



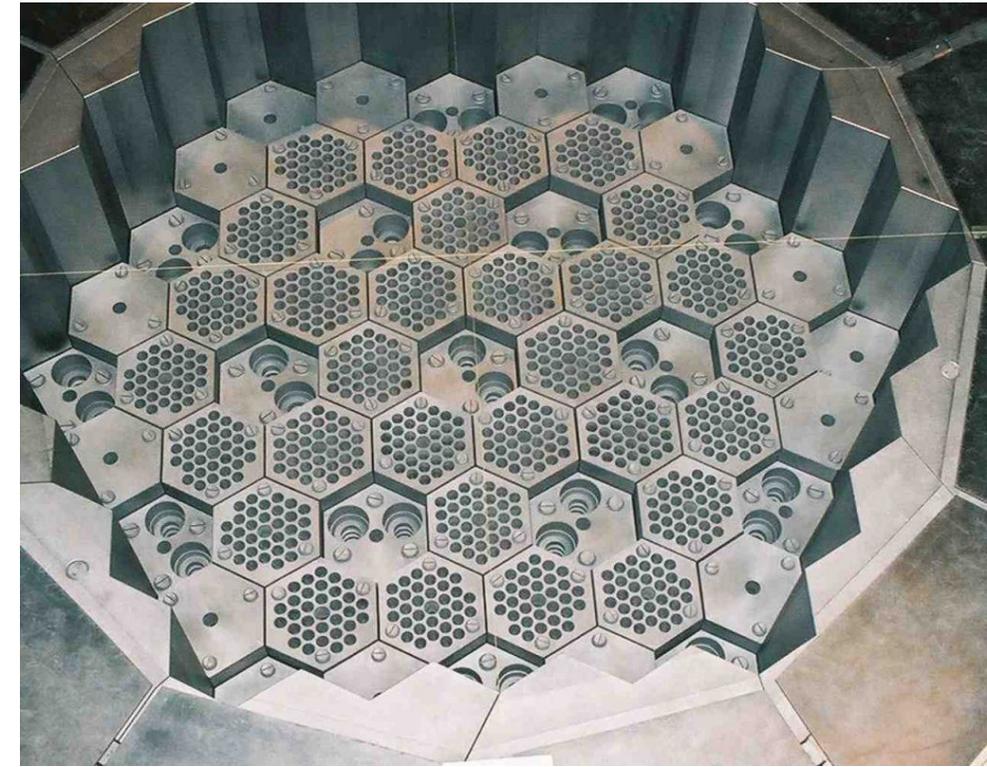
Верификация программы JAR-HTGR на расчетах экспериментального бенчмарка исследовательского реактора HTTR

В. Ф. Бояринов, А.В. Гроль, Я. А. Котов, В. А. Невиница, П. А. Фомиченко
НИЦ «Курчатовский Институт», Москва

Высокотемпературные газовые реакторы

- В настоящее время ведутся работы по созданию АЭТС с ХТЧ для производства водорода
- В качестве источника высокотемпературного тепла предполагается использование высокотемпературного реактора ВТГР-В
- JAR-HTGR является одним из проектных кодов, вследствие этого он должен быть аттестован и предварительно, верифицирован.
- Одной из задач в матрице верификации является реактор HTTR и его модель на стенде VHTRC.

Фото активной зоны HTTR



Матрица верификации программы JAR-HTGR

Фрагмент матрицы верификации JAR-HTGR

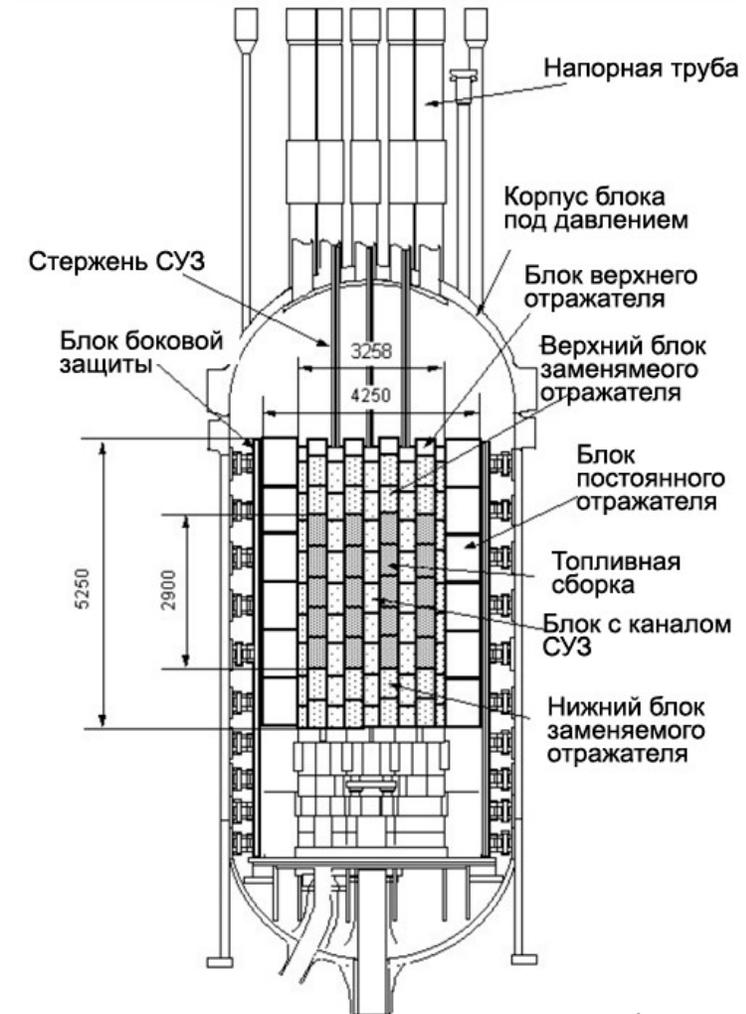
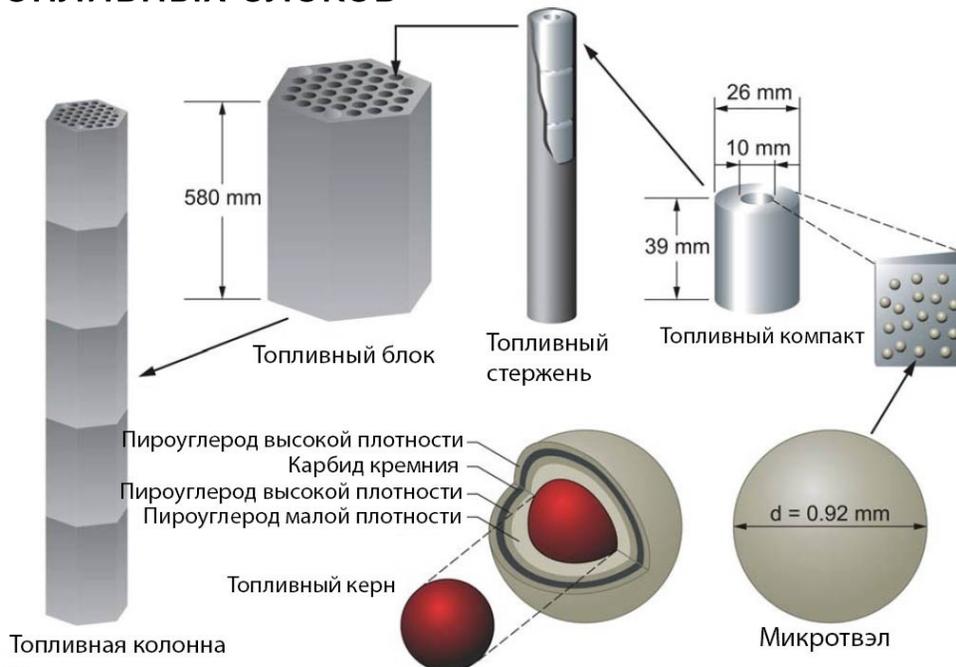
№	Сборка или реактор	Краткая характеристика сборки (реактора)		Параметры			
		моделируемая система	наличие МОКС топлива	Критич-ность	Эффектив-ность органов СУЗ	Распре-делениеэнерго-выделе-ния	ТКР
1	ГТ-МГР	Математическая модель ВТГР с призматическими ТВС и компактами					
2	HTTR	ВТГР с призматическими ТВС и компактами					
3	VHTRC	Критическая сборка с призматическими ТВС и компактами					
4	АСТРА	Критическая сборка , шаровая засыпка, НПС в ВО					
5	АСТРА	Критсборка , шаровая засыпка, ППЭ в ВО					
6	АСТРА	Критическая сборка , шаровая засыпка, ППЭ в БО					



