



НИКИЭТ  
РОСАТОМ

# Расчетное моделирование облучательных экспериментов МОКС и СНУП топлива по программному комплексу MCSU-NR

«Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики», г. Обнинск

Докладчик: **Ромадинов Александр Михайлович**

Техник

Авторы: Ромадинов А.М., Федоров И.А., Юферева В.А.

**28.05.2024 – 31.05.2024**

# Цели и задачи



Основной целью настоящей работы является верификация программного комплекса (ПК) MCU-NR в части изотопной кинетики и выгорания ядерного топлива.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Проведено расчетное моделирование эксперимента по облучению образцов актинидов в реакторе БН-350 и эксперимента по выгоранию СНУП-топлива КЭТВС-1 и КЭТВС-7 в реакторе БН-600.
2. Созданы бенчмарк-модели экспериментов на БН-350 и БН-600 и проведена кроссверификация ПК MCU-NR по кодам FACT-BR и BPSD.
3. Разработан расчетный тест выгорания твэлов КЭТВС в РУ БРЕСТ-ОД-300.
4. Проведено расчетное исследование в обоснование возможности использования модели бесконечной решетки гетерогенных ячеек при расчете выгорания и изотопной кинетики в реакторах на быстрых нейтронах.

# Программный комплекс MSU-NR



ПК MSU-NR выполняет численное моделирование процесса переноса нейтронов методом Монте-Карло на основе оцененных нейтронных данных в системах с трехмерной геометрией.

Физический модуль позволяет учитывать эффекты непрерывного изменения энергии частицы при столкновениях, а также непрерывную зависимость сечений от энергии.

Расчет выгорания в MSU-NR выполняется по временным шагам. На каждом шаге решаются две независимые задачи:

1. Расчет методом Монте-Карло средних по зонам потоков нейтронов и сечений при заданном нуклидном составе реактора;
2. Расчет изменения нуклидного состава при заданных потоках нейтронов и сечениях реакций (выполняется с помощью модуля BURNUP).



# Эксперимент на БН-350

Образцы топлива облучались в течение двух микрокампаний (22-ой и 23-ей)

Образец №2 – MOX

Образец №3 – UO<sub>2</sub> (90%)

Образец №4 – PuO<sub>2</sub> (96%)

