

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВОЙ СТАДИИ ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА БР-К1М

**А. А. Девяткин, А. В. Арапов, Н. А. Красавин, А. Б. Соколов, А. В. Данилов,
И. М. Пискорский, С. П. Котков, А. В. Жирнов, П. В. Устюжанин, В. Х. Хоружий**

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

Статья поступила в редакцию 16.08.2021, после доработки – 14.09.2021, принята к публикации – 18.11.2021

В 2020 г. были проведены работы первой стадии физического пуска исследовательской ядерной установки БР-К1М. В работе приведены результаты критмассовых и физических исследований на ИЯУ БР-К1М. Описаны используемые методы измерений, состав и схемы экспериментального оборудования, применяемого для определения характеристик ИЯУ БР-К1М. Представлен сравнительный анализ полученных характеристик ИЯУ БР-К1М с характеристиками ИЯУ БР-К1 в части распределения плотности делений.

Ключевые слова: исследовательская ядерная установка, БР-К1, БР-К1М, метод Шестранда, метод ОРУК, опорные реактивности, метод Бабала, метод автокорреляции, относительное распределение плотности делений, эффективность счетного канала, эффективность токового канала, время жизни мгновенных нейтронов, активационный метод, прирост температуры.

THE FIRST STAGE RESULTS OF THE BR-K1M RESEARCH NUCLEAR REACTOR PHYSICAL COMMISSIONING / A. A. Devyatkin, A. V. Arapov, N. A. Krasavin, A. B. Sokolov, A. V. Danilov, I. M. Piskorsky, S. P. Kotkov, A. V. Zhirnov, P. V. Ustyuzhanin, V. Kh. Khoruzhy // In 2020 there were carried out the first stage activities on the research nuclear plant BR-K1M physical commissioning. The paper presents the results of critical mass and physical researches on research nuclear plant RNP BR-K1M. There are described measuring methods, configuration and schemes of experimental equipment applied to determine characteristics of RNP BR-K1M. The comparative analysis in fission density distribution between the obtained RNP BR-K1M characteristics and those of the RNP BR-K1 is presented.

Key words: nuclear research plant, BR-K1, BR-K1M, method of squares (Shestrend method), the method of inverse solution of kinetic equation (ORUK method), reference reactivities, Babal's method, autocorrelation method, relative distribution of fission density, counting channel efficiency, current channel efficiency, lifetime of prompt neutrons, activation method, temperature growth.

Введение

Бустер-реактор БР-К1 разработан во ВНИИЭФ и введен в 1995 г. в эксплуатацию. Он представляет собой многоцелевую ядерно-физическую установку, предназначенную для апробации элементов концептуального проекта

двухсекционного бустера-реактора «Каскад» (БР-К) с односторонней нейтронной связью секций, для проведения облучательных экспериментов в режиме автономного аperiodического импульсного реактора (ширина максимального импульса по проекту ~ 200 мкс,

энерговыведение 120 МДж) и короткоимпульсного (~10–15 мкс) бустера [1].

Именно предполагаемая проектом совместная работа с ускорителем в бустерном режиме с введением внутрь активной зоны (АЗ) пучка тормозного излучения и предопределила главные особенности установки БР-К (БР-К1):

- горизонтальное и совпадающее по высоте с осью ускорителя расположение центральной оси активной зоны;

- большой диаметр топливных блоков внешней АЗ-2, позволяющий разместить внутри секцию или АЗ-1 из порогового делящегося материала в вольфрамовой оболочке.

Герметичные чехлы из нержавеющей стали, использованные в БР-К1, являются наиболее распространенным средством защиты топливных элементов АЗ от коррозии и применяются во многих реакторах. Их нагрев в процессе генерации импульса может приводить к деформации и короблению, но до начала физического пуска БР-К1 в 1989 г. это не наблюдалось на практике. Деформация чехлов приводит к выбиранию зазоров между свободно падающими и неподвижными блоками активной зоны, что в свою очередь ведет к заклиниванию падающих блоков, невозможности срабатывания аварийной защиты и перевода реактора в заглушенное состояние. Расчеты [2] деформаций и напряжений показали, что выпучивание торцевых пластин и коробление чехлов в целом связано с потерей чехлами термоупругой устойчивости. До потери устойчивости наблюдаются только небольшие выпучивания торцевых пластин, а после чехол сильно перекашивается, более всего около внутренней цилиндрической обечайки. Смещения при этом достигают 0,5–1,0 см при плоском начальном зазоре между чехлами 0,3 см. В соответствии с вышеуказанными расчетными данными предусмотренные проектом технические характеристики реактора были серьезно ограничены (уменьшены более чем в 3 раза). Предельно допустимое значение полного энерговыведения в АЗ в импульсах на мгновенных и запаздывающих нейтронах – не более 36,5 МДж. В 1997 г. после аварии на установке ФКБН опытная эксплуатация реак-

тора БР-К1 была приостановлена. В декабре 2005 г. эксплуатацию реактора возобновили с учетом возросших требований безопасности – за счет демонтажа ветви высокого давления в пневмоприводе импульсного блока был исключен режим генерирования импульсов на мгновенных нейтронах.

Материалом АЗ является сплав урана с молибденом. АЗ реактора имеет кольцевую структуру, топливный материал АЗ разбит на диски, а диски – на коаксиальные кольца. Диски по одному или попарно заключены в герметичные, заполненные гелием чехлы. Аварийный блок (АБ) является основным элементом аварийной защиты, обеспечивая быстрый перевод реактора в глубоко подкритическое состояние. Импульсный блок (ИБ) и стоп-блок (СБ) размещены у торцевой стороны неподвижного блока 1 правого (НБ-1П) и имеют форму прямоугольного параллелепипеда. Эти блоки изготовлены из сплава бериллия и герметично заварены в титановые чехлы. Все подвижные блоки АЗ выполняют функции органов регулирования реактивности. Конструкция реактора обеспечивает независимое падение АБ, ИБ, СБ под действием силы тяжести, вызывая тем самым срабатывание аварийной защиты и перевод реактора в заглушенное состояние.

С развитием возможностей численного моделирования теплофизических процессов был обоснован и разработан проект модернизации исследовательской ядерной установки (ИЯУ) БР-К1 с целью повышения безопасности ее функционирования во всех режимах и вывода на параметры, близкие к проектным: генерированию импульса на мгновенных нейтронах с энерговыведением 91 МДж и длительностью не менее 600 мкс.

В соответствии с проектом модернизации ИЯУ БР-К1 проведены работы по ограниченному изменению состава оборудования и алгоритмов функционирования существующих составных частей:

- а) в топливных блоках АЗ заменен материал чехлов (оболочек) – нержавеющей сталь на титановый сплав марки ВТ20 – с сохранением габаритных и посадочных размеров топливных блоков и АЗ в целом;

б) введен вновь разработанный быстрый импульсный блок (БИБ) с исполнительным механизмом; БИБ введен как орган регулирования реактивности в импульсном на мгновенных нейтронах режиме;

в) введен вновь разработанный внешний трехсегментный отражатель из графита, предназначенный для восполнения убыли запаса реактивности при переходе на новую конструкцию топливных блоков и обеспечения безопасной ширины импульса в импульсах на мгновенных нейтронах;

г) введена система охлаждения АЗ для поддержания безопасной температуры топливных блоков АЗ в длительном статическом режиме;

д) модернизирована система управления и защиты (СУЗ);

е) установлены новые герметичные подвески ионизационных камер и камер деления в составе каналов контроля мощности;

ж) введены в эксплуатацию новые системы видеонаблюдения и громкоговорящей связи.

С февраля 2020 г. установка БР-К1М находится в процессе физического пуска, который ввиду большого объема работ во времени разделен на две стадии. В рамках первой стадии в соответствии с программой физического пуска была осуществлена сборка активной зоны реактора в технологических разборных титановых чехлах и монтаж графитового отражателя. По завершении монтажных работ проведены критмассовые исследования параметров модернизируемой установки БР-К1М.

1. Определение подкритичности активной зоны установки БР-К1М методом Шестранда

Измерения подкритичности установки БР-К1М проводились при ее размещении в рабочей позиции в реакторном зале, в защитном боксе и в бетонном проеме между реакторным залом и помещением с защитным боксом с использованием метода Шестранда.

Метод Шестранда, или метод площадей, состоит в измерении площадей под мгновенной и запаздывающей составляющими нестационарного потока нейтронов в подкритическом реакторе, возбужденном коротким импульсом от внешнего источника. Для реализации метода длительность импульса Δt должна быть много меньше характерного времени спада мгновенных нейтронов $1/\alpha$, т. е. $\Delta t \ll 1/\alpha$ (для ИЯУ БР-К1М $1/\alpha \sim 1,5 \cdot 10^{-5}$ с). Длительность нейтронного импульса генератора на уровне 0,5 амплитуды импульса составляет не более 1,2 мкс. Частота следования импульсов нейтронов должна быть такой, чтобы удовлетворять условию $\alpha \gg \nu_0 \gg \lambda$, где λ – максимальное значение постоянной распада запаздывающих нейтронов. Если устанавливается равновесная концентрация запаздывающих нейтронов, то

$$\rho/\beta_{эф} = S_p/TN_d, \quad (1)$$

где N_d – скорость счета детектора при регистрации запаздывающих нейтронов; $T = 1/\nu_0$; ν_0 – частота ИНГ-013; S_p – площадь под мгновенной составляющей нестационарного потока нейтронов.