Реактор HTTR

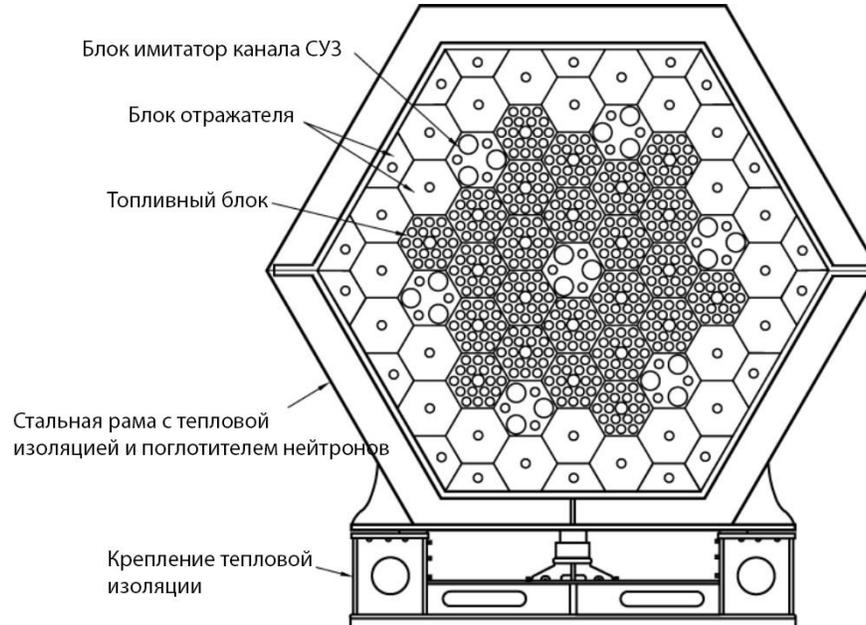
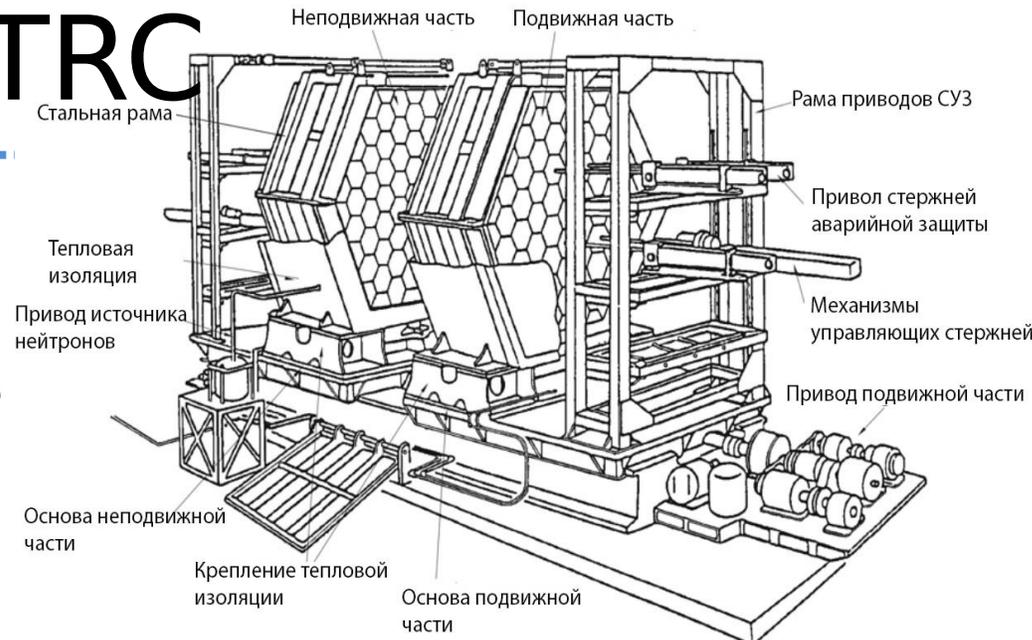
Характеристика	Значение
Мощность тепловая, МВт	30,0
Теплоноситель	гелий
Температура гелия на входе/выходе, °С	395,0/950,0
Давление гелия, МПа	~ 4,00
Конструкционный материал активной зоны	графит
Размеры активной зоны (диаметр/высота), м	2,3/2,9
Топливо	UO ₂
Обогащение, %	от 3,4 до 9,9
Материал матрицы	Графит

- HTTR (high-temperature engineering test reactor) - высокотемпературный газоохлаждаемый реактор, сооруженный в Японии (JAEA, ранее JAERI)
- Первая критичность была достигнута в 1998 году
- Микротвэльное топливо UO₂, размещенное в графитовой матрице цилиндрических компактов
- Компакты объединены в стержни, которые размещаются в каналах графитовых призм – топливных блоков



Сборка VHTRC

- **VHTRC (Very High Temperature Reactor Critical Assembly)**^[1] - критическая сборка высокотемпературного газового реактора
- Сооружен на территории **JAEA** для постановки критических экспериментов в поддержку ВТГР
- Состоит из двух частей, одна из которых подвижна
- Первая критичность достигнута в 1985
- Имеет аналогичную HTTR структуру топлива на основе микротвэлов



Параметр	Значение
Высота АЗ, см	240
Размер блока Н, см	30.01
Количество топливных блоков	24
Количество блоков имитаторов СУЗ	7
Количество блоков отражателя	24
Количество усеченных блоков отражателя	18
Длина блока L, см	120
Диаметр компакта внутр. d, см	1.795
Диаметр компакта внешн. D, см	3.585
Высота компакта L, см	3.598
Топливо	UO ₂
Обогащение топлива, %	2/4
Высота топливного стержня, см	73.2
Высота стержня торцевого отражателя, см	44.4
Диаметр топливного ядра микротвэла, мкм	602
Толщина первого защитного слоя, мкм	79
Толщина второго защитного слоя, мкм	79
Материал защитных слоев	углерод
Количество микротвэлов в компакте	20000/20400

Бенчмарк HTTR

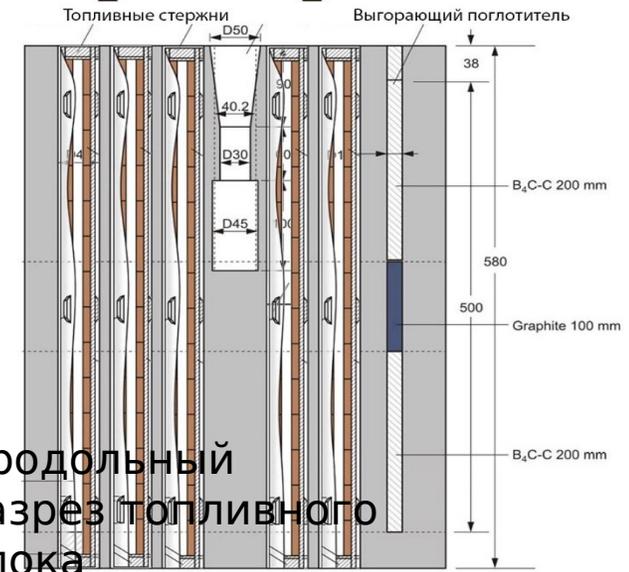
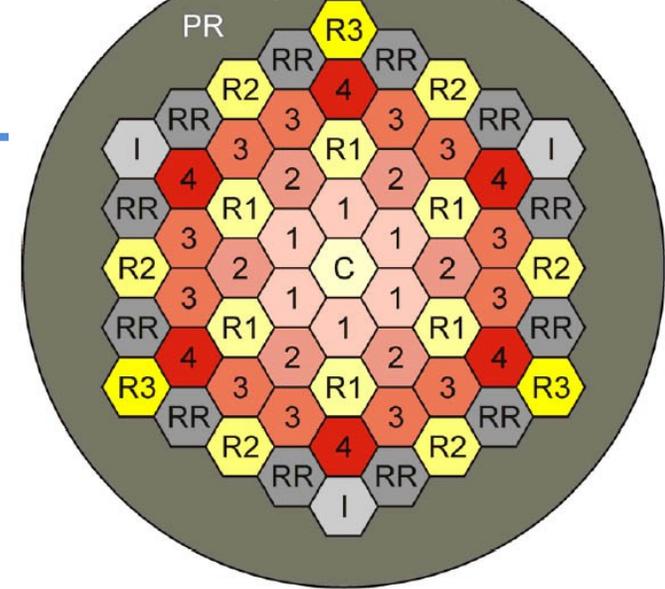
На основе пусковых экспериментов на реакторе HTTR в NEA OECD был создан бенчмарк^[1,2], в котором описаны измерения для следующих характеристик:

