

## ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ КНК-2-8М

А. С. Кошелев<sup>1</sup>, Л. Е. Довбыш<sup>1</sup>, М. А. Овчинников<sup>1</sup>, Г. Н. Пикулина<sup>1</sup>, Ю. М. Дроздов<sup>1</sup>,  
С. В. Чукляев<sup>2</sup>, Ю. Н. Пепёлышев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

<sup>2</sup>АНО «НИИ технологии материалов», г. Москва

<sup>3</sup>Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна Московской обл.

Дано краткое описание конструкции детектора быстрых нейтронов КНК-2-8М. Представлены результаты изучения детектора в режимах счета импульсов от деления ядер  $^{238}\text{U}$  в радиаторе нейтронно-чувствительной секции и токовом с разделением секционных токов функциональных секций. Рассмотрены возможности определения эффективного числа ядер  $^{238}\text{U}$  в радиаторе нейтронно-чувствительной секции.

Диагностические возможности детектора в счетном режиме продемонстрированы на примере анализа справочных данных по характеристикам нейтронных полей в рабочем зале реактора БР-1. Диагностические возможности детектора в токовом режиме работы продемонстрированы на примере результатов измерения интенсивности делений  $^{238}\text{U}$  в энергетических пусках реактора БР-К1, осуществленных в режиме генерирования импульсов деления на запаздывающих нейтронах, при размещении детектора во внутризонной полости реактора в условиях масштабного варьирования поля реакторных излучений.

**Ключевые слова:** газонаполненный детектор деления  $^{238}\text{U}$ , поле реакторных излучений, счетно-токовый режим работы детектора, коррекция просчетов, аппаратурно-программный регистрационный комплекс.

**HIGH-SENSITIVITY FAST NEUTRON DETECTOR KНК-2-8M / A. S. KOSHELEV, L. Ye. DOVBYSH, M. A. OVCHINNIKOV, G. N. PIKULINA, Yu. M. DROZDOV, S. V. CHUKLYAEV, Yu. N. PEPYOLYSHEV** // There is given a brief design description of KНК-2-8M detector of fast neutrons.

There are presented the results of detector studies in the mode of counting pulses of  $^{238}\text{U}$  nuclei fission in a radiator of a neutron-sensitive section and in the current mode when sectional currents of functional sections are separated. There are considered the determination possibilities of the effective number of  $^{238}\text{U}$  nuclei. The detector diagnostic capabilities in the count mode are demonstrated by the example of reference data analysis performed on the base of the characteristics of neutron fields in the working hall of BR-1 nuclear reactor. The detector diagnostic capabilities in the current mode are illustrated by the results of  $^{238}\text{U}$  fission rate measurements. These data were obtained during BR-K1 nuclear reactor power startups implemented in the mode of generating fission pulses on delayed neutrons at the detector arrangement inside the zone cavity of the nuclear reactor under a wide variation of nuclear radiation fields.

**Keywords:** gas-filled detector of  $^{238}\text{U}$  fission, nuclear reactor radiation field, count-current operating mode of detector, count adjustment, hardware-software registration system.

Для решения методических и прикладных задач спектрального диагностирования и текущего мониторинга полей быстрых нейтронов ядерно-физических установок, ис-

пользуемых для изучения радиационной стойкости элементов и систем радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), в практике работ исследовательского и прикладного характера не утра-

чен интерес к применению газонаполненных ионизационных камер с пороговыми изотопами деления  $^{237}\text{Np}$  (пороговая энергия  $E_{\text{эф}} = 0,55 \text{ МэВ}$  [1]) и  $^{238}\text{U}$  (пороговая энергия  $E_{\text{эф}} = 1,5 \text{ МэВ}$  [1]). Специализированная камера КНК-2-7М с изотопом деления  $^{237}\text{Np}$  была нами изучена ранее, результаты опубликованы в работе [2]. В настоящей статье представлены результаты изучения специализированной камеры КНК-2-8М, конструктивно идентичной камере КНК-2-7М, но с изотопом деления  $^{238}\text{U}$ .

Газонаполненная ионизационная камера КНК-2-8М построена по схеме вакуумированной камеры деления КНК-2 [3] с использованием ее комплектующих. Камера представляет собой систему изготовленных из аустенитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т трех независимых мультиэлементных электродов, размещенных в цилиндрическом корпусе из того же материала с толщиной стенки 0,8 мм. Конструктивно каждый электрод представляет собой набор дисков диаметром 44 мм и толщиной 0,4 мм, закрепленных на трех металлических рейках. Рейки одноименного электрода объединены электрически и подключены к проходному электровводу в крышке корпуса камеры, изготовленному из спая корундовой керамики с коваром. Рейки изолированы от корпуса с помощью опорных изоляторов из высокоглинистой керамики марки ВК 100-2, установленных в специальных гнездах во фланцах.

Отверстия в рейках расположены таким образом, что между соседними дисками разноименных электродных наборов образуется

зазор  $\sim 1,6 \text{ мм}$ , а каждый диск так называемого сигнального, общего для функциональных секций электрода (наружная маркировка электроввода «0»), оказывается размещенным между дисками двух специализированных электродов, образующих с сигнальным электродом две секции. На поверхности дисков сигнального электрода, обращенные к дискам электрода с наружной маркировкой электроввода «+», нанесен слой оксида диоксида  $^{238}\text{U}$  (с примесным содержанием других изотопов урана не более 0,001 %) толщиной  $2,3 \text{ мг/см}^2$ . Эта секция чувствительна как к нейтронам, так и к  $\gamma$ -квантам. На обращенных друг к другу поверхностях дисков сигнального электрода и электрода с наружной маркировкой электроввода «-» нейтронно-чувствительное покрытие отсутствует, что позволяет рассматривать эту секцию как исключительно  $\gamma$ -чувствительную.

Общее количество дисков в электродном пространстве – 41, из них 20 формируют общий для обеих функциональных секций электрод, 11 – специализированный электрод  $\gamma$ -секции, 10 – специализированный электрод нейтронной секции. Общая длина пакета электродных дисков составляет 80 мм; расстояние эффективного центра детектора (центра электродного пакета) от внешней торцевой поверхности – 54 мм. Камера заполнена трехкомпонентной газовой смесью до внутреннего давления 0,45 МПа. Использовали следующий состав газовой смеси (в объемных процентах): аргон – 96,6 %, гелий – 0,2 %, азот – 0,2 %. Конструктивная компоновка КНК-2-8М представлена на рис. 1.

