

ДИНАМИКА ТРЕХЗОННОГО РЕАКТОРА «ТИРАН»

DYNAMICS OF THE THREE-CORE REACTOR «TIRAN»

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

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

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

Рассмотрены результаты экспериментов на комплексе ТИРАН с конвертором нейтронов и модулями лазеров с ядерной накачкой. С помощью решения обращенных уравнений кинетики и формы импульса делений рассчитываются поведения реактивности связанных систем в режиме «С мощности».

There are considered the results of experiments on complex TIRAN with neutron converter and modules of nuclear-pumped lasers. By means of solving inverted equations of kinetics and fission pulse shape, there is calculated the behavior of reactivity of coupled systems in the mode when a «strong» internal neutron source is available.

Введение

В РФЯЦ-ВНИИТФ в качестве источников n, γ – излучений высокой интенсивности используются многозонные аperiodические импульсные реакторы (МАИР): двухзонный БАРС-5 [0] и трехзонный ТИРАН [0].

Реактор ТИРАН введен в эксплуатацию в 1994 году, состоит из реактора БАРС-5 и установленного рядом реактора-умножителя РУН-2 [3]. За время эксплуатации МАИР были проведены многочисленные опыты с образцами из ДМ («быстрые» образцы), для которых проблемы облучения практически решены.

В последнее время появилась необходимость в исследовании на реакторе ТИРАН комбинированных образцов, состоящих из ДМ и замедлителя нейтронов. К таким образцам, в частности, относятся: объекты, содержащие ДМ и замедлитель («медленный» образец), и модули лазеров с ядерной накачкой (ЛЯН), состоящие из протяженного замедлителя и лазерно-активных элементов в виде длинных тонкостенных трубок с нанесенным на внутреннюю поверхность ДМ.

Из экспериментов, проведенных на БАРС-5, ТИРАН с большими образцами [4], известно, что размещение крупногабаритных (по отношению к размеру активной зоны) объектов, а также образцов, содержащих ДМ, влияет на кинетику и динамику реактора.

Установленные на активные зоны (АЗ) БАРС-5 защитные экраны, поглощающие нейтроны низких энергий, практически устраняют эффекты возмущения, вызванные «медленными» образцами. На трехзонном реакторе ТИРАН меры по защите АЗ от влияния облучаемых образцов хуже, т.к. экраны РУН-2 выполнены из кадмия. Кроме того, реактор ТИРАН, в отличие от реактора БАРС-5, состоит из неодинаковых компонентов – двух одинаковых АЗ реактора БАРС-5 и значительно отличающейся АЗ РУН-2. Поэтому время жизни мгновенных нейтронов $l_{3\phi}$ и эффективность обратной связи по реактивности реактора в целом определяются такими же характеристиками компонентов, а также соотношением числа делений в компонентах реактора.

Экспериментально-расчетное определение параметров динамики

Исследование характеристик ввода и гашения реактивности ведется с использованием метода восстановления реактивности по форме импульса делений, путем решения обращенных уравнений кинетики связанной системы в одноточечном приближении.

$$\begin{cases} \rho = 1 - \frac{(1 - \beta_{эф})n}{I_{эф}\dot{n} - \sum_k \lambda_k C_k + S} \\ C_k = \frac{1}{\lambda_k} (k\beta_k n - \dot{C}_k) \end{cases}$$

Здесь функция n – запись формы импульса делений, а остальные обозначения общепринятые.

Алгоритм расчета реализован в программе xForma, которая осуществляет расчет функций реактивности от времени, периода разгона (спада) от времени, реализованной избыточной реактивности, скорости ввода реактивности, скорости гашения реактивности на заднем фронте импульса делений, «провала» реактивности, минимального периода разгона. Программа xForma реализована на языке Delphi, интерфейс показан на рис. 1.

