

СОЗДАНИЕ НА БАЗЕ КРИТИЧЕСКОГО СТЕНДА ИКАР-С ОБЛУЧАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С АТТЕСТОВАННЫМ НЕЙТРОННЫМ ПОЛЕМ

Г. В. Влох, М. А. Воинов, С. В. Воронцов, Л. Ю. Глухов, И. А. Горшкова,
И. М. Губайдуллин, А. А. Девяткин, В. А. Деманов, Ю. П. Демин, И. Ю. Дроздов,
Ю. М. Дроздов, Н. В. Завьялов, А. А. Кайгородов, Е. М. Какалашвили, М. А. Калмыков,
Н. Е. Колесова, А. А. Кубасов, А. Н. Кузнеченков, Ю. М. Лимарь, Е. А. Мамаева,
В. С. Майорников, И. Н. Мочкаев, А. А. Наумов, М. А. Овчинников, Д. А. Орлов,
А. А. Пикулев, Г. Н. Пикулина, В. А. Попов, Д. В. Сазанов, А. В. Силаев, В. А. Тарасов,
Е. Ю. Тарасова, С. В. Фролова, В. М. Цветков, В. А. Юхневич

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В 2017 г. в состав парка моделирующих установок ИЯРФ введена новая статическая ядерная установка СКС ИКАР-С. Стенд предназначен для проведения испытаний крупногабаритных объектов на стойкость к нейтронному и гамма-излучению, для размещения которых служит облучательная полость с рекордными для ИЯУ России размерами 200×50×50 см. Совместно с ФГУП «ВНИИФТРИ» на СКС ИКАР-С проведена аттестация комплекса моделирующих опорных нейтронных полей (МОП-К3).

Ключевые слова: критический стенд, секция активной зоны, критмассовые параметры, реактивность, температурный коэффициент реактивности.

CREATION OF IRRADIATING INSTALLATION WITH THE CERTIFIED NEUTRON FIELD ON THE BASE OF THE CRITICAL STAND IKAR-S / G. V. VLOKH, M. A. VOINOV, S. V. VORONTSOV, L. Y. GLUKHOV, I. A. GORSHKOVA, I. M. GUBAIDULLIN, A. A. DEVIATKIN, V. A. DEMANOV, Y. P. DEMIN, I. Y. DROZDOV, Y. M. DROZDOV, N. V. ZAVJALOV, A. A. KAIGORODOV, E. M. KAKALASHVILI, M. A. KALMUKOV, N. E. KOLESOVA, A. A. KUBASOV, A. N. KUZNECHENKOV, YU. M. LIMAR', E. A. MAMAIEVA, V. S. MAJORNIKOV, I. N. MOCHKAEV, A. A. NAUMOV, M. A. OVCHINNIKOV, D. A. ORLOV, A. A. PIKULEV, G. N. PIKULINA, V. A. POPOV, D. V. SAZANOV, A. V. SILAEV, V. A. TARASOV, E. YU. TARASOVA, S. V. FROLOVA, V. M. TSVETKOV, V. A. YUHNEVICH // In 2017 the park of modeling installations IARF was filled up by the new static nuclear installation - critical stand (CS) IKAR-S. The stand is intended for neutron and gamma radiation resistance testing of large-sized objects. For their placing on IKAR-S the irradiation module with record for Russia research nuclear reactors dimensions 200×50×50 cm is used. Modeling reference neutron fields complex (MRF-K3) has been certificated at SC IKAR-S together with FGUP «VNIIFTRI».

Key words: critical stand, section of active zone, critical parameters, reactivity, temperature reactivity coefficient.

Введение

С конца 1960-х гг. и вплоть до недавнего времени во ВНИИЭФ активно проводились

исследования, направленные на использование ядерной энергии для накачки лазеров. На основе экспериментальных и теоретических исследований была выработана концепция реакто-

ра-лазера – автономного ядерно-физического устройства, совмещающего функции лазерной системы и ядерного реактора и осуществляющего прямое преобразование энергии ядерных реакций в лазерное излучение [1].

Работы по созданию во ВНИИЭФ макета реактора-лазера непрерывного действия были начаты в 1980-х гг. Макет включал в себя реактор ИКАР-500 и 16-канальный лазерный модуль ЛМ-16, который должен был загружаться в активную зону (АЗ) реактора ИКАР-500 вместо одного из реакторных модулей [2].

Стенд для критических сборок (СКС) ИКАР-С был создан для выбора конфигурации реакторных секций, обеспечивающей требуемый запас реактивности АЗ реактора ИКАР-500. Физический пуск СКС ИКАР-С проведен в 2004–2006 гг. [3]. В 2008 г. стенд был введен в эксплуатацию. В 2012–2013 г. проведены работы по физическому пуску СКС ИКАР-С с центральным уран-графитовым модулем, который предназначался для обеспечения отрицательного температурного коэффициента реактивности АЗ реактора ИКАР-500 [4] (включение в состав активной зоны стенда СКС ИКАР-С уран-графитового модуля предложено В. Ф. Колесовым). Для этого во ВНИИЭФ была разработана высокоэффективная технология изготовления уран-графитового топлива, основанная на введении урана в матрицу путем пропитки пористого графитового блока раствором металлоорганического соединения урана [5]. По данной технологии было изготовлено 240 уран-графитовых блоков для формирования центрального модуля АЗ реактора ИКАР-500.

Еще во время создания СКС ИКАР-С уникальные особенности облучательного модуля, в котором должен был располагаться лазерный модуль ЛМ-16 (большой объем полости, значительные уровни n , γ -полей при высокой однородности распределения и т. д.), привели к идее использования реактора ИКАР-500 в качестве мощной облучательной установки с рекордными параметрами по размерам облучаемых объектов и однородности распределения n , γ -полей [6].

Эта идея получила новый толчок к развитию после того, как с начала 2014 г. работы по со-

зданию макета реактора-лазера были приостановлены, и стал актуальным поиск задач, для решения которых можно использовать СКС ИКАР-С. Как наиболее перспективное рассматривалось предложение использовать стенд ИКАР-С в качестве базовой установки для создания статического реактора-облучателя с большой облучательной полостью [7].

Итогом развития данного направления явилась проведенная в 2016 г. модернизация СКС ИКАР-С с целью создания на его базе облучательной установки, предназначенной для проведения испытаний на радиационную стойкость крупногабаритных объектов в статическом режиме. Размер облучательной полости в СКС ИКАР-С составляет 200×50×50 см и является рекордным в России для исследовательских ядерных установок.

При модернизации критического стенда проведены следующие работы:

- в АЗ ИКАР-С организована полость (с размерами 200×50×50 см) для размещения облучательного модуля. Для этого из нижнего центрального топливного канала извлечены две топливные секции, содержащие уран-алюминиевые пластинчатые твэлы;

- в целях компенсации убыли реактивности проведены работы по изменению состава АЗ СКС ИКАР-С. Для этого были разработаны и изготовлены новые конструктивные варианты топливных секций, содержащих увеличенное количество уран-алюминиевых твэлов и графита;

- разработан и изготовлен облучательный модуль, предназначенный для создания требуемых условий радиационного воздействия на крупногабаритные объекты испытаний. Модуль располагается на телеге стенда (ТС), с помощью которой производятся операции по его загрузке (выгрузке) в АЗ СКС ИКАР-С. Для управления соотношением дозовых параметров и спектральным составом нейтронного и сопутствующего гамма-излучений в облучательной полости в конструкцию АЗ введен конвертор, состав которого может изменяться в зависимости от выполняемой задачи.

Работы по модернизации критического стенда проводились в рамках физического пуска с 25.05.2016 по 30.11.2016, 28.12.2016 СКС ИКАР-С введен в эксплуатацию.

Описание размножающей системы СКС ИКАР-С

Модернизированный СКС ИКАР-С предназначен для проведения испытаний радиационной стойкости приборов и крупногабаритных изделий. Для размещения испытываемых объектов СКС ИКАР-С содержит в своем составе облучательный модуль.

