

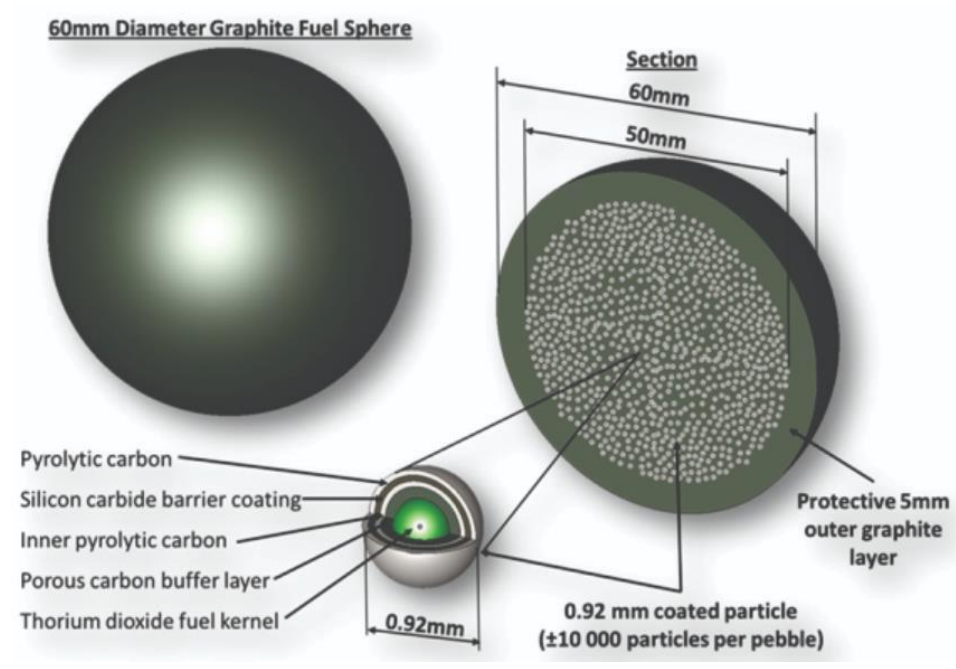
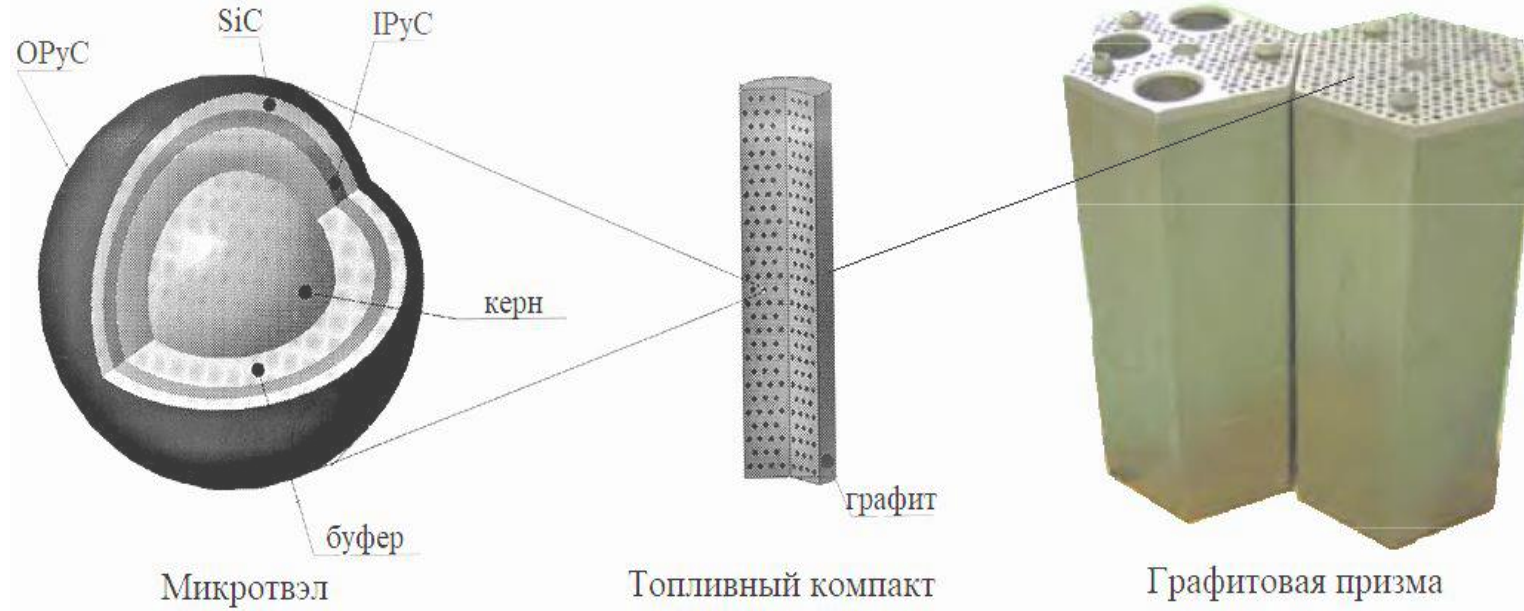


