

РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА РЕАКТОРА БР-1М С МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ АКТИВНОЙ ЗОНОЙ

THE RESULTS OF THE PHYSICAL START-UP OF THE REACTOR BR-1M WITH MODERNIZED CORE

А. А. Девяткин, М. В. Мочкаев, А. В. Арапов, И. Ю. Дроздов
A. A. Devyatkin, M. V. Mochkaev, A. V. Arapov, I. Yu. Drozdov

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров Нижегородской обл.

Federal Nuclear Center of Russia – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

В данной работе приведены результаты физического пуска аperiodического импульсного реактора БР-1М с модернизированной активной зоной, как в зале его автономной работы, так и в зале совместной работы комплекса ЛИУ-30+БР-1М.

In this work results of physical start-up of the aperiodic pulse BR-1M reactor with the modernized core, both are given in a hall of its autonomous work, and in a hall of collaboration of the LIU-30+BR-1M complex.

Импульсный бустер-реактор БР-1 [1] относится к классу аperiodических импульсных реакторов на быстрых нейтронах с компактными активными зонами (АЗ) из высокообогащенного металлического урана или его сплавов. Достоинством данного класса реакторов является жесткий спектр нейтронов (близкий к спектру деления), малая длительность импульса (от 40 до 100 мкс) и высокая плотность потока нейтронов (до $2 \cdot 10^{19}$ 1/(см²·с)). Основным ограничителем повышения параметров импульса реакторов этого класса фактически является прочность топливных элементов АЗ по отношению к механическим напряжениям, которые связаны в первую очередь с динамическими эффектами (тепловой удар) возбуждения вибраций в деталях и отчасти с неравномерным распределением поля температур по АЗ.

В 2009 г. в РФЯЦ-ВНИИЭФ завершен физический пуск реактора БР-1М с модернизированной АЗ. Модернизация АЗ проведена для снижения термомеханических напряжений при генерировании импульсов делений с целью существенного увеличения ресурса её работы при сохранении номинальных параметров импульса [2]. Кроме того герметизация структурных блоков АЗ сварным швом исключила частые разборки блоков для восстановления их герметичности и снизила дозовую нагрузку на эксплуатационный персонал.

Модернизированная АЗ реактора БР 1 по своим габаритным параметрам практически не отличается от старой конструкции и имеет форму полого цилиндра с центральной внутренней полостью – центральным каналом, предназначенным для загрузки облучаемых образцов. Размеры модернизированной АЗ по делящемуся материалу (ДМ): высота 264,6 мм, внешний диаметр 268 мм и диаметр осевой полости 116 мм. Для защиты ДМ от окисления топливные элементы (ТЭ) поблочно заключены в неразборные, заполняемые гелием чехлы из нержавеющей стали. Для уменьшения влияния на кинетику реактора нейтронов, отраженных стенами реакторного помещения, и исключения локальных перегревов ТЭ от водородсодержащих загрузок, АЗ окружена защитными экранами, содержащими ¹⁰B (толщина по ¹⁰B~0,3 г/см²).

Блоки АЗ функционально различны: верхний блок (ВБ) неподвижен, а подвижные нижний (НБ), регулирующий (РБ) и импульсный блоки (ИБ) используются в качестве органов регулирования реактивности (ОРР). Для снижения термомеханических напряжений при генерировании импульса верхний и нижний блоки структурно расчленены на слои в виде дисков с большим центральным отверстием. Каждый слой разбит в свою очередь на ряд коаксиальных колец (топливных элементов), каждое из них имеет уступ на середине высоты по всей окружности, с помощью которого оно опирается на соседнее кольцо или на опорные кольца из нержавеющей стали. Опорные кольца в свою очередь опираются друг на друга и в итоге на днища чехлов соответствующих блоков.

Схема новой АЗ реактора БР-1 в осевом разрезе представлена на рис. 1.