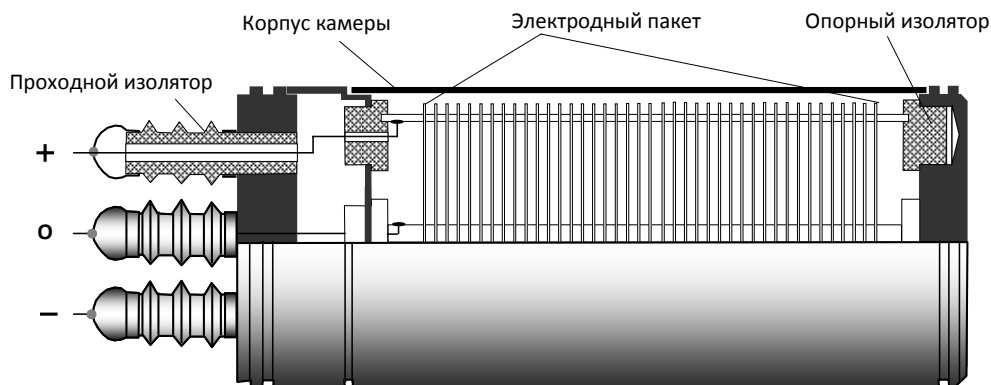


Рис. 1. Схема конструктивной компоновки камеры деления КНК-2-8М

Для проведения исследований в распоряжении авторов имелся один детектор КНК-2-8М ограниченного промышленного изготовления с заводским номером № 001.

С ориентацией на конкретные практические применения в измерениях исследовательского и прикладного характера в качестве основной схемы включения детектора КНК-2-8М была использована комбинированная схема, обеспечивающая непрерывный счетно-токовый режим с отдельной регистрацией токовых откликов функциональных секций. Принципиально-структурная версия схемы включения КНК-2-8М представлена на рис. 2.

Ключевым функциональным элементом схемы является блок согласования БС (запатентованная авторская разработка [4]). Он обладает высокой радиационной стойкостью и обеспечивает надежную передачу импульсного сигнала нейтронной секции КНК-2-8М по радиочастотной кабельной линии длиной до 15 м за биологическую защиту реакторного зала. Одновременно осуществляемая непосредственная подача однополярного напряжения питания положительной полярности на сигнальный (собирающий) электрод с маркировкой «0», успешно использованная ранее (см., например, [5]), обеспечивает возмож-

ность независимой регистрации токов функциональных секций. Наличие высокоомных сопротивлений на входе подачи напряжения питания ограничивает верхний регистрационный уровень секционного тока  $\sim 10^{-5}$  А.

Для регистрации показаний детектора КНК-2-8М (один счетный регистрационный тракт, два токовых регистрационных тракта) синхронно с измерением мощности реактора (два токовых регистрационных тракта автономного канала контроля мощности реактора) был использован аппаратно-программный комплекс с четырьмя измерительными модулями токовой камеры ИМТК, аналогичный представленному в [2], с включением в его состав измерительного модуля счетчика нейтронов ИМСН. Все использованные измерительные модули сертифицированы. Комплектационная схема аппаратуры для регистрации счетно-токового отклика детектора КНК-2-8М представлена на рис. 3.

Основные функциональные возможности управляющего комплексом программного обеспечения таковы:

- синхронный запуск всех запланированных для использования измерительных модулей с фиксированной дискретизацией шкалы времени регистрации (варьируется от 0,1 до 1 с;

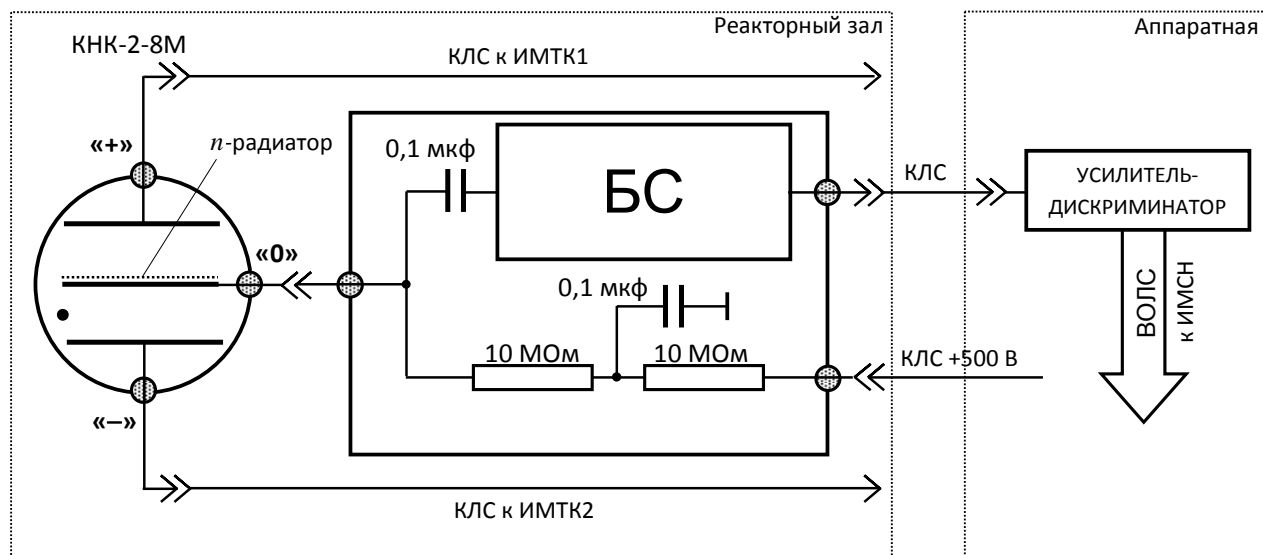


Рис. 2. Принципиальная схема комбинированной регистрации счетного и токового откликов КНК-2-8М: БС – блок согласования, ИМТК – измерительный модуль токовой камеры, ИМСН – измерительный модуль счетчика нейтронов, КЛС – кабельная линия связи, ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи

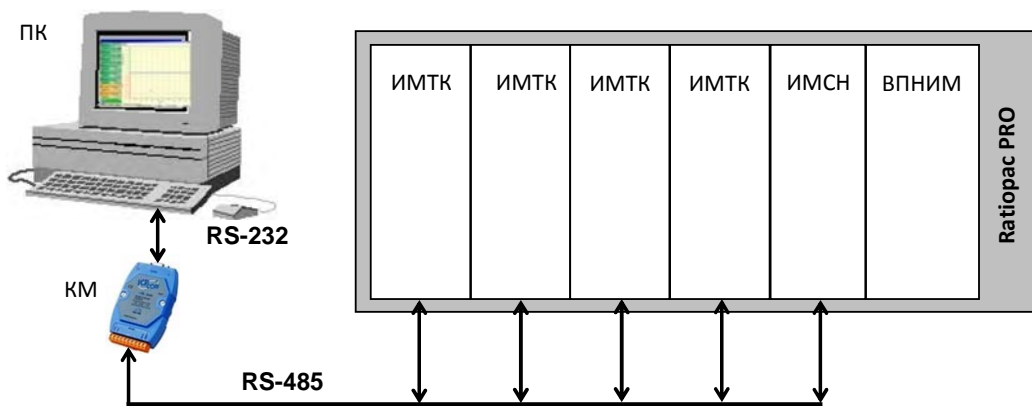


Рис. 3. Комплектационная схема аппаратуры для регистрации счетно-токового отклика детектора КНК-2-8М: ПК – персональный компьютер, КМ – коммутирующий модуль, ИМТК – измерительный модуль токовой камеры, ИМСН – измерительный модуль счетчика нейтронов, ВПНИМ – выпрямитель питающих напряжений измерительных модулей

