

ПРЕЦИЗИОННЫЕ РАСЧЕТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА СТЕНДЕ БФС-2 ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ ПК MCU-BR

Давыдов В.К., Жирнов А.П., Калугина К.М., Моисеев А.В.,
Рождественский И.М., Юферева В.А. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Введение

В рамках данной работы рассмотрены экспериментальные программы свинцовой сборки БФС-64, серии натриевых сборок БФС-66 и свинцово-висмутовой сборки БФС-80, реализованные на критическом стенде БФС-2. На базе обновленного детализированного описания соответствующих сборок составлены точные расчетные модели конфигураций сборок и проведены расчеты с помощью прецизионного программного комплекса (ПК) MCU-BR, результаты которого были использованы для пополнения верификационной базы и оценки расчетной погрешности.

1. Описание расчетных моделей

Для расчетов по ПК MCU-BR была создана трехмерная полномасштабная модель, детально описывающая стенд БФС-2. Первоначально задан контейнер системы – конечная область пространства, в которой производится непосредственно сам расчет – в виде прямого цилиндра с условием полного поглощения на границах. Расчетная модель включает в себя бетонную опору, бетонную плиту, опорную плиту, воздушный зазор, дистанционирующую решетку, боковой бетонный отражатель, бак, в котором собираются исследуемые критические сборки, межтрубные вытеснители, графитовую (тепловую) колонну, металлическую колонну и железо-кадмиевую обечайку, окружающую их. Глобальная геометрия (рисунки 1 и 2) изображена на примере сборки БФС-64-1 и является аналогичной для сборок всех конфигураций.

