

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

С. А. Андреев, А. А. Снопков, Н. В. Горин, В. И. Черашев, В. В. Сукневич

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», г. Снежинск Челябинской обл.

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).

**Ключевые слова:** импульсный реактор, активная зона, реактивность.

**METHODS OF GENERATING FISSION PULSES IN REACTORS «BARS-5», «TIRAN» IN PRESENCE OF «STRONG» INTERNAL NEUTRON SOURCE / S. A. ANDREEV, A. A. SNOPKOV, N. V. GORIN, V. I. CHERASHEV, V. V. SUKNEVICH** // 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.

**Key words:** pulsed reactor, core, reactivity.

### Введение

Реакторы типа «БАРС» в период с апреля 1964 г. по 1989 г. работали в традиционном импульсном режиме «Ожидание», в котором прежде вводят начальную избыточную реактивность, затем инициируют импульс делений нейтронами внешнего импульсного источника. Режим «Ожидание» имеет существенный недостаток – отсутствует внутренняя защита реактора [1], так как 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, взрыва с тяжелыми последствиями. Кроме этого, в режиме «Ожидание» невозможно исследовать на реакторе образцы,

имеющие собственный нейтронный фон, так как 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 бы 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  $\sim 1$  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  $\sim 40$   $\beta$ /с, что позволяло получать импульсы с числом делений  $1,5 \cdot 10^{16}$ . На реакторе БР-1 (ВНИИЭФ) в 1983 г. (по сообщению г. Одиноца Ю. М.) была получена скорость ввода избыточной реактивности  $\sim 100$   $\beta$ /с 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 однозонного 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  $S_b \geq 2 \cdot 10^9$  н/с, образованным перед импульсом за счет накопления предшественников запаздывающих нейтронов, а скорость ввода избыточной реактивности может достигать 300  $\beta$ /с 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 можно считать и недостатком, так как при работе с двумя регуляторами реактивности (РР) и регулятором связи (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.

## 1. Управление реактивностью «БАРС-5» путем изменения нейтронной связи

Если установить образец, эффективно замедляющий нейтроны, между АЗ, то часть нейтронов утечки одной АЗ после замедления будет поглощена экраном из  $B^{10}$  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 диаметром 58 мм и высотой 110 мм, в центре которого установлен стержень из полиэтилена, снаружи экранированный  $B^{10}$  80 %-го обогащения. Вклад «нейтронной ловушки» в реактивность в канале АЗ отрицательный, а при ее 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 избыточную реактивность с помощью РР, РС или их комбинаций, при этом обеспечивается большая, до 300  $\beta$ /с, скорость ввода избыточной реактивности при механической скорости движения регуляторов  $\sim 6$  м/с.

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

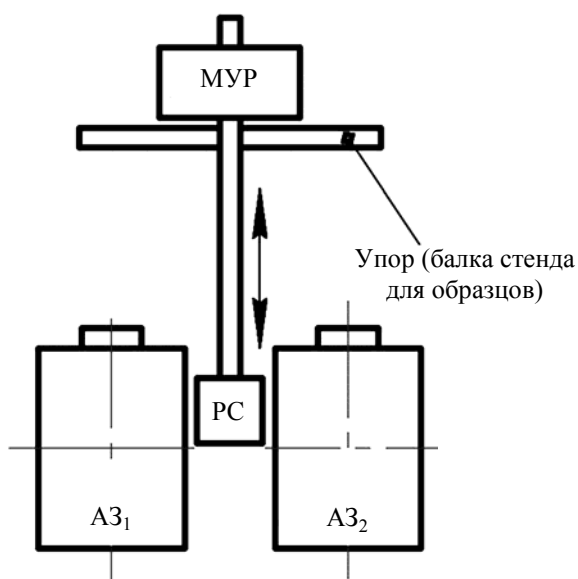


Рис. 1. Конфигурация «БАРС-5» с РС

## 3. Генерирование импульсов делений $PP_1 + PC + PP_2$

Недостатком способа ввода избыточной реактивности с помощью РС является невозможность получения больших (разрешенных) энерговыделений до  $2,5 \cdot 10^{17}$  делений в каждой АЗ, для получения которых при наличии «сильного»  $S_B$  необходима большая скорость ввода избыточной реактивности. Эта скорость определяется произведением двух сомножителей: механической скорости движения РС

у жесткого упора и вкладом 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 соединенных с траверсой 4. Единый регулятор (РС + 2РР) при установке на нужную координату перемещается двигателем механизма 5, имеет общий жесткий 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.

