

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ, СТРУКТУРНО ОПТИМИЗИРОВАННЫЙ КАНАЛ КОНТРОЛЯ ПАСПОРТИЗОВАННОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ РЕАКТОРОВ С КОМПАКТНОЙ АКТИВНОЙ ЗОНОЙ

А. С. Кошелев, К. Н. Ковшов, М. А. Овчинников, Г. Н. Пикулина, А. Б. Соколов

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

Представлены результаты апробации на реакторе БР-К1 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» варианта технического решения канала контроля паспортизованной мощности реактора с компактной активной зоной, выполненного с использованием в качестве детекторов нейтронов счетчика СНМ-11 и промышленных компенсационных камер КНК-4 и КНК-3, а в качестве измерительной аппаратуры – сертифицированных измерительных модулей ИМСН и ИМТК под управлением персонального компьютера со специализированным программным обеспечением.

Рассмотрены особенности метрологического обеспечения градуировки канала в необходимом формате контроля мощности реактора.

Ключевые слова: реактор, паспортизованная мощность, контроль паспортизованной мощности, счетчик нейтронов, нейтронная токовая камера, рабочий диапазон контроля мощности.

WIDE-RANGE STRUCTURALLY OPTIMIZED CHANNEL OF CERTIFIED POWER MONITORING FOR SMALL-CORE REACTORS / A. S. KOSHELEV, K. N. KOVSHOV, M. A. OVCHINNIKOV, G. N. PIKULINA, A. B. SOKOLOV // There are presented the results of testing on reactor BR-K1 (FSUE «RFNC-VNIEF») a version of technical decision for a small-core reactor channel of certified power monitoring produced with the use of SNM-11 counter and commercial compensation chambers KNC-4 and KNC-3 as neutron detectors. Certified measurement modules IMSN and IMTK are applied under the control of PC with specialized software as measurement equipment. There are considered the peculiarities of the channel calibration metrological provision in the required format of reactor power monitoring.

Key words: reactor, certified power, certified power monitoring, neutron counter, neutron current chamber, working range of power monitoring.

Введение

Задача определения и контроля энерговыделения на импульсных ядерных реакторах (ИЯР) с компактной металлической активной зоной (АЗ) имеет особый характер, отличающийся от общепринятого на ядерных энергетических установках. Ориентированные исключительно на функционирование в качестве мощных источников радиационных излучений, по уровням интегрального энерговыхода за кампанию ИЯР могут быть отнесены к установкам «нулевой» мощности, потому что такие важные факторы, как выгорание и накопление продуктов деления, сопутствующие работе энергетических установок, в рассматриваемом случае практически отсутствуют.

В основном режиме работы ИЯР – генерирование импульсов делений на мгновенных нейтронах – существует форсированное энергонагружение элементов конструкции из делящегося материала (ДМ), следствием которого является возникновение значительных динамических напряжений как в самих деталях из ДМ, так и в несущих элементах конструкции, не содержащих ДМ, но находящихся в непосредственном контакте с ними. Для ИЯР с компактной металлической АЗ основным фактором, ограничивающим возможности реактора как источника излучений, являются термодинамические напряжения в наиболее энергонагружаемых деталях из ДМ.

Импульсный характер энерговыхода обуславливает определяющую роль процессов, непосред-

ственно связанных с делением ядер соответствующих делящихся нуклидов (как правило, это ^{235}U и, в меньшей степени, ^{238}U): разлет осколков деления, вылет мгновенных нейтронов и γ -квантов. Сопровождающие процесс деления запаздывающие нейтроны, β -частицы и γ -кванты практически не оказывают влияния на размер энерговыхода на стадии генерирования импульса делений на мгновенных нейтронах. Однако заметная доля их парциального энерговыхода на деление (согласно [1], на долю запаздывающих излучений деления ^{235}U приходится 14,6 МэВ из общего энерговыхода 195,1 МэВ, что составляет 7,5 %) в условиях жестких ограничений на превышение предельно допустимых напряжений в деталях из ДМ при стремлении максимального приближения к допустимому пределу может стать причиной значимых расхождений при формулировании ограничительных условий по энергетическим параметрам (в частности, по полному энерговыделению в АЗ реактора).

В практическом плане [2] более определенными (непротиворечивыми) величинами для описания процесса энерговыделения в АЗ ИЯР, вне зависимости от характера его реализации (кроме импульса делений на мгновенных нейтронах на ИЯР предусматривается также генерирование импульсов на запаздывающих нейтронах и осуществление статических пусков с регламентированным энерговыделением), являются удельная плотность делений (число делений в 1 г ДМ) и полное число делений в АЗ реактора, соответствующее интегралу функции плотности делений по ДМ АЗ. Наличие детекторов, обеспечивающих возможность прямого измерения числа делений любого из делящихся нуклидов (малогабаритные ионизационные камеры деления, ИКД; покрытие электродов, содержащее соответствующие делящиеся изотопы; делительно-активационные детекторы с определением числа делений в них по γ -активности продуктов деления и т. п.), позволяет определять и контролировать необходимые энергетические параметры ИЯР в однозначно трактуемых величинах.

Компактность активной зоны ИЯР предопределяет также, в отличие от исследовательских и энергетических реакторов с объемной АЗ, невозможность размещения детекторов контроля мощности (энерговыделения) внутри АЗ, непосредственно в пространстве протекания процессов деления и формирования поля нейтронов, обуславливающих указанные процессы. Сказанное означает, что изученная (расчетно или экспери-

ментально, на стадии физпуска) связь между плотностью делений в конкретизированном пространстве внутри АЗ ИЯР и пропорциональным ей флюенсом нейтронов в том же конкретизированном пространстве не может быть непосредственно использована для калибровки каналов контроля энергетического функционала АЗ, нейтронно-чувствительные детекторы которых не только вынесены из АЗ и удалены от нее на значительное расстояние, но и заключены, как правило, в устройство трансформации нейтронов утечки из АЗ с целью обеспечения условий регулирования их чувствительности к контролируемому энергетическому параметру ИЯР.

