

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНЕГО ОКРУЖЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ИИР БАРС-6

Н. С. Гаранин, О. Ф. Кухарчук, Ю. А. Прохоров

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского», г. Обнинск Калужской обл.

Статья поступила в редакцию 14.06.2019, после доработки – 21.08.2019, принята к публикации – 04.10.2019

В работе представлены результаты расчетов влияния конструкционных материалов экспериментальных устройств, находящихся вблизи реактора БАРС-6, на среднее время жизни нейтронов. Расчеты проводились при различных расстояниях между активными зонами реактора, при различных толщинах полиэтиленового замедлителя в экспериментальном устройстве. Рассчитывалось влияние модели тела человека на реактивность при проведении плановых работ на реакторе.

**Ключевые слова:** импульсный реактор БАРС-6, время жизни нейтронов в реакторе, воздействие на время жизни нейтронов окружающих предметов, расчет зависимости воздействия от типа и геометрии окружающих предметов.

### RESEARCH OF THE EXTERNAL ENVIRONMENT INFLUENCE ON PULSED RESEARCH REACTOR BARS-6 PARAMETERS / N. S. GARANIN, O. F. KUKHARCHUK, Yu. A. PROKHOROV //

The paper presents the calculation results of the influence of construction materials of experimental devices located near the reactor BARS-6 on the neutrons average lifetime. The calculations were performed for different distances between the reactor active cores with various thicknesses of polyethylene moderator in the experimental device. The influence of the model of the human body on reactivity during routine work on the reactor was calculated.

**Key words:** pulsed reactor BARS-6, neutrons lifetime in the reactor, effect of surrounding objects on the lifetime of neutrons, calculation of the effect dependence on the type and geometry of surrounding objects.

Реактор БАРС-6 [1–3] – быстрый импульсный исследовательский реактор самогасящегося типа – имеет две активные зоны (АЗ), расположенные на платформе, передвигающейся по рельсам к одному из двух рабочих мест или к биологической защите, в которую помещаются АЗ во время работ в реакторном зале при подготовке экспериментов.

На первом рабочем месте (рис. 1) реактор может использоваться для облучения импульсным потоком нейтронов и гамма-квантов различных образцов и экспериментальных

устройств (ЭУ), в первую очередь, устройств, содержащих лазерно-активные элементы с различными газовыми и конденсированными средами. Экспериментальные устройства с лазерно-активными элементами располагаются на оптических этажерках.

Для снижения влияния на реактивность реактора соседствующих с ним предметов активные зоны окружены экраном из аморфного  $^{10}\text{B}$  толщиной 5 мм, заключенного в тонкостенную стальную оболочку.

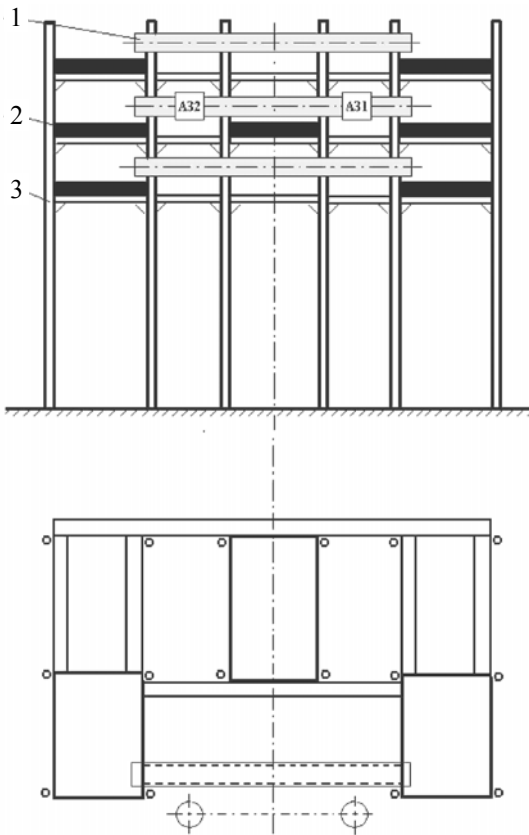


Рис. 1. Схема расположения реактора БАРС-6 на первом рабочем месте: 1 – экспериментальные устройства, 2 – стальные плиты, 3 – опорные конструкции

При генерации импульса мощности, топливо подвергается значительным температурным нагрузкам. Быстрые температурные расширения могут привести к образованию трещин на защитном покрытии топлива, что может повлечь выход радиоактивных веществ за его пределы. Для осмотра топлива ежегодно проводятся профилактические работы с разборкой активных зон. После проверки на дефекты топливных колец и органов регулирования АЗ вновь собираются. Сборка проводится с соблюдением строгого регламента при постоянном контроле потока нейтронов и наличии нейтронных источников, с построением зависимости обратной скорости счета от массы загруженного топлива (рис. 2).