- Последовательная загрузка с выходом на критичность
 - K_{eff}
- Серия критических конфигураций с введенными СУЗ
 - K_{eff}
 - Эффективность СУЗ
- Погружение СУЗ из критического состояния
 - Эффективность СУЗ
- Эффекты реактивности
 - Температурный эффект реактивности (Доплер)
- Распределение скоростей реакций

[1] John D. Bess, Nozomu Fujimoto "Evaluation of the Start-up Core Physics Tests at Japan's High Temperature Engineering Test Reactor" NEA/NSC/DOC(2006)1, 2006.

[2] IAEA-TECDOC-1382, Evaluation of High Temperature Gas Cooled Reactor Performance: Benchmark analysis related to initial testing of the HTTR and HTR-10. November 2003.

Картограмма зоны



Продольный разрез топливного блока



Расчетная модель (1/2)

- Программа JAR-HTGR предусматривает моделирование на основе диффузионного приближения в гомогенном представлении
- Для расчета формируются групповые константы с помощью WIMS

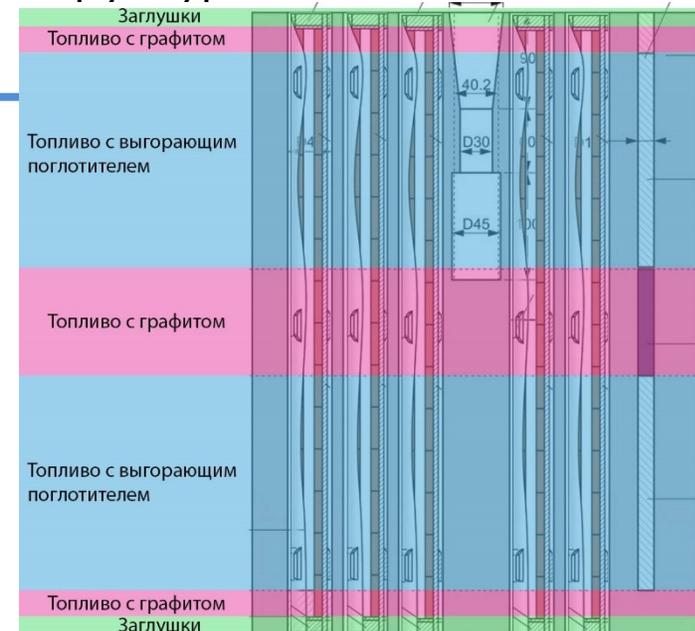
Поскольку блоки HTTR имеют размер под ключ 36см, для их моделирования необходимо:

- Применение крупносеточных нодальных методик[1] с восстановлением локальных полей
- Дробление расчетной сетки на более мелкие узлы

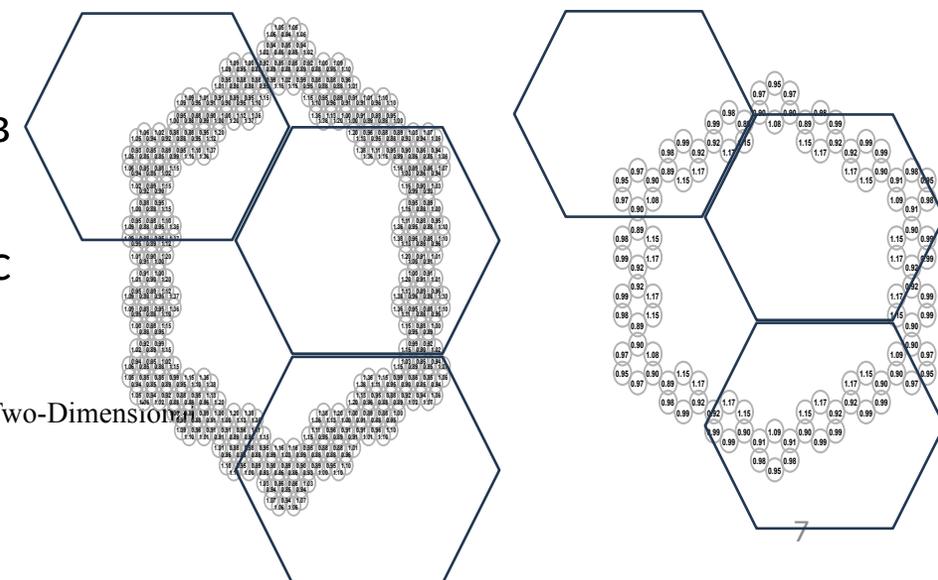
При моделировании нужно учитывать следующие факторы:

- Поля подобной системы могут иметь высокую неоднородность в плоскости, особенно в ходе начальной загрузки
- Топливный блок имеет сложную аксиальную структуру с сосредоточением выгорающего поглотителя

Соответствие зон аксиальной структуре топливного блока



Коэффициенты неравномерности



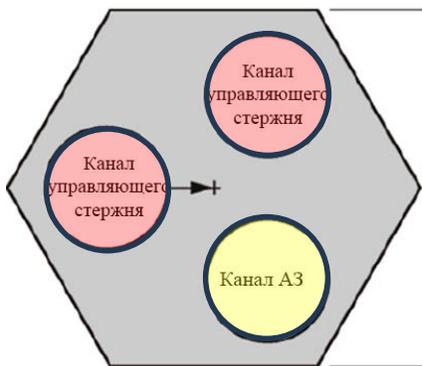
[1] TAKEDA, T., KOMANO, Y. (1978). Extension of Askew's Coarse Mesh Method to Few-Group Problems for Calculating Two-Dimensional Power Distribution in Fast Breeder Reactors. Journal of Nuclear Science and Technology, 15(7), 523–532. <https://doi.org/10.1080/18811248.1978.9735544>



Расчетная модель (2/2)

- Особенно неравномерность и локализация касается органов СУЗ, которые представляют собой графитовую призму с тремя каналами, из которых в номинальном режиме задействованы только 2
- Разработана мелкосеточная модель, которая учитывает внутреннее строение блоков НТТР и с помощью программы процедурной генерации[1] сформирована активная зона
- Каждая из физических зон имеет свой набор групповых констант, подготовленных с учетом окружения

Колонна СУЗ



Модель СУЗ

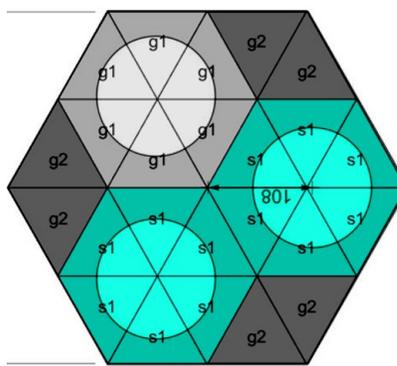
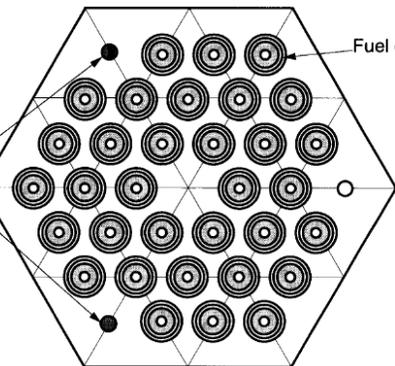
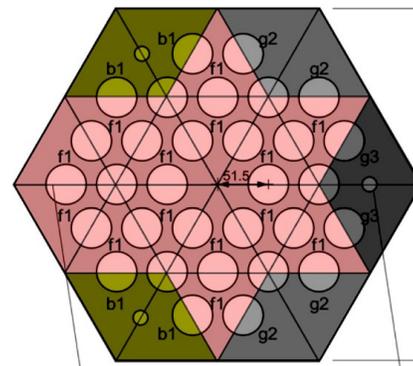