Размножающая система (РС) критического стенда формируется из 8 топливных и одного облучательного модулей, размещенных в каналах графитовой сборки электромеханического стенда (ЭМС) СКС ИКАР-С (рис. 1). Каждый топливный модуль состоит из двух последовательно расположенных топливных секций. Схема размещения секций в модуле РС приведена на рис. 2.

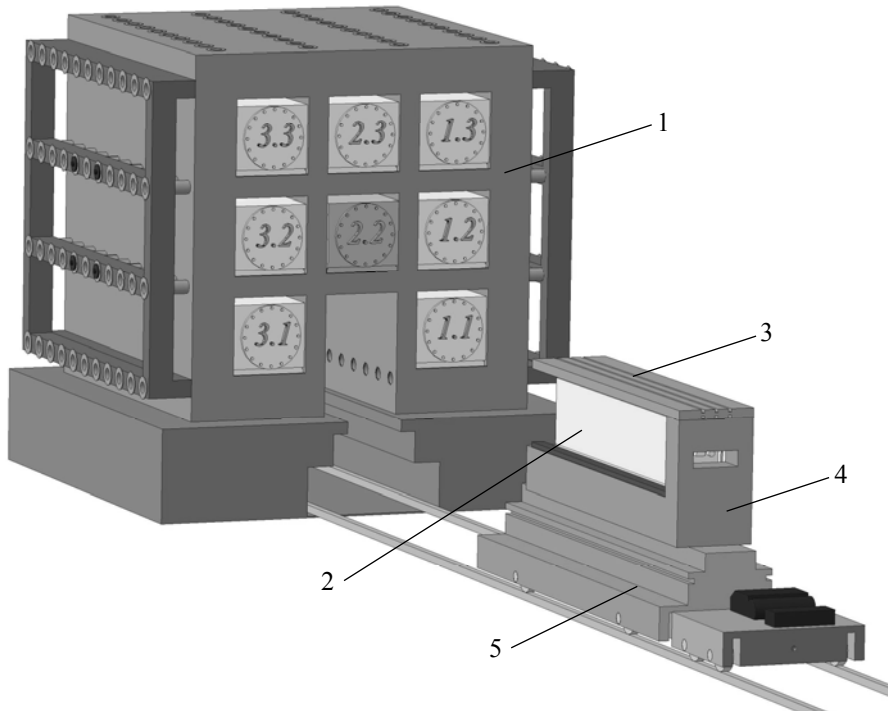


Рис. 1. Структурная схема РС СКС ИКАР-С: 1 – графитовая матрица; 2 – облучательный модуль; 3 – конвертор; 4 – графитовый отражатель; 5 – телега стенда

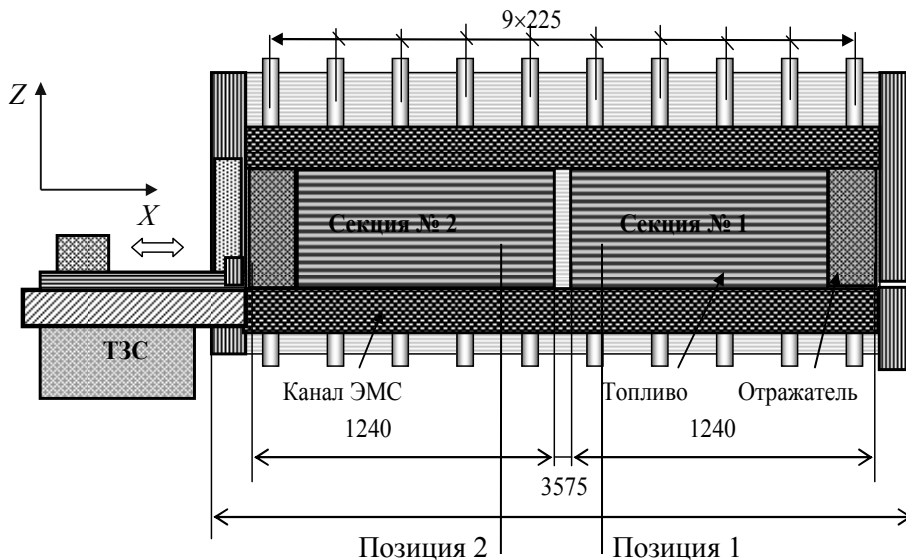


Рис. 2. Размещение топливного модуля в канале ЭМС СКС ИКАР-С

Загрузка секций в ЭМС осуществляется с помощью транспортно-загрузочного стенда (ТЗС). Внешний вид СКС ИКАР-С и ТЗС представлен на рис. 3.

СКС ИКАР-С может быть использован для выполнения работ по сборке и исследованию следующих размножающих систем:

- в центральном модуле 2.2 двух секций с уран-графитовым топливом;
- в периферийных топливных модулях 1.1, 1.2, 1.3, 2.3, 3.1, 3.2, 3.3 по две секции типов 02, 03, ... 07 с уран-алюминиевым топливом;
- в канале 2.1 облучательного модуля;
- в горизонтальных каналах ЭМС компенсирующих стержней.

Секция с уран-алюминиевыми твэлами является набором чередующихся слоев графита и дисперсионных уран-алюминиевых твэлов, смонтированных на основании (платформе) из циркониевого сплава Э-125 (Zr-Nb, 2,5 % ниобия). Уран-алюминиевые твэлы выполнены из уран-алюминиевых сердечников (2,5 % – массовая доля урана 90 %-го обогащения по изотопу ^{235}U в алюминии) с размерами $5 \times 60 \times 900 \text{ мм}^3$, заключенных в герметичные вакуумированные чехлы из сплава Э-125 (Zr-Nb, 2,5 % ниобия) толщиной 0,5 мм [3].

Всего разработано семь типов уран-алюминиевых секций (далее обозначаются 01, 02, ... 07), отличающихся друг от друга как количеством твэлов, так и массой используемых в секции основных материалов: графита, алюминия, циркония. Секции типов 01–04 и 07 содержат по 72 твэла; секция 05–90 твэлов; секция 06–120 твэлов. Эскизы сечений уран-алюминиевых секций типов 05 и 06, разработанных при модернизации СКС ИКАР-С 2016 г., представлены на рис. 4.

В двух герметичных уран-графитовых секциях размещены по 106 уран-графитовых блоков и графитовые блоки отражателя. Уран-графитовое топливо изготовлено методом пропитки двух типоразмеров графитовых блоков: $52 \times 72 \times 485 \text{ мм}^3$ и $52 \times 57 \times 485 \text{ мм}^3$. Массовая доля урана 90 %-го обогащения по изотопу ^{235}U в уран-графитовых блоках составляет 0,52 %. На поверхность блоков нанесено термостойкое защитное покрытие толщиной 40–50 мкм [5]. Эскиз поперечного сечения уран-графитовых секций (разработаны для физического пуска 2012–2013 гг.) представлен на рис. 5.



