

УДК 539.1.074.8:621.039.571

## Высококочувствительный детектор быстрых нейтронов КНК-2-7М

А. С. Кошелев, Л. Е. Довбыш,  
М. А. Овчинников, Г. Н. Пикулина,  
Ю. М. Дроздов, С. В. Чукляев

*Дано краткое описание конструкции детектора быстрых нейтронов КНК-2-7М. Представлены результаты изучения детектора в режимах счета импульсов от деления ядер  $^{237}\text{Np}$  в радиаторе нейтронно-чувствительной секции и токовом, с разделением секционных токов функциональных секций. Рассмотрены возможности определения эффективно-го числа ядер  $^{237}\text{Np}$  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-1М, в токовом режиме – на примере результатов измерения интенсивности делений  $^{237}\text{Np}$  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.*

Сопоставление результатов изучения радиационной стойкости элементов и систем радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и интерпретация их для реальных условий применения РЭА невозможны без достаточно полного описания условий облучения объектов. Требования к нейтронным измерениям при радиационных испытаниях РЭА заданы нормативными документами: моделирующие установки должны быть аттестованы по спектру нейтронов в диапазоне энергии от 0,1 до 15 МэВ; для каждого облучения объекта должен определяться флюенс нейтронов с энергиями больше 0,1 МэВ с погрешностью не более 20 % [1].

Из [1] следует также, что:

– диапазон энергий выше 0,1 МэВ может быть отнесен к так называемым *быстрым нейтронам*, определяемым как нейтроны с энергией выше 0,5 МэВ;

– одним из эффективных способов измерения быстрых нейтронов является использование пороговых детекторов, в частности, детектора деления  $^{237}\text{Np}(n, f)$  с рекомендуемой пороговой энергией  $E_{\text{эф}} = 0,55$  МэВ;

– в качестве одного из методов перспективного практического применения детектора деления рассматривается *ионизационный метод*, заключающийся в измерении ионизационного эффекта, возникающего в веществе детектора под воздействием частиц из ядерной реакции взаимодействия нейтронов.

Детектор КНК-2-7М – это газонаполненная ионизационная камера, построенная по схеме (рис. 1) и с использованием комплектующих вакуумированной камеры деления КНВК-2 [2]. Камера представляет собой систему изготовленных из аустенитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т трех разноименных многослойных электродов, размещенных в цилиндрическом кор-

пусе из того же материала с толщиной стенки 0,8 мм. Каждый электрод – это набор дисков диаметром 44 мм и толщиной 0,4 мм, соединенных электрически и закрепленных на трех металлических рейках. Рейки каждого из электродов соединены токоведущими проводниками с отдельными электровводами, изготовленными из спая корундовой керамики с коваром и вваренными в крышку корпуса детектора. Рейки изолированы от корпуса с помощью опорных изоляторов из высокоглинистой керамики марки ВК 100-2, установленных в специальных гнездах во фланцах.

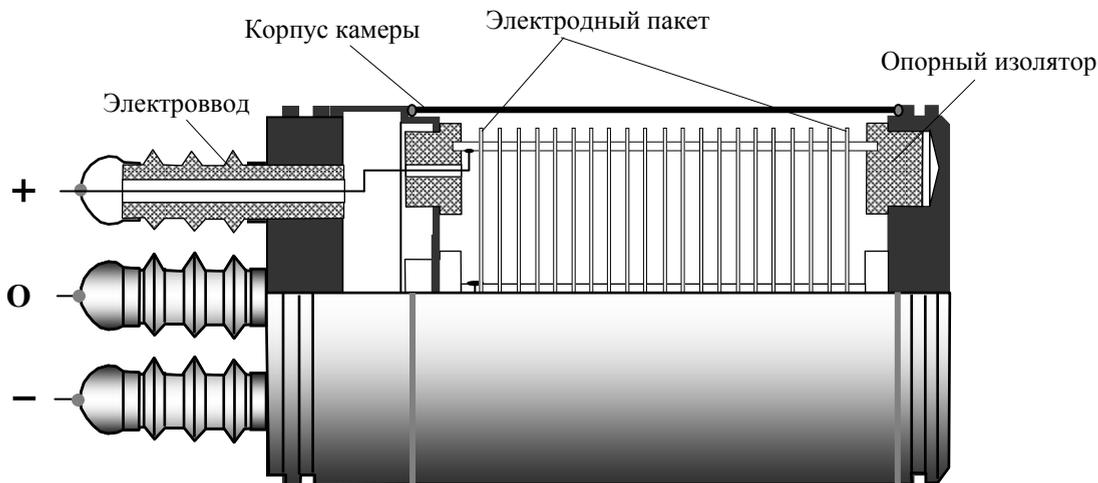


Рис. 1. Конструктивная компоновка детектора КНК-2-7М

Отверстия в рейках расположены таким образом, что между дисками разноименных (разнополярных) электродов образуется зазор  $\sim 1,6$  мм, а каждый диск третьего электрода, традиционно называемого сигнальным (собирающим), оказывается размещенным между дисками разноименных электродов, образующих с сигнальным электродом две секции. В одной из них на поверхности электродных дисков нанесен слой оксида  $^{237}\text{Np}$  толщиной  $\sim 1$  мг/см<sup>2</sup>. Эта секция чувствительна как к нейтронам (преимущественно быстрым), так и к  $\gamma$ -квантам. Отсутствие нейтронно-чувствительного покрытия на электродных дисках второй секции практически исключает чувствительность этой секции к нейтронам и позволяет рассматривать ее как исключительно  $\gamma$ -чувствительную.

Общее количество дисков в электродном пространстве – 21, из них 10 формируют сигнальный (собирающий) электрод, 6 – эмиттерный электрод  $\gamma$ -секции, 5 – эмиттерный электрод нейтронной секции. Длина электродного пакета  $\sim 50$  мм, расстояние эффективного центра детектора (центра электродного пакета) от внешней торцевой поверхности  $\sim 37$  мм. Камера заполнена газовой смесью аргона, гелия и азота до давления 0,45 МПа. Регистрационно-значимым фактором является неизменно высокая  $\alpha$ -активность  $^{237}\text{Np}$ . Согласно [3], результирующий период  $\alpha$ -распада  $^{237}\text{Np}$  составляет  $2,14 \cdot 10^6$  лет с выходом  $2,6 \cdot 10^4$   $\alpha$ -частиц на 1 мг  $^{237}\text{Np}$ .