Сборка начинается с измерения фона нейтронов и измерения интенсивности пускового источника нейтронов. Затем устанавливается стержень тонкой регулировки, стоп-стержень и блок безопасности. Стоп-стержень

устанавливается в верхнее положение и является органом аварийной защиты при дальнейшей сборке активных зон. Стержень тонкой регулировки и блок безопасности во время сборки находятся в нижнем положении.

Далее идет установка топливных колец с поэтапными замерами скорости счета. После установки шестого (последнего) топливного кольца вся сборка закрепляется и поджимается тарельчатыми пружинами, устанавливается постоянный источник нейтронов. После этого необходимость в пусковом источнике отпадает. На завершающем этапе происходит установка топливных вкладышей, борного экрана и механизма управления реактивностью.

При проведении плановых профилактических работ существует необходимость нахождения персонала в непосредственной близости от реактора. Человеческое тело на 80 % состоит из воды, то есть является хорошим замедлителем нейтронов. Это важно с точки зрения обеспечения ядерной безопасности, так как по мере приближения человека даже к подкритическому реактору нейтроны, вылетающие из реактора, будут замедляться и отражаться от человека, возвращаясь в реактор и внося положительную реактивность. Поэтому для обеспечения ядерной безопасности при проведении работ необходимо знать влияние тела человека на реактивность реактора, а также влияние борного экрана.

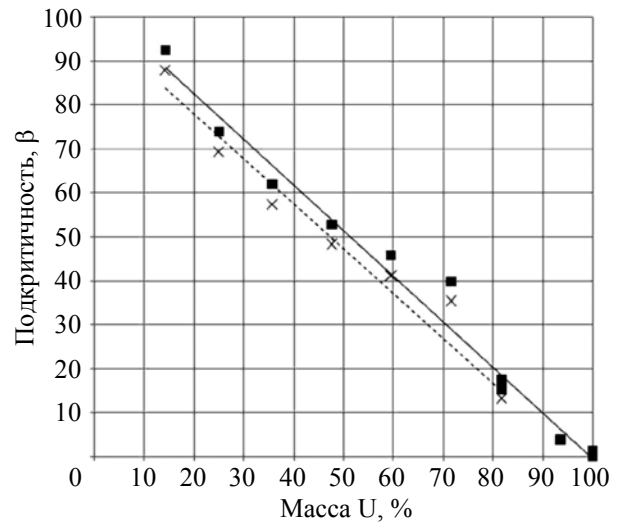


Рис. 2. Подкритичность АЗ при ее сборке в присутствии (×) фантома тела человека и без него (■)

Для проведения расчетов методом Монте-Карло (ММК) была разработана модель реактора БАРС-6. Модель полностью повторяет геометрические параметры и изотопный состав топлива реального реактора и органов регулирования. Все допущения были сделаны с учетом соответствия расчетного значения эффективного коэффициента размножения мгновенных нейтронов ( $k_{эф}$ ) в рамках исследуемой модели и экспериментальных данных. Эффективность каждого органа регулирования в модели была откорректирована так, чтобы равняться эффективности аналогичного органа регулирования в реальном реакторе.

В качестве модели тела человека (рис. 3) был выбран 4-компонентный фантом. Состав фантома: 5,8 % С, 63 % Н, 1,2 % N, 30 % О [4]. Форма фантома человека представляет собой пластину высотой 30 см ( $H$ ), длиной 40 см ( $D$ ) и толщиной 20 см ( $d$ ), изогнутую с радиусом 30 см ( $R$ ), объем фантома составил 24 л, плотность – 1 г/см<sup>3</sup>. Минимальное расстояние от фантома до топлива – 1,7 см. Исследования проводились при опущенном блоке безопасности и без механизма управления реактивностью, поэтому рассматривалась начальная конфигурация активной зоны из шести топливных колец, двух топливных вкладышей и стоп-стержня, поднятого до верхнего упора.

