



ФЭИ
РОСАТОМ

Разработка нейтронно-физических тестов для анализа первой серии облучения мавэл в реакторе БОР-60

«Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (НЕЙТРОНИКА–2024)»

Ю.В. Левченко, М.Н. Слюняев, А.А. Перегудов, В.А. Мишин, В.В. Лосев АО «ГНЦ РФ–ФЭИ»
И.Ю. Жемков, О.В. Ишунина, А.И. Меркулов, Ю.В. Набойщиков АО «ГНЦ НИИАР»

30.05.2024

Содержание



● Введение о ГВМА	02
● Описание тестовой модели 1 партии	06
● Анализ результатов	12
● Выводы	17

Введение о ГВМА

Для обоснования и реализации гетерогенного выжигания минорных актинидов (ГВМА) в реакторе на быстрых нейтронах (РБН) реализуется многоэтапная программа, включающая реакторные испытания облучательных устройств с минор-актиниды выжигающими элементами (мавэлами) в реакторе БОР-60 и послереакторные исследования (ПРИ).

НИОКР в обоснование технологии ГВМА в РБН, включает:

- Отработка технологии изготовления мавэл на имитаторах порошков МА;
- Создание испытательного стенда для отработки технологий дистанционного изготовления мавэл;
- Реакторные испытания ОУ с мавэлами в БОР-60;
- ПРИ облученных мавэл с МА;
- Рециклирование МА после облучения в БОР-60;
- Расчётно-экспериментальные исследования эффективности ГВМА в различных спектрах быстрого реактора БОР-60.

Расчетно-экспериментальные исследования



В 2019-2024 гг. был выполнен комплекс работ по облучению мавэлов с Np и Am в различных спектрах нейтронов в боковом экране реактора БОР-60.

Изготовлены мавэлы и урановые мониторы для двух ОУ:

- Мавэлы AmO₂,
- Мавэлы с NpO₂,
- Мониторные элементы с ²³⁵U.

ОУ	Мавэл	МК	Число МК	Примечание
ОУ-1	АЦ04	112-112А	2	1-я партия мавэл. Выгружены. ПРИ U монитор, 90% ²³⁵ U
	НЦ03			
	МН1			
	НЦ01	112-115	8	2-я партия мавэл. Выгружены
	АЦ01			
	АЦ07	116-118А	6	3-я партия мавэл. Выгрузка - май 2024 г.
	АЦ05	116-120А	10	Рециклированные МА. Выгрузка - 2025 г.
НЦ09				
ОУ-2	АЦ03	112-112А	2	1-я партия мавэл. Выгружены. ПРИ U монитор, 90% ²³⁵ U
	НЦ04			
	МН2			
	АЦ02	112-115	8	2-я партия мавэл. Выгружены
	НЦ02			
	АЦ08	116-118А	6	3-я партия мавэл. Выгрузка - май 2024 г.
	АЦ06	116-120А	10	Рециклированные МА. Выгрузка - 2025 г.
НЦ10				

МК/ППР	Начало МК	Конец МК
ППР-112	08.12.20	
МК-112	26.12.20	07.02.21
МК-112А	27.02.21	03.05.21
ППР-113	03.06.21 и 10.06.21	
МК-113	19.06.21	03.08.21
МК-113А	10.09.21	11.11.21
МК-114	25.12.21	13.02.22
МК-114А	11.03.22	03.05.22
МК-115	18.06.22	02.08.22
МК-115А	23.08.22	16.10.22
ППР-116	23.11.22	
МК-116	03.12.22	05.02.23
МК-116А	22.02.23	24.04.23
МК-117	20.06.23	06.08.23
МК-117А	29.08.23	06.11.23
МК-118	21.12.23	11.02.24
МК-118А	29.02.24	06.05.24
ППР-119		