Для проведения исследований в распоряжении авторов имелось два детектора КНК-2-7М ограниченного промышленного изготовления с заводскими номерами № 001 и № 002. С целью практической реализации в измерениях исследовательского и прикладного характера в качестве основной схемы включения детектора КНК-2-7М была использована комбинированная схема, обеспечивающая непрерывный счетно-токовый режим с отдельной регистрацией токовых откликов функциональных секций. Принципиально-структурная версия схемы включения КНК-2-7М представлена на рис. 2.

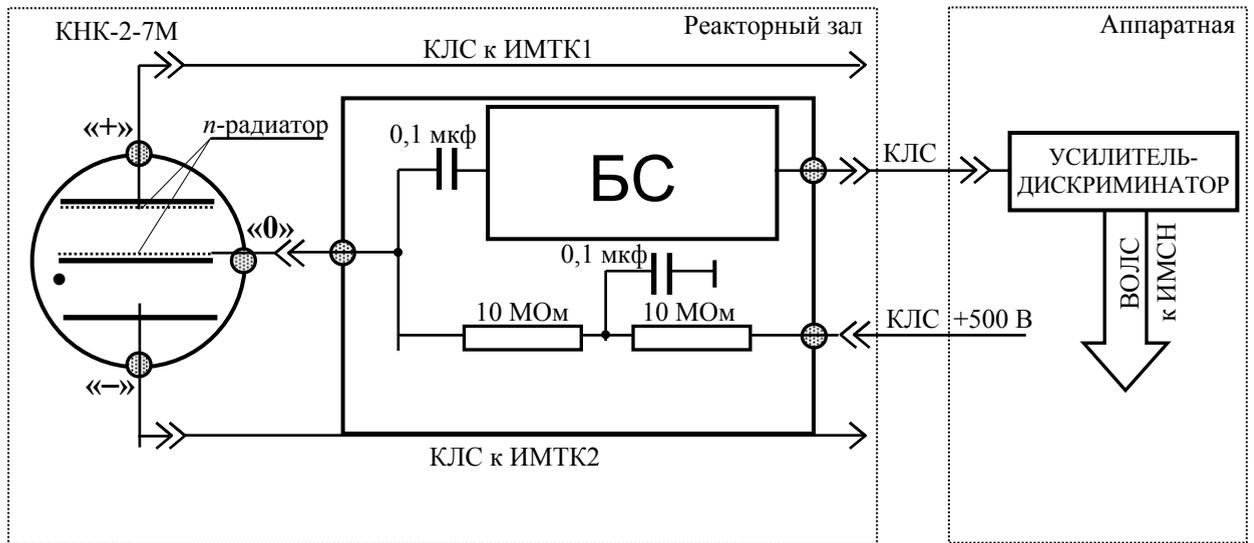


Рис. 2. Принципиальная схема комбинированной регистрации счетного и токового откликов КНК-2-7М: БС – блок согласования, ИМТК – измерительный модуль токовой камеры, ИМСН – измерительный модуль счетчика нейтронов, КЛС – кабельная линия связи, ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи

Ключевым функциональным элементом схемы является блок согласования БС (авторская разработка, проходящая процедуру оформления как изобретение), обладает высокой радиационной стойкостью и обеспечивает надежную передачу импульсного сигнала нейтронной секции КНК-2-7М 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 [4], обеспечивает возможность 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-2-7М (один счетный регистрационный тракт, два токовых регистрационных тракта) синхронно с измерением мощности реактора (два токовых регистрационных тракта автономного канала контроля мощности реактора) был использован аппаратурно-программный комплекс с четырьмя измерительными модулями токовой камеры ИМТК, аналогичный представленному в [4], 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-2-7М 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; 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 форми-

руемой выборкой последовательного суммирования токовых показаний (зарядовый отклик детектора); фактически можно говорить об одновременной реализации как дифференциальной формы регистрации (*current value measurement*, или *cvm*-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), а также поиск форм более корректного форматирования;

– графическая визуализация фактически измеряемых величин в режиме реального времени.

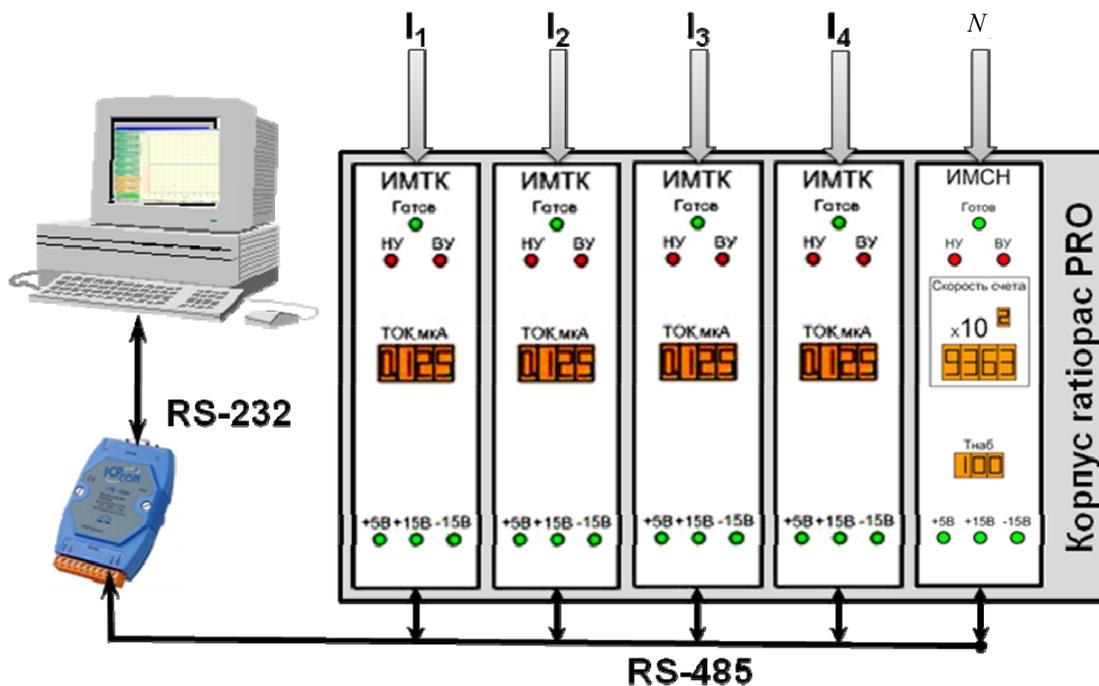


Рис. 3. Комплектационная схема аппаратуры для регистрации счетно-токового отклика детектора КНК-2-7М

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

– вывод реактора на стационарный уровень мощности  $P_f \sim 1 \cdot 10^{11}$  дел. АЗ; контроль и оперативная коррекция уровня стационара в границах вариативности не более  $\pm 4\%$ ;

– пошаговое изменение напряжения дискриминации  $U_d$  от 200 до 1000 мВ (от 200 до 600 мВ шаг  $U_d$  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).