На практике принята опосредованная форма калибровки каналов контроля мощности ИЯР (как первичной, так и осуществляемой повторно с установленной периодичностью) в два этапа. На первом этапе, возможном только на стадии физпуска, осуществляется максимально детализированное изучение пространственного энергораспределения по АЗ реактора; определяется связь требующих регламентации параметров с полным энерговыделением; выбирается монитор полного энерговыделения (как правило, активационный, с единственным долгоживущим продуктом активации) и его фиксированное место расположения (обычно внутри АЗ, в координатной позиции, максимально защищенной от влияния внешней загрузки объектами целевого использования ИЯР); устанавливается связь между полным энерговыделением в АЗ и выбранным для контроля параметром монитора (как правило, количество образовавшихся при реализации конкретизированного энерговыделения в АЗ ядер соответствующего радионуклида, определяемое по активности монитора с использованием высокоточных γ -радиометров). Установленная комиссией по физпуску связь между полным энерговыделением в АЗ и показаниями конкретизированного монитора для всей последующей кампании реактора фактически является паспортизованным параметром, который не может быть изменен без полномасштабного повторения осуществленной при физпуске метрологической процедуры.

Паспортизованная связь полного энерговыделения в АЗ с показаниями монитора обеспечивает возможность осуществления в процессе физпуска и в процессе эксплуатации ИЯР второго этапа калибровки, а именно калибровку каналов оперативного контроля текущей мощности при работе реактора в статическом режиме или в режиме генерирования импульсов делений на запаздываю-

щих нейтронах, а также калибровку активационных детекторов штатной методики определения полного энерговыделения в статическом и в импульсном (в том числе, и на мгновенных нейтронах) энергопусках реактора.

В настоящей статье вниманию заинтересованных профильных специалистов предлагается описание технического решения макетного варианта широкодиапазонного, структурно оптимизированного канала контроля паспортизованной мощности ШСО ККПМ, ориентированного на использование в системах контроля мощности ИЯР с компактной АЗ, и результаты его апробации на реакторе БР-К1 [3], включая детализированную конкретизацию процедуры калибровки с использованием концепции паспортизованной мощности.

Апробационное техническое решение

С учетом совокупного опыта построения контрольно-измерительных систем критических стендов и импульсных реакторов ВНИИЭФ [3], результатов изучения особенностей функционирования промышленных ионизационных камер в качестве детекторов контрольно-измерительной аппаратуры импульсных ядерных реакторов [4] и запатентованного предложения [5] было разработано техническое решение широкодиапазонного, структурно оптимизированного канала контроля паспортизованной мощности для реактора с компактной активной зоной ШСО ККПМ и скомплектован макетный вариант предлагаемого ККПМ, ориентированный для апробации на реакторе БР-К1 [6].

Структурная схема предлагаемого технического решения ККПМ представлена на рис. 1. Размещение детекторов тепловых нейтронов трех ти-

пов в едином детекторном блоке КДТН иллюстрирует схема, представленная на рис. 2.

Основную функциональную нагрузку по осуществлению контроля мощности реактора в предлагаемой структуре ККПМ призвана выполнять газонаполненная компенсационная камера КНК-4, обладающая широким диапазоном практически реализуемого изменения рабочего тока (от $\sim 10^{-10}$ А до $5 \cdot 10^{-4}$ А [7]), высокой чувствительностью к тепловым нейтронам ($1 \cdot 10^{-13}$ А·см²·с/нейтр. [7]) и конструктивно обеспеченным (путем индивидуальной пространственной локализации) независимым функционированием нейтронной и гамма-секций.

Включение в состав КДТН счетчика СМ-11 позволяет значительно снизить нижнюю границу контроля мощности реактора. Для использованной конфигурации КДТН и его расположения относительно АЗ реактора БР-К1 ($\sim 1,5$ м от поверхности АЗ) установлено, что току 10^{-10} А камеры КНК-4 соответствует интенсивность отсчетов счетчика СМ-11 ~ 4000 отсч./с.

Включение в состав КДТН камеры КНК-3 с чувствительностью к тепловым нейтронам $3,3 \cdot 10^{-15}$ А·см²·с/нейтр. и рабочим током до $5 \cdot 10^{-3}$ А [7] позволяет значительно поднять (в ~ 300 раз) верхнюю границу контроля мощности реактора. Использование камеры с борным покрытием электродов нейтронной секции позволяет исключить влияние наведенной активности в покрытии, характерное для камер с урановым покрытием электродов нейтронной секции, подверженных активации за счет осколков деления, которая искажает токограмму таких камер на участке спада мощности реактора после его работы на высоких уровнях мощности.