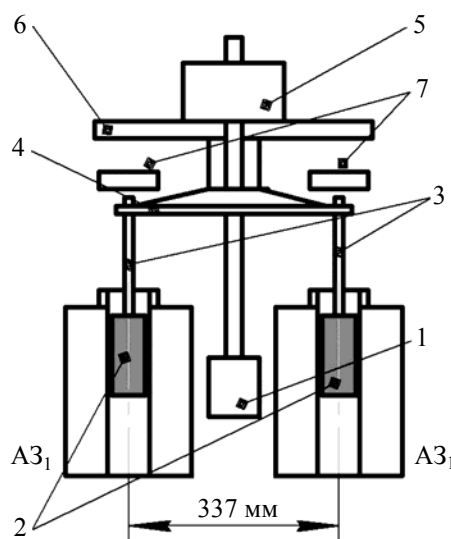


Рис. 2. Конфигурация «БАРС-5» с тремя регуляторами (РС + 2РР)

Единый регулятор после установки на любую нужную координату может быть переведен 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 ~300 β/с, что обеспечило получение предельно разрешенных импульсов.

#### 4. 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. 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 объема 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 диаметром 50 мм, высотой 100 мм, изготовленных из В<sup>10</sup>, спрессованного с полиэтиленом, и жестко связанных между собой траверсой. Потеря скорости ввода реактивности, связанная со снятием РС, компенсировалась тем, что за счет прессования была увеличена до 1,7 г/см<sup>3</sup> плотность каждого РР (в РР старой конструкции ~ 1 г/см<sup>3</sup>). На рис. 3 показана схема единого регулятора из двух РР, который обеспечивает получение импульсов с числом делений  $2,5 \cdot 10^{17}$  в каждой АЗ.

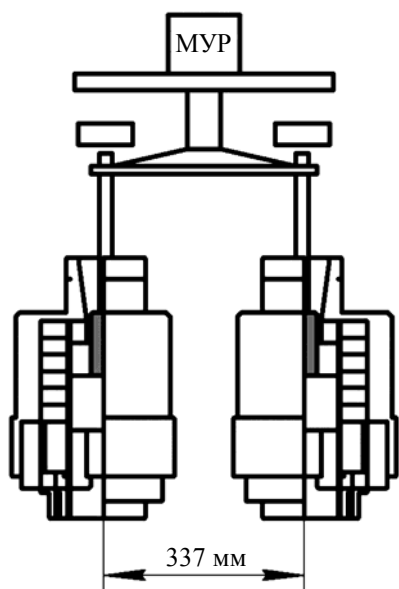


Рис. 3. Конфигурация «БАРС-5» с двумя РР

Конфигурация «БАРС-5» с двумя РР позволяет использовать область между АЗ для уста-

новки образцов. Кроме этого, данный способ ввода реактивности применяется для генерирования импульсов делений в трехзонном реакторе ТИРАН.

#### 5. Генерирование импульсов делений одним РР

Режим «С мощности» успешно применяется для изолированной АЗ и связанных систем с  $R = 0,33 - 0,9$  м (расстояние между центрами АЗ), при этом импульс генерируется двумя РР, соединенными единой траверсой. Для систем с  $R = 0,9 - 1,5$  м не удалось реализовать этот режим в таком виде, так как траверса, соединяющая РР, при увеличении расстояния между АЗ становится тяжелой и с помощью пружины РР уже не разогнаться до нужных скоростей. Не удалась и попытка ввода избыточной реактивности двумя независимыми механизмами с РР, так как нарушается синхронизация движения РР, что приводит к снижению скорости ввода реактивности. Вместе с тем управлять связанными системами можно путем изменения реактивности только в одном компоненте. Конфигурация «БАРС-5» с одним РР показана на рис. 4.