Образец №5 – MOX

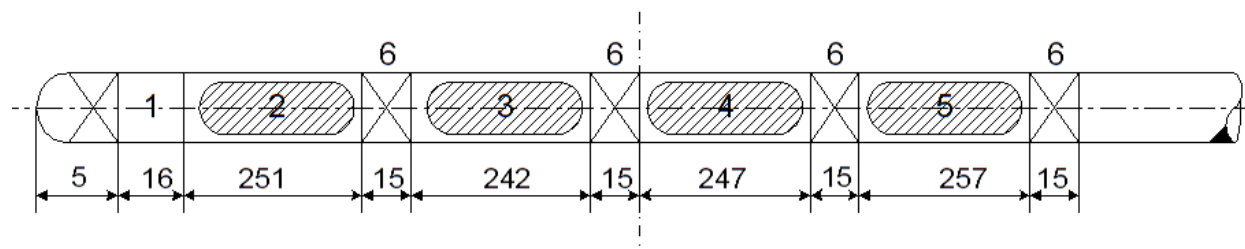


Рисунок 2 – Схема размещения образцов в БН-350, штриховкой выделены образцы

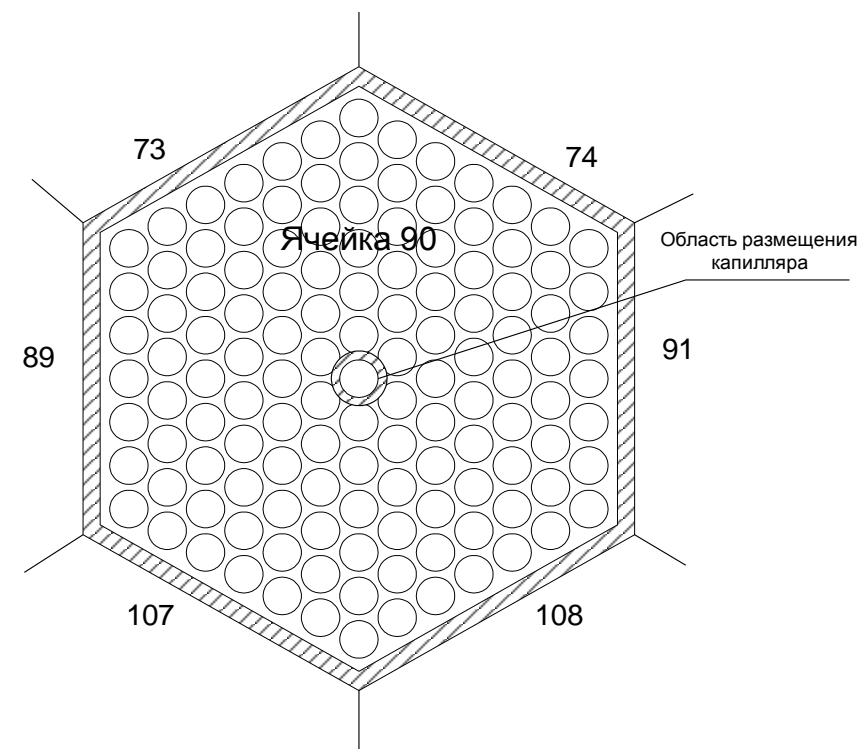


Схема размещения капилляра с образцами в ТВС БН-350

# Описание модели эксперимента на БН-350



Параметр	Значение, см
Высота модели	255,69
Размер под ключ	9,8
Диаметр капилляра	1,6
Диаметр образцов	1,0
Высота образца	25

Параметр	Значение, сут
22 МК	103,9
23 МК	103,6
Перегрузка	22

Модель представляет собой полномасштабную по высоте трехмерную ТВС, в которой устанавливалась капиллярная трубочка с образцами топлива.

Граничное условие на боковых гранях ТВС – отражение, по торцам – полное поглощение (утечка).

Для каждого образца мощность ТВС подбиралась таким образом, чтобы в расчете получить измеренную радиоактивность  $^{137}\text{Cs}$  и/или  $^{144}\text{Ce}$ .



# Относительные доли нуклидов в урановой и плутониевых фракциях

Образец №2 - МОХ1 (3,5 МВт)

Нуклид	Эксперимент, %	Расчет, %	Отклонение, %(Р-Э)/Э
$^{235}\text{U}$	0,442	0,437	-1,13
$^{238}\text{U}$	99,56	99,56	0,00
$^{238}\text{Pu}$	0,503	0,522	3,78
$^{239}\text{Pu}$	73	73,07	0,10
$^{240}\text{Pu}$	19,8	19,7	-0,51
$^{241}\text{Pu}$	3,78	3,8	0,53
$^{242}\text{Pu}$	2,61	2,6	-0,38
$^{241}\text{Am}$	0,28	0,29	3,57
$^{242}\text{Cm}$	0,0087	0,0103	18,39

Нуклид	Эксперимент, $10^9 \cdot \text{Бк}$	Расчёт, $10^9 \cdot \text{Бк}$	Отклонение, %(Р-Э)/Э
$^{137}\text{Cs}$	0,424	0,423	-0,24
$^{144}\text{Ce}$	6,77	7,51	10,93

Образец №5 - МОХ2 (3,0 МВт)

Нуклид	Эксперимент, %	Расчет, %	Отклонение, %(Р-Э)/Э
$^{235}\text{U}$	0,4504	0,4417	-1,93
$^{238}\text{U}$	99,55	99,56	0,01
$^{238}\text{Pu}$	0,504	0,525	4,17
$^{239}\text{Pu}$	73,05	73,16	0,15
$^{240}\text{Pu}$	19,69	19,60	-0,46
$^{241}\text{Pu}$	3,84	3,81	-0,78
$^{242}\text{Pu}$	2,61	2,598	-0,46
$^{241}\text{Am}$	0,30	0,29	-3,33
$^{242}\text{Cm}$	0,0079	0,0095	20,25

Нуклид	Эксперимент, $10^9 \cdot \text{Бк}$	Расчёт, $10^9 \cdot \text{Бк}$	Отклонение, %(Р-Э)/Э
$^{137}\text{Cs}$	0,409	0,410	0,24
$^{144}\text{Ce}$	7,00	7,28	4,00



# Относительные доли нуклидов в урановой и плутониевых фракциях

Образец №3 - UO<sub>2</sub> (3,1 МВт)

Нуклид	Эксперимент, %	Расчет, %	Отклонение, %(Р-Э)/Э
<sup>234</sup> U	0,996	0,997	0,05
<sup>235</sup> U	83,07	83,24	0,20
<sup>236</sup> U	4,17	4,06	-2,64
<sup>238</sup> U	11,77	11,70	-0,59

Нуклид	Эксперимент, 10 <sup>9</sup> ·Бк	Расчёт, 10 <sup>9</sup> ·Бк	Отклонение, % (Р-Э)/Э
<sup>137</sup> Cs	4,24	4,25	0,24
<sup>144</sup> Ce	110	107,0	-2,73