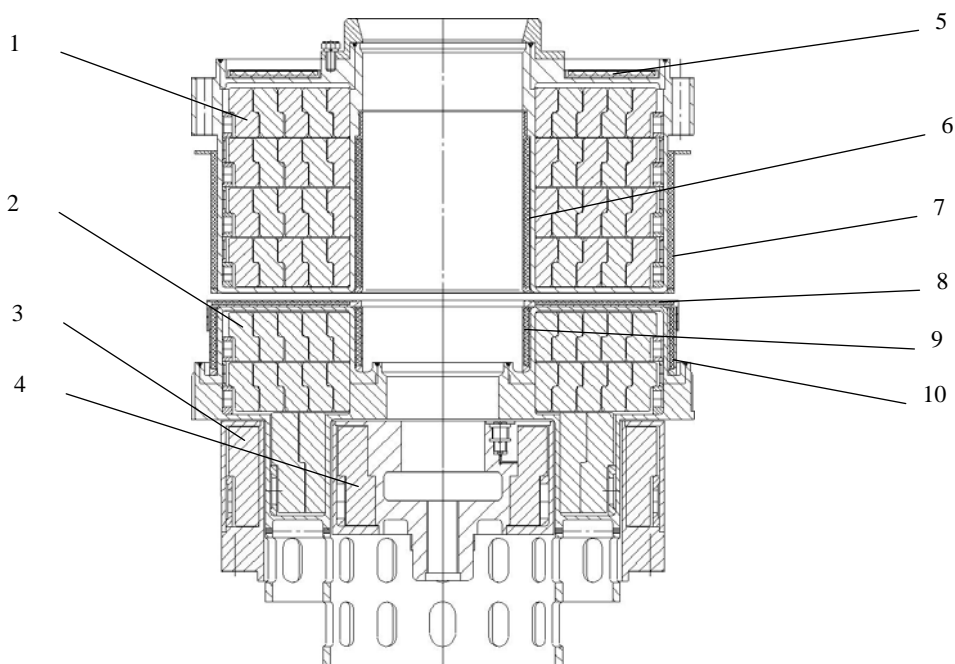


Рис. 1. Схема новой АЗ реактора БР-1 в осевом разрезе: 1 – блок верхний; 2 – блок нижний; 3 – блок регулирующий; 4 – блок импульсный; 5, 6, 7, 8, 9, 10 – экран с засыпкой из бора

Главные отличия новой конструкции АЗ от старой состоят в следующем:

- все ТЭ изготовлены из сплава урана с молибденом (массовая доля изотопа ^{235}U в уране – 90 %) с увеличением содержания массовой доли молибдена до 10 % по сравнению с ранее использованным сплавом (9 %), что заметно повышает (на 10–20 кг/мм²) значения прочности сплава во всем рабочем интервале температур от 20 °С до 600 °С;

- для дальнейшего снижения механических напряжений применен способ большего структурного членения ДМ по высоте АЗ. Количество слоев колец в ВБ увеличено с двух до четырех, а в НБ – с двух до трех;

- для исключения противофазных столкновений ТЭ друг с другом в радиальной плоскости радиальные зазоры между ними увеличены с 0,33 до 0,53 мм;

- для достижения необходимого значения $K_{\text{эфф}}$ новой АЗ горизонтальные зазоры между слоями ТЭ уменьшены с 1,0 до 0,6 мм;

- для снижения концентрации напряжений радиусы закругления в зонах уступов и торцов всех ТЭ увеличены с 1,0 до 1,5 мм;

- для гарантированного исключения процесса поверхностного коррозионного растрескивания ТЭ под действием кислорода воздуха чехлы всех блоков загерметизированы сварным швом;

- общая масса сплава в новой АЗ уменьшена со ~177 до ~172,9 кг.

В процессе физического пуска проведено исследование ядерно-физических и метрологических характеристик реактора, как в зале его автономной работы, так и в зале совместной работы комплекса ЛИУ-30+БР-1 [3].

Для экспериментального подтверждения обоснованности ограничения по максимальному импульсному энерговыделению в АЗ (8,7 МДж, что соответствует числу делений в АЗ: $3 \cdot 10^{17}$), установленного на основании расчетных данных о пределах упругой деформации ТЭ новой АЗ, процесс физического пуска был разделен на два этапа. Первый (предварительный) этап, включающий генерирование 10 импульсов делений на мгновенных нейтронах, проводился при размещении ТЭ в чехлах с разборным болтовым соединением, второй (основной) – при размещении ТЭ в неразборных чехлах с герметизацией сварным швом. Для доказательства исключительно упругого характера деформирования ТЭ в процессе генерирования импульсов между этапами был проведен инструментальный контроль самых энергонапряженных ТЭ на отсутствие в них пластических деформаций.

