

КРИТИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА СТЕНДЕ БФС-2 В ПОДДЕРЖКУ РАЗМЕЩЕНИЯ МОХ-ТОПЛИВА В РЕАКТОРЫ БН

**А.Л. Кочетков, И.П. Матвеев, М.Ю. Семенов, Ю.С. Хомяков,
А.М. Цибуля**

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт, им. А.И. Лейпунского, г.Обнинск



В поддержку Программы утилизации российского оружейного плутония в реакторах на быстрых и тепловых нейтронах проведены эксперименты на сериях критических сборок БФС. Для уточнения расчетных методов и констант, используемых при проектных разработках модели гибридной зоны реактора БН-600 на серии критических сборок БФС-62, проведена программа экспериментов. На пяти критических сборках измерялись распределения скоростей реакций, эффективности макетов органов СУЗ, натриевый пустотный эффект реактивности (НПЭР), спектральные индексы. Погрешность измеренных величин удовлетворительна для сравнений с расчетами. Расчетные результаты, выполненные по проектным и прецизионным программам с использованием современной библиотеки констант БНАБ-93, в основном, совпадают с измеренными в пределах заявленных погрешностей, за исключением распределения скоростей реакций деления в районе стального отражателя.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее готовых и оптимальных вариантов утилизации российского плутония является его загрузка в реактор БН-600. Для этого разработаны разнообразные проекты загрузки активной зоны. Одна из них, где подзона из девяти одной тепловыделяющей сборки (ТВС) со смешанным уран-плутониевым топливом (в литературе – МОХ), располагается между урановыми зонами среднего и высокого обогащения, разработана в ГНЦ РФ-ФЭИ и называется гибридной. Кроме этого, в отличие от проекта, экран с двуокисью обедненного урана заменен стальным отражателем с поглотителем В₄С. Для исследования физических характеристик зоны такой довольно сложной структуры, в течение четырех лет, совместно с Японским институтом топливного цикла (JNC), проводились исследования [1] нейтронно-физических характеристик модели гибридной зоны на серии критических сборок БФС-62, собранных на стенде БФС-2 [2]. Поскольку величина НПЭР в МОХ-зонах может быть положительной и расчет стальных экранов представляет определенные сложности, исследования на критических сборках БФС-62 главным образом были сосредоточены на измерениях НПЭР и распределений скоростей делений, особенно в боковом экране.

Таблица 1

Серия критических сборок, моделирующих гибридную зону БН-600

№ п/п	Активная зона	Экран	Что будет изучаться
62-1	UO ₂	UO ₂	Модель активной зоны существующего БН-600
62-2	UO ₂	Стальной	Эффект замены экрана UO ₂ на стальной экран
62-3А	UO ₂ +МОХ	Стальной	Модель гибридной активной зоны БН-600
62-4	UO ₂ +МОХ	UO ₂	Эффект замены стального экрана на экран UO ₂
62-5	МОХ+(UO ₂)	UO ₂	Нейтронно-физические параметры в МОХ-вставке

ПРОГРАММА РАБОТ

Для исследований планировалось собрать и изучить серию из пяти критических сборок на стенде БФС-2 (см. табл. 1).

Первая из обозначенных выше конфигураций планировалась для моделирования активной зоны существующего реактора БН-600, состоящая из UO₂-топлива и окруженная боковым экраном из UO₂. Второй вариант БФС-62-2 получался из БФС-62-1 заменой стержней UO₂ бокового экрана стержнями с нержавеющей сталью в пределах сектора 120°. Затем часть активной зоны, входящей в состав зоны среднего и зоны большого обогащения, должна быть заменена на МОХ-топливо (гибридная зона БН-600- БФС-62-3А). При переходе к следующей конфигурации БФС-62-4 стальной экран будет вновь заменен на UO₂-экран. Пятый вариант БФС-62-5 будет содержать МОХ-топливо в центре критической сборки и является не полномасштабным вариантом модели реактора БН-600 с полной загрузкой МОХ-топливом.