Данный метод имеет недостаток, связанный с различием между пространственно-энергетическими распределениями мгновенных и запаздывающих нейтронов, что, в свою очередь, приводит к разной эффективности их регистрации. Это означает, что величина $\rho/\beta_{эф}$ будет зависеть от места положения детектора и его спектральной чувствительности [3].

Из опыта практического применения метода [4] для систем с отражателем известно, что при измерениях импульсный источник нейтронов помещали у наружной поверхности отражателя на уровне его середины. А детектор располагали либо в центре активной зоны, либо между активной зоной и отражателем. Измерения производились при помощи экспериментального оборудования и аппаратуры, представленной на рис. 1 в виде блок-схемы.

Регистрация нейтронного потока осуществлялась счетчиком нейтронов СНМ-14, размещенным внутри цилиндрического контейнера из полиэтилена, покрытого кадмием. Задание параметров работы и регистрация сигналов осуществлялись программным модулем, реализованным в среде LabVIEW.

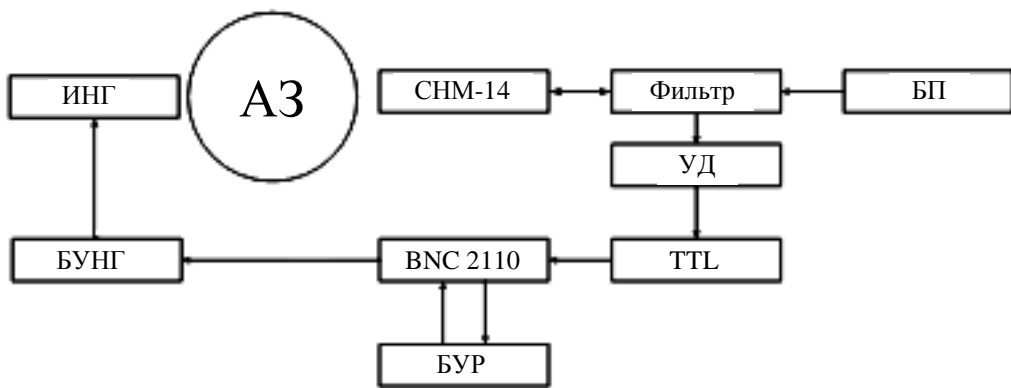


Рис. 1. Блок-схема экспериментального оборудования и аппаратуры: ИНГ – импульсный нейтронный генератор; БУНГ – блок управления нейтронного генератора; БП – высоковольтный блок питания; УД – усилитель-дискриминатор; Фильтр – согласующее устройство; TTL – преобразователь; BNC-2110 – блок коммутации; БУР – блок управления реактиметром Шестранда

В программном модуле регистрируемые импульсы с датчика суммируются в три канала, N_1 , N_2 , $N_{\text{хв}}$. Перед измерениями реактивности определяется скорость счета фоновых нейтронов $\Phi = N_{\text{фон}}/t_{\text{фон}}$ по результатам измерения за время $t_{\text{фон}}$. Далее запускается нейтронный генератор ИНГ. БУР выдает управляющий сигнал БУНГ на однократное включение нейтронного генератора каждые 50 мс в течение времени $t_{\text{инг}}$. После выдачи управляющего сигнала ведется запись импульсов регистрации мгновенной компоненты нейтронного потока N_1 , а затем производится подсчет импульсов от регистрации запаздывающей компоненты N_2 .

По истечении времени $t_{\text{инг}}$ работа генератора нейтронов прекращается и производится подсчет импульсов $N_{\text{хв}}$, обусловленных регистрацией спада запаздывающих нейтронов, в течение времени $t_{\text{хв}}$. Таким образом, время измерения реактивности определяется как $t_{\text{изм}} = t_{\text{инг}} + t_{\text{хв}}$.

Реактивность определялась по соотношению, являющемуся преобразованной формой отношения мгновенной и запаздывающей компонент нейтронного потока:

$$\rho = -\frac{2N_1 - N_2}{3N_2 + 2(N_{\text{хв}} - \Phi t_{\text{изм}})}. \quad (2)$$

Работоспособность описанной выше измерительной схемы, реализованной с исполь-

зованием аппаратного комплекса, представленного на рис. 1, была подтверждена измерениями известных значений подкритичности на реакторе БР-1М. Измерения по методу Шестранда сопровождались измерениями с использованием поверенного реактиметра ЦВР-10, разработанного и изготовленного в ГНЦ РФ ФЭИ.

Для определения подкритичности АЗ были проведены измерения в следующих геометриях, при этом органы регулирования реактивности всегда находились в исходном состоянии (на рисунках не показаны регулирующие блоки и их привод):

1. Активная зона установлена на стенде без графитового отражателя. Трубка импульсного нейтронного генератора размещена во внутренней полости подвижного блока (ПБ) и неподвижного блока второго (НБ-2), а детектор закреплен на опорной стойке, как показано на рис. 2. Стенд реактора находится в рабочей позиции в зале автономной работы.

2. Активная зона и графитовый отражатель установлены на стенде реактора. Датчик размещен во внутренней полости подвижного блока (ПБ) и неподвижного блока второго (НБ-2), а трубка импульсного нейтронного генератора размещена на нижнем боковом сегменте графитового отражателя, как это показано на рис. 3. Данная геометрия системы применялась при измерениях реактивности в рабочей позиции, в бетонном проеме и защитном боксе.

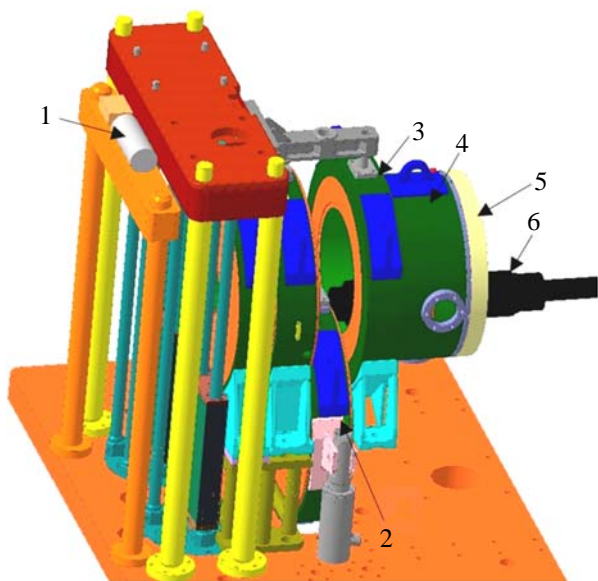


Рис. 2. Геометрия системы при измерениях реактивности в рабочей позиции без графитового отражателя: 1 – детектор; 2 – АБ; 3 – НБ-2; 4 – ПБ; 5 – отражатель латунный; 6 – трубка ИНГ-013

При проведении всех измерений уровень дискриминации усилителя-дискриминатора установлен в 400 мВ. Зарядное напряжение генератора подбиралось таким, чтобы величина N_d /импульс была в пределах от 11 до 17 отсчетов на один импульс генератора.

Для установки БР-К1М с графитовым отражателем в результате измерений получены следующие значения реактивности:

- в рабочей позиции: минус $21,7 \pm 0,7 \beta_{эф}$ ($K_{эф} \approx 0,865$);
- в бетонном проеме: минус $11,7 \pm 0,1 \beta_{эф}$ ($K_{эф} \approx 0,922$);
- в защитном боксе: минус $12,1 \pm 0,6 \beta_{эф}$ ($K_{эф} \approx 0,920$).

Реактивность установки БР-К1М без графитового отражателя имеет значение минус $25,8 \pm 0,8 \beta_{эф}$ ($K_{эф} \approx 0,843$). Полученные значения удовлетворяют требованиям безопасности стандарта СТО В Росатом 3031-2012 для систем на быстрых нейтронах, конструкция которых предусматривает окружение ДМ отражателями с толщиной не менее 0,05 м.

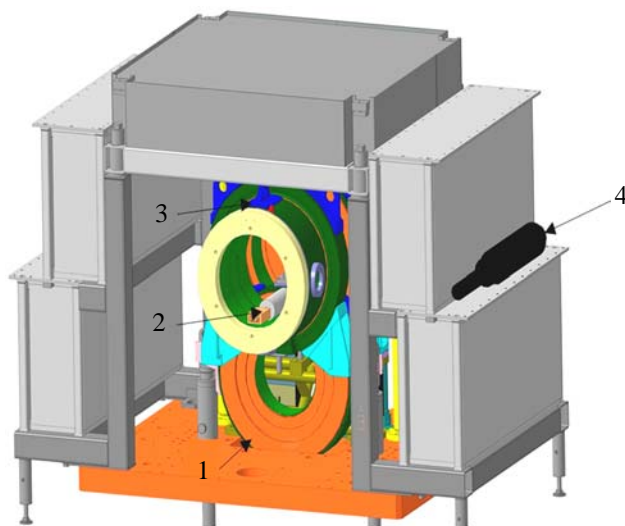


Рис. 3. Геометрия системы при измерениях реактивности в рабочей позиции, в бетонном проеме и защитном боксе, с графитовым отражателем: 1 – АБ; 2 – детектор; 3 – ПБ; 4 – трубка ИНГ-013

2. Определение опорных реактивностей при последовательном подъеме (введении) органов регулирования реактивности. Подбор критической конфигурации и необходимого запаса реактивности

Определение опорных реактивностей осуществлялось при последовательном подъеме (введении) ОРР в соответствии с реализованной в СУЗ БР-К1М последовательностью, оперативный контроль изменения реактивности АЗ осуществлялся реактиметром обратной кинетики.

