

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР В КАЧЕСТВЕ ДЕТЕКТОРОВ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ ИМПУЛЬСНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

А. С. Кошелев, М. А. Овчинников, Г. Н. Пикулина

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

Представлены результаты исследования токовых откликов серийно выпускаемых промышленных ионизационных камер типа КНК-4, КНК-53М и КНК-15 в энергетических пусках статического и импульсного характера на ядерных реакторах ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» БР-К1, БР-1М и ГИР-2.

Ключевые слова: промышленная ионизационная камера, импульсный ядерный реактор, система контроля и защиты реактора, релаксационные характеристики камеры, измеритель малых токов.

FUNCTIONING PECULIARITIES OF ION CHAMBERS OPERATION AS DETECTORS OF CONTROL MEASURING HARDWARE FOR PULSE REACTORS / A. S. KOSHELEV, M. A. OVCHINNIKOV, G. N. PIKULINA // There are presented the research results of current responses of series-produced ionization chambers such as KNK-4, KNK-53M, KNK-15 during power startups in static and pulse regime of RFNC-VNIIEF reactors BR-K1, BR-1M and GIR-2.

Key words: series-produced ionization chamber, pulse reactor, reactor control system, chamber relaxation characteristic, small current gauge.

Неотъемлемой составляющей контрольно-измерительных систем импульсных ядерных реакторов (ИЯР) с функцией первичных измерительных преобразователей (детекторов) реакторных излучений являются промышленного и/или опытного изготовления газонаполненные и/или вакуумированные ионизационные камеры с комбинированной n - γ -чувствительностью и/или только γ -чувствительные [1–3].

Номенклатура серийно выпускаемых камер достаточно обширна [4], но по типу – это исключительно газонаполненные ионизационные камеры, преимущественно ориентированные на регистрацию плотности потока (интенсивности флюенса) тепловых нейтронов в активных зонах (АЗ) реакторов энергетической направленности (исследовательских или промышленных). Наличие газовой среды в рабочем объеме ионизационной камеры практически исключает возможность ее применения в системах измерений характеристик энергопусков ядерных реакторов, осуществляемых в режиме генерирования импульсов делений на мгновенных нейтронах.

Разработаны и выпускаются опытными партиями вакуумированные детекторы как нейтронного, так и γ -излучения [5], практический интерес

к которым проявляют и разработчики систем контроля собственно ядерного реактора в импульсном режиме работы, и специалисты по определению импульсных параметров полей реакторных излучений в исследовательских и прикладных целях.

Приходится, однако, констатировать, что при наличии достаточно обширной информации о возможностях и формах использования газонаполненных камер промышленного изготовления на реакторах энергетической направленности практически отсутствует информация о специфике работы детекторов серийного и опытного изготовления на ядерных реакторных установках преимущественно импульсной направленности. Так, в аспекте практического использования камер различного типа в контрольно-измерительных системах ИЯР можно отметить, пожалуй, только публикации [6, 7].

Благоприятное стечение обстоятельств при наличии необходимой аппаратуры (в первую очередь, комплекта из четырех высокочувствительных токовых модулей ИМТК*) и соответствующего опыта работы в области проектирования ИЯР позволило авторам осуществить ряд исследований

* ИМТК – измерительный модуль токовой камеры.

избирательного характера, результаты которых, по мнению авторов, выходят за рамки частного технического решения и могут быть полезны при решении задач общетехнического характера, предполагающих использование промышленных ионизационных камер (ПИК) в контрольно-измерительных системах модернизируемых и вновь создаваемых ИЯР.

Состав и функциональное назначение структурных составляющих регистрационного комплекта на основе ИТМ иллюстрирует функциональная схема, представленная на рис. 1.

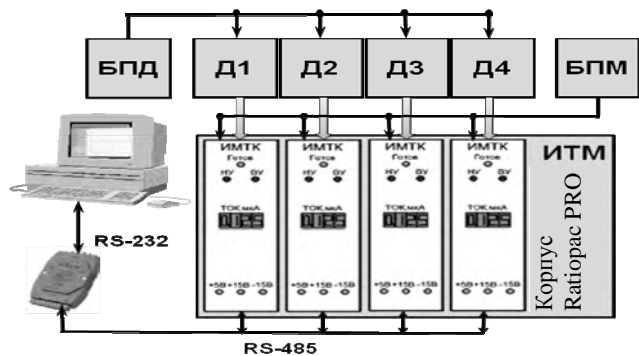


Рис. 1. Структурная схема регистрационного комплекта на основе ИТМ: Д1–Д4 – детекторы токовые, БПД – блок питания детекторов, БПМ – блок питания модулей

Измеритель тока многоканальный (ИТМ) – это комплект из четырех измерительных модулей ИМТК в общем приборном корпусе типа Ratiopac PRO. Предусмотрена возможность доукомплектования ИТМ дополнительными модулями ИМТК до восьми – общего числа модулей в приборном корпусе. При разработке ИМТК учтен предшествующий опыт измерения малых токов во ВНИИЭФ [8].

Рабочий диапазон измеряемых токов от $\sim 10^{-11}$ до $2,5 \cdot 10^{-3}$ А разбит на семь поддиапазонов десятичного форматирования, кроме первого и последнего. Предусмотрено автоматическое переключение поддиапазонов измерения в зависимости от значения тока на входе. Текущее значение измеренного тока постоянно отображается на индикаторах, расположенных на передней панели модуля.