Образец №4 - PuO<sub>2</sub> (3,2 МВт)

Нуклид	Эксперимент, %	Расчет, %	Отклонение, %(Р-Э)/Э
<sup>238</sup> Pu	0,0136	0,0112	-17,65
<sup>239</sup> Pu	92,01	91,73	-0,31
<sup>240</sup> Pu	7,52	7,80	3,83
<sup>241</sup> Pu	0,298	0,320	7,38
<sup>242</sup> Pu	0,0209	0,0145	-30,62
<sup>241</sup> Am	0,1275	0,1154	-9,49
<sup>242m</sup> Am	0,0036	0,0030	-16,67
<sup>242</sup> Cm	0,00742	0,00657	-11,46

Нуклид	Эксперимент, 10 <sup>9</sup> ·Бк	Расчёт, 10 <sup>9</sup> ·Бк	Отклонение, % (Р-Э)/Э
<sup>137</sup> Cs	2,95	7,5	154,24
<sup>144</sup> Ce	125	125	0,00



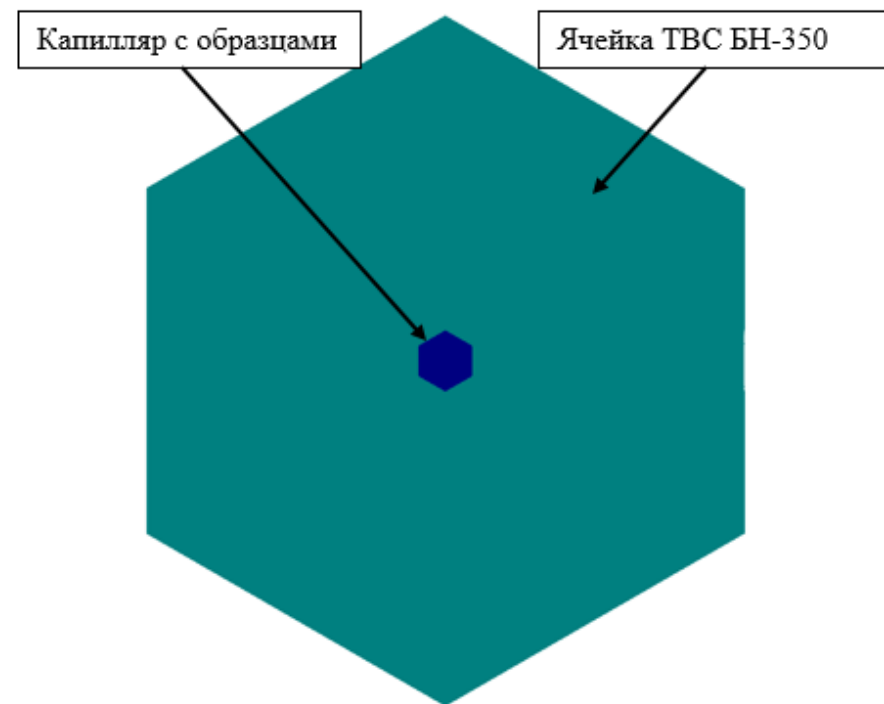
# Кроссверификация ПК MCU-NR по коду FACT-BR и программе BPSD/v2.1

Основа бенчмарка – расчетная модель FACT-BR.

Капилляр – гомогенная шестигранная призма высотой 106,8 см и размером под ключ 0,87 см.

Мощность ячейки в бенчмарке - 3,384 МВт.

Было проведено сравнение результатов расчетов MCU-NR, FACT-BR и BPSD.



Поперечное сечение бенчмарк-модели эксперимента на БН-350



# Результаты расчетов эксперимента на БН-350 в бенчмарк-модели

Образец №2 (МОХ1)

Величина, единицы измерения	Нуклид	BPSD	FACT-BR	Отклонение FACT-BR от BPSD, %	MCU-NR	Отклонение MCU-NR от BPSD, %
Относительная доля, ат. %	<sup>235</sup> U	0,44	0,442	0,45	0,438	-0,52
	<sup>238</sup> U	99,56	99,558	0,00	99,562	0,00
	<sup>238</sup> Pu	0,526	0,531	0,95	0,522	-0,79
	<sup>239</sup> Pu	73,18	73,136	-0,06	73,115	-0,09
	<sup>240</sup> Pu	19,63	19,621	-0,05	19,666	0,19
	<sup>241</sup> Pu	3,79	3,804	0,37	3,798	0,21
	<sup>242</sup> Pu	2,59	2,602	0,46	2,594	0,15
	<sup>241</sup> Am	0,283	0,291	2,83	0,287	1,27
	<sup>242</sup> Cm	0,0104	0,01	-3,85	0,01	-3,85
Активность, 10 <sup>9</sup> Бк	<sup>137</sup> Cs	0,427	0,389	-8,90	0,415	-2,78
	<sup>144</sup> Ce	7,79	6,92	-11,17	7,33	-5,86

