



НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



ФЭИ  
РОСАТОМ



# Верификация расчетных подходов к планированию экспериментов по моделированию нейтронно-физических характеристик реактора ВВЭР-С на стенде БФС-1

Кузенкова Дарья Сергеевна, Лапин А.С.<sup>1</sup>, Внуков Р.А.<sup>1</sup>, Каширина В.Е.<sup>1</sup>, Котов Я.А.<sup>1</sup>, Невиница В.А.<sup>1</sup>, Колесов В.В.<sup>1</sup>, Бландинский В.Ю.<sup>1</sup>, Фомиченко П.А.<sup>1</sup>, Бобров Е.А.<sup>1</sup>, Осипов А.М.<sup>1</sup>, Михайлов Г.М.<sup>2</sup>, Шагинян Р.А.<sup>2</sup>, Жуков А.М.<sup>2</sup>, Коробейникова Л.В.<sup>2</sup>, Гулевич А.В.<sup>2</sup>, Мантуров Г.Н.<sup>2</sup>, Елисеев В.А.<sup>2</sup>, Стогов В.Ю.<sup>2</sup>, Бедняков С.М.<sup>2</sup>, Изотов В.В.<sup>2</sup>, Прищепа В.В.<sup>2</sup>

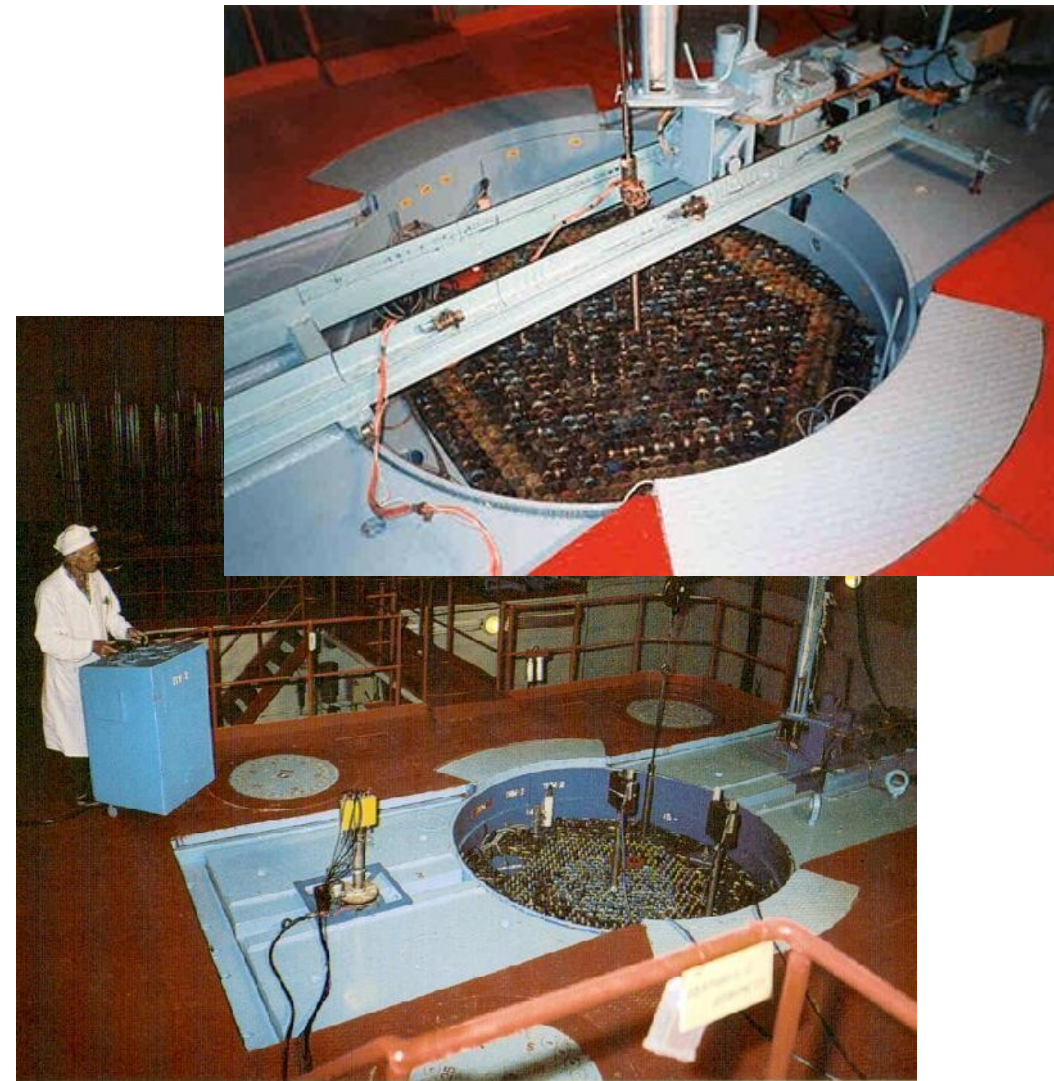
<sup>1</sup> НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва

<sup>2</sup> АО «ГНЦ РФ – ФЭИ имени А.И. Лейпунского», г. Обнинск

Обнинск, 2024



Необходимость экспериментального моделирования реактора ВВЭР-С обусловлена лежащим в основе его работы новым физическим принципом: возможностью воздействовать на реактивность реактора путем изменения водо-топливного отношения и, соответственно, спектра реактора. Другой особенностью моделируемого реактора является применение в его загрузке уран-плутониевого топлива с использованием плутония из ОЯТ ВВЭР, которое обуславливает несколько более жесткий, по сравнению с урановым топливом, спектр нейтронов.