Погрешность измерения тока на первых двух поддиапазонах (до 10^{-9} А) не более 5 %, а на остальных – не более 3 %. Время переключения поддиапазонов не более 0,1 с. Частота дискретизации входного сигнала не менее 10 Гц.

ИМТК содержит микроконтроллер, который выполняет функции по управлению модулем и обмену данными через последовательный интерфейс типа RS-485. Имеется функция самотестирования путем проверки работоспособности на всех поддиапазонах измерения с помощью встро-

енного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).

В функции разработанного для управления ИТМ программного обеспечения (ПО) включены:

- конкретизация количества модулей ИТМ, используемых для измерения токовых откликов избранного количества детекторов (от одного до четырех);
- установка связи между персональным компьютером (ПК) и комплектующими ИМТ модулями ИМТК, задание адресов модулей, проверка связи;
- передача данных от измерительных модулей на ПК с сохранением их в виде регистрационных файлов на жестком диске компьютера;
- отображение на экране монитора ПК измеренных значений тока и их суммы (заряда) на текущий момент времени измерения;
- просмотр регистрационных файлов и их первичная обработка.

При разработке ПО учитывалось, что оно будет использоваться в физическом эксперименте. Поэтому интерфейс пользователя программы организован в виде виртуального прибора с информационными индикаторами и панелью для вывода графика.

Предусмотрена регулируемая с шагом 0,1 с дискретизация измерений по текущему времени на интервале от 0,1 до 1 с.

При однозначной приоритетности режима работы, обеспечивающего генерирование импульсов делений на мгновенных нейтронах, предусмотрены также и другие режимы работы ИЯР, такие как подготовка стартового состояния для генерирования импульса на мгновенных нейтронах, генерирование саморегулирующихся и регулируемых извне импульсов делений на запаздывающих нейтронах (так называемых кратковременных энергопусков длительностью от единиц до сотен секунд), осуществление длительных (от ~ 1000 с и более) энергопусков с фиксацией избранного уровня мощности (так называемые статические энергопуски).

Особое внимание должно быть также уделено релаксационным характеристикам детекторов после воздействия на них реализуемых в импульсе делений на мгновенных нейтронах уровней излучений, на порядки превосходящих установленные измерительные пределы.

Одной из отличительных особенностей применения ПИК в системах контроля постоянной или медленно меняющейся (секунды) мощности реактора, ориентирующихся на нейтронную составляющую излучений АЗ, является практическое отсутствие сопутствующего γ -излучения на стадии вывода реактора на мощность, определенное возрастание γ -вклада в токовый отклик детектора в процессе работы на мощности и выражен-

ное преобладание γ -составляющей в токе детектора после заглушения реактора.

Рекомендуемая типовая схема включения двухсекционной ПИК в режиме компенсации сопутствующего γ -излучения представлена на рис. 2. При фиксированном напряжении питания нейтронной секции (+U) за счет регулировки напряжения питания γ -секции (-U) перед началом операции вывода реактора на мощность требуется осуществление операции взаимокомпенсирования секционных токов путем установки достижимо нулевого уровня суммарного токового сигнала.

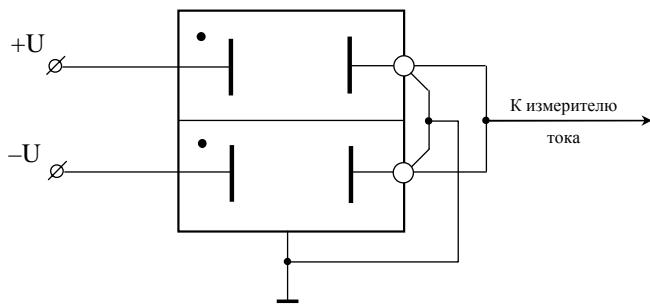


Рис. 2. Типовая схема включения двухсекционной ПИК в режиме γ -компенсации

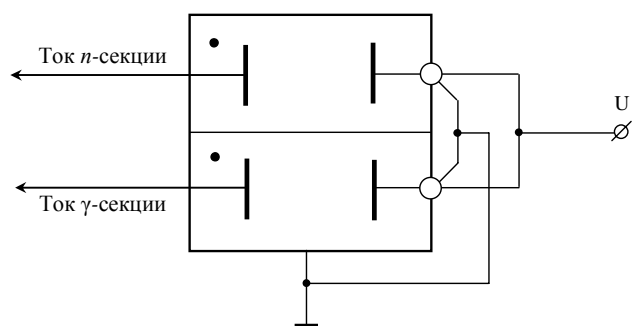


Рис. 3. Схема включения двухсекционной ПИК в режиме раздельной регистрации токов нейтронной и γ -секций

Использование типовой схемы включения ПИК в системах контроля квазистатической мощности ИЯР исключает возможность анализа сложной структуры изменения парциального соотношения нейтронной и γ -составляющей токового отклика детектора в процессе конкретного энергопуска реактора. Проведенные исследования показали возможность и целесообразность изменения типовой схемы включения ПИК на схему, представленную на рис. 3, с ориентацией ее использования в контрольно-измерительных системах ИЯР. Предпочтительности использования напряжения питания положительной или отрицательной полярности не выявлено. Так как некоторые различия секционной чувствительности ПИК при смене полярности напряжения питания имеют место, для

определенности все представляемые далее результаты исследований с включением ПИК по схеме рис. 3 получены при использовании положительной полярности питающего напряжения.