# Результаты расчетов эксперимента на БН-350 в бенчмарк-модели



Образец  
№3 (UO<sub>2</sub>)

Величина	Нуклид	BPSD	FACT-BR	Отклонение (F-B)/B, %	MCU-NR	Отклонение (M-B)/B, %
Отн. доля, ат. %	<sup>234</sup> U	0,996	0,99	-0,60	1,001	-0,52
	<sup>235</sup> U	83,154	83,47	0,38	82,829	0,39
	<sup>236</sup> U	4,118	3,87	-6,02	4,390	-6,61
	<sup>238</sup> U	11,729	11,67	-0,50	11,780	-0,43
Активность, 10 <sup>9</sup> Бк	<sup>137</sup> Cs	4,20	4,07	-3,10	4,53	7,92
	<sup>144</sup> Ce	113,00	106,00	-6,19	113,51	0,45

Образец  
№4 (PuO<sub>2</sub>)

Величина	Нуклид	BPSD	FACT-BR	Отклонение (F-B)/B, %	MCU-NR	Отклонение (M-B)/B, %
Отн. доля, ат. %	<sup>238</sup> Pu	0,0131	0,01	-23,66	0,011	-12,83
	<sup>239</sup> Pu	91,839	91,98	0,15	91,487	-0,38
	<sup>240</sup> Pu	7,709	7,56	-1,93	8,031	4,17
	<sup>241</sup> Pu	0,3006	0,31	3,13	0,337	12,00
	<sup>242</sup> Pu	0,0133	0,01	-24,81	0,0153	14,93
	<sup>241</sup> Am	0,1156	0,12	3,81	0,1154	-0,16
	<sup>242</sup> Cm	0,007	0,01	42,86	0,0032	-54,49
Активность, 10 <sup>9</sup> Бк	<sup>137</sup> Cs	7,38	7,49	1,49	7,80	5,75
	<sup>144</sup> Ce	126,80	125,00	-1,42	129,18	1,88