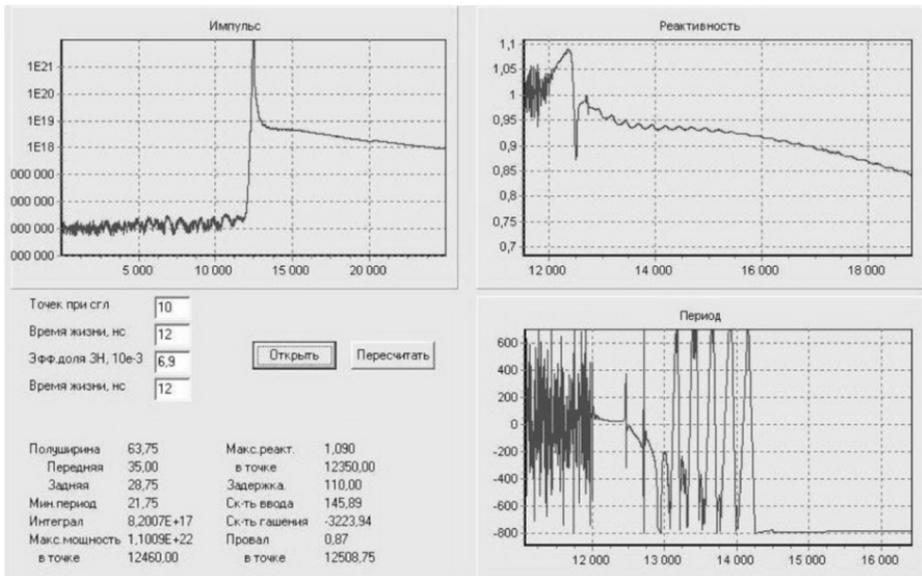


Рис. 1. Интерфейс программы xForma

На рис. 2 приведено изменение реактивности, а на рис. 3 изменение периода во времени, совмещенные с формой импульса делений реактора «ТИРАН». По этим данным расчетным путем определяются следующие параметры:

1. Реализованная избыточная реактивность $\Delta\rho_{\text{реал}}$, отличающаяся от введенной $\Delta\rho_{\text{вв}}$ в силу наличия «запаса» избыточной реактивности,

$$\Delta\rho_{\text{реал}} = \frac{1}{2m} \sum_{i=n_{\text{max}}-m}^{n_{\text{max}}+m-1} \rho_i - \beta_{эфф},$$

где $2m$ – число интервалов усреднения, определяемое как $m\Delta t = 5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Это означает, что усреднение реализованной реактивности происходит в интервале 5 мкс справа и слева от максимального значения; n_{max} – шаг расчета, на котором значение реактивности достигает максимума (пик реактивности), соответствует значению времени t_{max} ; ρ_i – массив значений реактивности.

2. Скорость ввода избыточной реактивности a определяется методом наименьших квадратов при построении функции $\tilde{\rho} = at + b$ во временном интервале $[(n_{\text{max}} - 10m) \cdot \Delta t; n_{\text{max}} \Delta t]$.

3. Скорость гашения реактивности $a_{\text{гаш}}$ определяется на заднем фронте импульса делений до формирования минимума реактивности также методом МНК при построении функции $\bar{\rho} = -a_{\text{гаш}}t + c$.

4. «Провал» реактивности $\Delta\rho_{\min}$, определяемый как подкритичность относительно критичности на мгновенных нейтронах (МН) в первом минимуме реактивности на заднем фронте импульса делений.

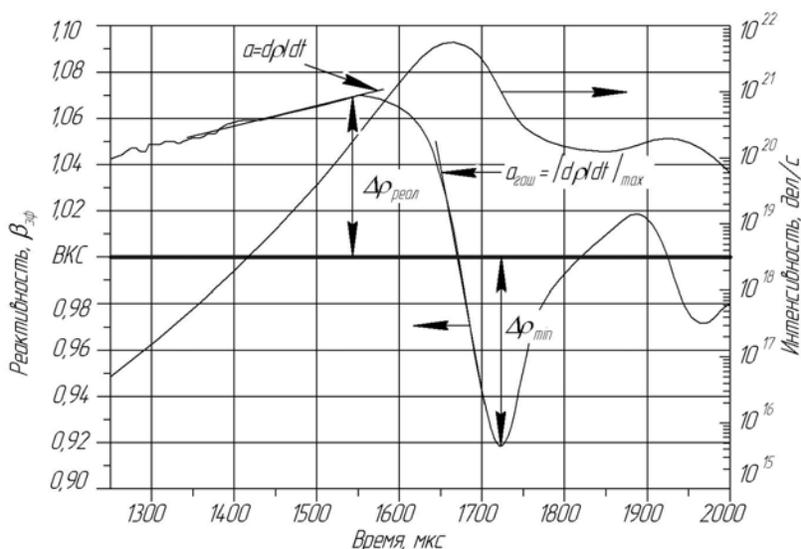


Рис. 2. Иллюстрация определения реактивности и динамических параметров импульса

Кроме определения перечисленных параметров реактивности, важным с точки зрения анализа влияния экспериментального образца на характеристики импульса является расчет периода разгона как функции времени, а также полуширины по форме нейтронного импульса.