Установлено, что дискриминационные характеристики обоих исследованных детекторов КНК-2-7М практически не различаются. На рис. 4 представлена дискриминационная характеристика для КНК-2-7М № 001. Для определения численных значений нормализованной интенсивности отсчетов было использовано соотношение  $N_{f\tau} = 10^8 N/P_f (1 - \tau N)$ , где  $10^8$  – коэффициент масштаба,  $N$  – фактическая интенсивность отсчетов,  $P_f$  – соответствующая  $N$  мощность реактора,  $\tau = 3,4 \cdot 10^{-6}$  с – параметр коррекции просчетов.

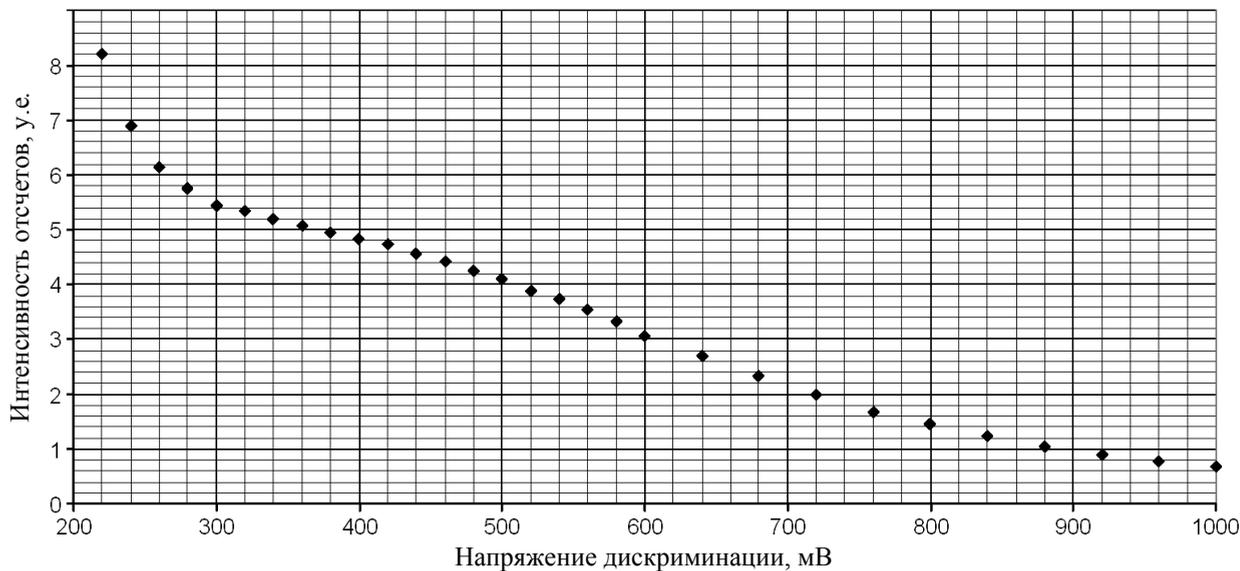


Рис. 4. Дискриминационная характеристика КНК-2-7М

Пошаговый наклон дискриминационной характеристики определялся (в %) по соотношению  $S = 100 [N_{f\tau}(U_d) - N_{f\tau}(U_d + \Delta U_d)] / \{ \Delta U_d [N_{f\tau}(U_d) + N_{f\tau}(U_d + \Delta U_d)] / 2 \}$ .

Выбранному в качестве рабочего значению  $U_d = 400$  мВ соответствует минимальное значение  $S$ , равное 0,12 % на мВ.

Для конкретизации формализма коррекции просчетов был осуществлен специализированный энергопуск реактора, в котором на асимптотическом периоде разгона реактора  $\sim 46$  с был достигнут уровень фактически реализуемой интенсивности  $\sim 150000$  отсч./с. Установлено, что до фактической интенсивности  $\sim 80000$  отсч./с хороший уровень коррекции (разброс не более  $\pm 1$  % в интервале от 10000 до 80000 отсч./с) достигается в рамках формализма с одним корректирующим параметром  $\tau = 3,4 \cdot 10^{-6}$  с в виде  $K(N) = 1/(1 - \tau N)$ . Для продления вышеуказанного уровня коррекции до  $N \approx 150000$  отсч./с необходимо применение двухпараметрического формализма коррекции в виде  $K(N) = 1/(1 - \tau_1 N - \tau_2 N^2)$  при  $\tau_1 = 2 \cdot 10^{-6}$  с и  $\tau_2 = 1,75 \cdot 10^{-11}$  с<sup>2</sup>.

Возможности однопараметрической коррекции иллюстрируют данные, представленные на рис. 5. Для определения численных значений фактора качества коррекции использовалось выражение  $10^{11} N / [P_f (1 - 3,4 \cdot 10^{-6} N)]$ .