Наибольший интерес с точки зрения исследования нейтронно-физических параметров для поставленной задачи представляет сборка БФС-62-3А, т.к. ее геометрические и физические параметры чрезвычайно близки к параметрам реактора БН-600 с гибридной зоной (см. табл. 2–5). В этих таблицах использованы общепринятые со-

Таблица 2

Размеры подзон, см

Подзона	ЗМО	ЗСО	ЗПО	ЗБО
БН-600	74	84	94	104
БФС-62-3А	73	83	97	105

Таблица 3

Количество делений в подзонах, %

Подзона	ЗМО	ЗСО	ЗПО	ЗБО
БН-600	42	17	22	19
БФС-62-3А	44	18	23	15

Таблица 4

Эффективность одиночных органов СУЗ

Реактор	БН-600		БФС-62-3А	
Единицы измерения	% $\Delta k/k$	центы	% $\Delta k/k$	центы
КР	0.33	57	0.34 *	55
АЗ	0.53	92	0.55	89

* – внутреннее кольцо

Таблица 5

Спектральные индексы

Реактор	БН-600	БФС-62-3А
F28/F25	0.24	0.21
F49/F25	0.95	0.94

кращения: ЗМО, ЗСО, ЗБО – урановые под зоны малого, среднего и большого обогащения; ЗПО – под зона с плутонием (МОХ-топливо); КР – компенсатор реактивности, АЗ – стержень аварийной защиты F28/F25, F49/F25 – спектральные индексы (отношения скоростей реакций делений урана-238 и плутония-239 к урану-235).

На всех критических сборках серии БФС-62 планировалось провести измерения распределений скоростей реакций деления, эффективностей органов СУЗ, натриевого пустотного эффекта реактивности (НПЭР), а также доплер-эффекта. Главным экспериментом среди прочих считается эксперимент по определению НПЭР, поскольку число сборок с МОХ-топливом определялось разработчиками исходя из нулевого значения НПЭР.

ОПИСАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ СБОРОК

Программа работ, изложенная в предыдущем параграфе, была выполнена на стенде БФС-2 в 1999–2002 гг. Результаты исследований опубликованы в препринтах ФЭИ [3–7].

Чтобы дать представление о размерах и структуре собираемых моделей, в табл. 6 приводится количество топливных стержней, стержней бокового экрана в различных подзонах серии сборок БФС-62 и их эквивалентные радиусы $R_{\text{ЭКВ}}$ или толщины $R_{\text{ЭКВ}}$, при том, что внешний диаметр труб стендов БФС равен 50 мм, а шаг решетки для установки – 51 мм. Высота всех зон с делением около 1 м. В ЗСО (только для БФС-62-1

Таблица 6

Композиция сборок серии БФС-62

Сборка	БФС-62-1	БФС -62-2	БФС -62-3А (-4)	БФС -62-5
	Количество топливных стержней			
ЗМО ~15% обогащения	511 ТС 24АЗ + 24КР	511 ТС 24АЗ + 24КР	649 ТС 24АЗ + 72КР	193 ТС Pu+456 ТС U 24АЗ + 72КР
$R_{\text{ЭКВ}}$ (см)	63	63	73	73 (37 для Pu)
ЗСО 18% обогащения	348 ТС+48КР	348 ТС+48КР	222 ТС	222 ТС
$\Delta R_{\text{ЭКВ}}$ (см)	20	20	10	10
ЗПО 17% обогащения	0	0	336 ТС	336 ТС
$\Delta R_{\text{ЭКВ}}$ (см)	0	0	14	14
ЗБО 21% обогащения	499 ТС	480 ТС	237ТС (242ТС для БФС-62-4)	171 ТС
$\Delta R_{\text{ЭКВ}}$ (см)	19	18	8	8
БЭ, труб (UO ₂ обедненный)	1840	1840 Модель не воспроизводящего экрана (сталь, бор) в секторе 120°	1840 Модель не воспроизводящего экрана в секторе 120° (для БФС-62-4 без)	1990
$\Delta R_{\text{ЭКВ}}$ (см)	~50	~50	~50	~50

ТС – топливный стержень;

АЗ – макет стержня аварийной защиты;

КР – макет стержня компенсатора реактивности

и БФС-62-2) и ЗМО размещаются макеты стержней аварийной защиты (АЗ) и компенсаторов реактивности (КР) реактора БН-600. Каждый макет (АЗ и КР) моделируется четырьмя трубами БФС, поэтому 6 АЗ и 18 КР реактора состоят из 24 труб АЗ и 72 труб КР стенда БФС. Макеты органов регулирования моделируются в выведенном из реактора состоянии, поэтому в пределах зоны в них размещается натрий (гильзы СУЗ), а в верхней части – поглощающая композиция. Начиная со сборки БФС-62-3А, где появляется зона с плутонием (ЗПО), увеличиваются размеры ЗМО и при этом обогащение в этой зоне уменьшается до 14%.

ПРОВЕДЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА СЕРИИ КРИТИЧЕСКИХ СБОРОК БФС-62

Измерения распределений скоростей делений

Распределения скоростей делений в радиальном и аксиальном направлениях измерялись при помощи малогабаритных камер деления [8], содержащих слои Pu-239, U-235 и U-238. Во время измерений камеры помещались в межтрубные зазоры критической сборки.

Абсолютные погрешности измерений составляют: для изотопа урана-235 около 1,5–2% в активной зоне с возрастанием до 3–4% в экранах; для урана-238 около 2–3% в активной зоне и 5–7% в экранах. Основные составляющие погрешностей:

- погрешность установки положения камеры;
- технологические разбросы в составе топливных стержней вблизи межтрубного зазора, где проводятся измерения;
- статистическая погрешность.

Комбинация этих погрешностей дает указанные выше величины. Примеры измеренных относительных радиальных распределений приводятся на рис. 1 и 2.

Отметим, что на появление плутониевой подзоны между ЗСО и ЗБО на критической сборке БФС-68-3А хорошо реагируют обе камеры (с ураном-235 и ураном-238), а на модель не воспроизводящего экрана на критических сборках БФС-62-2 и БФС-62-3А заметно реагирует только камера со слоем урана-235 (рис. 2).

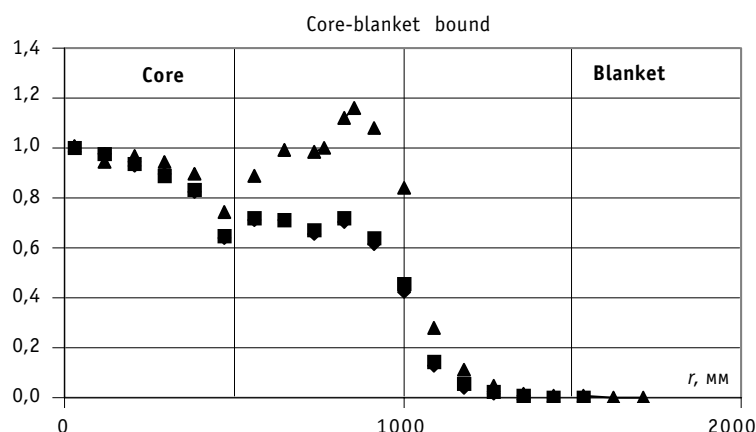


Рис.1. Радиальные распределения скоростей деления U-235: — 62-1; — 62-2; — 62-3А

Измерения отношений средних сечений

Некоторые отношения средних сечений деления и захвата могут хорошо описывать нейтронный спектр, поэтому их часто рассматривают как спектральные индексы. Обычно измерения этих отношений проводятся в центре активной зоны, где из-

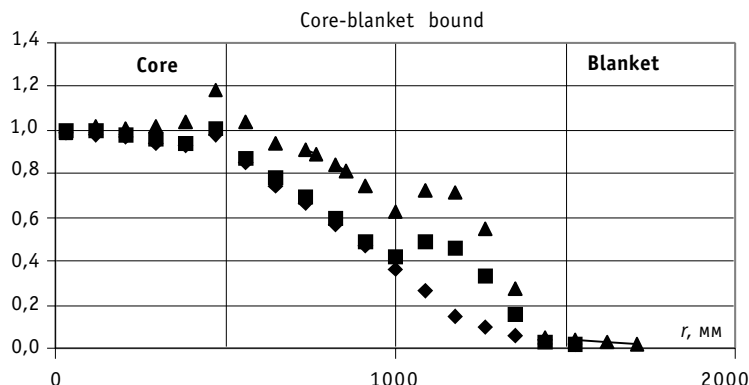


Рис. 2. Радиальные распределения скоростей деления U-235: — 62-1; — 62-2; — 62-3A

