

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА КРИТИЧЕСКОГО СТЕНДА ИКАР-С С УРАН-ГРАФИТОВЫМ ТОПЛИВОМ

### BASIC RESULTS OF PHYSICAL START-UP OF IKAR CRITICAL TEST BENCH WITH URANIUM - GRAPHITE FUEL

*Г. В. Влох, А. Н. Кузнецников, С. В. Фролова*  
*G. V. Vlokh, A. N. Kuznechenkov, S. V. Frolova*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров Нижегородской обл.

Federal Nuclear Center of Russia – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

*В докладе представлены результаты экспериментальных исследований ядерно-физических параметров размножающей системы (РС), полученные при поэтапной сборке РС с дисперсионным уран-графитовым топливом в центральном модуле, а также результаты, полученные при замене секций, содержащих дисперсионные уран-алюминиевые твэлы, на аналогичные секции с большим содержанием графита.*

*The report presents results of experimental studies of nuclear physics parameters of a multiplying system (MS), obtained at stage-by-stage assemblage of MS with dispersion uranium-graphite fuel in the central module, as well as results, obtained at a change of sections, containing dispersion uranium-aluminum fuel elements, for analogue sections with higher graphite content.*

С начала 80-х годов во ВНИИЭФ велись работы по созданию макета реактора-лазера непрерывного действия. Макет включает в себя реактор ИКАР-500 и 16-канальный лазерный модуль ЛМ-16. Активная зона (АЗ) реактора ИКАР-500 представляет собой графитовую матрицу (куб со стороной 240 см) с девятью сквозными ячейками сечением  $50 \times 50$  см, в которых размещаются реакторные модули. В одной из ячеек вместо реакторного модуля в дальнейшем предполагалось разместить лазерный модуль ЛМ-16.

Для исследования ядерно-физических характеристик АЗ реактора ИКАР-500 был создан стенд для критическихборок (СКС) ИКАР-С [1]. Основная цель исследований с критическим стендом – выбор конфигурации реакторных секций, обеспечивающую требуемый запас реактивности АЗ реактора. Физический пуск СКС ИКАР-С был проведен в 2004–2006 годах [1], в 2008 году стенд был введен в эксплуатацию. Структурная схема СКС ИКАР-С представлена на рис. 1.

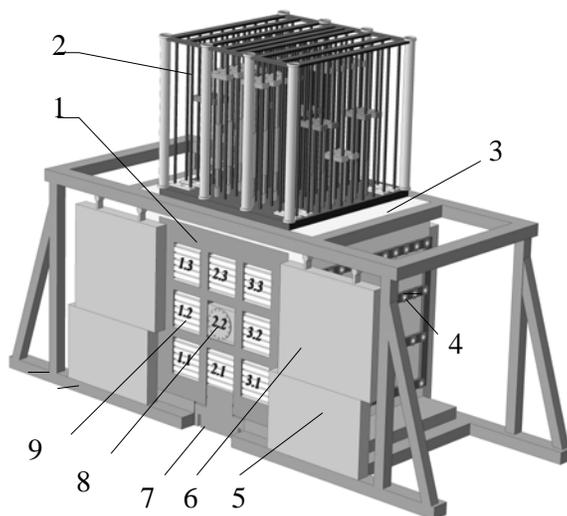


Рис. 1. Структура СКС ИКАР-С: 1 – графитовая матрица; 2 – механизмы ОРР; 3 – биологическая защита; 4 – горизонтальные каналы; 5 – нижние защитные шиберы; 6 – верхние защитные шиберы; 7 – телега стенда; 8, 9 – реакторные модули

Первоначально предполагалось, что АЗ реактора ИКАР-500 реактора формируется из 18 уран-алюминиевых секций (секции, содержащие пластинчатые уран-алюминиевые твэлы), которые загружаются в 9 модулей (по 2 секции на модуль); запас реактивности АЗ при этом составляет  $\rho = 2 \beta_{эф}$ .

