

СРАВНЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ «БАРС-5», «ТИРАН» С ОДНОЗОННЫМИ РЕАКТОРАМИ ТИПА «БАРС»

А. А. Снопков, С. А. Андреев, В. И. Литвин, Д. В. Зайцев, А. Л. Подъезжих,
В. И. Черашев, В. В. Сукневич

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

Приведены новые возможности многозонных реакторов «БАРС-5», «ТИРАН» по сравнению с однозонными апериодическими импульсными реакторами типа «БАРС».

Ключевые слова: импульсный реактор, активная зона, реактивность.

COMPARATIVE POSSIBILITIES OF MULTI-CORE REACTORS «BARS-5», «TIRAN» WITH ONE-CORE REACTOR TYPE «BARS» / A. A. SNOPKOV, S. A. ANDREEV, V. I. LITVIN, D. V. ZAYTSEV, A. L. PODYEZZHIKH, V. I. CHERASHEV, V. V. SUKNEVICH // Below are presented new performance capabilities of multi-core reactors «BARS-5», «TIRAN» as compared to one-core aperiodic pulsed reactors of «BARS» type.

Key words: pulsed reactor, core, reactivity.

Введение

Эксплуатация «БАРС-5», «ТИРАН» показала наличие у многозонных апериодических импульсных реакторов (МАИР) как источников мощных нейтронных и гамма-излучений ряд положительных возможностей, которых нет у однозонных апериодических импульсных реакторах (АИР) типа «БАРС».

1. Сравнение качества МАИР с АИР

Основными показателями качества импульсного реактора, с точки зрения исследования образцов на радиационную стойкость, являются:

- величина флюенса нейтронов за импульс;
- длительность импульса на полувысоте (скорость энерговывода в образец);

– объем пространства с высоким однородным флюенсом нейтронов, который доступен для установки экспериментальных образцов (ЭО).

Качество импульсного реактора считается тем выше, чем короче длительность импульса делений и, чем больше флюенс нейтронов и объем пространства, доступный для экспериментов [1].

МАИР «ТИРАН» обладает более высоким качеством, чем АИР «БАРС-3»: размеры экспериментального канала (ЭК) и флюенс нейтронов примерно в четыре раза больше, а полуширина максимального импульса делений увеличена незначительно. Это объясняется тем, что многозонные системы позволяют «сгладить» противоречие между критериями качества: при значительном увеличении размеров ЭК (РУН-2) и флюенса нейтронов в ЭК незначительно увеличивается полуширина импульса делений системы в целом.

2. Распределение функциональных нагрузок между компонентами «ТИРАН»

В многозонных, связанных в нейтронном отношении системах «БАРС-5», «ТИРАН» АЗ выполняют разные функциональные нагрузки. Распределение функциональных нагрузок между АЗ МАИР достигнуто за счет различных конструкций АЗ.

На рис. 1 приведен вид активных зон «БАРС-5» основной и дополнительной конфигурации. В дополнительной АЗ установлено еще два диска и втулка из запасного комплекта деталей. К подвижным деталям АЗ относятся ОРР 8, 9, 10, 11.

Конструкция АЗ «БАРС-5» имеет ряд существенных особенностей:

- между дисками АЗ имеются зазоры, обеспечиваемые специальными титановыми прокладками, для уменьшения механических напряжений между соседними дисками во время генерации импульса делений;

- диски стягиваются по наружному контуру специальной гайкой 12 через фланец 6

и тарельчатые пружины 7 для снижения нагрузок на трубу;

- импульсный стержень выполнен из меди, установлен снаружи АЗ и работает как отражатель;

- снаружи АЗ установлен экран из В¹⁰ 80 %-го обогащения толщиной 5 мм вместо экрана из кадмия толщиной 1 мм, как в «БАРС-1», «БАРС-2», «БАРС-3», что значительно упрощает получение импульсов делений с большими образцами из материалов, замедляющих нейтроны;

- под экраном из ¹⁰В постоянно присутствует нейтронный источник мощностью $\sim 1,5 \cdot 10^6$ н/с, что уменьшает последствия аварии;

- ОРР СТР и СС выполнены в виде колец и совместно образуют нижний диск АЗ, это позволило диски изготовить без отверстий под регулирующие стержни, что исключило концентрацию напряжений в дисках и уменьшило вероятность их поломки.