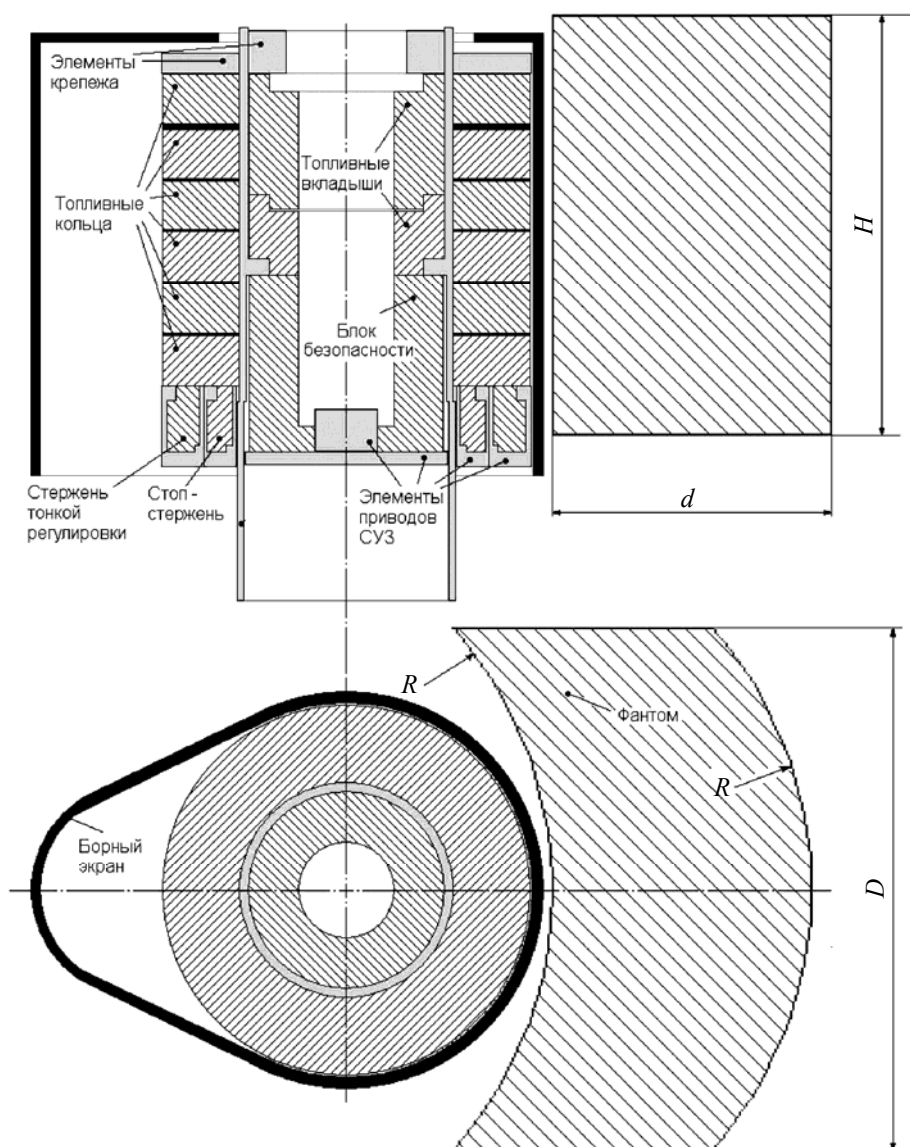


Рис. 3. Взаимное расположение активной зоны реактора БАРС-6 и фантома человека в расчетной модели

Все расчеты ММК выполнялись с использованием программы MCNP [5]. В каждом расчете проигрывалось по 500 циклов и 1000 частиц в каждом цикле, 13 первых циклов в оценке не рассматривались. В табл. 1 приведены результаты расчетов  $k_{эф}$  реактора БАРС-6, окруженного защитным борным экраном, и в отсутствие экрана.

Как и следовало ожидать, влияние фантома на реактивность системы без борного экрана почти в два раза больше, нежели в его присутствии. Хотя борный экран уменьшает подкритичность реактора более, чем на  $2\beta_{эф}$  (эффективная доля запаздывающих нейтронов в реакторе), тем не менее полученные величины показывают, что в обоих случаях реактор находится в глубоко подкритическом состоянии ( $k_{эф} < 0,91$ ). Это обеспечивает ядерную безопасность во время проведения работ (здесь не затрагивается вопрос о радиационной безопасности).