менения потока очень малы. Для измерений отношения средних сечений, так же, как и для измерений распределений скоростей делений, применялись малогабаритные камеры деления. Измерения проводились внутри одной периодической ячейки (17 см высотой) с шагом 10 мм и фиксировался средний результат. Калибровка камер деления проводилась в тепловом спектре графитовой колонны стенда БФС-2. В слой камеры с пороговым изотопом U-238 вводится известная доля не порогового U-235. При вычислении отношений средних сечений учтены следующие источники погрешностей:

- статистическая погрешность счета в камерах;
- погрешность в определении композиции слоев;
- неопределенность в знании тепловых констант;
- неопределенность знания отношений средних сечений деления для примесных изотопов в композиции слоев.

Статистическая погрешность при измерениях отношений средних сечений деления находилась в диапазоне 0.3–0.5% как для активной зоны, так и для тепловой колонны.

Погрешность установки камеры в заданную позицию по высоте достаточно мала (1–2 мм). Эта погрешность не принималась во внимание из-за малого изменения потока в центре активной зоны и тепловой колонны. Экспериментальная верификация показала, что соответствующая компонента погрешности для итогового отношения не превышает 0.2%.

Полная относительная погрешность измерения составляла около 1.5% для F49/F25 и 2.5% для F28/F25.

Результаты измерения отношений средних сечений деления на критических сборках БФС-62-1 и БФС-62-3А представлены в табл. 7.

Измерения натриевого пустотного эффекта (НПЭР)

Натриевый пустотный эффект (НПЭР) определяется как разность значений реактивности критической сборки в состояниях с натрием и без него в некоторой части активной зоны.

Изменение реактивности фиксируется цифровым реактиметром.

Методика измерения реактивности является неотъемлемой частью всех основных методик измерения на критических стендах БФС, таких как измерение НПЭР, измерение эффективности макетов органов СУЗ, реактивность малых образцов, изучение доплер-эффекта. Для измерений изменений реактивности критической сборки используется система, называемая реактиметром. В состав этой системы входят три нейтронных детектора, представляющих из себя ионизационные камеры, наполнен-

Таблица 7

Результаты измерения спектральных индексов на критических сборках БФС-62-1 и БФС-62-3А

Сборка Индекс	БФС-62-1	БФС-62-3А
F49/F25	0.943 ± 0.015	0.937 ± 0.015
F28/F25	0.0218 ± 0.0004	0.0202 ± 0.0004

ные ВР₃. Эти детекторы находятся на расстоянии 30–40 см от края активной зоны, в боковом экране (вместо стержней бокового экрана). Для повышения эффективности детекторов они окружены шестеркой труб с полиэтиленом в качестве замедлителя. Наличие между активной зоной и трубами с полиэтиленом стержней бокового экрана (UO₂ обедненный) делает незначительным влияние замедлителя на реактивность.

Изменение мощности критической сборки, возникающее после возмущения сборки, записывается и обрабатывается при помощи сложной цепочки электроники, включающей в себя измерительную линию с детектором – борной камерой, преобразователь «ток–частота» и персональный компьютер.

Экспериментальное значение реактивности сборки, зависящее от времени, определяется в режимах on-line и off-line при помощи программы-реактиметра, в основе которой решение обращенного уравнения точечной кинетики (метод ОРУК [9]), входными данными для которого являются табличные константы распада нуклидов-предшественников запаздывающих нейтронов (ЗН), а также экспериментальная информация в виде силы тока, частота которого пропорциональна мощности сборки. Эффект реактивности определяется как разность реактивностей сборки в двух состояниях. В режиме on-line результаты всех измерений всех трех детекторов усредняются, и погрешность каждого цикла определяется.

Источниками погрешностей определения реактивности по методу ОРУК являются: 1) параметры запаздывающих нейтронов a_i (относительная доля ЗН i -ой группы) и λ_i (постоянная распада предшественников ЗН) – в разных литературных источниках они разные, что приводит к различным окончательным результатам; 2) погрешности в a_i и λ_i в пределах одного литературного источника; 3) неточность расчета эффективных долей a_i ; 4) неточности математических моделей – модели пропорциональности обратной величины эффективности детектора, вводимой в сборку реактивности, и модели постоянства эффективности детектора после окончания введения реактивности; 5) отступлениями от линейности преобразования тока камер в частоту импульсов; 6) изменение эффективных долей a_i с изменением реактивности сборки; 7) нестабильность электронной аппаратуры измерительных каналов; 8) неучтенный пространственный эффект; 9) деление на различных изотопах; 10) 6-групповое приближение; 11) статистические погрешности массива чисел.