а



б

Рис. 3. СКС ИКАР-С (а) и транспортно-загрузочный стенд (б)

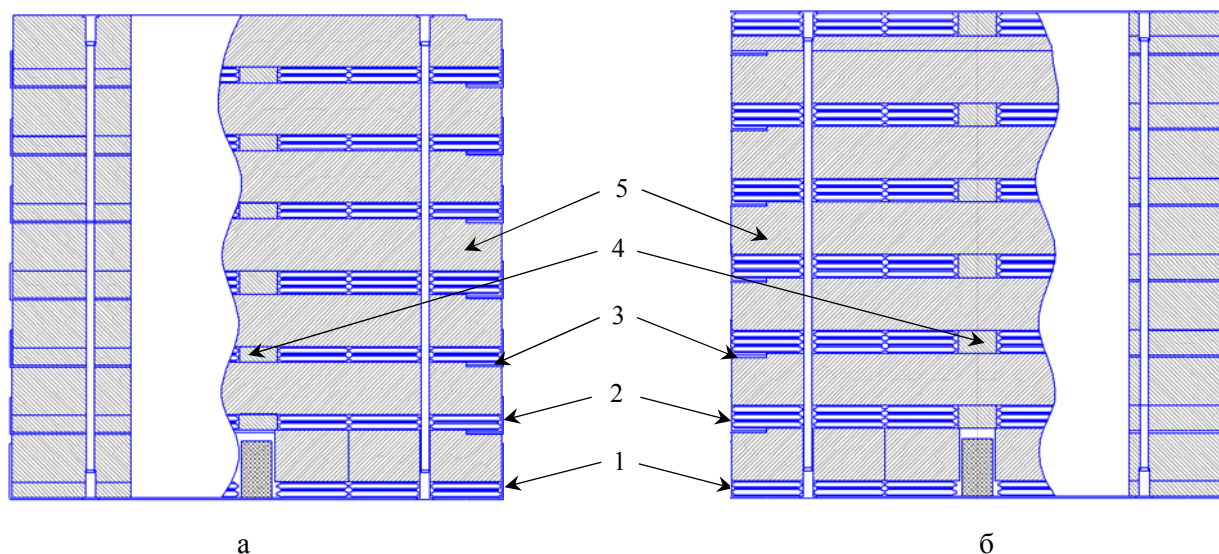


Рис. 4. Эскизы сечений уран-алюминиевых секций 05 (а) и 06 (б): 1 – платформа; 2 – уран-алюминиевый ТВЭЛ; 3 – рама; 4 – графитовый вкладыш; 5 – графитовый блок

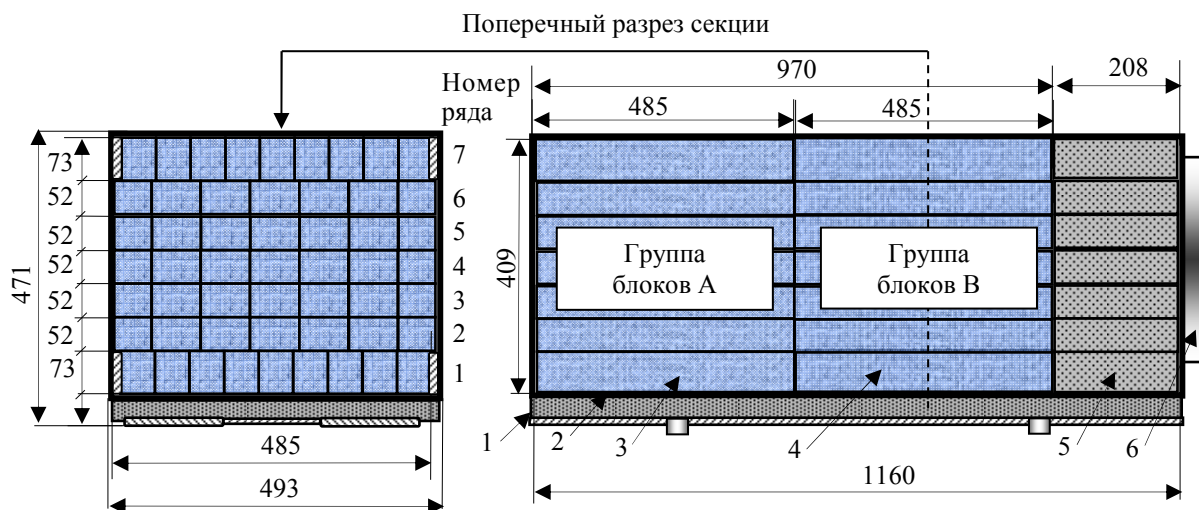


Рис. 5. Эскиз поперечного сечения уран-графитовой секции: 1 – платформа; 2 – герметичный корпус; 3, 4 – уран-графитовые блоки групп А и В; 5 – графитовые блоки отражателя; 6 – крышка корпуса секции

Облучательный модуль (ОМ) предназначен для размещения облучаемых объектов и должен обеспечивать требуемые условия радиационного воздействия. Конструктивно ОМ представляет собой силовую раму с графитовым отражателем для размещения облучаемых объектов. Эскиз облучательного модуля представлен на рис. 6.

На корпусе облучательного модуля размещена панель стыковочного модуля для обеспечения электрического соединения с измерительной аппаратурой, находящейся вне реакторных помещений. Также ОМ снабжен датчиками, детекторами и прочими устройствами, позволяющими отслеживать уровни

n , γ -облучения, температуру и т. д. Непосредственно над ОМ располагается конвертор n , γ -излучения, который представляет собой две силовые рамы, заполненные функциональным наполнителем. В качестве основного наполнителя конвертора используются уран-алюминиевые ТВЭЛы в количестве до 72 шт. В качестве наполнителя конвертора могут также выступать полиэтилен, кадмий, оргстекло, свинец.

Загрузка облучательного модуля в АЗ СКС ИКАР-С осуществляется с помощью транспортной телеги стэнда, которая может дистанционно перемещаться в реакторном зале по рельсовой колее в горизонтальной плос-

кости. ТС обеспечивает монтаж на ней облучательного модуля и его загрузку в АЗ критического стенда.

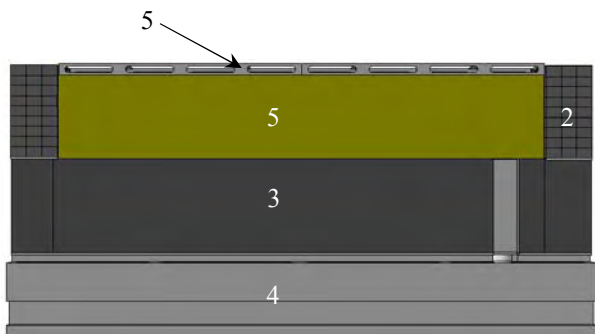


Рис. 6. Эскиз облучательного модуля: 1 – кожух ОМ; 2 – блок торцевого отражателя; 3 – графитовый отражатель; 4 – рама; 5 – конвертор

Для тонкой корректировки реактивности РС используются компенсирующие стержни, размещаемые в горизонтальных каналах ЭМС СКС ИКАР-С. В качестве поглотителя в стержнях использованы вкладыши из карбида бора (B_4C), которые зачехлены в алюминиевые трубы. Загрузка компенсирующих стержней может производиться в любой канал второго, третьего или четвертого ряда (рис. 7).

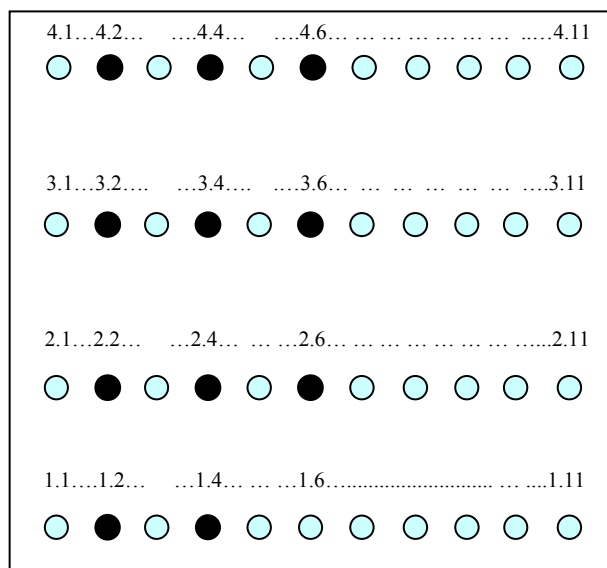


Рис. 7. Схема расположения горизонтальных каналов ЭМС

Применение компенсирующих стержней производится с учетом установленного ограничения $0,5 \beta_{эф}$ над нижним критическим состоянием. Проведенные исследования показа-

ли, что при размещении поглощающих стержней в различных каналах ЭМС реактивность РС уменьшается в интервале от $0,1$ до $3 \beta_{эф}$ на стержень.