В силу лицензионных ограничений в настоящее время экспериментальное моделирование возможно лишь на критическом стенде БФС-1 в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» (Обнинск), который является сложным объектом для моделирования. Более того, существует прецедент использования именно этого стенда для моделирования легководных реакторов с МОКС-топливом. В конце 90-х и в начале 2000-х на этом стенде была осуществлена программа предварительных экспериментов в обоснование постановки в активную зону реактора типа ВВЭР-1000 МОКС-топлива с плутонием оружейного качества [1, 2]. В силу технических особенностей стенда БФС и его изначального предназначения, полномасштабное моделирование легководного реактора на нем невозможно, однако существует возможность применить метод центральных вставок, или другими словами, метод неполномасштабного моделирования [2,3].

1 Кочетков А. Л. Матвеевко, И. П., Рожихин, Е. В., Цибуля А. М. Эксперименты в поддержку размещения МОХ-топлива в реакторы ВВЭР //Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2007. – №. 3-1. – С. 99-108.

2 Kochetkov A., Doulin V., Semenov M., Rozhikhin Ye., Pavlova O. BFS-57 and BFS-59 Assemblies: Experimental Program on Critical Assemblies with Heterogeneous Compositions of Enriched- Uranium Dioxide or Plutonium, Depleted Uranium Dioxide and Polyethylene. NEA/NSC/DOC (2006)1

3 Внуков Р.А., Котов Я.А., Невиница В.А., Колесов В.В., Бландинский В.Ю., Лапин А.С., Кузенкова Д.С., Фомиченко П.А., Михайлов Г.М., Коробейникова Л.В., Бурьевский И.В., Стогов В.Ю., Шагинян Р.А., Елисеев В.А., Гулевич А.В. Оценка возможности получения экспериментальных данных для зон ВВЭР-СКД на стенде БФС. — ВАНТ. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2023, вып. 1, с. 117—129.



Цель данной работы состоит в моделировании некоторых сборок стенда БФС с центральной вставкой (БФС-93) и без нее (БФС-57 и БФС-59) для верификации расчетных моделей.

Основные задачи работы заключаются в:

- создании расчетных моделей и расчете их критичности,
- расчете спектральных индексов и аксиального распределения скоростей реакций деления в измерительном канале,
- расчете аксиального и радиального распределений энерговыделения.

Работа выполнялась в два этапа:

**Первый этап:** анализ экспериментов с применением традиционного для стенда БФС способа моделирования штатными средствами БФС (трубы заполненные блочками или таблетками, имитирующие моделируемую материальную композицию и ее спектральные свойства) – сборки БФС-57 и БФС-59.

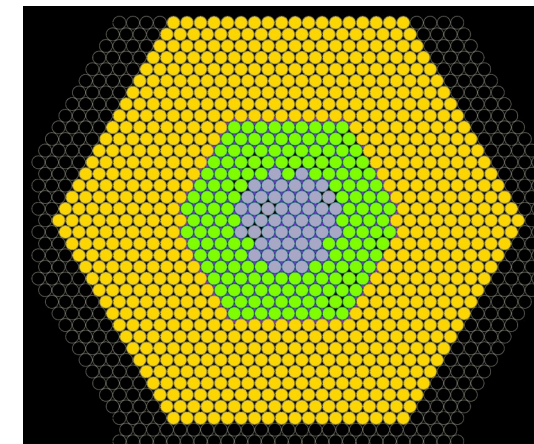
**Второй:** анализ экспериментов с установкой в центр стенда БФС-1 бака с водой и фрагментом решетки твэлов реактора типа ВВЭР – сборка БФС-93.



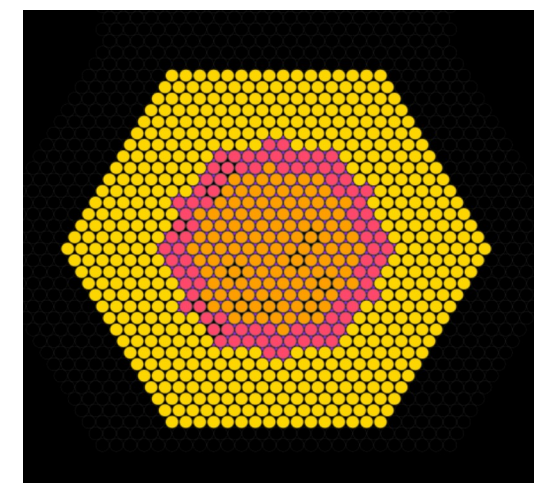
## Результаты расчета спектральных индексов в пустом