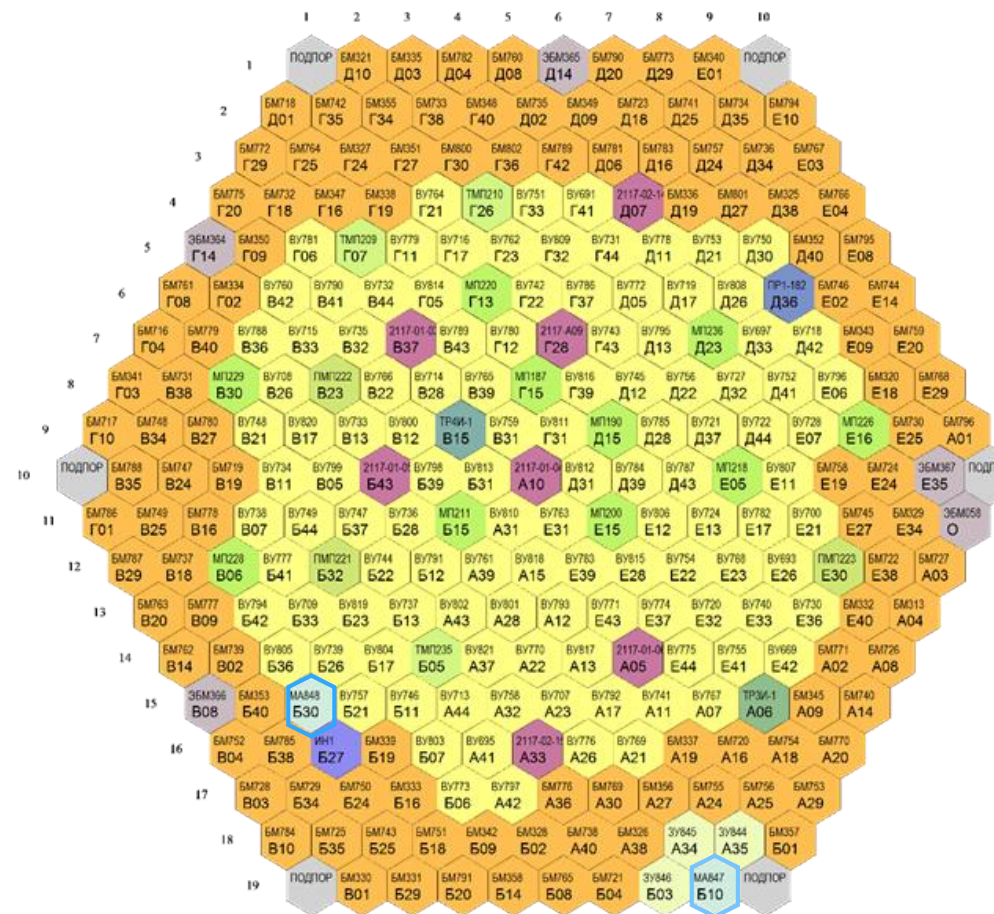
Модель РУ БОР-60



Для проведения реакторного эксперимента :

ОУ-1 (МА847) расположили в ячейке девятого ряда (**Б10**) на периферии бокового экрана реактора БОР-60. В трех соседних ячейках (А34, Б03, А35) для смягчения спектра нейтронов установили ЗУ (ЗУ844, ЗУ845 и ЗУ846) с замедляющими элементами на основе гидрида циркония.

ОУ-2 (МА848) расположили в ячейке седьмого ряда (**Б30**) на границе активной зоны и бокового экрана реактора.



Картограмма РУ БОР-60 на начало облучения

Постановка задачи

Разработка тестовых (бенчмарк) моделей реактора БОР-60 и облучательных устройств первой партии мавэлов.

Цель - детальный расчетный анализ эксперимента с облученными мавэлами для верификации программ и библиотек констант для использования их при обосновании эффективности выжигания минорных актинидов.