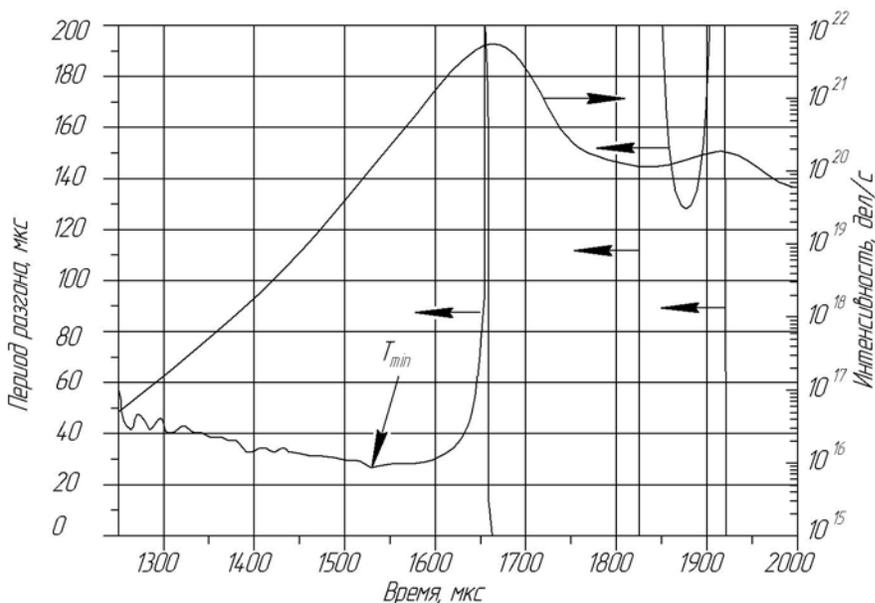


Рис. 3. Иллюстрация расчета периода разгона импульса

Для реактора ТИРАН расчетным путем показано, что в районе состояния критичности на МН отношения реактивностей изменяются незначительно, а минимальный период разгона соответствует реактивности системы в целом. На рис. 4 приведен пример полученных в расчете зависимостей от времени реактивностей, периодов разгона и отношения мощностей в процессе импульса делений в системе реактор БАРС-5 + реактор-умножитель РУН-2.

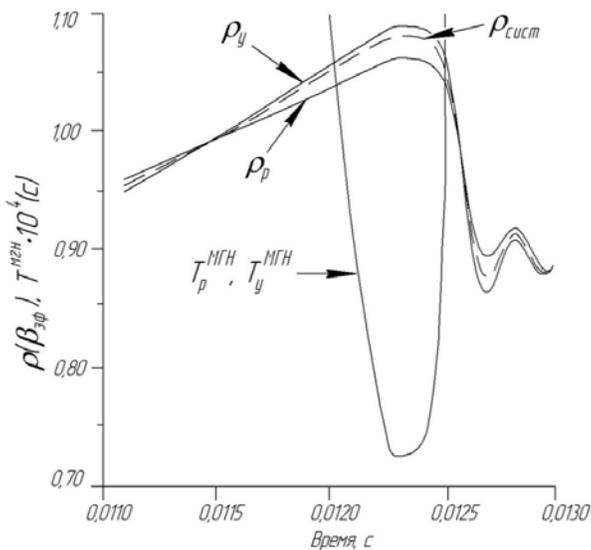


Рис. 4. Зависимость величин $\rho_p(t)$, $\rho_y(t)$, $T_p^{МГН}(t)$, $T_y^{МГН}(t)$ и $\rho_{сист}^{(ТИРАН)}$ от времени в процессе импульса делений в системе $p + y$ (p – реактор БАРС-5, y – реактор-умножитель РУН-2)

Соответствие реактивности минимальному периоду дает возможность проводить расчет реактивности по форме импульса делений, записанного детектором, который регистрирует суммарный поток нейтронов от всех трех АЗ реактора ТИРАН.

Постановка экспериментов

Опыты по исследованию динамики ТИРАН проводились с конвертором быстрых нейтронов в тепловые (КБНТ) [5], лазерным модулем (ЛМ) и лазерной кюветой (ЛК).

Конфигурация реактора ТИРАН с КБНТ приведена на рис. 5. Расстояние между АЗ реактора БАРС-5 составляет $R_{щц} = 337$ мм. Расстояние между линией, проходящей через центр АЗ БАРС-5, и РУН-2L = 330 мм, заполнение гнезд матрицы РУН-2: все гнезда заполнены стержнями из делящегося материала.

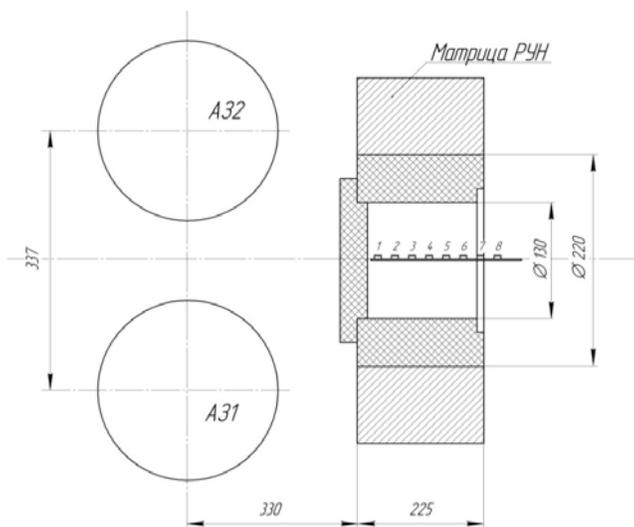


Рис. 5. Конфигурации реактора ТИРАН с КБНТ ($R_{щц} = 337$ мм, $L = 330$ мм)

Конфигурация реактора ТИРАН с ЛМ показана на рис. 6, с ЛК – на рис. 7, фото облучательной позиции с ЛМ – на рис. 8.