в проведенной серии измерений использовалась только дискрета 1 с); длительность регистрационного цикла практически не ограничена;

- непосредственная регистрация фактической интенсивности импульсов на входе ИМСН с параллельно формируемым результатом ее коррекции в заранее заданной форме;

- непосредственная регистрация фактического тока на входе ИМТК с параллельно формируемой выборкой последовательного суммирования токовых показаний (зарядовый отклик детектора); фактически можно говорить об одновременной реализации как дифференциальной формы регистрации (*current value measurement*, или *svm*-режим), так и ее интегральной формы (*integral value measurement*, или *ivm*-режим);

- полномасштабное архивирование как первичных (без обработки) данных, так и их частично преобразованных в заранее заданной форме версий; такая форма архивирования допускает непосредственное практическое использование программно отформатированных данных (при удачном выборе форм преобразования первичных данных) и поиск форм более корректного форматирования;

- графическая визуализация фактически измеряемых величин в масштабе реального времени.

Процедура определения дискриминационной характеристики детектора в счетном режиме работы была организована следующим образом:

- вывод реактора на стационарный уровень мощности  $P_f \sim 1,5 \cdot 10^{11}$  дел. АЗ; контроль и оперативная коррекция уровня стационара в границах вариативности не более  $\pm 5\%$  от среднего;

- пошаговое изменение напряжения дискриминации  $U_d$  от 200 до 1000 мВ (от 200 до 600 мВ шаг  $\Delta U_d$  20 мВ, от 600 до 1000 мВ шаг 40 мВ) с выдержкой не менее 2 мин на каждом зафиксированном  $U_d$ ;

- нормализация регистрационного файла  $N(t_i)$  с учетом фактического изменения мощности реактора в интервале регистрации и коррекции на просчеты (выбор формализма коррекции был осуществлен по результатам отдельного специального эксперимента).

Дискриминационная характеристика для КНК-2-8М № 001 представлена на рис. 4. Для определения численных значений нормализованной интенсивности отсчетов было использовано соотношение  ${}^*N_{f\tau} = 10^9 N / P_f (1 - \tau N)$ , где  $10^9$  – коэффициент масштаба,  $N$  – фактическая интенсивность отсчетов,  $P_f$  – соответствующая  $N$  мощность реактора,  $\tau = 3,25 \cdot 10^{-6}$  с – параметр коррекции просчетов.

Пошаговый наклон дискриминационной характеристики определялся (в %) по отношению

$$S = \frac{100 \left[ {}^*N_{f\tau}(U_d) - {}^*N_{f\tau}(U_d + \Delta U_d) \right]}{\left\{ \Delta U_d \left[ {}^*N_{f\tau}(U_d) + U_{f\tau}(U_d + \Delta U_d) \right] / 2 \right\}}.$$

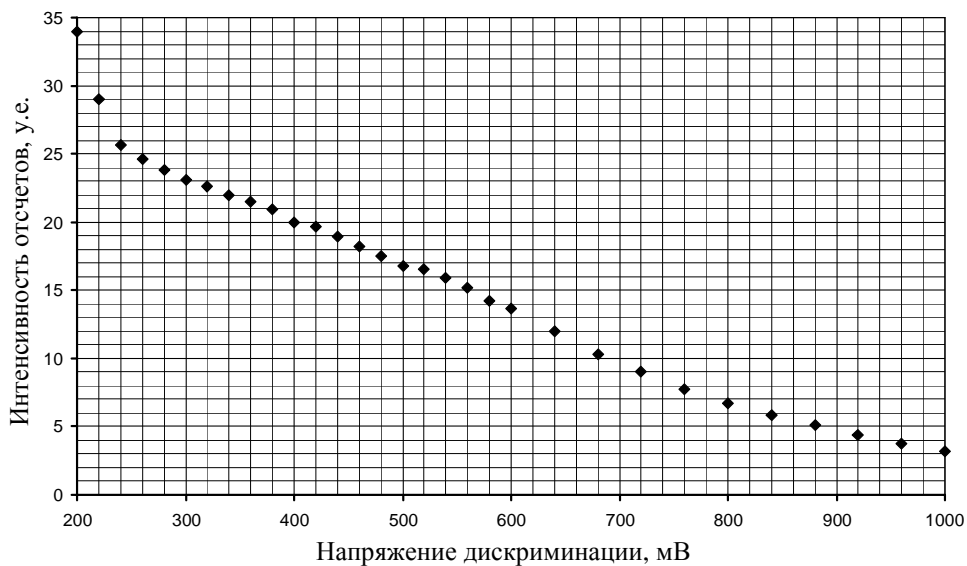


Рис. 4. Дискриминационная характеристика КНК-2-8М

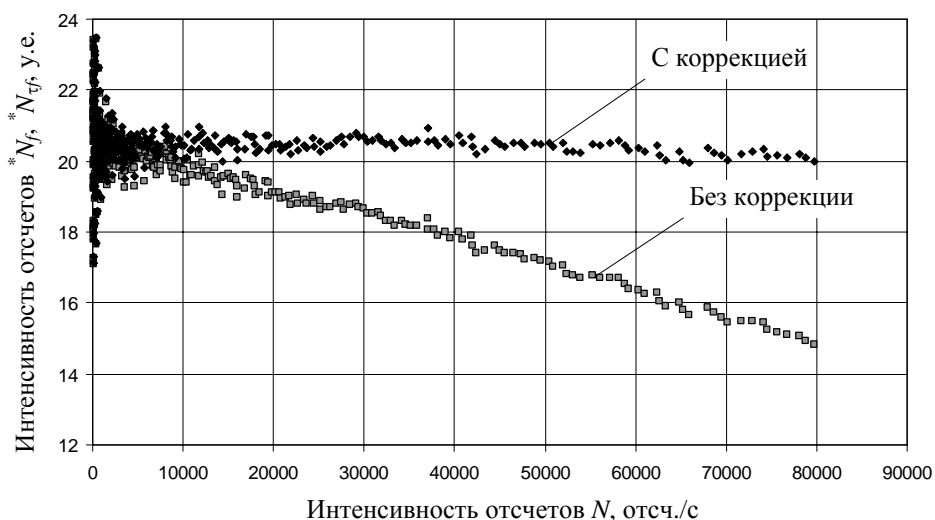


Рис. 5. Просчеты и их корректировка

Выбранному в качестве рабочего значению  $U_d = 400$  мВ соответствует значение  $S$ , равное 0,14 % на мВ.