1 Этап

Нейтронно-физическая
модель

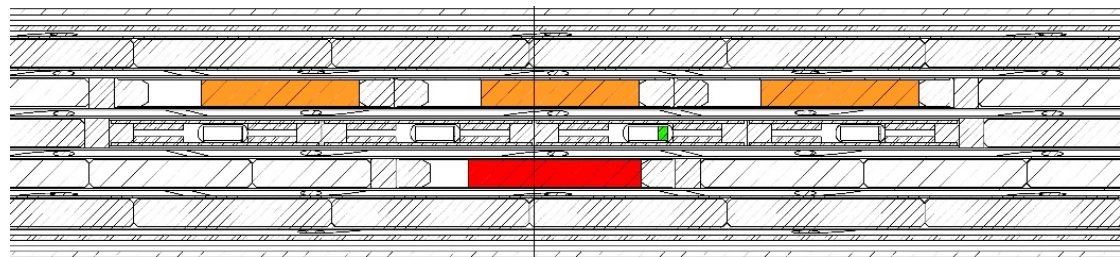
2 Этап

Расчеты изотопной
кинетики

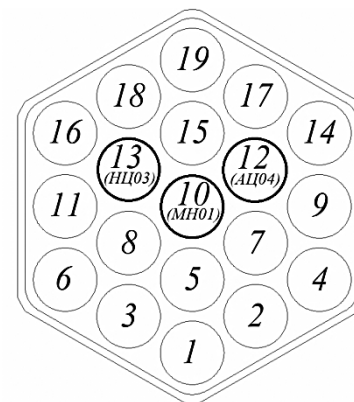
3 этап

Сравнительный анализ
с данными ПРИ

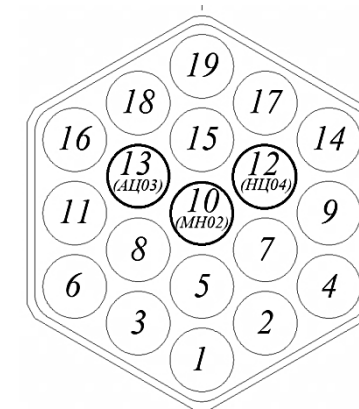
Описание тестовой модели 1 партии мавэлов



Ампулы с Nr – **оранжевый цвет**
Ампула с Am – **красный цвет**
Монитор с U – **зеленый цвет**



ОУ МА847 (ОУ-1)
Ячейка Б10



ОУ МА848 (ОУ-2)
Ячейка Б30

На протяжении двух микрокомпаний в ОУ-1 облучались мавэлы АЦ04 (Am), НЦ03 (Nr) и урановый монитор МН-01 (он был разрушен). В ОУ-2 облучались мавэлы АЦ03, НЦ04 и монитор МН-02.

БНАБ-93
БНАБ-РФ
РОСФОНД-2010

Библиотеки

- Библиотек нейтронных сечений в формате БНАБ.
- Библиотека нейтронных оцененных данных.