На рис. 4 представлен результат регистрации токового отклика ПИК КНК-4 (нейтронно-чувствительная камера с газообразным радиатором из ^3He) в энергопуске реактора БР-1М [9] статического характера с выдержкой стационарного уровня мощности $\sim 2,6 \cdot 10^{14}$ дел.АЗ/с ($\sim 7,5$ кВт) в течение ~ 1000 с при полном энерговыделении за пуск $\sim 2,7 \cdot 10^{17}$ дел.АЗ ($\sim 7,8$ МДж). Конструктивное оформление детектора ориентировано на возможность прямого практического использования в структуре детекторного оборудования реактора.

Графики секционных токов ПИК КНК-4 наглядно демонстрируют значительно большее превышение n -тока над γ -током (более, чем 1000-кратное) на участке вывода реактора на стационар и во время работы на нем вплоть до операции заглушения путем быстрого возврата органов регулирования реактивности (ОРР) АЗ на исходные позиции.

По завершении процедуры возврата ОРР на исходные позиции проявляется значительное различие в изменениях токов нейтронной и γ -секций. По истечении ~ 700 с после завершения активной части энергопуска имеет место практическое совпадение токов обеих секций, свидетельствующее об отсутствии влияния нейтронов реактора на формирование тока в n -секции и о примерно равной γ -чувствительности обеих секций ПИК КНК-4.

Собственно нейтронная составляющая тока n -секции на рис. 4 представлена графиком разности секционных токов.

В плане разделения нейтронной и γ -составляющей излучений реактора по воздействию на детектор ПИК КНК-4, по мнению авторов, наиболее подходит для применения в системах контроля мощности ИЯР стационарного характера, особенно при использовании реактора как физического инструмента преимущественно исследовательской направленности. К недостаткам ПИК КНК-4 могут быть отнесены определенное ограничение по максимальному рабочему току (не более 500 мкА) и недостаточная изученность ресурсных возможностей в условиях работы в составе контрольно-измерительных систем ИЯР.

На рис. 5 представлен результат регистрации токового отклика ПИК КНК-53М (нейтронно-чувствительная камера с радиатором из ^{10}B) в саморегулирующемся импульсе делений реактора БР-К1 [9] на запаздывающих нейтронах с пиковой мощностью $\sim 1,6 \cdot 10^{16}$ дел.АЗ/с ($\sim 0,46$ МВт)

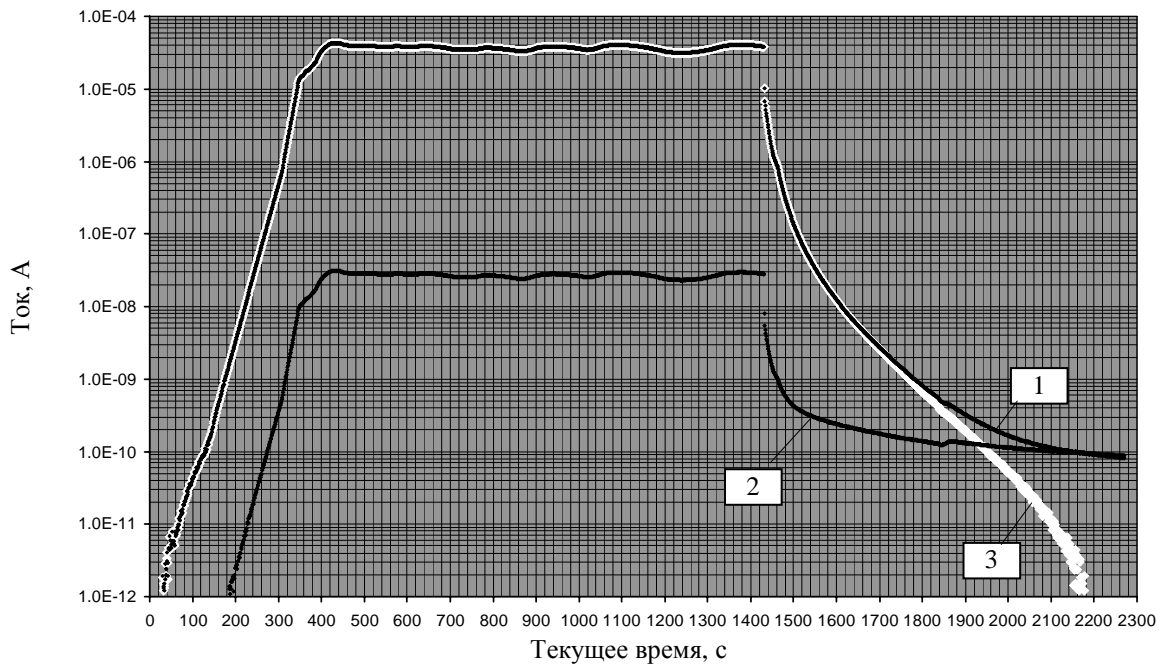


Рис. 4. Изменение секционных токов КНК-4 в энергопуске реактора БР-1М статического характера: 1 – ток n -секции, 2 – ток γ -секции, 3 – разность секционных токов