**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВНЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ ВТГР В КОМПЛЕКСЕ SCALE И СРАВНЕНИЕ  
С РЕЗУЛЬТАТАМИ БЕНЧМАРКА**

**Саляев А.В., Усынина С.Г.**  
АО "ОКБМ Африкантов"



**28.05 – 31.05.2024**

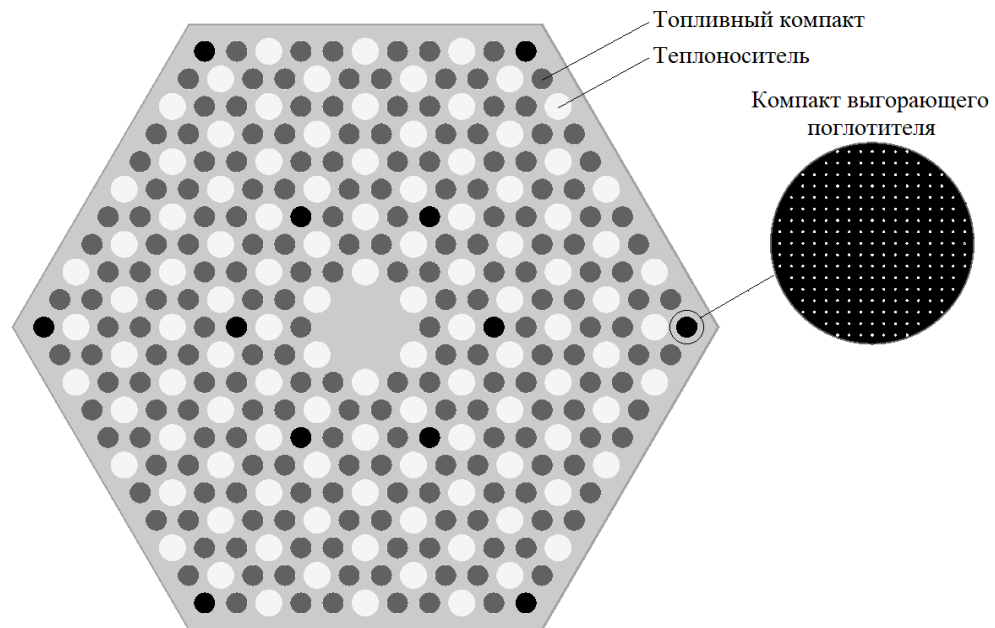


Топливный элемент

Двойная гетерогенность  
Сложная геометрия

Специальные расчетные  
методики и/или  
программы

Верификация / Валидация



Управляющий модуль TRITON – последовательности T-DEPL-1D/T6-DEPL (KENO-VI - решение транспортной задачи методом Монте-Карло) → библиотеки констант для каждого материала на каждом шаге выгорания

Спектр нейтронов в процессе выгорания рассчитывался с использованием 252-групповой библиотеки, включающей нейтронные данные, основанные на файлах оцененных ядерных данных ENDF/B-VII.1