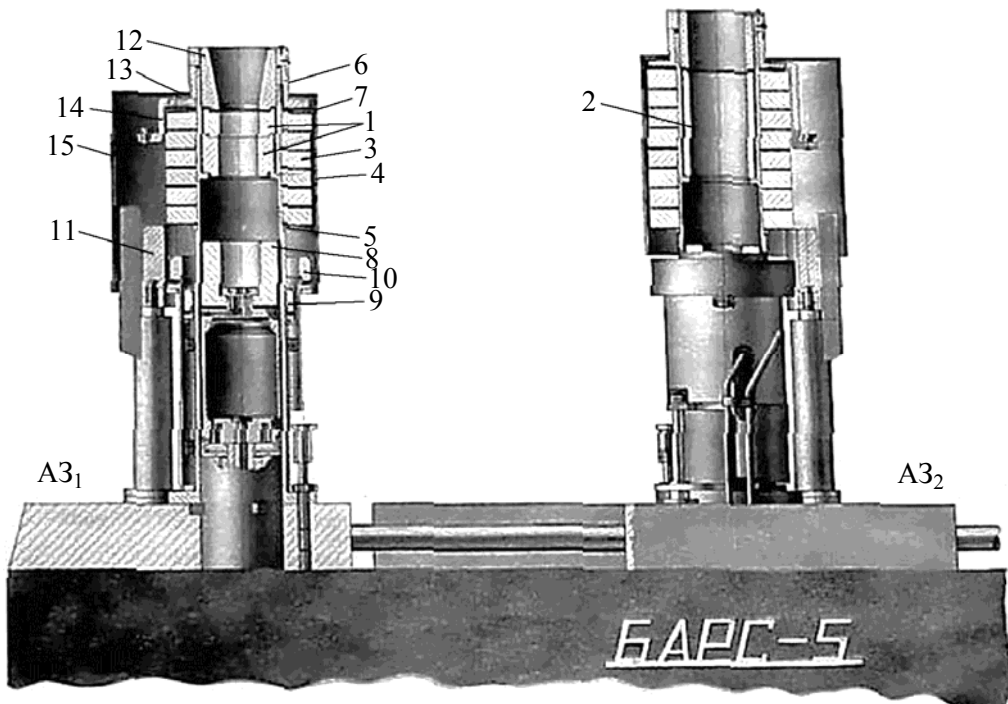


Рис. 1. Вид активных зон «БАРС-5» в осевом сечении (АЗ₁ – основной вариант – $\varnothing_{\text{ЭК}} = 60$ мм; АЗ₂ – дополнительный вариант – $\varnothing_{\text{ЭК}} = 90$ мм): 1 – вкладыши (малый, большой), 2 – втулка, 3 – диски, 4 – труба, 5 – опорное кольцо, 6 – фланец, 7 – тарельчатые пружины, 8 – блок безопасности, 9 – стоп-стержень, 10 – стержень тонкой регулировки, 11 – импульсный стержень (медь), 12 – гайка, 13 – пружина, 14 – упор ИС с нейтронным источником, 15 – экран (¹⁰В, 80 %-е обогащение)

Конструкции двух АЗ основной конфигурации компактны и идентичны. Различаются способом крепления трубы 4, которая у АЗ₁ жестко закреплена к стенду, а труба 4 АЗ₂ крепится болтами к передвижной плите и имеет возможность дистанционно перемещаться относительно АЗ₁, изменяя расстояние между центрами АЗ в диапазоне $R_{\text{щц}} = 0,33 - 1,5$ м.

Отсутствие концентраторов напряжения в АЗ и высокопрочностной сплав позволяет получать мощные импульсы делений (до $5 \cdot 10^{17}$).

Одинокная АЗ обладает эффективной обратной связью по реактивности ($1,5 \cdot 10^{-20}$ а.е./дел.) и малым эффективным временем жизни мгновенных нейтронов ($1,2 \cdot 10^{-8}$ с). Обе АЗ «БАРС-5» выполняют одинаковые функции: генерирование коротких мощных импульсов до $2,5 \cdot 10^{17}$ дел. в каждой АЗ для формирования нейтронного поля с высоким флюенсом нейтронов.