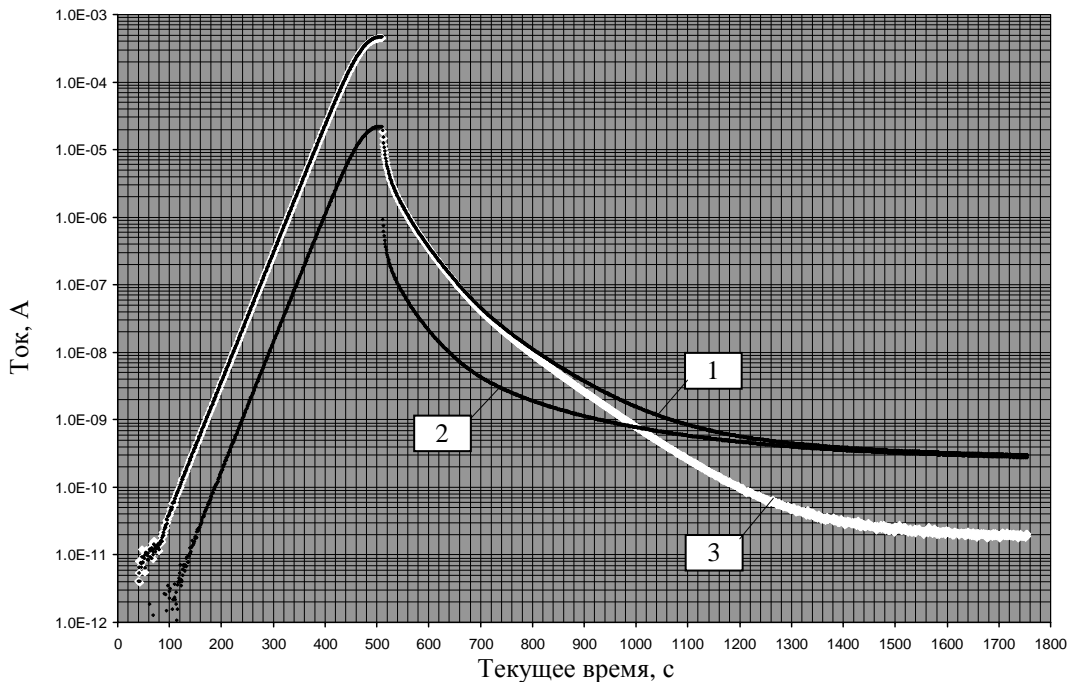


Рис. 5. Изменение секционных токов КНК-53М в процессе генерирования импульса делений на запаздывающих нейтронах на реакторе БР-1М: 1 – ток n -секции, 2 – ток γ -секции, 3 – разность секционных токов

и полном энерговыделении за пуск $\sim 9,1 \cdot 10^{17}$ дел.АЗ (~ 26 МДж). Конструктивное оформление детектора ориентировано на возможность прямого практического использования в структуре детекторного оборудования реактора.

Графики секционных токов ПИК КНК-53М также демонстрируют выраженное превышения n -тока над γ -током (~ 20 -кратное) на активном уча-

стке формирования импульса делений вплоть до осуществления операции заглушения путем быстрого возврата ОРР АЗ на исходные позиции.

Характер изменения токовых сигналов нейтронной и γ -секций аналогичен таковому в энергопуске реактора БР-1М, и также практически через 700 с наблюдается совпадение токовых показаний обеих секций детектора. Наблюдаемый ха-

рактически изменения разностного тока в конце процесса регистрации обусловлен, очевидно, имеющимися местами незначительными различиями в чувствительности функциональных секций КНК-53М к γ -излучению.

Высокие электрические параметры (максимальный рабочий ток 4 мА) и повышенная защищенность от внешних механических воздействий (наличие амортизатора, предохраняющего от повреждений при ударе) позволяют рассматривать ПИК КНК-53М как наиболее перспективный детектор для контрольно-измерительных систем ИЯР с измерительными функциями. Массовый характер применения ПИК КНК-53М в системах управления и защиты (СУЗ) действующих в стране энергетических реакторов свидетельствует о высоком уровне эксплуатационной надежности ПИК указанного типа, какового можно ожидать и при применении КНК-53М в контрольно-измерительных системах ИЯР.

На рис. 6 представлен результат регистрации токовых откликов ПИК КНК-4 и КНК-15 (нейтронно-чувствительная камера с радиатором из ^{235}U) в энергопуске реактора ГИР-2 [9] статического характера с выдержкой стационарного уровня мощности $\sim 1,7 \cdot 10^{12}$ дел.АЗ/с (~ 50 Вт) в течение ~ 1860 с при полном энерговыделении за пуск $\sim 3,2 \cdot 10^{15}$ дел.АЗ (~ 90 кДж). Конструктивное оформление детектора с КНК-4 ориентировано на возможность прямого практического использования в структуре детекторного оборудования реактора. Данные для КНК-15 получены в варианте конструктивно-измерительной конфигурации детектора, используемой в экспериментально отработываемой версии канала контроля мощности реактора. Включение детектора в регистрационный тракт осуществлено по типовой схеме (см. рис. 2).

Главным отличием ПИК КНК-15 от рассмотренных ранее ПИК КНК-4 и КНК-53М, обуславливающим приоритетный характер ее использования в большинстве СУЗ действующих ИЯР, является токовая составляющая постоянного и значительного уровня, формируемая испускаемыми материалом радиатора α -частицами с практически неизменным выходом. В практической версии использования ПИК КНК-15 на реакторе ГИР-2, как следует из рис. 6, токовый отклик соответствует значению $\sim 5 \cdot 10^{-10}$ А.

Наличие постоянно присутствующей и значительной по величине α -составляющей токового отклика КНК-15, безусловно, привлекательно при использовании детектора в системах аварийной защиты ИЯР благодаря возможности организации

непрерывного сквозного контроля работоспособности регистрационного тракта, очевидным образом ограничивает измерительный диапазон детектора (как следует из сравнения токовых откликов 1 и 2 на рис. 6).