TRIGEX
ММКС
ММККЕНО

Нейтронно-физические расчеты

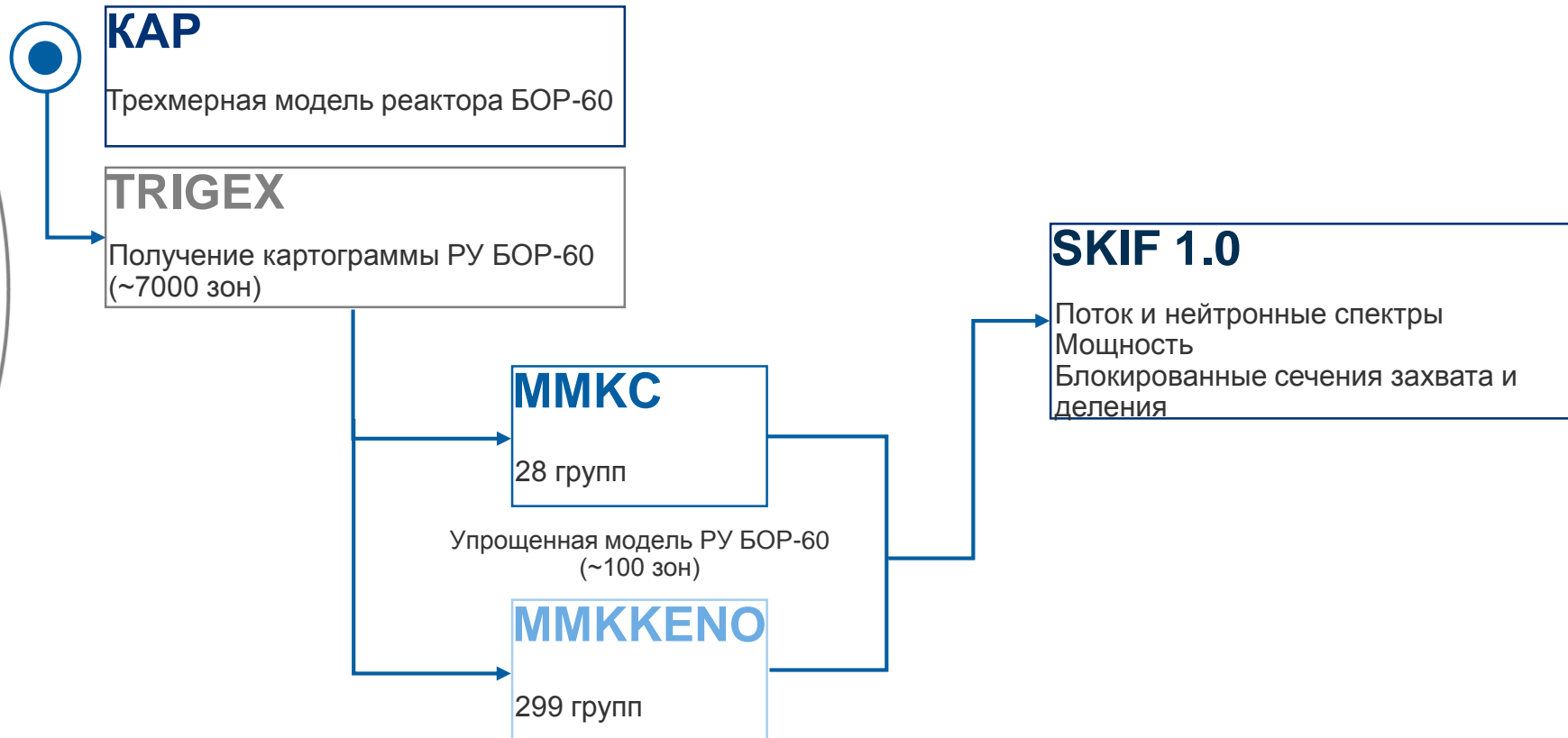
- Диффузионный, многогрупповой трехмерный программный комплекс.
- Расчет методом Монте-Карло с использованием детальных энергетических зависимостей сечений в формате ACE.
- Расчет нейтронно-физических характеристик методом Монте-Карло в мультигрупповом приближении.

SKIF 1.0

Изотопная кинетика

- Расчет изменения нуклидного состава ядерного топлива, остаточного энерговыделения, источников нейтронного и гамма-излучений.

