

СПОСОБЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ ДЕЛЕНИЙ В РЕЖИМЕ «С МОЩНОСТИ» НА РЕАКТОРАХ «БАРС-5», «ТИРАН»

METHODS OF GENERATING FISSION PULSES IN REACTORS «BARS-5», «TIRAN» IN PRESENCE OF «STRONG» INTERNAL NEUTRON SOURCE

С. А. Андреев, А. А. Снопков, Н. В. Горин, В. И. Черашев
S. A. Andreev, A. A. Snopkov, N. V. Gorin, V. I. Cherashev

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина»

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics

Рассмотрены пять способов генерирования импульсов делений в реакторах типа «БАРС» в режиме «С мощности», в которых освобожден от регуляторов реактивности либо объем между АЗ, либо экспериментальный канал (каналы).

There are considered five methods of generating fission pulses in the reactors of “BARS” type in the mode when a «strong» internal neutron source is available where either the space between the cores or experimental channel (channels) is free of reactivity regulator.

Введение

Реакторы типа «БАРС» в период с апреля 1964 г. по 1989 г. работали в традиционном импульсном режиме – «Ожидание», в котором вначале вводят начальную избыточную реактивность, затем иницируют импульс делений нейтронами внешнего импульсного источника.

Режим «Ожидание» имеет существенный недостаток – отсутствует внутренняя защита реактора [1], т. к. во время ввода реактивности в АЗ действует «слабый» внутренний источник нейтронов ($S_b \approx 10^3$ н/с), при котором система может долго не реагировать на увеличение избыточной реактивности, т. е. имеется потенциальная возможность случайного ввода большой надкритичности и, следовательно, к взрыву с тяжелыми последствиями.

Кроме этого, в режиме «Ожидание» невозможно исследовать на реакторе образцы, имеющие собственный нейтронный фон, т. к. нейтроны образца могут инициировать процесс деления преждевременно (во время ввода реактивности) и планируемая избыточная реактивность не будет достигнута, что приведет к получению импульса с непредсказуемыми параметрами.

Необходимость устранить эти недостатки стимулировали работы [2] по созданию такого импульсного режима, для которого, с одной стороны, нейтроны образца не мешали бы достижению начальной избыточной реактивности, а с другой – была надежно обеспечена внутренняя безопасность реактора, т. е. исключалось физическими методами достижение взрывной надкритичности. Прообразом данного режима был режим работы установки ФКБН-И [3], в котором реактивность непрерывно вводилась в систему при наличии в АЗ «сильного» источника нейтронов. Роль сильного S_b играли запаздывающие нейтроны осколков деления, накопленных при работе установки перед генерированием импульса на мощности ~ 1 Вт. Эти нейтроны инициировали систему в подкритическом состоянии и включали механизм гашения реактивности, который не позволял ввести аварийную избыточную реактивность. На ФКБН-И была достигнута скорость ввода реактивности $\sim 40 \frac{\beta}{c}$, что позволяло получать импульсы с числом делений $1,5 \cdot 10^{16}$. На реакторе БР-1 (ВНИИЭФ) в 1983 (по сообщению г. Одинцова Ю. М.), была получена скорость ввода избыточной реактивности $\sim 100 \frac{\beta}{c}$ путем передвижения специальных образцов в экспериментальном канале.

Подобный режим генерирования импульса делений отрабатывался на ИЯР типа «БАРС» много лет из-за того, что не удавалось получить скорости ввода избыточной реактивности, необходимые для генерирования импульсов делений во всем разрешенном энергетическом диапазоне.

Решить эту проблему удалось путем управления нейтронной связью между АЗ БАРС-5, а для однопольного реактора размещением (с последующим выстрелом) нейтронной ловушки в канале АЗ.

В результате был отработан и введен в эксплуатацию в 1989 г. на БАРС-5 импульсный режим «С мощности» [4], в котором генерирование импульсов осуществляется с «сильным» источником $S_n \geq 2 \cdot 10^9$ н/с, образованным перед импульсом за счет накопления запаздывающих нейтронов, а скорость ввода избыточной реактивности может достигать $300 \frac{\beta}{c}$ для получения максимально-разрешенного импульса – $2,5 \cdot 10^{17}$ делений ($5 \cdot 10^{17}$ делений в связанной системе).