Отметим, что наличие в конструкции АЗ ГИР-2 внешне расположенного конвертора, эффективно трансформирующего нейтронное излучение АЗ в γ -излучение, практически не изменяет кратности различия между токами нейтронной и γ -секциями КНК-4 (см. рис. 4 и 6).

Постимпульсный процесс релаксации регистрационного тракта, состоящего из газонаполненного ПИК-детектора и ИМТК, исследовался в нескольких импульсах делений на мгновенных нейтронах, осуществленных как на реакторе БР-1М, так и на реакторе ГИР-2. Отсутствие принципиальных отличий данных, получаемых в нескольких пусках на каждом из реакторов, позволяет ограничиться рассмотрением результатов, полученных только в одном из импульсов и на реакторе БР-1М, и на реакторе ГИР-2.

На рис. 7 представлены результаты измерения токовых откликов ПИК КНК-4, выполненных в импульсе на мгновенных нейтронах БР-1М с пиковой мощностью $\sim 2,1 \cdot 10^{21}$ дел.АЗ/с (~ 60 ГВт), полушириной 86 мкс и полным энерговыделением $\sim 2,2 \cdot 10^{17}$ дел.АЗ ($\sim 6,3$ МДж). Одновременно с секционными токами КНК-4 регистрировались токовые отклики γ -детектора КГК-2 (газонаполненный вариант детектора ВЭД-2-02 [5] штучного изготовления по заказу ВНИИЭФ при участии разработчика ВЭД-2, сотрудника НИИТМ Чукуяева С. В.) и батареи из шести параллельно соединенных γ -детекторов ВЭД-2-03, для усиления токового сигнала окруженных оболочкой из материала, конвертирующего реакторные нейтроны в γ -кванты (спрессованная смесь полипропилена с окисью кадмия в массовом соотношении ~ 9 к 1). Для наглядности токовый отклик батареи детекторов ВЭД-2-03 увеличен в 540,62 раза.

Генерирование импульса делений БР-1М осуществляется с минимизированного уровня начальной мощности (после не менее 20-минутного «высвечивания» в отсутствие внешнего источника нейтронов), поэтому до начала развития импульса делений регистрируются только фоновые уровни токовых сигналов соответствующих регистрационных трактов с ИМТК ($\sim 10^{-12}$ А).

Измеренный в предшествующих импульсах БР-1М пиковый ток батарей ВЭД-2-03, соответствующий пиковой мощности реактора $\sim 2 \cdot 10^{21}$ дел.АЗ/с, численно равен $\sim 1,2 \cdot 10^{-4}$ А при допустимом рабочем токе одного ВЭД-2-03 10 А. Данное обстоя-

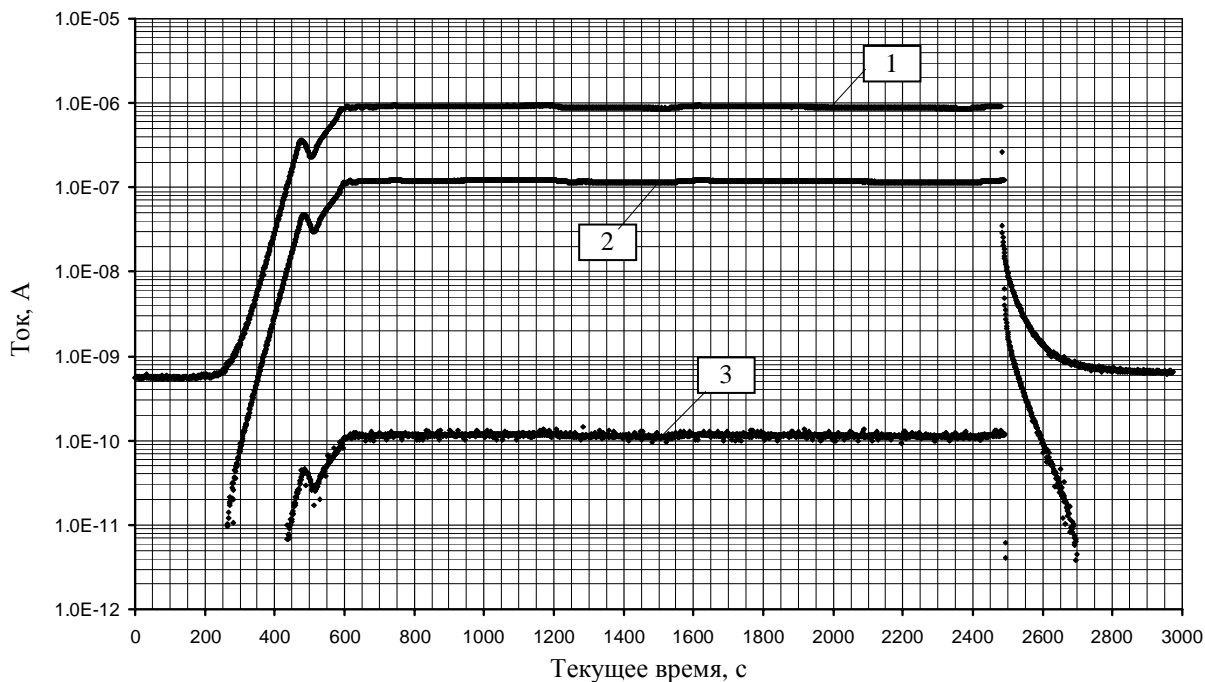


Рис. 6. Изменение секционных токов КНК-4 и разностного тока КНК-15 в энергопуске реактора ГИР-2 статического характера: 1 – разность секционных токов КНК-15, 2 – ток n -секции КНК-4, 3 – ток γ -секции КНК-4