## центральной канале

	БФС-57	БФС-59
Эксперимент		
f_U238 / f_U235	0,00486±0,00010	0,00260±0,00005
f_Pu239 / f_U235	2,53±0,04	2,13±0,03
Расчет, MCNP5 (ENDF/B-VI.8)		
f_U238 / f_U235	0,00458 ± 0,00007	0,00243 ± 0,00002
f_Pu239 / f_U235	2,57 ± 0,02	2,07 ± 0,02
Расчет, Serpent (ENDF/B-VII.1)		
f_U238 / f_U235	0,00461 ± 0,00007	0,00228 ± 0,00001
f_Pu239 / f_U235	2,51 ± 0,06	2,04 ± 0,02
(C-E)/E, расчет Serpent (ENDF/B-VII.1), %		
f_U238 / f_U235	-5,07	-12,41
f_Pu239 / f_U235	-0,80	-4,33
Расчет, MCNP5 (РОСФОНД-2010)		
f_U238 / f_U235	-	0,00236 ± 0,00001
f_Pu239 / f_U235	-	2,06 ± 0,01
(C-E)/E, расчет MCNP5 (РОСФОНД-2010), %		
f_U238 / f_U235	-	-9,40
f_Pu239 / f_U235	-	-3,28



Картограмма БФС-57



Картограмма БФС-59

# БФС-93

Суть метода центральных вставок сводится к тому, что в центральной части собранной на стенде БФС сборки собирается фрагмент активной зоны или типовой решетки твэлов. Размер фрагмента выбирается таким образом, чтобы внутри него формировался бы спектр нейтронов, характерный для моделируемого реактора.

## Критические состояния серии БФС-93

БФС-93-		-1	-2	-3	-4	-5	-6
Al Бак	UOX-твэлы (шт)	397	276	463	336	463	336
	MOX-твэлы (шт)	-	127	-	127	-	127
	SS-имитаторы (шт)	66	60	-	-	-	-
Стальные трубы драйвера (шт)		167	161	140	135	81	89
Al трубы драйвера (шт)		-	-	-	-	47	39
Боковой экран-1 (Al оболочка), шт		363	364	363	363	360	360
Боковой экран-2 (оболочка SS), шт		398	369	267	267	264	264
H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub> концентрация, г/л		0	0	4	4	7	7
K <sub>эфф</sub> , эксперимент ±0.0005 (1?)		1.0006	1.0000	1.0012	1.0011	1.0008	1.0010
K <sub>эфф</sub> , расчет (MNCР, 1σ)		0.9996	1.0009	1.0016	1.0019	1.0012	1.0013

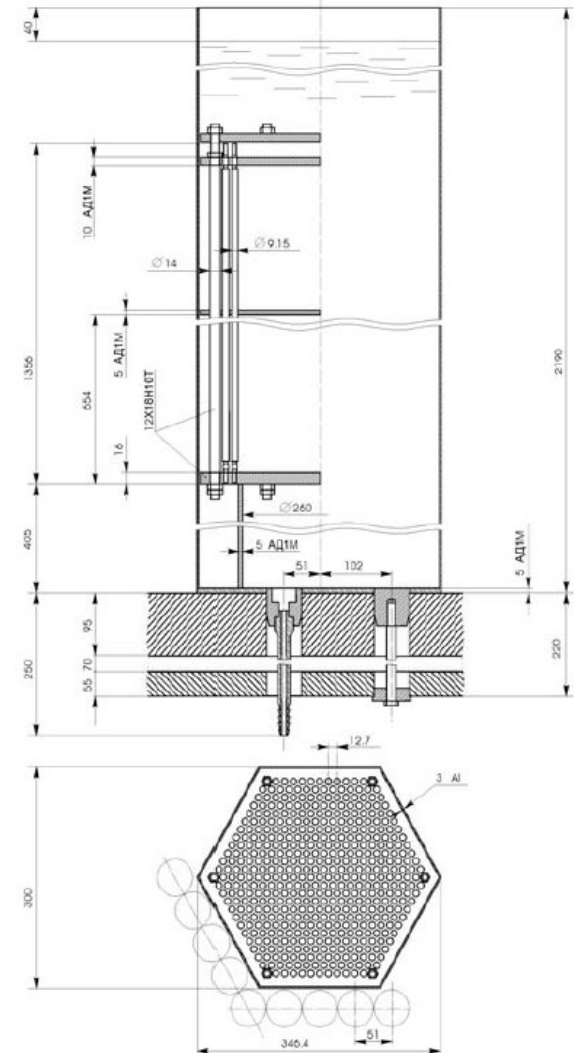


Рис.1. Алюминиевый бак для центральной вставки



## Расчет критичности

В ходе работы созданы расчетные модели БФС-93, а также сборки БФС-57 и БФС-59, соответствующие моделированию реакторов типа ВВЭР с тесными решетками в программных комплексах MCNP и Serpent и выполнен расчетный анализ серии экспериментов. Примеры выполненных расчетов представлены в таблице, для сравнения приведены результаты АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» из работ :