То, что удалось построить управление БАРС-5 путем изменения коэффициента связи, является достоинством, но это же является и недостатком, т.к. при работе с двумя РР и РС место между АЗ и оба экспериментальных канала, где реализуется самый высокий флюенс нейтронов, заняты механизмом регулирования коэффициентов связи. Для устранения этого недостатка при эксплуатации реактора было разработано пять способов генерирования импульсов делений в режиме «С мощности», в которых либо освобожден объем между АЗ, либо освобождены экспериментальные каналы (канал) для установки экспериментальных образцов.

Управление реактивностью БАРС-5 путем изменения нейтронной связи

Если установить образец, эффективно замедляющий нейтроны, между АЗ, то часть нейтронов утечки одной АЗ после замедления будут поглощены экраном из В¹⁰ другой АЗ, и нейтронная связь уменьшится, т. е. уменьшится реактивность системы в целом. Удаление такого образца из объема между АЗ увеличит нейтронную связь, т. е. увеличит реактивность всей системы. Образец в этом случае исполняет роль регулятора связи (РС), т. е. является элементом регулирования реактивности.

Аналогичный эффект изменения реактивности одной изолированной АЗ наблюдается при движении образца, выполненного в виде «нейтронной ловушки», – это алюминиевый цилиндр Ø58×110 мм, в центре которого установлен стержень из полиэтилена, снаружи экранированный В¹⁰ 80 % обогащения. Вклад «нейтронной ловушки» в реактивность в канале АЗ отрицательный, а при её удалении из экспериментального канала (ЭК) реактивность АЗ увеличивается, т. е. «нейтронная ловушка» является регулятором реактивности (РР).

Реакторы БАРС-5, ТИРАН генерируют импульсы делений в режиме «С мощности», в котором связанная система переводится через мгновенную критичность на заданную величину избыточной реактивности с помощью РР, РС или их комбинациями, при этом обеспечивается большая, до $300 \frac{\beta}{c}$, скорость ввода избыточной реактивности при механической скорости движения регуляторов ~6 м/с.

Генерирование импульсов делений РС

Первоначально в качестве ОРР, генерирующего импульс делений, использовался регулятор связи (РС) – полиэтиленовый блок (60×110×85 мм), удаляемый из объема между АЗ пружиной механизма управления реактивностью (МУР).

На рис. 1 показана схема генерирования импульсов делений с помощью МУР.

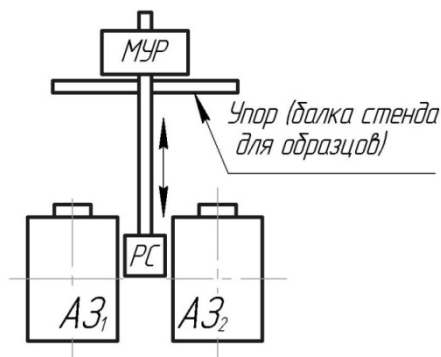


Рис. 1. Конфигурация БАРС-5 с РС

Для конфигурации, показанной на рис. 1, максимальная скорость движения РС составляет ~ 6 м/с, что соответствует скорости ввода избыточной реактивности $\sim 120 \beta/c$ и числу делений в импульсе $\sim 1,2 \times 10^{17}$ в каждой АЗ.

Генерирование импульсов делений $PP_1+PC+PP_2$

Недостатком способа ввода избыточной реактивности с помощью РС является невозможность получения больших (разрешённых) энерговыделений до $2,5 \times 10^{17}$ делений в каждой АЗ, для получения которых при наличии «сильного» S_0 необходима большая скорость ввода избыточной реактивности. Эта скорость определяется произведением двух сомножителей: механической скорости движения РС у жёсткого упора и величиной вклада в реактивность на 1 мм перемещения РС у упора (градиент реактивности).

На рис. 2 показана схема единого регулятора реактивности БАРС-5, состоящего из РС (1) и двух нейтронных ловушек – регуляторов реактивности РР (2), с помощью тяги (3) соединённых с траверсой (4).