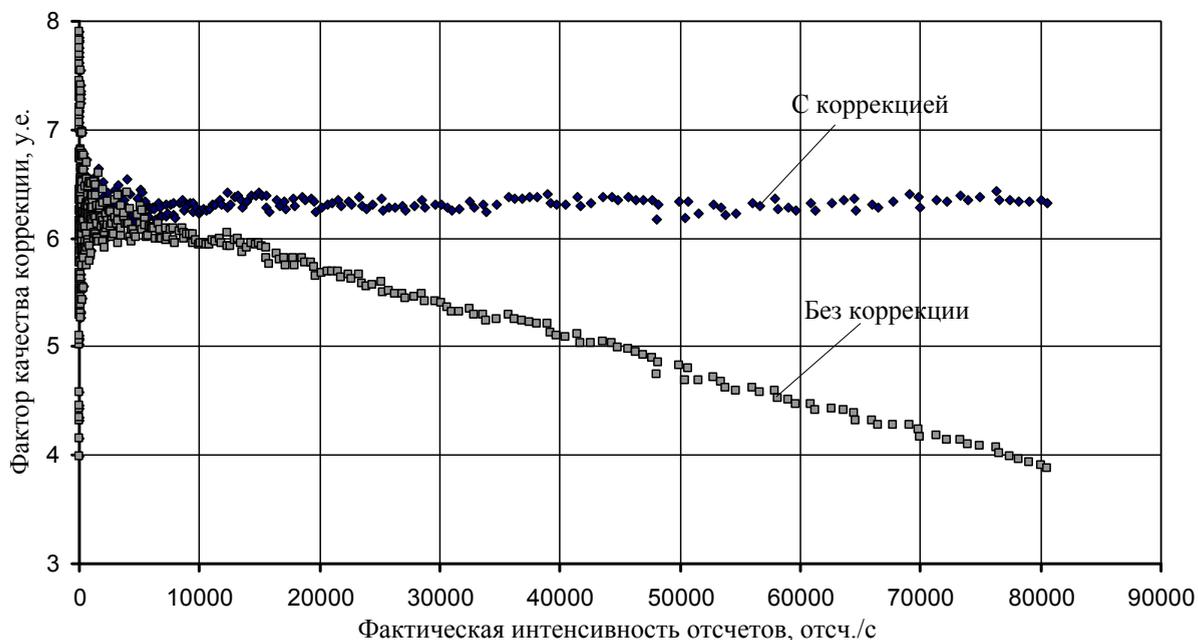


Рис. 5. Просчеты и их корректировка

Для определения (оценки) числа эффективных ядер при  $U_d = 400$  мВ детектор КНК-2-7М устанавливался в пустом контейнере горизонтальной загрузки во внутризонную облучательную полость БР-К1 в позицию совмещения центра чувствительности детектора (~37 мм от торца без разъемов) с координатой  $z = 6$  см от внутренней торцевой поверхности КГЗ. Параметры поля реакторных излучений в данной конфигурации загрузки, именуемой далее КГЗ-П, представлены в [5, 6].

Согласно [6], одному делению в активной зоне (АЗ) реактора БР-К1 в позиции  $z = 6$  см соответствуют  $2,77 \cdot 10^{-28}$  делений  $^{237}\text{Np}$ . Принимая указанное значение в качестве среднего по чувствительной области КНК-2-7М, по соотношению откорректированной интенсивности отсчетов при  $U_d = 400$  мВ и соответствующей ей мощности реактора эффективное число ядер для детектора КНК-2-7М № 001 определено равным  $1,80 \cdot 10^{20}$  ( $70,8$  мг  $^{237}\text{Np}$ ), а для детектора КНК-2-7М № 002 —  $1,39 \cdot 10^{20}$  ( $54,7$  мг  $^{237}\text{Np}$ ).

Именно столь значительное эффективное количество ядер  $^{237}\text{Np}$  в исследованных детекторах КНК-2-7М позволяет рассматривать детектор данного типа как высокоэффективный детектор быстрых нейтронов. Согласно [6], в рабочем зале реактора БР-1 (в настоящее время замененном на модернизированный аналог БР-1М [7]) на удалении от центра АЗ на 10 м интегральный отклик реакции деления  $^{237}\text{Np}(n, f)$  имеет значение  $3,3 \cdot 10^{-31}$  реакций/ядро·дел. АЗ. Для получения более чем измерительно приемлемой интенсивности отсчетов 100 отсч./с при использовании КНК-2-7М № 002 достаточен вывод реактора БР-1М на уровень мощности не более  $2,2 \cdot 10^{12}$  дел. АЗ/с (~70 Вт при эксплуатационно разрешенном уровне неограниченной работы в статическом режиме 3 кВт). При эффективном пороге регистрации нейтронов ~0,55 МэВ интенсивности КНК-2-7М № 002 100 отсч./с соответствует интенсивность флюенса нейтронов (плотность потока нейтронов)  $dF_{0,55}/dt = 4,4 \cdot 10^4$  нейтр./см<sup>2</sup>·с.

Особенностью реакции  $^{237}\text{Np}(n, f)$  является слабо выраженная чувствительность к тепловым и эпитепловым нейтронам (см., например, [6]). При проведении измерений в полях реакторных установок с компактной металлической АЗ указанная особенность сечения деления  $^{237}\text{Np}$  не оказывает практически значимого влияния. Так, для спектра нейтронов на 10 м от центра АЗ БР-1М использование кадмиевого фильтра толщиной 1 мм уменьшает интегральный отклик на  $\sim 1,7\%$ , а борного фильтра толщиной  $0,4 \text{ г/см}^2$  по  $^{10}\text{B}$  – на  $\sim 6\%$ . В спектрах с более выраженным содержанием тепловых и эпитепловых нейтронов целесообразно применение, по необходимости, соответствующих поглощающих экранов для КНК-2-7М.

Возможность исключения внутреннего влияния интенсивного  $\alpha$ -фона нептуниевого радиатора нейтронной секции и внешнего влияния  $\gamma$ -компоненты реакторного излучения ( $\gamma$ -кванты не формируют в газовом пространстве детектора достаточных для регистрации импульсов тока) предопределяет статус счетного режима работы детектора КНК-2-7М как основного. Переход в токовый режим регистрации практически реализуем, но диагностические возможности детектора КНК-2-7М в этом режиме имеют значительные ограничения, связанные именно с наличием высокого уровня фонового  $\alpha$ -тока и значительным влиянием  $\gamma$ -излучения из-за низкой нейтронной чувствительности.