# КЭТВС-1 и КЭТВС-7 в БН-600

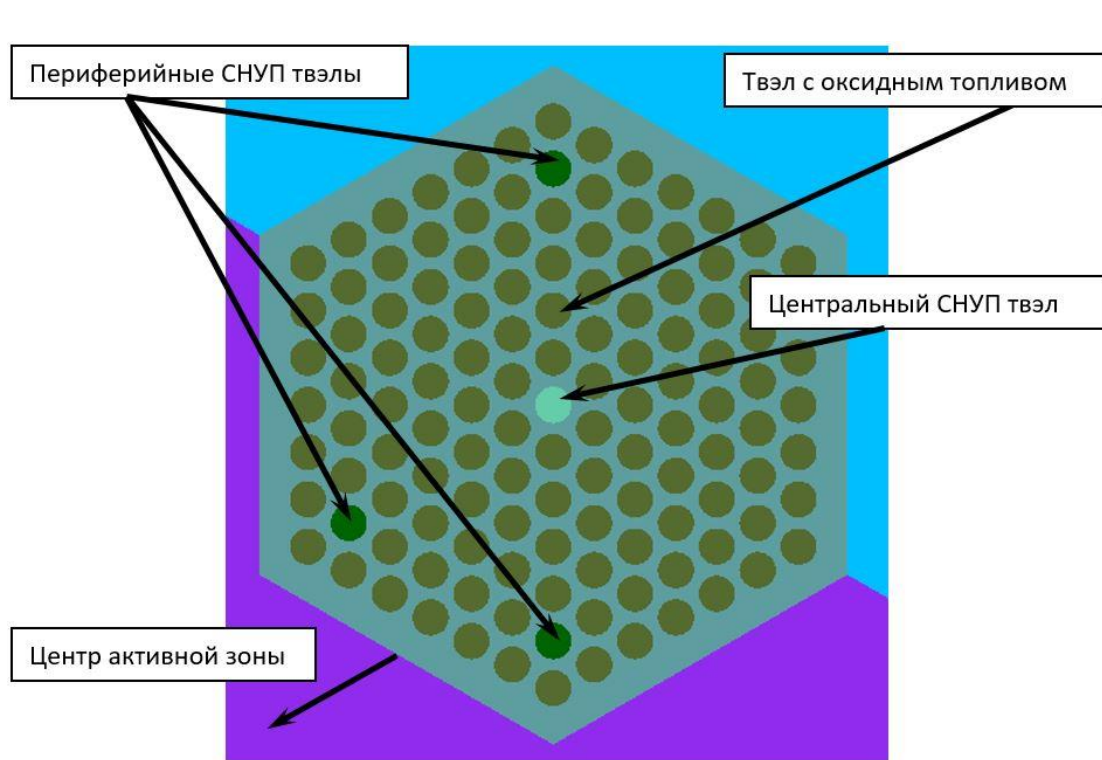


Схема КЭТВС-1

Режим облучения КЭТВС-1

Номер МК	65	66	67	68
Место облучения	ЗСО	ЗБО	ЗБО	ВРХ
Длительность МК, эфф. сут	132,6	163,4	137,1	157,8
Выдержка, кал.сут	9	41	10	541

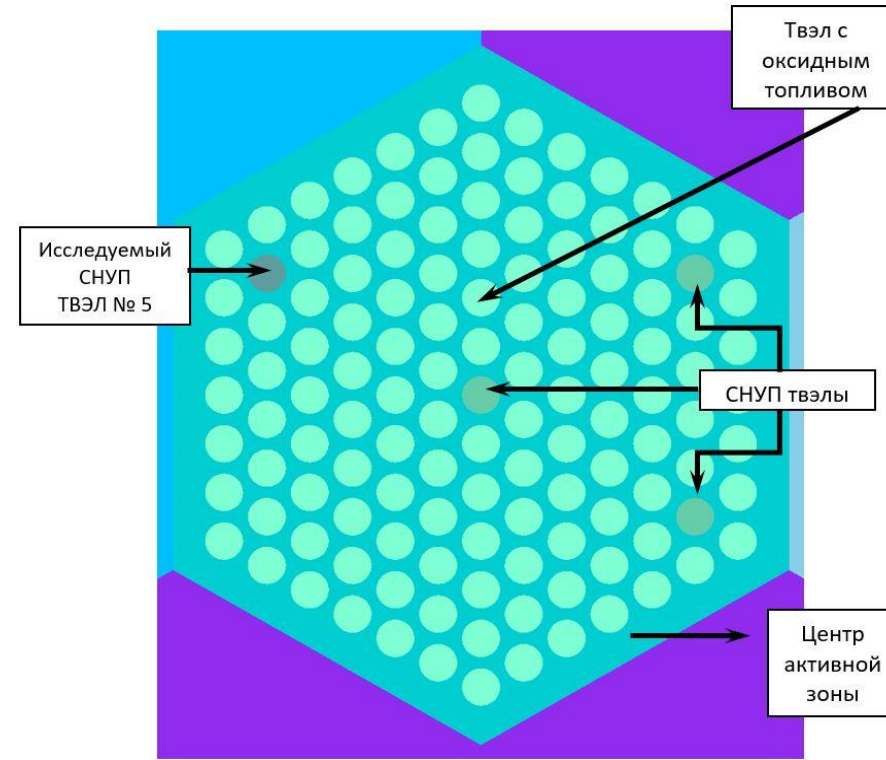


Схема КЭТВС-7

Режим облучения КЭТВС-7

Номер МК	68	69	70	71	72
Место облучения	ЗСО	ЗСО	ЗСО	ЗСО	ВРХ
Длительность МК, эфф. сут	157,8	132,4	160,6	138,4	159,9
Выдержка, кал. сут	41	11	37	12	730

# Массовое содержание нуклидов в выгоревшем СНУП-топливе КЭТВС



Изотоп	Массовое содержание, кг/т (U+Pu исх.)					
	КЭТВС-1			КЭТВС-7		
	Измерение	Расчет	(Р-Э)/Э, %	Измерение	Расчет	(Р-Э)/Э, %
$^{232}\text{U}$	$1,10 \times 10^{-6}$	$1,03 \times 10^{-6}$	-6,6	-	$1,57 \times 10^{-6}$	-
$^{234}\text{U}$	0,016(2)	0,025	54	-	0,003	-
$^{235}\text{U}$	1,77(2)	1,67	-5	0,89(5)	1,41	58
$^{236}\text{U}$	0,20(2)	0,19	-3,0	0,29(6)	0,25	-15
$^{238}\text{U}$	818,94(5)	806,99	-1,5	796,3(2)	788,4	-1,0
$^{238}\text{Pu}$	0,077(2)	0,072	-5,9	0,12(3)	0,08	-35
$^{239}\text{Pu}$	123,60(17)	122,48	-0,9	116,12(4)	119,16	2,6
$^{240}\text{Pu}$	13,78(13)	14,83	7,6	16,71(3)	17,90	7,1
$^{241}\text{Pu}$	0,660(3)	0,740	12	0,97(3)	1,07	11
$^{242}\text{Pu}$	0,037(2)	0,052	41	0,15(3)	0,08	-46
$^{241}\text{Am}$	0,22(1)	0,23	3,7	0,30(2)	0,21	-29
$^{242\text{m}}\text{Am}$	$3,60 \times 10^{-3}(3)$	$5,50 \times 10^{-3}$	53	$3,00 \times 10^{-3}(2)$	$1,34 \times 10^{-3}$	-55
$^{243}\text{Am}$	$1,40 \times 10^{-2}(2)$	$2,42 \times 10^{-3}$	-83	$1,20 \times 10^{-2}$	$3,95 \times 10^{-3}$	-67
$^{242}\text{Cm}$	$2,80 \times 10^{-4}(2)$	$1,03 \times 10^{-4}$	-63	$4,00 \times 10^{-5}$	$3,00 \times 10^{-5}$	-25