В ходе физического пуска в 2006 году на СКС ИКАР-С была собрана РС, моделирующая АЗ реактора ИКАР-500 и содержащая делящийся материал в виде пластинчатых уран-алюминиевых твэлов. РС была выведена в критическое состояние (запас реактивности  $\rho = 0,4 \beta_{эф}$ ), однако достижение в такой РС необходимого запаса реактивности  $\rho = 2 \beta_{эф}$  вызывает определённые сложности. Дело в том, что при формировании АЗ исключительно из уран-алюминиевых секций влияние энергетического коэффициента реактивности проявляется только после передачи тепловой энергии, выделившейся в пластинчатых уран-алюминиевых твэлах, графиту в секциях (и в графитовой матрице). Характерное время такой передачи составляет несколько секунд, и в реакторных импульсах длительностью до одной секунды (разгон на мгновенных нейтронах при надкритичности  $1,3 \beta_{эф} < \Delta\rho < 2 \beta_{эф}$ ) влияние энергетического коэффициента реактивности практически отсутствует [2].

Для повышения безопасности работ реактор должен обладать свойством самогашения ядерной реакции при допустимом энерговыделении в активной зоне, т. е. иметь отрицательный энергетический коэффициент реактивности по всему рабочему диапазону температур.

Для обеспечения необходимого температурного коэффициента гашения реактивности было принято решение ввести в состав АЗ реактора ИКАР-500 модуль, содержащий дисперсионное уран-графитовое топливо (вместо центрального модуля № 2.2 с уран-алюминиевыми секциями). Согласно проведённым расчётам, реактор с такой активной зоной будет иметь запас реактивности  $\rho = 2 \beta_{эф}$  и обладать «мгновенным» энергетическим коэффициентом реактивности, достаточным для самогашения при допустимом энерговыделении.

Для обеспечения возможности проведения работ с размножающими системами, содержащими уран-графитовое топливо, потребовалось проведение нового физического пуска СКС ИКАР-С. Уран-графитовое топливо изготовлено методом пропитки графитовых блоков с размерами  $52 \times 72 \times 485 \text{ мм}^3$  и  $52 \times 57 \times 485 \text{ мм}^3$ , используемых в секциях с уран-алюминиевыми твэлами. На поверхность уран-графитовых блоков нанесено защитное покрытие (термостойкая эмаль «Церта»). Толщина защитного покрытия на поверхности блоков составляет от 10 мкм до 70 мкм. Уран-графитовые блоки содержат в среднем  $\approx 0,5 \%$  (по массе)  $^{235}\text{U}$  90 % обогащения.

Эскиз секций, содержащих уран-графитовые блоки, представлен на рис. 2.

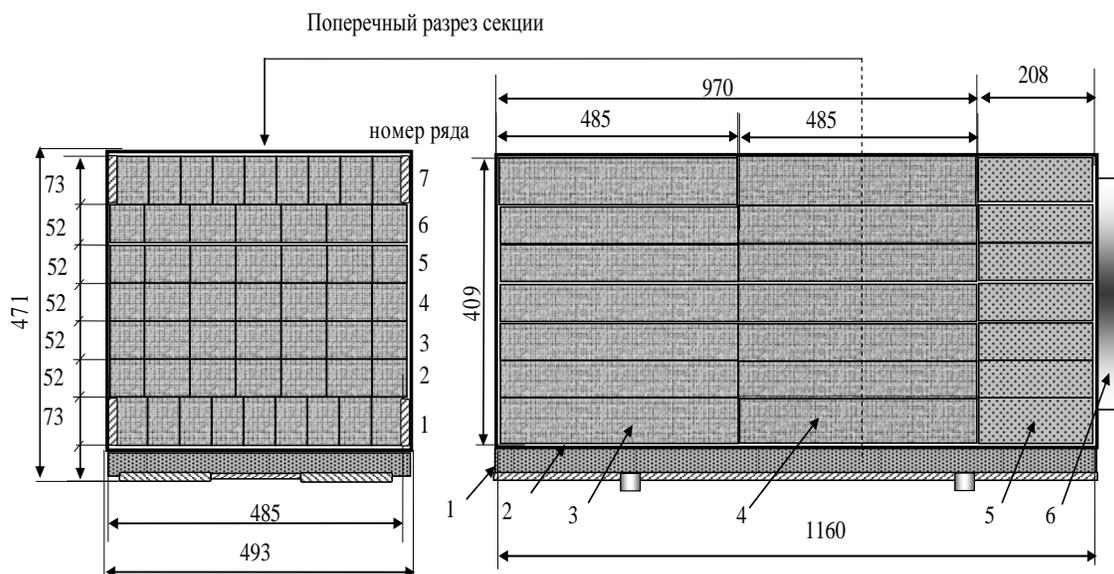


Рис. 2. Эскиз поперечного сечения секции с уран-графитовыми блоками: 1 – платформа; 2 – герметичный корпус; 3, 4 – уран-графитовые блоки; 5 – графитовые блоки отражателя; 6 – крышка