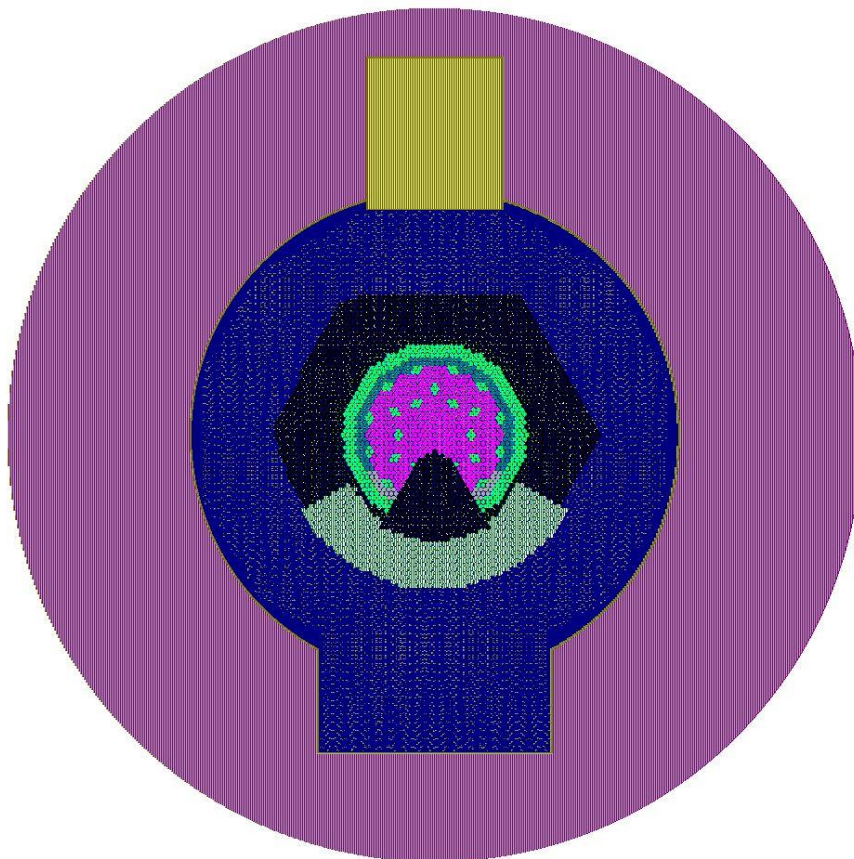


Рис. 1. Горизонтальный разрез модели стенда БФС-2

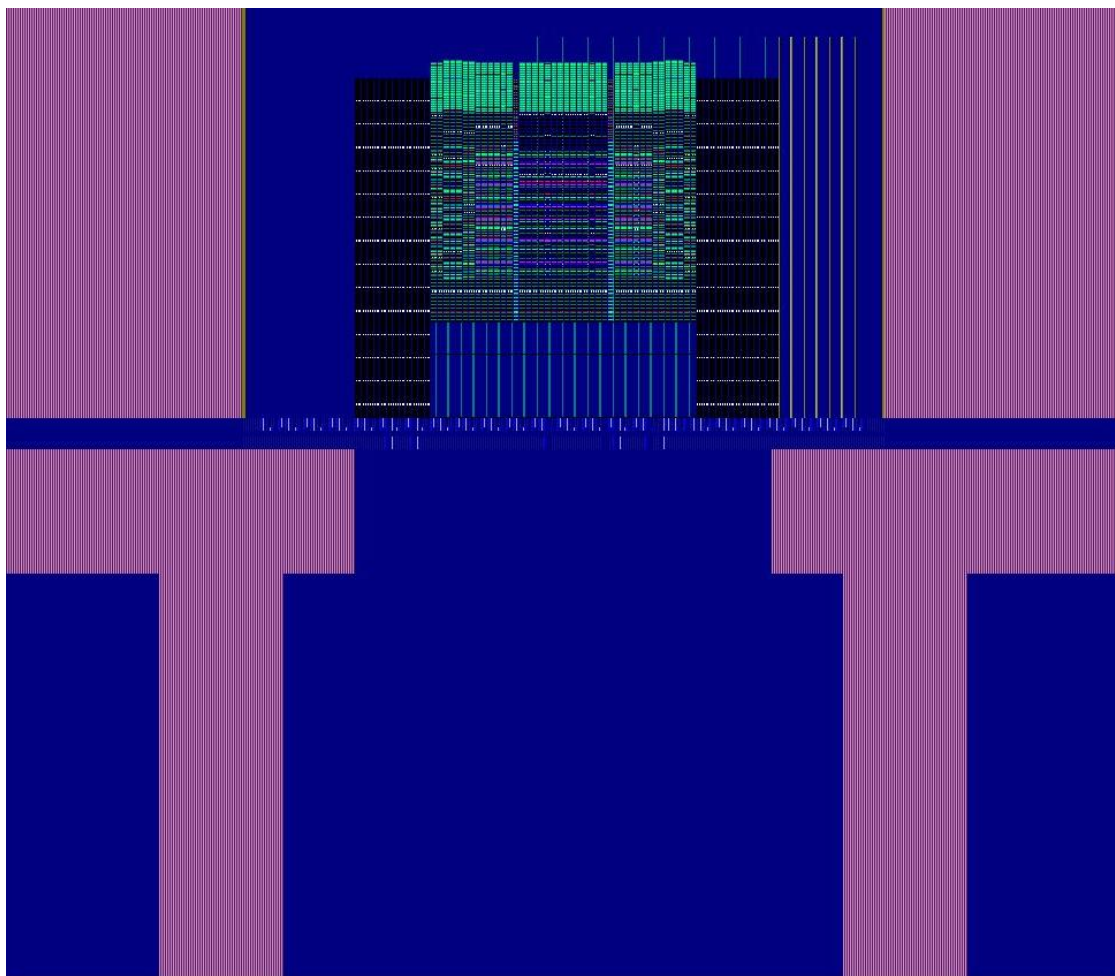


Рис. 2. Вертикальный разрез модели стенда БФС-2

В целом критическая сборка представляет собой конструкцию из вертикальных цилиндрических труб (наружный диаметр – 5,0 см, толщина стенки – 0,1 см, длина около 3 м) из нержавеющей стали, расположенных в шестигранной решетке с шагом 5,1 см. Трубы сборки заполнены таблетками из различных материалов в порядке повторяющихся ячеек.

2. Описание критических сборок БФС

Серия критических сборок БФС-64 (рисунок 3) представляет собой секторную модель активной зоны (а.з.) быстрого реактора с оксидным уран-плутониевым топливом и свинцовым теплоносителем, сформированной на базе модели быстрого натриевого реактора. Активная зона рассматриваемых сборок разделена на несколько подзон с различными обогащениями, в которой выделена тестовая зона – сектор с углом 60°. Экран из диоксида обедненного урана также включает в себя отражатель из свинцово-висмутового сплава в форме сектора углом 120°.

На критической конфигурации сборки БФС-64-1 были выполнены измерения следующих параметров:

- эффективный коэффициент размножения нейтронов ($K_{эф}$),
- эффективная доля запаздывающих нейтронов ($\beta_{эф}$),
- эффекты реактивности,
- спектральные характеристики,
- радиальные распределения скоростей реакций деления ^{239}Pu и ^{238}U ,
- аксиальные распределения скоростей реакций деления ^{239}Pu и ^{238}U .