Изучение особенностей работы обоих детекторов КНК-2-7М в токовом режиме было организовано и осуществлено с использованием масштабно варьируемых полей излучений во внутризонной облучательной полости реактора БР-К1, формируемых с помощью специализированных трансформеров реакторного излучения [5]. В качестве основного принималось конкретизированное ранее по тексту поле излучений КГЗ-П. Свинцовый трансформер (фильтр) позволяет в  $\sim 5$  раз уменьшить  $\gamma$ -дозу при незначительном уменьшении флюенса нейтронов относительно КГЗ-П. Дальнейшее обозначение поля – КГЗ-СФ. Изготовленный из спрессованной гомогенной смеси полипропилена с окисью кадмия трансформер (конвертор) позволяет в  $\sim 2,5$  раза увеличить  $\gamma$ -дозу при уменьшении флюенса быстрых нейтронов в  $\sim 6,5$  раз относительно КГЗ-П. Дальнейшее обозначение поля – КГЗ-НГК. Существенные для оценки диагностических возможностей КНК-2-7М при работе детектора в токовом режиме характеристики полей излучений КГЗ-П, КГЗ-СФ и КГЗ-НГК представлены в таблице.

*Избранные характеристики полей излучений КГЗ-П, КГЗ-СФ и КГЗ-НГК*

Параметр	Поле излучений		
	КГЗ-П	КГЗ-СФ	КГЗ-НГК
Интегральный отклик реакции $^{237}\text{Np}(n, f) A_{\text{Np}}$ , реакц./ядро·дел. АЗ	2,77–28	1,85–28	4,62–29
Доза $\gamma$ -излучения (воздух) $D_\gamma$ , Гр/дел. АЗ	5,8–16	1,1–16	1,4–15
$A_{\text{Np}}/D_\gamma$ , реакц./ядро·дел. АЗ·Гр	4,78–13	1,68–12	3,3–14
Флюенс нейтронов выше порога 0,55 МэВ $F_{0,55}$ , нейтр./см <sup>2</sup> ·дел. АЗ	1,73–4	1,19–4	2,83–5
$F_{0,55}/D_\gamma$ , нейтр./см <sup>2</sup> ·Гр	2,98+11	1,09+12	2,02+10

В работе [8] 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 (подвержен-

ное 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-2-7М в токовом режиме работы.

Измеренные до начала работы с детекторами КНК-2-7М № 001 и № 002 в полях реакторных излучений фоновые секционные токи имели следующие значения:

– ток нейтронной секции КНК-2-7М № 001  $I_{nc} = 2,12 \cdot 10^{-8}$  А, ток  $\gamma$ -секции  $I_{\gamma c} = 6,30 \cdot 10^{-10}$  А, отношение секционных токов  $I_{nc}/I_{\gamma c} = 33,6$ ,  $I_{\gamma c}$  составляет 2,97 % от тока  $I_{nc}$ ;

– ток нейтронной секции КНК-2-7М № 002  $I_{nc} = 1,88 \cdot 10^{-8}$  А, ток  $\gamma$ -секции  $I_{\gamma c} = 5,56 \cdot 10^{-10}$  А, отношение секционных токов  $I_{nc}/I_{\gamma c} = 33,8$ ,  $I_{\gamma c}$  составляет 2,96 % от тока  $I_{nc}$ .

Очевидно, что токи нейтронных секций обеих КНК-2-7М обусловлены  $\alpha$ -частицами  $^{237}\text{Np}$ . Отношение  $I_{nc}(\text{№ 001})/I_{nc}(\text{№ 002}) = 1,13$  характеризует различие массового содержания  $^{237}\text{Np}$  в радиаторах детекторов. Наличие фоновых токов  $I_{\gamma c}$  может быть объяснено только формированием токов утечки из нейтронной в  $\gamma$ -секцию. Одинаковость величины утечки свидетельствует об одинаковости условий межсекционного перераспределения токов в обеих исследованных КНК-2-7М.

Токовые отклики обеих КНК-2-7М в полях КГЗ-П, КГЗ-СФ, КГЗ-НГК исследовались в шести близких по форме реализации кратковременных энергопусках реактора БР-К1, осуществляемых путем вывода реактора на стационарную мощность  $(2...3) \cdot 10^{14}$  дел. АЗ/с на периоде разгона  $\sim 30$  с, выдержкой на стационаре  $\sim 1000$  с и гашением путем одновременного сброса и отвода от АЗ всех органов регулирования реактивности (ОРР). Токограммы, полученные для детектора КНК-2-7М № 001, представлены на рис. 6. Аналогичная выборка токограмм получена и для детектора КНК-2-7М № 002.

Первое, что обращает на себя внимание, это фактическое отсутствие различий токов функциональных секций в поле КГЗ-НГК в процессе работы реактора на стационарной мощности (в количественном выражении имеем  $I_{nc}/I_{\gamma c} = 0,96$  для КНК-2-7М № 001 и  $I_{nc}/I_{\gamma c} = 0,94$  для КНК-2-7М № 002). Полученный результат показывает, что при использовании детекторов КНК-2-7М в токовом режиме работы в полях с переменным соотношением нейтронной и  $\gamma$ -компонент необходимо предварительно определять (оценивать) компонентное соотношение излучений.

Характер изменения соотношения токов функциональных секций в процессе выхода на стационар и в течение его поддержания иллюстрируют графики отношений  $I_{nc}/I_{\gamma c}$  для КНК-2-7М № 001, представленные на рис. 7. Из очевидных практических соображений целесообразно рассмотрение соотношений  $I_{nc}/I_{\gamma c}$  только для измерений в полях КГЗ-П и КГЗ-СФ.