Алгоритм определения реактивности формализован в виде:

$$\rho_j = 1 - \frac{S + \sum_{i=1}^m C_{i,j}}{n_j};$$

$$C_{i,j} = C_{i,j-1} E_i + A_i n_j - B_i n_{j-1};$$

$$E_i = \exp(\lambda_i \Delta t); \quad A_i = a_i \left[1 - (1 - E_i) / (\lambda_i \Delta t) \right]; \quad (3)$$

$$B_i = a_i \left[E_i - (1 - E_i) / (\lambda_i \Delta t) \right]; \quad C_{i,0} = a_i n_0;$$

$$\varepsilon n = N - N_\phi; \quad S' = S - \rho_j N_\phi;$$

$$\rho_j = 1 - \frac{S' + \sum_{i=1}^m C_{i,j}}{N_j}.$$

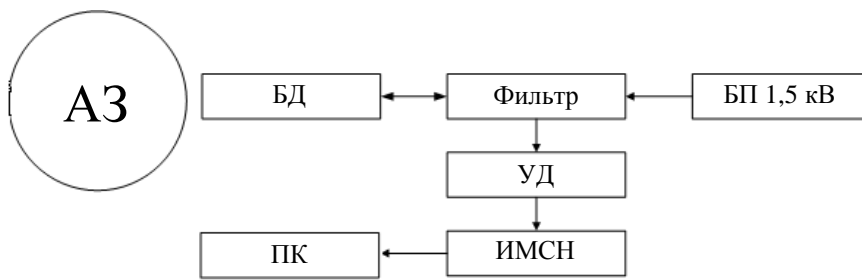


Рис. 4. Блок-схема ОРУК-реактиметра: БД – блок детекторов; БП – блок питания высоковольтный; УД – усилитель-дискриминатор; ИМСН-2 – счетный модуль; ПК – персональный компьютер; Фильтр – согласующее устройство

В приведенных выше соотношениях ρ_j – реактивность в единицах $\beta_{эф}$ в момент времени $t = j\Delta t$, n_j – скорость отсчетов в j -м интервале квантования времени Δt , m – число групп запаздывающих нейтронов, a_i и λ_i – константы i -й группы запаздывающих нейтронов, S – аналог внешнего источника нейтронов, N_ϕ – нейтронный фон, ε – эффективность детектора к регистрации плотности нейтронов.

При проведении работ счетный ОРУК-реактиметр был реализован согласно блок-схеме, представленной на рис. 4. Блок детекторов помещен в полиэтиленовый корпус-замедлитель и имеет 8 счетчиков нейтронов типа СМН-11. Блок был расположен на высоте 2,2 м от пола и на расстоянии 1,3 м до поверхности блока НБ-1П, как это показано на рис. 5. Сигнал с детектора поступал на усилитель-дискриминатор с блоком питания. В этом блоке сигналы с детектора усиливались, дискриминатором убирались шумы, и формировался оптический сигнал, считываемый на счетном модуле ИМСН-2. Счетный модуль передавал информацию на персональный компьютер.

Работоспособность описанной схемы реализации ОРУК-реактиметра была подтверждена в измерениях известных подкритичностей на БР-1М.

Для расчета реактивности с использованием регистрационных файлов для реактора БР-К1М был разработан комбинированный Excel-шаблон с 12-групповой системой параметров запаздывающих нейтронов. Шаблон включал таблицу с характеристиками запаз-

дывающих нейтронов и производными операторами E_i , A_i , B_i , C_i , N , Δt системы (3), ориентированными на запрограммированное использование с Excel-шаблоном для последовательного определения текущей реактивности.

Работа пользователя с Excel-шаблоном заключается в переносе шкалы текущего времени и зарегистрированных значений скорости счета в соответствующие ряды. При использовании ранее заполненного шаблона замена данных в других столбцах осуществляется автоматически в строках с ранее имеющимися значениями t и N .

Реактивность при этом рассчитывается по соотношению (3), преобразованному к виду

$$\rho_j = 1 - \frac{S_j - N_\phi + \sum_{i=1}^m C_{i,j}}{N_j - N_\phi}. \quad (4)$$

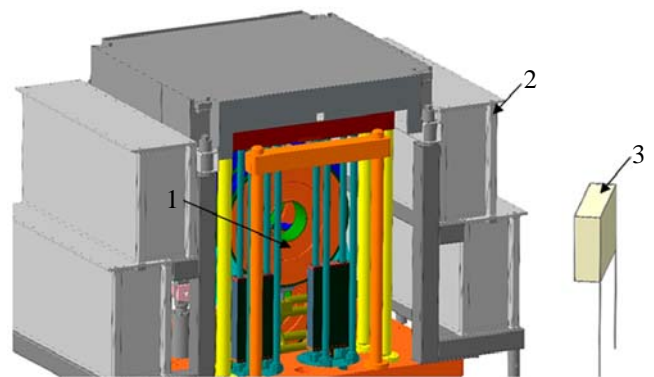


Рис. 5. Схема размещения блока детекторов реактиметра относительно АЗ реактора БР-К1М: 1 – активная зона БР-К1М в технологических разборных чехлах; 2 – графитовый отражатель; 3 – блок детекторов ОРУК-реактиметра

Определение параметров S и N_{ϕ} предполагает анализ переходных процессов способом, описанным в работе [5]. После скачка реактивности ρ_j выражения (3) содержат две неизвестные величины, S и N_{ϕ} . Поэтому необходимо построить зависимость $Y_i(N_j)$ для переходного процесса реактора из одного конечного состояния в другое и по методу наименьших квадратов (МНК) рассчитать два разных переходных процесса, для которых

$$Y_i = S' + \rho_j N_j; \quad (5)$$

$$S = -\rho_j (N_{ac} - N_{\phi}).$$

На основании этого был реализован и рассчитан переходный процесс «подъем и сброс СБ». Сопоставив выражения (5) и уравнения, полученные при линейной аппроксимации переходных процессов, можно найти ρ_j . При этом координаты точки пересечения аппроксимационных линий двух серий (подъем и спуск) являются параметрами S (ордината) и N_{ϕ} (абсцисса) [6]. Значения S и N_{ϕ} задаются в программу для оперативного расчета реактивности по методу ОРУК при последовательном вводе органов регулирования реактивности АЗ реактора БР-К1М.

Далее производится перемещение ОРР согласно логике СУЗ ИЯУ БР-К1М, регламентирующей последовательность их перемещения. Опорные реактивности, а также запас реактивности, были определены:

– при конфигурации АЗ, в которой отсутствует внешнее топливное кольцо из делящегося материала в блоке НБ-1П;

– при конфигурации графитового отражателя, в которой верхний сегмент графитового отражателя находится на высоте 570 мм от горизонтальной плоскости, проходящей через ось центральной симметрии АЗ, верхний боковой сегмент со стороны помещения защитного бокса – без графитовой кладки, остальные сегменты графитового отражателя – с графитом.

Значения парциальных реактивностей на полной базе перемещения каждого ОРР (кроме

АБ) были определены методом ОРУК в диапазоне реактивности АЗ от $-2,5\beta_{эф}$ до $0,3\beta_{эф}$. Реактивность, вносимая контейнером горизонтальной загрузки (КГЗ), была определена как разность реактивности АЗ с КГЗ и без него. Определенное значение реактивности, вносимой КГЗ в АЗ, составило $1,2\beta_{эф}$. Физический вес АБ определялся как разность реактивности АЗ после перемещения АБ до верхнего положения и реактивности, представляющей собой сумму значения реактивности АЗ в заглушенном состоянии, веса СБ и реактивности КГЗ.

Определенные значения опорных реактивностей, а также запас реактивности АЗ приведены в табл. 1. Согласно данным табл. 1, перемещение всех ОРР и КГЗ в положения с максимальным вкладом (полный ввод ОРР) увеличивает реактивность АЗ на $24,1\beta_{эф}$. Запас реактивности АЗ над нижним критическим состоянием составляет $2,4\beta_{эф}$. Общий сброс аварийной защиты (АБ, СБ и ИБ) уменьшает реактивность АЗ (суммарно) на $19,3\beta_{эф}$.

Таблица 1

Физический «вес» органов регулирования реактивности БР-К1М

Орган регулирования реактивности	Физический «вес», $\beta_{эф}$
Стоп-блок (СБ)	1,02
Аварийный блок (АБ)	17,18
Подвижный блок (ПБ)	2,25
Импульсный блок (ИБ)	1,05
Регулирующий блок первый (РБ-1) и регулирующий блок второй (РБ-2)	1,20
Быстрый импульсный блок (БИБ)	0,20

3. Определение времени жизни мгновенных нейтронов активной зоны ИЯУ БР-К1М

Важную роль при прогнозировании параметров импульса (длительность, максимальная мощность и др.) аperiodического импульсного реактора (АИР) играет постоянная спада при критичности на запаздывающих нейтронах [2], определяемая как

$$\alpha_c = \frac{\beta_{\text{эф}}}{\Lambda}, \quad (6)$$

где $\beta_{\text{эф}}$ – эффективная доля запаздывающих нейтронов; Λ – время генерации мгновенных нейтронов (для систем критических на запаздывающих нейтронах время жизни мгновенных нейтронов (l) и время генерации мгновенных нейтронов (Λ) равны) [2, 7].