Расчетные программы



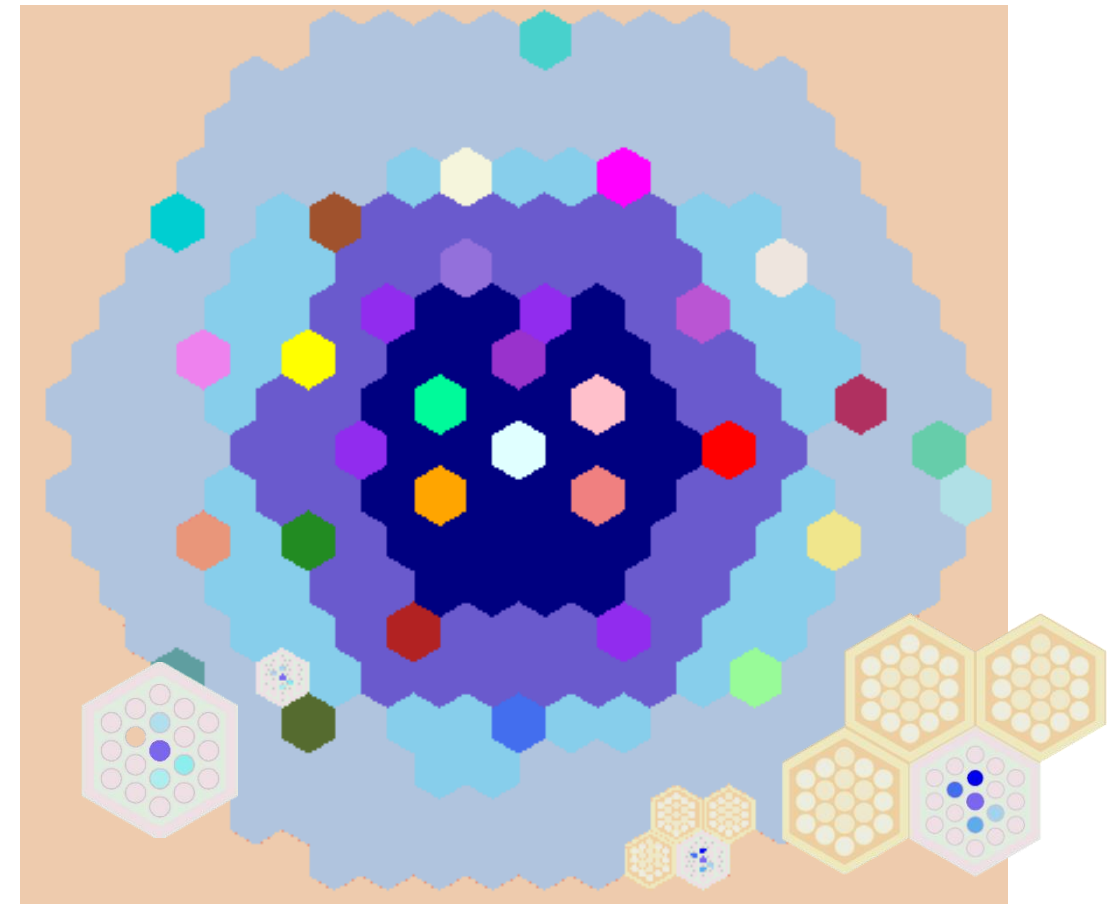
Этап 1. Нейтронно-физическая расчетная модель



Расчетная модель в программах MMKKENO и MMKS представляет собой гомогенную структуру с гетерогенным выделением замедляющих устройств и мавэлов.

В ходе упрощения идентичные зоны были свернуты, что позволило уменьшить количество зон, топливные стержни были объединены в три группы.

Для составления расчетной модели программы MMKKENO и MMKS, основанной на методе Монте-Карло, использовалась модель реактора в программе TRIGEX (~7000 зон) и ее упрощенная версия (~100 зон).



Модель активной зоны в программе MMKKENO

Этап 2. Расчеты изотопной кинетики



Для проведения расчетов изотопной кинетики необходимы исходные данные в расчетных заданиях:

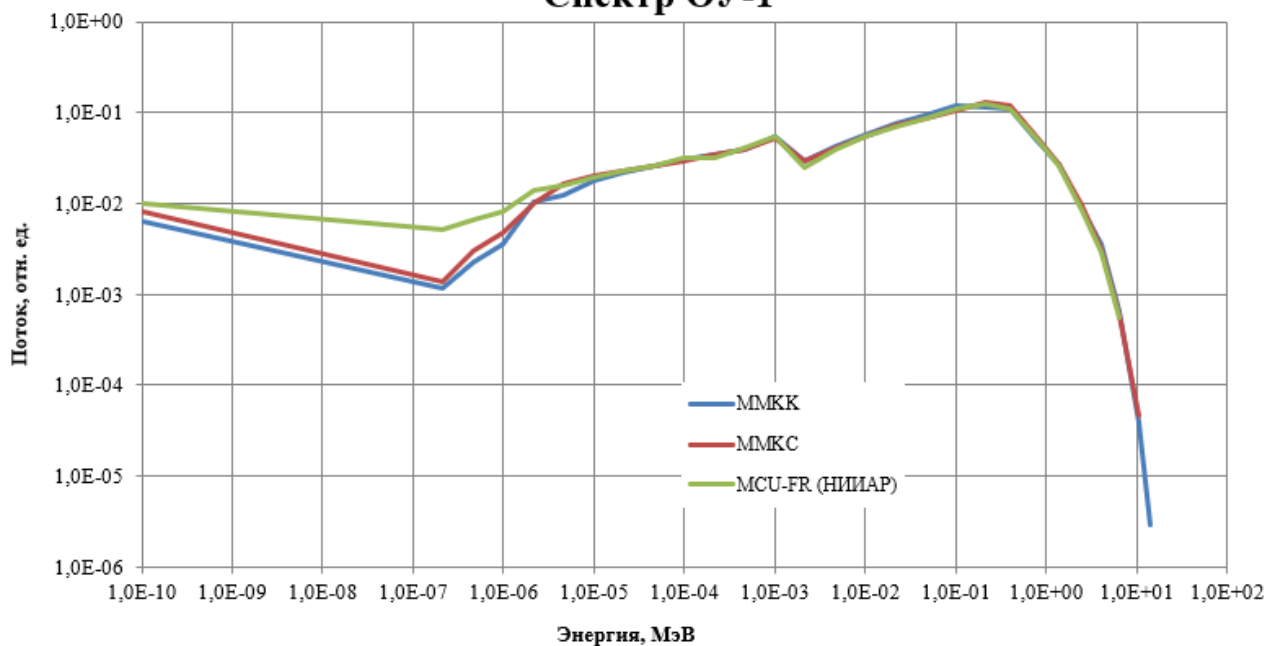
- По облучению мавэлов в ОУ-1 и ОУ-2 - массы, время до облучения и после облучения;
- По микрокампаниям – потоки и нейтронные спектры в ампулах мавэлов, поток нормированный на мощность, мощность в МВт, блокированные сечения захвата и деления.