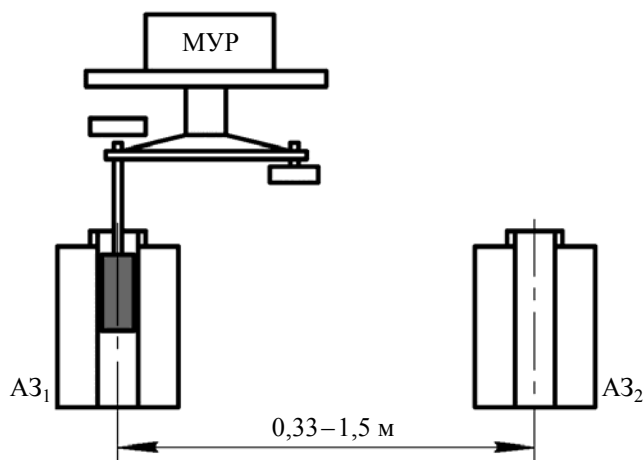


Рис. 4. Конфигурация «БАРС-5» с одним РР

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 АЗ<sub>2</sub> можно использовать в качестве бустера, когда нейтроны АЗ<sub>1</sub> являются внешними и умножаются

АЗ<sub>2</sub>. При сближении АЗ и уменьшении подкритичности АЗ<sub>2</sub> система все 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  $Y_1 = Y_2 \cong 1,25 \cdot 10^{17}$ .

## 6. Генерирование импульсов делений РР совместно с РС

Более мощные импульсы в АЗ<sub>2</sub>, чем при способе генерирования импульсов делений одним РР ( $1,25 \cdot 10^{17}$  дел.), получаются с помощью РР, установленного в канал АЗ<sub>1</sub> 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.

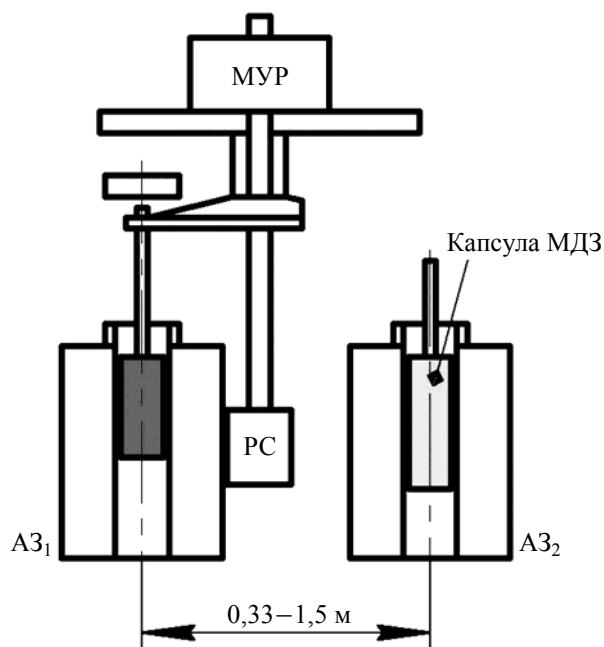


Рис. 5. Конфигурация «БАРС-5» с РС и РР (МДЗ – механизм дистанционной загрузки)

Для конфигурации опытов, показанных на рис. 5, при отношении числа делений  $Y_1/Y_2 = 1$

получаются импульсы с числом делений  $Y_i = 1,8 \cdot 10^{17}$ , что достаточно для большого количества экспериментов на реакторе.

## 7. 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» ( $\rho_p [\beta_{эф}]$ ) и реактивности изолированной АЗ РУН-2 ( $\rho_y [\beta_{эф}]$ ) в процессе получения импульса делений.