После проведения сборки РС на СКС ИКАР-С с центральным модулем, содержащим секции с уран-графитовыми блоками, размножающая система не достигла критического состояния ( $k_{эф} = 0,987 \pm 0,002$ ). В целях достижения состояния РС на СКС ИКАР-С с запасом реактивности  $\leq 0,5 \beta_{эф}$  выше состояния критичности на запаздывающих нейтронах было принято решение о дополнительной переборке модулей СКС ИКАР-С. Увеличения  $k_{эф}$  предполагалось достигнуть путём замены в модулях нижнего ряда (№№ 1.1, 2.1, 3.1) уран-алюминиевых секций со стандартным содержанием графита (рис. 3) на подобные секции с повышенным содержанием графита (рис. 4).

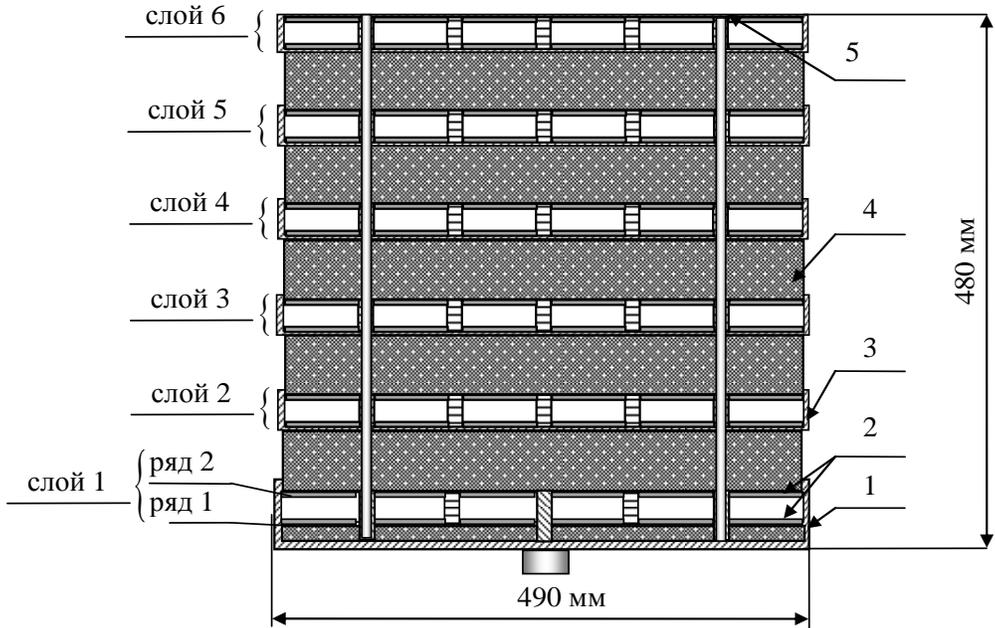


Рис. 3. Эскиз поперечного сечения стандартной уран-алюминиевой секции: 1 – платформа; 2 – твэл U-Al; 3 – рама с радиаторами; 4 – графит; 5 – элементы крепежа