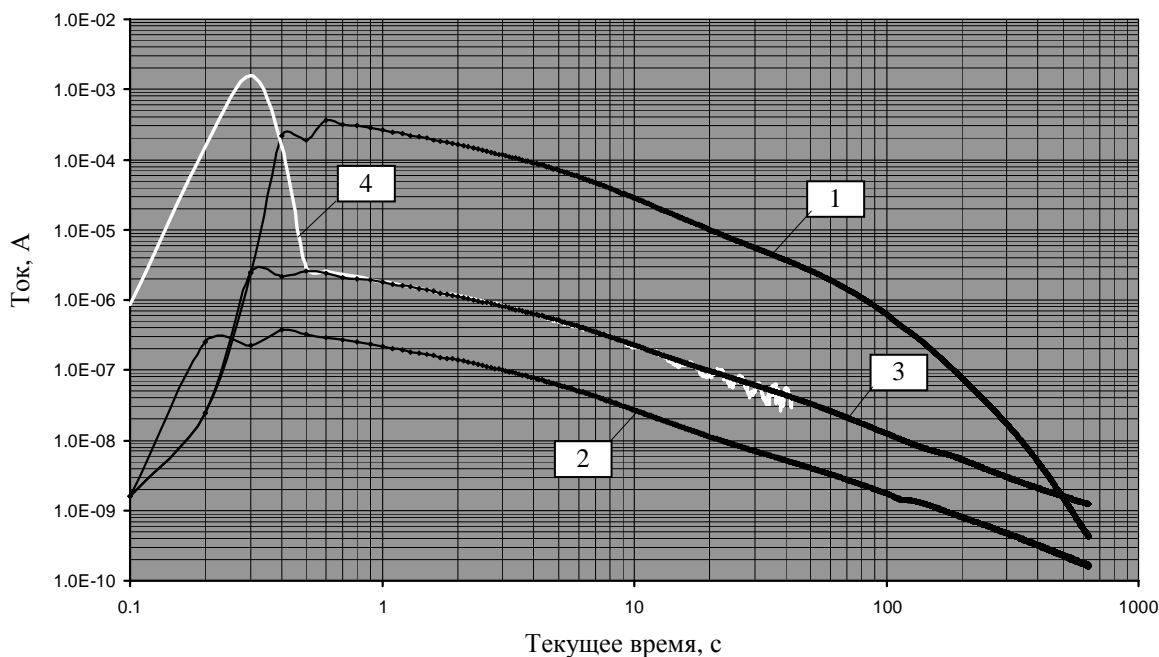


Рис. 7. Изменение секционных токов КНК-4, тока КГК-2 и тока батареи из шести ВЭД-2-03 при генерировании импульса делений на мгновенных нейтронах БР-1М: 1 – ток n -секции КНК-4, 2 – ток γ -секции КНК-4, 3 – ток КГК-2, 4 – ток батареи из шести ВЭД-2-03

тельство позволяет исключить из рассмотрения перегрузку детекторов ВЭД по току и имеющий место характер изменения токового сигнала 4 на рис. 7 отнести исключительно к реакции ИМТК на импульсный всплеск тока на его входе (макси-

мально зафиксированный ток, с учетом масштабного множителя, равен $\sim 3,2 \cdot 10^{-6}$ А).

Фактическое совпадение токовых откликов вакуумированного детектора ВЭД-2 и газонаполненного детектора КГК-2 через $\sim 0,7$ с после им-

пульса делений БР-1М можно рассматривать как экспериментальный факт, позволяющий утверждать, что не позже 1 с после импульса с практически максимально разрешенным для генерирования на БР-1М энерговыделением (установленное для планирования предельное значение $2,7 \cdot 10^{17}$ дел.АЗ) регистрационный тракт с газонаполненной ПИК КНК-4 и регистратором тока ИМТК завершил процесс релаксации и функционирует в режиме нормальной (неискаженной) регистрации.

Рис. 8 иллюстрирует изменение отношения секционных токов КНК-4 в формате текущего времени по мере уменьшения нейтронного выхода из АЗ, связанного с изменением (уменьшением) мощности источника запаздывающих нейтронов и изменением мощности γ -излучения, связанного как с уменьшением интенсивности делений на запаздывающих нейтронах, так и с уменьшением выхода запаздывающих γ -квантов деления.

На рис. 9 представлены результаты измерения разностного тока ПИК КНК-15, секционных токов ПИК КНК-4 и тока γ -детектора КГК-2, выполненных в импульсе на мгновенных нейтронах ГИР-2 с пиковой мощностью $\sim 4,9 \cdot 10^{20}$ дел.АЗ/с (~ 14 ГВт), полушириной 384 мкс и полным энерговыделением $\sim 2,1 \cdot 10^{17}$ дел.АЗ ($\sim 6,0$ МДж).

Генерирование импульса ГИР-2 осуществляется в режиме из стартового состояния с реактивностью выше критического состояния по запаздывающим нейтронам (с непосредственным контролем перед вводом импульсного блока по асимптотическому периоду разгона) и по достижению «стартового уровня» мощности реактора. Указан-

ные особенности предстартового функционирования реактора хорошо видны в интервале текущего времени до момента времени ~ 350 с, соответствующего импульсному всплеску мощности реактора и, соответственно, токовым сигналам детекторов излучений АЗ.