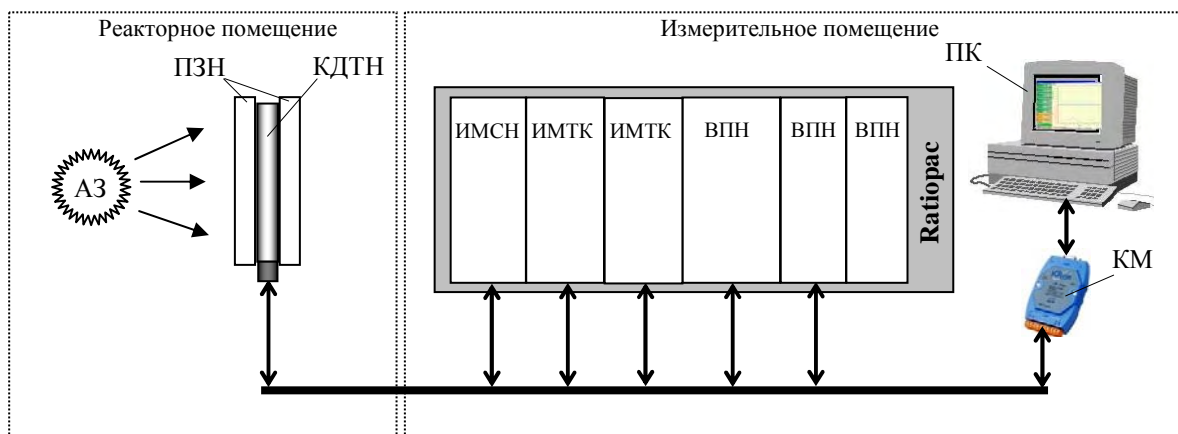


Рис. 1. Структурная схема ККПМ: АЗ – активная зона, ПЗН – полиэтиленовый замедлитель нейтронов, КДТН – комбинированный детектор тепловых нейтронов, ИМСН – измерительный модуль счетчика нейтронов, ИМТК – измерительный модуль токовой камеры, ВПН – выпрямитель питающих напряжений, ПК – персональный компьютер, КМ – коммутирующий модуль

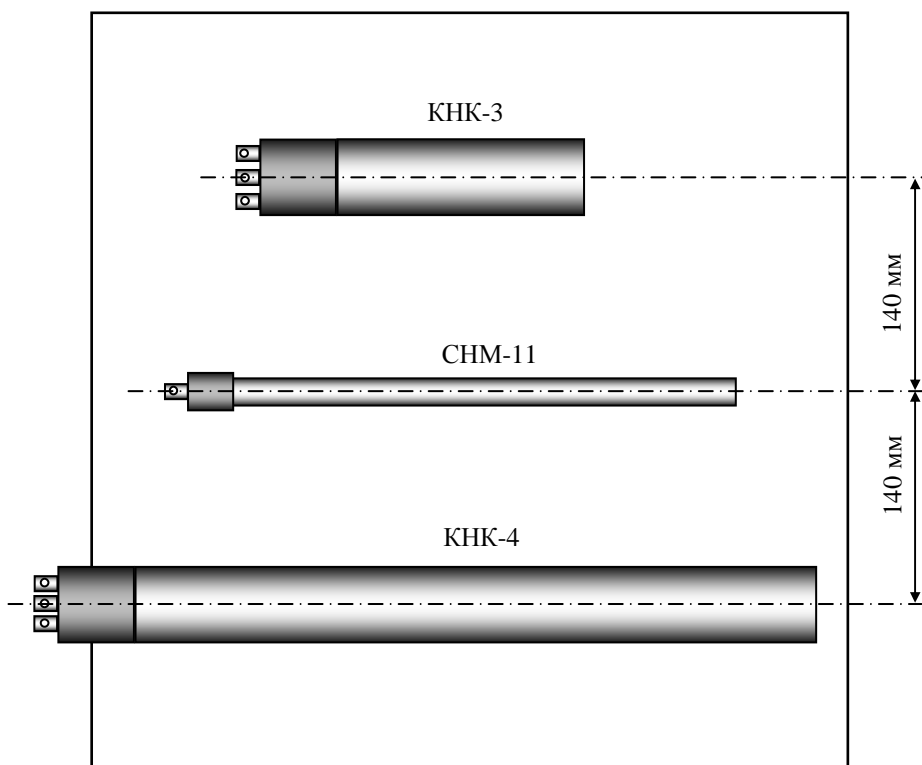


Рис. 2. Схема расположения детекторов КДТН на нижней плите полиэтиленовой сборки

Регистрационные особенности счетного тракта

Как известно [8], для всех систем регистрации числа отсчетов (счетных систем) детекторов элементарных частиц характерно наличие так называемого мертвого времени системы τ , с которым связан эффект просчета части событий, произошедших в детекторе в указанный интервал времени. Для простейших счетных систем принято осуществлять коррекцию просчетов с использованием соотношения $n_0 = n / (1 - \tau n)$, где n_0 – произошедшее число событий, n – зарегистрированное число событий, τ – мертвое время счетной системы.

На рис. 3 в графической форме представлены совмещенные в едином формате текущего времени результаты измерения интенсивности отсчетов (счета) СНМ-11 n_r и тока КНК-4 $n^{-\gamma} I_{\text{КНК-4}}$ на специально организованном участке роста мощности реактора с асимптотическим периодом ~ 37 с. Упрощенный сопоставительный анализ роста счета СНМ-11 и роста тока КНК-4 позволяет оценить мертвое время счетного регистрационного тракта $\tau \approx 3$ мкс.

Углубленный анализ регистрационных возможностей счетного канала с СНМ-11 был организован с использованием модельного представления функции счета СНМ-11 n_{0m} , сформированного с учетом характера изменения мощности реактора на участке моделирования и критерия минимизации расхождения модельной n_{0m} , реальной n_r и откорректированной n_c счетностей СНМ-11 на уровне не более 10^4 отсч./с. В качестве результирующего параметра рассматривалось отклонение счетности реальной n_r от модельной n_{0m} , определяемой в виде $\delta n_r = 100(n_r - n_{0m})/n_{0m}$ (%), и отклонение счетности откорректированной n_c от модельной n_{0m} , определяемой в виде $\delta n_c = 100(n_c - n_{0m})/n_{0m}$ (%). Для определения откорректированной счетности использовалось соотношение $\delta n_c = n_r / (1 - \tau n_r)$.