# Оценка расчетной погрешности изменения нуклидного состава

По результатам верификации приняты следующие максимальные погрешности расчета изменения нуклидного состава по ПК MSU-NR:

- $^{235}\text{U}$  – 5 %,
- $^{238}\text{U}$  – 2 %,
- $^{236}\text{U}$  – 15 %,
- $^{234}\text{U}$  – 55 %,
- $^{239}\text{Pu}$  – 3 %,
- $^{240}\text{Pu}$  – 8 %,
- $^{241}\text{Pu}$  – 12 %,
- $^{238}\text{Pu}$  – 35 %,
- $^{242}\text{Pu}$  – 50 %,
- $^{241}\text{Am}$  – 30 %,
- $^{242\text{m}}\text{Am}$  – 55 %,
- $^{242}\text{Cm}$  – 60 %.

# Бенчмарк БРЕСТ-КЭТВС

Цель дополнительного расчетного исследования по ПК MCU-NR и ПК FACT-BR:

- Обоснование возможности переноса результатов оценки погрешности концентрации актинидов при выгорании топлива активной зоны в спектре РУ БН-600 (КЭТВС) на РУ БРЕСТ
- Дополнительная кроссверификация MCU-NR

Был разработан расчетный тест выгорания твэлов КЭТВС-1 и КЭТВС-7 в быстром реакторе со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300.

Проведены расчеты выгорания и изотопной кинетики экспериментального топлива КЭТВС в БРЕСТ-ОД-300 по ПК MCU-NR и ПК FACT-BR.