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 счет передвижения ВБ в стенде реактора-умножителя. При этом центр экспериментального канала АЗ реактора-умножителя находится на уровне центра АЗ «БАРС-5».

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 (перекompенсация),  $T_8 - T_{10}$  (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  $T_1$ .

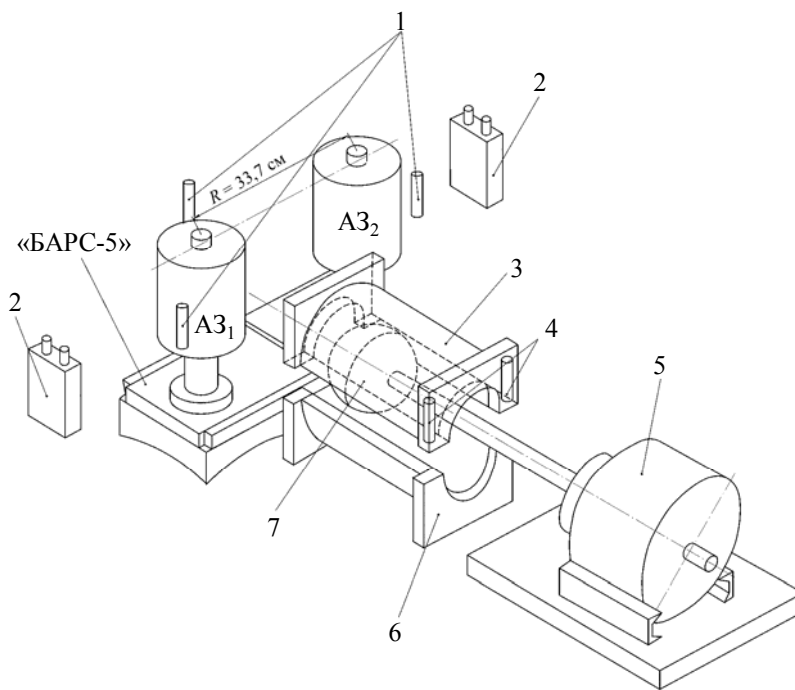


Рис. 6. Геометрия опытов комплекса «ТИРАН»: 1 – детекторы формы нейтронного импульса; 2 – детекторы мощности «БАРС-5»; 3 – верхний блок АЗ реактора-умножителя; 4 – детекторы мощности РУН-2; 5 – загрузочное устройство для образцов; 6 – нижний блок реактора-умножителя; 7 – капсула для загрузки образцов