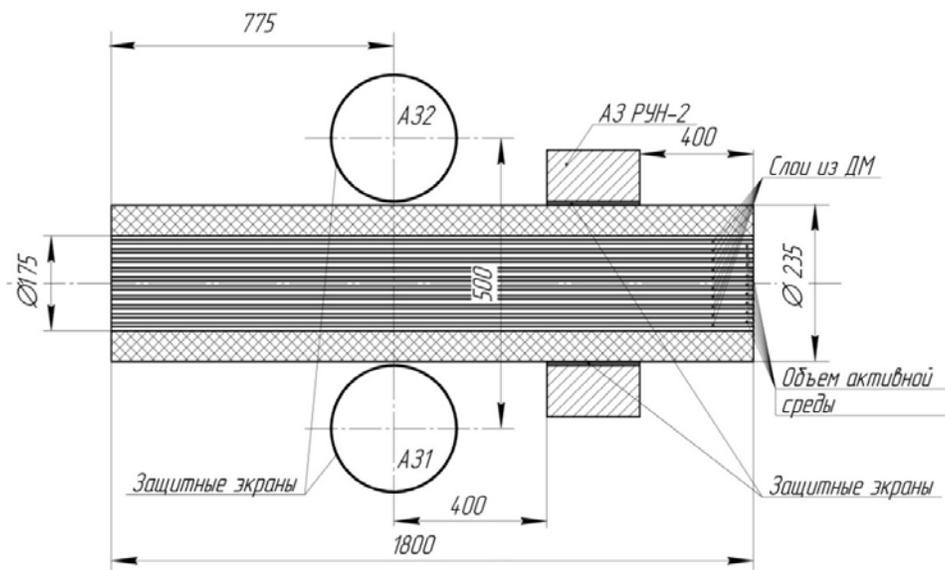


Рис. 6. Конфигурация реактора ТИРАН с ЛМ (размеры – в мм) ($R_{\text{щ}} = 500$ мм, $L = 400$ мм)

Лазерный модуль (ЛМ) представляет собой полиэтиленовый цилиндр наружным диаметром 235 мм, длиной 1800 мм, толщина полиэтилена 30 мм. Внутри полиэтилена размещается герметичный объем с матрицей из 37 трубок, на внутреннюю поверхность которых нанесен уран. Лазерный модуль расположен горизонтально, занимает пространство между АЗ и канал АЗ РУН-2, ось ЛМ совпадает с осью канала АЗ РУН-2.

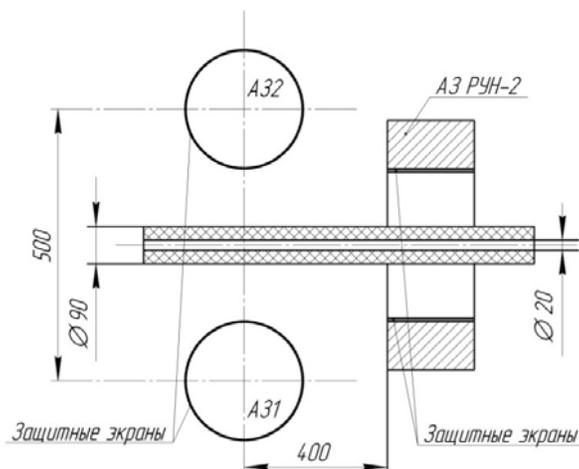


Рис. 7. Конфигурация реактора ТИРАН с ЛК (размеры – в мм) ($R_{\text{щ}} = 500$ мм, $L = 400$ мм)

Лазерная кювета (ЛК) представляет собой полиэтиленовый цилиндр наружным диаметром 90 мм, длиной 1050 мм. Полиэтилен имеет толщину 35 мм, внутри него размещается герметичный объем с активными лазерными элементами, составляющими трубку. Расположение лазерной кюветы аналогично экспериментам с ЛМ.