В реакторе «ТИРАН» АЗ «БАРС-5» выполняет роль драйвера связанной системы и обеспечивает получение коротких импульсов делений.

В работе [2] приведена схема активной зоны реактора-умножителя (РУН-2), которая состоит из верхнего блока (ВБ) и нижнего блока (НБ), основой которых является матрица. В матрице АЗ имеется 30 отверстий, в которых установлены стержни из ДМ.

Особенностью АЗ РУН-2 является наличие большого экспериментального канала для установки образцов и то, что она сильно фрагментирована, так как состоит из 60 стержней с высокой собственной частотой (~ 11 кГц), что исключает тепловой удар при максимальных импульсах делений в реакторе и уменьшает отрицательный коэффициент гашения реактивности до $\gamma_{\text{РУН}} = 0,9 \cdot 10^{-21}$ а.е./дел.

Увеличение массы АЗ до 248,3 кг позволило увеличить \sim в 2 раза число делений в АЗ РУН-2 по сравнению с одной АЗ «БАРС-5».

В реакторе «ТИРАН» АЗ РУН-2 выполняет функцию облучения крупногабаритных образцов высоким флюенсом нейтронов.

3. Возможность образования разнообразных критических конфигураций системы

Реактивность связанной в нейтронном отношении системы зависит от следующих величин:

- реактивности изолированных систем;
- реактивности, создаваемой нейтронами связи;
- реактивности, создаваемой нейтронами, отраженными от материала АЗ;
- «возмущения» образцами реактивности системы.

На рис. 2 приведена диаграмма связанной системы «БАРС-5» для $R_{\text{щц}} = 0,33; 0,75$ м соответственно. Диаграмма состояний реактора «ТИРАН» приведена в работе [2]. Из рис. 2 видно:

- реактивности связанных систем с постоянным отношением мощностей $\left(\frac{N_1}{N_2} = \text{const} \right)$

лежат на прямых линиях, расположенных под углом 45° к осям координат;

- одинаковые реактивности связанных систем лежат на кривых линиях ($\rho_{\text{св}} = 0, \rho_{\text{св}} = +1\beta$);

– одну и ту же реактивность связанной системы можно получить при разных отношениях реактивностей компонентов;

– связанные из двух или трех АЗ системы имеют бесконечно большое количество критических конфигураций (каждая точка на диаграмме состояния реактора характеризует свою связанную систему).

Связанные системы позволяют исследовать образцы, которые сильно «возмущают» реактивность однозонных систем. В табл. 1 приведены разрешенные «вклады» в реактивность для реакторов типа «БАРС». Из табл. 1 видно, что допустимый «вклад» образцов в реактивность «ТИРАН» в 16 раз больше, чем в реактивность «БАРС-1».