Предварительный этап был начат с компоновки топливных элементов по верхнему и нижнему структурным блокам АЗ с обеспечением требуемых горизонтальных тепловых зазоров между слоями колец. При сборке АЗ ТЭ с относительно большим суммарным содержанием примесей и углерода, в частности, были размещены в менее термонапряженных областях АЗ.

В дальнейшем были определены:

- реактивность АЗ реактора в единицах $\beta_{эфф}$ в заглушенном состоянии и подобран полный запас реактивности для АЗ без штатных загрузочных механизмов: $0,19 \beta_{эфф}$ над мгновенной критичностью при полностью поднятых ОРР;
- вклады в реактивность АЗ контейнера вертикальной загрузки (КВЗ), экранов – отражателей штатных загрузочных механизмов и штатного нейтронного источника;
- относительное распределение плотности делений в ВБ и НБ АЗ (представленное на рис. 2), а также влияние на распределение плотности делений по АЗ секции штатного n - γ конвертора, размещенного вплотную к боковой поверхности АЗ.

Влияние n - γ -конвертора заключается в незначительном перераспределении максимума плотности делений в сторону загрузки при выраженном понижении пикового значения. Хорошая экранировка АЗ штатными и дополнительным (из насыпного карбида бора естественного изотопного состава толщиной 10 мм) борными экранами позволяет не накладывать дополнительных ограничений на энерговыделение при работе реактора с n - γ -конвертором.

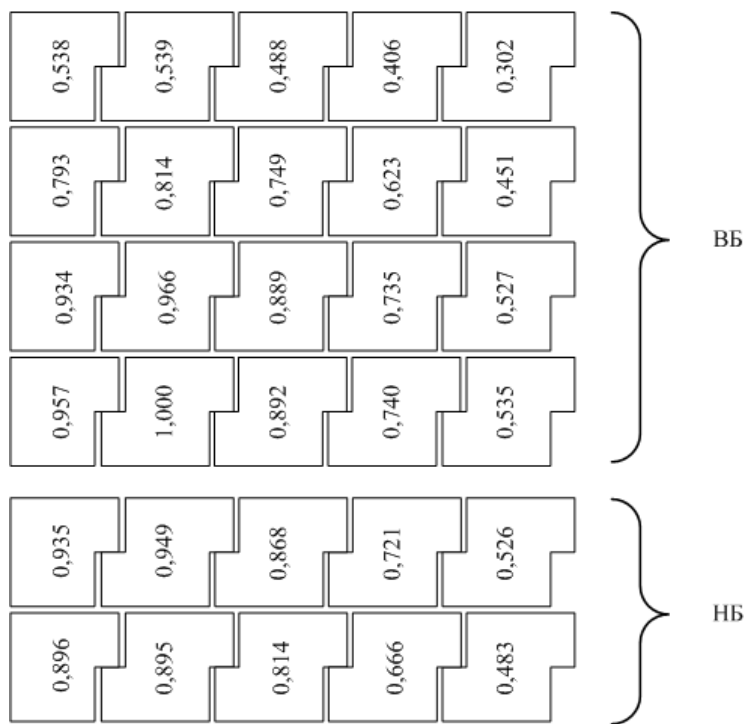


Рис. 2. Относительные распределение значения плотности делений в новой АЗ при положении ОРР, характерном для импульсного режима работы реактора

Определены геометрические положения максимумов плотности делений в ВБ и НБ АЗ и их значения; на основе этого оценены максимальные температуры разогрева топлива при работе реактора в импульсном режиме: скачок (прирост) температуры ΔT при полном энерговыделении в АЗ 8,7 МДж для ВБ составляет $\Delta T_{max} = 552^\circ C$, для НБ: $\Delta T_{max} = 505^\circ C$.

Произведено экспериментальное определение характеристик нейтронных и гамма-полей в реакторных залах, в других помещениях здания за биологической защитой реактора и на прилегающей территории, а также осуществлен контроль загрязнения воздуха и поверхностей оборудования при функционировании реактора и его обслуживании на соответствие контрольным уровням по загрязнениям рабочих поверхностей и воздуха, сбрасываемого в атмосферу.