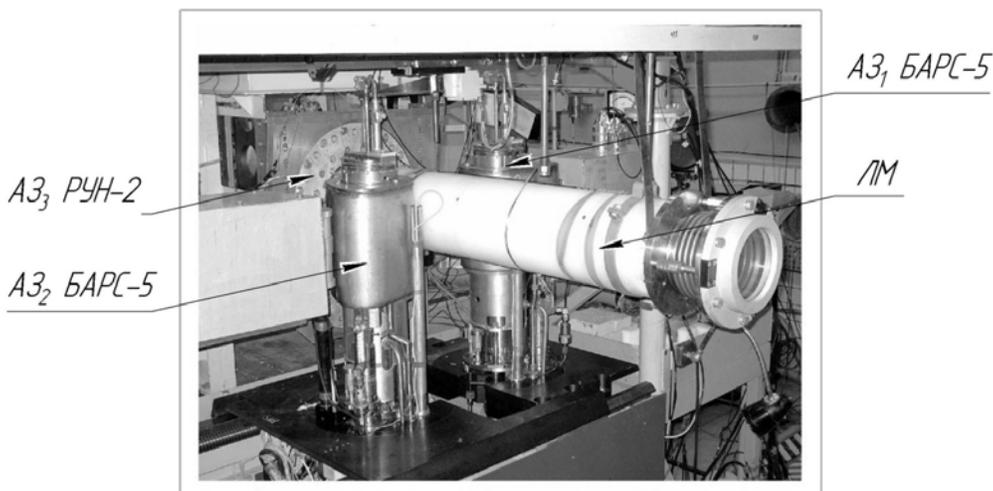


Рис. 8. Фото облучательной позиции с ЛМ

На реакторе ТИРАН с КБНТ проведена серия последовательно возрастающих по энерговыделению импульсов делений.

Формы импульсов делений и реактивность, восстановленная по форме импульса делений, показаны на рис. 9.

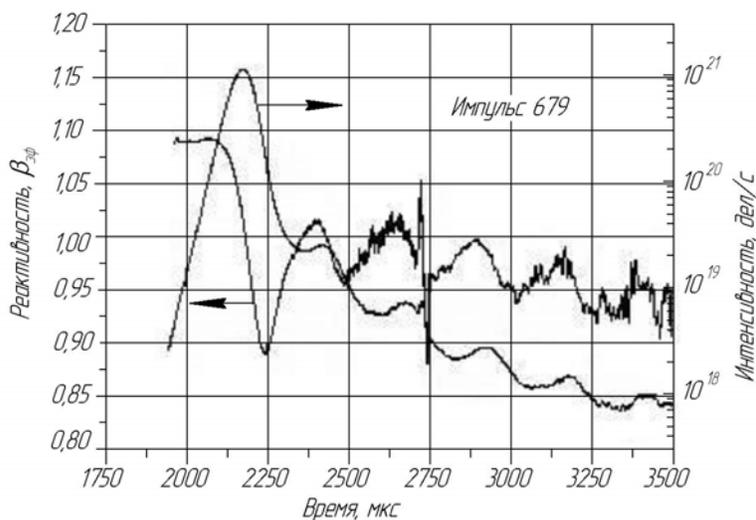


Рис. 9. Формы импульсов делений, зависимость реактивности от времени для конфигурации с КБНТ

Проведена серия последовательно возрастающих по энерговыделению импульсов делений на реакторе ТИРАН с ЛМ и ЛК.

Формы импульсов делений, зарегистрированные подсистемой «Динамика», показаны на рис. 10 и рис. 11 для конфигураций с ЛМ и ЛК, соответственно.

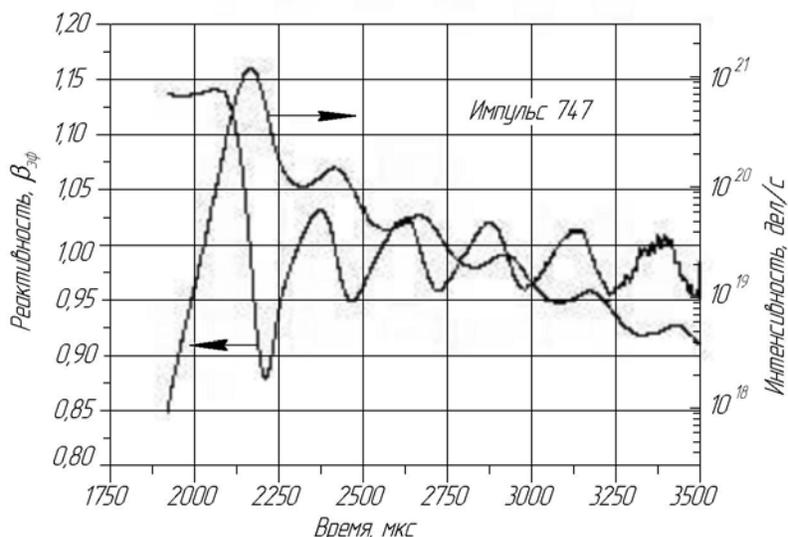


Рис. 10. Формы импульсов делений и зависимость реактивности от времени для конфигурации с ЛМ