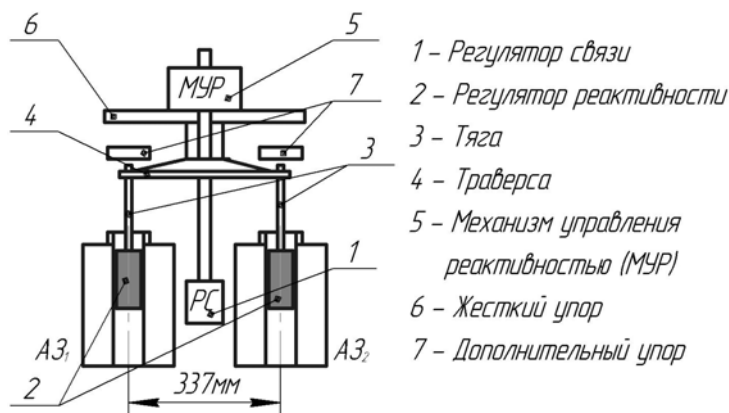


Рис. 2. Конфигурация БАРС-5 с тремя регуляторами (РС+2 РР)

Единый регулятор (РС+2РР) при установке на нужную координату перемещается двигателем механизма (5), имеет общий жёсткий упор (6), ограничивающий перемещение всей конструкции единого регулятора вверх. Геометрические центры РС и РР находятся на одном уровне, а их положение у упора соответствует максимальному градиенту реактивности. Дополнительные упоры (7) дублируют упор (6).

Единый регулятор после установки на любую нужную координату может быть переведён к упору с помощью пружин, имеющихся в МУР.

Создание единого регулятора позволило увеличить градиент реактивности до $0,05 \beta_{эф}/мм$ и при той же механической скорости движения регулятора (~ 6 м/с) получить скорость ввода избыточной реактивности $\sim 300 \beta/c$, что обеспечило получение предельно-разрешенных импульсов.

Генерирование импульсов делений PP_1+PP_2

Из рис. 2 видно, что места между АЗ и в ЭК, где реализуется высокий флюенс нейтронов, заняты РС и РР и недоступны для установки образцов, и это является недостатком данного способа генерирования импульсов делений. Конфигурация БАРС-5 с единым регулятором позволяет устанавливать образцы для исследования только снаружи АЗ.

С целью освобождения объёма между АЗ для установки образцов были продолжены работы по поиску новой конструкции РР с более высоким градиентом реактивности. Такая конструкция была найдена.

Новый единый РР состоял из двух цилиндров $\varnothing 50$ мм, высотой 100 мм, жёстко связанных между собой траверсой и изготовленных из В¹⁰, спрессованного с полиэтиленом. Потеря скорости ввода реактивности, связанная со снятием РС, компенсировалась тем, что за счёт прессования была увеличена до $1,7 \text{ г/см}^3$ плотность каждого РР вместо $\sim 1 \text{ г/см}^3$ в РР старой конструкции.

На рис. 3 показана схема единого регулятора, состоящего из двух РР, который обеспечивает получение импульсов с числом делений $2,5 \cdot 10^{17}$ в каждой АЗ.

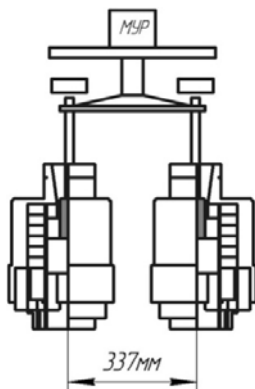


Рис. 3. Конфигурация БАРС-5 с двумя РР

Конфигурация БАРС-5 с двумя РР позволяет использовать область между АЗ для установки образцов. Кроме этого, данный способ ввода реактивности применяется для генерирования импульсов делений в трёхзонном реакторе ТИРАН.

Генерирование импульсов делений одним РР

Режим «С мощности» успешно применяется для изолированной АЗ и для связанных систем с $R = 0,33 \dots 0,9$ м (расстояние между центрами АЗ), при этом импульс генерируется двумя РР, соединёнными единой траверсой.

Для систем с $R = 0,9 \dots 1,5$ м не удалось реализовать этот режим в таком виде, т. к. траверса, соединяющая РР, с увеличением расстояния между АЗ становится тяжёлой и с помощью пружины РР уже не разогнаться до нужных скоростей. Не удалась и попытка ввода избыточной реактивности двумя независимыми механизмами с РР, т. к. нарушается синхронизация движения РР, что приводит к снижению скорости ввода реактивности. Вместе с тем, управлять связанными системами можно путём изменения реактивности только в одной компоненте.

Конфигурация БАРС-5 с одним РР показана на рис. 4.