Итоговые результаты углубленного анализа представлены на рис. 4. Выборка данных для δn_c получена с использованием $\tau = 2,65$ мкс. Даже на первый взгляд можно констатировать значительное (практически на порядок, до уровня $\sim 10^5$ отсч./с) расширение диапазона счетной характеристики СНМ-11, более чем удовлетворительное при функциональной нагрузке регистрационного тракта с СНМ-11 в составе ККПМ.

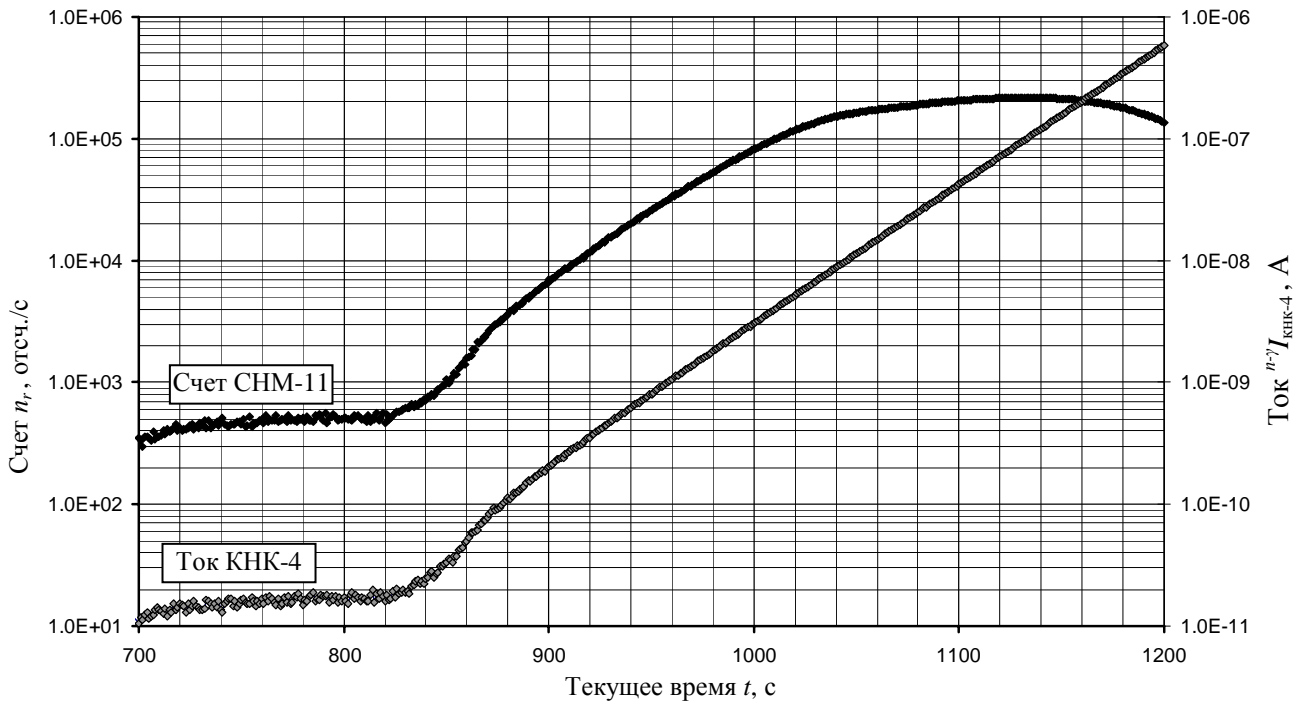


Рис. 3. Зарегистрированные в процессе разгона реактора БР-К1 с асимптотическим периодом ~ 37 с интенсивность отсчетов СМ-11 n_r и разностный ток КНК-4 $^{n-\gamma}I_{\text{КНК-4}}$

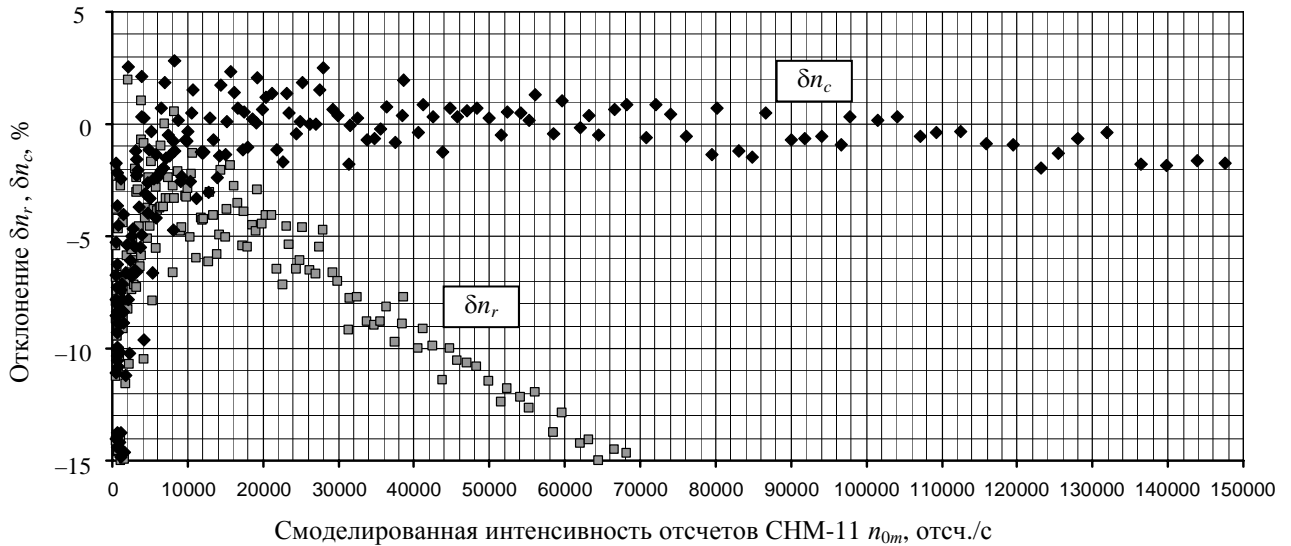


Рис. 4. Отклонения регистрируемой n_r и откорректированной n_c интенсивностей отсчетов СМ-11 от смоделированной интенсивности отсчетов n_{0m}