Расчетные исследования были проведены с 28 групповой библиотекой нейтронных сечений БНАБ-93.

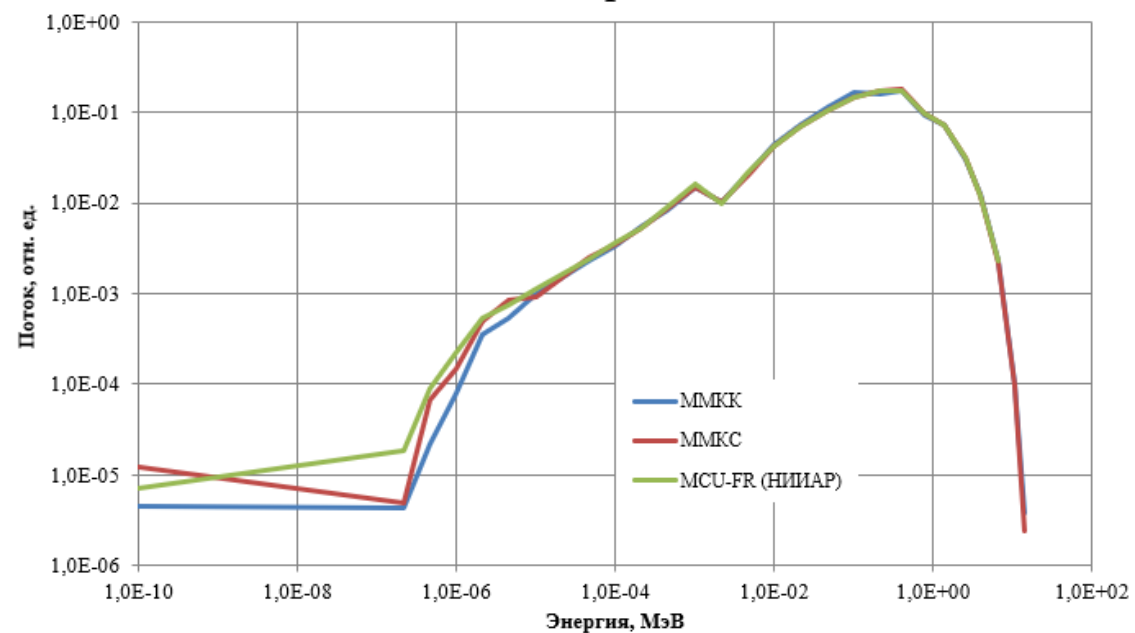
Этап 1. Результаты



Спектр ОУ-1



Спектр ОУ-2



Сравнение спектров для МК-112

Результаты Этапа 2

АЦ04 в ОУ-1 (промежуточный)