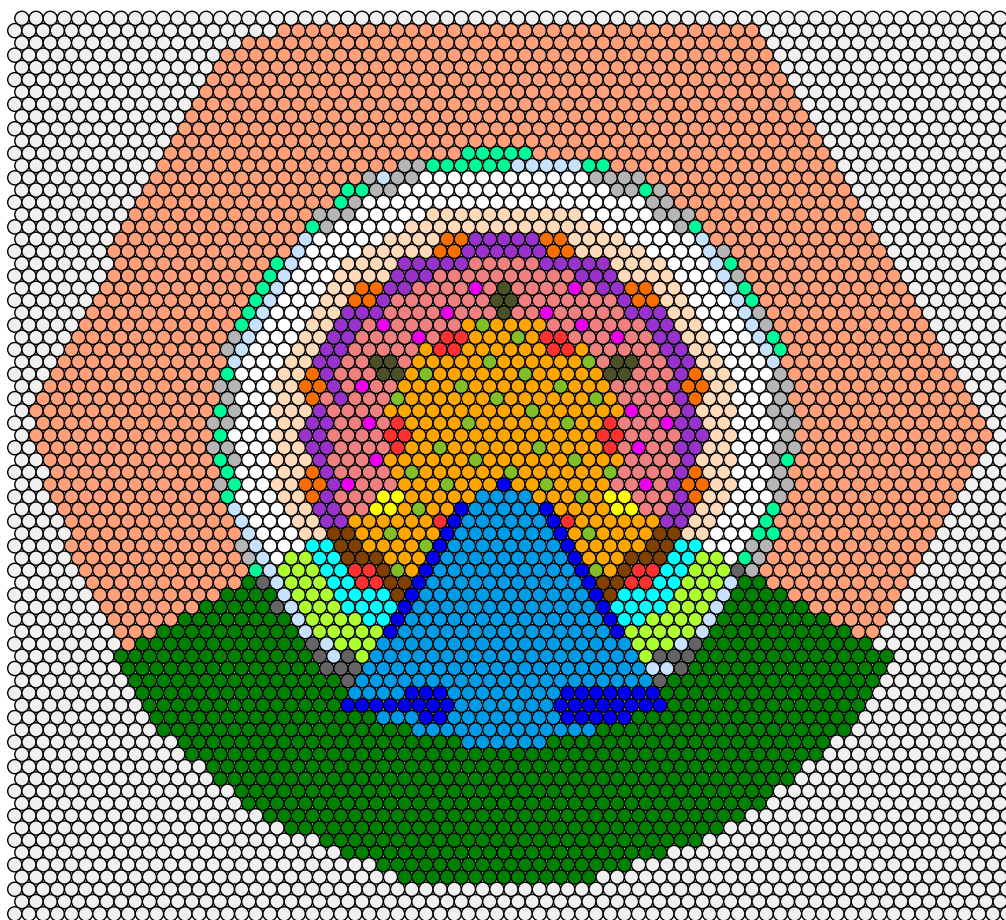


Рис. 3. Картограмма сборки БФС-64-1

Серия критических сборок БФС-66 на стенде БФС-2 представляет собой модель быстрого натриевого реактора с различными видами топливных композиций.

Основная сборка БФС-66-1 (рисунок 4) представляет собой модель активной зоны реактора БН-600 с полной загрузкой МОКС-топлива. Активная зона сборки разделена на три подзоны: малого, среднего и большого обогащения. Центральная часть (зона малого обогащения – ЗМО) собрана из плутониевых таблеток, а периферийные части (зона среднего обогащения – ЗСО и зона большого обогащения – ЗБО) составлены из таблеток металлического урана различного обогащения (36 % и 90 %).

Критические конфигурации серии БФС-66Б представляют собой модель активной зоны реактора БН-800 с нитридным топливом. Нитридное топливо в активной зоне сборок моделируется при помощи таблеток обедненного металлического урана и графита. Графит добавляется для замедления нейтронов на нитриде, то есть «смягчает» спектр нейтронов. Активная зона сборок серии БФС-66Б аналогична по составу и компоновке активной зоне БФС-66-1, за исключением вставки в ЗМО из 229 топливных стержней (ТС) с имитацией нитридного топлива. Данная вставка из 229 ТС включала в себя 127 центральных топливных стержней ЗМО, у которых в торцевом нижнем экране была выделена тестовая зона, куда размещались различные материалы: двуокись урана, уран металлический, сталь X18, сталь X28, хром, никель и сталь с большим содержанием железа.

На критических конфигурациях серии сборок БФС-66 были выполнены следующие измерения:

- эффективный коэффициент размножения нейтронов ($K_{эф}$),
- эффективная доля запаздывающих нейтронов ($\beta_{эф}$),
- пространственные распределения скоростей реакций деления изотопов ^{239}Pu , ^{238}U , ^{235}U в активной зоне и отражателях сборки БФС-66-1,

– аксиальные распределения скоростей реакций деления ^{239}Pu , ^{238}U и ^{235}U в аксиальном направлении сборок БФС-66-Б1 – БФС-66-Б9.

