск $\sim 1,6 \cdot 10^{17}$ дел.АЗ.

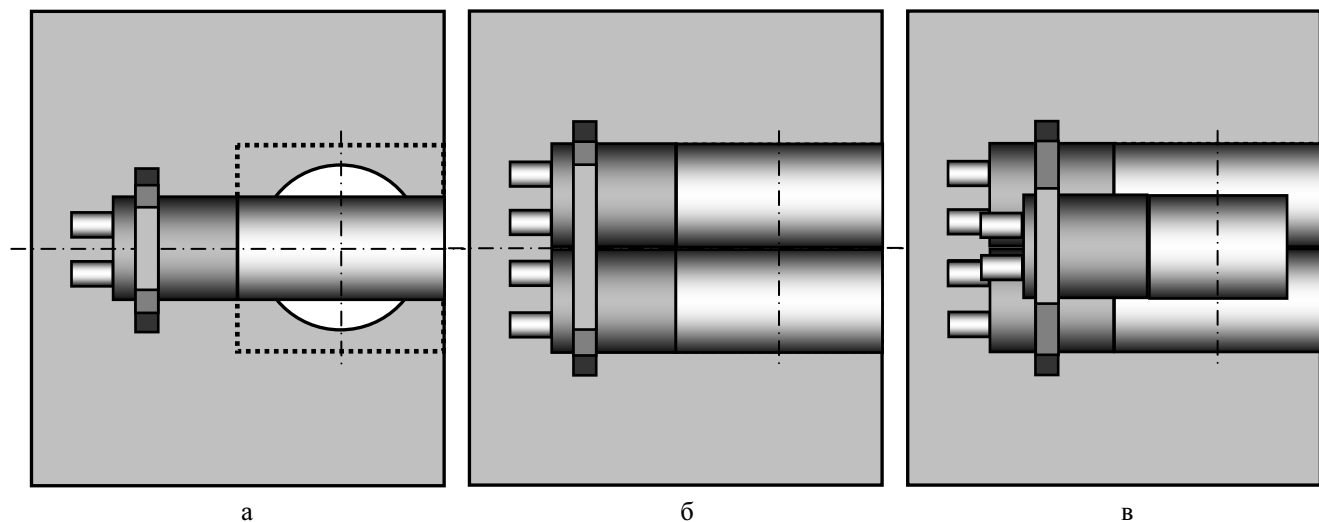


Рис. 3. Расположение детекторов ВЭД-2 на установочной площадке несущей конструкции СГИ: а – стандартное одиночное, б – компараторное парное, в – компараторное тройное

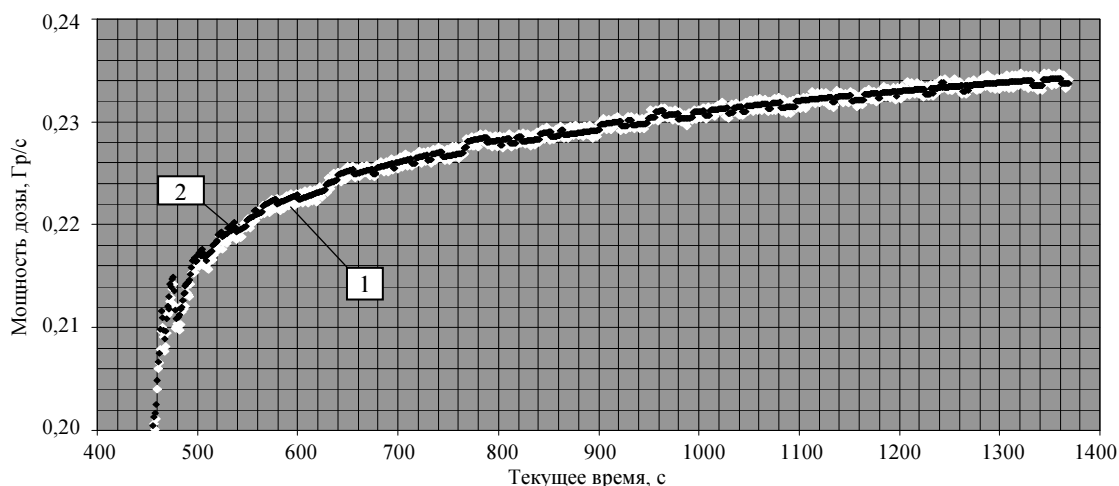


Рис. 4. Сравнение экспериментальной (1) и расчетной (2) мощности дозы в энергопуске стационарного типа со стандартным одиночным размещением ВЭД-2-03