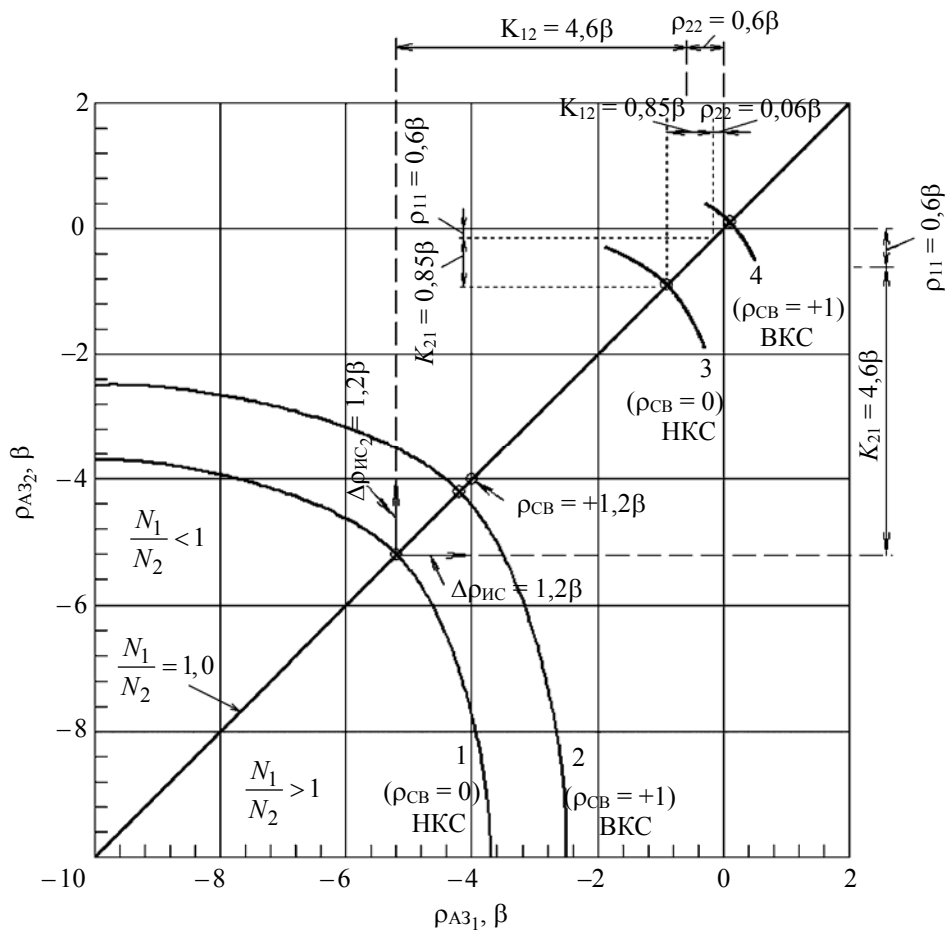


Рис. 2. Диаграмма состояний реактора «БАРС-5» (1, 2 – $R_{\text{цц}} = 0,33$ м; 3, 4 – $R_{\text{цц}} = 0,75$ м)

Таблица 1

Материал экранов АЗ и допустимый «вклад» образцами в реактивность

Реактор	«Возмущение» реактивности образцами, $\beta_{\text{эф}}$	Экран АЗ	Примечание
«БАРС-1»	0,5	–	При эксплуатации был установлен экран из Cd
«БАРС-2»	2	Карбид бора	Толщина экрана 5 мм
«БАРС-3»	3	Cd	Толщиной 1 мм
«БАРС-5»	4	^{10}B 80 %-го обогащения	Вклад в одну АЗ или в АЗ ₁ + АЗ ₂
«ТИРАН»	8	^{10}B + Cd	Вклад образца в АЗ РУН-2
	4		Вклад АЗ РУН-2 с образцом в АЗ «БАРС-5»

4. Нейтронные поля

МАИР могут легко перестраивать конфигурацию опытов с учетом геометрии образца для обучений. Поля нейтронов, создаваемые различными конфигурациями АЗ МАИР, исследованы в местах установки экспериментальных образцов.

На рис. 3 приведено распределение флюенса нейтронов вдоль центральной оси реактора «ТИРАН» для разных критических систем (КС). Рис. 3 иллюстрирует распределение флюенса нейтронов по глубине образца: возрастание 6, постоянство 2, уменьшение 4; 1, т. е. в МАИР имеется возможность создавать нужный «профиль» флюенса нейтронов по образцу.