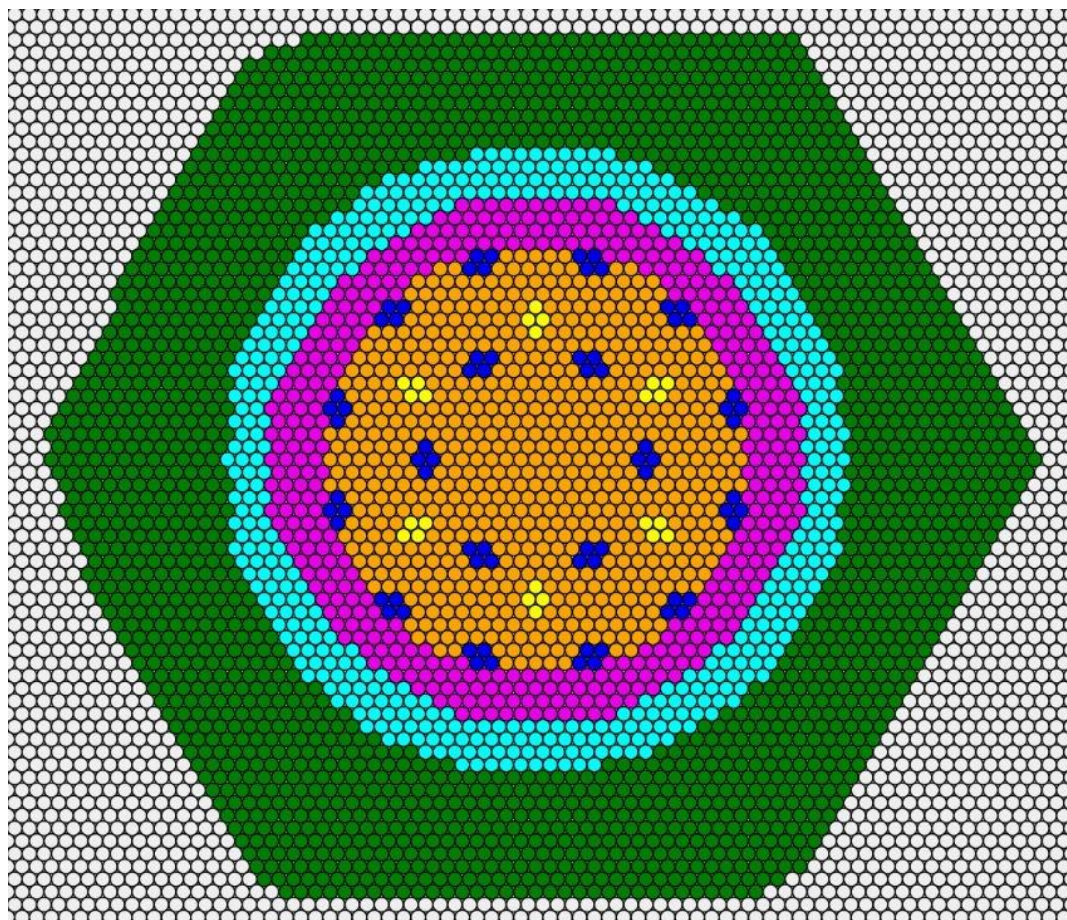


Рис. 4. Картограмма сборки БФС-66-1

Серия критических сборок БФС-80 на стенде БФС-2 представляет собой полномасштабную модель активной зоны быстрого реактора с урановым топливом и свинцово-висмутовым теплоносителем на разные моменты кампании.

Сборка конфигурации БФС-80-1 (рисунок 5) представляет собой модель активной зоны реактора СВБР на начало кампании. Активная зона состоит из пяти concentric подзон, каждая из которых состоит из шестигранных модулей. В каждом модуле содержится по 19 стальных штатных труб БФС-2, из которых 18 труб – топливные стержни, а центральная труба – макет стержня системы управления и защиты (СУЗ). Активную зону модели реактора окружает экран из пяти рядов стержней с Pb-Bi, далее располагается экран из трех рядов труб с нержавеющей сталью и слой борной защиты, также состоящий из трех рядов. Данная композиция окружена отражателем из двуокиси обедненного урана, в котором смоделирован испаритель.