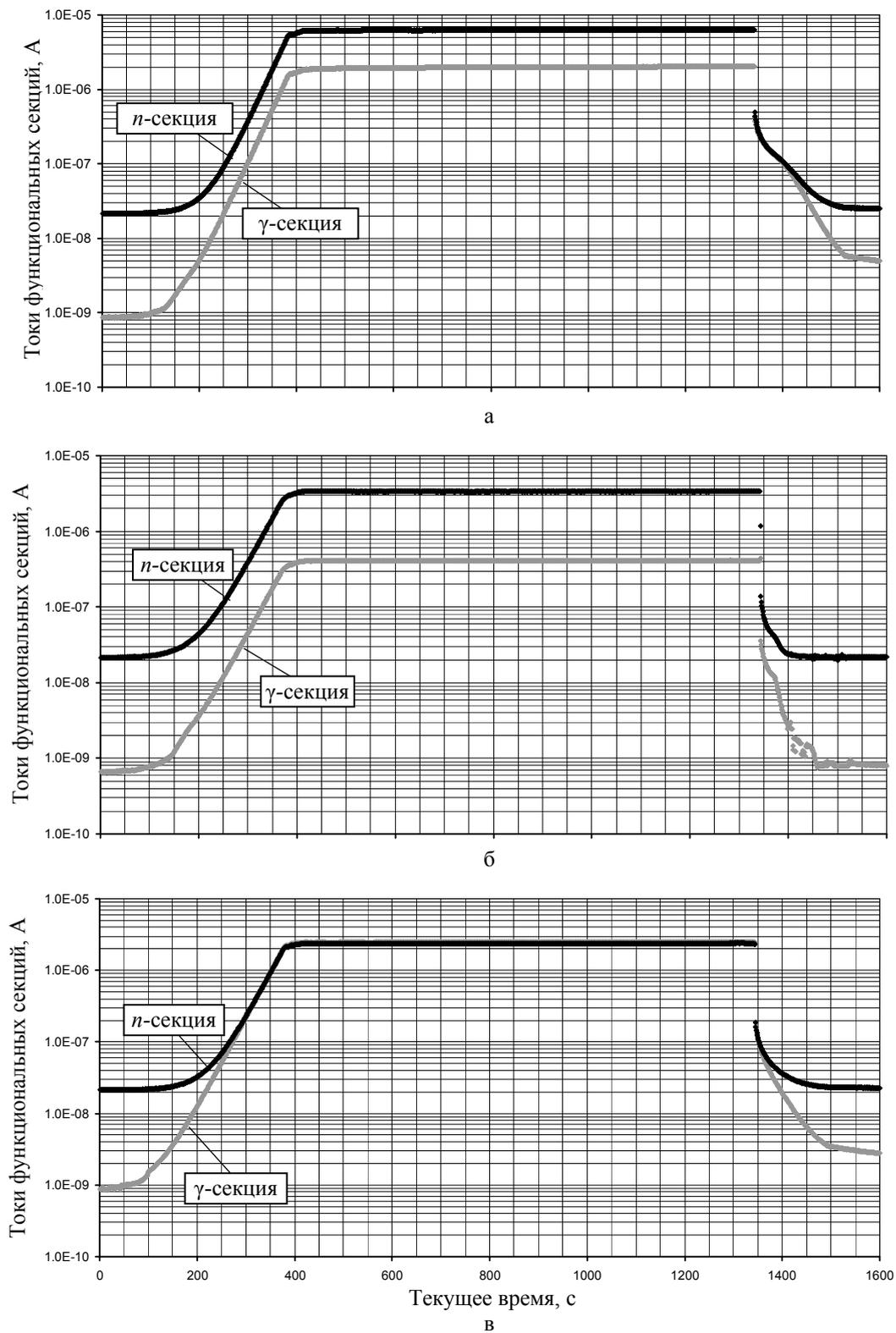


Рис. 6. Секционные токи КНК-2-7М при измерениях в КГЗ-П (а), КГЗ-СФ (б) и КГЗ-НГК (в)

Анализ представленных на рис. 7 графических данных показывает следующее:

– при размещении детектора в поле КГЗ-П на участке, предшествующем выводу реактора на мощность, имеем  $I_{нс}/I_{\gammaс} = 23,8$ , или в 1,41 раза меньше такого для токов  $\alpha$ -фона; наличие высокого уровня осколочного  $\gamma$ -фона АЗ, достаточного для значимого увеличения тока  $\gamma$ -секции, но недостаточного для значимого вклада в  $\alpha$ -ток нейтронной секции, можно рассматривать как аргументированное объяснение выявленного изменения соотношения  $I_{нс}/I_{\gammaс}$ ;

– при размещении детектора в поле КГЗ-СФ на участке, предшествующем выводу реактора на мощность, имеем  $I_{нс}/I_{\gammaс} = 32,6$ , или всего в 1,04 раза меньше такого для токов  $\alpha$ -фона; полученный результат фактически подтверждает значимость высокого уровня осколочного  $\gamma$ -фона АЗ, эффективно экранируемого толстостенным свинцовым фильтром;

– выход на устойчивое соотношение секционных токов ( $I_{нс}/I_{\gammaс} = 2,92$  для поля излучений КГЗ-П и  $I_{нс}/I_{\gammaс} = 7,42$  для поля излучений КГЗ-СФ) происходит только на уровнях мощности реактора не менее  $10^{13}$  дел./с; до получения дополнительных экспериментальных данных указанный уровень мощности реактора и связанные с ним параметры полей излучений следует рассматривать как нижнюю границу применимости детекторов КНК-2-7М в токовом режиме работы в полях реакторных излучений.