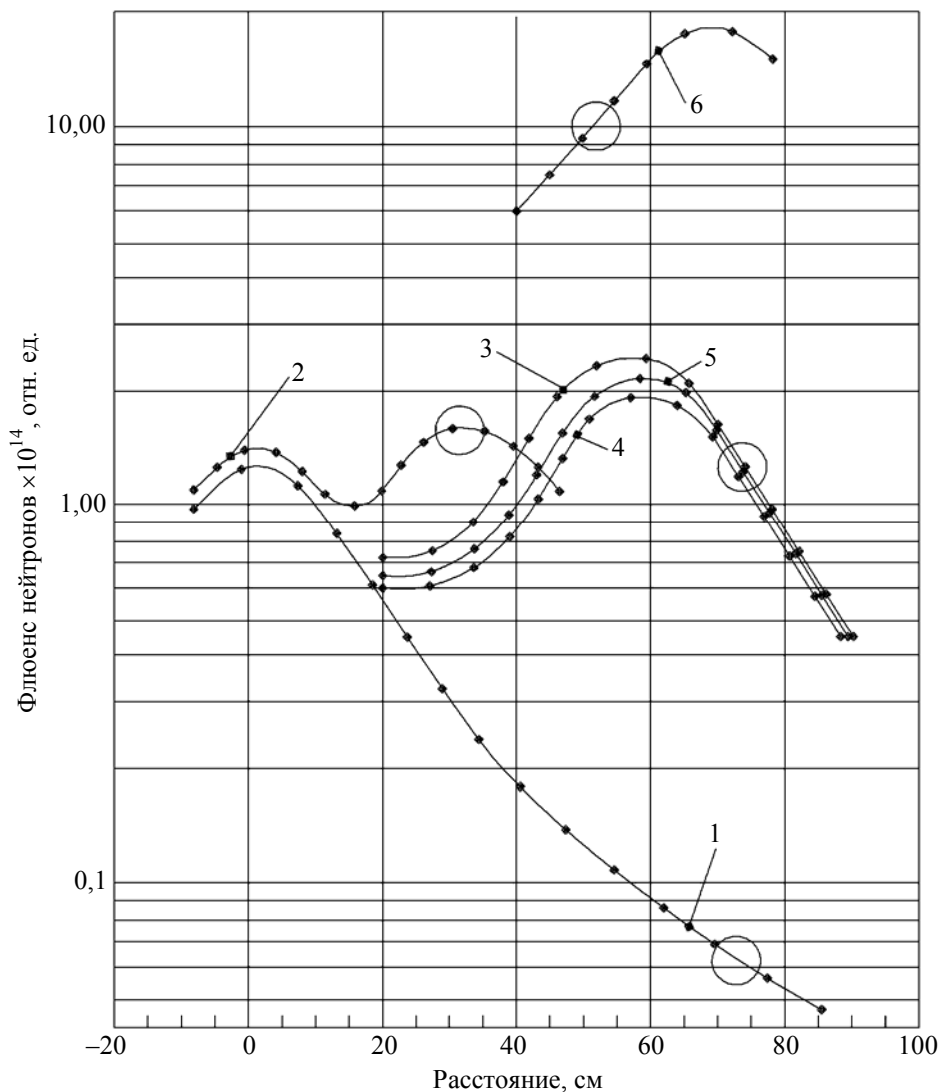


Рис. 3. Распределения флюенсов нейтронов вдоль центральной оси «БАРС-5» + РУН-2 для различных конфигураций комплекса с образцом (O): 1 – «БАРС-5», $R = 33,7$ см, РУН-2 отсутствует; 2 – «БАРС-5» + РУН-2, $R = 33,7$ см, $L = 44$ см, $Q = 10$; 3 – «БАРС-5» + РУН-2, $R = 33,7$ см, $L = 47,0$ см, $Q = 43$; 4 – «БАРС-5» + РУН-2, $R = 33,7$ см, $L = 47,0$ см, $Q = 45$; 5 – «БАРС-5» + РУН-2, $R = 33,7$ см, $L = 47,0$ см, $Q = 45$; 6 – «БАРС-5» + РУН-2, $R = 33,7$ см, $L = 68,0$ см, $Q = 135$

5. Импульсы делений одинаковой полуширины, но разные по энерговыделению

В «БАРС-5», при управлении в одном компоненте, для другого компонента можно исключить зависимость полуширины импульса от энерговыделения. Для этого одну АЗ необходимо использовать в качестве источника внешних нейтронов, а другую – в качестве бустера, размножающего эти нейтроны. В серии импульсов использовалась возможность получения в АЗ₂ коротких ($t_{1/2} < 100$ мкс)

импульсов делений при небольших энерговыделениях.

Анализ полученных данных показывает, что в АЗ₂ в широком диапазоне можно влиять на энерговыделение путем изменения соотношений стартовых мощностей. При этом в ведущей АЗ₁ мощность должна оставаться постоянной, а изменение соотношений мощностей осуществляется за счет изменения мощности АЗ₂. Полуширины получаемых импульсов будут практически одинаковыми, а отношение числа делений в АЗ будет соответствовать отношению стартовых мощностей.