Программа и основные результаты физического пуска СКС ИКАР-С

1. Основным содержанием работ по программе являлся подбор на СКС ИКАР-С критической РС, содержащей ОМ с конвертором; исследование параметров собранной РС и параметров нейтронных и гамма-полей внутри ОМ.

Работы по программе физического пуска включали следующие этапы:

Этап 1. Проверка работоспособности систем СКС ИКАР-С.

Этап 2. Сборка и измерение критмассовых параметров критической РС с конвертором, содержащим уран-алюминиевые твэлы.

Этап 3. Проведение работ по определению предельно допустимых параметров СКС ИКАР-С, эффективности биологической защиты и снятию картограммы полей.

Этап 4. Измерение и корректировка параметров гамма-нейтронного поля в ОМ при помощи изменения состава конвертора.

2. Исходным состоянием РС перед началом работ по программе физического пуска являлась следующая конфигурация:

- в центральном модуле 2.2 расположены две секции с уран-графитовым топливом;

- модули 1.2, 1.3, 2.3, 3.3, 3.2 состоят из уран-алюминиевых секций типа 02;

- три нижних модуля, 1.1, 2.1, 3.1, состоят из уран-алюминиевых секций типа 03.

На СКС ИКАР-С были исследованы 33 различные конфигурации РС. Для каждой промежуточной конфигурации РС был определен коэффициент размножения $K_{эф}$. Для имитации влияния объекта испытаний на критмассовые и нейтронно-физические параметры РС был использован специальный ядерно-физический макет.

Последовательность переборки АЗ СКС ИКАР-С при переходе к базовой конфигурации приведена в табл. 1.

Последовательность переборки АЗ СКС ИКАР-С

№ п/п	Конфигурация АЗ	ρ , $\beta_{эф}$
1	Исходная	$0,44 \pm 0,03$
2	Без модуля 2.1	$-8,90 \pm 0,67$
3	В канале 2.1 макет без конвертора	$-10,26 \pm 0,91$
4	В канале 2.1 макет с конвертором из 72 твэлов (6 слоев по 12 твэлов)	$-7,39 \pm 0,45$
5	Без модуля 3.3	$-10,79 \pm 1,00$
6	Модуль 3.3 с секциями 05	$-5,60 \pm 0,26$
7	Без модуля 2.3	$-15,3 \pm 2,2$
8	Модуль 2.3 с секциями 05	$-1,44 \pm 0,03$
9	Без модуля 1.3	$-7,80 \pm 0,51$
10	Модуль 1.3 с секциями 05	$\sim 0,9$
11	В конверторе 72 твэла, под ними в центральной части в один слой Cd (4 листа $458 \times 212 \times 1$ мм)	$-0,05$
12	В конверторе 72 твэла, под ними в один слой Cd (4 листа $917 \times 212 \times 1$ мм)	$-0,72 \pm 0,01$
13	В конверторе 48 твэлов (4 слоя по 12 твэлов), под ними в один слой Cd (4 листа $917 \times 212 \times 1$ мм)	$-1,03 \pm 0,02$
14	Вернулись к геометрии п. 12	$-0,72 \pm 0,01$
15	Без модуля 3.1	$-2,37 \pm 0,05$
16	Модуль 3.1 с секциями 05	$-0,54 \pm 0,01$
17	Модуль 1.1 с секциями 05	$-0,35 \pm 0,01$
18	Модуль 3.2 с секциями 05, канал 3.3 – пустой	$-5,6 \pm 0,3$
19	Модуль 3.3 с секциями 07	$\sim 2,2$
20	Модуль 2.3 без секции 2.3.2	$-5,25 \pm 0,23$
21	Модуль 1.2 с секциями 05, канал 1.3 – пустой	$-10,0 \pm 1,0$
22	Модуль 1.3 с секциями 07	$-3,47 \pm 0,11$
23	Без модуля 2.3	$-9,9 \pm 1,0$
24	Модуль 2.3 с секциями 03	$\sim 3,03$
25	Конвертор без твэлов	$\sim 1,76$
26	Без секции 03 на позиции 2.3.2 в модуле 2.3	$-5,8 \pm 0,3$
27	Модуль 2.3 (секция 03 на позиции 2.3.1), (секция 02 на позиции 2.3.2)	$\sim 0,55$
28	В конверторе 12 твэлов (1 слой), под ним Cd (4 листа $917 \times 212 \times (1 + 0,5)$ мм)	$\sim 0,7$
29	ТС доработана. В конверторе: Cd (4 листа $917 \times 212 \times 1$ мм)	$0,50 \pm 0,03$
30	В конверторе: снизу кадмий толщиной 1 мм, затем слой твэлов 12 шт., сверху кадмий толщиной 0,5 мм	$0,46 \pm 0,03$
31	В конверторе: снизу свинец 3 мм, затем Cd (4 листа $917 \times 212 \times 1$ мм), затем 24 твэла (2 слоя по 12 твэлов)	$\sim 1,00$
32	В горизонтальный канал стенда 4.9 симметрично установили два компенсирующих стержня «500 мм»	$0,60 \pm 0,03$
33	Переставили компенсирующие стержни «500 мм» в горизонтальный канал стенда 4.8	$0,45 \pm 0,03$

В результате на СКС ИКАР-С была собрана РС следующего состава:

- в центральном модуле 2.2 расположены две секции с уран-графитовым топливом;
- в периферийных каналах 1.2, 1.1, 3.2, 3.1 размещены «тяжелые» топливные модули, состоящие из двух секций типа 05;
- в периферийных верхних угловых каналах 1.3, 3.3 размещены «легкие» топливные модули, состоящие из двух секций типа 07;
- в верхнем среднем канале 2.3 размещен «легкий» топливный модуль, состоящий из секции типа 03 на позиции 2.3.1 и секции типа 02 на позиции 2.3.2;
- в канале 2.1 на телеге станда размещен макет и конвертор. В конверторе размещены послойно снизу вверх: слой свинца толщиной 3 мм, слой кадмия толщиной 1 мм и 2 слоя уран-алюминиевых твэлов (24 шт.);
- в горизонтальном боковом канале 4.8 размещены два компенсирующих стержня.

Данная РС согласно акту физического пуска от 07.12.2016 является базовой и имеет реактивность $\rho = (0,45 \pm 0,03) \beta_{эф}$ выше состояния критичности на запаздывающих нейтронах.

3. В процессе проведения физического пуска измерено влияние на реактивность РС органов регулирования реактивности (ОРР). Результаты представлены в табл. 2.

Из таблицы видно, что эффективный коэффициент размножения РС со всеми введенными ОРР составляет $K_{эф} \sim 0,8$; таким обра-

зом, заглушенная система находится в глубоко подкритическом состоянии.

Для иллюстрации на рис. 8 представлены профиль и скорость ввода (вывода) реактивности стержнем СРР 1.1 в зависимости от его положения в РС.

4. Для измерения распределения плотности потока нейтронов по объему РС использовался счетчик медленных нейтронов СНМ-11, который с помощью механизма равномерно перемещался по горизонтальным каналам станда из начального положения «СНМ вне зоны» в конечное положение «СНМ в зоне». Схема размещения механизма перемещения детектора приведена на рис. 9.

При проведении измерений стержень СРР 1.1 был поднят на 700 мм, остальные поглощающие стержни полностью извлечены из РС. Реактивность данной конфигурации РС составляет $\rho \sim -0,15 \beta_{эф}$.

При проведении экспериментов использовались штатные плутоний-бериллиевые источники нейтронов ИН-1 и ИН-2. В связи с тем, что счетчик нейтронов (с направляющей штангой) является поглотителем нейтронов, при его введении в РС подкритичность АЗ возрастает тем больше, чем ближе канал, в котором перемещается счетчик, к центру АЗ.

В качестве примера на рис. 10 представлено изменение реактивности РС, определенное по показаниям штатных импульсных каналов контроля потока нейтронов ККНИ при перемещении детектора вдоль канала 2.6.