Константа спада мгновенных нейтронов (или константа Росси-альфа) определяется временем жизни мгновенных нейтронов и коэффициентом размножения нейтронов,

$$\alpha = \frac{1-k(1-\beta_{\text{эф}})}{l} = \frac{1-k_p}{l} = \frac{\beta_{\text{эф}} - \tilde{\rho}}{\Lambda}, \quad (7)$$

где k – коэффициент размножения нейтронов; k_p – коэффициент размножения на мгновенных нейтронах; $\tilde{\rho}$ – реактивность;

или

$$\alpha = \frac{\beta_{\text{эф}}}{\Lambda} \left(1 - \frac{\tilde{\rho}}{\beta_{\text{эф}}} \right) = \alpha_c \left(1 - \frac{\tilde{\rho}}{\beta_{\text{эф}}} \right) = \alpha_c [1 - \rho], \quad (8)$$

где ρ – реактивность, выраженная в единицах $\beta_{\text{эф}}$, α_c – постоянная спада при критичности на запаздывающих нейтронах.

Приведенные выше выражения справедливы как для «голых» АИР и гомогенных АИР, так и для АИР с отражателем. Для систем с отражателем в двухзонном представлении [7] время генерации мгновенных нейтронов будет складываться из двух компонент: быстрой и медленной – и может быть записано системой уравнений

$$\begin{aligned} \alpha_1 \alpha_2 &= -\frac{\tilde{\rho} - \beta}{\Lambda_c} \cdot \frac{1}{\tau_r}; \\ \alpha_1 + \alpha_2 &= -\frac{\tilde{\rho} - \beta - f(1 - \beta)}{\Lambda_c(1 - f)} - \frac{1}{\tau_r}, \end{aligned} \quad (9)$$

где α_1 – постоянная спада в АЗ (быстрая); α_2 – постоянная спада в отражателе (медленная), $f = k - k_c$; k – эффективный коэффициент размножения АЗ с отражателем; k_c – эффективный коэффициент размножения ИЯУ БР-К1М без отражателя; τ_r – время жизни нейтронов в отражателе; Λ_c – время генерации мгновенных нейтронов в АЗ.

Время генерации мгновенных нейтронов Λ во всей системе (АЗ и отражатель) при этом будет составлять [7]

$$\Lambda = \Lambda_c + \frac{f\tau_r}{1-f}. \quad (10)$$

Имеется достаточно большое количество экспериментальных методов определения постоянной спада мгновенных нейтронов (константы Росси-альфа), основанных на счете нейтронов [8]. В данной работе использовались два метода: метод Бабала и метод автокорреляционного анализа.

Выражение для распределения счетно-счетных интервалов, используемое по методу Бабала, определяется как

$$p_{cc}(t)dt = A \exp(-N_0 t) [1 + B \exp(-\alpha t)] dt, \quad (11)$$

где A , B – нормировочные константы; N_0 – средняя счетность; α – постоянная спада на мгновенных нейтронах. Множитель $A \exp(-N_0 t)$ соответствует пуассоновскому распределению случайных событий, а множитель $B \exp(-\alpha t)$ – распределению коррелированных событий.

Для получения величины α (постоянной спада на мгновенных нейтронах) экспериментально найденное распределение счетно-счетных интервалов $p_{cc}(t)$ обрабатывается методом наименьших квадратов.

Выражение для функции метода автокорреляционного анализа определяется следующим образом:

$$\varphi_{cc}(t)dt = A + B_1 \exp(-\alpha_1 t) + B_2 \exp(-\alpha_2 t) dt, \quad (12)$$

где A , B_1 и B_2 – нормировочные константы; α_1 – «быстрая» постоянная спада на мгновенных нейтронах; α_2 – «медленная» постоянная спада на мгновенных нейтронах. Слагаемое A соответствует распределению случайных событий; слагаемое $B_1 \exp(-\alpha_1 t)$ – распределению коррелированных событий по мгновенным нейтронам; слагаемое $B_2 \exp(-\alpha_2 t) dt$ – распределению коррелированных событий по отраженным нейтронам.

При использовании автокорреляционного метода регистрируется спад как мгновенных

нейтронов, так и отраженных [8]. При использовании метода Бабала процессы регистрации мгновенных и отраженных нейтронов неравнозначны, что фактически исключает возможность регистрации коррелированных событий с участием отраженных нейтронов [9].

Структурная схема измерительного канала представлена на рис. 6. В качестве детекторов использовались два счетчика нейтронов СНМ-11. Первый детектор размещался во внутризонной полости АЗ, сформированной

блоками НБ-1П и НБ-1Л. Второй детектор устанавливался между АЗ и графитовым отражателем (ГО), вплотную к боковой поверхности НБ-1П (~300 мм от плоскости, проходящей через центр АЗ). Размещение детекторов СНМ-11 приведено на рис. 7. Для наглядности на рис. 7 некоторые элементы графитового отражателя, опорных стоек крепления АЗ, элементы конструкции исполнительного механизма БИБ не отображены.

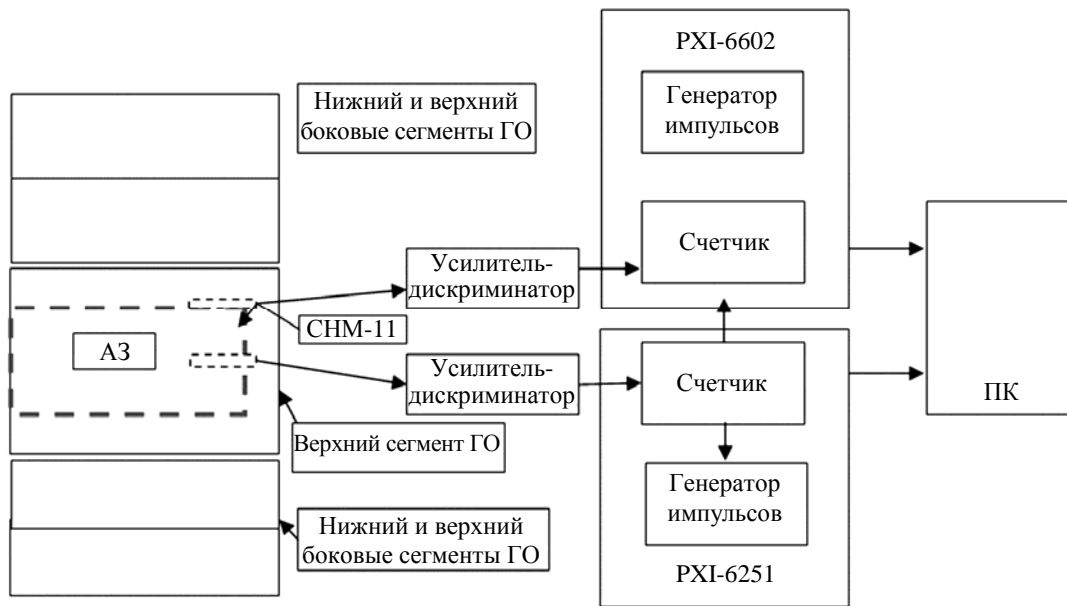


Рис. 6. Структурная схема измерительного канала

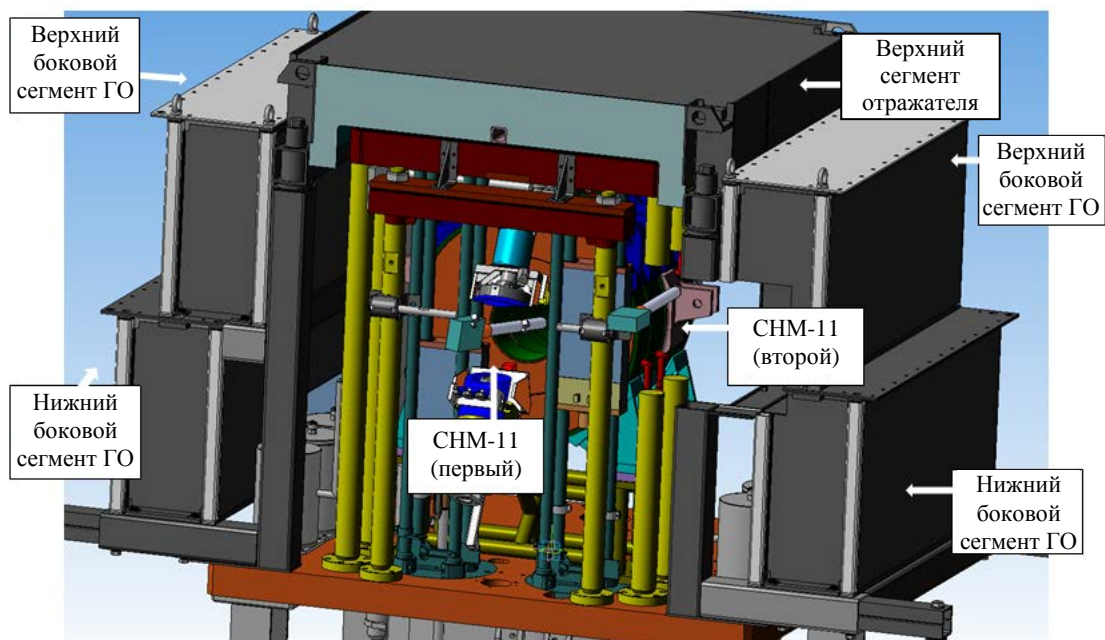


Рис. 7. Размещение детекторов СНМ-11

Измерения проводились в подкритическом состоянии реактора, в диапазоне реактивности от $-0,2\beta_{эф}$ до $-0,03\beta_{эф}$. Регулировка реактивности производилась перемещением следующих ОРР: регулирующего блока-1, регулирующего блока-2, подвижного блока, импульсного блока. В облучательную полость АЗ при проведении измерений загружались: пустой КГЗ, КГЗ с n - γ конвертором, КГЗ со свинцовым фильтром.