Но не только человеческое тело, но и любые материалы, находящиеся в непосредственной близости к активным зонам реактора, могут оказывать влияние на его нейтронно-физические характеристики.

Основным режимом работы реактора БАРС-6 является генерация мощных нейтронных импульсов, при этом, попадая в материалы, окружающие реактор, нейтроны могут, отразившись (и несколько замедлившись), вернуться обратно в реактор. Такие нейтроны могут значительно увеличить значение среднего времени жизни мгновенных нейтронов ( $l$ ), что, в свою очередь, ведет к увеличению длительности и уменьшению амплитуды импульса.

Влияние отраженных нейтронов на среднее время жизни мгновенных нейтронов в системе зависит от того, насколько нейтрон был замедлен перед возвращением в реактор. Как известно, различные материалы замедляют быстрые нейтроны с различной степенью. Основными материалами, расположенными на достаточно близком расстоянии, влияющими на вылетевшие из реактора нейтроны, являются сталь конструкционных материалов, а также полиэтилен и уран в составе ЭУ.

Стальные конструкции, окружающие реактор, представлены семью плитами на оптических этажерках, и плитой, находящейся под активными зонами (см. рис. 1). Результаты расчетов ММК влияния стальных конструкций на среднее время жизни мгновенных нейтронов при двух расстояниях между АЗ ( $L$ ), представлены в табл. 2.

Таблица 1

*Влияния фантома тела человека на реактивность реактора*

Конфигурации	Подкритичность, $\beta_{эф}$	Эффективность фантома, $\beta_{эф}$
А – шесть топливных колец, два топливных вкладыша	$18,0 \pm 0,2$	–
Б – шесть топливных колец, два топливных вкладыша + фантом	$13,5 \pm 0,2$	$4,5 \pm 0,3$
В – шесть топливных колец, два топливных вкладыша окружены борным экраном	$15,7 \pm 0,2$	–
Г – шесть топливных колец, два топливных вкладыша окружены борным экраном + фантом	$13,2 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,3$

Влияние стальных конструкций на среднее время жизни  
мгновенных нейтронов в реакторе БАРС-6

Конфигурация	$L$ , мм	
	500	1500
	$l$ , нс	
Без стальных конструкций	12,1	11,6
Семь стальных плит	12,1	11,6
Плита под активными зонами	12,5	12,1

Проведенные расчеты показывают, что стальные плиты на этажерках, несмотря на большую их массу (более 4 т), в пределах погрешностей не влияют на среднее время жизни мгновенных нейтронов, поскольку они расположены достаточно далеко от активных зон. Стальная плита под реактором, находящаяся существенно ближе к реактору, увеличивает среднее время жизни мгновенных нейтронов на 0,2–0,3 нс.

На величину среднего времени жизни нейтронов также влияет и расстояние между активными зонами реактора (рис. 4). С одной стороны, при увеличении расстояния между активными зонами, нейтроны вынуждены пролетать большее расстояние, тем самым увеличивая среднее время жизни. С другой стороны, при раздвижении АЗ коэффициент связи между ними уменьшается, зоны все хуже «видят» друг друга. Нейтроны, вылетевшие из одной АЗ, имеют все меньший шанс попасть во вторую, поэтому доля таких нейтронов уменьшается, и время жизни также

уменьшается. Из результатов проведенных расчетов видно, что влияние второго процесса сильнее, и в итоге при раздвижении АЗ реактора БАРС-6 среднее время жизни мгновенных нейтронов уменьшается.

Были проведены также расчеты по влиянию на значение среднего времени жизни мгновенных нейтронов экспериментального устройства, состоящего из полиэтиленового блока и обогащенного урана внутри него при разных расстояниях между АЗ. Полиэтилен без присутствия урана увеличивает среднее время жизни мгновенных нейтронов на 0,7–0,8 нс в зависимости от расстояния между АЗ реактора. Уран в полиэтиленовой оболочке увеличивает время жизни мгновенных нейтронов на 15–16 нс.