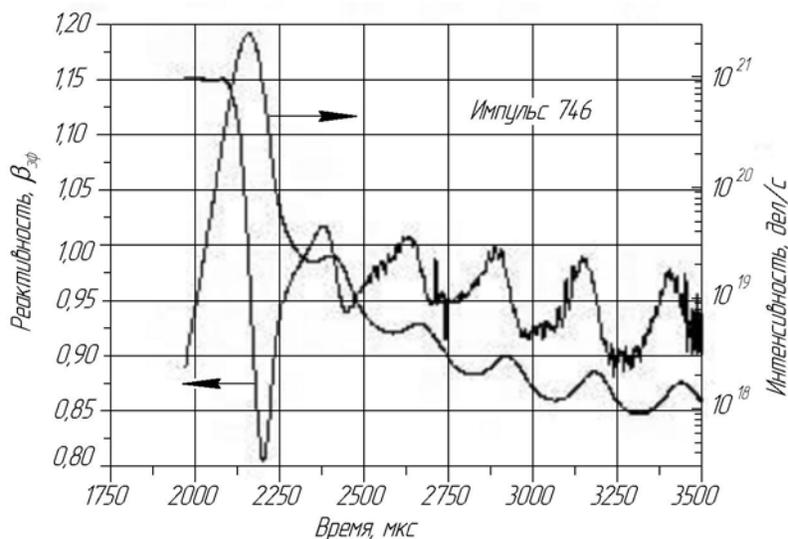


Рис. 11. Формы импульсов делений и зависимость реактивности от времени для конфигурации с ЛК

Результаты экспериментов

Результаты исследования динамики реактора ТИРАН приведены в виде графиков, показанных на рис. 12–16.

На рис. 12 показана зависимость числа делений в АЗ реактора БАРС-5 (сумма по двум АЗ) и АЗ РУН-2 от реализованной реактивности.

Из рис. 12 видно, что отношение чисел делений $Y_{\text{БАРС}}/Y_{\text{РУН}}$ изменяется в зависимости от загрузки канала АЗ РУН-2 образцами: $Y_{\text{БАРС}}/Y_{\text{РУН}} \cong 1; 2; 3,3$ соответственно для КБНТ, ЛК, ЛМ. При одинаковом положении нижнего блока РУН-2 коэффициент умножения РУН-2 без образца равен 57 ± 2 , а с ЛМ 22 ± 3 . Это означает, что установка протяженного замедляющего нейтроны образца приводит к уменьшению нейтронной связи между нижним и верхним блоком АЗ РУН-2, и, следовательно, к снижению числа делений в АЗ РУН-2.

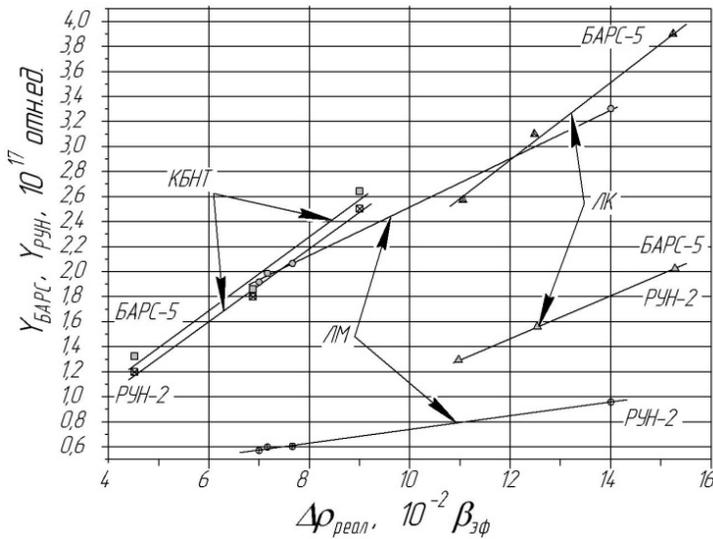


Рис. 12. Зависимость энерговыделения в БАРС-5 и РУН-2 от реализованной реактивности

Отметим, что установка таких образцов, как ЛМ и ЛК, вносящих отрицательный «вклад» в реактивность реактора, потенциально более опасна, чем для образцов, имеющих положительный «вклад». Это обусловлено тем, что массивные замедлители могут при их извлечении из реактора создать большие скорости ввода реактивности и привести к реализации энерговыделения свыше установленного предела.

На рис. 13 показана зависимость обратного минимального периода разгона от реализованной в импульсе делений реактивности. Период разгона в условиях непрерывного ввода реактивности может быть неодинаков для БАРС-5 и РУН-2, однако измерения показали, что для вершины импульса делений, когда система близка или переходит критичность на МН, периоды разгона БАРС-5, РУН-2 совпадают.