Таблица 2

Эффективность («вес») ОРР

№ п/п	ОРР	Эффективность ОРР, $\beta_{эф}$
1	СРР 1.1	$0,91 \pm 0,03$
2	СРР 1.2	$0,99 \pm 0,03$
3	СРР 2.5	$1,10 \pm 0,03$
4	СРР 2.6	$1,06 \pm 0,03$
5	СРР 1.3	$6,93 \pm 0,15$
6	СРР 2.4	$6,85 \pm 0,15$
7	СРР (1.3+2.4)	$12,2 \pm 0,3$
8	СРР (1.1+1.2+1.3+2.4+2.5+2.6)	$23 \pm 0,5$
8	Группа САС-1 (1.1+1.2+1.3+1.4)	$12,2 \pm 0,3$
10	Группа САС-2 (2.5+2.6+2.7+2.8)	$11,4 \pm 0,3$
11	Все ОРР в РС	$(K_{эф} \sim 0,8)$

Примечание. СРР – стержень регулирования реактивности; САС – стержень аварийного сброса

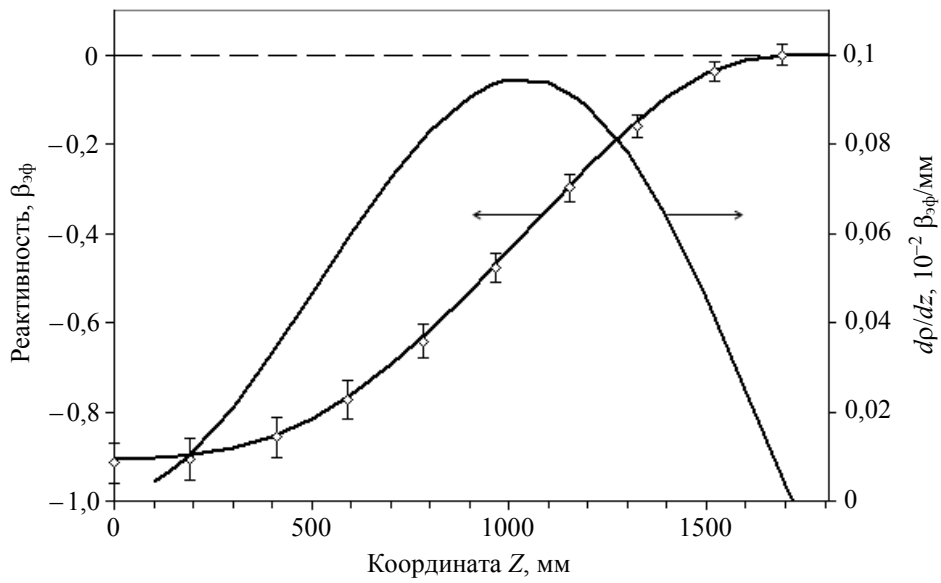


Рис. 8. Профиль и скорость ввода (вывода) реактивности стержнем СРР 1.1

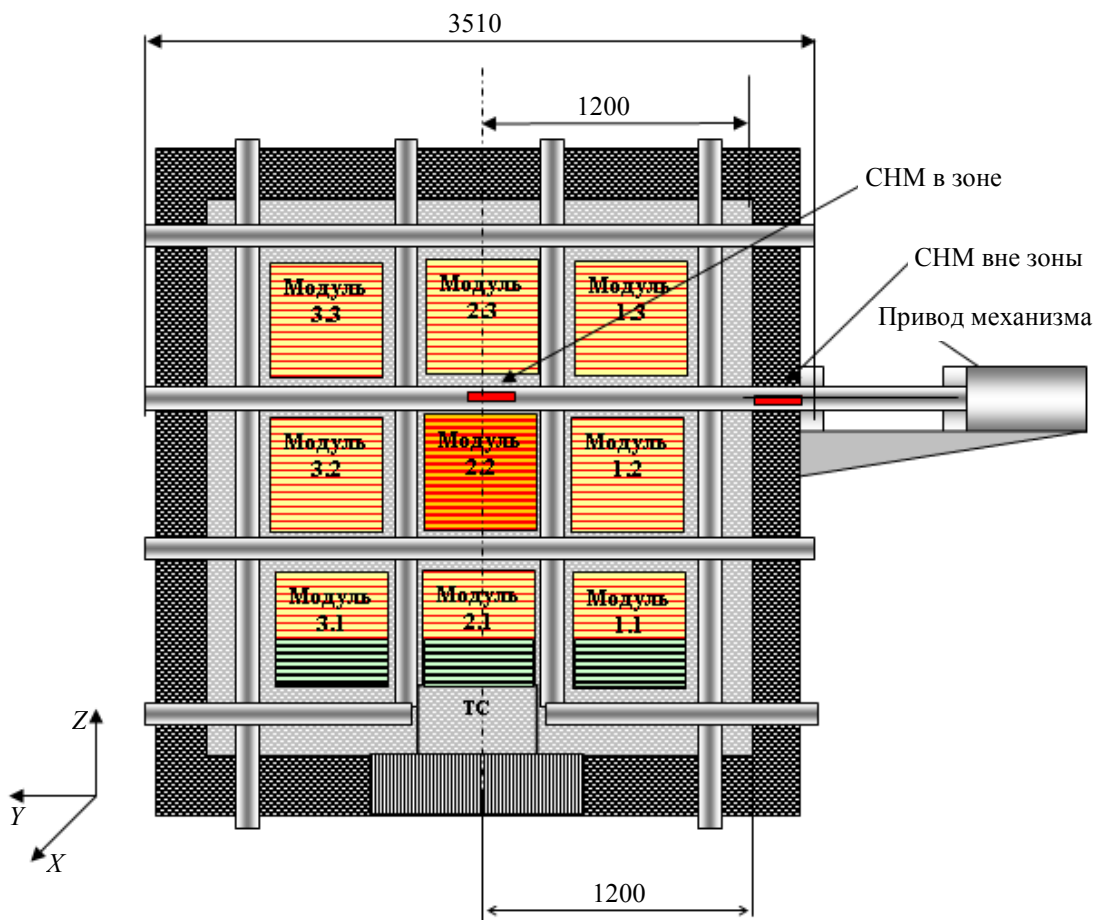


Рис. 9. Схема размещения на СКС механизма перемещения детектора

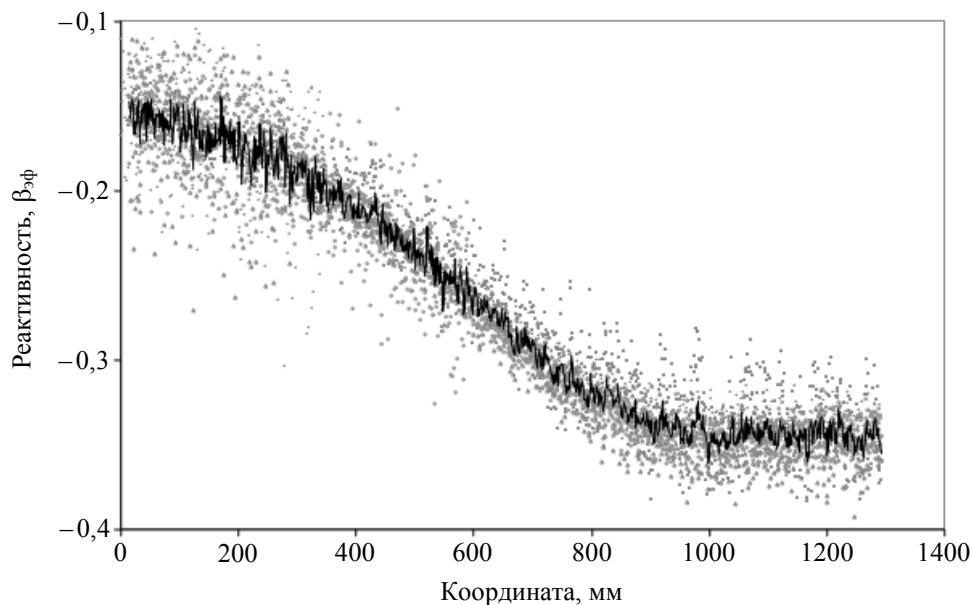


Рис. 10. Изменение реактивности РС при перемещении СНМ-11 в канале 2.6

Распределение плотности потока нейтронов измерялось в каналах СКС 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 1.10; 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 2.10; 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 3.10; 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 4.10 (см. рис. 7).