Характер изменения секционных токов КНК-4 и тока КГК-2 соответствует характеру изменения токовых откликов указанных детекторов как в импульсе на мгновенных нейтронах БР-1М, так и после сброса статической мощности в энергопусках БР-1М и ГИР-2. Также наблюдается выравнивание секционных токов КНК-4 через ~ 700 с по завершении процесса интенсивного энерговыделения и снижение сигнала n -секции КНК-4 до фоновового уровня.

Однако в токовом сигнале ПИК КНК-15 через ~ 300 с после импульса реактора и далее наблюдается значимое различие в характере изменения токовых сигналов КНК-4 и КНК-15, выражающееся в незначительности изменения показаний КНК-15 при существенно большем изменении показаний КНК-4. Численная величина тока КНК-15 в области его относительной стабилизации многократно (в ~ 10 раз) превышает определенный ранее в статпусках реактора уровень α -тока $\sim 5 \cdot 10^{-10}$ А. Имеются данные, что даже через сутки после воздействия на КНК-15 излучений реактора в импульсе делений на мгновенных нейтронах с номинальным энерговыделением ($\sim 6,8$ МДж) регистрируемое значение тока превышает установленное для данной камеры в нормальных условиях значение α -тока.

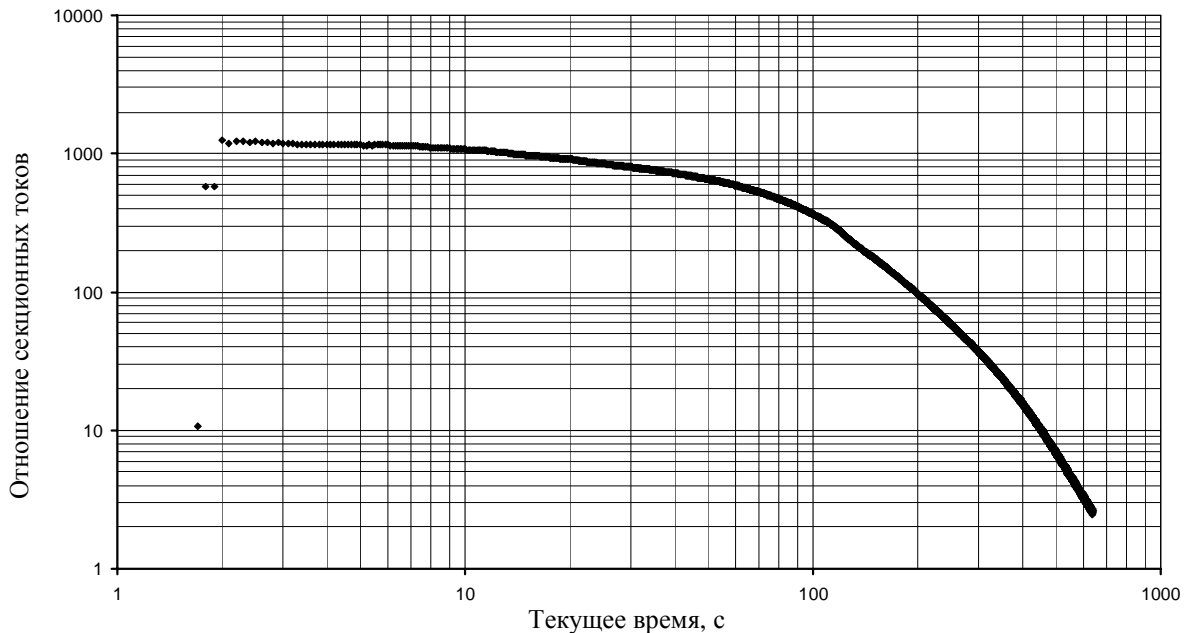


Рис. 8. Отношение тока n -секции к току γ -секции ПИК КНК-4 по завершении генерации импульса делений на мгновенных нейтронах БР-1М