Для конкретизации формализма коррекции просчетов был осуществлен специализированный энергопуск реактора, в котором на асимптотическом периоде разгона реактора  $\sim 40$  с был достигнут уровень фактически реализуемой интенсивности  $\sim 150000$  отсч./с. Установлено, что до фактической интенсивности  $\sim 80000$  отсч./с хороший уровень коррекции (вариативность вокруг среднего  $*N_{ft} = 20,45$  у.е. в интервале доверительной вероятности  $P = 0,95$  не превышает 1,5 % при изменении интенсивности отсчетов от 10000

до 80000 отсч./с) достигается в рамках формализма с одним корректирующим параметром  $\tau = 3,25 \cdot 10^{-6}$  с в виде  $K(N) = 1/(1 - \tau N)$ . Продолжение вышеуказанного уровня коррекции до  $N \approx 120000$  отсч./с достижимо при использовании двухпараметрического формализма коррекции  $K(N) = 1 / (1 - \tau_1 N - \tau_2^2 N^2)$  при  $\tau_1 = 2,8 \cdot 10^{-6}$  с и  $\tau_2 = 3,0 \cdot 10^{-6}$  с.

Возможности однопараметрической коррекции иллюстрируют данные, представленные на рис. 5. По определению в отсутствие искажающих факторов в измеряемых величинах  $N$  и  $P_f$  должно выполняться равенство  $N/P_f = \text{const}$ . Из рис. 5 следует, что при отсут-

ствии коррекции на просчеты имеет место уменьшение отношения регистрируемой интенсивности отсчетов (в нормализованном формате  $*N_f = 10^9 \cdot N/P_f$ ) к мощности реактора, достигающее  $\sim 25\%$  при  $N \approx 80000$  отсч./с. При введении коррекции имеем  $*N_f/P_f = \text{const}$  до интенсивности отсчетов  $N \approx 80000$  отсч./с (с учетом коррекции фактическое смещение корректно регистрируемой интенсивности отсчетов КНК-2-8М до  $\sim 110000$  отсч./с).

Для определения (оценки) числа эффективных ядер при  $U_d = 400$  мВ детектор КНК-2-8М устанавливался в пустом контейнере горизонтальной загрузки (КГЗ) во внутризонную облучательную полость БР-К1 в позицию, обеспечивающую совмещение центра чувствительности детектора с координатой  $z = 6$  см по центральной осевой от внутренней торцевой поверхности КГЗ. Параметры поля реакторных излучений в данной конфигурации загрузки, именуемой далее КГЗ-П, представлены в [6, 7].

Согласно [7], одному делению в активной зоне (АЗ) реактора БР-К1 в позиции  $z = 6$  см соответствуют  $3,58 \cdot 10^{-29}$  делений  $^{238}\text{U}$ . Принимая указанное значение в качестве среднего по чувствительной области КНК-2-8М, по отношению откорректированной интенсивности отсчетов при  $U_d = 400$  мВ и соответствующей ей мощности реактора эффективное число ядер для детектора КНК-2-8М № 001 определено равным  $5,73 \cdot 10^{20}$  ( $226,4$  мг  $^{238}\text{U}$ ).

Именно столь значительное эффективное количество ядер  $^{238}\text{U}$  в исследованном детекторе КНК-2-8М позволяет рассматривать его как высокочувствительный детектор быстрых нейтронов. Например, согласно [8], табл. 4, в рабочем зале реактора БР-1М на 7,7 м от центра АЗ интегральный отклик реакции деления  $^{238}\text{U}(n, f)$  имеет значение  $6,31 \cdot 10^{-32}$  реакций/ядро-дел.АЗ. Соответственно при работе реактора БР-1М на мощности  $\sim 100$  Вт ( $\sim 3,3 \cdot 10^{12}$  дел.АЗ/с) интенсивность отсчетов детектора КНК-2-8М № 001 при его размещении на указанной позиции будет составлять  $\sim 120$  отсч./с, что обеспечивает уверенный текущий контроль интенсивности флюенса быстрых нейтронов в условиях работы реак-

тора существенно ниже эксплуатационно разрешенного уровня неограниченной работы в статическом режиме 3 кВт. Численное значение интенсивности флюенса нейтронов с энергией выше 1,5 МэВ при мощности реактора  $\sim 100$  Вт на расстоянии 7,7 м от центра АЗ реактора БР-1М, оцененное с использованием спектральных характеристик из [7], получено равным  $\sim 3,5 \cdot 10^5$  нейтр./см<sup>2</sup>·с.

Изучение особенностей работы детектора КНК-2-8М в токовом режиме было организовано и осуществлено с использованием масштабно варьируемых полей излучений во внутризонной облучательной полости реактора БР-К1 [6]. В качестве основного принималось конкретизированное ранее по тексту поле излучений КГЗ-П. Свинцовый трансформер (фильтр) позволяет в  $\sim 5$  раз уменьшить  $\gamma$ -дозу при существенно меньшем влиянии на флюенс нейтронов относительно КГЗ-П. Дальнейшее обозначение поля – КГЗ-СФ. Изучение особенностей работы КНК-2-8М в поле КГЗ-НГК, с учетом результатов, полученных для детектора КНК-2-7М [2], не проводилось. Существенные для оценки диагностических возможностей КНК-2-8М при работе детектора в токовом режиме характеристики полей излучений КГЗ-П и КГЗ-СФ представлены в табл. 1.

В работе [9] показано, что процессы токообразования в газонаполненных ионизационных камерах, выполненных по двухсекционной схеме с размещением обеих функциональных секций в общем газовом объеме, имеют сложную физическую структуру, включающую в себя формирование собственно функционального тока (обусловленного воздействием нейтронов и  $\gamma$ -квантов на нейтронную секцию и воздействием  $\gamma$ -квантов на  $\gamma$ -секцию); токоперераспределение между функциональными секциями из-за их недостаточной пространственной локализации (подверженное вариативности не только у камер разного типа, но и для однотипных камер); формирование фоновых токов, обусловленных наличием внутренних сторонних излучений, постоянных в случае продуктов  $\alpha$ -распада и переменных в результате формирования продуктов распада осколочного происхождения

для камер с радиаторами из делящихся материалов. В разной степени значимости сказанное имеет место при использовании детектора КНК-2-8М в токовом режиме работы.