При измерениях по методу Бабала импульсы с детектора СНМ-11 после усиления поступали на многофункциональную плату NI PXI-6251. В интервале времени между двумя соседними импульсами, поступившими с детектора, счетчик платы подсчитывал импульсы, сформированные генератором импульсов (частотой 80 МГц), входящим в состав измерительной платы. В дальнейшем данные (подсчитанные импульсы за интервал времени) передавались с платы на персональный компьютер и в режиме реального времени подвергались математической обработке.

При измерениях автокорреляционным методом импульсы с детектора СНМ-11 поступали на плату NI PXI-6602. Генератор импульсов, входящий в состав измерительной платы, формировал тактовые импульсы частотой 100 кГц. Счетчик платы подсчитывал импульсы, поступившие с детектора за один период тактового импульса (10^{-5} с). При достижении вре-

мени в 1 с счетчик перезапускался, а массив данных (размерностью 10^5) передавался с платы на ПК и в режиме реального времени подвергался математической обработке (определялась автокорреляционная функция массивов данных).

Результатом математической обработки данных для одного измерения по методу Бабала являлась гистограмма распределения импульсов $p_{cc}(t)$ в зависимости от длительности временного интервала (пример типичной гистограммы приведен на рис. 8). Основываясь на соотношении оптимальности времени измерения и возможности провести обработку методом Бабала, шаг интервала гистограммы был выбран в 250 нс.

В целях достижения точности определения константы Росси-альфа при каждом измерении набиралась статистика не менее 100 000 отсчетов нейтронов.

Далее гистограмма обрабатывалась по МНК с использованием формулы (11). Результатом математической обработки данных для одного измерения по автокорреляционному методу являлась функциональная зависимость автокорреляционной функции $\varphi_{cc}(t)$ от длительности временного интервала (пример типичной зависимости приведен на рис. 9). Шаг временного интервала выбран в 10 мкс, исходя из возможностей измерительной аппаратуры.

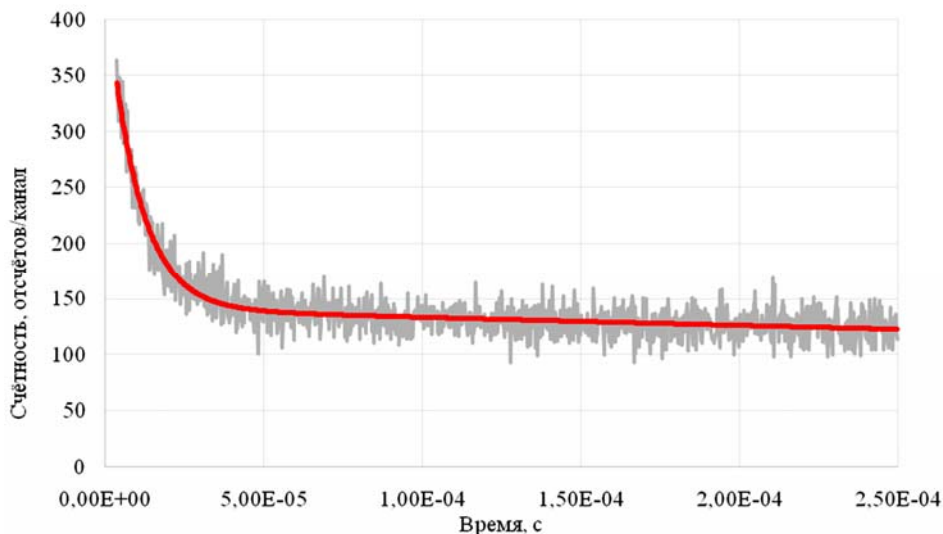


Рис. 8. Распределение счетно-счетных интервалов по методу Бабала для АЗ без ГО (— — экспериментальные данные; — — аппроксимированная кривая)

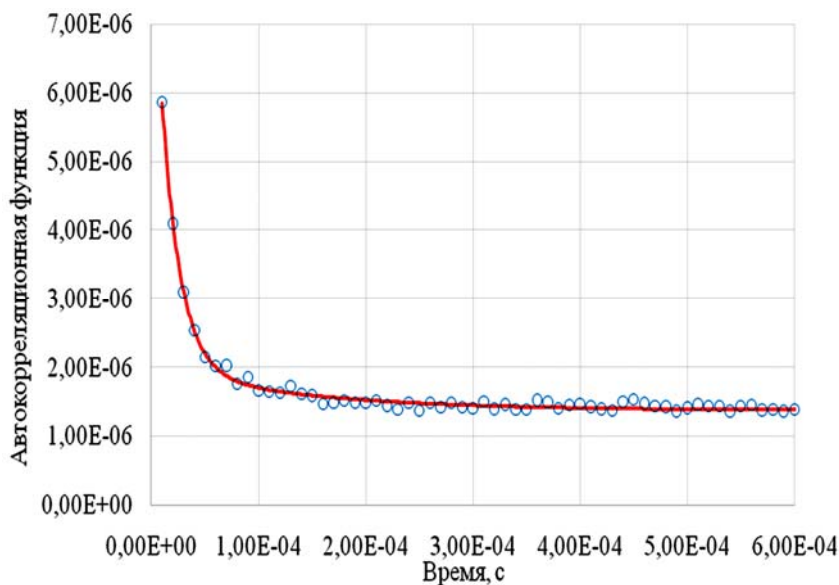


Рис. 9. Автокорреляционная функция для АЗ БР-К1М
(○ – экспериментальные данные; — – аппроксимация)

Далее полученная зависимость обрабатывалась по МНК с использованием формулы (12). Результаты определения времени жизни мгновенных нейтронов АЗ без ГО и АЗ с ГО при размещении во внутризонной облучательной полости пустого КГЗ, КГЗ с n - γ конвертором, КГЗ со свинцовым фильтром приведены в табл. 2. Полученные экспериментальные значения практически совпадают с проектными и гарантируют «безопасную» для уровня напряжений в топливных кольцах длительность импульса – не менее 600 мкс.

4. Определение эффективности наиболее чувствительных регистрационных трактов ККМ (I и II диапазонов)

Эффективность наиболее чувствительных регистрационных трактов каналов контроля мощности (ККМ) (счетный регистрационный тракт, имеющий в составе подвеску со счетчиком нейтронов СНМ-11, и токовый регистрационный тракт, имеющий в составе подвеску с камерой КНК-4) была определена по методике измерений физической мощности исследовательских ядерных установок.

Таблица 2

Результаты определения время жизни мгновенных нейтронов АЗ БР-К1М

Реактивность, $\beta_{эф}$	Время генерации мгновенных нейтронов в АЗ Λ_c , с	Время жизни нейтронов в отражателе τ_r , с	Время жизни нейтронов мгновенных в ИЯУ БР-К1М при критичности на запаздывающих нейтронах Λ , с	Примечания
-0,12	$8,1 \cdot 10^{-8}$	–	$8,1 \cdot 10^{-8}$	КГЗ пустой, АЗ без отражателя
-0,19	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	КГЗ пустой, АЗ с отражателем
-0,19	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	КГЗ с n - γ конвертором, АЗ с отражателем
-0,13	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	КГЗ со свинцовым фильтром, АЗ с отражателем

Регистрация скорости счета со счетного регистрационного тракта и текущих значений тока с токового регистрационного тракта и последующее суммирование зарегистрированных значений тока производилось аппаратурой отображения информации (АОИ) из состава СУЗ установки БР-К1М.

Эффективность токового регистрационного тракта определялась следующим образом. В основной опорной позиции (в центре на дне КГЗ) размещались два никелевых детектора диаметром 65 мм и толщиной 1 мм. После проведения облучения измерялся активационный интеграл каждого никелевого детектора. По двум полученным значениям определялось среднее значение активационного интеграла (A , реакций/ядро). Также в боковых опорных позициях размещались два никелевых детектора диаметром 50 мм и толщиной 1 мм, предназначенных для мониторингования энерговыделения в АЗ, при наличии объектов для облучения, размещаемых внутри КГЗ. Измерения никелевых детекторов проводились с использованием гамма-спектрометра многоканального для измерения рентгеновского и гамма-излучения.

По среднему значению активационного интеграла было определено энерговыделение в АЗ с использованием соотношения

$$E = \frac{A}{C} Y, \quad (13)$$

где $C = 1,37 \cdot 10^{-11}$ реакций/ядро – значение активационного интеграла в опорной позиции при энерговыделении (Y , Дж), равном $3,03 \cdot 10^7$ Дж в АЗ.

Эффективность токового регистрационного тракта с детектором КНК-4 (K_T , Дж/Кл) была определена по соотношению

$$K_T = E/Q, \quad (14)$$

где Q – величина электрического заряда, Кл.

Эффективность счетного регистрационного тракта ($K_{сч}$, Дж/имп) определялась следующим образом. Зарегистрированные значения тока (I , А) регистрационного тракта с подвеской с детектором КНК-4 сравнивались с заре-

гистрированными значениями скорости счета (N , имп/с) счетного регистрационного тракта. Были построены графики зависимости откорректированной скорости счета $N^{кор}(t)$ в диапазоне от $1 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^5$ имп/с и силы тока $I(t)$ от времени в соответствующем временном диапазоне в полулогарифмическом масштабе. Выбраны по графику номера точек, для которых наклоны зависимостей $I(t)$ и $N^{кор}(t)$ равны.

Корректированная скорость счета определялась по формуле

$$N^{кор} = \frac{N}{1 - N\tau}, \quad (15)$$

где τ – мертвое время счетного регистрационного тракта.

Для первого счетного регистрационного тракта значение $\tau = 2,5 \cdot 10^{-6}$ с, для второго – $\tau = 1,9 \cdot 10^{-6}$ с.