6. Физические параметры

Экспериментально определенные физические параметры БАРС-5, ТИРАН приведены в табл. 2.

Для двухзонной системы БАРС-5 параметры компонентов равны: $l_{эф1} = l_{эф2}$, $K_{12} = K_{21}$, $\gamma_{A31} = \gamma_{A32}$. При вариации отношения мощностей компоненты $l_{эф}^{БАРС-5}$, $\beta_{эф}^{БАРС-5}$ остаются постоянными. Изменяется только величина $\gamma^{БАРС-5}$. В комплексе «БАРС-5» + РУН $l_{эф}$ больше, чем в «БАРС-5».

Для трехзонной системы «ТИРАН» соотношения между физическими параметрами следующие:

$$\begin{aligned} l_{эф1} &= l_{эф2} \neq l_{эф3}; \\ \gamma_1 &= \gamma_2 \neq \gamma_3; \\ \beta_{эф1} &= \beta_{эф2} \neq \beta_{эф3}; \\ K_{12} &= K_{21} \neq K_{1(2)3} \neq K_{31(2)}. \end{aligned}$$

«ТИРАН» можно рассматривать как систему с переменными параметрами:

$$\begin{aligned} l_{эф}^{БАРС-5} &< l_{эф}^{ТИРАН} < l_{эф}^{РУН+образец}, \\ \gamma^{БАРС} &> \gamma^{ТИРАН} > \gamma^{РУН}, \\ \beta_{эф}^{БАРС-5} &< \beta_{эф}^{ТИРАН} < \beta_{эф}^{РУН+образец}. \end{aligned}$$

Для однозонных АИР методы измерения физических параметров и регистрирующая аппаратура хорошо отработаны и применялись для исследования АЗ, входящих в состав МАИР и работающих в автономном режиме.

Для определения физических параметров МАИР методики одиночных АИР были усовершенствованы с учетом физических особенностей систем, связанных в нейтронном отношении, а для определения $l_{эф}$ была разработана методика многократного нейтронного импульса и корреляционный метод с гамма-нейтронным разделением.

Физические параметры «ТИРАН» [2] определялись для изолированного реактора и для реактора с экспериментальными образцами. Параметры исследуемых критических систем приведены в работе [2].

Таблица 2

Физические параметры МАИР

Параметр	«БАРС-5»					«ТИРАН»
	Изолированная АЗ с ЭК, мм		Двойная связанная система с расстоянием между осевыми линиями АЗ «БАРС-5», м			Тройная связанная система с расстоянием между передним (обращенным к реактору) торцом АЗ РУН-2 и плоскостью, образованной осевыми линиями АЗ «БАРС-5», м
	Ø 60	Ø 90	0,33	0,75	1,5	
Постоянная α_R , c^{-1}	$5,6 \cdot 10^5$	$4,9 \cdot 10^5$	$4,6 \cdot 10^5$	$4,8 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^5$	0,38–0,68
Эффективная доля запаздывающих нейтронов	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$(6,9 - 7,2) \cdot 10^{-3}$
Эффективное время жизни мгновенных нейтронов, $l_{эф}$, с	$1,23 \cdot 10^{-8}$	$1,40 \cdot 10^{-8}$	$1,50 \cdot 10^{-8}$	$1,43 \cdot 10^{-8}$	$1,38 \cdot 10^{-8}$	$(1,64 - 2,43) \cdot 10^{-8}$
Температурный коэффициент гашения, $\gamma_{ст}$, $\beta_{эф}/^{\circ}C$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$			$1,7 \cdot 10^{-3} - 4,5 \cdot 10^{-4}$
Коэффициенты связи	–	–	4,6	0,7	0,25	$K_{ру} < 2,01$ $K_{ур} < 2,25$

Эксперименты показали:

– $l_{\text{эф}}^{\text{ТИРАН}}$ слабо зависит от Q РУН-2 (Q – коэффициент умножения изолированного РУН-2) и увеличивается при установке экспериментального образца;

– $l_{\text{эф}}^{\text{ТИРАН}}$ уменьшается при увеличении $\gamma^{\text{БАРС}}/\gamma^{\text{РУН}}$ для $L = \text{const}$ (L – расстояние между АЗ «БАРС-5» и РУН-2), а также при увеличении L при $\gamma^{\text{БАРС}}/\gamma^{\text{РУН}} = \text{const}$.