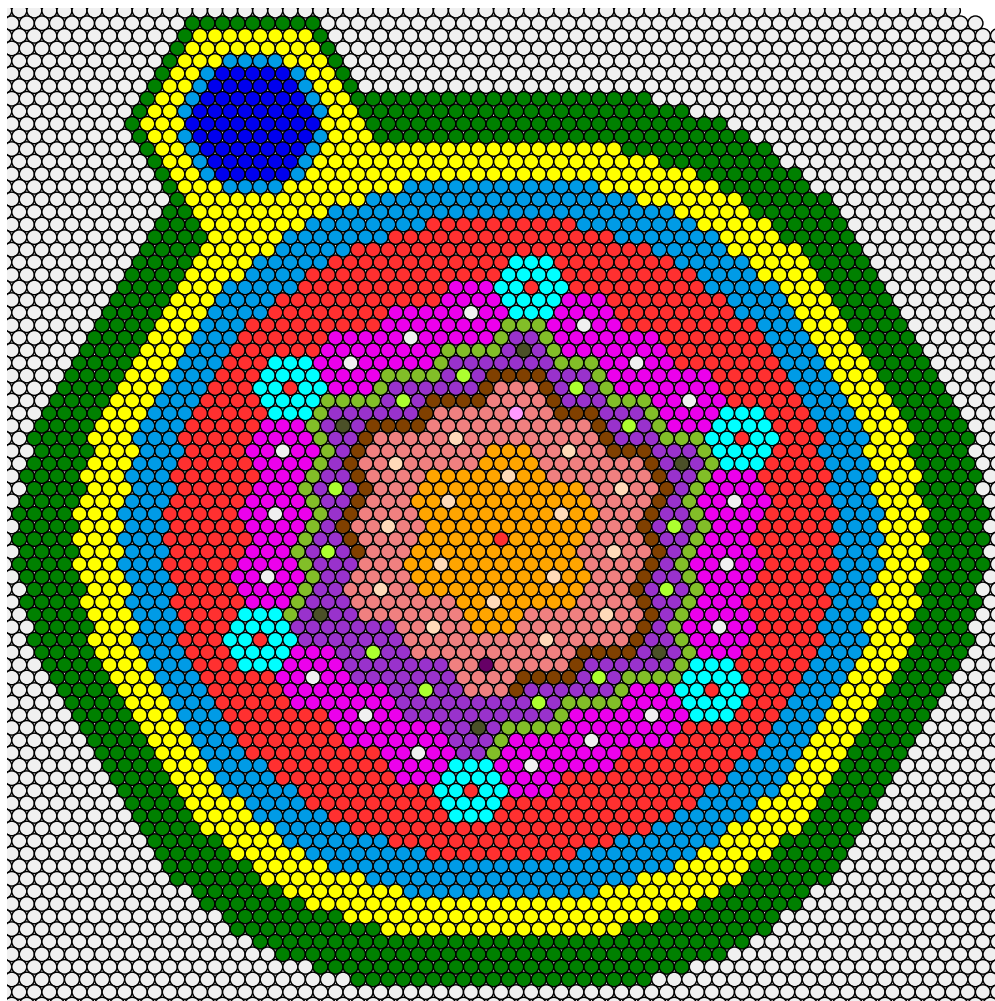


Рис. 5. Картограмма сборки БФС-80-1

На сборках БФС-80 были выполнены исследования по изучению пространственного распределения скорости деления изотопов урана (^{235}U и ^{238}U) по радиусу и высоте критической сборки в активной зоне, боковых экранах и защите.

3. Результаты расчетного моделирования

3.1. Критичность

Для оценки влияния неопределенности, вносимой нейтронными константами различных файлов оцененных нейтронных данных (ФОНД) проведено расчетное моделирование критических экспериментов на стенде БФС-2 сборок БФС-64, БФС-66 и БФС-80 в различных конфигурациях (15 конфигураций) методом Монте-Карло по прецизионному программному комплексу – MCU–BR.

Для расчетов используются нейтронные сечения в формате ACE, подготовленные из следующих файлов оцененных нейтронных данных: MDBBR50, РОСФОНД, ENDF/B-7.1, JEFF-3.2, JEFF-3.3, JENDL-4.0, CENDL-3.1, MEJ (в этой библиотеке используются данные из ENDF/B-7.1 для всех изотопов, а для изотопов Pu и Pb данные из JENDL-4.0).

Экспериментальные значения $K_{\text{эф}}$ и результаты расчетов с использованием различных ФОНД, а также отклонения расчетных значений от экспериментальных, приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Результаты расчетов $K_{эф}$ по ПК MCU-BR с использованием различных ФОНД