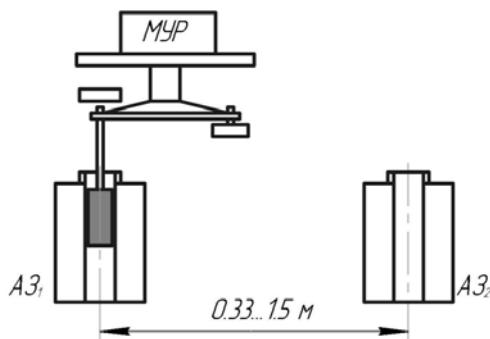


Рис. 4. Конфигурация БАРС-5 с одним РР

Поэтому была проведена серия импульсов делений, генерируемых одним РР в слабосвязанной системе с $R = 1,5$ м.

При работе БАРС-5 в режиме «С мощности» с одним РР АЗ₂ можно использовать в качестве бустера, когда нейтроны АЗ₁ являются внешними и умножаются АЗ₂. При сближении АЗ и уменьшении подкритичности АЗ₂ система всё больше «связывается», отношения числа делений в активных зонах изменяются. По мере «связывания» системы уменьшается скорость ввода избыточной реактивности из-за уменьшения «веса» РР в связанной системе и при $Y_1/Y_2=1$ получаются импульсы с числом делений не более $Y_1 = Y_2 \cong 1,25 \times 10^{17}$.

Генерирование импульсов делений РР совместно с РС

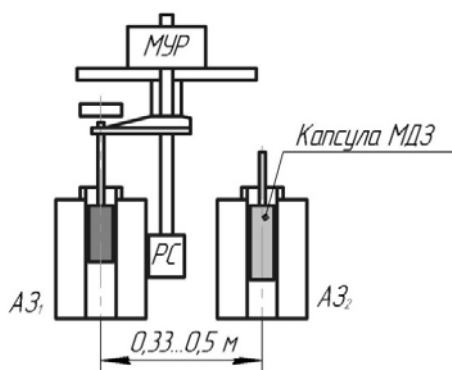


Рис. 5. Конфигурация БАРС-5 с РС и РР

Более мощные импульсы в АЗ₂, чем при способе генерирования импульсов делений одним РР ($1,25 \cdot 10^{17}$ дел), получаются с помощью РР, установленного в канал АЗ₁ и жестко связанного с РС, размещенным между АЗ. РР и РС одновременно перемещаются механизмом МУР [7].

Конфигурация БАРС-5 при генерировании импульсов делений одним РР совместно с РС показана на рис. 5.

Для конфигурации опытов, показанных на рис. 5, при отношении числа делений $Y_1/Y_2 = 1$ получаются импульсы с числом делений $Y_1 = 1,8 \cdot 10^{17}$, что достаточно для большого количества экспериментов на реакторе.

Генерирование импульсов РР+РР в ТИРАН

В ТИРАН применяется основная конфигурация БАРС-5 (рис. 3).

На рис. 6 приведена геометрия опытов на реакторе ТИРАН с загрузочным устройством экспериментальных образцов в ЭК реактора-умножителя (РУН-2), а на рис. 7 показано изменение реактивности связанной системы ТИРАН от значения реактивности двух связанных АЗ БАРС-5 ($\rho_p[\beta_{\text{эфф}}]$) и реактивности изолированной АЗ РУН-2 ($\rho_y[\beta_{\text{эфф}}]$) в процессе получения импульса делений.