Во втором энергопуске квазиимпульсного типа измерения проводились с двумя детекторами ВЭД-2-03 (№ 072, № 093) и одним (третьим) детектором ВЭД-2-02 № 073, который устанавливался сверху на не перемещаемые позиционно детекторы ВЭД № 072 и № 093. Ранее установленное в калибровке интегрального типа значение чувствительности детектора ВЭД-2-02 № 073 $2,37 \cdot 10^{-9}$ Кл/Гр. Асимптотический период разгона реактора ~ 49 с, мощность на момент сброса ОРР $\sim 3,0 \cdot 10^{15}$ дел.Аз/с, полное энерговыделение за пуск $\sim 1,8 \cdot 10^{17}$ дел.Аз. Позиционное размещение пакета из трех детекторов иллюстрирует рис. 3,в. Фиксация детекторов осуществлялась после совмещения центров их электродных секций с радиальной осевой, проходящей через геометрический центр СГИ.

Результаты измерения одиночным детектором ВЭД-2-03 № 072 в формате мощности дозы в сопоставлении с соответствующими расчетными данными представлены на рис. 4. В пределах визуализированного на рис. 4 интервала времени, соответствующего работе реактора на стационарном уровне мощности, очевидно практическое совпадение графиков экспериментальных и расчетных данных.

Результаты измерения детектором ВЭД-2-03 № 072 в паре с детектором ВЭД-2-03 № 093 в энергопуске стационарного типа в формате мощности дозы в сопоставлении с соответствующими расчетными данными представлены на рис. 5. Превышение расчетных данных над экспериментальными (в 1,0234 раза с разбросом $\pm 0,018$ %

в интервале доверительной вероятности $P = 0,95$ по результатам выборки данных на интервале 1000 с от сброса ОРР) можно рассматривать как количественную оценку качественно ожидаемого деградационного эффекта от внесения в поле СГИ дополнительного детектора ВЭД-2-03.

На рис. 6 с использованием упомянутых выше результатов измерений в графической форме представлена функциональная связь тока компараторно калибруемого детектора ВЭД-2-03 с током детектора ВЭД-2-03, принимаемого в качестве меры. Экспериментальные данные представлены в виде ромбов белого цвета. Сплошной линией черного цвета отображена аппроксиманта вида

$$I_{093} = 0,9975I_{072} + 2,8563 \cdot 10^{-13}. \quad (1)$$

Из соотношения (1) для чувствительности детектора ВЭД-2-03 № 093 при упомянутом ранее значении чувствительности ВЭД-2-03 № 072

$4,28 \cdot 10^{-9}$ Кл/Гр (принимаемая мера чувствительности) имеем $4,27 \cdot 10^{-9}$ Кл/Гр. Сравнение с данными интегральной калибровки для компараторно калибруемого детектора показывает различие в 1,0047 раза, что безусловно можно рассматривать как расхождение в пределах относительной погрешности определения значения меры.

На рис. 7 в графической форме представлена аналогичная функциональная связь тока детектора ВЭД-2-03 № 093 с током детектора ВЭД-2-03 № 072, соответствующая результатам измерений, полученным в энергопуске квазиимпульсного типа. Экспериментальные данные представлены в виде ромбов белого цвета. Сплошной линией черного цвета отображена аппроксиманта вида