Определена величина реактивности, выводимой за 0,2 секунды блоками НБ, ИБ и РБ в отдельности и в совокупности с момента поступления сигнала аварийной защиты. При комплексном

сбросе блоков реактор переводится в подкритическое состояние за время $\leq 0,18$ с, что соответствует требованиям действующих правил проектирования, устройства и эксплуатации исследовательских ядерных реакторов (ППУ и ПТБ ИЯР) к системам на быстрых нейтронах, к которым относится БР-1.

Определены в необходимом объеме характеристики реактора в импульсных режимах на запаздывающих и мгновенных нейтронах: $Y_{\text{полн}}$ – полное число делений в импульсе, $\Theta_{1/2}$ – ширина импульса на половине его высоты, τ – период разгона, квазистатический и динамические коэффициенты гашения реактивности. В максимальном импульсе на мгновенных нейтронах (ИМН) получено $Y_{\text{полн}} = 3,16 \cdot 10^{17}$, $\Theta_{1/2} = 66$ мкс, $\tau = 24,7$ мкс.

После завершения предварительного этапа физического пуска проведена разборка АЗ и выборочная дефектация шести самых энергонапряженных ТЭ из двух нижних рядов (слоев) ТЭ верхнего блока и верхнего ряда ТЭ нижнего блока. Схема размещения в АЗ ТЭ, выбранных для инструментального контроля, представлена на рис. 3. Пластических деформаций ТЭ не обнаружено.

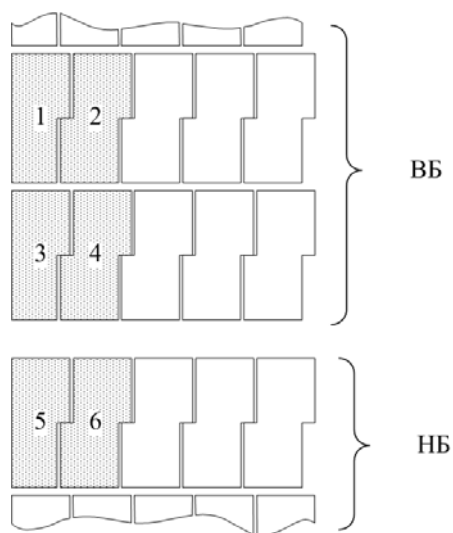


Рис. 3. Схема размещения ТЭ, подвергнутых выборочной дефектации

Перед началом работ на основном этапе проведена сборка ВБ и НБ в неразборных чехлах и герметизация блоков сварным швом. Чехлы блоков были испытаны на прочность и герметичность с оформлением акта испытаний и признаны годными к эксплуатации в составе новой АЗ.

Второй этап был начат с определения значений реактивности полностью заглушенного реактора в рабочих позициях реакторных залов: $-25 \beta_{\text{эфф}}$, реактора, размещенного в защитном боксе-отстойнике: $-21 \beta_{\text{эфф}}$, реактора, находящегося в проходе между реакторными залами: $-24 \beta_{\text{эфф}}$. Требования ППУ и ПТБ ИЯР к заглушенному состоянию ИЯР выполняются для всех позиций.

Подобран полный запас реактивности для АЗ без штатных загрузочных механизмов: $0,18 \beta_{\text{эфф}}$ над мгновенной критичностью при полностью поднятых НБ, ИБ и РБ.

Определены полные вклады в реактивность АЗ отдельных блоков. Ввод НБ до упора изменяет реактивность на $18,9 \beta_{\text{эфф}}$. Ввод ИБ при выведенном РБ изменяет реактивность на $3,3 \beta_{\text{эфф}}$. Ввод РБ до упора изменяет реактивность на $2,9 \beta_{\text{эфф}}$.

Определены в необходимом объеме характеристики реактора в импульсных режимах на запаздывающих и мгновенных нейтронах в зале автономной работы и на двух рабочих позициях зала совместной работы реактора и ускорителя. Определены квазистатический и динамические коэффициенты гашения реактивности. В максимальном импульсе на мгновенных нейтронах получено $Y_{\text{полн}} = 3,16 \cdot 10^{17}$ дел, $\Theta_{1/2} = 68$ мкс, $\tau = 25,5$ мкс.

В максимальных импульсах на запаздывающих нейтронах получены параметры, приведенные в табл. 1.