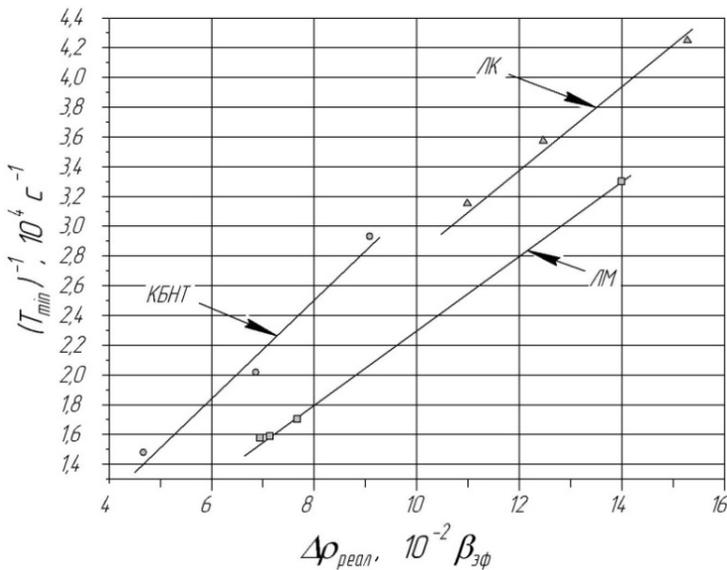


Рис. 13. Зависимость обратного периода разгона от реализованной избыточной реактивности

Другими важными величинами, характеризующими динамику реактора ТИРАН, являются «провал» реактивности и скорость гашения реактивности после формирования вершины импульса делений.

На рис. 14 приведена взаимосвязь «провала» реактивности и полуширины импульса делений, а на рис. 15 – «провала» реактивности, реализованной избыточной реактивности и скорости гашения реактивности.

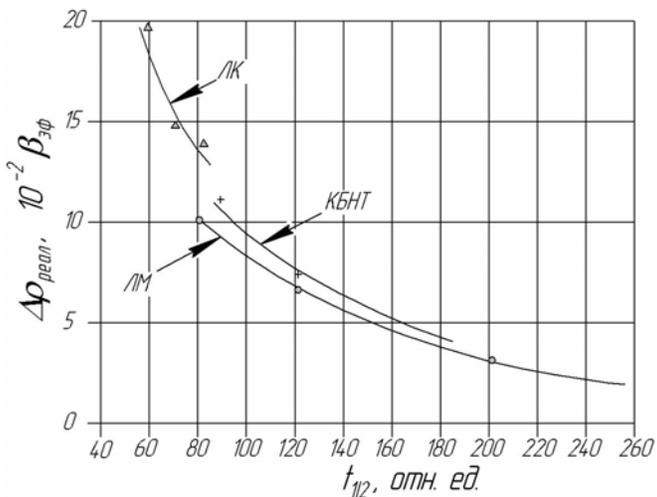


Рис. 14. Взаимосвязь «провала» реактивности и полуширины импульса делений

Из рис. 14 видно, что «провал» реактивности при работе реактора ТИРАН с ЛМ на $\sim 5 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}$ меньше, чем в конфигурации с ЛК, с ростом полуширины он сильно уменьшается. При генерировании импульсов делений с $t_{1/2} > 260$ мкс может получиться ситуация, когда после формирования вершины импульса реактор будет находиться в состоянии, близком к критичности на МН, и гашение реактивности в этом случае возможно только за счет аварийного сброса.

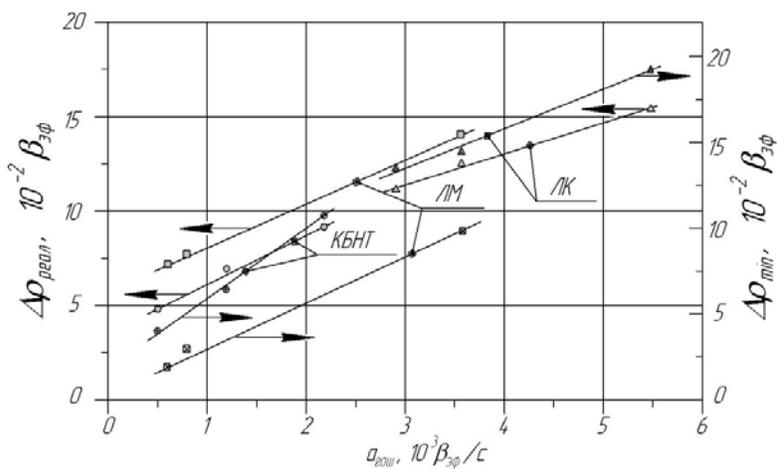


Рис. 15. Взаимосвязь «провала» реактивности, реализованной избыточной реактивности со скоростью гашения реактивности

Результаты анализа влияния образцов на динамику реактора ТИРАН приведены в табл. 1.