Используя эти свойства комплекса, $l_{\text{эф}}^{\text{ТИРАН}}$ можно перед импульсом подбирать: уменьшать или увеличивать для получения импульсов делений с ресурсной полушириной, а флюенс нейтронов на образец обеспечивать установкой нужных значений $\gamma^{\text{БАРС}}/\gamma^{\text{РУН}}$ и Q РУН-2.

Заключение

1. Результаты сравнения «БАРС-5» и «ТИРАН» с «БАРС-3» показывают, что разработанные МАИРы как моделирующие установки имеют высокие качественные показатели, являются уникальными, связанными в нейтронном отношении системами. Такое высокое качество МАИР достигнуто увеличением количества активных зон, распределением функциональных нагрузок между АЗ и возможностью оптимизации $l_{\text{эф}}^{\text{реактор+образец}}$ в облучательных опытах.

2. Физические параметры «БАРС-5» (α_R , $l_{\text{эф}}$, $\beta_{\text{эф}}$) не меняются при изменении отношения энерговыделения в компонентах АЗ и не зависят от отношения коэффициентов связи, т. е. его кинетика и динамика при симметричной загрузке описываются одноточечной моделью. Наличие таких свойств «БАРС-5» позволило упростить управление реактором, а в случае установки около двух АЗ «БАРС-5» еще третьей АЗ образованную трехзонную систему (АИР + АИР + АИР) можно рассматривать как двухзонную, что и реализовано в «ТИРАН».

3. Экспериментальные исследования МАИР «БАРС-5», «ТИРАН» показали, что они имеют ряд новых возможностей по сравнению с однозонными АИР типа «БАРС»:

– распределение функциональных нагрузок на разные АЗ. Например, функциональные нагрузки на АЗ «ТИРАН» распределены так: две АЗ «БАРС-5» (с меньшим $l_{\text{эф}}$) исполняют роль драйвера связанной трехзонной системы и отвечают за форму импульса, АЗ РУН-2 (с большим ЭК) исполняет роль реактора умножителя и обеспечивает высокий флюенс нейтронов на образец;

– уменьшение неравномерности и увеличение уровня энерговывода в большие образцы из-за наличия области с флюенсом нейтронов, который образуется как нейтронами утечки нескольких АЗ, так и нейтронами, ответственными за нейтронную связь между компонентами АЗ;

– возможность в реакторе «ТИРАН» изменять размеры этой области за счет установки АЗ реактора-умножителя на разных расстояниях от двух АЗ «БАРС-5» и создавать нужный «профиль» ввода энергии в экспериментальный образец;

– возможность образовывать бесконечное число критических систем и выбирать из них необходимые для экспериментов с нужным отношением энерговыделения в компонентах АЗ;

– возможность загружать в связанную систему более крупные образцы, так как система в целом менее чувствительна к «возмущению» реактивности образцами;

– возможность изменения в широких пределах параметров импульсов делений: одно и то же число делений в импульсе может быть получено при разных полуширинах, и наоборот;

– возможность управлять нейтронной связью позволяет достигать большой скорости ввода реактивности (до 300 β/c) при малых механических скоростях регуляторов (~6 м/с) и генерировать импульсы делений в режиме «С мощности»;

– возможность увеличивать скорость энерговывода в крупногабаритные образцы, так как

ширина импульса делений на половине высоты увеличивается незначительно по сравнению с однозонными реакторами этого же типа, несмотря на то, что один из компонентов АЗ имеет большую полость;

– возможность перед генерированием импульса делений подбирать $l_{эф}$ системы в целом для получения импульса с нужной шириной, тем самым обеспечивая нужную скорость энерговывода в образец.

Список литературы

1. Колесов В. Ф. Аperiodические импульсные реакторы. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007. Т. 1; с. 15.

2. 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. 23–31.

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. 108–115.