Основные параметры импульсов на запаздывающих нейтронах

τ, c	$\dot{Y}_{max} \cdot 10^{15}, c^{-1}$	$\Theta_{1/2}, c$	$Y_{пик}, 10^{17}$	$Y(\Theta), 10^{17}$
Зал автономной работы				
9,4	6,80	50	1,43	3,05
Зал совместной работы				
9,6	5,99	57	1,39	3,03

Примечание \dot{Y}_{max} – максимальная интенсивность делений;
 $Y_{пик}$ – число делений к моменту достижения максимума интенсивности делений;
 $Y(\Theta)$ – число делений к моменту спада максимума интенсивности делений в 2 раза.

Характерная зависимость изменения мощности от времени для максимального импульса делений на мгновенных нейтронах представлена на рис. 4.

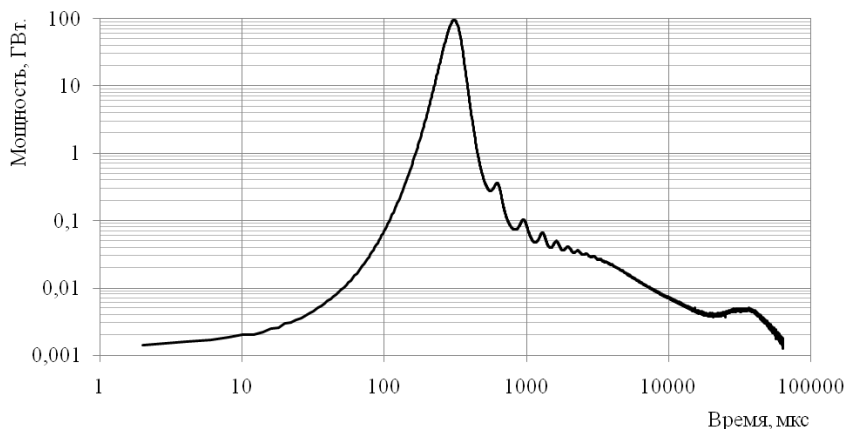
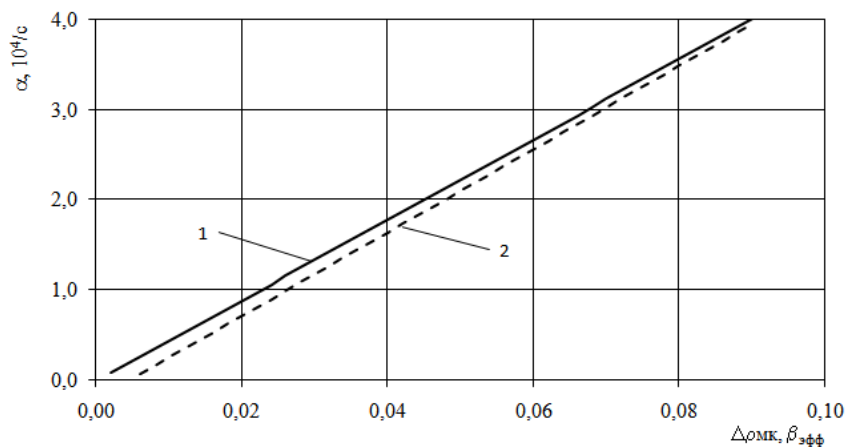


Рис. 4. Зависимость изменения мощности от времени для максимального импульса делений на мгновенных нейтронах

На основании проведенного анализа экспериментальных данных, различий в параметрах импульсов делений, требующих учета при размещении реактора в произвольной позиции в зале совместной работы комплекса на базе $0,9 \leq L \leq 2,94$ м от оси ускорителя, не имеется.

На рис. 5 в графическом виде представлены аппроксимированные (по экспериментальным точкам) значения кинетических параметров ИМН (обратная величина периода разгона мощности (а), ширина импульса на половине его высоты (б)) в зависимости от планируемого перехода $\Delta\rho$.