На рис. 11 в качестве иллюстрации приведены относительные распределения потока нейтронов вдоль горизонтальных каналов 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 3.10. Точками на рисунке обозначены средние по каналу значения плотности потока нейтронов.

Центр делений РС на СКС ИКАР-С находится в центре горизонтального канала 3.6.

В центре делений удельный флюенс нейтронов составляет $\sim 3,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{МДж}^{-1}$.

5. Проведено три статических пуска критстенда на номинальной мощности. Основные параметры пусков приведены в табл. 3, где $\langle W \rangle$ – средняя мощность за пуск, τ – длительность пуска, E – энерговыделение за пуск. На рис. 12, 13 показаны зависимости изменения мощности критстенда и изменения реактивности в статических пусках № 2 и № 3.

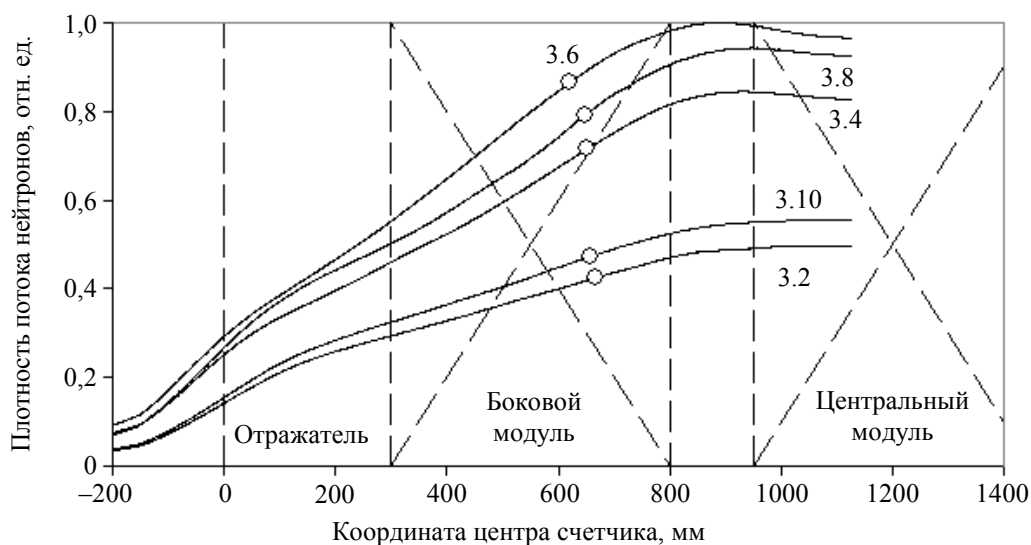


Рис. 11. Относительное распределение плотности потока нейтронов по каналам 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 3.10

Таблица 3

Статические пуски СКС ИКАР-С

№ п/п	$\langle W \rangle$, Вт	τ , ч	E , МДж
1	~1200	~1	~4,4
2	~1100	~1	~4,2
3	~1455	~30	~157

Из рис. 12 видно, что при работе на мощности происходит монотонное уменьшение запаса реактивности, связанное с нагревом АЗ. Для поддержания среднего уровня мощности приходится периодически вводить реактивность посредством периодического извлечения регулирующего стержня СРР 1.1. В результате мощность СКС испытывает периодические колебания около среднего значения,

причем, как это видно по осциллограмме пуска № 3 (рис. 13), частота колебаний мощности РС и запаса реактивности с течением времени монотонно снижаются, что приводит к увеличению энерговыделения в отдельных пиках мощности. Это свидетельствует о снижении энергетического коэффициента гашения с течением времени, что связано с утечкой тепла из РС на конструктивные элементы, биозащиту и фундамент СКС, а также с теплообменом между РС и окружающим воздухом.

На рис. 14 приведен ход ввода компенсирующей реактивности в пуске № 3, который осуществлялся за счет перемещения регулирующего стержня СРР 1.1.