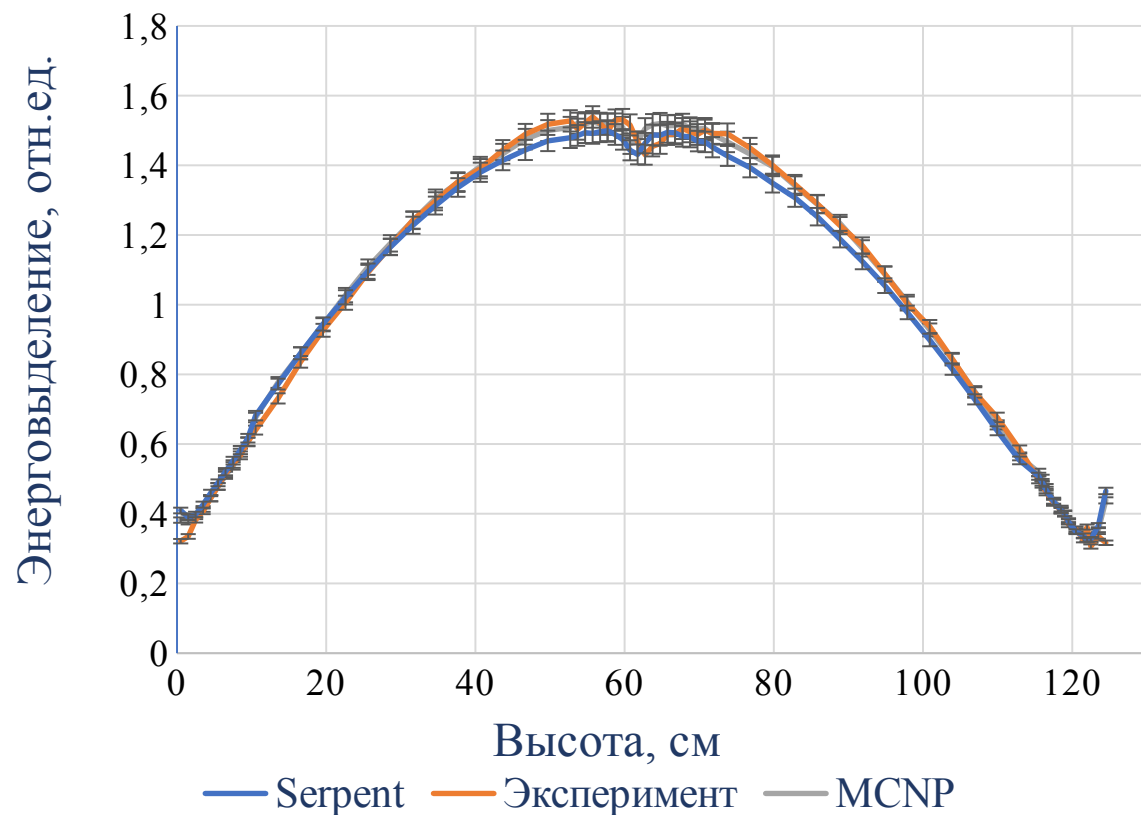
	БФС-93-1	БФС-93-2	БФС-57	БФС-59
Расчет MCNP ГНЦ РФ ФЭИ	0,9996 [1]	1,0009 [1]	1,00015[2]	0,99173[2]
Расчет MCNP	1,00412	1,00441	-	0,99235
Расчет Serpent	1,00214	1,00168	1,00074	0,99357

1 Кочетков А. Л. Матвеевко, И. П., Рожихин, Е. В., Цибуля А. М. Эксперименты в поддержку размещения МОХ-топлива в реакторы ВВЭР //Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2007. – №. 3-1. – С. 99-108.

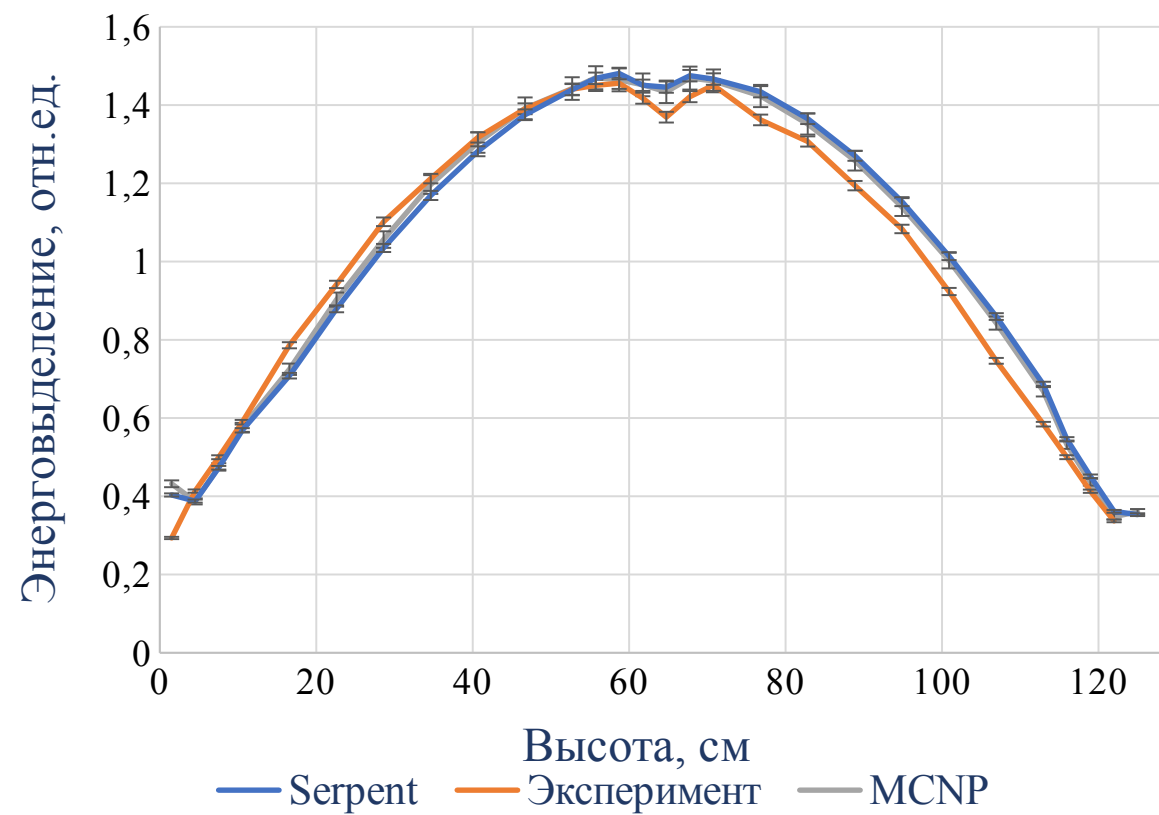
2 Kochetkov A., Doulin V., Semenov M., Rozhikhin Ye., Pavlova O. BFS-57 and BFS-59 Assemblies: Experimental Program on Critical Assemblies with Heterogeneous Compositions of Enriched- Uranium Dioxide or Plutonium, Depleted Uranium Dioxide and Polyethylene. NEA/NSC/DOC (2006)1