При изменении толщины слоя полиэтиленовой оболочки ЭУ наблюдается немонотонная зависимость (рис. 5). Это связано с тем,

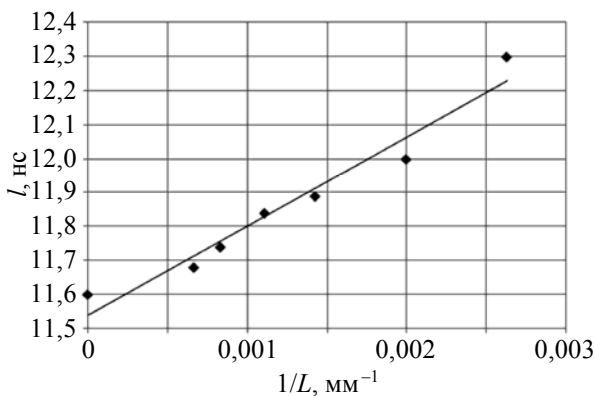


Рис. 4. Зависимость среднего времени жизни мгновенных нейтронов в реакторе БАРС-6 от расстояния между активными зонами

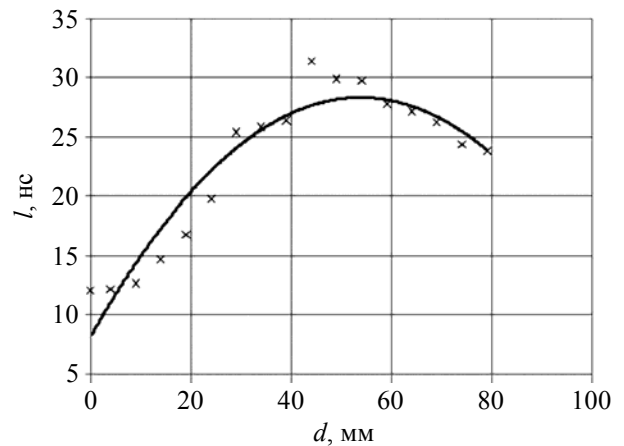


Рис. 5. Влияние толщины полиэтилена ЭУ на среднее время жизни мгновенных нейтронов в реакторе БАРС-6

*Влияние экспериментального устройства на среднее время жизни мгновенных нейтронов в реакторе БАРС-6*

Конфигурация	<i>L</i> , мм			
	700		1500	
	<i>l</i> , нс	$k_{эф}$	<i>l</i> , нс	$k_{эф}$
Борный экран присутствует	26,45	0,99956	28,20	1,00139
Борный экран отсутствует	110,87	0,99011	108,38	0,99182

что, с одной стороны, при увеличении толщины полиэтилена нейтроны все больше замедляются и, следовательно, увеличивается время жизни. Однако при дальнейшем увеличении слоя уменьшается вероятность попадания быстрых нейтронов из ЭУ в АЗ реактора. Активные зоны все хуже «видят» ЭУ, и его вклад в реактивность реактора снижается. Борный экран отсекает замедленные нейтроны, имеющие большое сечение поглощения нейтронов в тепловой области.

Результаты выполненных ММК расчетов влияния экспериментального устройства на нейтронно-физические характеристики реактора БАРС-6 с установленным защитным борным экраном и при его отсутствии представлены в табл. 3.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Нахождение человека в непосредственной близости к активной зоне реактора БАРС-6 во время проведения плановых работ не приводит к выведению реактора из глубокого подкритического состояния.

Стальные конструкции экспериментальных устройств не оказывают существенного влияния на среднее время жизни мгновенных нейтронов реактора, за исключением плиты под его активными зонами. Экспериментальные устройства, содержащие полиэтилен, в особенности при наличии урана внутри полиэтиленовой оболочки, напротив, оказывают сильное влияние на значение среднего времени жизни мгновенных нейтронов, что может привести к существенным изменениям параметров импульса (длительности и амплитуды).

### Список литературы

1. Гулевич А. В., Дьяченко П. П., Зродников А. В., Кухарчук О. Ф. Связанные реакторные системы импульсного действия. – М.: Энергоатомиздат, 2003.
2. Snopkov A. A., Gorin N. V., Gornovoi G. F. et al. Two-core fast reactor BARS-5 // Proc. Topical Meeting on Physics, Safety and Applications of Pulse Reactors. – Washington, 1994, Nov. 13–17, p. 300–306.
3. Леваков Б. Г., Лукин А. В., Магда Э. П. и др. Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002.
4. Photon, Electron, Proton and Neutron Interaction Data for Body Tissues. ICRU Report 46; 1992.
5. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume II: User's Guide, April 24, 2003 (Revised 10/3/05), электронная версия.

Контактная информация –

Гаранин Никита Сергеевич,  
инженер-испытатель  
лаборатории 75 ГНЦРФ-ФЭИ,  
e-mail: garanin@ippe.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2019, вып. 4, с. 148–153.