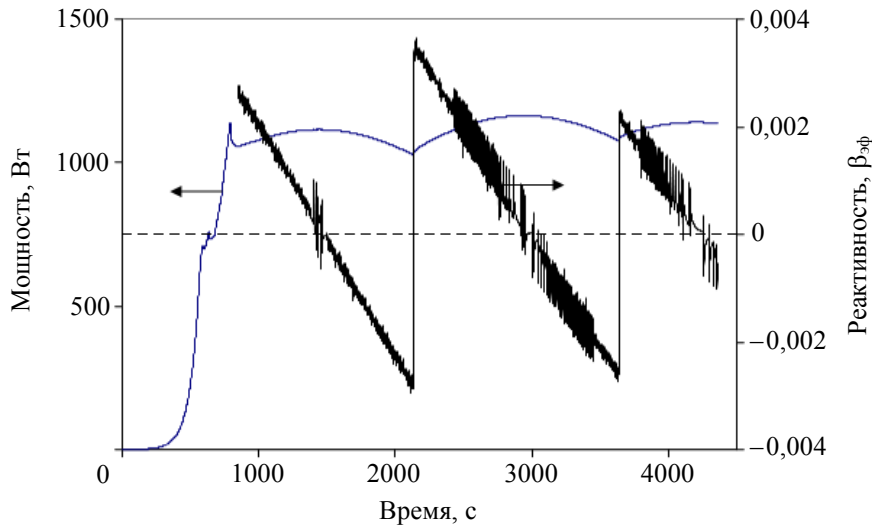


Рис. 12. Поведение мощности и реактивности в статическом пуске № 2

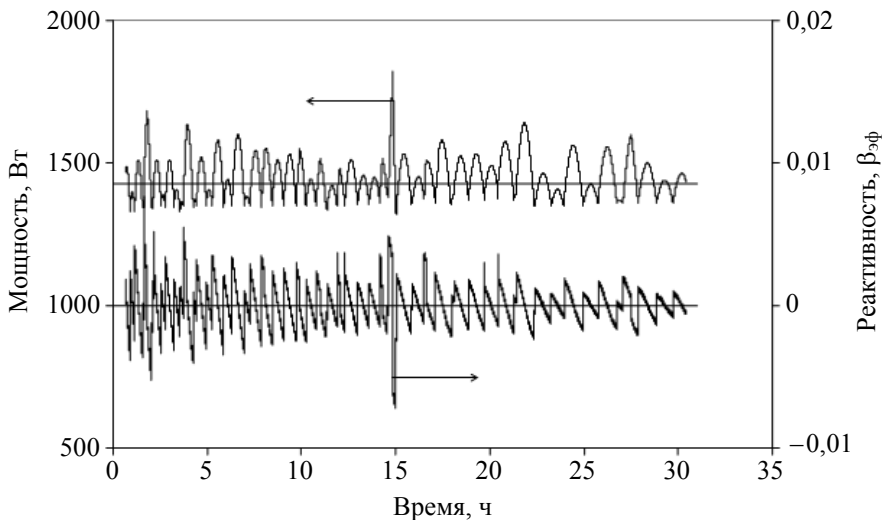


Рис. 13. Поведение мощности и реактивности в статическом пуске № 3

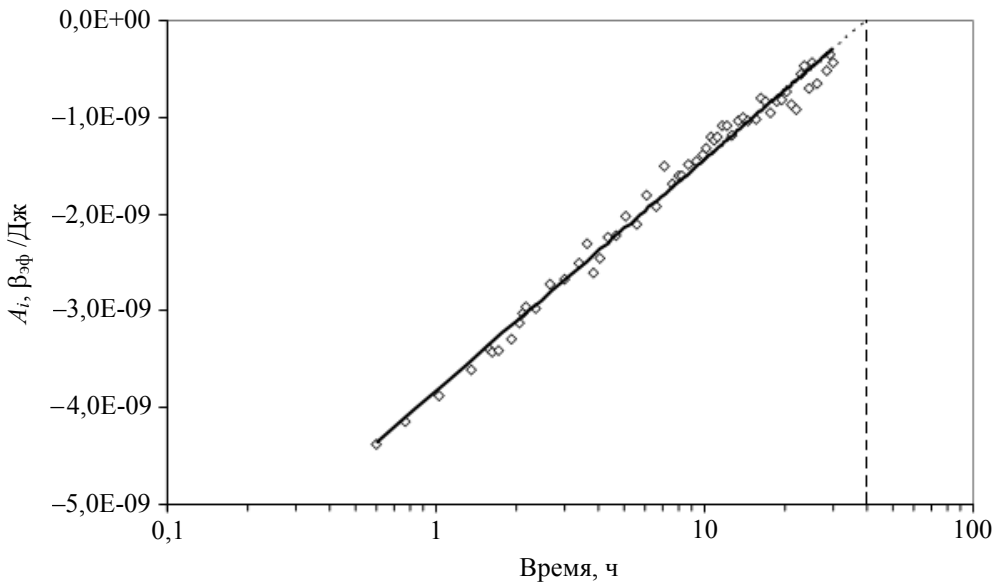


Рис. 14. Изменение коэффициента гашения в пуске № 3

6. При работе СКС на мощности были проведены измерения температуры разогрева АЗ в локальных точках и температуры воздуха с внешней стороны графитового отражателя. Для этого использовались термопарные датчики, расположенные в следующих точках:

T1 – графитовый поддон секции 2.2.1;

T2 – образец U-C топлива в центре горизонтального канала 3.7;

T3 – образец U-A1 топлива в центре горизонтального канала 2.5;

T4 – графитовый поддон секции 3.2.1;

T5 – в центре горизонтального канала 2.5;

T6 – воздух на расстоянии 10 см от АЗ на уровне 3 ряда горизонтальных каналов.

На рис. 15 показано приращение температуры РС в местах размещения термопарных датчиков в статическом пуске № 3. Из рисунка видно, что темп прироста температуры замедляется во времени, что свидетельствует об утечке тепла из РС.

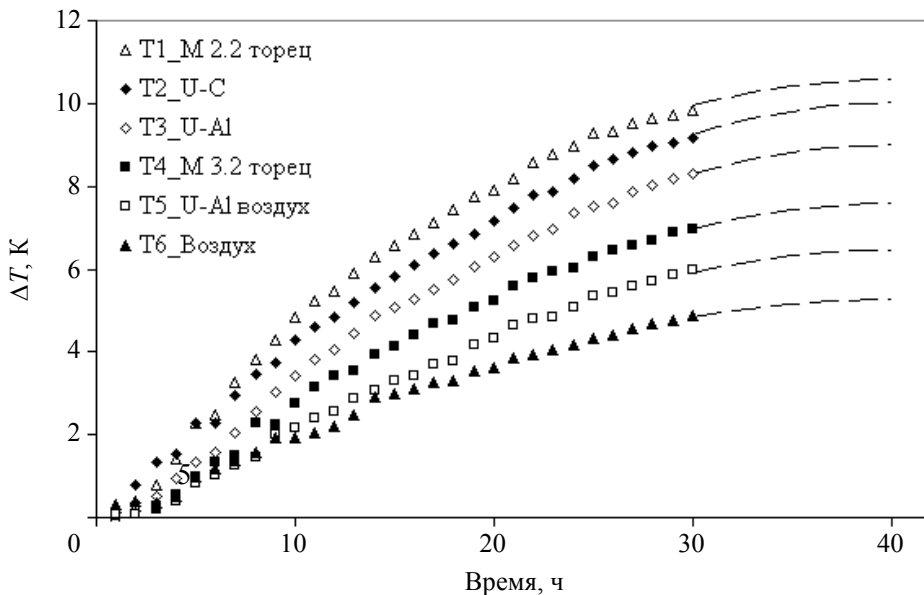


Рис. 15. Показания термопарных датчиков в статическом пуске № 3

При определении температурного и энергетического коэффициентов реактивности были использованы средние значения температуры разогрева РС, полученные в экспериментах. Теплоемкость АЗ определялась из материального состава критстенда ИКАР-С. Расчетное значение энтальпии АЗ составляет:

- с учетом всех отражателей $\sim 14,5$ МДж/К;
- с учетом только торцевого отражателя $\sim 7,6$ МДж/К.

На рис. 16 показано изменение реактивности РС при разных температурах в зале, где находится критстенд. Данная зависимость по-

лучена при выводе РС на асимптотический период разгона мощности в геометрии, когда все стержни СРР, кроме стержня СРР 1.1, извлечены из РС, а стержень СРР 1.1 извлечен из РС на 950 мм. В таком стационарном, равновесном с температурой зала критстенда, состоянии получено значение температурного коэффициента реактивности $\partial\rho/\partial T = (-1,78 \pm 0,26) \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/К$.

На рис. 17 показана зависимость изменения реактивности гашения от реального теплосодержания РС, полученная в пуске № 3.