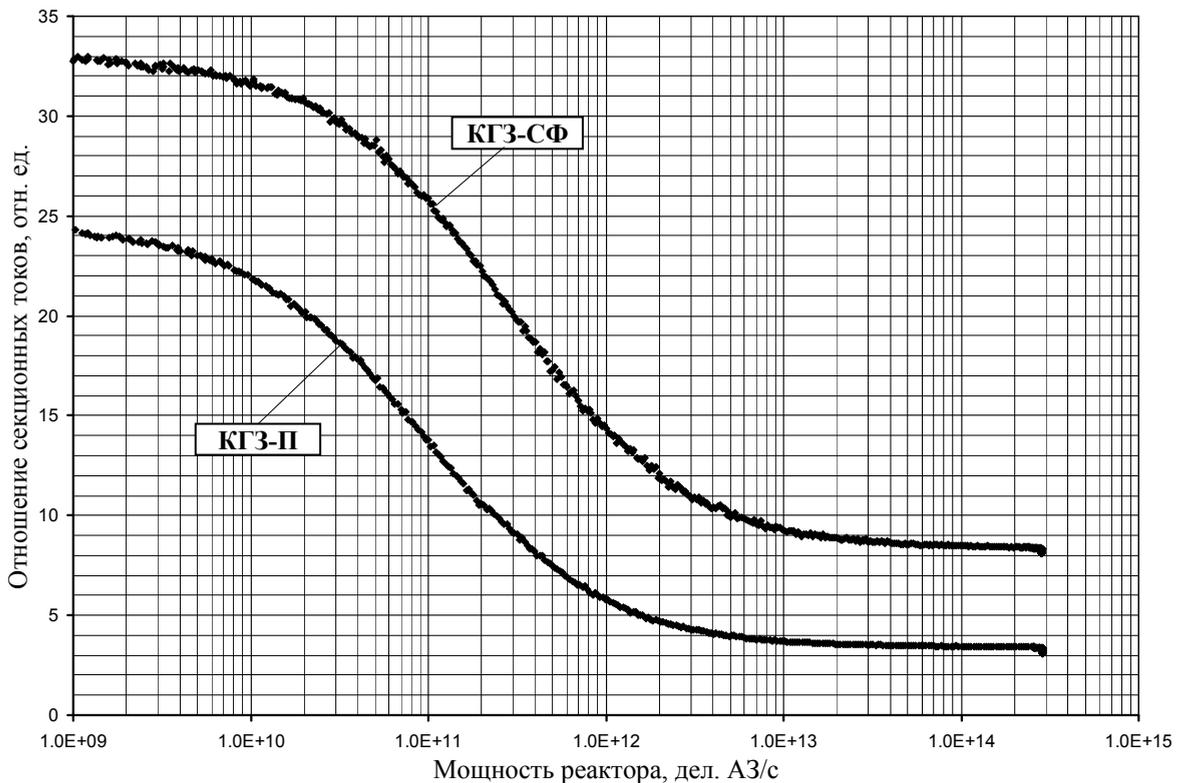


Рис. 7. Изменение отношения секционных токов  $I_{нс}/I_{\gammaс}$  в процессе развития энергопусков с КНК-2-7М № 001 в полях излучений КГЗ-П и КГЗ-СФ

Принято считать, что разность токов функциональных секций газонаполненных ионизационных камер, ориентированных на регистрацию нейтронов в реакторных полях излучений и выполненных по трехэлектродной (компенсационной) схеме, представляет собой токовый отклик такой камеры только на воздействие нейтронной компоненты поля. Так как нейтронная компонента использованных полей излучений КГЗ-П и КГЗ-СФ практически прямо пропорциональна мощности реактора БР-К1, следует ожидать аналогичного поведения и обусловленного нейтронами токового отклика детектора КНК-2-7М. Реальный характер изменения нормализованного в форме  $I_n = 10^{20} (I_{нс} - I_{\gammaс}) / P_f$  нейтронного токового отклика иллюстрируют графики на рис. 8. Представленные данные показывают, что в использованных полях излучений КГЗ-П и КГЗ-СФ практически приемлемая пропорциональность между нейтронным токовым откликом детектора КНК-2-7М № 001 и мощностью реактора достигается только на уровнях мощности не менее  $10^{13}$  дел. АЗ/с. Аналогичный результат имеет место и для детектора КНК-2-7М № 002.

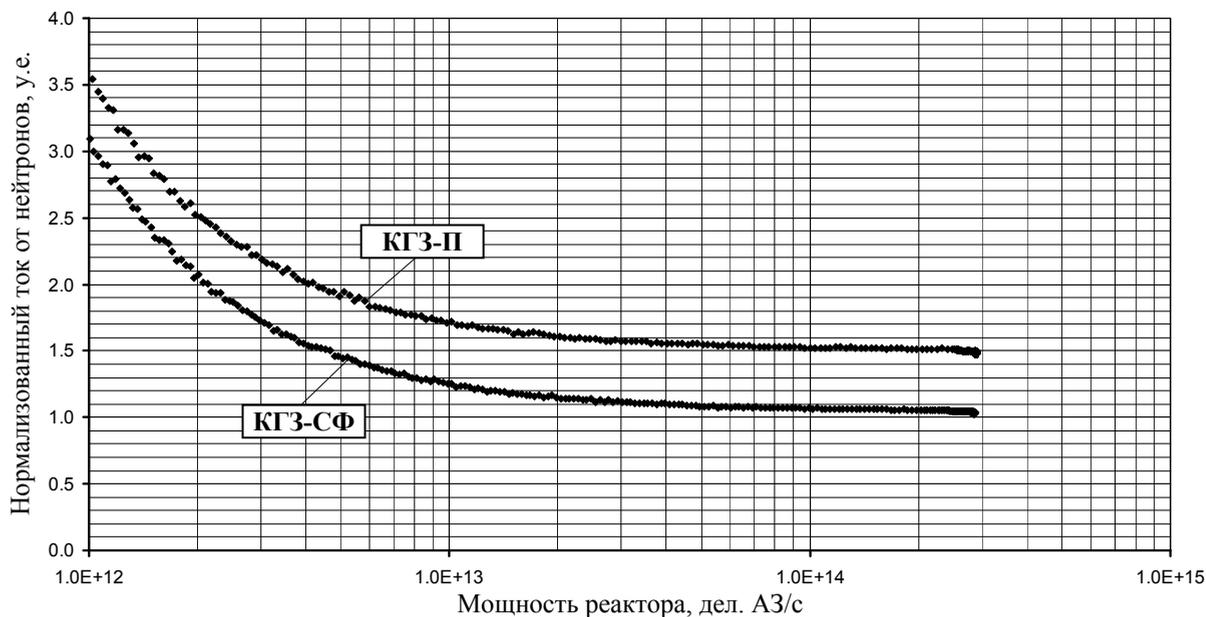


Рис. 8. Изменение нормализованного тока в зависимости от нейтронов в процессе развития энергопулков с КНК-2-7М № 001 в поле излучений КГЗ-П и КГЗ-СФ

Выявленная значимая роль воздействия  $\gamma$ -компоненты реакторного поля излучений на функциональные токи КНК-2-7М обусловила целесообразность определения чувствительности  $\gamma$ -секции к реакторному  $\gamma$ -излучению. Соответствующая градуировка была осуществлена компараторным методом в рабочей области специализированного гамма-источника реактора БР-К1 СГИ с использованием детектора КГК-2 с учетом результатов работ [9–11]. Для обоих исследованных детекторов КНК-2-7М получены количественно совпадающие значения искомой чувствительности –  $1,10 \cdot 10^{-5}$  Кл/Гр.