Сборка	Эксперимент	MDBBR50	РОСФОНД	ENDF/B-7.1	JEFF-3.2	JEFF-3.3	JENDL-4.0	CENDL-3.1	MEJ
БФС 64-0	1,0004	0,9997	0,9988	0,9986	1,0005	1,0038	0,9999	1,0008	0,9997
БФС 64-1	1,0011	1,0012	1,0000	1,0000	1,0019	1,0051	1,0012	1,0022	1,0011
БФС 66-1	1,0007	1,0012	0,9979	0,9995	1,0000	1,0028	1,0022	1,0041	1,0010
БФС 66-Б1	1,0005	0,9995	0,9964	0,9975	0,9977	1,0021	1,0010	1,0024	0,9993
БФС 66-Б2	1,0009	1,0001	0,9968	0,9981	0,9980	1,0025	1,0015	1,0029	0,9998
БФС 66-Б3	1,0007	0,9993	0,9963	0,9973	0,9975	1,0020	1,0010	1,0022	0,9992
БФС 66-Б4	1,0006	1,0000	0,9967	0,9978	0,9978	1,0023	1,0014	1,0029	0,9997
БФС 66-Б5	1,0003	0,9997	0,9965	0,9975	0,9975	1,0020	1,0014	1,0032	0,9994
БФС 66-Б6	1,0008	0,9999	0,9969	0,9980	0,9978	1,0025	1,0015	1,0027	0,9998
БФС 66-Б7	1,0005	0,9998	0,9966	0,9979	0,9979	1,0027	1,0015	1,0028	0,9996
БФС 66-Б8	1,0006	0,9993	0,9961	0,9972	0,9972	1,0017	1,0009	1,0023	0,9989
БФС 66-Б9	1,0004	1,0000	0,9966	0,9979	0,9979	1,0024	1,0014	1,0029	0,9996
БФС 80-1	1,0008	0,9991	1,0011	0,9996	1,0037	0,9983	0,9946	1,0003	0,9999
БФС 80-1a	1,0012	1,0001	1,0021	1,0006	1,0047	0,9993	0,9955	1,0013	1,0008
БФС 80-2	1,0005	1,0010	1,0032	1,0014	1,0060	1,0014	0,9962	1,0024	1,0017

Таблица 2

Отклонение расчетных значений $K_{эф}$ от эксперимента (рсм)

Сборка	Р-Э, рсм								MAX	Среднее
	MDBBR50	RF	E71	F32	F33	J40	C31	MEJ		
БФС 64-0	-71	164	183	11	338	45	36	66	338	114
БФС 64-1	2	110	119	72	393	5	103	4	393	101
БФС 66-1	54	280	124	71	205	152	343	25	343	157
БФС 66-Б1	-100	413	299	286	159	52	184	117	413	201
БФС 66-Б2	-83	408	282	286	159	58	201	108	408	198
БФС 66-Б3	-140	435	341	325	129	32	147	152	435	213
БФС 66-Б4	-58	386	275	275	167	85	228	91	386	196
БФС 66-Б5	-66	381	279	279	171	103	285	92	381	207
БФС 66-Б6	-82	385	272	292	172	77	195	93	385	196
БФС 66-Б7	-72	392	261	262	218	98	222	92	392	202
БФС 66-Б8	-132	448	339	342	110	34	168	167	448	217
БФС 66-Б9	-47	379	255	252	196	102	248	80	379	195
БФС 80-1	-166	33	116	291	250	622	48	94	622	203
БФС 80-1а	-109	86	59	351	193	575	12	41	575	178
БФС 80-2	50	273	96	559	97	422	190	122	559	226
MAX	166	448	341	559	393	622	343	167	-	-
Среднее	82	305	220	264	197	164	174	90	-	-

По рассмотренной совокупности из пятнадцати критических сборок минимальная погрешность расчета получена с использованием библиотеки MDBBR50, среднеквадратичное отклонение (СКО) 0,09 % $\Delta K/K$, максимальное отклонение 0,17 % $\Delta K/K$ и среднее абсолютное отклонение $K_{эф}$ от эксперимента 82 рсм. Среднее расчетное значение $K_{эф}$ по ПК MCU-BR с библиотекой MDBBR50 по 15 критическим состояниям составляет 1,0000, среднее экспериментальное значение $K_{эф}$ равно 1,0007, среднее отклонение расчета от эксперимента составляет минус 70 рсм (- 0,0007).

3.2. Свинцовый пустотный эффект реактивности (СПЭР)

Измерение СПЭР проводилось на сборке БФС-64-1 в двух шестигранниках (по 37 труб в каждом) на периферии и в центре тестовой зоны путем фиксации разницы реактивностей состояний, соответствующих этапам опустошения. Слив свинца моделировался заменой свинцовых таблеток на пустые коробочки, начиная с верхнего торцевого экрана (ВТЭ) и так далее до нижнего торцевого экрана (НТЭ).

В таблице 3 приведены экспериментальные данные и результаты расчетного моделирования эффекта реактивности на сборке БФС-64-1.