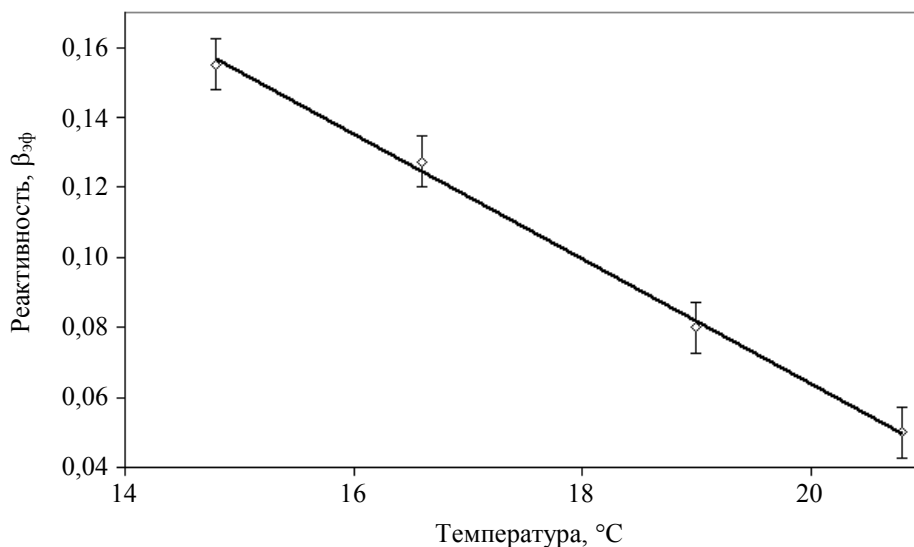


Рис. 16. Зависимость реактивности РС от температуры в зале критстенда

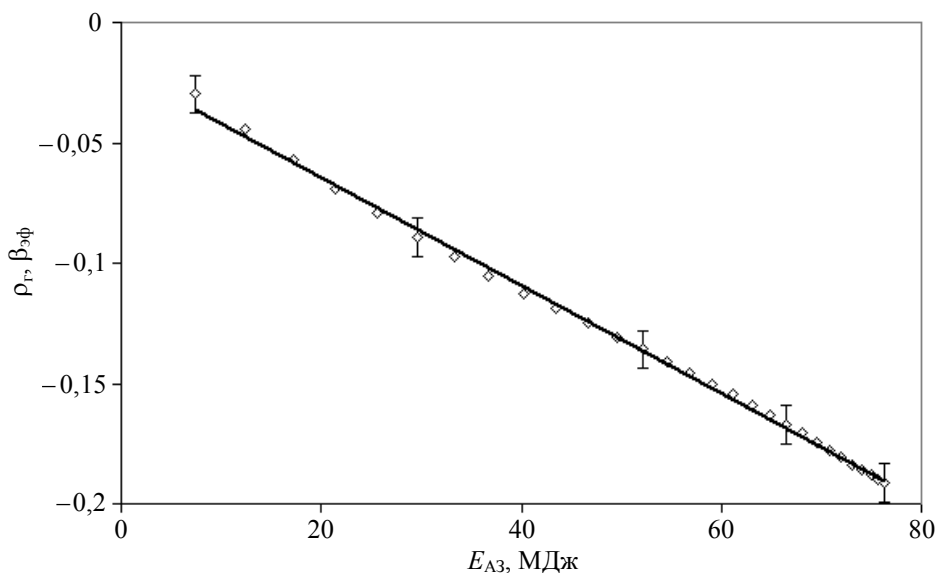


Рис. 17. Зависимость реактивности от реального теплосодержания РС

По данным, представленным на рис. 17, определено, что энергетический коэффициент реактивности имеет значение $\partial\rho/\partial E = (-0,224 \pm 0,02) \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/\text{МДж}$. Если при определении теплосодержания РС использовать теплоемкость АЗ без боковых, верхнего и нижнего отражателей (7,6 МДж/К), то данное значение соответствует температурному коэффициенту реактивности $\partial\rho/\partial T = (-1,70 \pm 0,15) \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/\text{К}$, что хорошо согласуется со значением $\partial\rho/\partial T$, приведенным выше ($\partial\rho/\partial T = (-1,78 \pm 0,26) \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/\text{К}$).

7. В процессе работы СКС на мощности $\sim 1,2$ кВт проведено измерение картограммы полей ионизирующих излучений и эффективности биологической защиты. Измерения проводились в реакторном зале, в смежных с реакторным залом помещениях и с наружной стороны здания СКС. Установлено, что мощность дозы фотонного излучения не превышает установленного значения контрольного уровня. Наличие нейтронного излучения за биологической защитой внутри здания не зафиксировано.

Выполнено измерение объемной активности радиоактивных благородных газов в воздухе производственных помещений, объемной активности радиоактивных аэрозолей в воздухе производственных помещений и вентвыбросах, уровней радиоактивного загрязнения рабочих поверхностей пола, оборудования, оснастки и инструмента в помещениях СКС. Измерения показали, что объемная активность радиоактивных газов и аэрозолей в воздушной среде помещений, уровни загрязнений в помещениях не превышают установленных контрольных уровней.

8. Актом физического пуска от 07.12.2017 установлены следующие предельно допустимые параметры СКС ИКАР-С:

– запас реактивности при полностью извлеченных ОРР и закрытых шиберах выше состояния критичности на запаздывающих нейтронах – не более $0,5 \beta_{эф}$;

– период экспоненциального увеличения мощности – не менее 10 с;

– мощность работы установки – не более 1,93 кВт.

В качестве допустимого параметра установлена мощность работы установки (планируемая) не более 1,54 кВт. Установлен следующий предел безопасной эксплуатации: давление в герметичных секциях центрального модуля – не более 84 кПа.

После завершения физического пуска СКС ИКАР-С введен в эксплуатацию с 28.12.2016.

Метрологическая аттестация эталонного нейтронного источника

В 2017 г. совместно с ФГУП «ВНИИФТРИ» на СКС ИКАР-С проведена аттестация комплекса моделирующих опорных нейтронных полей (МОП-КЗ), представляющего собой совокупность нейтронных полей (3 зоны внутри облучательного модуля) установки, используемых в качестве меры энергетического состава и плотности потока нейтронного излучения.

Согласно свидетельству № 4/430-0001-17 от 06.06.2017 о метрологической аттестации эталона, нейтронный источник на СКС ИКАР-С с МОП-КЗ допущен к применению в качестве рабочего эталона 2-го разряда для аттестации реакторных нейтронных полей по энергетическому спектру (от 10^{-10} до 18 МэВ) и флюенсу нейтронов (от $5 \cdot 10^{10}$ до $2 \cdot 10^{16}$ см⁻²) для исследования радиационного воздействия нейтронного излучения, градуировки радиометрической, спектрометрической и дозиметрической аппаратуры (рис. 18).

Заключение

В 2016 г. был проведен физический пуск критического стенда ИКАР-С после его модернизации. Были выполнены следующие работы:

1) в активной зоне СКС ИКАР-С организована облучательная полость с размерами 200×50×50 см для размещения испытываемых объектов;

2) в целях компенсации убыли реактивности разработаны и изготовлены новые

конструктивные варианты топливных секций, содержащих увеличенное количество уран-алюминиевых твэлов и графита;

3) разработан и изготовлен облучательный модуль, предназначенный для создания требуемых условий радиационного воздействия на крупногабаритные объекты испытаний;

4) для управления соотношением дозовых параметров и спектром нейтронного и гамма-излучений в облучательной полости в конструкцию АЗ введен конвертор.

физические характеристики СКС ИКАР-С и параметры нейтронного и гамма-полей в облучательном модуле в зависимости от состава конвертора.

Совместно с ФГУП «ВНИИФТРИ» на СКС ИКАР-С проведена аттестация комплекса моделирующих опорных нейтронных полей (МОП-КЗ).

В 2017 г. на модернизированном СКС ИКАР-С была проведена первая серия испытаний крупногабаритного объекта на радиационную стойкость.



Рис. 18. Свидетельство о метрологической аттестации эталона

При проведении физического пуска определены физические «веса» новых типов секций, собрана АЗ с необходимым запасом реактивности, определена эффективность ОРР, проведено измерение распределения плотности потока нейтронов по объему АЗ, определены энергетический и температурный коэффициенты реактивности. Определены нейтронно-

Список литературы

1. Мельников С. П., Сизов А. Н., Синянский А. А. Лазеры с ядерной накачкой. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008.
2. Воинов А. М., Воронцов С. В., Кривоносов В. Н., Мельников С. П., Пикулев А. А., Пунин В. Т., Сизов А. Н., Синянский А. А., Турутин С. Л. Работы, выполненные во ВНИИЭФ, по исследованию возможности создания реактора-лазера // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2007. № 2, с. 19–28.
3. Воинов А. М., Влох Г. В., Воронцов С. В., Кривоносов В. Н., Попов В. А., Синянский А. А., Сизов А. Н., Сорокин С. В., Турутов В. И., Лимарь Ю. М., Василенко А. Г., Кузнеченков А. Н., Никитин И. А., Горшкова И. А. Стенд критических сборок ИКАР-С. Результаты физического пуска // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2007. № 2, с. 29–33.
4. Влох Г. В., Кузнеченков А. Н., Фролова С. В. Основные результаты физического пуска критического стенда ИКАР-С с уран-графитовым топливом // Труды межотраслевой научной конференции «Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования». – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016. Т. 1, с. 155–161.
5. Данилин Л. Д., Поленов И. В., Королев А. С., Максимов М. Ю., Горелов И. А.,

Карпунин С. М. Изготовление топливных элементов (ТВЭЛов) методом капиллярной пропитки графитовых блоков органическими и водно-органическими растворами β -дикетоната уранила // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2016. № 4, с. 116–123.

6. Бурцева Д. В., Влох Г. В., Колесов В. Ф., Кривоносов В. Н., Попов В. А., Пунин В. Т., Сизов А. Н., Синянский А. А., Турутов В. И. Физическая схема мощного теплового реактора-облучателя // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2000. № 3, с. 41–46.

7. Влох Г. В., Пикулев А. А., Попов В. А., Фролова С. В. Перспективы создания на базе

критического стенда ИКАР-С статического реактора с большой облучательной полостью // Труды межотраслевой научной конференции «Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования». – Саров ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016. Т. 2, с. 348–354.

Контактная информация –

Пикулев Алексей Александрович,
начальник отдела ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
e-mail: otd4@expd.vniief.ru,

Статья поступила в редакцию 20.06.18.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2018, вып. 4, с. 29–44.