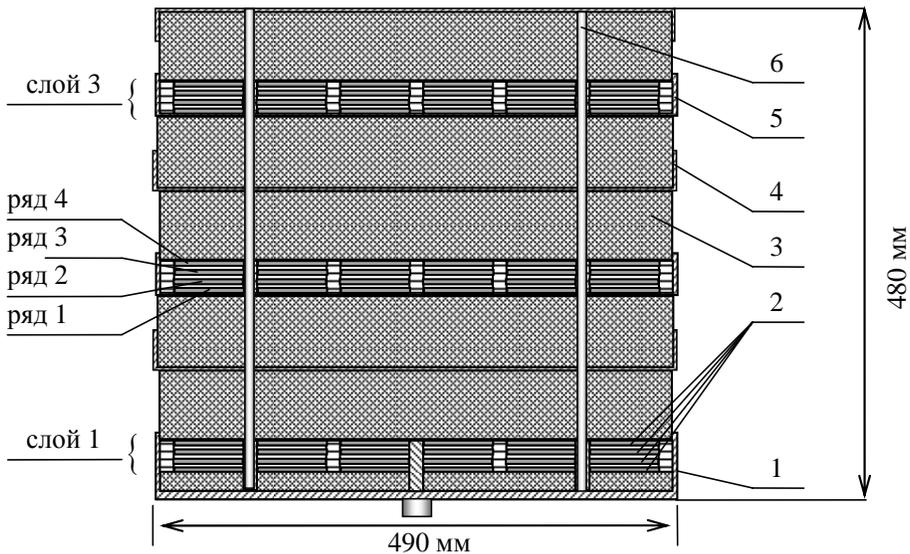


Рис. 4. Эскиз поперечного сечения уран-алюминиевой секции с повышенным содержанием графита: 1 – платформа; 2 – твэл U-Al; 3 – графит; 4 – рама; 5 – рама с твэлами и радиаторами; 6 – элементы крепежа

В итоге на СКС ИКАР-С была собрана размножающая система, моделирующая АЗ реактора ИКАР-500, с ограниченным до  $\rho \leq 0,5 \beta_{эф}$  запасом реактивности выше критичности на запаздывающих нейтронах. Измеренный запас реактивности РС составил  $\rho = (0,44 \pm 0,03) \beta_{эф}$ .

При проведении физического пуска для собранной РС на СКС ИКАР-С выполнены измерения весов органов регулирования реактивности (ОРР), определены характеристики чувствительности штатных каналов регистрации потока нейтронов, проведены проверка уставок и определение времени срабатывания аварийной защиты, проведено измерение доз фотонного и нейтронного излучений для определения эффективности биологической защиты, выполнено измерение относительного распределения плотности потока тепловых нейтронов по объему РС на СКС ИКАР-С и измерение флюенса тепловых нейтронов в области максимума распределения РС на СКС ИКАР-С.

Схема расположения органов регулирования реактивности – стержней аварийного сброса (САС) и стержней регулирования реактивности (СРР), источников нейтронов (ИН), детекторов приведена на рис. 5.

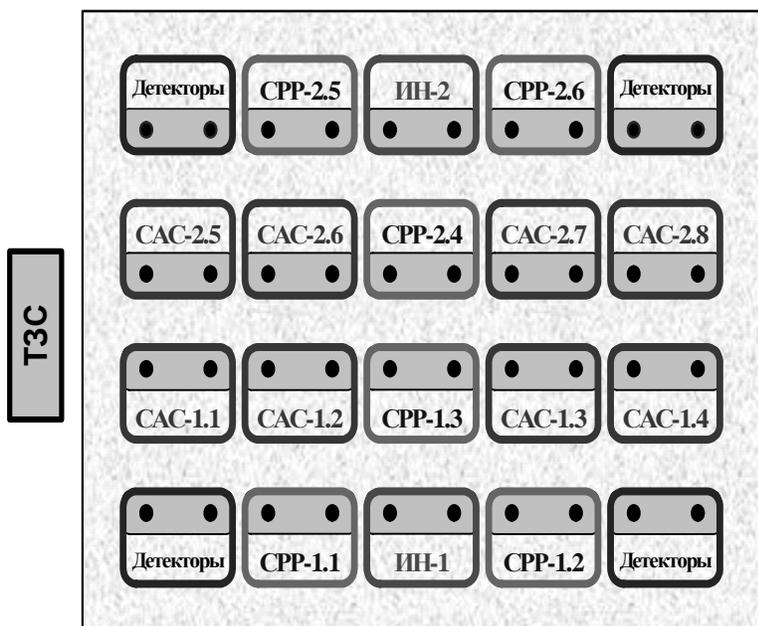


Рис. 5. Схема расположения САС, СРР, ИН и детекторов (вид сверху)

Результаты измерения эффективности («веса») СРР представлены в табл. 1.