$$I_{093} = 0,9885I_{072} + 2,4147 \cdot 10^{-13}. \quad (2)$$

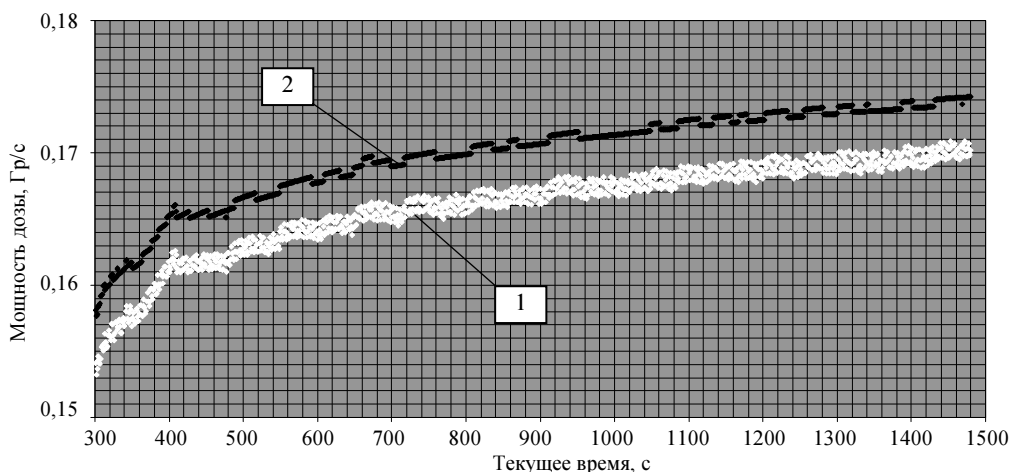


Рис. 5. Сравнение экспериментальной (1) и расчетной (2) мощности дозы в энергопуске стационарного типа с компараторным парным размещением ВЭД-2-03

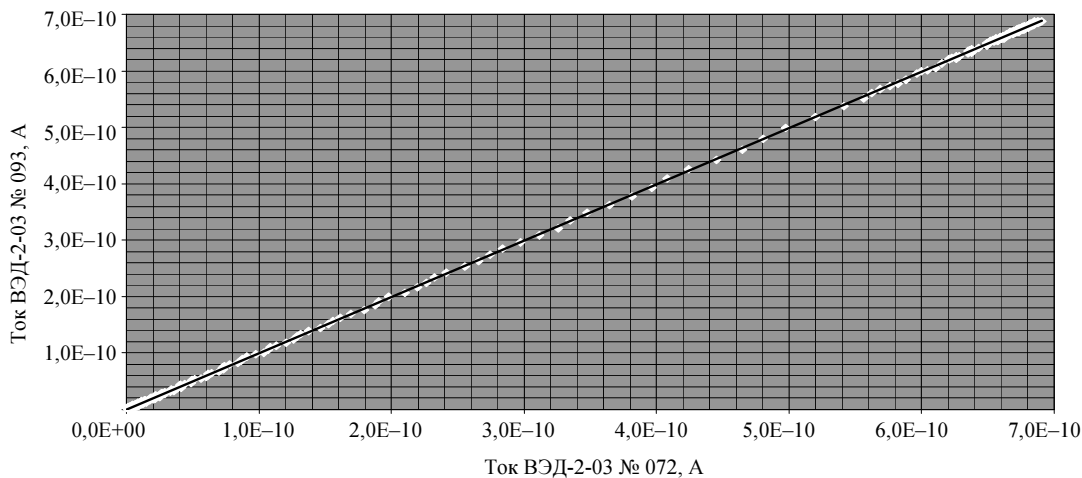


Рис. 6. Функциональная связь тока ВЭД-2-03 № 093 с током ВЭД-2-03 № 072 в энергопуске стационарного типа

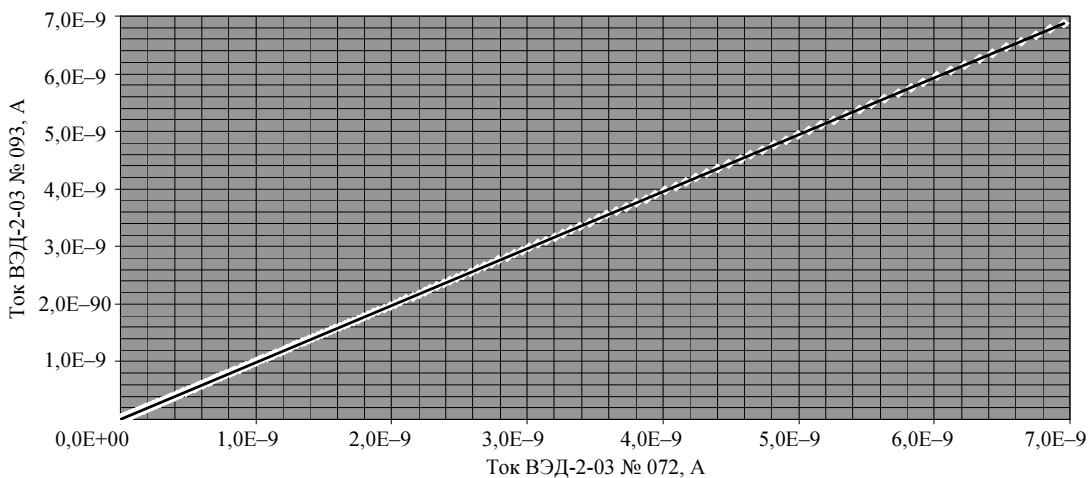


Рис. 7. Функциональная связь тока ВЭД-2-03 № 093 с током ВЭД-2-03 № 072 в энергопуске квазиимпульсного типа