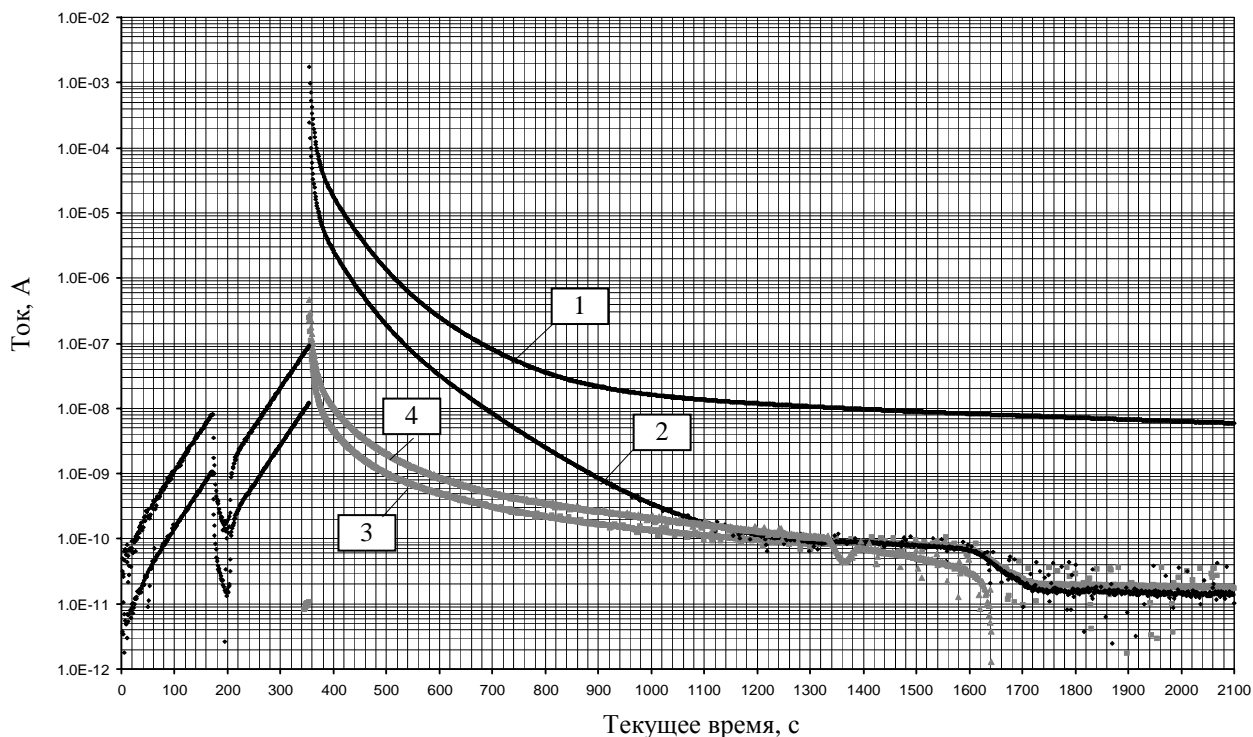


Рис. 9. Изменение тока КНК-15, секционных токов КНК-4 и тока КГК-2 в импульсе делений реактора ГИР-2: 1 – разностный ток КНК-15, 2 – ток n -секции КНК-4, 3 – ток γ -секции КНК-4, 4 – ток КГК-2

По мнению авторов, наиболее вероятная причина наблюдаемого эффекта – появление значимой сторонней составляющей тока n -секции КНК-15, обусловленной β -активностью осколков деления ^{235}U , образовавшихся в материале радиатора под воздействием значительного флюенса тепловых нейтронов, формируемого полиэтиленовым замедлителем вокруг детектора. В любом случае, при невозможности устранения выявленного эффекта, в значительный период времени после мощных импульсов на мгновенных нейтронах при использовании ПИК КНК-15 в контрольно-измерительных системах ИЯР необходимо учитывать особенности процесса релаксации детектора данного типа, не влияющие на его работоспособность в регистрационных трактах защитной ориентации, но однозначно влияющие на качество его работы в регистрационных трактах измерительной ориентации.

В целом, представленные в статье результаты свидетельствуют о перспективности использования практически всех серийно выпускаемых ПИК в контрольно-измерительных системах ИЯР с учетом основной функциональной направленности

таких реакторов на генерирование мощных импульсов делений на мгновенных нейтронах.

В то же время следует отметить явную недостаточность информационных данных, необходимых для эффективного использования серийных ПИК в качестве детекторов аппаратуры СУЗ ИЯР из-за различий в специфике их функционирования в составе СУЗ энергетических реакторов, являющихся предметом всестороннего освещения в научно-технической литературе, и в составе СУЗ ИЯР, о чем круг публикаций крайне ограничен. По мнению авторов, выявленные в процессе проведенных исследований различных серийных ПИК на ИЯР ВНИИЭФ БР-1М, БР-К1 и ГИР-2 особенности функционирования их как детекторов в составе контрольно-измерительных систем ИЯР однозначно свидетельствуют о необходимости организации исследований системного характера, направленных, в первую очередь, на выработку критериев предпочтительности использования ПИК конкретного типа в контрольно-измерительной системе конкретного назначения и установления сроков безотказной работы в реальных условиях их применения на ИЯР конкретного типа.

Список литературы

1. Мухачев С. В., Чередник П. Ф., Кушнарев А. Ф. и др. Система регистрации физических характеристик импульсного ядерного реактора // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 2, с. 51–54.

2. Овчинников М. А., Пикулина Г. Н., Богданов В. Н., Пичугин А. М. Автоматизированная система измерения физических характеристик реактора БИГР // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2011, вып. 3, с. 43–48.

3. Мингазов О. А. Модернизированная автоматизированная система контроля, управления и защиты ИЯР растворного типа // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2010, вып. 2, с. 83–88.

4. Дмитриев А. Б., Малышев Е. К. Нейтронные ионизационные камеры для реакторной техники. – М.: Атомиздат, 1975.

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

6. Одинцов Ю. М., Попов В. А., Кошелев А. С. и др. Исследование характеристик газонаполненных и вакуумированных камер деления типа КНК-15 в полях излучений с различным составом n -, γ -компонент // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1993, вып. 1–2, с. 3–8.

7. Одинцов Ю. М., Крыжановский А. А., Кошелев А. С. и др. Вакуумированные камеры КНК-15

для измерения потока нейтронов в поле излучения импульсного реактора // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1996, вып. 2, с. 65–71.

8. Виноградов Ю. И., Вьюшин А. Н., Овчинников М. А. и др. Измерение объемной активности в задачах радиометрии и радиохроматографии // Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами (ISISH-04). Сборник докладов Второго международного семинара. 12–17 апреля 2004 г. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 468–471.

9. Колесов В. Ф., Кувшинов М. И., Воронцов С. В. и др. Критические стенды и импульсные реакторы РФЯЦ-ВНИИЭФ // 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии: В 2-х выпусках. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. Вып. 1. С. 136–164.

Контактная информация –

Кошелев Александр Сергеевич,
ведущий научный сотрудник ИЯРФ, РФЯЦ-ВНИИЭФ,
тел. (831 30) 3-06-87

Статья поступила в редакцию 31.08.2012.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2012, вып. 3, с. 51–59.