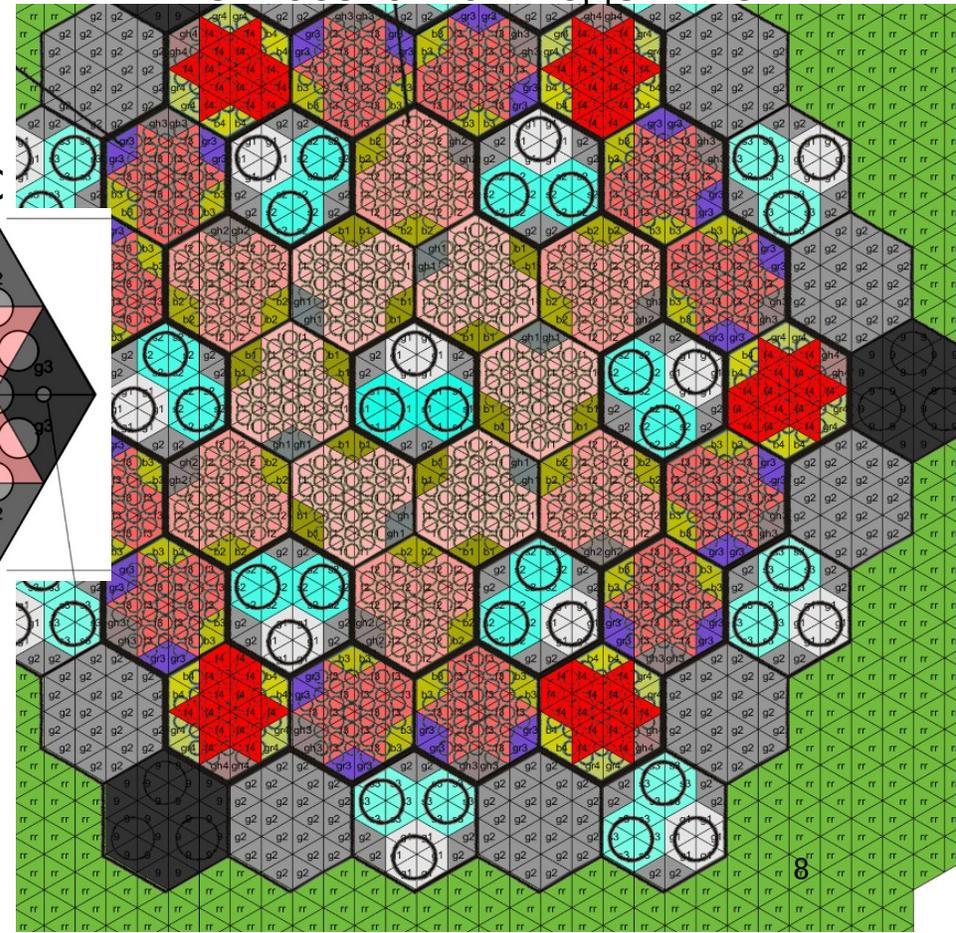
Схема ТВС



Модель ТВС



Мелкосеточная модель АЗ

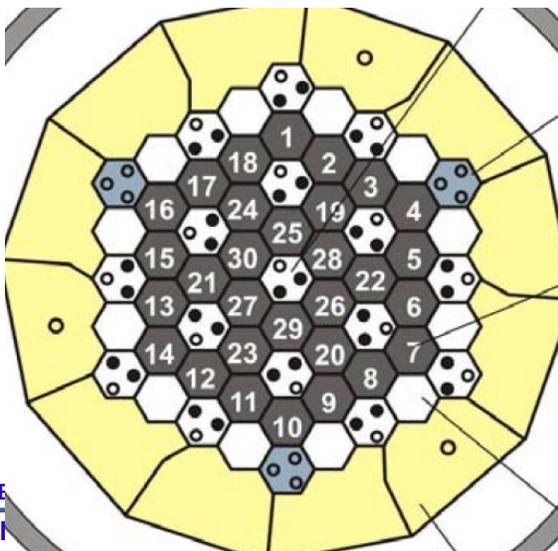


[1] "ПРОГРАММА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МЕЛКОСЕТОЧНЫХ КАРТОГРАММ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ «JARFINEMESH». Фомиченко П.А., Котов Я.А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021662675, 03.08.2021

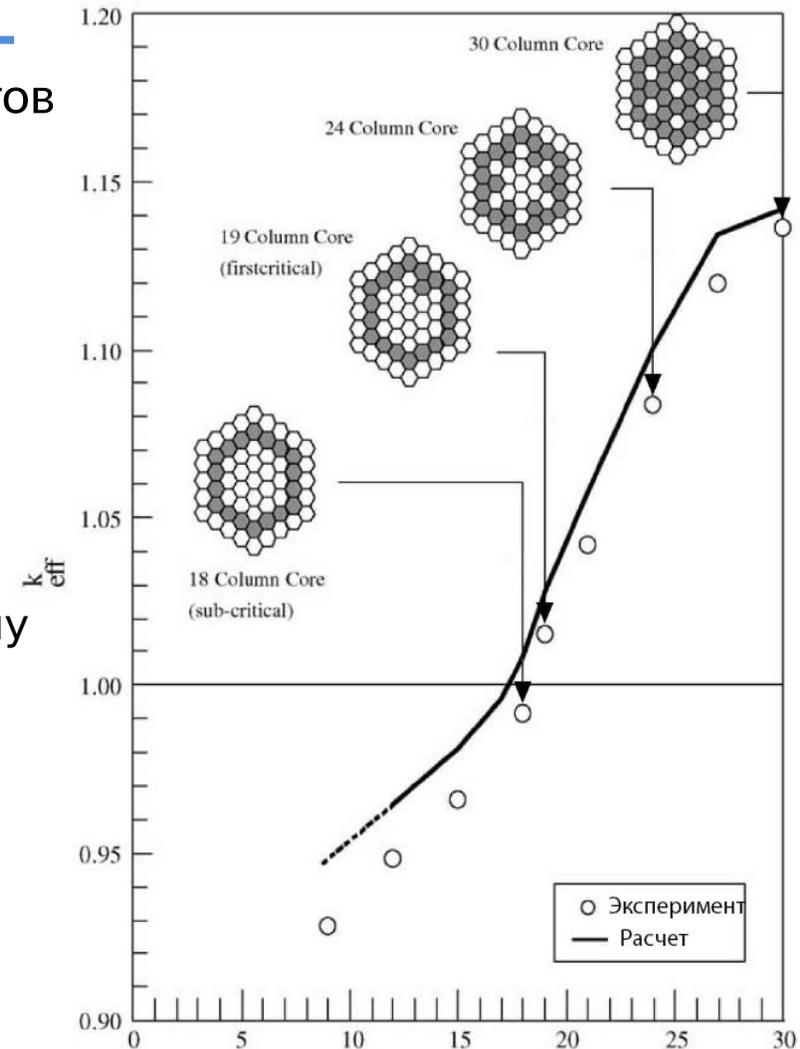
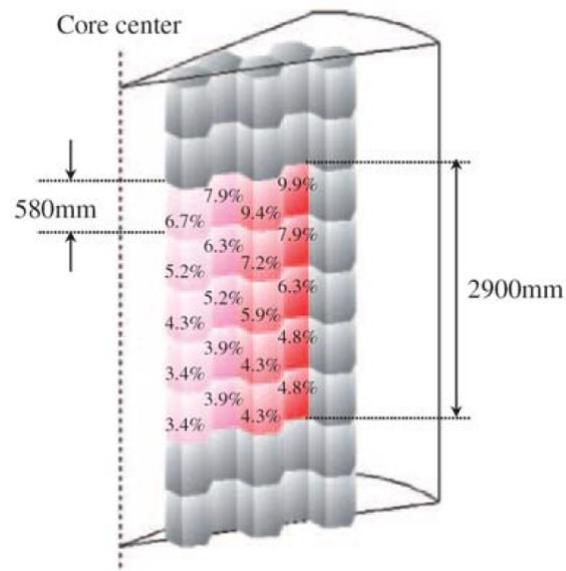
Достижение критичности и загрузка