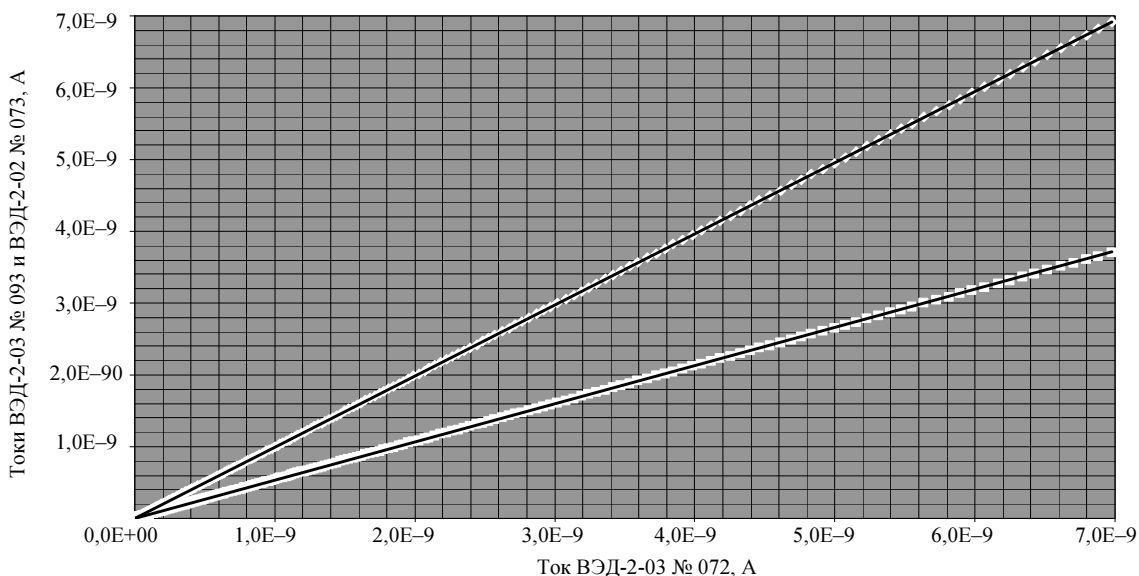


Рис. 8. Функциональная связь токов ВЭД-2-03 № 093 (\diamond), ВЭД-2-02 № 073 (\square) с током ВЭД-2-03 № 072 в энергопуске квазиимпульсного типа

Из соотношения (2) для чувствительности детектора ВЭД-2-03 № 093 при значении чувствительности ВЭД-2-03 № 072 $4,28 \cdot 10^{-9}$ Кл/Гр имеем $4,23 \cdot 10^{-9}$ Кл/Гр. Сравнение с данными интегральной калибровки для компараторно калибруемого детектора показывает различие в 0,9953 раза. Различие данных по чувствительности ВЭД-2-03 № 093, полученных в энергопусках стационарного и квазиимпульсного типа, составляет 1,0095, или менее 1 %.

На рис. 8 в графической форме представлены функциональные связи токов детекторов ВЭД-2-03 и ВЭД-2-02 (компараторно калибруемые) с током детектора ВЭД-2-03 (мера), соответствующие ре-

зультатам измерений в энергопуске квазиимпульсного типа. Аппроксиманта экспериментальных данных для ВЭД-2-03 № 093 (сплошная черная линия поверх массива белых ромбов) имеет вид

$$I_{093} = 0,9910I_{072} + 4,2876 \cdot 10^{-12}. \quad (3)$$

Аппроксиманта экспериментальных данных для ВЭД-2-02 № 073 (сплошная черная линия поверх массива белых квадратов) имеет вид

$$I_{073} = 0,5309I_{072} + 4,0819 \cdot 10^{-12}. \quad (4)$$

Сравнением с чувствительностью ВЭД-2-03 № 072 для чувствительности ВЭД-2-03 № 093 со-

гласно (3) имеем $4,24 \cdot 10^{-9}$ Кл/Гр. Сравнением с чувствительностью ВЭД-2-03 для чувствительности ВЭД-2-02 № 073 согласно (4) имеем $2,27 \cdot 10^{-9}$ Кл/Гр.