Эффективность счетного регистрационного тракта определялась по формуле

$$K_{сч} = K_T \frac{\sum_{j=J_0}^{J_1} I_j}{\sum_{j=J_0}^{J_1} N_j^{кор}}, \quad (16)$$

где K_T – эффективность токового регистрационного тракта, определенная по формуле (14), Дж/Кл; I_j – зарегистрированная сила тока j -го измерения, А; $N_j^{кор}$ – зарегистрированная и откорректированная по соотношению (15) скорость счета j -го измерения, имп/с; J_0 – номер первого измерения для выбранного участка; J_1 – номер последнего измерения для выбранного участка.

Определение эффективности наиболее чувствительных регистрационных трактов ККМ было проведено по трем статическим энергопускам с выходом на запланированное значение мощности с периодом увеличения мощности реактора ~ 45 с. Значения эффективностей наиболее чувствительных трактов ККМ, определенных по соотношениям (14) и (16), составили:

– для первого счетного канала ККМ
 $K_{сч1} = 6,220 \cdot 10^{-6}$ Дж/отс.;

– для второго счетного канала ККМ
 $K_{сч2} = 5,262 \cdot 10^{-6}$ Дж/отс.;

– для первого токового канала ККМ
 $K_{т1} = 6,477 \cdot 10^8$ Дж/Кл;

– для второго токового канала ККМ
 $K_{т2} = 6,640 \cdot 10^8$ Дж/Кл.

Значения коэффициентов связи активности боковых никелевых детекторов составили $C_{Y1} = 1,173 \cdot 10^{20}$ Дж·ядро/реакц. и $C_{Y2} = 1,094 \cdot 10^{20}$ Дж·ядро/реакц.

5. Изучение положения и величины максимума плотности делений с целью определения максимальной температуры разогрева топливных колец в каждом из блоков

В связи с тем, что одним из основных ограничивающих факторов предельных параметров реактора в импульсном режиме является максимальная температура разогрева топлива, наиболее важным было определение с возможно минимальной погрешностью абсолютной плотности делений в месте ее максимумов в каждом из блоков. Поскольку после заварки чехлов прямое измерение плотности делений в блоках практически исключено, то на первом шаге была получена относительная связь плотности делений в месте максимумов с плотностью делений в области, доступной для ее прямых измерений (в КГЗ). На втором шаге в выявленных максимумах в каждом блоке были размещены урановые слои и проведена серия статических облучений. Полное число делений в урановых слоях определялось по активности продуктов деления: ^{95}Zr , ^{97}Zr , ^{99}Mo , ^{132}I , ^{133}I , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{143}Ce . По числу делений в слоях оценены максимальные температуры разогрева топлива для энерговыделения 91 МДж.

5.1. Определение относительного распределения плотности делений в АЗ БР-К1М

Относительное распределение плотности делений по объему АЗ определялось по результатам измерений активационного интеграла детекторов из медной фольги по реакции $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$.

Детекторы были изготовлены из медной фольги (ленты) марки М1 (ГОСТ 618-73), их толщина составляла 50 мкм. Детекторы имели прямоугольную форму, ширина – 20 мм, длина в зависимости от высоты кольцевых элементов, между которыми устанавливался детектор, составляла: типоразмер 1–90 мм, типоразмер 2–100 мм и типоразмер 3–120 мм.

Каждый детектор предварительно упаковывался в слои алюминиевой фольги с суммарной толщиной ~40 мкм. Назначение алюминиевой фольги – экранирование медных детекторов от осколков деления, вылетающих из поверхности топливных колец. Для последующих измерений γ -активности слои алюминиевой фольги удалялись.

Детекторы размещались в зазоре ~0,5 мм между кольцами в вертикальном и горизонтальном направлении.

На дне КГЗ рядом с двумя никелевыми детекторами располагались два медных детектора из фольги прямоугольной формы размером 50×20 мм и толщиной 50 мкм. Активация медных детекторов производилась в статических пусках с одинаковым положением ОРР. Измерения детекторов проводились с использованием многоканального гамма-спектрометра для рентгеновского и гамма-излучения.

До измерений детекторы разрезались на две равные части в поперечном направлении. В измерениях определялась скорость счета импульсов в пике полного поглощения аннигиляционных гамма-квантов с энергией $E_{\gamma} = 511$ кэВ.

В процедуре обработки результатов измерений учитывалось отличие в относительной эффективности регистрации для детекторов различного типоразмера по длине (значения поправочных коэффициентов установлены в отдельной серии измерений). Измерения ак-

тивации медных детекторов проведены со статистической погрешностью не более 2 % (при $P = 0,95$). При нормировке результатов за единицу была принята активность медных детекторов, установленных в КГЗ.

Таким образом, были получены активности детекторов в относительных единицах и определены области с максимальным значением плотности делений в каждом из блоков АЗ.

В целях лучшего визуального восприятия информации на рис. 10 на разрезе АЗ (вертикальная проекция) показаны значения активности детекторов в относительных единицах. На рисунке обозначены оси координат: R , мм – расстояние по радиусу от центральной оси симметрии АЗ; L , мм – расстояние вдоль центральной оси симметрии АЗ. За начало координат (точка 0,0) выбрана точка пересечения центральной оси симметрии АЗ и плоскости, проходящей через торцевую поверхность крышки блока ПБ со стороны загрузочного устройства.

Для сравнительного анализа на рис. 11 приведено относительное распределение плотности делений по АЗ БР-К1 (данные физического пуска 1989 г.).

На рис. 10 и 11 синим цветом обозначены топливные кольца, белая область между кольцами означает зазоры. Цифры, приведенные в белой области, соответствуют относительным значениям активационного интеграла правой и левой частей разрезанного медного детектора.

В каждом блоке АЗ БР-К1 и АЗ БР-К1М красным цветом выделены максимальные значения относительного распределения плотности делений. Выделенные зеленой рамкой области АЗ БР-К1М (рис. 10) и желтой рамкой АЗ БР-К1 (рис. 11) содержат максимальные значения относительного распределения плотности делений для каждой АЗ. Для сравнения построены графики относительного распределения делений в АЗ БР-К1 и в АЗ БР-К1М, по длине АЗ при $R = 214,8$, вертикальная проекция (рис. 12).

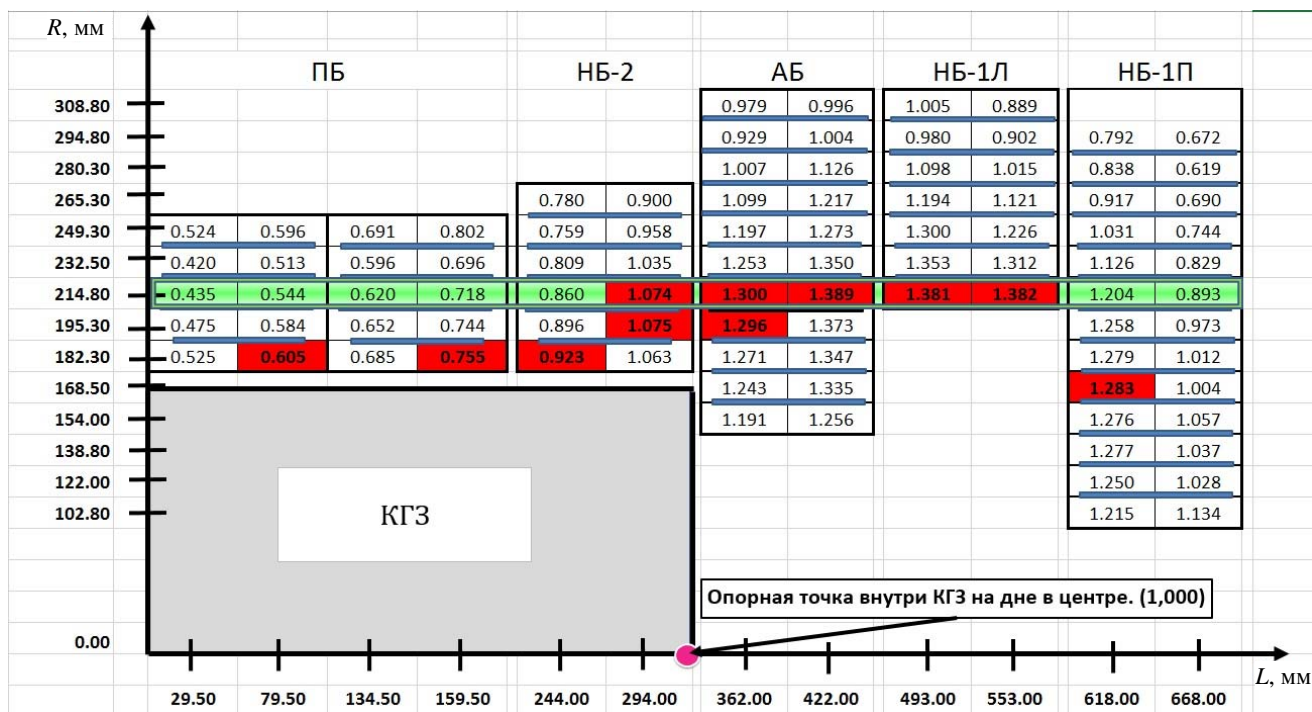


Рис. 10. Относительное распределение плотности делений АЗ БР-К1М в вертикальной проекции (данные физического пуска 2020 г.)