Измеренные в процессе работы с детектором КНК-2-8М № 001 фоновые секционные токи имели следующие значения:

– усредненный ток нейтронной секции  $I_{\text{нс}} = 2,54 \cdot 10^{-11}$  А; вариативность в течение рабочего дня  $\sim 3$  % (от  $2,46 \cdot 10^{-11}$  А до  $2,62 \cdot 10^{-11}$  А);

– усредненный ток  $\gamma$ -секции  $I_{\gamma} = 3,5 \cdot 10^{-12}$  А; вариативность в течение рабочего дня значительная, до  $\sim 60$  % (от  $1,5 \cdot 10^{-12}$  А до  $5,5 \cdot 10^{-12}$  А);

– отношение усредненных секционных токов  $I_{\text{нс}}/I_{\gamma} = 7,2$ .

С одной стороны, семикратное превышение тока нейтронной секции над током  $\gamma$ -секции может свидетельствовать о некотором выходе заряженных частиц ( $\alpha$ -частиц примесных изотопов урана или заряженных частиц осколочной активности от взаимодействия ядер  $^{238}\text{U}$  с нейтронами в процессе изучения КНК-2-8М). С другой стороны, численные значения токов лежат в области фоновых значений токов измерительных трактов ИМТК. В целом, зафиксированный уровень фоновых составляющих токов функциональных секций не должен значимо повлиять на диагностические возможности КНК-2-8М как детектора быстрых нейтронов.

Для конкретизации диагностических возможностей КНК-2-8М как детектора быстрых нейтронов при работе в токовом режиме были запланированы и осуществлены два энергопуска реактора в следующей редакции:

– энергопуск статического характера при размещении КНК-2-8М в КГЗ-П; длительность выдержки на стационарной мощности  $\sim 1000$  с (режим, позволяющий конкретизировать интегральную  $\gamma$ -дозу за пуск); планируемая стационарная мощность  $\sim 3 \cdot 10^{14}$  дел.АЗ/с, полное энерговыделение за пуск  $\sim 3 \cdot 10^{17}$  дел.АЗ;

– энергопуск статического характера при размещении КНК-2-8М в КГЗ-СФ; длительность выдержки на стационарной мощности  $\sim 1000$  с; планируемая стационарная мощность

$\sim 6 \cdot 10^{14}$  дел.АЗ/с, полное энерговыделение за пуск  $\sim 6 \cdot 10^{17}$  дел.АЗ;

– в каждом энергопуске обязательный контроль мощности реактора по текущим показаниям автономного канала контроля мощности реактора (АККМ) с газонаполненной компенсационной камерой КНК-4 в качестве детектора нейтронов и итогового энерговыделения за пуск по интегральным показаниям АККМ и штатных никелевых мониторов реактора.

Токограммы, полученные для детектора КНК-2-8М № 001 в специализированных энергопусках реактора БР-К1, представлены на рис. 6.

Из токограммы рис. 6,а следует:

– на стадии подготовки, непосредственно (за  $\sim 100$  с) перед выводом реактора на период разгона  $\sim 43$  с,  $I_{\text{нс}} = 5,43 \cdot 10^{-11}$  А,  $I_{\gamma} = 3,46 \cdot 10^{-11}$  А,  $I_{\text{нс}}/I_{\gamma} = 1,57$ ; увеличение  $I_{\text{нс}}$  относительно фонового значения секционного тока в  $\sim 2$  раза, а  $I_{\gamma}$  в  $\sim 8$  раз однозначно связано с высоким уровнем осколочного  $\gamma$ -фона делящихся материалов активной зоны реактора;

– на участке асимптотического разгона реактора (в интервале от 300 до 700 с) при изменении  $I_{\text{нс}}$  от  $4,96 \cdot 10^{-10}$  А до  $3,56 \cdot 10^{-6}$  А и  $I_{\gamma}$  от  $3,26 \cdot 10^{-10}$  А до  $2,47 \cdot 10^{-6}$  А для  $I_{\text{нс}}/I_{\gamma}$  имеем изменение от 1,52 до 1,44;

– на участке стационарной мощности (в интервале от 750 до 1750 с)  $I_{\text{нс}}$  слабо возрастает от  $4,41 \cdot 10^{-6}$  А до  $4,65 \cdot 10^{-6}$  А (5,4 %),  $I_{\gamma}$  – от  $3,11 \cdot 10^{-6}$  А до  $3,37 \cdot 10^{-6}$  А (7,7 %), а  $I_{\text{нс}}/I_{\gamma}$  уменьшается от 1,42 до 1,38 (2,9 %);

– на участке промежуточного снижения мощности путем быстрого перевода реактора в подкритическое состояние  $\sim -1,3 \beta_{\text{эф}}$  (в интервале от 2000 до 2600 с), в условиях значительного снижения нейтронной компоненты делений при сохранении высокого уровня запаздывающей  $\gamma$ -активности продуктов деления в активной зоне реактора, наблюдается выраженное превышение тока  $\gamma$ -секции над током нейтронной секции; при уменьшении  $I_{\text{нс}}$  от  $1,02 \cdot 10^{-7}$  А до  $4,90 \cdot 10^{-8}$  А и  $I_{\gamma}$  от  $1,10 \cdot 10^{-7}$  А до  $5,21 \cdot 10^{-8}$  А отношение секционных токов  $I_{\text{нс}}/I_{\gamma}$  практически не меняется (0,93 на мо-

мент времени энергопуска 2000 с и 0,94 на момент времени энергопуска 2600 с);

– на участке полного заглушения реактора до состояния  $-18\beta_{эф}$  (в интервале от 3100 до 3500 с) при снижении  $I_{нс}$  от  $5,99 \cdot 10^{-10}$  А до  $5,15 \cdot 10^{-10}$  А и  $I_{\gammaс}$  от  $3,09 \cdot 10^{-10}$  А до  $2,65 \cdot 10^{-10}$  А отношение секционных токов  $I_{нс}/I_{\gammaс}$  не меняется и равно 1,94.