Таблица 1

«Провал» реактивности $\Delta\rho_{мин}$ в зависимости от типа образца

Тип образца	$\Delta\rho_{реал}, 10^{-2} \beta_{эф}$	$\Delta\rho_{мин}, 10^{-2} \beta_{эф}$	Примечание
Замедлитель нейтронов (ЛК, КБНТ)	0...6	$\Delta\rho_{мин} \approx \Delta\rho_{реал}$	квазистатическое гашение
	6...14	$\Delta\rho_{мин} \approx \Delta\rho_{реал} + (2...4) \cdot 10^{-2} \beta_{эф}$	начало действия теплового удара
ДМ + замедлитель нейтронов (ЛМ)	0...6	$\Delta\rho_{мин} \approx 0$	влияние образца – «подпитка» нейтронами
	6...14	$\Delta\rho_{мин} \approx \Delta\rho_{реал} - (\sim 5) \cdot 10^{-2} \beta_{эф}$	

Анализ динамики изменения реактивности реактора ТИРАН при работе с образцами показал, что замедляющие нейтроны образцы слабо влияют на отрицательную обратную связь по реактивности связанной системы. Комбинированные образцы из замедлителя и ДМ уменьшают «провал» реактивности и скорость гашения реактивности – ухудшается эффективность обратной связи по реактивности. При этом (см. рис. 10) связанная система на «хвосте» импульса несколько раз переходит состояние критичности на МН, и гашение реактивности происходит за счет срабатывания аварийной защиты.

Таким образом, экспериментальные исследования работы реактора ТИРАН с крупногабаритными образцами показали, что изменение динамики реактора вследствие размещения образца зависит от состава, габаритов и местоположения образца относительно АЗ.

Заключение

Для реактора БАРС-5, как составной части реактора ТИРАН, ранее показано [4], что его кинетические и динамические характеристики практически не изменяются при работе с крупногабаритными образцами. Однако для реактора ТИРАН это не так – хотя реактор БАРС-5 является драйвером системы, но в этом случае реактор ТИРАН с образцом следует рассматривать как систему «реактор + подкритическая сборка». Подкритическая сборка при генерировании импульса делений «подпитывает» АЗ реактора нейтронами, что приводит к увеличению реактивности системы, интенсивности делений на заднем фронте импульса делений и, соответственно, уменьшению «провала» реактивности и скорости гашения реактивности.

Определены диапазоны изменения динамических параметров реактора ТИРАН.

Вместе с тем показано, что проведение работ по исследованию крупногабаритных замедлителей (и замедлителей в комбинации с ДМ) на реакторе ТИРАН является более ядерно-опасным, чем при проведении опытов с другими объектами, т. к. во-первых, такие образцы вносят отрицательное изменение реактивности и необходимо повысить требования к их фиксации в облучательной позиции; во-вторых, после формирования вершины импульса делений уменьшается скорость гашения реактивности и «провал» реактивности и глубина модуляции реактивности. При этом на «хвосте» импульса делений состояние системы может несколько раз переходить критичность на МН.

Таким образом, исследование динамики реактора ТИРАН позволило расширить возможности экспериментальной базы РФЯЦ-ВНИИТФ в плане проведения облучательных опытов по исследованию образцов, содержащих замедлитель нейтронов и ДМ, и получать результаты по масштабированию лазеров с ядерной накачкой.

Список литературы

1. Snopkov A. A., Gorin N. V., Gornovoi G. A. et al. TWO-CORE FAST PULSE REACTOR “BAРС-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.
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. Москва 2001, выпуск 1/2 (импульсные реакторы и простые критические сборки). С. 23–31.
3. Подъезжих А. Л., Снопков А. А., Черашев В. И. Реакторный умножитель нейтронов РУН-2. Конструкция и физические параметры. В сб.: Труды IV международной конференции «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы». Т. 2. ГНЦ РФ ФЭИ, Обнинск, 2009. С. 542–545.
4. Андреев С. А., Снопков А. А., Черашев В. И. Особенности работы многозонных импульсных реакторов БАРС-5, ТИРАН. В сб.: Труды IV международной конференции «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы», том 2 – ГНЦ РФ ФЭИ, Обнинск, 2009. С. 505–509.
5. Литвин В. И., Снопков А. А., Черашев В. И. и др. Протяженный источник тепловых нейтронов на базе трехзонного импульсного реактора ТИРАН. В сб.: Труды IV международной конференции «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы», том 2 – ГНЦ РФ ФЭИ, Обнинск, 2009. С. 667–670.