Суммарный вес стержней аварийного сброса оценивался для всей группы по разнице результатов измерений реактивности РС в двух подкритических состояниях, для двух положений органов САС. Вес органов САС составил приблизительно  $32 \beta_{эф}$ .

Таблица 1

Результаты измерений эффективности СРР.

ОРР	Эффективность стержней, $\beta_{эф}$
СРР-1.1	$(1,09 \pm 0,04)$
СРР-1.2	$(1,13 \pm 0,04)$
СРР-2.5	$(1,13 \pm 0,04)$
СРР-2.6	$(1,11 \pm 0,04)$
СРР-1.3	$(8,2 \pm 0,1)$
СРР-2.4	$(8,6 \pm 0,1)$

Для измерения относительного распределения плотности потока нейтронов по объёму РС был выполнен монтаж механизма перемещения детектора со счётчиком нейтронов СМ-11. Схема размещения механизма перемещения детектора приведена на рис. 6.

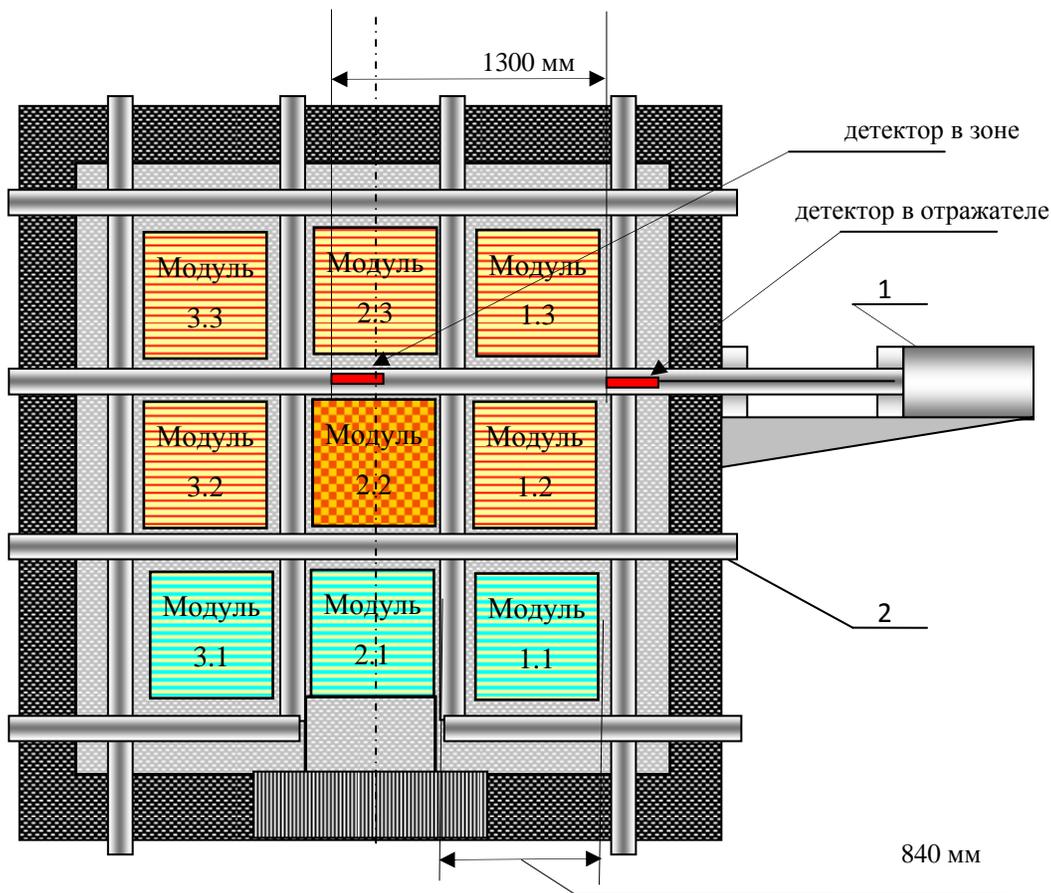


Рис. 6. Схема размещения на СКС механизма перемещения детектора: 1 – привод механизма перемещения детектора, 2 – горизонтальные каналы

Во всех измерениях поглощающие стержни механизма СРР-1.1 были полностью погружены, остальные поглощающие стержни полностью извлечены из РС. Реактивность данной конфигурации РС  $\rho \sim -0,6 \beta_{эф}$ . При перемещении детектора из графитового отражателя в центр РС подкритичность системы возрастала. Для учета реактивностного возмущения сигнал счетчика СМ-11 нормировался на показания штатных каналов контроля потока нейтронов ККНИ АКФМ критического стенда.