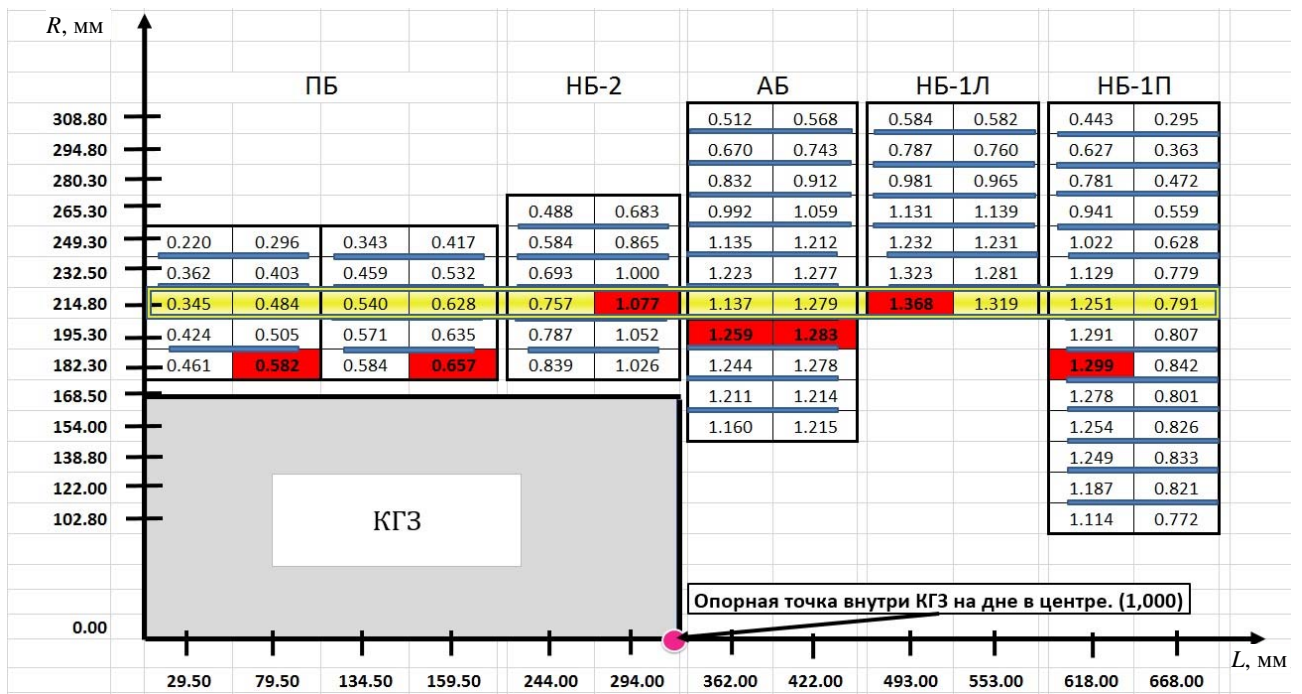


Рис. 11. Относительное распределение плотности делений АЗ БР-К1 в вертикальной проекции (данные физического пуска 1989 г.)

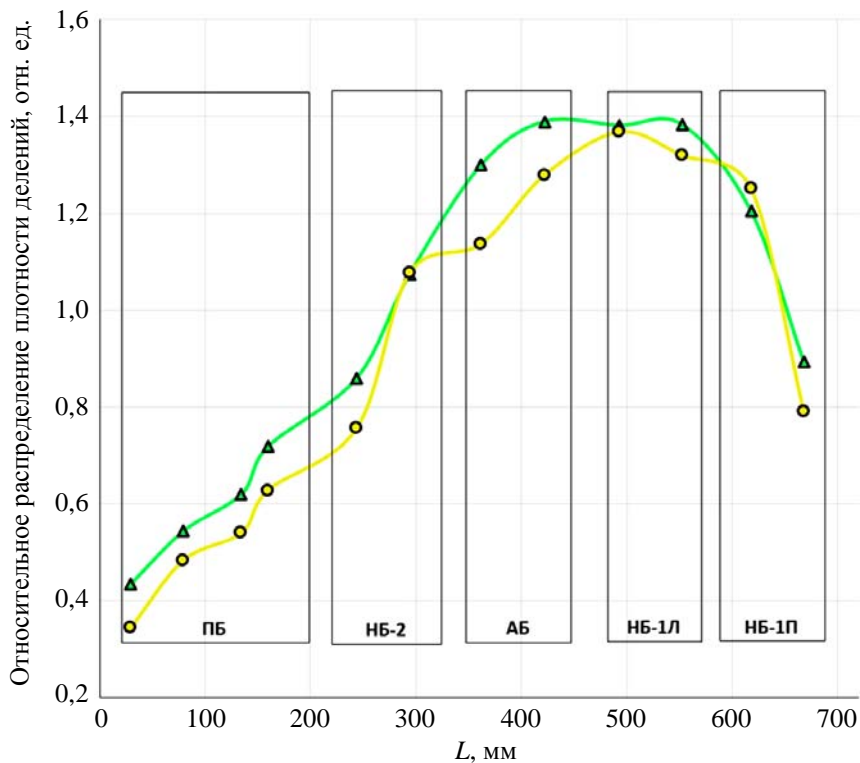


Рис. 12. Относительное распределение плотности делений в АЗ БР-К1 (●) и АЗ БР-К1М (▲), по длине АЗ при $R = 214,8$ мм (вертикальная проекция)

Из данных, приведенных на рис. 10–12, следует, что значение относительного распределения плотности делений в вертикальной

проекции АЗ БР-К1М по отношению к значению относительного распределения плотности делений в вертикальной проекции АЗ БР-К1:

- в блоке ПБ на ~15 % больше;
- в блоке НБ-2 в левой части на ~14 % больше, в правой – совпадает (отличие менее 1 %);
- в блоке АБ в левой части на ~14 %, а в правой – на ~9 % больше;
- в блоке НБ-1Л в левой части совпадает (отличие менее 1 %), а в правой – на ~5 % больше;
- в блоке НБ-1П в левой части на ~4 % меньше, а в правой на ~13 % больше.

Для анализа изменения относительного распределения плотности делений в АЗ БР-К1М по отношению к распределению плотности делений АЗ БР-К1 на рис. 13, 14 приведено относительное распределение плотности делений в вертикальной проекции вдоль радиуса R для АЗ БР-К1М и БР-К1. Графики приведены для областей АЗ, где наблюдаются максимальные значения относительной плотности распределения делений (АБ – правая часть, НБ-1Л – левая часть).

Из данных на рис. 13, 14 следует, что распределение относительной плотности делений по радиусу R в наиболее нагруженных областях АЗ, в целом, больше по величине для АЗ БР-К1М, чем для АЗ БР-К1, что связано с влиянием графитового отражателя (наибольшая разность значений относительного распределения плотности делений наблюдается у внешних колец, ближних к графитовому отражателю).

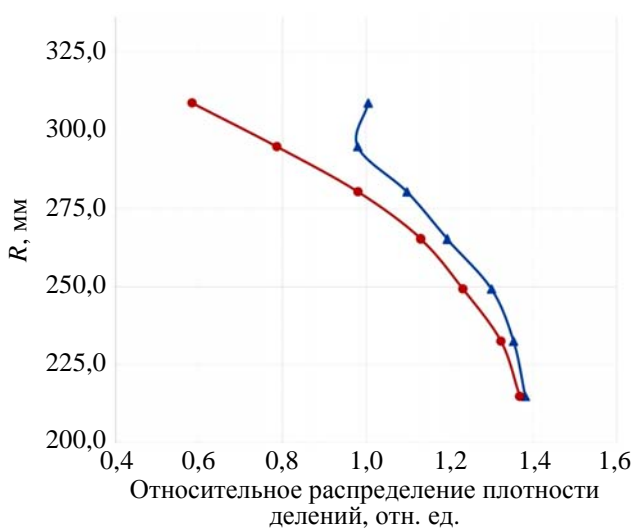


Рис. 13. Относительное распределение плотности делений в АЗ БР-К1М (▲) и АЗ БР-К1 (●), по радиусу блока АБ (правая часть) в вертикальной проекции, при $L = 422$ мм

5.2. Расчетно-экспериментальное определение температур в области максимального разогрева сплава уран-молибден в АЗ БР-К1М

По результатам облучений медных детекторов проведена серия статических облучений урановых слоев. Урановые слои представляли собой диски из металлического урана (с разным обогащением по изотопу ^{235}U) диаметром 10 мм и толщиной 0,3 мм, экранированные от осколков деления, выходящих из топлива, алюминием толщиной 100 мкм. Диски размещались в зазорах между кольцами в области максимума плотности делений в каждом блоке. Полное число делений в урановых слоях определялось по активности продуктов деления: ^{95}Zr , ^{97}Zr , ^{99}Mo , ^{132}I , ^{133}I , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{143}Ce .

По числу делений в слоях оценены максимальные температуры разогрева топлива при работе реактора в импульсном режиме для энерговыделения 91 МДж (максимальное по проекту энерговыделение, доступное для планирования). Отношение плотности делений в слоях из урана с разным обогащением по ^{235}U учитывалось на основе данных, полученных при физическом пуске БР-К1 в 1989 г. Так как АЗ реактора состоит из сплава U с молибденом (массовая доля – 9 %), то сей факт также учитывался при определении количества делений на грамм топлива.