- Вход в критику осуществлялся путем постепенной замены блоков-макетов топливными блоками
- Загрузка велась от периферии к центру
- Критичность была достигнута при 19 топливных колоннах
- Задokumentированы значения для 18, 19, 24, 27 и 30 (полная загрузка)
- Запас реактивности был оценен из замеренной изначальной кривой эффективности СУЗ

Порядок загрузки



Расстановка блоков по типу



Расчеты K_{eff} и ρ при загрузке реактора

Результаты расчета K_{eff} для последовательной загрузки топлива при компенсации запаса реактивности органами СУЗ

№	Описание	K_{eff} JAR-HTGR	K_{eff} эксперимент $\pm 1\sigma$	$\Delta K/K$, %
1	19 колонн	1,0080	1,0048 \pm 0,0103	0,32
2	21 колонна	1,0059	1,004 \pm 0,0100	0,19
3	24 колонны-1	1,0038	1,0035 \pm 0,0078	0,03
4	24 колонны-2	0,9972	1,0032 \pm 0,0080	-0,60
5	27 колонн	1,0061	1,0029 \pm 0,0068	0,32
6	30 колонн	1,0074	1,0025 \pm 0,006	0,49

Результаты расчета суммарно введённой реактивности при добавлении топливных колонн

№	Описание	Расчет, % $\Delta K/K$	Эксперимент, % $\Delta K/K$	% $\Delta K/K$
1	19 колонн	1,36	2,4 \pm 0,24	1,04
2	21 колонна	4,26	4,0 \pm 1,1	-0,26
3	24 колонны	8,26	7,7 \pm 2,1	-0,56
5	27 колонн	11,14	10,7 \pm 3,0	-0,44
6	30 колонн	11,89	12,0 \pm 3,0	0,11

Отклонения в K_{eff} (% $\Delta K/K$) для критических конфигурации в простых моделях

№	Описание	1 узел	1 узел + НМ	6 узлов	24 узла
1	19 колонн	-5.1	-2.5	1.3	1.2
2	21 колонна	-4.3	-1.2	1.8	1.7
3	24 колонны-1	-3.4	-1.9	1.6	1.1
4	24 колонны-2	-3.9	-2.0	1.2	1.1
5	27 колонн	-4.9	-1.8	1.2	0.7
6	30 колонн	-4.8	-2.3	1.3	1.1

Эффективность СУЗ

- Из пусковых экспериментов доступно 3 измерения:
 - 2 попарных сброса стержней из верхних положений
 - Сброс всех стержней
- Для случая 2-3 расчет совпадает с измерением в пределах его погрешности
- Для случая 1 наблюдается отклонение в 26%, однако аналогичный результат был получен авторами бенчмарка и в MCU-HTR

Позиции стержней

Серия	Состояние	C	R1	R2	R3
1	Критичность	1775	1775	1775	Вне зоны
	Сброс	1775	1775	-55	-55
2	Критичность	1775	1775	1775	Вне зоны
	Сброс	-55	-55	1775	Вне зоны
3	Критичность	1775	1775	1775	Вне зоны
	Сброс	-55	-55	-55	-55

Результаты расчетов и сравнение

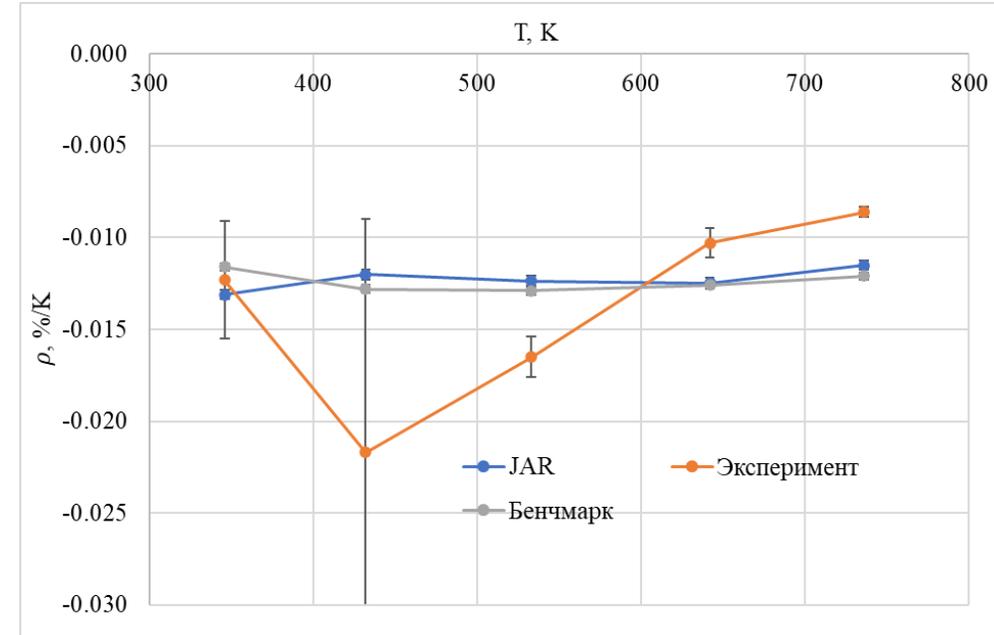
Серия	Keff начало	Keff сброс	расчет, рсм	эксперимент, рсм	, %
1	1,0074	0,9240	8963	12100 ±600	-25,9
2	1,0074	0,7431	35316	34200 ±1700	3,2
3	1,0074	0,6720	49541	46300 ±1200	7,0

Температурные коэффициенты реактивности

T	T1/T2	Расчет, (%/K)	Измерение, (%/K)	JAR-HTGR/измерения, %	JAR-HTGR/бенчмарк, %
346	300/400	-0,0131	-0,0123 ± 0,0032	6,5	12,9
407	380/480	-0,0120	-0,0132 ± 0,0033	8,97	-6,1
421	380/480	-0,0120	-0,0217 ± 0,0127	-44,6	-6,1
533	480/580	-0,0124	-0,0165 ± 0,0011	-25,1	-4,2
642	580/680	-0,0125	-0,0103 ± 0,0008	21,1	-1,0
736	680/780	-0,0115	-0,0086 ± 0,0003	33,8	-4,9

Для расчета температурного коэффициента реактивности предлагается следующая формула:

$$\left(\frac{\Delta k}{k}\right)_{T=421K} = -\frac{1}{2} \left[\frac{\left(k_{\substack{T=380K \\ CR=1970mm}}\right) - \left(k_{\substack{T=380K \\ CR=1859mm}}\right)}{k_{\substack{T=380K \\ CR=1970mm}} \times k_{\substack{T=380K \\ CR=1859mm}}} + \frac{\left(k_{\substack{T=480K \\ CR=1859mm}}\right) - \left(k_{\substack{T=480K \\ CR=1970mm}}\right)}{k_{\substack{T=480K \\ CR=1859mm}} \times k_{\substack{T=480K \\ CR=1970mm}}} \right]$$



Анализ расхождения расчета ТКР и измерений

- Во всех точках сохраняется хорошее совпадение с расчетами авторов бенчмарка и с расчетами по другим прецизионным кодам