Формирование единой измерительной метрики (метрической шкалы)

На рис. 5 представлены откорректированная интенсивность отсчетов СМ-11 и разностные токи КНК-4 и КНК-3 в специализированном энергопуске реактора БР-К1 на участке роста мощности с асимптотическим периодом ~ 37 с. Пред-

ставленные на рис. 5 данные были использованы для определения соотношений $^{n-\gamma}I_{\text{КНК-4}}/n_c$ и $^{n-\gamma}I_{\text{КНК-4}}/^{n-\gamma}I_{\text{КНК-3}}$. Результаты этой операции представлены в графической форме на рис. 6.

Анализ данных рис. 6 показывает:

- в интервале текущего времени от 931 до 980 с имеет место выражено устойчивое отношение разностного тока камеры КНК-4 к откорректиро-

ванной интенсивности отсчетов счетчика СМ-11, в рамках ординарного определения среднеарифметического и его СКО [9] равно $2,92 \cdot 10^{-14}$ Кл/отсч. с погрешностью $\pm 0,27\%$ в интервале доверительной вероятности $P = 0,95$;

– в интервале текущего времени от 1201 до 1400 с имеет место выражено устойчивое отношение разностного тока камеры КНК-4 к разностному току камеры КНК-3, в рамках ординарного определения среднеарифметического и его СКО равно $18,9 \pm 0,014\%$ в интервале доверительной вероятности $P = 0,95$.

Наличие устойчивой, количественно конкретизированной связи между функционально значимым токовым откликом базового детектора КНК-4 и функционально значимыми откликами дополнительных детекторов (счетного СМ-11 и токового КНК-3) на репрезентативно протяженных временных интервалах обеспечивает возможность формирования единой метрики для отображения мощности реактора в два этапа:

– на первом этапе осуществляется перерасчет откорректированного счета СМ-11 в разностный ток КНК-4 с помощью множителя $2,92 \cdot 10^{-14}$ и разностного тока КНК-3 в разностный ток КНК-4 с помощью множителя 18,9 на выбранных интервалах сращивания показаний детекторов;

– на втором этапе определяется чувствительность базового детектора КНК-4 по соотношению $\varepsilon_{\text{КНК-4}} = *Q_{\text{КНК-4}} / Y$ Кл/дел.АЗ, где $*Q_{\text{КНК-4}} = \sum_t I(t) \Delta t$

для сформированной выборки данных с единой шкалой тока КНК-4, а Y – энерговыделение реактора по показаниям никелевого монитора в позиции, установленной комиссией по физпуску.

После определения $\varepsilon_{\text{КНК-4}}$ очевидным образом для чувствительности регистрационного тракта с СМ-11 имеем $\varepsilon_{\text{СМ-11}} = \varepsilon_{\text{КНК-4}} / 2,92 \cdot 10^{-14} = 3,43 \cdot 10^{13} \cdot \varepsilon_{\text{КНК-4}}$ отсч./дел.АЗ, а для чувствительности регистрационного тракта с КНК-3 имеем $\varepsilon_{\text{КНК-3}} = \varepsilon_{\text{КНК-4}} / 18,9 = 5,30 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon_{\text{КНК-4}}$ Кл/дел.АЗ. Осуществляя на программном уровне в режиме текущего времени перерасчет первичных показаний регистрационных трактов ККПМ в показания с размерностью «дел.АЗ/с», можно визуализировать контролируемую мощность реактора в процессе осуществления его рабочего пуска в статическом режиме и/или в режиме генерирования импульса делений на запаздывающих нейтронах в метрически единообразном энергетическом формате.

Результаты

На рис. 7 представлены результаты апробации скомплектованного технического решения ШСО ККПМ при расположении КДПН с детекторами СМ-11, КНК-4 и КНК-3 на расстоянии $\sim 1,5$ м от поверхности АЗ реактора БР-К1 в направлении к штатным контрольно-измерительным детекторам реактора в одном из специально реализованных энергопусков в режиме генерирования импульса делений на запаздывающих нейтронах.