а

Рис. 5. Зависимости кинетических характеристик: обратного периода разгона (а), ширины импульса на половине высоты (б) от планируемого перехода выше мгновенной критичности: 1 – зал автономной работы; 2 – зал совместной работы комплекса ЛИУ-30+БР-1

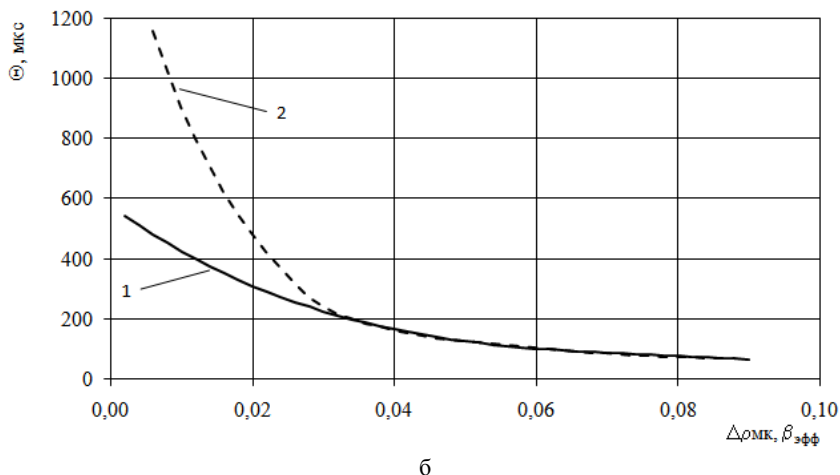


Рис. 5. (Окончание)

При сравнении основных параметров импульсов реактора в залах автономной и совместной работы в случае зала совместной работы отмечается изменение (в сторону замедления) кинетических характеристик импульсов, связанное с приближением почти на 2 м массивного замедлителя-отражателя (торцевой стены зала), и неизменность, в пределах точности определения числа делений, энергетических характеристик импульсов.

Полученные зависимости основных параметров импульсов от планируемой начальной избыточной реактивности следует рассматривать в качестве основных эксплуатационных параметров реактора.

Определены в необходимом объеме спектральные характеристики (частоты и амплитуды спектральных пиков радиальных колебаний ТЭ) колебательного процесса мощности реактора на «плато» импульсов [4] для последующего сравнения с аналогичными характеристиками, получаемыми в специальных «контрольных» импульсах. «Контрольные» импульсы генерируются для комплексной проверки состояния ТЭ АЗ (без загрузки АЗ объектами облучения) с частотой 1 раз в год.

По результатам физического пуска установлены следующие предельные эксплуатационные параметры БР-1 с новой АЗ:

- допустимое (предельное для планирования) полное число делений в АЗ в режиме генерирования импульсов на мгновенных нейтронах $Y_{полн} = 2,7 \cdot 10^{17}$;
- предельно-допустимое полное число делений в АЗ в режиме генерирования импульсов на мгновенных нейтронах $Y_{полн} = 3,0 \cdot 10^{17}$ при равновесной начальной температуре топливного материала по отношению к температуре воздуха в реакторном зале;
- допустимое (предельное для планирования) полное число делений в АЗ в режиме генерирования импульсов на запаздывающих нейтронах $Y_{полн} = 3,6 \cdot 10^{17}$;
- предельная мощность для статического режима работы не выше 5 кВт, при этом период разгона при выходе на мощность не должен быть короче 15 с.

Согласно проведенным оценкам, ресурс работы топливных элементов АЗ составит 3000 импульсов на мгновенных нейтронах в разрешенном диапазоне полного числа делений.

Список литературы

1. Павловский А. И., Малинкин А. А., Колесов В. Ф. и др. Бустер-реактор БР-1 // ВАНТ. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки. Вып. 1. 1985. С. 3–13.
2. Девяткин А. А., Романов В. И., Колесов В. Ф., Арапов А. В. и др. Модернизация конструкции активной зоны аperiodического импульсного реактора БР-1 // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. Вып. 2. 2007. С. 13–18.
3. Босамыкин В. С., Кошелев А. С., Герасимов А. И. и др. Высокоинтенсивный источник нейтронов на базе мощного ускорителя электронов ЛИУ-30 и импульсного ядерного реактора БР-1. In: Advanced pulsed neutron sources: Physics of/at advanced pulsed neutron sources, PANS-2, 14–17 June 1994; Dubna, Russia. Дубна. Изд-во ОИЯИ, 1995. С. 114–121.
4. Девяткин А. А., Колесов В. Ф., Хоружий В. Х., Арапов А. В. и др. Методика диагностики состояния тепловыделяющих элементов аperiodических импульсных реакторов с металлической активной зоной // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. Вып. 1. 2008. С. 12–17.