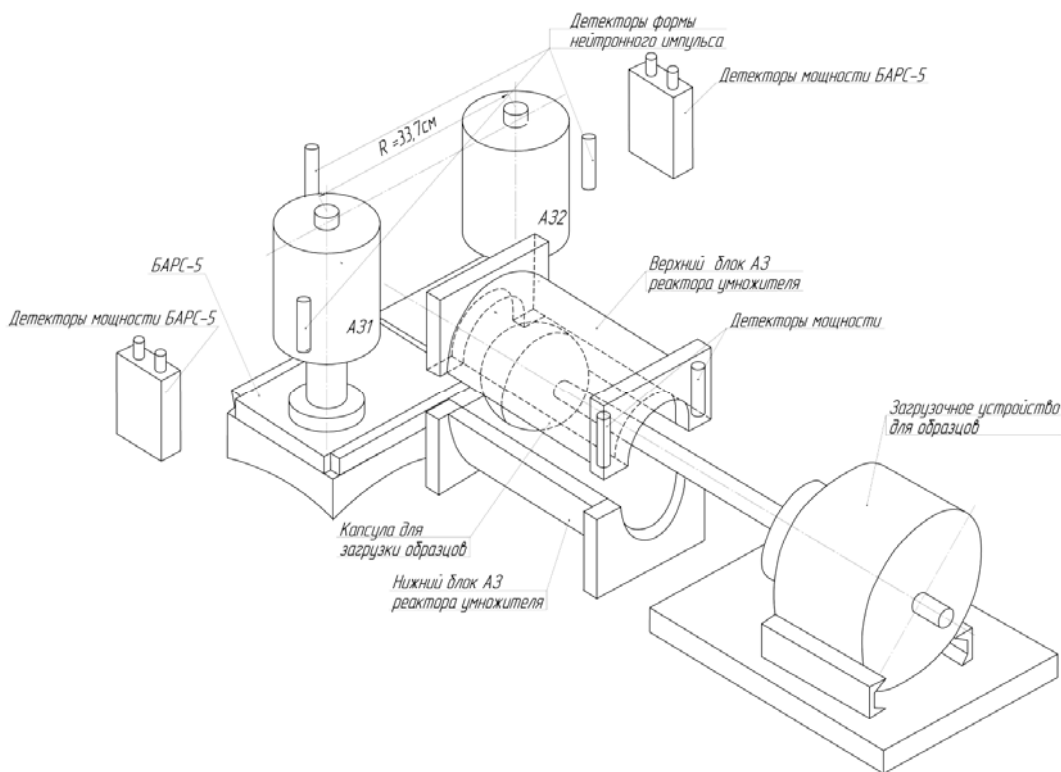


Рис. 6. Геометрия опытов комплекса ТИРАН

Стенд реактора-умножителя устанавливается нижней плитой на рельсы стенда для образцов около АЗ БАРС-5 таким образом, что расстояние от передней плоскости АЗ РУН-2 до линии, соединяющей центры АЗ БАРС-5, составляет 38 см. Это расстояние можно увеличить до 68 см за

счёт передвижения ВВ в стенде реактора-умножителя. При этом центр экспериментального канала АЗ реактора-умножителя находится на уровне центра АЗ БАРС-5.

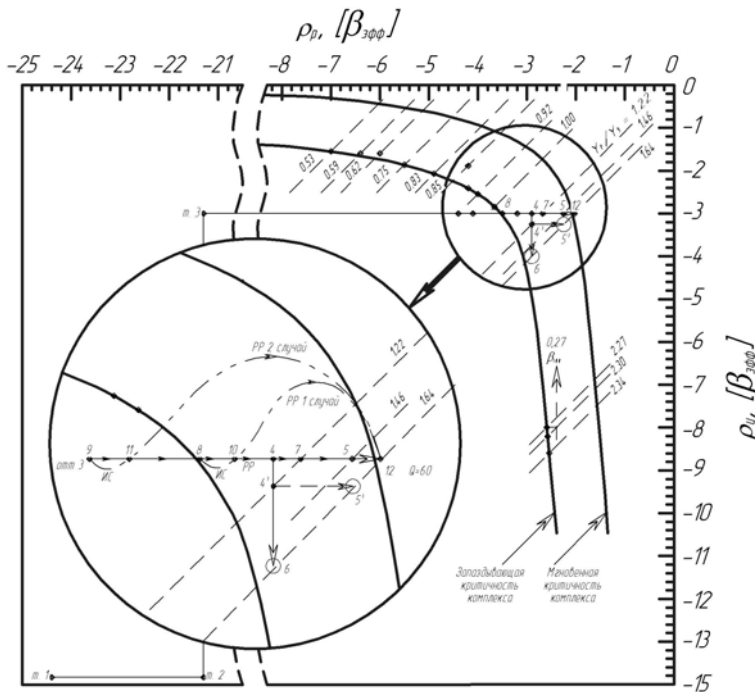


Рис. 7. Изменение реактивности компонент комплекса при получении импульса делений на реакторе ТИРАН

Точками на рис. 7 отмечена последовательность операций по изменению реактивности связанной системы в процессе получения импульса делений.

$T_1 - T_2$ ввод СС, $T_2 - T_3$ ввод НБ РУН-2, $T_3 - T_4$ ввод ББ и СТР, $T_4 - T_4' - T_5$ калибровка ИС, T_6 калибровка РР, $T_4 - T_8$ (или $T_4 - T_9$) ввод ИС и РР (перекомпенсация), $T_8 - T_{10}$ (или $T_9 - T_{11}$) достреливается ИС, $T_{10} - T_{12}$ (или $T_{11} - T_{12}$) вывод РР (достижение избыточной реактивности).

После генерирования импульса делений реактор переводится в заглушенное состояние – T_1 .