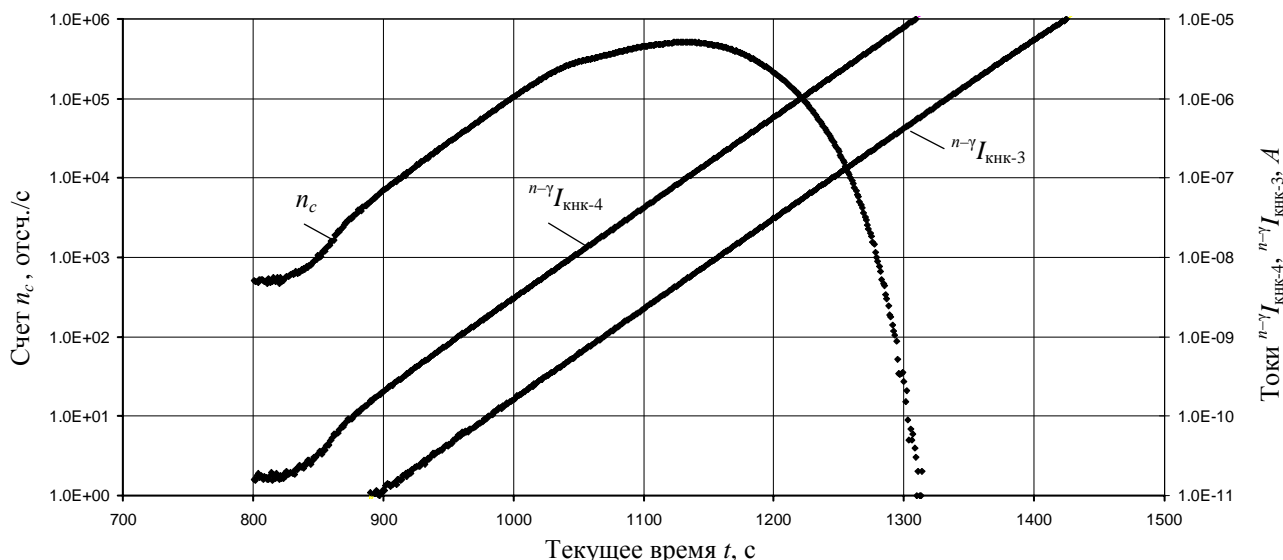


Рис. 5. Откорректированная интенсивность отсчетов СМ-11 n_c и разностные токи КНК-4 $n-\gamma I_{\text{КНК-4}}$ и КНК-3 $n-\gamma I_{\text{КНК-3}}$ на участке разгона реактора с асимптотическим периодом ~ 37 с, использованном для сращивания показаний детекторов

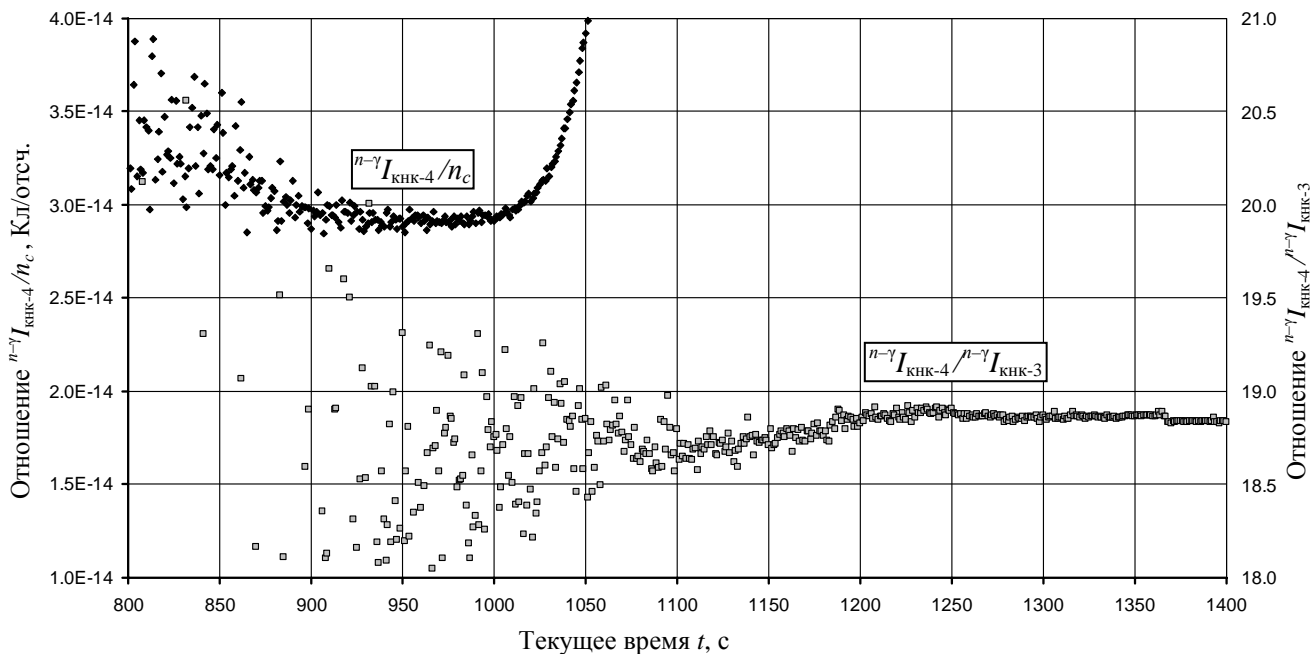


Рис. 6. Соотносительность разностного тока КНК-4 $n-\gamma I_{\text{КНК-4}}$ с откорректированной интенсивностью отсчетов СНМ-11 n_c и разностным током КНК-3 $n-\gamma I_{\text{КНК-3}}$