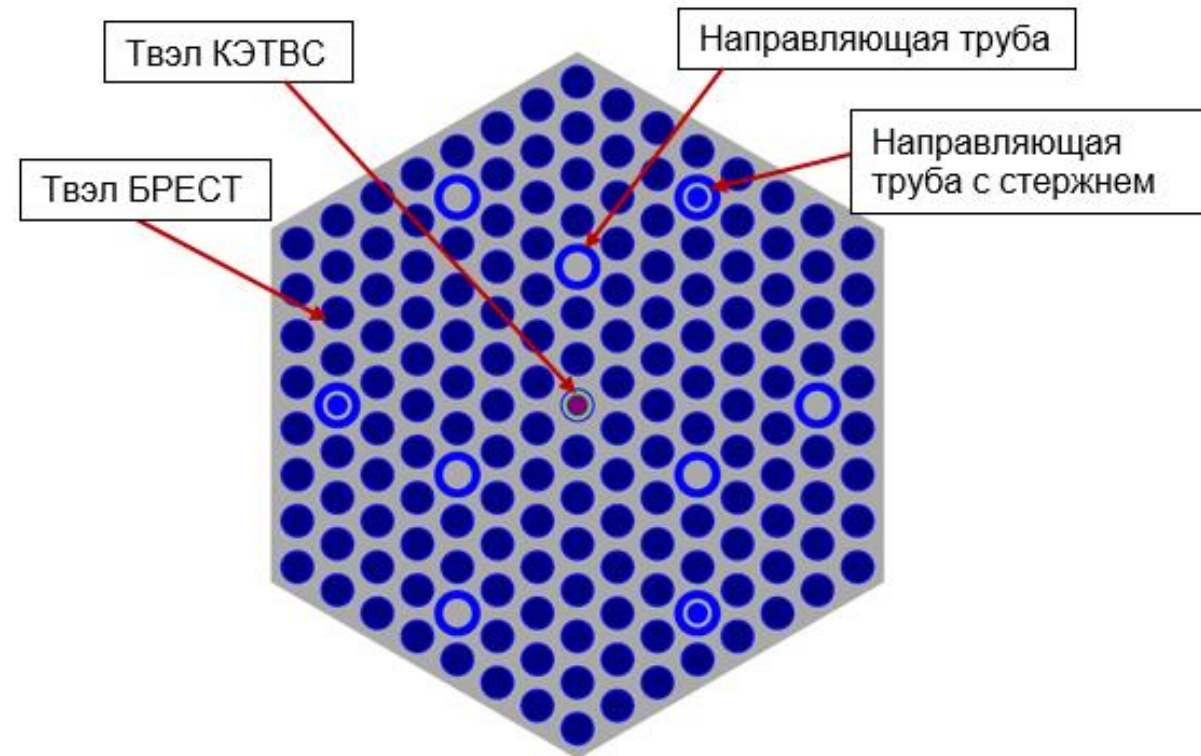


Схема бенчмарк-модели  
БРЕСТ-КЭТВС

# Относительные отклонения массовых содержаний нуклидов



НИКИЭТ  
РОСАТОМ

Отклонения значений расчета в модели БРЕСТ-ОД-300 от расчета в модели БН-600

Нуклид	КЭТВС-1		КЭТВС-7	
	ФАКТ-BR	MCU-NR	ФАКТ-BR	MCU-NR
$^{234}\text{U}$	-1.3	-0.5	-8.9	-18.6
$^{235}\text{U}$	2.0	1.7	7.3	2.5
$^{236}\text{U}$	-3.8	-4.0	-8.7	-4.6
$^{238}\text{U}$	0.4	0.4	1.2	0.6
$^{238}\text{Pu}$	-19.8	-13.3	-12.1	-20.5
$^{239}\text{Pu}$	0.7	0.1	1.6	-0.3
$^{240}\text{Pu}$	-0.1	-1.8	-5.1	-3.2
$^{241}\text{Pu}$	-3.0	-4.2	-12.2	-7.2
$^{242}\text{Pu}$	-4.5	-5.5	-16.6	-8.0
$^{241}\text{Am}$	0.2	-0.6	-8.1	-3.8
$^{14}\text{C}$	-4.8	-2.0	-11.0	0.1

По результатам расчетного эксперимента можно сделать вывод, что разница в спектральных характеристиках РУ БН-600 и РУ БРЕСТ-ОД-300 незначительно влияет на изменение изотопного состава в процессе выгорания для основных актинидов.

# Расчетное исследование моделей ячеек

Цель исследования:

Обоснование возможности использования модели бесконечной решетки гетерогенных ячеек при расчете выгорания и изотопной кинетики в реакторах на быстрых нейтронах.

Проведён сравнительный анализ результатов расчета в моделях ячеек и в полномасштабной модели реактора.

Два варианта ячеек:

1 вариант – высота топливного столба (110 см),  
боковые границы – трансляция,  
торцевые границы – отражение

2 вариант – высота реакторной модели (510 см),  
боковые границы – трансляция,  
торцевые границы – поглощение (утечка)