Заключение

Режим «С мощности» на БАРС-5 имеет пять способов генерирования импульсов делений, отличающихся числом или комбинацией ОРР, генерирующих импульс делений. В табл. 1 приведены характеристики способов ввода избыточной реактивности в режиме «С мощности».

Таблица 1

Характеристики способов ввода реактивности для режима «С мощности» в БАРС-5.

№	Способ ввода избыточной реактивности	Расстояние между центрами АЗ, [см]	Предельная скорость α , β /с	Максимальное число делений в каждой АЗ, дел.	Место установки образцов
1	РС	33.7	120	1.25×10^{17}	ЭК, вне АЗ
2	РР1+РС+РР2 *	33.7	300	2.6×10^{17}	Только вне АЗ
3	РР1+РР2	33.7...90	250	2.5×10^{17}	Область между АЗ и вне АЗ
4	РР1**	33.7...150	240...120	$2.0 \times 10^{17***}$	
5	РР1+РС	33.7...50.1	225	1.8×10^{17}	ЭК, вне АЗ

* при установке РС уменьшается $\ell_{\text{ф}}$ системы, поэтому требуется несколько большая скорость ввода реактивности для получения предельно-разрешённого импульса делений, чем без РС.

** предельная скорость ввода реактивности уменьшается по мере приближения отношения числа делений в АЗ к единице $Y_1/Y_2 \rightarrow 1$ (для $Y_1/Y_2 = 80$ $\alpha = 240$ β/c , а для $Y_1/Y_2 = 1$ $\alpha = 120$ β/c);

*** только в АЗ1, где установлен РР.

Режим «С мощности» позволил:

- устанавливать у АЗ БАРС-5 штатные нейтронные источники высокой интенсивности $(1...5) \cdot 10^7$ н/с и оставлять их в реакторе на все время работы и хранения, что создало условие для внутренней защищенности реактора, т. к. механизмы самогашения реактивности всегда «включены»;
- решить проблему, связанную с облучением на реакторах объектов, имеющих собственный нейтронный фон, т. к. в режиме «С мощности» система всегда находится в детерминированном состоянии.

Разные способы генерирования импульсов делений в режиме «С мощности» разработаны для возможности проведения облучательных опытов с образцами, установленными в области с высоким флюенсом нейтронов: либо в ЭК БАРС-5, либо между АЗ.

В реакторе ТИРАН применяется основная конфигурация БАРС-5 с двумя РР, которые обеспечивают скорость ввода реактивности в связанной системе для получения импульсов с максимальным числом делений – $1 \cdot 10^{18}$ [7].

Список литературы

1. Снопков А. А., Марков В. Н., Горин Н. В. Повышение внутренней защиты импульсного реактора против ошибочных или противоправных действий. Атомная энергия, 2003. Т. 94, вып. 2. С. 401–405.
2. Снопков А. А., Горин Н. В. Экспериментальная отработка на ИЯР типа БАРС режима генерирования импульсов делений «Мощность» // В сб.: Труды III международной конференции «Проблемы лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы», РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, 2003. С. 602–606.
3. Андреев С. А., Лукин А. В., Соколов Ю. А. К истории создания и развития импульсных ядерных реакторов типа ЭБР. ВАНТ. Сер. «Физика ядерных реакторов», 2014. Вып. 3. С. 18–23.
4. Snopkov A. A., Gorin N. V., Gornovoi G. A. et al. TWO-CORE FAST PULSE REACTOR “БАРС-5”. In: Proceedings of the Topical Meeting on Physics, Safety and Applications of Pulse Reactors, Washington D. C., 13–17 November 1994, p. 300–315.
5. Эйвери Р. Теория связанных реакторов. Труды II-й Женевской конференции. Избранные доклады иностранных ученых. М.: Атомиздат, 1958. Т. 3. С. 321–340.
6. Черашев В. И., Андреев С. А. Прогнозирование импульсов делений в двухзонном реакторе БАРС-5 при несимметричном управлении реактивностью. В сб.: Труды IV международной конференции «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы», том 2 – ГНЦ РФ ФЭИ, Обнинск, 2009. С. 671–676.
7. Снопков А. А., Черашев В. И., Кошмяков В. П., Литвин В. И. Нейтронно-физические характеристики трехзонного импульсного реактора ТИРАН. ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. Москва, 2001. Вып. 1/2 (импульсные реакторы и простые критические сборки). С. 23–32.