На базе многочисленных экспериментов на стендах БФС и ряда расчетов было установлено, что: полная погрешность реактивности в диапазоне от 0.3 $\beta_{эфф}$ до $-10\beta_{эфф}$ находится в пределах $\pm (1-10)\%$; погрешность реактивности монотонно возрастает с ростом абсолютной величины реактивности.

В условиях БФС при измерениях НПЭР пустота формируется путем замены натриевых блоков на пустые коробочки. Процедура проведения измерений довольно проста, однако изменение композиции топливных стержней требует немало времени. Большая часть экспериментальных результатов по НПЭР была получена путем суммирования эффектов реактивности от частичных замен блоков натрия на пустые

коробочки. Для компенсации потери реактивности благодаря удалению натрия (для поддержания критической сборки все время в надкритическом состоянии с реактивностью от $0.02 \beta_{эфф}$ до $0.15\beta_{эфф}$) производится замена некоторого числа стержней бокового экрана на топливные стержни ЗБО. Таким образом, число топливных стержней в ЗБО и радиус активной зоны меняются по мере увеличения натриевой пустоты.

На критической сборке БФС-62-2 было выполнено два эксперимента по определению НПЭР.

1. В первом эксперименте натрий удалялся из малого объема в центре критической сборки. Блочки натрия заменялись на пустые коробочки для 7 центральных по высоте ячеек 61 центральных ТС. Всего 840 блокочков (11.76 кг) натрия было удалено. Полученное экспериментальное значение НПЭР составляет минус $(0.8 \pm 0.2) \cdot 10^{-2} \beta_{эфф}$.

2. Во втором эксперименте натрий удалялся из сектора 60° всех подзон: ЗМО, ЗСО и ЗБО. Этот сектор расположен в центральной части сектора 120° с чистым натрием. По высоте замена натрия на пустые коробочки была проведена в рамках активной зоны и верхнего торцевого экрана.

Результаты измерения НПЭР на БФС-62-2 представлены в табл. 8.

На критической сборке БФС-62-3А натрий удалялся из сектора 60° всех подзон: ЗМО, ЗСО и ЗБО. Этот сектор расположен в центральной части сектора 120° с чистым натрием. По высоте замена натрия на пустые коробочки была проведена в рамках активной зоны и верхнего торцевого экрана.

Результаты измерения НПЭР на БФС-62-3А представлены в табл. 9.

Измерения эффективности макетов органов СУЗ

Для измерения эффективности макетов органов СУЗ также был использован реактиметр. Система органов регулирования БН-600 на серии БФС-62 моделировалась следующим образом: 6 макетов (по 4 стержня БФС) органов компенсаторов реактивности (КР) – первое кольцо, на радиусе 38 см; 6 макетов органов аварийной защиты

Таблица 8

Результаты измерения НПЭР на БФС-62-2

Зона	Кол-во Na (кг)	НПЭР, центы *
ЗМО	70	$-11,1 \pm 0,5$
ЗСО	40	$-5,3 \pm 0,3$
ЗБО	55	$-12,9 \pm 0,4$

* – усредненные значения по двум экспериментам: замена блокочков натрия на пустые коробочки и постановки их обратно, $\beta_{эфф} = 0.00726$.

Таблица 9

Результаты измерения НПЭР на БФС-62-3А

Зона	Кол-во Na (кг)	НПЭР, центы *
ЗМО	86	$-9,2 \pm 0,5$
ЗСО	26	$-2,5 \pm 0,3$
ЗПО	37	$-5,2 \pm 0,3$
ЗБО	30	$-11,5 \pm 0,5$

* – усредненные значения по двум экспериментам: замена блокочков натрия на пустые коробочки и постановки их обратно, $\beta_{эфф} = 0.00617$.