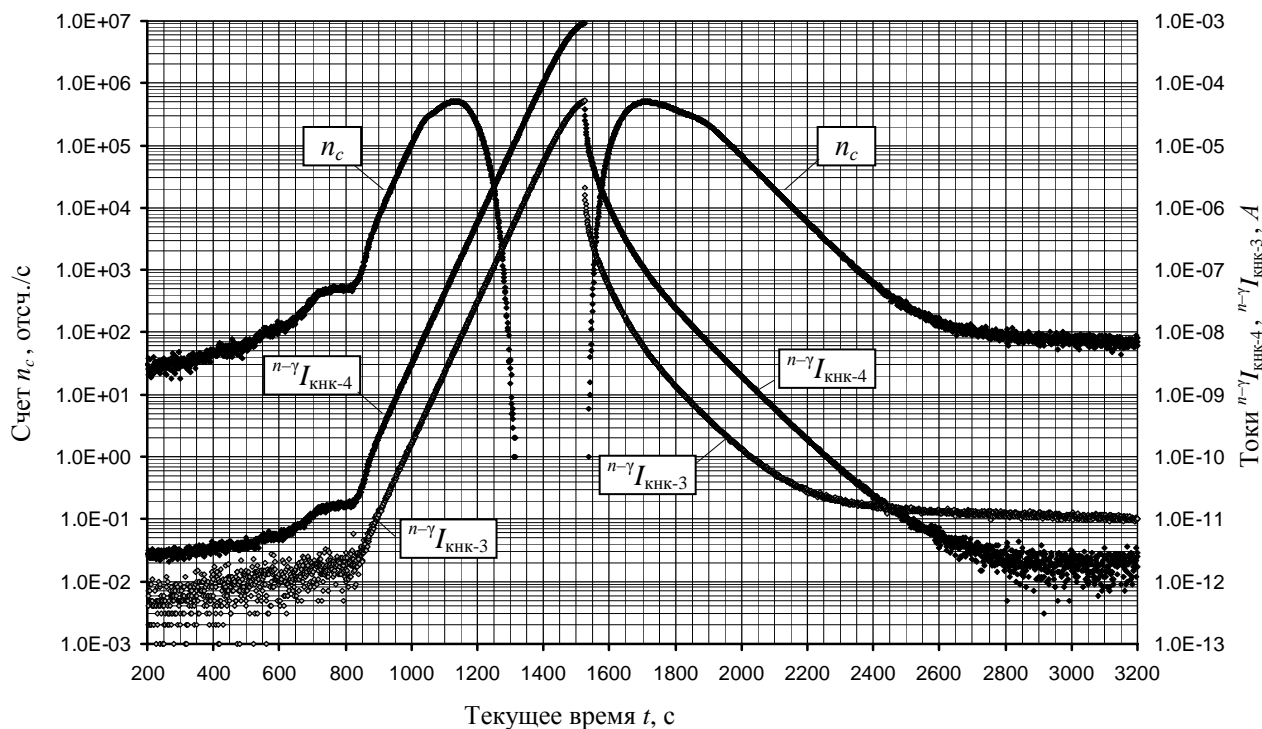


Рис. 7. Изменение откорректированной интенсивности отсчетов СНМ-11 n_c и токов КНК-4 $n-\gamma I_{\text{КНК-4}}$, КНК-3 $n-\gamma I_{\text{КНК-3}}$ в процессе осуществления апробационного энергопуска реактора БР-К1

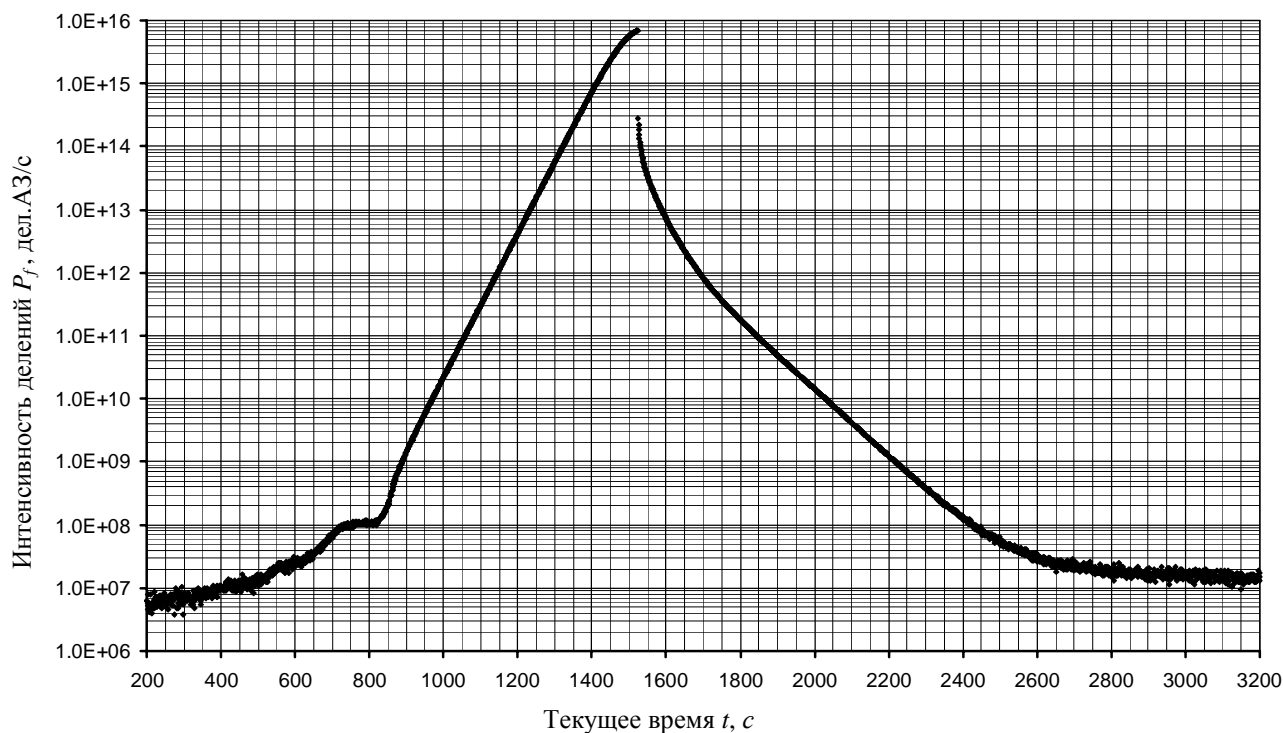


Рис. 8. Комбинированное представление изменения мощности реактора БР-К1 в апробационном энергопуске в метрике «дел.АЗ/с»

Регистрационная процедура осуществлялась в расширенном информационном формате, с раздельной регистрацией токов функциональных секций КНК-4 и КНК-3. Значения разностных токов, представленные на рис. 7, получены простым вычитанием тока γ -секции из тока нейтронной секции. В показания счетного регистрационного тракта введена корректирующая поправка с $\tau = 2,65$ мкс.