Изотоп	ПРИ	НИИАР	ММККЕНО + БНАБ93	ММКС+ РОСФОНД1 0
$\sum Pu$	100%			
Pu238,%	64,14	73,70	68,14	72,26
Pu239,%	11,13	5,15	10,32	6,12
Pu240,%	4,18	1,21	2,90	1,59
Pu241,%	1,53	0,77	0,43	0,57
Pu242,%	19,02	19,17	18,21	19,45
$\sum Am$	100%			
Am241,%	96,68	98,04	99,13	98,65
Am242m, %	0,95	1,68	0,72	1,10
Am243,%	2,37	0,28	0,16	0,25

Расчётный и экспериментальный состав
АЦ04

Изотоп	ПРИ	НИИАР	ММККЕНО+ БНАБ93	ММКС+ РОСФОНД10
Am	5,53%	9,99%	5,46%	8,85%

Изменение массы Am в АЦ04

АЦ03 в ОУ-2 (быстрый)



Изотоп	НИИАР	ПРИ	ММККЕНО+ БНАБ93	ММКС+ РОСФОНД10
Σ Pu	100%			
Pu238,%	78,07	94,35	77,83	77,80
Pu239,%	0,08	1,01	0,08	0,08
Pu240,%	0,43	1,60	0,41	0,47
Pu241,%	0,00	1,01	0,00	0,01
Pu242,%	21,41	2,03	21,67	21,64
Σ Am	100%			
Am241,%	99,22	99,54	99,31	99,34
Am242m,%	0,48	0,42	0,41	0,36
Am243,%	0,30	0,04	0,28	0,30

Расчётный и экспериментальный состав
АЦ03

Изотоп	ПРИ	НИИАР	ММККЕНО+ БНАБ93	ММКС+ РОСФОНД10
Am	4,18%	2,07%	2,22%	1,90%

Изменение массы Am в АЦ03

НЦ03 в ОУ-1 (промежуточный)

Изотоп	НИИАР	ПРИ	ММККЕНО+ БНАБ93	ММКС+ РОСФОНД10
$\sum Pu$	100%			
Pu238,%	96,49	96,86	96,08	96,01
Pu239,%	3,27	3,56	3,72	3,72
Pu240,%	0,17	0,38	0,16	0,22
Pu241,%	0,06	0,09	0,04	0,04
Pu242,%	0,003	0,11	0,002	0,003

Изотоп	ПРИ	НИИАР	ММККЕНО+ БНАБ93	ММКС+ РОСФОНД10
Np237	6,39%	7,35%	5,36%	1,93%

Изменение массы Np в НЦ03

**Расчётный и экспериментальный состав
НЦ03**

НЦ04 в ОУ-2 (быстрый)

Изотоп	НИИАР	ПРИ	ММККЕНО+ БНАБ93	ММКС+ РОСФОНД1 0
$\sum Pu$	100%			
Pu238,%	94,02	93,74	94,56	93,66
Pu239,%	5,63	5,71	5,12	5,97
Pu240,%	0,33	0,49	0,30	0,35
Pu241,%	0,01	0,02	0,01	0,01
Pu242,%	0,01	0,04	0,01	0,01

Расчётный и экспериментальный состав
НЦ04

Изотоп	ПРИ	НИИАР	ММККЕНО+ БНАБ93	ММКС+ РОСФОНД10
Np237	3,96%	2,51%	2,72%	2,41%

Изменение массы Np в НЦ04



Разработаны
тестовые
модели
реактора
БОР-60 и
облучательных
устройств
первой партии
мавэлов.



Выполнен
первичный
анализ
результатов
расчетов.



На основе
тестовой
модели будет
проходить
кросс-
верификация
расчетных
средств и
библиотек
констант.



Будет
проводиться
анализ и
создание
тестовой
модели второй
партии
мавэлов.

Спасибо за внимание!

Левченко Юлия Владимировна

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», ОЯЭ, ДФР, Лаборатория 12
Инженер-исследователь в области констант и радиационной
безопасности

Тел.: +7 (484) 399 84 25

Моб. тел.: +7 (910) 605 67 11

Email: yvlevchenko@ippe.ru

www.ippe.ru

30.05.2024