(АЗ) – второе кольцо, на радиусе 49 см; 6 макетов КР – третье кольцо, на радиусе 69 см. Нумерация симметрично расположенных макетов в кольцах велась по часовой стрелке начиная с 12-часового. Все макеты моделировались во взведенном состоянии, когда поглощающие части находятся вне активной зоны. Замена гильзы СУЗ на поглощающую композицию (моделирование ситуации сброса стержня в реакторе) делалась в два этапа. Вначале из сборки краном одновременно извлекались четыре трубы БФС – макет соответствующей гильзы СУЗ и реактиметром по установившемуся периоду определялся эффект замены гильзы на пустоту (около минус 5 центов), а затем, после сборки в тех же 4-х трубах макета поглощающей композиции органа СУЗ, измерялась замена пустоты на поглотитель тем же методом. Суммарный эффект этих двух этапов для БФС-62-1 и БФС-62-3А представлен в табл. 10. Погрешность учитывает все источники, описанные выше для метода ОРУК. Пространственные эффекты учтены (использовались три датчика). Отметим, что эффективность органов при переходе от стандартной модели БН-600 к гибридной зоне меняется незначительно.

Таблица 10

Результаты измерения эффективности макетов органов СУЗ

Макет	Положение	Номер кольца	БФС-62-1 Общий эффект, центы	БФС-62-3А Общий эффект, центы
КР	центр	–	$-71,5 \pm 0,8$	$-56,3 \pm 0,8$
КР	6	1	$-57,5 \pm 0,8$	$-54,8 \pm 0,8$
АЗ	5	2	$-87,5 \pm 1,4$	$-87,8 \pm 1,3$
КР	5	3	$-41,7 \pm 0,7$	$-45,8 \pm 0,7$

$\beta_{\text{eff}} = 0.00726$ (БФС-62-1), $\beta_{\text{eff}} = 0.00617$ (БФС-62-3А).

РАСЧЕТНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Ниже приводятся некоторые результаты расчетов, проведенные в лаборатории БНАБ ФЭИ.

Для анализа использовалась трехмерная диффузионная программа ТРИГЕКС с набором констант БНАБ-93 [11] в комплексе с ячеечной программой FFSP [12], позволяющей оценивать гетерогенную структуру критических сборок БФС. Кроме оценки эффектов гетерогенности, применялись методы, позволяющие оценить следующие поправки: транспортную, на групповость и частоту расчетной сетки. В табл. 11 приводятся результаты сравнений расчетных и экспериментальных (р/э) величин $K_{\text{эфф}}$. В расчетные величины введены все вышеуказанные поправки. Погрешность экспериментальных величин не хуже 5 центов. Кроме этого, в табл. 11 приводятся результаты расчетов по программе ММК-KENO [13] (метод Монте-Карло) в 299 энергетических группах БНАБ-93. Современная величина точности расчета $K_{\text{эфф}}$ оценивается не хуже 0.3%Dk/k (с учетом экспериментов на критсборках), анализ результатов на серии БФС-62 подтверждает это.

В табл. 12 приводятся результаты анализа спектральных индексов (отношение расчета к эксперименту, Р/Э), выполненные по программе ТРИГЕКС с поправкой на структуру ячейки.

Суммарная величина отрицательного НПЭР для БФС-62-2 (из табл. 8) и БФС-62-3А (из табл. 9) недооценивается диффузионным расчетом с транспортными и сеточными поправками на 3-4 цента (см. табл. 13). Это хороший результат с точки зрения предсказаний безопасности таких систем.

На рис.3 приводятся сравнения рассчитанных и измеренных величин эффектив-

Таблица 11

Результаты расчетов $K_{эфф}$ (Р/Э)

Метод расчета	БФС-62-1	БФС-62-2	БФС -62-3А
ТРИГЕКС, 26 групп	0.9978	0.9986	0.9977
ММК-KENO, 299 групп	0.9967*	0.9985*	1.0011*

* – статистическая погрешность 0.0004.

Таблица 12

Результаты анализа спектральных индексов (Р/Э)

	F8/F5		F9/F5	
	Р/Э	погрешность* (%)	Р/Э	погрешность* (%)
БФС-62-1	1.018	±1.8	1.011	±2.1
БФС -62-2	0.991	±1.8	1.013	±2.1
БФС -62-3А	1.025	±2.0	0.997	±1.6

* – погрешность измерений 1σ.