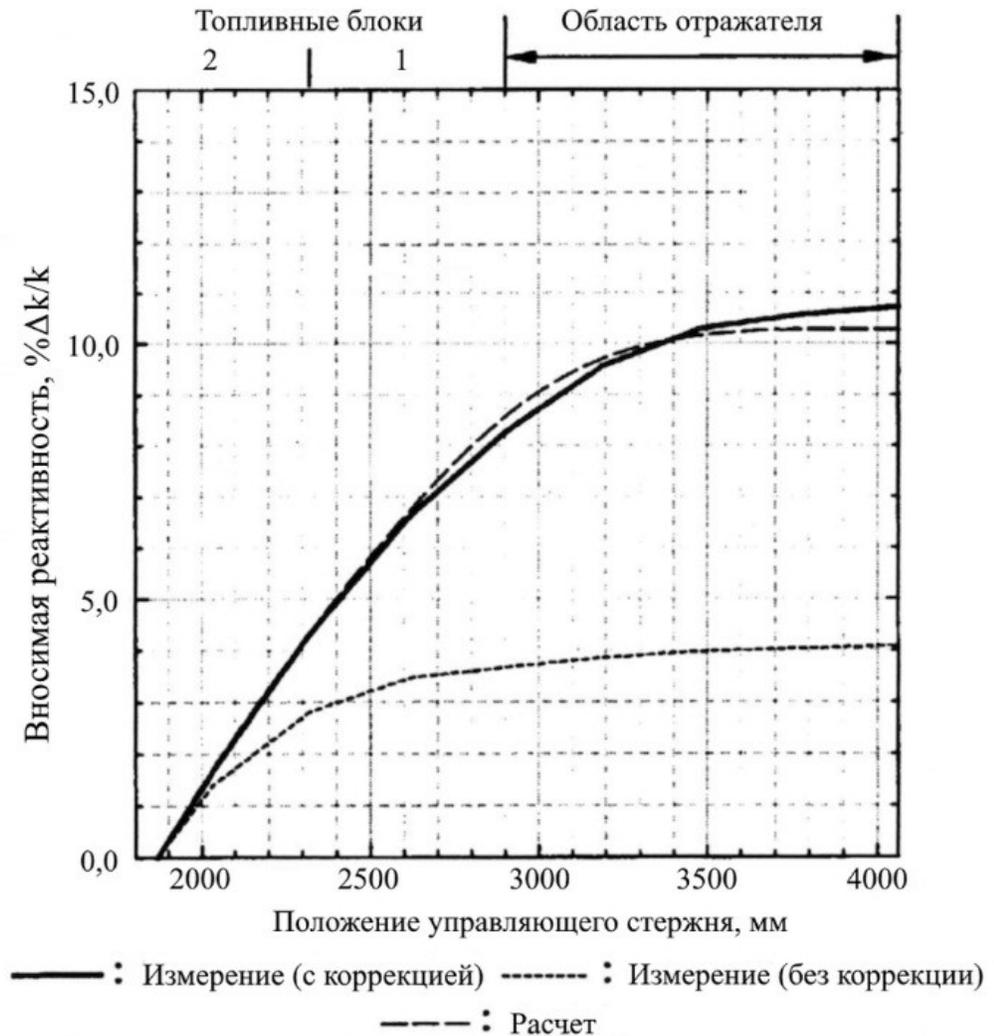
- Результаты расчета имеют постоянные значения

Как оказалось, в отличие от других пусковых экспериментов, на этапе пуска реактора были выполнены только два первых измерения ТКР. Остальные измерения были выполнены позже, когда выгорание топлива достигло 5 МВт сут/кг. Отличием изотопного состава от свежего топлива авторы бенчмарка пренебрегли.

- В большинстве серий измерений ТКР не были задокументированы положения органов СУЗ.

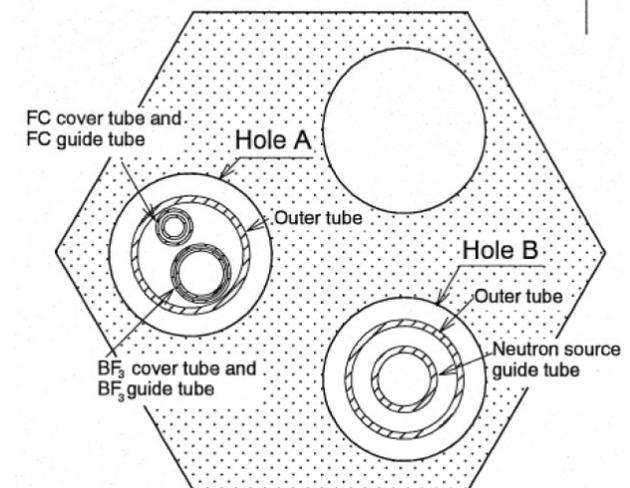
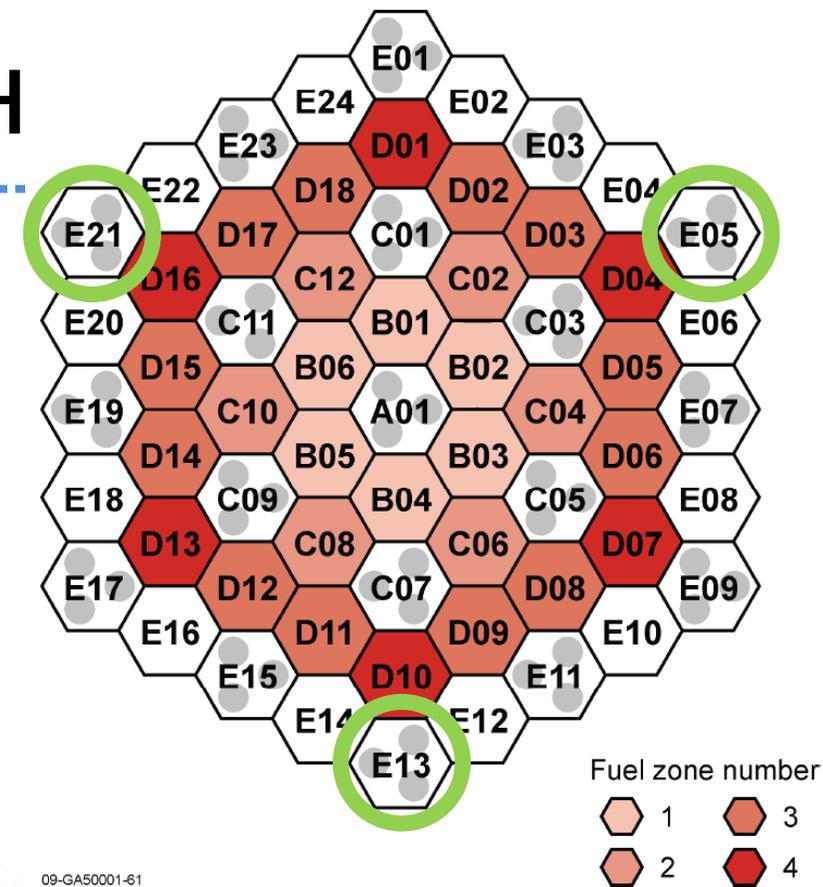
В описании приводятся положения органов СУЗ для трех критических состояний реактора для трех температур в диапазоне от 295K до 418K, однако эти температуры не совпадают с теми температурами, при которых проводились измерения эффектов реактивности. Недостающая информация восстанавливалась по другим экспериментам, градуировочным кривым, расчетным путем и экстраполяцией. Качество

такого сорта восстановления иллюстрирует рисунок.