Из вышеприведенного анализа токограммы КНК-2-8М в поле  $n$ - $\gamma$ -излучений КГЗ-П следует:

– порядка 40 % тока нейтронной секции КНК-2-8М обусловлено нейтронной компонентой поля излучений в КГЗ-П; вклад от

нейтронов в суммарный токовый отклик, с одной стороны, достаточно велик для надежного диагностирования нейтронной компоненты поля на фоне сопутствующего  $\gamma$ -излучения; с другой стороны, различие токовых откликов обеих функциональных секций не настолько велико, чтобы процессы межсекционного токоперераспределения оказывали на них значимое влияние;

– возможное присутствие повышенного внутреннего фона нейтронной секции фактически перестает влиять на токовый отклик данной секции с уровня измеряемого тока  $10^{-9}$  А и выше;

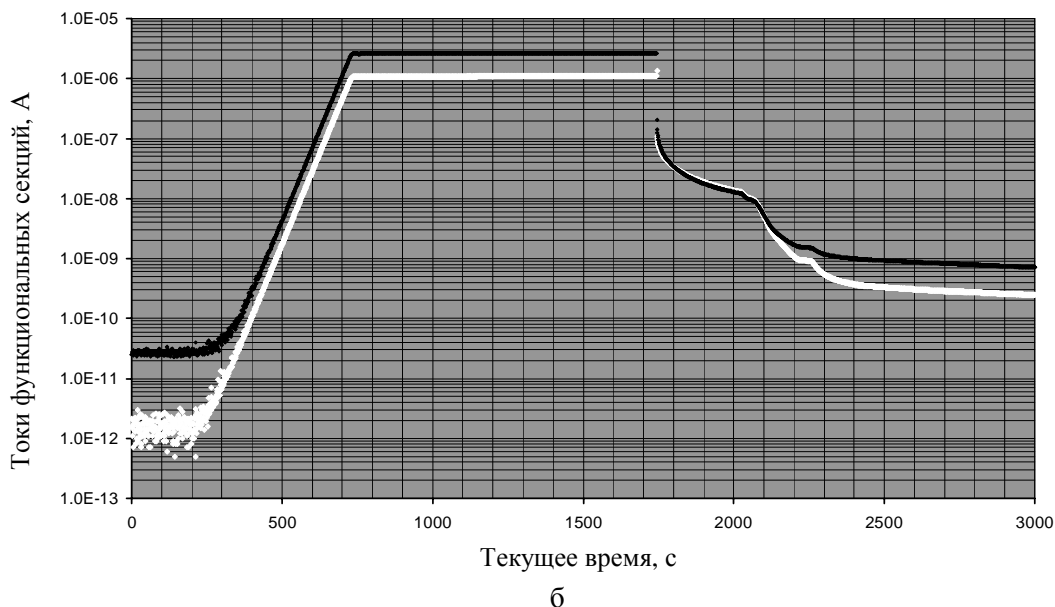
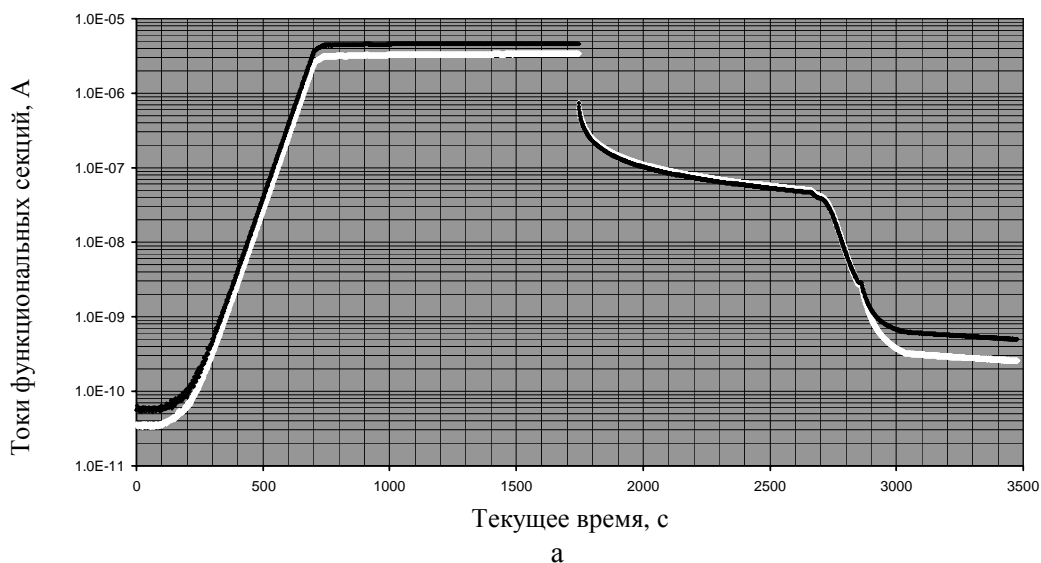


Рис. 6. Секционные токи КНК-2-8М при измерениях в КГЗ-П (а) и КГЗ-СФ (б):  $n$ -секция – черным,  $\gamma$ -секция – белым



– чувствительность  $\gamma$ -секции к  $\gamma$ -компоненте поля излучений в КГЗ-П на  $\sim 7\%$  больше таковой для нейтронной секции.

Выявленные особенности воздействия  $\gamma$ -компоненты реакторного поля излучений на функциональные токи КНК-2-8М обусловили целесообразность определения чувствительности  $\gamma$ -секции к реакторному  $\gamma$ -излучению. Соответствующая градуировка была осуществлена компараторным методом в рабочей области специализированного гамма-источника (СГИ) реактора БР-К1, сформированного в КГЗ-П. В качестве средства градуировки использовался детектор КГК-2 с учетом изложенного в [10–12]. Искомое значение чувствительности  $\gamma$ -секции КНК-2-8М № 001 получено равным  $1,82 \cdot 10^{-5}$  Кл/Гр.

Из токограммы рис. 6,б следует:

– на стадии подготовки, непосредственно (за  $\sim 100$  с) перед выводом реактора на период разгона  $\sim 35$  с,  $I_{\text{нс}} = 2,70 \cdot 10^{-11}$  А,  $I_{\gamma\text{с}} = 1,64 \cdot 10^{-12}$  А,  $I_{\text{нс}}/I_{\gamma\text{с}} = 16,5$ ;  $I_{\text{нс}}$  практически равен усредненному фоновому значению секционного тока,  $I_{\gamma\text{с}}$  в  $\sim 2$  раза меньше фонового значения секционного тока и находится в границах вариативности фоновой величины;

– на участке асимптотического разгона реактора (на интервале от 450 до 700 с) при изменении  $I_{\text{нс}}$  от  $1,26 \cdot 10^{-9}$  А до  $1,32 \cdot 10^{-6}$  А и  $I_{\gamma\text{с}}$  от  $5,04 \cdot 10^{-10}$  А до  $5,34 \cdot 10^{-7}$  А для  $I_{\text{нс}}/I_{\gamma\text{с}}$  имеем изменение от 2,50 до 2,47;