Расчет блокировки микросечений проводился с использованием транспортного модуля CENTRM, рассчитывающего непрерывный по энергии спектр нейтронов, использующийся в качестве весовой функции (тип ячейки DOUBLEHET)

Расчет выгорания проводился по модулю изотопной кинетики ORIGEN

Конфигурация	Управляющий модуль/ последовательность	Библиотека констант/ источник данных	Количество групп
Топливная ячейка	TRITON/T-DEPL-1D (XSDRN)	scale.rev04.xn252v7.1/ ENDF/B-VII.1	252
Шаровой топливный элемент	TRITON/T6-DEPL (KENO-VI)	scale.rev04.xn252v7.1/ ENDF/B-VII.1	252
Призматический топливный блок	TRITON/ T6-DEPL (KENO VI), CSAS6 (KENO-VI)	scale.rev04.xn252v7.1/ ENDF/B-VII.1	252

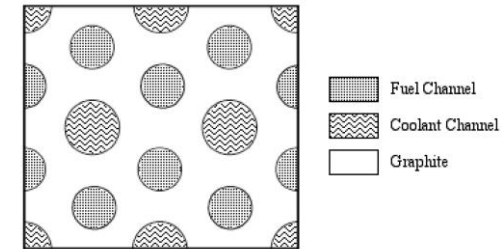
Расчетные характеристики для вариантов задания микротвэл и частиц выгорающего поглотителя

Вариант задания ТК/ВП		doublehet/ doublehet	doublehet/ частицы	частицы/ частицы
Время счета, ч		3,8	3,4	38,5
Групповая структура		252	252	CE
K <sub>inf</sub> на начало / конец облучения		0,795/1,055	0,797/1,042	0,799/1,041
Относительное отклонение K <sub>inf</sub> от реперного варианта, %	Начало облучения	-0,4	-0,3	—
	Конец облучения	1,3	0,1	—
	Среднее по шагам облучения	1,4	0,1	—
Относительное отклонение содержания актинидов и продуктов деления на конец облучения от реперного варианта, %	<sup>235</sup> U	-0,16	0,17	—
	<sup>239</sup> Pu	-2,24	0,21	—
	<sup>240</sup> Pu	-0,49	-0,22	—
	<sup>241</sup> Pu	-1,25	0,45	—
	<sup>241</sup> Am	-1,57	0,39	—
	<sup>244</sup> Cm	-1,46	0,81	—
	<sup>85</sup> Kr	0,12	-0,06	—
	<sup>90</sup> Sr	0,15	-0,07	—
	<sup>137</sup> Cs	0,02	0,00	—
	<sup>135</sup> Xe	1,07	0,00	—

Микротвэл

Шаровой топливный элемент

Призматический топливный блок (ТК и проходки под т/ль)



**21** набор данных

**12** участников

**6** стран

**10** организаций

**11** расчетных программ

Рассчитывались следующие характеристики:

- коэффициент размножения в бесконечной среде  $K_{inf}$ ,
- спектральные индексы:

$$1) \rho^{238} = {}^{238}U_c(\text{быстр}) / {}^{238}U_c(\text{тепл});$$

$$2) \delta^{235} = {}^{235}U_f(\text{быстр}) / {}^{235}U_f(\text{тепл});$$

$$3) \delta^{238} = {}^{238}U_f / {}^{235}U_f;$$

$$4) c/f^{235} = {}^{238}U_c / {}^{235}U_f;$$

где  ${}^{238}U_c$  – скорость реакции радиационного захвата на  ${}^{238}U$ ;

${}^{235}U_c$  – скорость реакции радиационного захвата на  ${}^{235}U$ ;

${}^{235}U_f$  – скорость реакции деления на  ${}^{235}U$ .