Таблица 13

**Результаты анализа НПЭР
(все величины в центах)**

	Р	Р/Э	погрешность
БФС -62-2	-25.2	+4.1	±0.7
БФС -62-3А	-25.8	+2.6	±0.8

ностей макетов органов СУЗ (Р/Э). Сравнения сделаны для макетов органов аварийной защиты (АЗ), компенсаторов реактивности (КР), в различных позициях (КЗ-5 – кольцо № 3, 5 позиция по часовой сверху) для трех критических сборок из серии. Расчеты предсказывают все эксперименты в диапазоне ±5%.

На рис. 4 и 5 приводятся сравнения расчетных и экспериментальных распределений скоростей реакций деления U-238 и U-235. Отметим, что на сборках со стальным отражателем (БФС-62-2 и БФС-62-3А) отличие Р/Э достигает 25% в распределения U-235, однако используемая для расчетов программа ТРИГЕКС не рассчитана (не тестирована) на использование в таких средах.

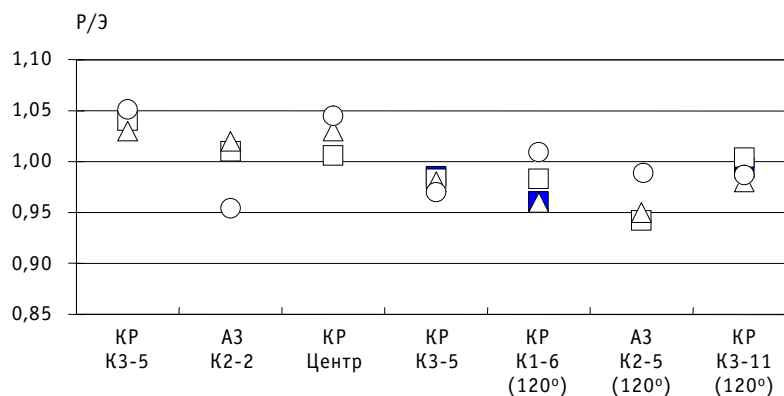


Рис. 3. Результаты анализа эффективностей макетов органов СУЗ (Р/Э): — □-1; —○-2; —62-3А

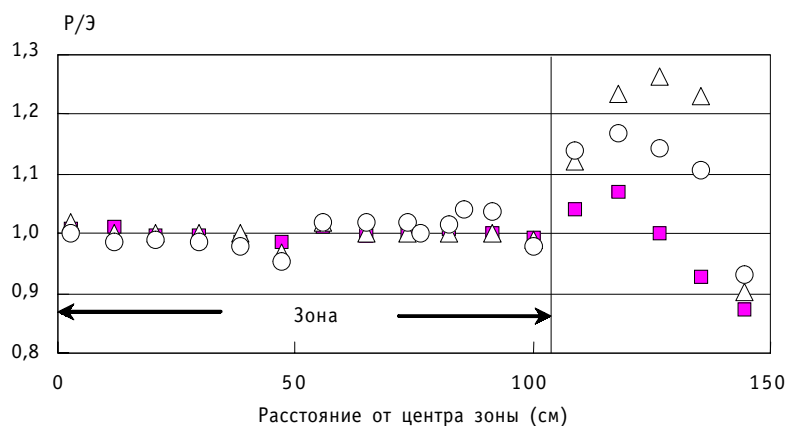


Рис.4. Сравнение (P/\mathcal{E}) относительных распределений скоростей реакций деления U-235:
■ – БФС-62-1; \triangle – БФС-62-2; \circ – БФС-62-3А

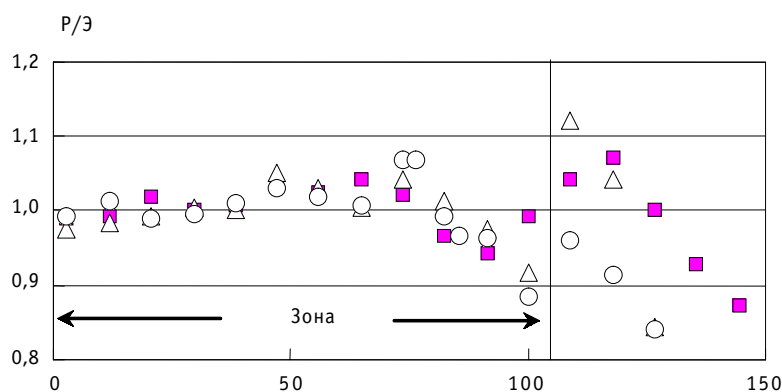


Рис.5. Сравнение (P/\mathcal{E}) относительных распределений скоростей реакций деления U-238:
■ – БФС-62-1; \triangle – БФС-62-2; \circ – БФС-62-3А