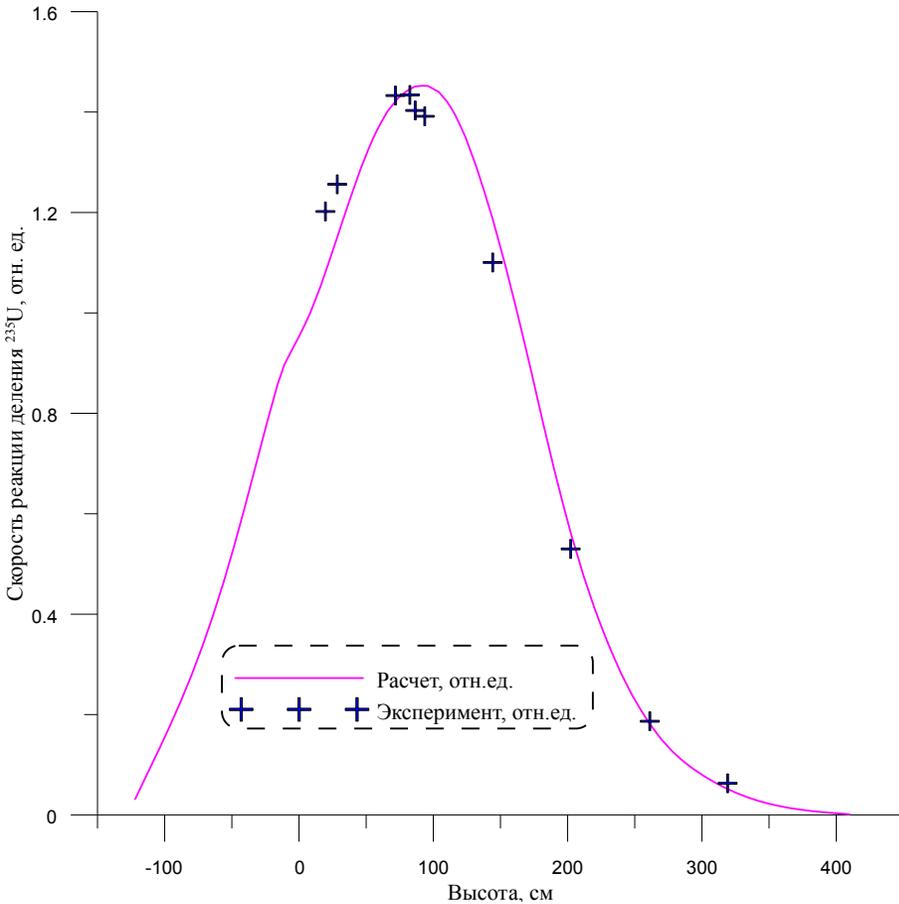


Аксиальные распределен

- В ходе экспериментов было проведено 3 серии измерений скоростей деления ^{235}U
- Использована малогабаритная камера делений, которая перемещалась внутри инструментальных каналов
- Поскольку JAR-HTGR – сеточная программа и рассчитывает значения величин в отдельных узлах а не в точках измерений, для получения значений в точках измерений использовалась следующая методика:
 - Сбор групповых потоков в каждом расчетном узле по высоте для соответствующей ячейки
 - Скалярное произведение групповых потоков и заранее подготовленных групповых микросечений
 - Сплайновая интерполяция величин для получения значений в нужных точках

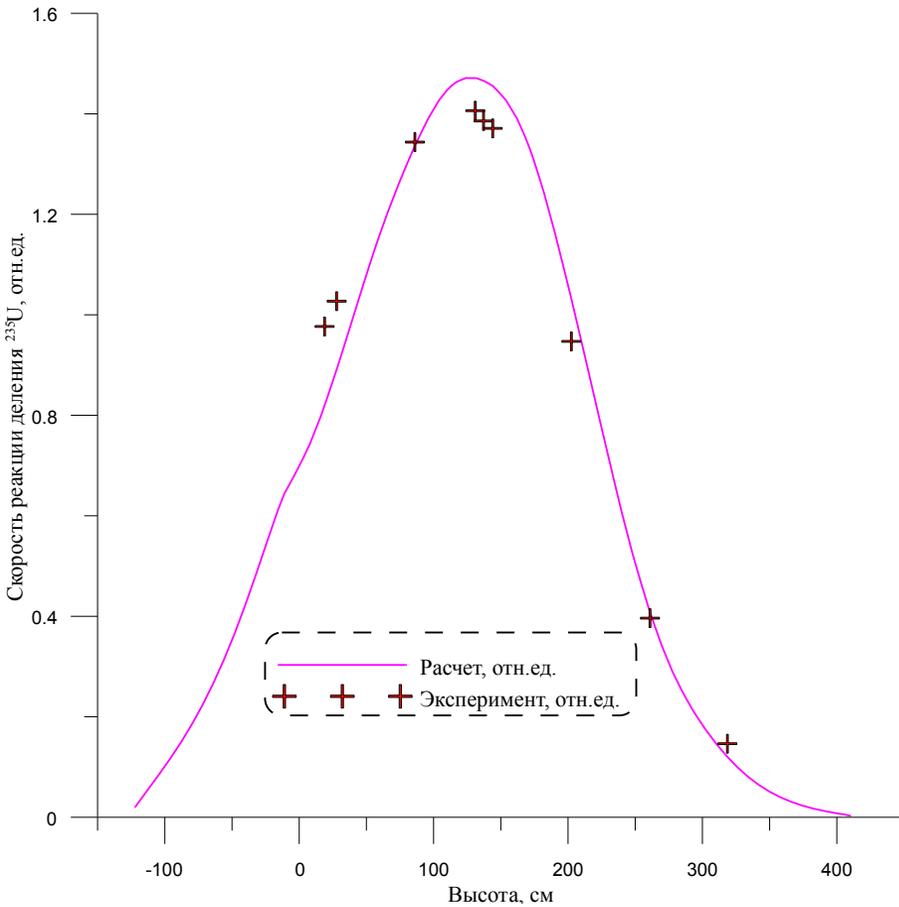


Расчет аксиального распределения для конфигурации 6 (30 ТК)



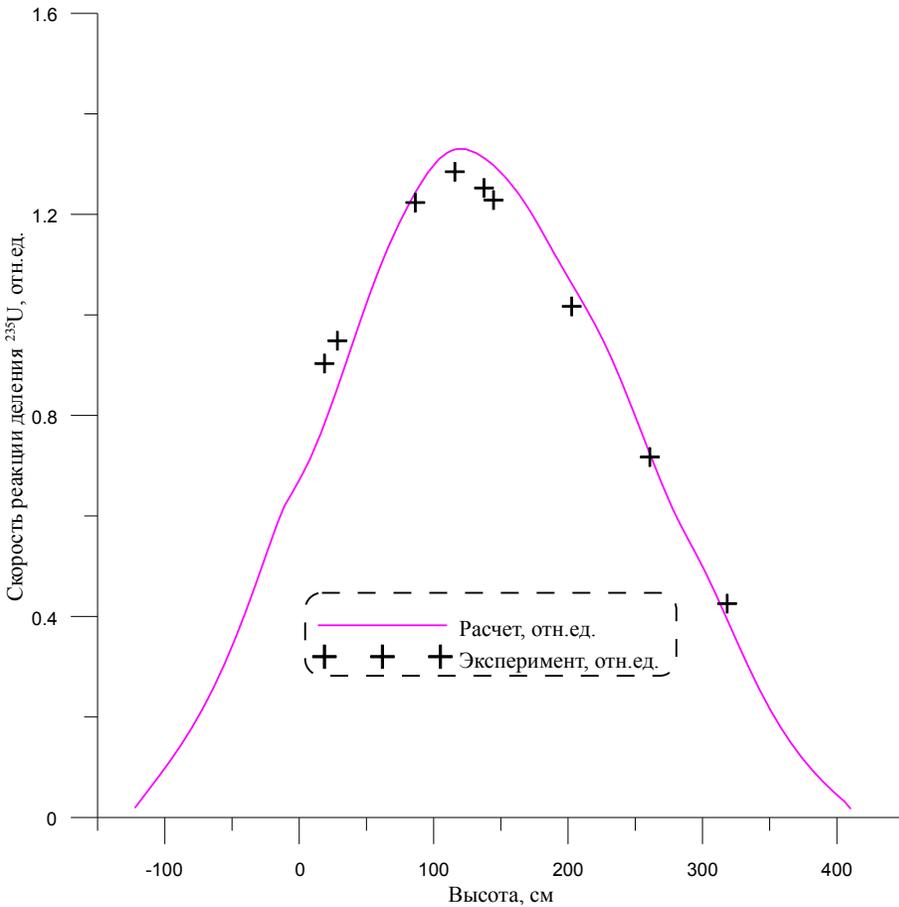
Н, см	Измерение	Δ измерения, % (1σ)	JAR-HTGR	(P-Э)/Э, %
19,68	1,202	1,5	1,085	-9,77
28,47	1,256	1,4	1,149	-8,54
71,81	1,433	1,3	1,424	-0,62
82,53	1,434	1,2	1,452	1,22
86,52	1,403	2,5	1,455	3,69
93,61	1,392	3,2	1,456	4,62
144,22	1,100	3,6	1,185	7,68
202,28	0,530	4,3	0,563	6,20
261,19	0,187	7,2	0,181	-2,82
319,13	0,063	13,0	0,051	-19,17