# Распределение энерговыделения по высоте



БФС-93-1

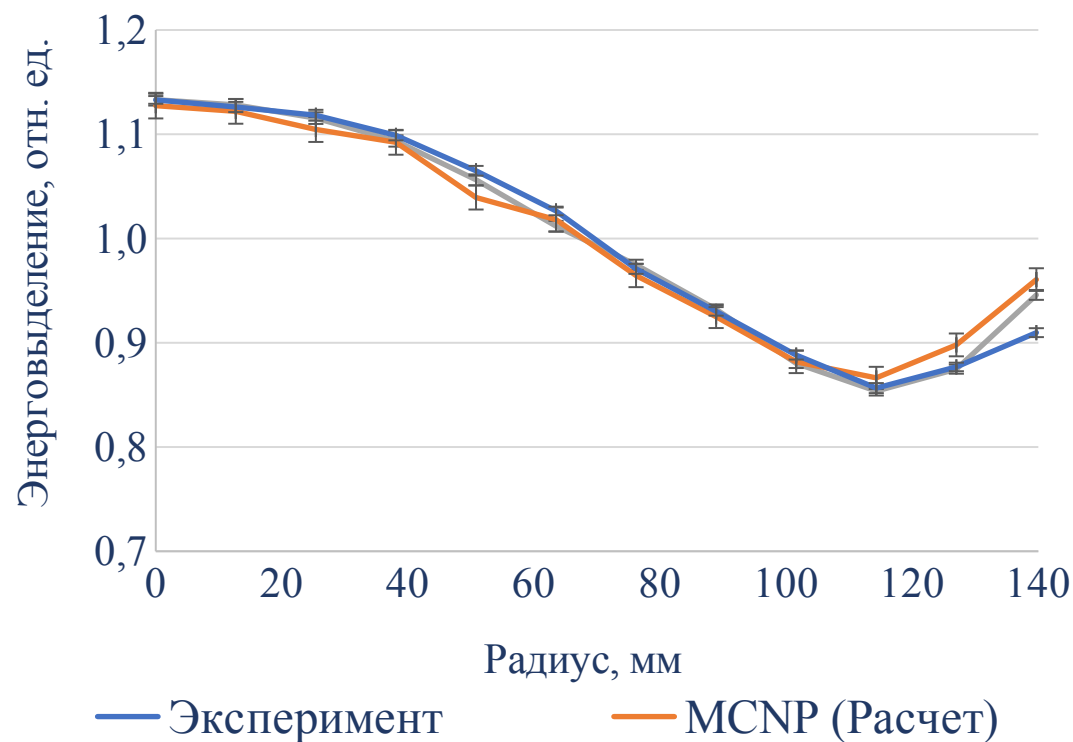


БФС-93-2

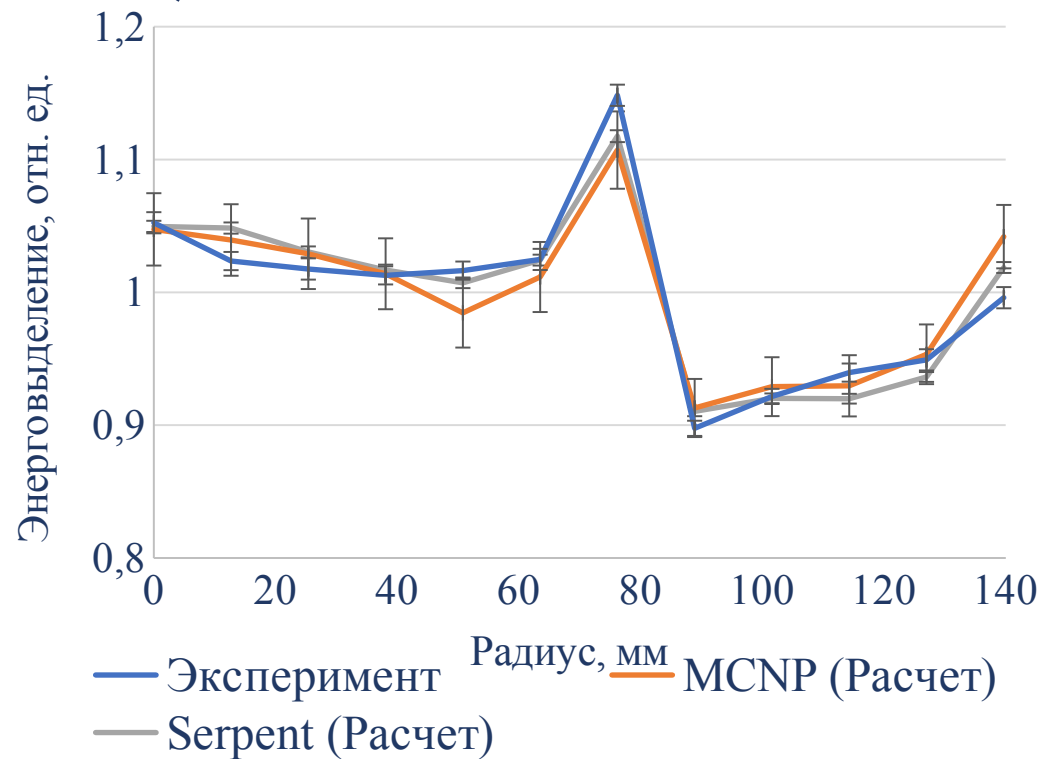




# Распределение энерговыделения потвэльно (радиальное)



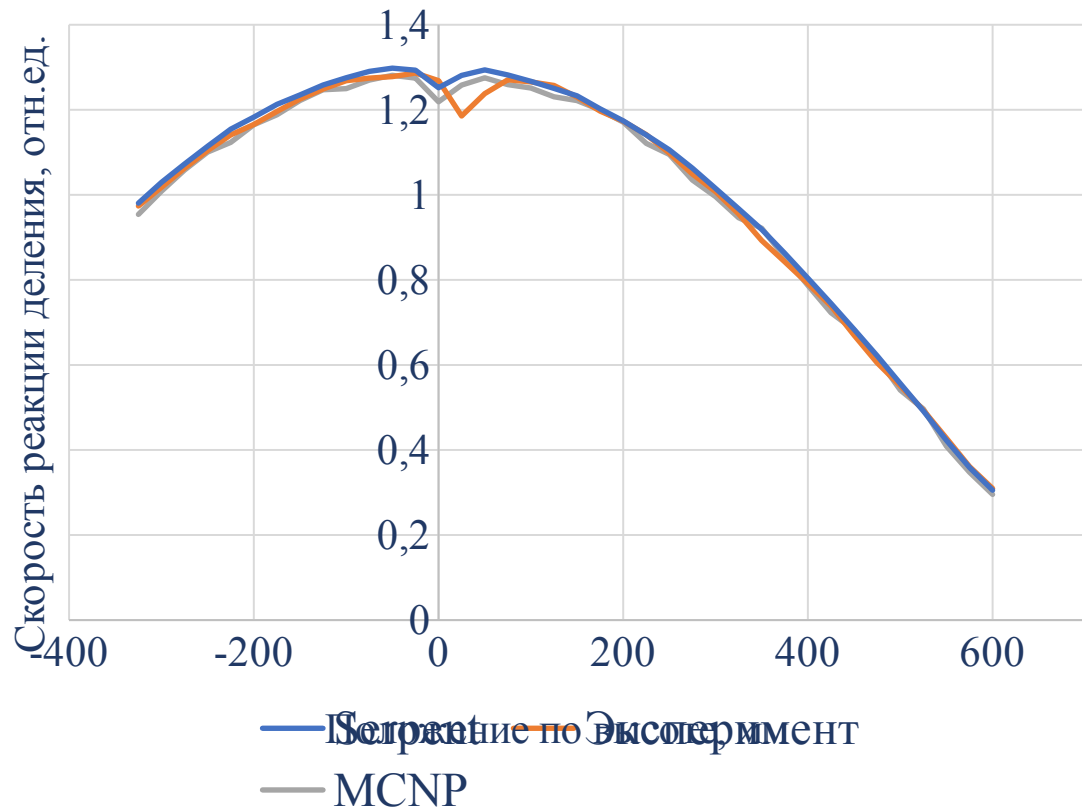
БФС-93-1



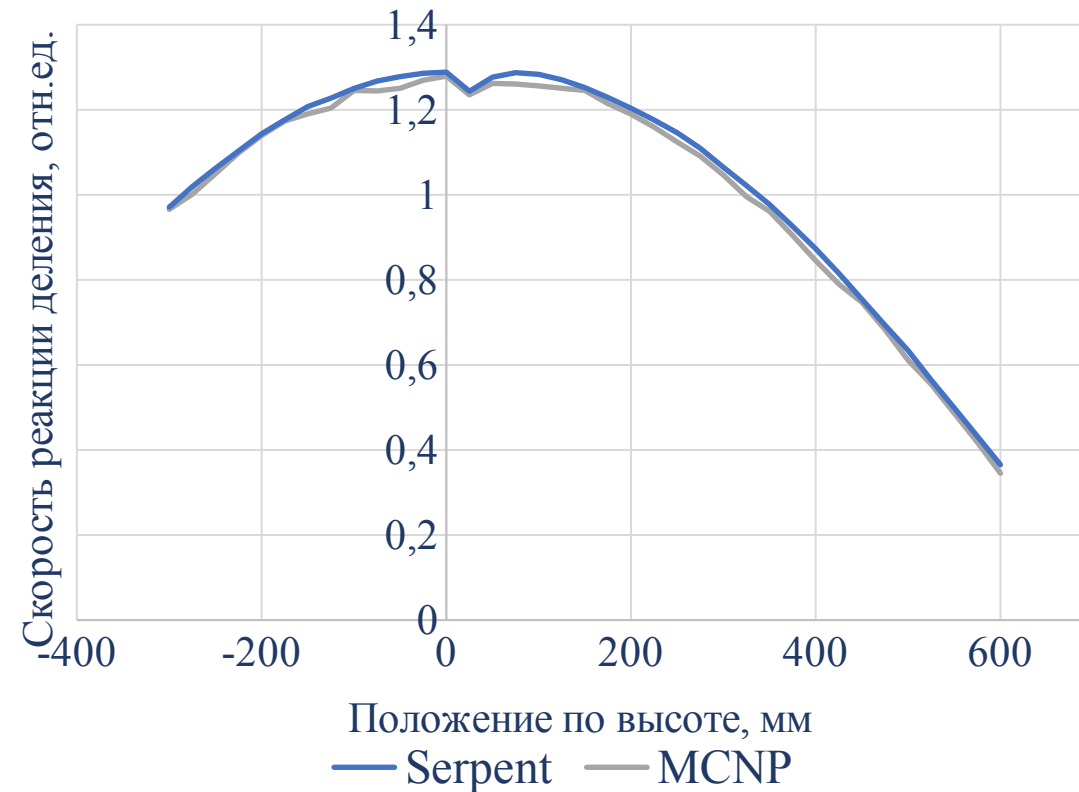
БФС-93-2



# Скорости реакции (Pu-239)



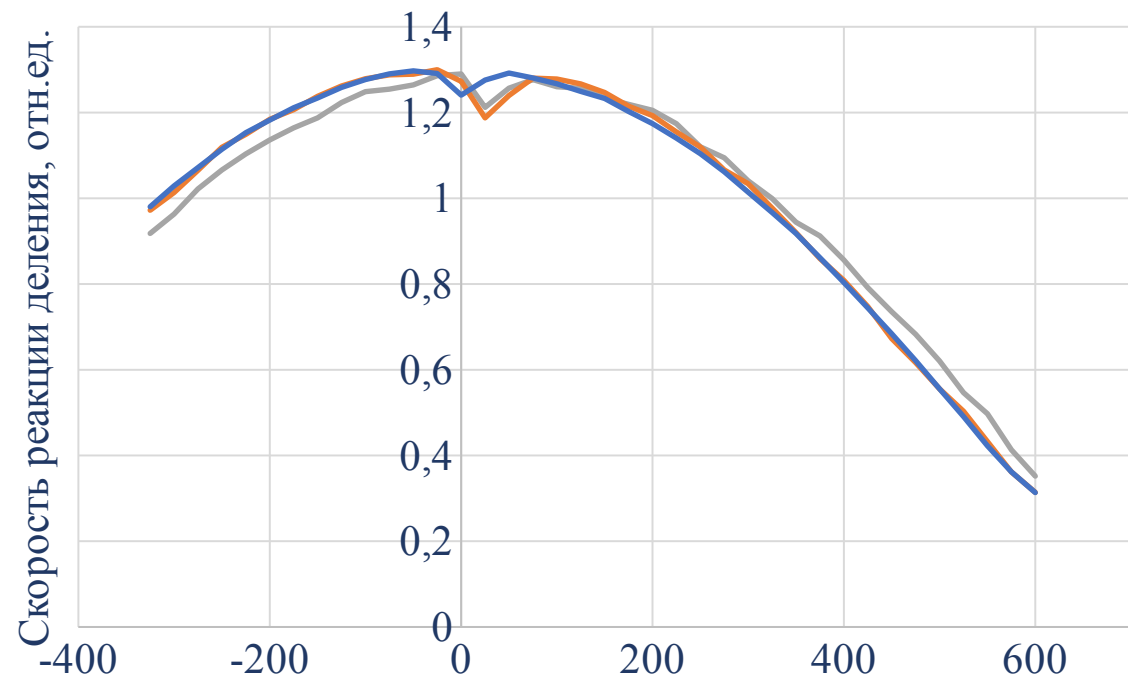
БФС-93-1



БФС-93-2



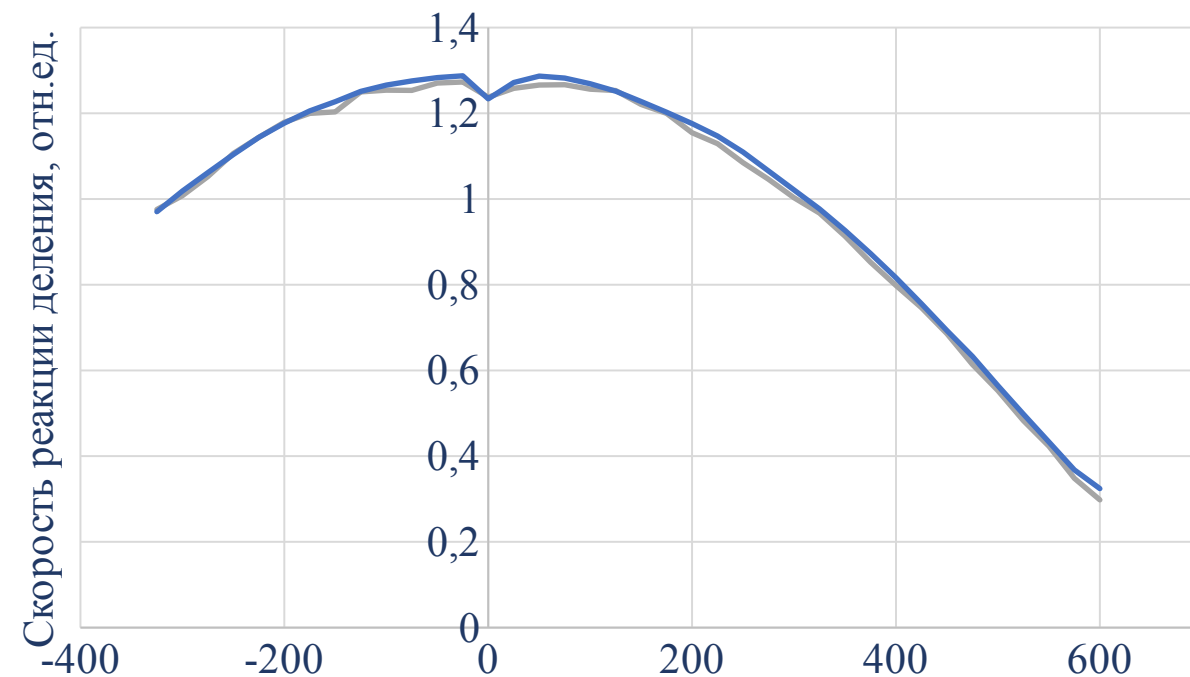
# Скорости реакции (U-235)



Положение по высоте, мм

— Serpent — Эксперимент — MCNP

**БФС-93-1**



Положение по высоте, мм

— Serpent — MCNP

**БФС-93-2**



## Спектральные индексы

### БФС-93-1

	F239/F235	F238/F235	C197/F235
Serpent	1.898	0.00135	0.758
МСНР	1.923	0.00151	0.762
Эксперимент	1.930±0.035	0.00170 ± 0.00005	0.718 ± 0.027

### БФС-93-2

	F239/F235	F238/F235	C197/F235