– на участке стационарной мощности (в интервале от 740 до 1740 с)  $I_{\text{нс}}$  слабо возрастает от  $2,65 \cdot 10^{-6}$  А до  $2,67 \cdot 10^{-6}$  А (0,8 %),  $I_{\gamma\text{с}}$  – от  $1,08 \cdot 10^{-7}$  А до  $1,11 \cdot 10^{-7}$  А (2,8 %), а  $I_{\text{нс}}/I_{\gamma\text{с}}$  уменьшается от 2,45 до 2,40 (2,1 %);

– на участке промежуточного снижения мощности путем быстрого перевода реактора в подкритическое состояние  $\sim -1,3\beta_{\text{эф}}$  (в интервале от 1900 до 2000 с), в условиях значительного снижения нейтронной компоненты делений при сохранении высокого уровня запаздывающей  $\gamma$ -активности продуктов деления в активной зоне реактора, наблюдается выраженное превышение тока  $\gamma$ -секции над током нейтронной секции; при уменьшении  $I_{\text{нс}}$  от  $1,74 \cdot 10^{-8}$  А до  $1,28 \cdot 10^{-8}$  А и  $I_{\gamma\text{с}}$  от  $1,84 \cdot 10^{-8}$  А

до  $1,35 \cdot 10^{-8}$  А отношение секционных токов  $I_{\text{нс}}/I_{\gamma\text{с}}$  неизменно и равно 0,95;

– на участке полного заглушения реактора до состояния  $-18\beta_{\text{эф}}$  (в интервале от 2500 до 3000 с) при снижении  $I_{\text{нс}}$  от  $9,22 \cdot 10^{-10}$  А до  $7,11 \cdot 10^{-10}$  А и  $I_{\gamma\text{с}}$  от  $3,29 \cdot 10^{-10}$  А до  $2,48 \cdot 10^{-10}$  А отношение секционных токов  $I_{\text{нс}}/I_{\gamma\text{с}}$  также практически не меняется (2,80 на момент времени пуска 2500 с и 2,89 на момент времени пуска 3000 с).

Из вышеприведенного анализа токограммы КНК-2-8М в поле  $n$ - $\gamma$ -излучений КГЗ-СФ следует:

– порядка 60 % тока нейтронной секции КНК-2-8М обусловлено нейтронной компонентой поля излучений в КГЗ-СФ; вклад от нейтронов в суммарный токовый отклик, с одной стороны, достаточно велик для надежного диагностирования нейтронной компоненты поля на фоне сопутствующего  $\gamma$ -излучения; с другой стороны, различие токовых откликов обеих функциональных секций не настолько велико, чтобы процессы межсекционного токоперераспределения оказывали на них значимое влияние;

– возможное присутствие повышенного внутреннего фона нейтронной секции фактически перестает влиять на токовый отклик данной секции с уровня измеряемого тока  $10^{-9}$  А и выше;

– чувствительность  $\gamma$ -секции к  $\gamma$ -компоненте поля излучений в КГЗ-СФ на  $\sim 5\%$  больше таковой для нейтронной секции;

– изменение соотношения секционных токов в  $\sim 1,5$  раза (от 1,94 для КГК-П до 2,85 для КГЗ-СФ) в конце энергопуска однозначно свидетельствует о формировании внутреннего источника осколочной активности в нейтронной секции с эффектом воздействия, характерного для заряженных частиц: относительное увеличение тока нейтронной секции в отсутствие нейтронов при адекватном ослаблении осколочной  $\gamma$ -активности делящихся материалов активной зоны свинцовым фильтром возможно только при формировании внутри нейтронной секции дополнительного источника ионизирующих излучений, эффективно только во внутрисекционном пространстве.

Очевидная целесообразность использования КНК-2-8М как детектора быстрых нейтронов предопределяет приоритетность использования их в счетном режиме работы, дополняемом, при необходимости, переходом в токовый режим. Такая идеология использования детектора предполагает целесообразность (необходимость) сохранения размерности (или ее аналога) измеряемой величины при переходе из одного режима работы в другой. Конкретизация эффективного числа ядер  $^{238}\text{U}$  в детекторе позволяет непосредственно измерять интенсивность реакций (делений)  $^{238}\text{U}$  в единицах «реакц./с» в *свт*-режиме с очевидным переходом в *ivm*-режим для получения результата в единицах «реакц.».

Для сопоставимости результатов измерений в токовом (в единицах «А» или «Кл/с») и импульсном (в единицах «отсч./с», эквивалентных единицам «реакц./с») регистрационных форматах определим коэффициент преформатирования  $k_{nf}$  с использованием соотношения

$$N_{tf} = k_{tf} I_{nf},$$

где  $N_{tf}$  – интенсивность отсчетов КНК-2-8М (интенсивность реакций деления  $^{238}\text{U}$ ) в импульсном формате регистрации с корректировкой на просчеты и нормировкой на мощность реактора (интенсивность делений в активной зоне);  $I_{nf}$  – нейтронная составляющая тока в нормировке на мощность реактора  $P_f$ , определяемая по соотношению  $I_{nf} = (I_{nc} - I_{\gamma c}) / P_f$ ; размерность  $k_{nf}$  – «реакц./Кл».

Зависимость  $N_{tf}$  от порога дискриминации  $U_d$  очевидным образом предопределяет необходимость конкретизации  $k_{nf}$  для используе-

мого значения  $U_d$ . По совокупности измерений в КГЗ-П параметров  $N_{tf}$  с порогом дискриминации  $U_d = 400$  мВ и  $I_{nf}$  на участке стационарной мощности реактора численное значение  $k_{tf}$  определено равным  $4,68 \cdot 10^{12}$  реакц./Кл.

Оценки чувствительности КНК-2-8М как детектора нейтронов с энергетическим порогом 1,5 МэВ, осуществленные в импульсном формате регистрации (в формате счета импульсов от деления  $^{238}\text{U}$ ) по соотношению  $\varepsilon_N = n_{\text{эф}} A_U dt / dF_{1,5}$  ( $dF_{1,5}/dt$  – интенсивность флюенса нейтронов с энергиями выше 1,5 МэВ), а в токовом формате регистрации – по соотношению  $\varepsilon_I = \varepsilon_N / k_{nf}$ , при использовании  $n_{\text{эф}} = 5,73 \cdot 10^{20}$  ядер и параметров  $A_U$  и  $F_{1,5}$  для КГЗ-П и КГЗ-СФ из табл. 1, дали следующие результаты:

– в поле нейтронов КГЗ-П (средняя энергия 0,764 МэВ, доля нейтронов выше 1,5 МэВ 0,136)  $\varepsilon_N = 3,32 \cdot 10^{-4}$  реакц.·см<sup>2</sup>/нейтр. (отсч.·см<sup>2</sup>/нейтр.),  $\varepsilon_I = 7,10 \cdot 10^{-17}$  Кл·см<sup>2</sup>/нейтр.;

– в поле нейтронов КГЗ-СФ (средняя энергия 0,656 МэВ, доля нейтронов выше 1,5 МэВ 0,063)  $\varepsilon_N = 3,36 \cdot 10^{-4}$  реакц.·см<sup>2</sup>/нейтр. (отсч.·см<sup>2</sup>/нейтр.),  $\varepsilon_I = 7,18 \cdot 10^{-17}$  Кл·см<sup>2</sup>/нейтр.