- масса нуклидов (г/т U):

1) актиниды:  ${}^{235}U$ ,  ${}^{238}U$ ,  ${}^{239}Pu$ ,  ${}^{240}Pu$ ,  ${}^{241}Pu$ ,  ${}^{242}Pu$ ,  ${}^{241}Am$ ,  ${}^{244}Cm$ ,  ${}^{245}Cm$ ;

2) продукты деления:  ${}^{85}Kr$ ,  ${}^{90}Sr$ ,  ${}^{110m}Ag$ ,  ${}^{137}Cs$ ,  ${}^{135}Xe$ ,  ${}^{149}Sm$ ,  ${}^{151}Sm$ .

Краткое наименование участника	Организация	Расчетная программа	Используемая библиотека констант/источник данных	Групповая структура
INL-Studsvik	Idaho National Laboratory / Studsvik Scandpower	HELIOS Code Package	HELIOS Cross-Section Library based on ENDF/B-VII.0	177
INL/PolyMtl	Idaho National Laboratory and Polytechnique Montreal	DRAGON 4.03	ENDF/B-VII	361
FZD 1	Forschungszentrum Dresden-Rossendorf	BGCORE (MCNP + MG depletion)	MCNP: ZZ-MCJEFF3.1NEA	Потоочное представление сечений (CE)
FZD 2			MCNP ACE: ZZ-MCJEFF3.1NEA	CE
FZD 3		HELIOS 1.9	ENDF/B-VI.8	190
IKE 1	Institut fuer Kernenergetik und Energiesysteme (IKE), Universitaet Stuttgart, Germany	MCNP coupled with module Abbrand	JEFF 3.1	CE
IKE 2		Microx2.2 coupled with Origen2.2		193
IKE 3		Grain: SCALE 6, TRITON t6-depl sequence (KENO-VI) Pebble and Prismatic: SCALE 6, TRITON t5-depl sequence (KENO V.a)	ENDF/B-VII	238
GRS	Gesellschaft fuer Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH	MONTEBURNS 2.0 (MCNP5 + ORIGEN2.2)	JEFF-3.1 based, available from NEA Data Bank as package ZZ-MCJEFF3.1NEA	CE
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory	MOCUP, MCNP5 Version 1.40 + ORIGEN2.2	ENDF/B-VII.0	CE
VTT 1	VTT Technical Research Centre of Finland	Serpent Monte Carlo reactor physics burn-up calculation code, version 1.1.2	ENDF/B-VII, no probability table treatment for unresolved resonances	CE
VTT 2 <sup>1)</sup>				
ORNL 1	Oak Ridge National Laboratory	SCALE 6.1β, TRITON t-depl sequence (NEWT)	ENDF/B-VII.0	238
ORNL 2		SCALE 6.1β, TRITON t5-depl sequence (KENO V.a)		
ORNL 3		SCALE 6.1β, TRITON t-depl-1d sequence (XSDRN)		
ORNL 4				
LANL	Los Alamos National Laboratory	MCNPX2.7b	ENDF-7	CE
KAERI 1	Korea Atomic Energy Research Institute	HELIOS	ENDF/B-VI.8	190
KAERI 2		MCCARD	ENDF/B-VII	CE
KAERI 3				
UNAM	National Autonomous University of Mexico (UNAM) - College of Engineering	MCNPX version 2.6.0	ENDF/B-VI and JEFF 3.1	CE
INL/ PolyMtl	Idaho National Laboratory and Polytechnique Montreal	DRAGON 4.03	ENDF/B-VII	361