Относительное распределение плотности потока нейтронов измерено в горизонтальных каналах СКС ИКАР-С №№ 2.2, 2.4, 2.6, 3.2, 3.4, 3.6, 4.2, 4.4, 4.6, 1.2 и 1.4 (рис. 7). Первая цифра в номере канала означает ряд каналов, вторая цифра номер канала в ряду по порядку, считая со стороны ТЗС. В каналах №№ 1.2 и 1.4 база перемещения детектора составляет уже 840 мм, а не 1300 мм, как для каналов в верхних рядах (см. рис. 6). Это обусловлено тем фактом, что циркониевые трубы 1-го ряда не сквозные.

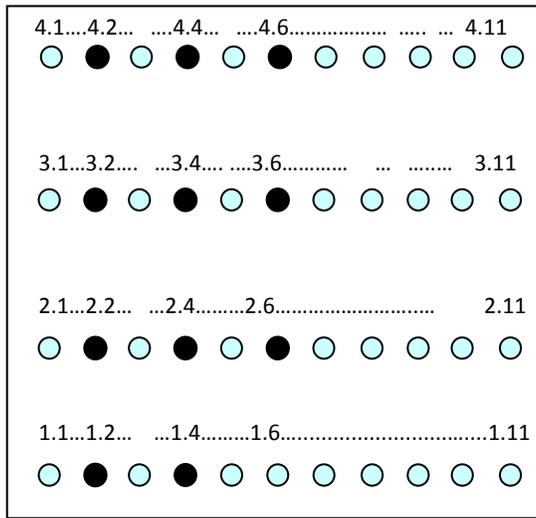


Рис. 7. Схема расположения горизонтальных каналов

Исследования проводились в геометрии с наличием в РС двух штатных боковых источников нейтронов. Отсчет перемещения проводился от внутренней поверхности графитового отражателя до центра СМ-11.

На рис. 8 приведена безразмерная функция распределения  $\Psi$ , пропорциональная зависимости плотности потока нейтронов по РС вдоль горизонтальных каналов СКС. Зависимости нормированы на максимальный сигнал СМ-11, соответствующий максимальной плотности потока нейтронов  $\langle n_0 \rangle$ , который был зарегистрирован в центре канала № 2.6. Вертикальными линиями показана область внутренней графитовой перемишки между модулями СКС ИКАР-С.