Из приведенных значений оцененной чувствительности детектора КНК-2-8М следует:

– отсутствие различий численных значений чувствительности в полях нейтронов КГЗ-П и КГЗ-СФ;

– возможность надежной диагностики быстрых нейтронов с энергиями выше 1,5 МэВ при интенсивностях их флюенса от  $\sim 3 \cdot 10^4$  до  $\sim 3 \cdot 10^8$  нейтр./см<sup>2</sup>·с при использовании счетного режима работы КНК-2-8М;

Таблица 1

Избранные характеристики полей излучений КГЗ-П и КГЗ-СФ

Параметр	Поле излучений	
	КГЗ-П	КГЗ-СФ
Интегральный отклик реакции $^{238}\text{U}(n, f) A_U$ , реакц./ядро-дел.АЗ	3,58–29	2,00–29
Доза $\gamma$ -излучения (воздух) $D_\gamma$ , Гр/дел.АЗ	5,8–16	1,1–16
$A_U / D_\gamma$ , реакц./ядро-дел.АЗ·Гр	6,19–14	1,82–12
Флюенс нейтронов выше порога 1,5 МэВ $F_{1,5}$ , нейтр./см <sup>2</sup> ·дел.АЗ	6,17–5	3,41–5
$F_{1,5} / D_\gamma$ , нейтр./см <sup>2</sup> ·Гр	1,06+11	3,10+11

в полях реакторных установок исследовательской и прикладной ориентации ограничений по сопутствующему  $\gamma$ -излучению не возникает;

– возможность информативно-приемлемой диагностики быстрых нейтронов с энергиями выше 1,5 МэВ при интенсивностях их флюенса от  $\sim 10^8$  до  $\sim 10^{11}$  нейтр./см<sup>2</sup>·с (в интервале изменения тока нейтронной секции от  $\sim 10^{-8}$  до  $10^{-5}$  А) при использовании токового режима работы КНК-2-8М; в полях реакторных установок исследовательской и прикладной ориентации имеются ограничения по сопутствующему  $\gamma$ -излучению.

В целом исследованный вариант детектора быстрых нейтронов КНК-2-8М с использованием в качестве радиатора нейтронной секции материалов с высоким содержанием <sup>238</sup>U, разработанный и изготовленный на базе промышленно освоенных комплектующих, безусловно, представляет собой уникальный детектор с большими потенциальными возможностями для использования как в качестве комплектоформирующего интегрального детектора в спектрометрии нейтронного излучения реакторных установок методом интегральных детекторов [13], так и в качестве репрезентативного вспомогательного детектора нейтронов при определении и контроле флюенса и интенсивности флюенса быстрых нейтронов с энергиями выше 0,1 МэВ в работах прикладной ориентации [14].

### Список литературы

1. Брегадзе Ю. И., Степанов Э. К., Ярына В. П. Прикладная метрология ионизирующих излучений / Под ред. Ю. И. Брегадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990, 264 с.

2. Кошелев А. С., Довбыш Л. Е., Овчинников М. А. и др. Высококчувствительный детектор быстрых нейтронов КНК-2-7М // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2014, вып. 3, с. 83–93.

3. Чукляев С. В., Грудский М. Я., Артемьев В. А. Вторично-эмиссионные детекторы ионизирующих излучений. – М.: Энергоатомиздат, 1995, 368 с.

4. Пат. 2522708 РФ, G01T 3\00 (2006.01). Способ регистрации нейтронного потока ядерной установки в широком диапазоне измерений и устройство для его реализации / М. И. Овчинников, Ю. М. Дроздов, Л. Е. Довбыш, О. А. Голубева // Изобретения. Полезные модели. 2014. № 20.

5. Кошелев А. С., Овчинников М. А., Пикулина Г. Н. Особенности функционирования промышленных ионизационных камер в качестве детекторов контрольно-измерительной аппаратуры импульсных ядерных реакторов // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2012, вып. 3, с. 51–59.

6. Кошелев А. С., Маслов Г. Н., Одинцов Ю. М., Тарасова Е. Ю. Характеристики стационарного поля нейтронного и гамма-излучений во внутризонной облучательной полости реактора БР-К1 // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 1997, вып. 2, с. 3–13.

7. 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. Справочник / Под ред. В. Д. Севастьянова. – Менделеево: «ВНИИФТРИ», 2007. 654 с.

8. Кошелев А. С., Хоружий В. Х. Особенности формирования поля нейтронов в рабочем зале реактора с компактной активной зоной БР-1 (БР-1М) // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2014, вып. 3, с. 72–82.

9. Кошелев А. С., Хоружий В. Х., Овчинников М. А., Пикулина Г. Н. Особенности формирования секционных токов промышленных ионизационных камер КНК-4, КНК-53М и КНК-15-1 в реакторном поле нейтронов и гамма-квантов // Ядерная физика и инжиниринг, 2013, т. 4, № 12, с. 1–7.

10. Кошелев А. С., Хоружий В. Х., Овчинников М. А., Пикулина Г. Н. Возможности и перспективы развития компараторного варианта калибровки детекторов мощности гамма-излучения в поле специализированного гамма-источника реактора БР-К1 // Вопросы атомной

науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2011, вып. 3, с. 10–18.

11. 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.

12. Кошелев А. С., Довбыш Л. Е., Хоружий В. Х., Чуклеяев С. В. Детектор мощности гамма-излучения типа КГК-2 для диагностики полей излучений ядерных реакторов в диапазоне от 1 мкГр/с до 100 Гр/с // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2012, вып. 3, с. 43–50.

13. Севастьянов В. Д., Кошелев А. С. Методика восстановления спектров нейтронов ядерных реакторов и нейтронных генераторов КАСКАД-200(176). – М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2011, 17 с.

14. Кошелев А. С., Севастьянов В. Д. Эквивалентные нейтронные детекторы сопровождения для специализированных облучательных процедур // Атомная энергия, 1995, т. 79, вып. 4, с. 314–320.

Контактная информация –

Кошелев Александр Сергеевич,  
ведущий научный сотрудник ИЯРФ,  
РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
e-mail: [otd4@expd.vniief.ru](mailto:otd4@expd.vniief.ru)

Статья поступила в редакцию 25.05.2016.

Вопросы атомной науки и техники Сер. Физика ядерных реакторов, 2016, вып. 4, с. 104–115.