Различие результатов интегральной и компараторной калибровки для детектора ВЭД-2-02 № 073 составляет 1,044, или $\sim 4,2$ %. Значимость наблюдаемого расхождения однозначно оценить затруднительно ввиду целого ряда обстоятельств: единичности проведенного компараторного измерения; различия габаритных размеров модификаций 02 и 03 детекторов ВЭД-2; асимметричности позиционного положения ВЭД-2 № 073 относительно детекторов ВЭД-2 № 072 и № 093; фактически оценочного характера интегральной калибровки детектора ВЭД-2-02 № 073. Допустимо, однако, констатировать, что при абсолютной погрешности меры ± 15 % относительная погрешность компараторно установленной чувствительности ~ 4 % в единичном измерении может рассматриваться как практически вполне приемлемая для детектора, используемого в измерениях с допустимой погрешностью ± 20 % в достаточно широком круге прикладных задач, которые решаются с применением реакторных полей нагружения.

Выборка из трех значений компараторно установленной чувствительности для детектора ВЭД-2-03, совпадающего по модификации с детектором, используемым в качестве меры, определяет среднее равным $4,25 \cdot 10^{-9}$ Кл/Гр с погрешностью $\pm 0,57$ % в доверительном интервале $P = 0,95$. Полученный результат однозначно свидетельствует о фактическом совпадении результатов компараторной и интегральной калибровок чувствительности для детектора ВЭД-2-03 № 093 вне зависимости как от реализационного типа энергопуска (стационарный или квазиимпульсный), так и от количественной совокупности одновременно устанавливаемых детекторов от одного до трех.

Заключение

Несмотря на относительно небольшой объем экспериментальных исследований, осуществленных в интересах изучения возможностей и перспектив практического освоения компараторного варианта калибровки детекторов мощности γ -дозы с использованием специализированного гамма-источника реактора БР-К1, полученные результаты вполне позволяют сформулировать ряд практически значимых выводов.

Однозначно можно утверждать, что использованный аппаратный комплекс из четырех широ-

кодиапазонных измерительных каналов малых токов, методически дополненный организацией канала контроля мощности реактора на одном из токовых каналов и расчетным формализмом мощности дозы в рабочем пространстве СГИ стандартной конфигурации (конфигурации проведения интегральной калибровки), представляет собой вполне надежный инструмент для разработки на его базе методики компараторной калибровки детекторов мощности γ -дозы, ориентированных на использование в полях реакторных излучений.

Бесспорным представляется реализация в качестве основного варианта с размещением в рабочем пространстве СГИ двух однотипных детекторов, один из которых принимается в качестве меры. Вариант с размещением двух разнотипных детекторов, а также трех детекторов любого типа, допустимо рассматривать как перспективный, но требующий дополнительных исследований и конкретизации уровня допустимой относительной погрешности в контексте с ориентационной областью дальнейшего применения.

Установленная адекватность использования в компараторном варианте калибровки энергопусков стационарного и квазиимпульсного типа позволяет как минимум на порядок расширить доступный калибровке диапазон чувствительности детекторов (до 10^{-10} Кл/Гр) за счет увеличения уровня максимальной мощности и уменьшения периода разгона в энергопуске квазиимпульсного типа при максимальном использовании регламентационной величины полного энерговыделения $1 \cdot 10^{18}$ дел.А3.

Список литературы

1. Генералова В. В., Жанжора А. П., Кошелев А. С., Нарожный А. Т. Специализированный источник гамма-излучения, пространственно совмещенный с моделирующим опорным полем нейтронов МОП-К2 // Измерительная техника, 2010, № 1, с. 24–27.
2. Кошелев А. С., Хоружий В. Х. Пространственные, спектральные и временные характеристики специализированного гамма-источника реактора БР-К1 // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2010, вып. 2, с. 61–68.
3. Васильев Р. Д. Основы метрологии нейтронного излучения. – Москва: Атомиздат, 1972.

4. Чукляев С. В., Грудский М. Я., Артемьев В. А. Вторично-эмиссионные детекторы ионизирующих излучений. – Москва: Энергоатомиздат, 1995.

5. Кошелев А. С., Хоружий В. Х. Прецизионные особенности реализации поглощенной дозы от запаздывающих гамма-квантов в поле специализированного гамма-источника реактора БР-К1 // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2009, вып. 1, с. 28–35.

6. Петров Ю. И. Гамма-излучение осколков U^{235} и Pu^{239} // Атомная энергия, 1959, т. 7, вып. 2, с. 168–171.

7. Крылов В. И. Приближенное вычисление интегралов. – Москва: Наука, 1967.

Контактная информация –
Кошелев Александр Сергеевич

тел.: (83130)3-06-87,
e-mail: otd4@expd.vniief.ru

Статья поступила в редакцию 19.07.2011.

Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 2011, вып. 3, с. 10–18.