Таблица 3

Экспериментальные и расчетные данные измерения реактивности ($\Delta\rho$)

Зона опустошения	Эксперимент $\Delta\rho$, ϵ	Расчет $\Delta\rho$, ϵ	(Р-Э)/Э, %	Р-Э
Центральная часть тестовой зоны				
ВТЭ	$-15,5 \pm 0,3$	$-21,7 \pm 0,3$	40,28	-6,2
а.з. верх	$-4,5 \pm 0,3$	$-4,5 \pm 0,3$	-0,31	0,01
а.з. середина	$+17,9 \pm 0,3$	$+18,4 \pm 0,3$	2,66	0,5
а.з. низ	$-8,3 \pm 0,3$	$-7,8 \pm 0,3$	-5,35	0,4
НТЭ	$-8,8 \pm 0,3$	$-10,7 \pm 0,3$	21,89	-1,9
Периферийная часть тестовой зоны				
ВТЭ	$-12,4 \pm 0,3$	$-17,6 \pm 0,3$	41,93	-5,2
а.з. верх	$-4,0 \pm 0,3$	$-3,4 \pm 0,3$	-14,26	0,6
а.з. середина	$-1,0 \pm 0,3$	$-1,7 \pm 0,3$	65,19	-0,7
а.з. низ	$+3,4 \pm 0,3$	$+3,1 \pm 0,3$	-8,62	-0,3
НТЭ	$-4,3 \pm 0,3$	$-4,4 \pm 0,3$	2,84	-0,1

3.3. Измерение эффективности труб бокового экрана

Для исследований эффективности труб бокового экрана на сборке БФС-64 трубы со сплавом Pb-Bi заменялись либо на пустые трубы, либо на воздух, в зависимости от экспериментальной операции. Максимальное отклонение расчетных значений от экспериментальных в эффективности одного модуля составляет 35 %. Наибольшее отличие в эффективности комбинации из пары модулей составляет 7 %.

3.4. Эффективность макетов периферийных СУЗ

При измерении эффекта реактивности макетов периферийных органов СУЗ на сборке БФС-64 в боковой экран из Pb-Bi помещались модули, состоявшие из макетов МАЗ (макет аварийной защиты) и МАР (макет автоматического регулятора). Активная часть стержня МАЗ состоит из карбида бора. Стержень МАР содержит в центральной части таблетки оксида алюминия. В соответствии с экспериментальной программой зафиксированы результаты установки макета МАЗ в воздушное пространство, полученное путем предварительного изъятия определенных труб и макета МАР из сборки.

Максимальное отличие в расчете и эксперименте в эффективности одного макета МАЗ составляет 8 %, отличие в комбинации из пары установленных макетов МАЗ составляет 7 %. Отклонение в эффективности макета МАР составляет 27 %.

3.5. Моделирование процесса перегрузки

Также на сборке БФС-64 проведено измерение эффективности семи труб тестовой зоны и семи труб со свинцом на периферии тестовой зоны и в центральной ее части. По полученным результатам отмечено наибольшее отличие для модулей, расположенных ближе к периферии тестовой зоны. Отличие составляет около 18 % для операции по изъятию семи топливных труб и 13 % для операции по изъятию модуля из семи стержней со свинцом. Максимальное отклонение в эффективности модуля в центральной части тестовой зоны составляет 4 %.

3.6. Спектральные характеристики

Измерения спектральных индексов на сборке БФС-64 проводились в середине тестовой зоны примерно на середине ее высоты. В таблице 4 приведены экспериментальные данные и результаты расчетного моделирования измерения спектральных индексов. Расчеты спектральных индексов позволяют провести верификацию библиотеки нейтронных сечений (сечений деления) для основных делящихся и воспроизводящих нуклидов.

Таблица 4

Спектральные индексы на сборке БФС-64-1

Индекс	Методика	Эксперимент	Расчет	(Р-Э)/Э, %
f_{Pu239}/f_{U235}	МКД	$0,940 \pm 0,009$	$0,948 \pm 0,013$	0,85
f_{U238}/f_{U235}	МКД	$0,0175 \pm 0,0003$	$0,0169 \pm 0,0004$	-3,43
f_{Pu239}/f_{U235}	СКД	$0,982 \pm 0,015$	$0,943 \pm 0,002$	-3,97
f_{U238}/f_{U235}	СКД	$0,0177 \pm 0,0004$	$0,0169 \pm 0,0001$	-4,52
f_{Pu238}/f_{Pu239}	АКД	$0,662 \pm 0,020$	$0,607 \pm 0,005$	-8,31
f_{Np237}/f_{Pu239}	АКД	$0,176 \pm 0,005$	$0,173 \pm 0,002$	-1,70
f_{Am241}/f_{Pu239}	АКД	$0,146 \pm 0,008$	$0,132 \pm 0,002$	-9,59
f_{Am243}/f_{Pu239}	АКД	$0,111 \pm 0,003$	$0,097 \pm 0,001$	-12,61
c_{U238}/f_{U235}	Активация	$0,154 \pm 0,005$	$0,164 \pm 0,005$	6,49
c_{U238}/f_{Pu239}	Активация + АКД	$0,93 \pm 0,05$	$0,880 \pm 0,014$	-5,38

По полученным результатам наблюдается хорошее согласие расчета спектральных индексов с экспериментом, отличие находится в диапазоне от 0,85 % до 13 %. Среднее значение – 4,2 %.