Serpent	1.862	0.00150	0.739
МСНР	1.935	0.00245	1.07985
Эксперимент	1.960±0.035	0.00302±0.00009	0.792±0.028



# Заключение

В программных комплексах MCNP и Serpent построены полномасштабные расчетные модели, содержащие минимальное количество упрощений. Использование данных моделей позволило точно воспроизвести ход проведения эксперимента и получить следующие функционалы: расчеты на критичность, аксиальное и радиальное распределения энерговыделения, спектральные индексы и аксиальное распределение скоростей реакций деления в измерительном канале. Проведенный расчетный анализ рассмотренных конфигураций показывает хорошее согласие полученных результатов с экспериментальными данными. Значения эффективного коэффициента размножения, рассчитанные по разным кодам, имеют расхождения не более 0,4%, что связано с использованием различных библиотек оцененных ядерных данных. В расчетах энерговыделения отклонение результатов расчетов от эксперимента редко превышает 3%, а для некоторых точек отклонения составляют порядка 14%, что связано с наличием в местах измерений дистанционирующих решеток. По этой же причине возникают расхождения в распределениях скоростей делений и составляют не более 6%. Спектральные индексы для обеих конфигураций согласуются с экспериментом в пределах погрешности, за исключением отношения C197/F235.

Расчетный анализ данных экспериментов расширяет верификационный базис, а полученные результаты могут быть использованы для верификации программных средств, аттестация которых планируется применительно к расчетам реактора ВВЭР-С.



## Литературные ссылки

- 1 *Кочетков А. Л. Матвеевко, И. П., Рожихин, Е. В., Цибуля А. М. Эксперименты в поддержку размещения МОХ-топлива в реакторы ВВЭР //Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2007. – №. 3-1. – С. 99-108.*
- 2 *Kochetkov A., Doulin V., Semenov M., Rozhikhin Ye., Pavlova O. BFS-57 and BFS-59 Assemblies: Experimental Program on Critical Assemblies with Heterogeneous Compositions of Enriched- Uranium Dioxide or Plutonium, Depleted Uranium Dioxide and Polyethylene. NEA/NSC/DOC (2006)1*
- 3 *Внуков Р.А., Котов Я.А., Невиница В.А., Колесов В.В., Бландинский В.Ю., Лапин А.С., Кузенкова Д.С., Фомиченко П.А., Михайлов Г.М., Коробейникова Л.В., Бурьевский И.В., Стогов В.Ю., Шагинян Р.А., Елисеев В.А., Гулевич А.В. Оценка возможности получения экспериментальных данных для зон ВВЭР-СКД на стенде БФС. — ВАНТ. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2023, вып. 1, с. 117—129.*

**Благодарю за внимание!**