Расчет аксиального распределения для конфигурации 3 (24 ТК)



Н, см	Измерение	Δ измерения, % (1σ)	JAR-HTGR	(P-Э)/Э, %
18,89	0,977	2,9	0,820	-16,09
27,86	1,027	2,7	0,891	-13,25
86,07	1,344	1,8	1,336	-0,53
130,96	1,406	1,7	1,472	4,65
137,15	1,386	1,7	1,466	5,78
143,96	1,371	1,7	1,456	6,16
202,48	0,947	3,0	1,032	8,95
260,99	0,396	5,9	0,408	3,01
318,58	0,146	9,1	0,120	-17,92

Расчет аксиального распределения для конфигурации 4 (24 ТК)

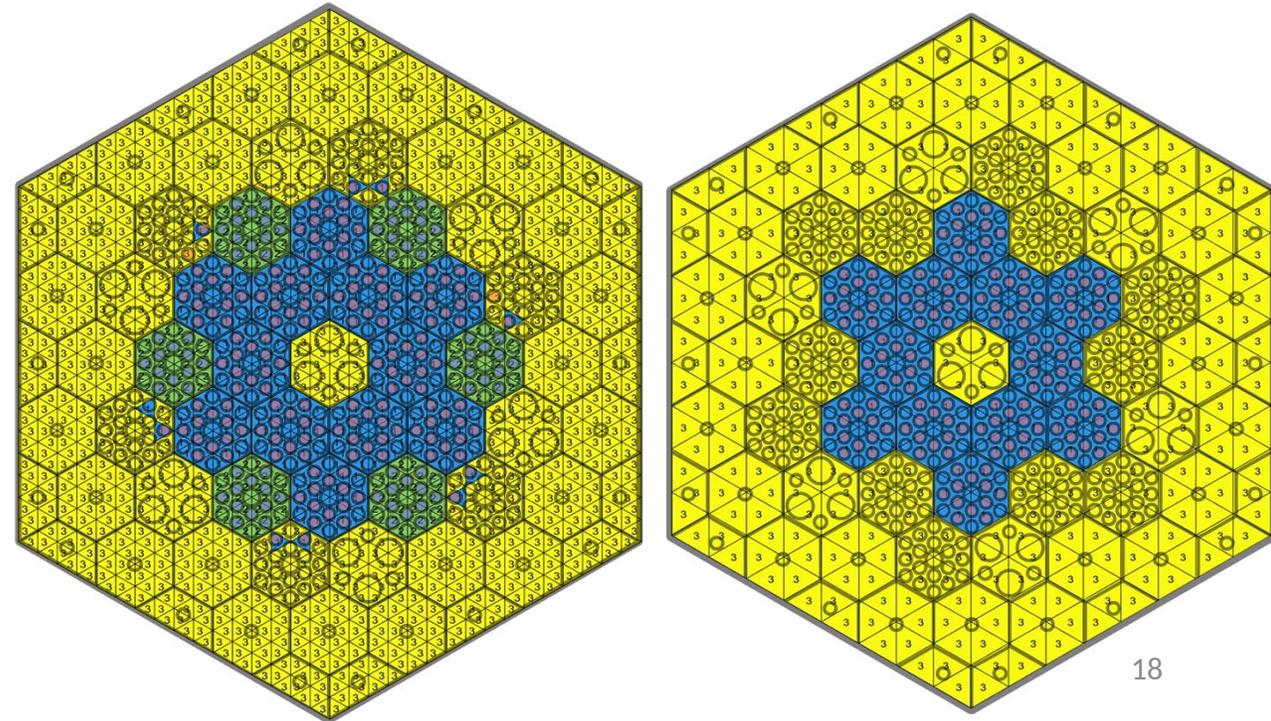


Н, см	Измерение	Δ измерения, % (1σ)	JAR-HTGR	(P-Э)/Э, %
18,79	0,903	2,8	0,783	-13,27
28,40	0,948	2,7	0,854	-9,92
86,36	1,223	1,8	1,244	1,65
115,79	1,285	1,7	1,329	3,45
137,45	1,252	1,7	1,312	4,77
144,57	1,228	1,8	1,298	5,64
202,72	1,017	2,4	1,062	4,46
260,85	0,717	3,6	0,724	0,94
318,37	0,425	5,3	0,394	-7,46

Бенчмарк VHTRC

- В VHTRC было проведено моделирование трех экспериментов: НР, НС-1 и НС-2, в которых достигалась критичность при различной загрузке топливом и разными температурами
- Также была использована мелкосеточная модель в двух вариациях
- При подготовке бенчмарка авторами модель была упрощена

Серия	Описание	Функционалы для верификации	Проведенные расчеты
НР	Сформирована критичная загрузка и затем проведен последовательный нагрев сборки. Проведено 5 измерений K_{eff} при разных температурах (от 25 до 200 °С)	K_{eff} , температурный коэффициент реактивности	K_{eff} для каждой температуры, температурный коэффициент реактивности
НС-1	Сформирована критичная загрузка при пониженной температуре (8 °С)	K_{eff} , температурный коэффициент реактивности	K_{eff}
НС-2	Сформирована критичная загрузка при разогретой сборке (200 °С)	K_{eff} , температурный коэффициент реактивности	K_{eff}



Расчеты VHTRC

Зона	T, C	K_{eff} расчетный	K_{eff} эксперимент	$\Delta K/K$, %
НР	25	1.018374	1.01172	0.65
НС-1	8	1.021716	1.01218	0.92
НС-2	200	0.99296	1.00895	-1.60

T, C	Эксперимент	K_{eff} расчетный	$\Delta K/K$ (эксперимент), %
25	1.018374	1.01172	0.65
71	1.01056	1.0048	0.57
101	1.00559	0.99953	0.60
150	0.997205	0.99074	0.65
200	0.988847	0.98216	0.69

T1, C	T2, C	ΔT	расчет	эксперимент	(Р-Э)Э, %
25.5	100.9	75.4	-1.656	-1.597±0.055	-3.7
25.5	150.5	125	-1.668	-1.673±0.041	0.3
25.5	199.6	174.1	-1.684	-1.708±0.038	1.4
71.2	100.9	29.7	-1.647	-1.764±0.155	6.6
71.2	150.5	79.3	-1.671	-1.78±0.069	6.1
71.2	199.6	128.4	-1.692	-1.786±0.053	5.2
100.9	150.5	49.6	-1.686	-1.789±0.12	5.8
100.9	199.6	98.7	-1.706	-1.793±0.073	4.9
150.5	199.6	49.1	-1.726	-1.796±0.158	3.9

- При расчетах K_{eff} были получены отклонения в пределах 1.6%
- Расчет экспериментов по последовательному нагреву дает отклонения по K в пределах 0.7%
- Отклонение рассчитанного ТКР находится в пределах 7%

Заключение

- Для верификации проектного кода JAR-HTGR были проведены расчеты серии экспериментов на реакторе HTTR а также его модели на стенде VHTRC
- Получены следующие отклонения:
 - Запас реактивности: не более 1% $\Delta K/K$ (в большинстве точек не превышает 0,6% $\Delta K/K$)
 - Эффективность СУЗ отличается от измерений на 7%, эффективность центральных стержней совпадает в пределах 3%, максимальное отклонение для стержней в отражателе составляет 25%
 - Расчет аксиальных распределений скоростей реакций показывает согласие с измерениями в пределах 10% для активной зоны и 19% для периферийных областей.
- При моделировании ТКР для большинства точек были получены высокие отклонения, при этом, аналогичные расхождения получены авторами бенчмарков и при расчете прецизионными программами
- Проанализировано описание бенчмарка и выявлены возможные причины отклонений.
- Для расширения верификационной базы добавлены эксперименты на VHTRC, в которых отклонения при расчете ТКР не превышают 7%
- Применение детальной мелкосеточной модель, позволило повысить точность расчета по сравнению с традиционными методами описания