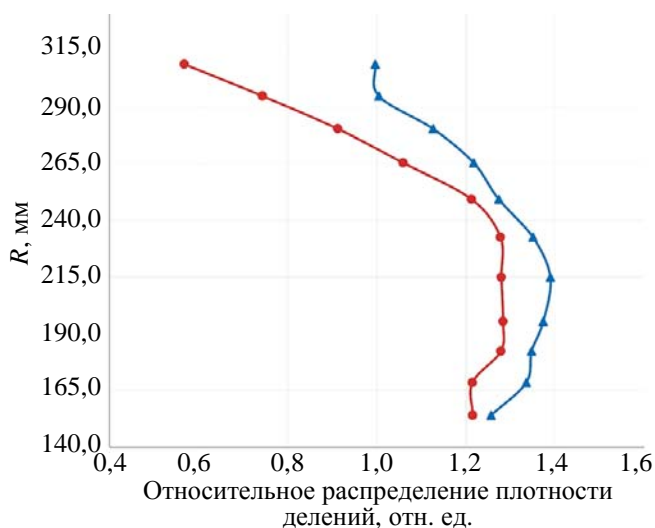


Рис. 14. Относительное распределение плотности делений в АЗ БР-К1М (▲) и АЗ БР-К1 (●), по радиусу блока НБ-1Л (левая часть) в вертикальной проекции, при $L = 493$ мм

Теплоемкость сплава уран-молибден C_p имеет следующую температурную зависимость:

$$C_p = 0,0344 + 1,1 \cdot 10^{-5} t \text{ [кал/г·градус]}. \quad (17)$$

Перепад температур ΔT , при котором удельная тепловая энергия, выделившаяся в материале АЗ, достигает значения q , определяется из выражения

$$q = \int_{t=0}^{\Delta T} C_p(t) dt \quad (18)$$

и принимает значение

$$\Delta T = \frac{-0,0344 + \sqrt{0,0344^2 + 2 \cdot 1,1 \cdot 10^{-5} q}}{1,1 \cdot 10^{-5}}. \quad (19)$$

Приросты температуры ΔT в областях максимума плотности делений в каждом блоке и нормированные на энерговыделение 91 МДж, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Приросты температуры ΔT в областях максимума плотности делений в каждом блоке для энерговыделения 91 МДж

Топливный блок	ПБ	НБ-2	АБ	НБ-1Л	НБ-1П
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	314 ± 22	470 ± 33	574 ± 40	590 ± 40	552 ± 39

Рассмотрим некоторые вопросы, касающиеся погрешностей в приведенных температурах разогрева топливных колец АЗ. Температура блоков является важнейшим параметром, определяющим эксплуатационные характеристики установки, в особенности, в месте максимальной плотности делений. Погрешность определения максимальной температуры разогрева включает в себя погрешность определения абсолютной плотности делений в опорной точке для образца из топлива ($\pm 3,7\%$ $P = 0,95$); ошибку измеренной относительной плотности делений в этой области

($\pm 2,5\%$ $P = 0,95$); ошибку теплоемкости топлива и ошибку в принятом энерговыделении за импульс на одно деление (180,4 МэВ). Проведенные ранее измерения [10] в центральном канале реактора БР-1 разогрева сплава ^{235}U с молибденом (массовая доля – 9 %) в интервале температур от 70 до 600 °С показали, что соотношение (17) для теплоемкости хорошо согласуется с измерениями в указанном интервале температур. Погрешность измерений температуры в этих исследованиях равнялась $\pm 3\%$ ($P = 0,68$). Отметим, что при сравнении измеренной температуры с расчетной по теплоемкости использовалось и значение величины энергии в одном акте деления 180,4 МэВ/дел в импульсе. С учетом указанных погрешностей результирующая погрешность определения T_{\max} равна $\pm 7\%$ ($P = 0,95$).

Следует отметить, что топливные кольца имеют довольно значительные высоты (от 90 до 120 мм) и диаметры, что вызывает в присутствии отражателей и конструктивных элементов АЗ заметные неравномерности в распределении плотности делений в импульсном режиме, даже в объеме одного отдельно взятого кольца. Поэтому в следующей номограмме (рис. 15) приведены расчетные средние температуры по кольцам каждого блока на момент выравнивания поля температур после импульсов с энерговыделениями 91 МДж (максимальное доступное для планирования) и 106 МДж (соответствует пределу безопасной эксплуатации).

Наибольшим тепловым нагрузкам (в целом по кольцу) подвержены соседние кольца одного диаметра, находящиеся в блоках НБ-1Л и АБ, также наибольшей тепловой нагрузке ($\Delta T_{\max} = 563^\circ\text{C}$ для энерговыделения 91 МДж) подвергается внутреннее кольцо блока НБ-1Л.

В табл. 4 представлено относительное распределение числа делений по структурным блокам АЗ БР-К1М в сравнении с данными предыдущего физического пуска БР-К1 в 1989 г.

91 МДж

ПБ	НБ-2	АБ	НБ-1Л	НБ-1П
147 213	296	311	342	–
173 249	347	365	400	265
194 271	383	439	479	342
201 271	399	490	529	401
	387	523	560	450
		535	563	488
		534		515
		528		528
		499		530
				525
				515
				495
				454

106 МДж

ПБ	НБ-2	АБ	НБ-1Л	НБ-1П
171 248	343	361	396	–
202 289	402	422	462	308
226 314	443	507	552	396
233 315	462	566	609	464
	447	603	646	520
		617	649	563
		616		593
		608		609
		575		611
				606
				594
				571
				524

Рис. 15. Средние расчетные температуры по кольцам каждого блока на момент выравнивания поля температур после импульсов с энерговыделениями 91 и 106 МДж

Таблица 4

Относительное распределение числа делений по структурным блокам АЗ БР-К1 и БР-К1М

Блок	Полное число делений, отн. ед.	
	БР-К1, данные физпуска 1989 г	БР-К1М
ПБ	0,103	0,110
НБ-2	0,116	0,111
АБ	0,265	0,269
НБ-1Л	0,219	0,230
НБ-1П	0,297	0,280
АЗ в целом	1,000	1,000

Заключение

В результате критмассовых исследований модернизированной установки БР-К1М получен ряд физических и технических параметров. Реактивность установки БР-К1М с активной зоной, окруженной графитовым отражателем, составляет:

– в рабочей позиции $-21,7 \pm 0,7 \beta_{эф}$ ($K_{эф} \approx 0,865$);

– в бетонном проеме между п. 107 и п. 108 $-11,7 \pm 0,1 \beta_{эф}$ ($K_{эф} \approx 0,922$);

– в защитном боксе $-12,1 \pm 0,6 \beta_{эф}$ ($K_{эф} \approx 0,920$).

Полученные значения удовлетворяют требованиям к «известной подкритической системе» стандарта СТО В Росатом 3031-2012 «Исследовательские ядерные установки. Требования ядерной и радиационной безопасности» для систем на быстрых нейтронах, конструкция которых предусматривает окружающие ДМ отражателями толщиной не менее 0,05 м.

Определено, что полный ввод всех органов регулирования реактивностью установки БР-К1М увеличивает реактивность АЗ на $24,1 \beta_{эф}$, что приводит к переходу реактивности АЗ через нижнее критическое состояние на $2,4 \beta_{эф}$. Запас реактивности АЗ удовлетворяет требованиям программы физического пуска.

Полученные экспериментальные значения времени жизни мгновенных нейтронов практически совпадают с проектными и гарантируют «безопасную» для уровня напряжений в топливных кольцах длительность импульса – не менее 600 мкс.

Определено относительное распределение плотности делений по объему АЗ и области с максимальным значением плотности делений.

По числу делений в слоях ^{235}U , размещенных в наиболее «горячих» областях АЗ, оценены максимальные температуры разогрева топлива при работе реактора в импульсном

режиме. Приросты температуры ΔT в областях максимума плотности делений в каждом блоке, нормированные на энерговыделение 91 МДж, составляют для НБ-1П 552 ± 39 °С, для НБ-1Л 590 ± 40 °С, для АБ 574 ± 40 °С, для НБ-2 470 ± 33 °С, для ПБ 314 ± 22 °С, что удовлетворяет требованиям проекта модернизации установки.

Список литературы

1. Павловский А. И., Малинкин А. А., Колесов В. Ф. и др. Двухсекционный бустер-реактор «КАСКАД» (БР-К) // ВАНТ: сер. Физика ядерных реакторов, 1992, вып. 3, с. 3–11.
2. Колесов В. Ф. Аперiodические импульсные реакторы. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2007. Т. 1.
3. Казанский Ю. А., Матусевич Е. С. Экспериментальные методы физики реакторов: Учебн. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
4. Теоретические и экспериментальные методы проблемы нестационарного переноса нейтронов: Сборник статей / Под ред. проф. В. В. Орлова и д-ра физ.-мат. наук Э. А. Стумбура. – М.: Атомиздат, 1972.
5. Попов В. А. Работа реактиметра обратной кинетики в условиях реального фона // ВАНТ, сер. Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 2, с. 54–56.

6. Попов В. А., Дюдяев А. М. Применение обращенного уравнения кинетики реактора для контроля реактивности подкритических размножающих систем. Атомная энергия. 1997, т. 82, вып. 3, с. 238–241.

7. Spriggs G. D., Busch R. D. The shift of prompt critical in reflected reactors and the limitations of the mean prompt-neutron lifetime model. – «Amer. Nuclear Society / Physics of Pulsed Reactors», November 13–17, 1994.

8. Уриг Р. Статистические методы в физике ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1974, 400 с.

9. Babala D. Neutron Counting Statistics in Nuclear Reactors. – Norwegian Report KR-114, November 1966.

10. Кошелев А. С., Никитин И. А., Терпелов В. Н., Турутов В. И. Нейтронный калориметрический детектор // ВАНТ. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки, 1986, вып. 1, с. 32–35.

Контактная информация –

Красавин Николай Александрович,
начальник группы эксплуатации установок
(комплексов) ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
e-mail: otd4@exped.vniief.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2021, вып. 4, с. 26–44.