Переформатирование данных, представленных на рис. 7, в метрику тока КНК-4 осуществлялось следующим образом:

- численные значения n_c в единицах «отсч./с» в интервалах текущего времени от 1 до 970 с и от 1946 до 3200 с умножались на $2,92 \cdot 10^{-14}$ Кл/отсч., обеспечивая переход от счета СНМ-11 к току КНК-4 в А;

- численные значения тока $n^{-\gamma} I_{\text{КНК-3}}$ в интервале текущего времени от 1411 до 1525 с умножались на 18,9, обеспечивая переход от тока КНК-3 к току КНК-4;

- в интервалах текущего времени от 970 до 1410 с и от 1526 до 1945 с использовались значения тока $n^{-\gamma} I_{\text{КНК-4}}$ без изменения.

Суммарный заряд $*Q_{\text{КНК-4}}$ на интервале текущего времени от 1 до 3200 с определен равным $6,35 \cdot 10^{-2}$ Кл. Полное число делений в энергопуске, определенное по показаниям внутризонного нике-

левого монитора, рекомендованного комиссией по физпуску, получено равным $4,78 \cdot 10^{17}$ дел.АЗ. Соответственно для чувствительности базового регистрационного тракта с КНК-4 имеем $\epsilon_{\text{КНК-4}} = 1,33 \cdot 10^{-19}$ Кл/дел.АЗ, для регистрационного тракта с СНМ-11 $\epsilon_{\text{СНМ-11}} = 4,55 \cdot 10^{-7}$ отсч./дел.АЗ, а для регистрационного тракта с КНК-3 $\epsilon_{\text{КНК-3}} = 7,04 \cdot 10^{-21}$ Кл/дел.АЗ.

Результат переформатирования данных, представленных на рис. 7 в первичных единицах регистрации, в текущую мощность реактора во время реализации апробационного энергопуска представлен на рис. 8.

Из рис. 8 наглядно следует добротная широкдиапазонность избранного технического решения ККПМ, даже без использования токового резерва детектора КНК-3 обеспечивающего перекрытие изменения мощности реактора в пределах девяти порядков. При использовании токового резерва КНК-3 верхний предел контролируемой мощности может быть повышен до $\sim 10^{18}$ дел.АЗ/с. Практическая возможность обеспечения контроля мощности реактора с компактной АЗ с использованием трех типов промышленно изготавливаемых детекторов и единого трансформера удобной конструктивной компоновки в интервале от $\sim 10^7$ до $\sim 10^{18}$ дел.АЗ/с (от $\sim 0,3$ мВт до ~ 30 МВт) без

сомнения позволяет рекомендовать апробированное техническое решение ККПМ как перспективное при разработке и создании контрольно-измерительных систем таких реакторов.

Заключение

Исходя из обширного опыта разработки и эксплуатации каналов контроля статической (квазистатической) мощности реакторов с компактной активной зоной, предложена концепция паспортизованной мощности, согласно которой на стадии физпуска реактора устанавливается связь между физической мощностью (энерговыведением в АЗ) реактора и избранным комиссией по физпуску монитором, обеспечивающим на стадии эксплуатации нормированное (паспортизованное) отображение физически реальной энергетики реактора.

Анализ особенностей функционирования компенсационных ионизационных камер промышленного изготовления в полях излучений реакторов с компактной активной зоной позволил сформулировать критерии оптимизации для формирования комплектов детекторов, ориентированных на перекрытие широкого диапазона (от девяти порядков и более) контроля мощности статического (квазистатического) характера.

Наличие детекторов, отвечающих оптимизационному критерию, и доступного для использования аппаратно-измерительного комплекса требуемого уровня позволило оформить техническое решение и организовать его оперативную апробацию на реакторе БР-К1.

Результаты апробации в полной мере подтвердили и целесообразность внедрения в практику метрологического обеспечения контроля мощности понятия «паспортизованная», и целесообразность оптимизированной комплектации единого детекторного блока одним счетчиком нейтронов типа СНМ-11 и двумя компенсационными камерами типа КНК-4 и КНК-3, не содержащими электродов с покрытием из делящихся материалов.

Список литературы

1. Кипин Дж. Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1967.

2. Кошелев А. С., Маслов Г. Н., Одинцов Ю. М. Плотность делений и спектры нейтронов в активной зоне реактора БР-1. Мониторинг полного энерговыведения // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2001, вып. 1/2, с. 127–140.

3. 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 энергий. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011, вып. 1, 1335 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. Пат. № 2522708 РФ, МПК 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.

6. Босамыкин В. С., Малинкин А. А., Колесов В. Ф. и др. Конструкция и физико-технические характеристики бустер-реактора БР-К1 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1996, вып. 1, с. 3–12.

7. Дмитриев А. Б., Малышев Е. К. Нейтронные ионизационные камеры для реакторной техники. – М.: Атомиздат, 1975, 96 с.

8. Калашникова В. И., Козодаев М. С. Детекторы элементарных частиц. – М.: Изд-во «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1966, 407 с.

9. Брянский Л. Н., Дойников А. С. Краткий справочник метролога. – М.: Издательство стандартов, 1991, 76 с.

Контактная информация –

Кошелев Александр Сергеевич,
ведущий научный сотрудник ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
факс: (83130) 4-55-69

Статья поступила в редакцию 05.06.2015.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып. 4, с. 49–57.