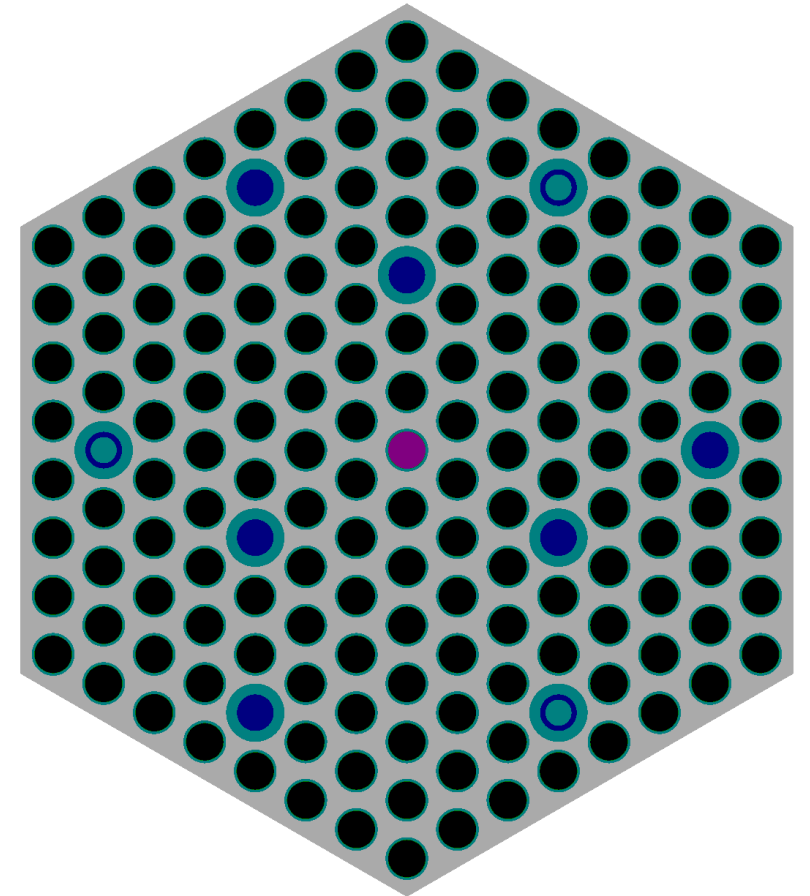


Схема модели ячейки  
БРЕСТ-300



# Относительные отклонения массовых содержаний



Отклонения результатов расчета в моделях ячеек от расчета в модели реактора

Нуклид	ТВС ПЗ - Центральный твэл		ТВС ПЗ - Периферийный твэл		ТВС ЦЗ - Центральный твэл		ТВС ЦЗ - Периферийный твэл	
	Ячейка 1	Ячейка 2	Ячейка 1	Ячейка 2	Ячейка 1	Ячейка 2	Ячейка 1	Ячейка 2
<sup>3</sup> H	3,3%	2,7%	-5,0%	-5,6%	1,4%	-2,6%	-2,6%	-6,4%
<sup>14</sup> C	2,5%	4,0%	-7,1%	-5,5%	-2,6%	-4,0%	-7,1%	-8,5%
<sup>234</sup> U	-0,1%	-0,5%	0,1%	-0,4%	-0,1%	0,1%	-0,1%	0,0%
<sup>235</sup> U	-0,1%	-0,6%	0,2%	-0,3%	-0,4%	0,1%	0,0%	0,3%
<sup>236</sup> U	1,4%	-1,7%	-2,4%	-5,5%	6,7%	0,1%	3,7%	-2,7%
<sup>238</sup> U	0,0%	-0,5%	0,0%	-0,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<sup>238</sup> Pu	-0,1%	-0,6%	0,2%	-0,3%	-0,1%	0,2%	0,0%	0,3%
<sup>239</sup> Pu	0,0%	-0,5%	0,1%	-0,5%	0,2%	0,1%	0,3%	0,1%
<sup>240</sup> Pu	0,0%	-0,6%	0,0%	-0,6%	0,2%	0,1%	0,0%	0,0%
<sup>241</sup> Pu	0,0%	-0,7%	-0,1%	-0,8%	0,6%	0,1%	0,2%	0,0%
<sup>242</sup> Pu	0,0%	-0,6%	0,1%	-0,5%	0,0%	0,1%	0,1%	0,1%
<sup>241</sup> Am	-0,1%	-0,6%	0,1%	-0,3%	-0,2%	0,1%	0,0%	0,2%
<sup>242m</sup> Am	2,6%	-0,5%	-2,4%	-5,4%	6,1%	-0,3%	3,2%	-3,0%
<sup>243</sup> Am	3,5%	-0,1%	-1,6%	-4,9%	5,6%	-0,7%	3,6%	-3,3%
<sup>242</sup> Cm	2,1%	-1,3%	-2,5%	-5,8%	6,8%	-0,1%	3,8%	-2,9%
<sup>243</sup> Cm	4,7%	-1,2%	-4,5%	-10,1%	13,1%	-0,7%	7,6%	-5,6%
<sup>244</sup> Cm	5,6%	-1,3%	-4,0%	-10,2%	13,8%	-0,7%	8,3%	-6,1%

## Заключение

- Проведено расчетное моделирование эксперимента по облучению образцов актинидов в БН-350 и эксперимента по выгоранию экспериментального СНУП-топлива КЭТВС-1 и КЭТВС-7 в БН-600
- Разработаны бенчмарк-модели для кроссверификации MCU-NR по коду FАСТ-BR и программе для ЭВМ ВРSD/V2.1
- Разработан расчетный тест выгорания твэлов КЭТВС-1 и КЭТВС-7 в БРЕСТ-ОД-300 для обоснования возможности переноса результатов оценки погрешности концентрации актинидов топлива активной зоны при выгорании в БН-600 на БРЕСТ-ОД-300
- Проведены расчетные исследования в обоснование возможности использования модели бесконечной решетки гетерогенных ячеек при расчете выгорания и изотопной кинетики в реакторах на быстрых нейтронах. При использовании модели ячейки достигается хорошее согласие с полномасштабной моделью реактора.
- Результаты расчетов будут использованы при верификации и валидации ПК FАСТ-BR с усовершенствованным модулем выгорания

**Спасибо за внимание**

Ромадинов А.М.