# Относительное отклонение результатов расчета от средних значений для выгорания ячейки **МИКРОТВЭЛА**, %

Характеристика	Глубина выгорания, ГВт-сут/т							
	0	0,5	5	10	20	40	80	120
$K_{inf}$	-0,40	-0,44	-0,45	-0,45	-0,50	-0,35	-0,45	-0,57
<b>Масса актинидов, г/т U</b>								
$^{235}\text{U}$	–	0,08	-0,02	-0,04	-0,15	-0,19	0,29	1,47
$^{238}\text{U}$	–	-0,03	-0,02	-0,03	-0,02	-0,05	-0,07	-0,04
$^{239}\text{Pu}$	–	3,00	3,06	2,69	2,29	1,47	1,69	1,52
$^{240}\text{Pu}$	–	7,91	4,68	3,30	2,65	2,20	1,50	1,50
$^{241}\text{Pu}$	–	10,15	6,25	4,43	3,50	2,77	1,38	1,11
$^{242}\text{Pu}$	–	48,40	9,29	6,12	5,02	4,30	3,29	3,64
$^{241}\text{Am}$	–	35,24	8,14	4,34	2,83	2,50	0,84	0,78
$^{244}\text{Cm}$	–	55,06	24,23	4,39	0,61	-1,64	-1,82	-2,40
$^{245}\text{Cm}$	–	-96,64	33,02	28,29	3,53	0,54	0,56	1,25
<b>Масса продуктов деления, г/т U</b>								
$^{85}\text{Kr}$	–	6,32	6,51	6,50	6,27	6,00	5,89	5,84
$^{90}\text{Sr}$	–	0,94	0,86	0,79	0,62	0,35	0,79	0,05
$^{110m}\text{Ag}$	–	13,89	23,10	31,79	32,14	27,47	16,49	6,88
$^{137}\text{Cs}$	–	1,18	1,20	1,12	1,24	1,21	1,28	1,25
$^{135}\text{Xe}$	–	-0,14	0,38	0,63	1,02	1,07	3,08	4,50
$^{149}\text{Sm}$	–	2,06	4,39	4,05	7,03	3,96	7,48	11,04
$^{151}\text{Sm}$	–	-1,46	1,31	0,94	1,55	1,19	2,67	4,13
<b>Спектральные индексы</b>								
$\rho^{238}$	1,09	1,26	1,51	1,73	1,71	1,49	2,68	3,21
$\delta^{235}$	-0,86	-0,98	-0,54	-0,01	0,34	0,36	2,58	3,86
$\delta^{238}$	-0,65	-0,60	-0,38	0,01	-0,02	-0,26	0,30	-2,15



# Относительное отклонение результатов расчета от средних значений для выгорания шарового топливного элемента, %

Характеристика	Глубина выгорания, ГВт·сут/т							
	0	0,5	5	10	20	40	80	120
$K_{inf}$	0,07	0,12	0,08	0,14	0,14	0,18	0,42	1,54
<b>Масса актинидов, г/т U</b>								
$^{235}\text{U}$	–	-0,03	-0,12	-0,22	-0,53	-1,43	-4,65	-8,32
$^{238}\text{U}$	–	0,05	0,06	0,05	0,07	0,04	0,01	0,00
$^{239}\text{Pu}$	–	1,22	0,78	0,37	0,06	-0,04	0,44	1,72
$^{240}\text{Pu}$	–	5,32	2,78	1,89	1,31	0,39	-0,96	-0,90
$^{241}\text{Pu}$	–	12,02	4,97	3,64	3,07	3,37	2,03	1,82
$^{242}\text{Pu}$	–	39,56	7,41	5,67	4,91	4,49	3,99	2,71
$^{241}\text{Am}$	–	40,66	6,70	4,00	1,86	-0,60	-5,74	-8,37
$^{244}\text{Cm}$	–	77,88	33,56	10,41	1,67	1,62	2,39	0,50
$^{245}\text{Cm}$	–	136,62	30,06	28,23	28,54	2,30	4,68	5,01
<b>Масса продуктов деления, г/т U</b>								
$^{85}\text{Kr}$	–	2,19	4,72	4,88	4,80	4,77	4,65	4,64
$^{90}\text{Sr}$	–	1,59	1,57	1,42	1,31	1,14	0,63	0,35
$^{110m}\text{Ag}$	–	28,07	-1,76	-0,83	0,69	-0,63	-5,99	-15,57
$^{137}\text{Cs}$	–	1,42	1,22	1,23	1,15	0,94	0,80	0,51
$^{135}\text{Xe}$	–	0,06	0,06	-0,07	-0,08	-0,22	0,51	2,74
$^{149}\text{Sm}$	–	0,90	0,78	0,94	2,37	1,84	2,84	4,81
$^{151}\text{Sm}$	–	-0,20	1,03	0,59	0,42	1,28	2,03	2,14
<b>Спектральные индексы</b>								
$\rho^{238}$	-1,96	-1,47	-1,92	-2,06	-2,41	-2,52	-2,09	-0,94
$\delta^{235}$	-0,22	-0,03	-0,42	-0,69	-1,00	-1,26	-0,63	0,79
$\delta^{238}$	4,55	4,80	4,64	4,98	4,56	4,97	7,49	11,41