Очевидная целесообразность использования КНК-2-7М как детекторов быстрых нейтронов предопределяет приоритетность использования их в счетном режиме работы, дополняемом, при необходимости, переходом в токовый режим. Такая идеология использования детекторов предполагает целесообразность (необходимость) сохранения размерности (или ее аналога) измеряемой

величины при переходе из одного режима работы в другой. Конкретизация эффективного числа ядер  $^{237}\text{Np}$  в каждом из детекторов позволяет непосредственно измерять интенсивность реакций (делений)  $^{237}\text{Np}$  в единицах «реакц./с» в *свт*-режиме с очевидным переходом в *ivm*-режим для получения результата в единицах «реакц».

Для сохранения указанной размерности при переходе в токовый режим работы следует определить чувствительность КНК-2-7М в форме  $\varepsilon = \Delta I_{\text{н}\gamma} / (A_{\text{Np}} n_{\text{эф}} P_f)$  ( $\Delta I_{\text{н}\gamma}$  – разность токов функциональных секций в А,  $P_f$  – мощность реактора в единицах «дел. АЗ/с») или в форме  $\varepsilon = \Delta Q_{\text{н}\gamma} / (A_{\text{Np}} n_{\text{эф}} Y_f)$  ( $\Delta Q_{\text{н}\gamma}$  – разность зарядов функциональных секций за энергопуск в Кл,  $Y_f$  – энерговыделение реактора в единицах «дел. АЗ»). Численные значения интегральных откликов  $A_{\text{Np}}$  представлены в таблице; эффективное число ядер  $n_{\text{эф}}$  для КНК-2-7М № 001 составляет  $1,80 \cdot 10^{20}$ , а для КНК-2-7М № 002 –  $1,39 \cdot 10^{20}$ . В обоих вариантах определения размерность определяемой чувствительности – «Кл/реакц.».

С учетом вышесказанного были получены следующие значения чувствительностей детекторов № 001 и № 002 для использования в токовом режиме работы КНК-2-7М:

–  $\varepsilon_{001} = 2,97 \cdot 10^{-13}$  Кл/реакц. в поле излучений КГЗ-П и  $\varepsilon_{001} = 3,09 \cdot 10^{-13}$  Кл/реакц. в поле излучений КГЗ-СФ;

–  $\varepsilon_{002} = 3,32 \cdot 10^{-13}$  Кл/реакц. в поле излучений КГЗ-П и  $\varepsilon_{002} = 3,59 \cdot 10^{-13}$  Кл/реакц. в поле излучений КГЗ-СФ.

Для обоих детекторов имеет место практически приемлемая согласованность количественных значений чувствительностей данного типа, полученных для конкретного детектора в полях излучений различающегося компонентного состава.

Очевидным образом для чувствительностей детекторов № 001 и № 002 к флюенсу нейтронов с порогом 0,55 МэВ  $F_{0,55}$ , ориентированных на использование в токовом режиме работы КНК-2-7М, получены следующие значения:

–  $\varepsilon_{001} = 8,56 \cdot 10^{-17}$  Кл·см<sup>2</sup>/нейтр. в поле излучений КГЗ-П и  $\varepsilon_{001} = 8,62 \cdot 10^{-17}$  Кл·см<sup>2</sup>/нейтр. в поле излучений КГЗ-СФ;

–  $\varepsilon_{002} = 7,39 \cdot 10^{-17}$  Кл·см<sup>2</sup>/нейтр. в поле излучений КГЗ-П и  $\varepsilon_{002} = 7,74 \cdot 10^{-17}$  Кл·см<sup>2</sup>/нейтр. в поле излучений КГЗ-СФ.

Для обоих детекторов также имеет место практически приемлемая согласованность количественных значений чувствительностей данного типа, полученных для конкретного детектора в полях излучений различающегося компонентного состава.

В целом исследованный вариант детектора быстрых нейтронов КНК-2-7М с использованием в качестве радиатора нейтронной секции материалов с высоким содержанием  $^{237}\text{Np}$ , разработанный и изготовленный на базе промышленно освоенных комплектующих, безусловно, представляет собой уникальный детектор с большими потенциальными возможностями для использования как в качестве приоритетного интегрального детектора в спектрометрии нейтронного излучения реакторных установок методом интегральных детекторов [12], так и в качестве детектора нейтронов с порогом 0,1 МэВ в работах прикладной ориентации после конкретизации принципиально возможной функциональной связи между откликом детектора и флюенсом нейтронов  $F_{0,1}$  различной спектральной вариативности.

### *Список литературы*

1. Брегадзе Ю. И., Степанов Э. К., Ярына В. П. Прикладная метрология ионизирующих излучений / Под ред. Ю. И. Брегадзе. – Москва: Энергоатомиздат, 1990, 264 с.
2. Чукляев С. В., Грудский М. Я., Артемьев В. А. Вторично-эмиссионные детекторы ионизирующих излучений. – Москва: Энергоатомиздат, 1995. 368 с.
3. Немец О. Ф., Гофман Ю. В. Справочник по ядерной физике / Под ред. доктора физ.-мат. наук В. И. Стрижак. – Киев: Наукова думка, 1975, 416 с.
4. 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.
5. 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.
6. 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. доктора техн. наук В. Д. Севастьянова. – Менделеево: ВНИИФТРИ, 2007. 654 с.
7. Воинов М. А., Воронцов С. В., Девяткин А. А. и др. Исследовательские ядерные установки РФЯЦ-ВНИИЭФ (основные характеристики, аспекты совершенствования СУЗ, элементов конструкции и правил эксплуатации) // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов. 2012. Вып. 3. С. 3–16.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Кошелев А. С., Довбыш Л. Е., Хоружий В. Х., Чукляев 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.
12. Севастьянов В. Д., Кошелев А. С. Методика восстановления спектров нейтронов ядерных реакторов и нейтронных генераторов КАСКАД-200 (176). – Москва: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2011, 17 с.

## High-sensitivity fast neutron detector KНК-2-7М

A. S. Koshelev, L. Ye. Dovbysh, M. A. Ovchinnikov, G. N. Pikulina,  
Yu. M. Drozdov, S. V. Chuklyaev

*There is given a brief design description of KНК-2-7М detector of fast neutrons. There are presented the results of detector studies in the mode of counting pulses of  $^{237}\text{Np}$  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  $^{237}\text{Np}$  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-K1 nuclear reactor. The detector diagnostic capabilities in the current mode are illustrated by the results of  $^{237}\text{Np}$  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.*