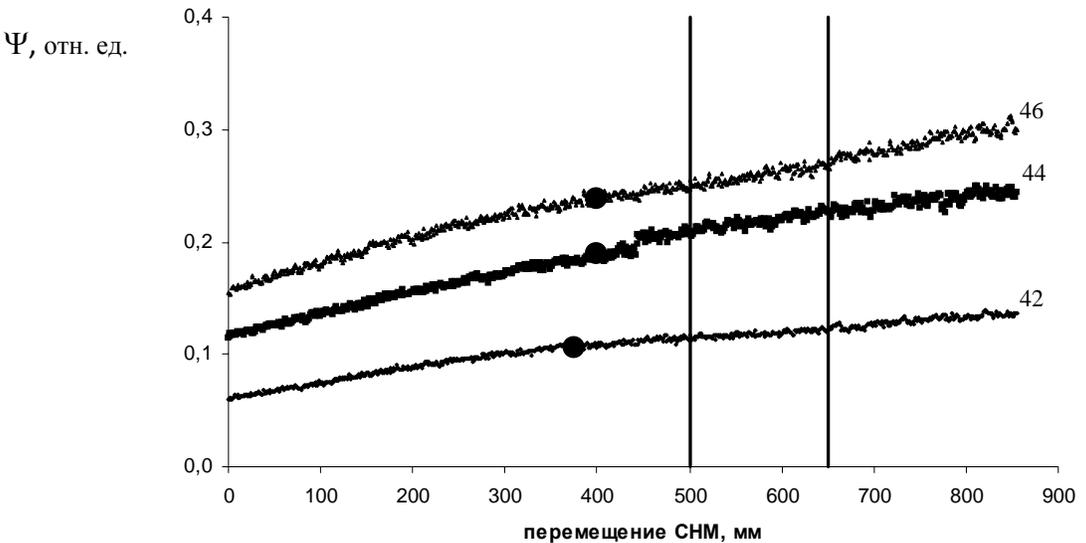


Рис. 8. Относительное распределение плотности потока нейтронов по каналам № 4.6, 4.4 и 4.2

Для интегрирования поля нейтронов по объему РС использовался метод усреднения экспериментальных данных. На первом этапе усреднялись распределения вдоль горизонтальных каналов, затем в плоскостях рядов каналов и далее по высоте РС. Такой подход оправдан, так как полученные зависимости достаточно гладкие, а координаты их средних значений лежат в достаточно локальных областях, отмеченных на графиках черными точками.

В табл. 2 приведены результаты интегрирования поля нейтронов по объему РС. Оцененная погрешность величины  $\langle n_{A3} \rangle$  находится в пределах  $\pm 10\%$ . Таким образом,  $\langle n_{A3} \rangle = (0,38 \pm 0,1) n_0$ .

Таблица 2

Средние значения нормированных функций распределения плотности потока нейтронов

канал среднее			Ряд каналов среднее	Среднее по РС $\langle n_{A3} \rangle$
$\frac{4.2}{0,106}$	$\frac{4.4}{0,19}$	$\frac{4.6}{0,238}$	$\frac{4}{0,178}$	0,378
$\frac{3.2}{0,294}$	$\frac{3.4}{0,532}$	$\frac{3.6}{0,664}$	$\frac{3}{0,497}$	
$\frac{2.2}{0,347}$	$\frac{2.4}{0,645}$	$\frac{2.6}{0,782}$	$\frac{2}{0,592}$	
$\frac{1.2}{0,147}$	$\frac{1.4}{0,264}$	$\frac{1.6}{0,331}$	$\frac{1}{0,247}$	

Во время работы на мощности  $\sim 100$  Вт (плотность потока нейтронов в максимуме распределения составила  $\sim 3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) выполнена корректировка показаний штатных каналов регистрации потока нейтронов, снята картограмма полей  $n, \gamma$  – излучений в помещении критического стенда, проведены измерения мощности доз фотонного и нейтронного излучений в смежных с реакторным залом помещениях и с наружной стороны здания. Установлено, что мощность дозы фотонного излучения в пультовой, на рабочих местах операторов составляет 0,2 мкЗв/ч, что не превышает установленного значения контрольного уровня (11 мкЗв/ч). Наличие нейтронного излучения в смежных с реакторным залом помещениях не зафиксировано.

Произведено измерение объемной активности радиоактивных газов и аэрозолей в воздушной среде помещений реакторных залов и на выбросе в окружающую среду.

В результате физического пуска зафиксирована базовая конфигурация РС на СКС ИКАР-С:

– в модулях №№ 1.1, 2.1, 3.1 размещены по 2 уран-алюминиевых секции с повышенным содержанием графита (всего 6 секций);

– в модулях №№ 1.2, 3.2, 1.3, 2.3, 3.3 размещены по 2 стандартных уран-алюминиевых секции (всего 10 секций);

– в модуле № 2.2 размещены 2 секции с уран-графитовыми блоками.

РС базовой конфигурации характеризуется запасом реактивности  $\rho = (0,44 \pm 0,03) \beta_{эф}$  выше состояния критичности на запаздывающих нейтронах.

### Список литературы

1. Воинов А. М., Влох Г. В., Кривоносов В. Н. и др. Стенд критических сборок «ИКАР-С». Результаты физического пуска // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2007. № 2. С. 29–33.

2. Илькаев Р. И. Исследования в области физики лазеров и высокотемпературной плазмы // Фундаментальные исследования РФЯЦ-ВНИИЭФ в области высоких плотностей энергии. Саров, 2003. С. 13–34.