ВЫВОДЫ

1. Впервые проведены эксперименты и их анализ на серии критических сборок БФС-62 в поддержку проекта гибридной зоны БН-600 с МОХ-зоной и стальным не воспроизводящим боковым отражателем.
2. Исследования были сосредоточены на измерениях НПЭР, эффективностей макетов органов СУЗ и распределений скоростей реакций делений.
3. Рассчитанные величины совпадают с измеренными в пределах заявленных погрешностей, за исключением распределения скоростей реакций деления в районе стального отражателя.

Авторы выражают благодарность иностранным коллегам из Японского института топливного цикла Макото Ишикаве и Акира Шоно за поддержку работы и вклад в нее; сменному персоналу стенда БФС-2, экспериментаторам лаборатории № 68 ФЭИ – Н.А. Колоскову, Е.Н. Кузину, А.В. Шапарю, разработчику программы ТРИГЕКС А.С. Серегину, без которых данная работа не состоялась бы.

Литература

1. Yamato A. *et al.* The Present Status of JNC's International Cooperation for the Disposition of Russian Surplus Weapons Plutonium/ The 3rd Annual JNC International Forum on the Peaceful Use of Nuclear Energy (Feb. 20-21, 2001, Tokyo, Japan). – P. 93-96.

2. Казанский Ю.А. и др. Методы изучения реакторных характеристик на критических сборках БФС. – М.: Атомиздат, 1977.
3. Белов С. и др. Результаты экспериментов на критической сборке БФС-62-1/Препринт ФЭИ, 2808, 2000.
4. Блыскавка А. и др. Расчетно-экспериментальные исследования, выполненные на сборках БФС-62-1 и БФС-62-2/Препринт ФЭИ, 2822, 2000.
5. Двухшерстнов В., Ефимов Е., Кочетков А. и др. Расчетно-экспериментальные исследования, выполненные на сборках серии БФС-62-3/Препринт ФЭИ, 2853, 2000.
6. Ефимов Е., Дулин В., Кочетков А. и др. Результаты экспериментов на критической сборке БФС-62-4/Препринт ФЭИ, 2884, 2001.
7. Двухшерстнов В., Кочетков А., Матвеев И. и др. Результаты измерений на критической сборке БФС-62-5/Препринт ФЭИ, 2949, 2002.
8. Белов С. и др. Комплект малогабаритных ионизационных камер деления//ПТЭ. – 1990. – № 4. – С. 240.
9. Готье Ж.К., Вест Ж.П., Матвеев И.П. и др. Сравнение эффективности поглощающих стержней быстрых реакторов//Атомная энергия. – 1989. – Вып. 5. – С. 302-308.
10. Input data for BN-600 hybrid core benchmark calculations//Updated Codes and Methods to Reduce the Calculational Uncertainties of the LMFR Reactivity Effects/Working Material of the First Research Coordination Meeting (Vienna, 24-26 November 1999). – IAEA-RC-803. IWGFR/100.
11. Manturov G.N. et al. ABBN-93 group constants system. Part 1: Nuclear Constants for Calculation of Neutron and Photon Radiation Fields//Nucl. Sci. & Tech.. Series: Nuclear Constants, Iss. 1. – М., 1996. – С. 59.
12. Bezborodov A.A. et al. Evaluation of Heterogeneous Effects by Method of the First Collision Probability in Fast Neutron Critical Assemblies//Nucl. Sci. & Tech. Series: Physics and Technology of Nuclear Reactors. – 1986. – Iss. 2. – P. 8.
13. Blyskavka A.A. et al. Complex code CONSYST//ММККЕНО to calculate nuclear reactors by the Monte-Carlo method in multi-group approximation with scattering indicatrix in Pn – approximation/Preprint IPPE-2887. – Obninsk, 2001.

Поступила в редакцию 7.04.2006