Для изучения эффекта гетерогенного перераспределения скорости захватов на ^{238}U на сборке БФС-64 были облучены пять фольг урана 37 % обогащения в центральной ячейке в канале 152/138, три из которых были расположены между таблетками, а остальные две располагались по сечению разрезного блокка окиси урана. Также проведен расчет относительного распределения скорости захватов на ^{238}U в тех же позициях.

Относительные погрешности расчета спектрального индекса c_{U238}/f_{U235} составляют по абсолютной величине 1,23 %, 5,26 %, 3,01 %, 0,74 %, 2,21 %, среднее значение – 1,3 %. Результаты расчетов скорости захватов на ^{238}U находятся в хорошем согласии с экспериментом, максимальное отклонение составляет 8 %.

3.7. Распределение скоростей реакции деления

С помощью малогабаритных камер деления, размещенных в межтрубных зазорах сборки, проведены измерения пространственных распределений скоростей реакций деления ^{235}U , ^{239}Pu и ^{238}U . Расчеты пространственных распределений скоростей реакций деления позволяют оценить погрешность расчета аксиального и радиального распределения плотности потока нейтронов и энерговыделения в активной зоне.

Расчеты радиального распределения скорости реакций деления в сборке БФС-64-1 показали среднеквадратичное отклонение для ^{239}Pu ~ 6 % в активной зоне и около 11 % в отражателе, для ^{238}U значения составили 13 % и 11 % соответственно. Среднеквадратичное отклонение в активной зоне сборки БФС-66 для всех исследуемых изотопов составляет около 3 %, при этом наибольшее отклонение отмечено у изотопа ^{238}U . В активной зоне сборки БФС-80 среднеквадратичное отклонение составляет около 3% для ^{235}U и ~ 8 % для ^{238}U , в отражателе достигает 15 %.

В таблице 5 представлена сводка по показателям СКО для всех моделируемых в данной работе сборок при расчете аксиальных скоростей реакций деления.

Таблица 5

Сводка по показателям СКО аксиальных скоростей реакций деления

Сборка	Тип отражателя	СКО, %					
		Активная зона			Отражатель		
		^{239}Pu	^{235}U	^{238}U	^{239}Pu	^{235}U	^{238}U
БФС-64-1 базовое состояние	Свинец-висмут	1,81	—	—	3,71	—	—
БФС-64-1 с макетом СУЗ	Свинец-висмут	2,02	—	4,06	4,02	—	5,30
БФС-66-1	UO ₂ (67%) + Na (33%)	1,42	1,19	3,94	4,47	6,06	5,09
БФС-66Б1	UO ₂ (67%) + Na (33%)	1,33	1,58	3,94	4,43	8,98	4,29
БФС-66Б2	UO ₂	2,09	2,35	4,62	7,27	10,38	9,27
БФС-66Б3	U(d)	1,39	1,86	4,33	3,06	3,60	4,20
БФС-66Б4	Сталь X-18	2,04	1,93	5,32	21,80	19,27	8,80
БФС-66Б5	Cr	1,93	1,77	4,82	13,54	10,41	13,56
БФС-66Б6	Ni	1,46	1,58	5,38	8,21	6,33	8,13
БФС-66Б8	Сталь с повышенным содержанием железа	2,11	2,35	5,45	8,76	15,10	9,38
БФС-66Б9	Сталь X-28	1,87	1,75	5,22	14,40	12,73	6,65
БФС-80-1	Сталь X-18 (67%) + Pb (33%)	—	4,07	2,73	—	10,45	6,56
БФС-80-2	Сталь X-18 (67%) + Pb (33%)	—	3,01	2,85	—	15,01	5,74

В результате анализа аксиальных распределений скоростей реакций деления наблюдается общая тенденция: в пределах активной зоны согласие расчетных и экспериментальных значений лучше, чем в отражателе сборки. Значения СКО в активной зоне для изотопа ^{239}Pu и ^{235}U не превышают 2,5 %, а для изотопа урана ^{238}U показатели среднеквадратичных отклонений составляют ~5 %. В отражателях расчетно-экспериментальные расхождения распределений скоростей реакций деления достигают 20 %.

Заключение

Результаты верификации на основе изученных экспериментальных исследований моделей быстрых реакторов на стенде БФС-2 показали, что точность большинства расчетов по ПК MCU-BR находится в пределах экспериментальной погрешности, что позволяет применять данное программное средство для высокоточных расчетов нейтронно-физических характеристик быстрых реакторов. Результаты расчетного моделирования сборки БФС-64 вошли в верификационный отчет ПК MCU-BR для РУ БР-1200. Кроме того, опыт моделирования и расчета данных сборок позволил качественно подготовиться к проведению экспериментальной программы на сборке БФС-88, которая представляет собой полномасштабную модель РУ БРЕСТ-ОД-300.