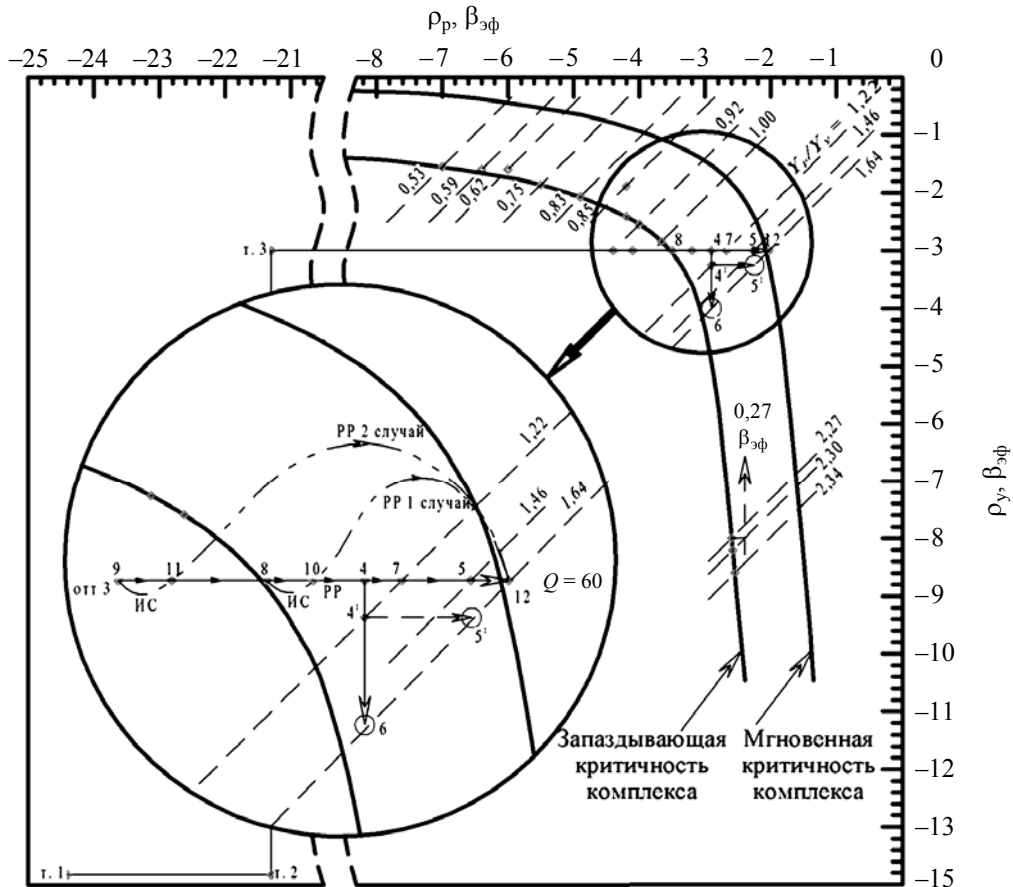


Рис. 7. Изменение реактивности компонентов комплекса при получении импульса делений на реакторе «ТИРАН»

Способ ввода избыточной реактивности	Расстояние между центрами АЗ, см	Предельная скорость $\alpha$ , $\beta$ /с	Максимальное число делений в каждой АЗ, дел.	Место установки образцов
РС	33,7	120	$1,25 \cdot 10^{17}$	ЭК, вне АЗ
РР <sub>1</sub> + РС + РР <sub>2</sub> *	33,7	300	$2,6 \cdot 10^{17}$	Только вне АЗ
РР <sub>1</sub> + РР <sub>2</sub>	33,7–90	250	$2,5 \cdot 10^{17}$	Область между АЗ и вне АЗ
РР <sub>1</sub> **	33,7–150	240–120	$2,0 \cdot 10^{17}$ ***	ЭК, вне АЗ
РР <sub>1</sub> + РС	33,7–50,1	225	$1,8 \cdot 10^{17}$	ЭК, вне АЗ

\*При установке РС уменьшается  $l_{эф}$  системы, поэтому требуется несколько большая скорость ввода реактивности для получения предельно разрешенного 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  $Y_1/Y_2 = 80$   $\alpha = 240$   $\beta$ /с; для  $Y_1/Y_2 = 1$   $\alpha = 120$   $\beta$ /с).

\*\*\*Только в АЗ<sub>1</sub>, где установлен РР.

### Заключение

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

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, так как механизмы самогашения реактивности всегда «включены»;

– решить проблему, связанную с облучением на реакторах объектов, имеющих собственный нейтронный фон, так как 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» // Труды III международной конференции «Проблемы лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы». – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 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 «BAPS-5» // Proceedings of the Topical Meeting on Physics, Safety and Applications of Pulse Reactors. Washington D.C., 1994, p. 300–315.

5. Эйвери Р. Теория связанных реакторов // Труды II 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 // Труды IV международной конференции «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы». – Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 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. 2001, вып. 1/2 (Импульсные реакторы и простые критические сборки), с. 23–32.

Контактная информация –

Снопков Альберт Александрович,  
главный научный сотрудник  
РФЯЦ-ВНИИТФ,  
e-mail: dep5@vniitf.ru

Статья поступила в редакцию 20.06.18.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2018, вып. 4, с. 150–157.