Относительное отклонение результатов расчета от средних значений для выгорания **призматического топливного блока**, %



Характеристика	Глубина выгорания, ГВт·сут/т							
	0	0,5	5	10	20	40	80	120
$K_{inf}$	-0,08	-0,07	-0,05	-0,04	0,03	0,18	0,52	0,89
<b>Масса актинидов, г/т U</b>								
$^{235}\text{U}$	–	0,02	-0,12	-0,25	-0,51	-1,20	-3,10	-5,21
$^{238}\text{U}$	–	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	-0,03	-0,03
$^{239}\text{Pu}$	–	-1,50	0,75	0,91	0,42	-0,07	-0,26	0,07
$^{240}\text{Pu}$	–	-0,81	1,84	1,72	1,13	0,31	-1,03	-1,50
$^{241}\text{Pu}$	–	12,45	2,37	2,34	1,76	1,86	0,48	-0,22
$^{242}\text{Pu}$	–	18,25	8,67	4,60	3,49	3,22	3,43	3,18
$^{241}\text{Am}$	–	17,37	14,04	1,61	0,01	-1,96	-6,11	-9,94
$^{244}\text{Cm}$	–	-19,78	3,77	7,18	-1,79	-1,21	-0,88	-1,21
$^{245}\text{Cm}$	–	-99,45	25,34	29,70	11,55	4,99	0,11	1,70
<b>Масса продуктов деления, г/т U</b>								
$^{85}\text{Kr}$	–	1,91	4,58	4,61	4,65	4,55	4,36	4,22
$^{90}\text{Sr}$	–	1,58	1,52	1,44	1,31	1,14	0,69	0,33
$^{110m}\text{Ag}$	–	-11,55	-4,97	-2,03	-2,54	-5,89	-13,99	-22,51
$^{137}\text{Cs}$	–	1,52	1,59	1,46	1,43	1,25	1,12	0,87
$^{135}\text{Xe}$	–	0,10	0,21	0,27	0,40	0,70	2,00	3,43
$^{149}\text{Sm}$	–	–	3,29	3,30	3,88	3,29	4,40	4,40
$^{151}\text{Sm}$	–	-2,08	0,60	0,08	-0,31	-0,05	0,71	0,76
<b>Спектральные индексы</b>								
$\rho^{238}$	0,32	-1,63	-1,57	-1,45	-1,93	-2,69	-2,73	-2,61
$\delta^{235}$	-3,30	-1,80	-2,01	-2,08	-2,44	-3,13	-3,23	-3,22
$\delta^{238}$	-3,39	-3,39	-3,14	-3,36	-3,27	-3,33	-2,06	-0,78

### ➤ $K_{inf}$

Стандартное отклонение < 1 % для всех конфигураций

В целом возрастает с увеличением выгорания

Относительное отклонение находится в пределах 1 %

### ➤ Спектральные индексы

Максимальное относительное отклонение  $\pm 5 \%$

Выраженного тренда в относительном отклонении в зависимости от выгорания не наблюдается

### ➤ Топливные изотопы

Относительное отклонение в основном  $\pm 6 \%$

Уменьшение относительного отклонения для изотопов с их накоплением

Разброс данных с увеличением выгорания более выражен для минорных актинидов Am и Cm, содержание которых в топливе невелико

Для Cm отличия достигают 30 % (при его содержании в облученной композиции на уровне микрограмм)

### ➤ Продукты деления

Относительное отклонение в основном от -2 % до 7 %

Наибольшие отличия наблюдаются для  $^{110m}\text{Ag}$ : от -22 до 32 % (очень малое накопление в топливе, неопределенность в коэффициентах ветвления библиотек распадов)

**Спасибо за  
внимание**

