



ПРОРЫВ
РОСАТОМ

Нейтронно-физические исследования характеристик топлива быстрых реакторов, включая топливо с минорными актинидами

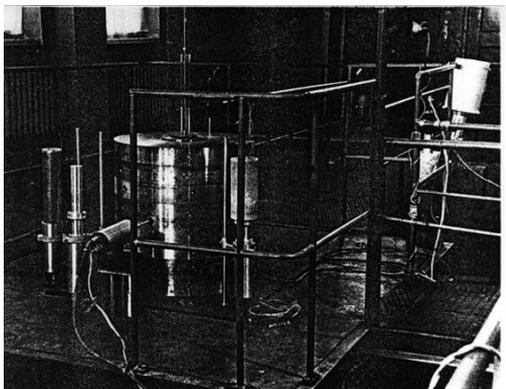
Сообщение на Торжественном заседании научно-технического совета, посвященное 50-летию пуска БН-350

Хомяков Ю.С.

Содержание

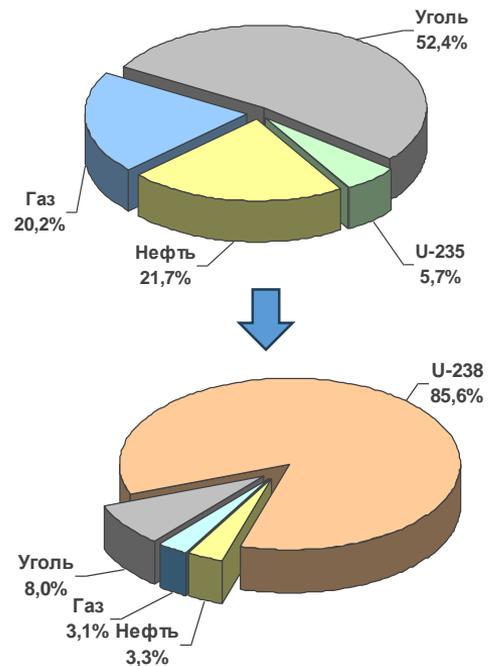
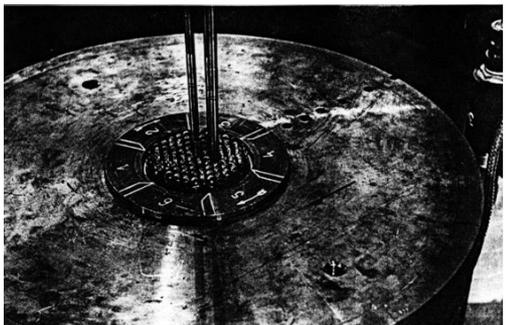
- ✓ От идеи воспроизводства топлива к ЗЯТЦ
- ✓ Исследования нуклидной кинетики и выгорания уранового топлива
- ✓ Исследования кинетики нуклидного состава МОКС топлива с учетом его воспроизводства в обоснование уран-плутониевого топливного цикла
- ✓ Исследования в обоснование ториевого топливного цикла:
воспроизводство урана-233 и накопление в нем урана-232
- ✓ Исследования в обоснование трансмутации минорных актинидов

От идеи воспроизводства к ЗЯТЦ (1)



БР-1: $KB = 2.5 \pm 0.2$
без учета $U^{238}(n,f)$: $KB = 2.0 \pm 0.2$

A. I. Leypunsky, I.I. Bondarenko et al. Experimental fast reactors in USSR // Proceedings of the 2nd International Conference for Peaceful Use of Nuclear Power, Geneva, 1958, Presentations of Soviet scientists, P/2129.

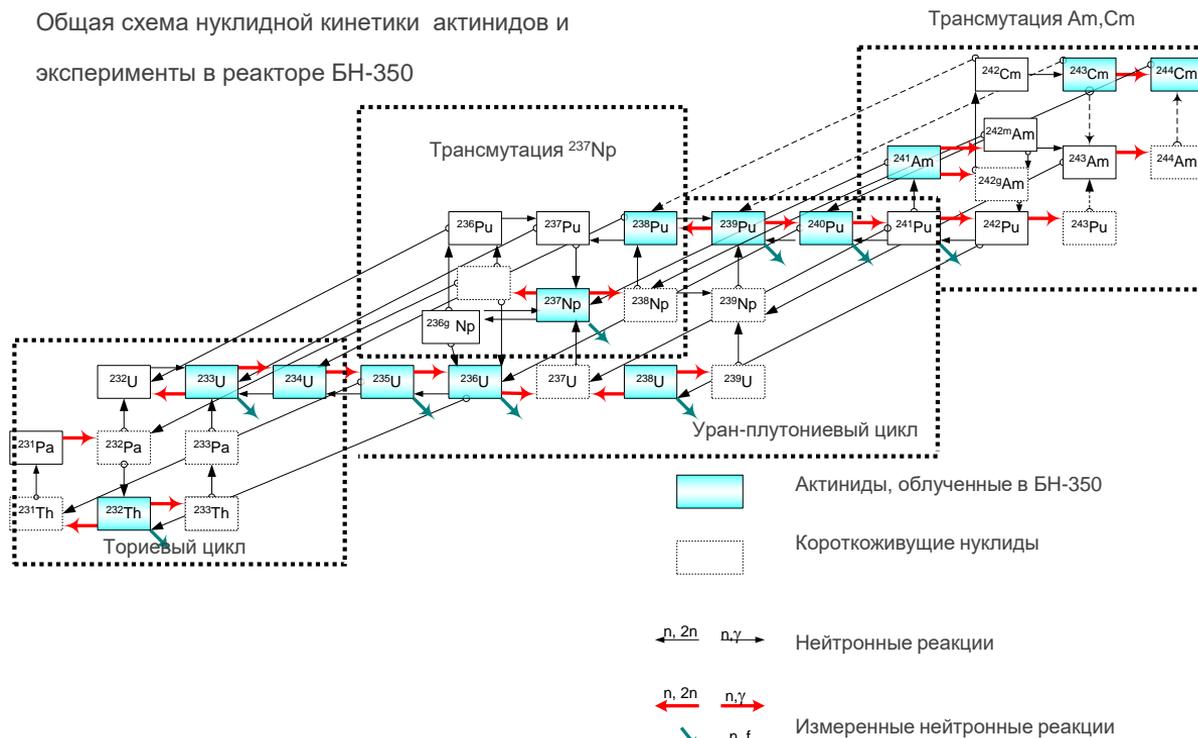


От идеи воспроизводства к ЗЯТЦ (2)

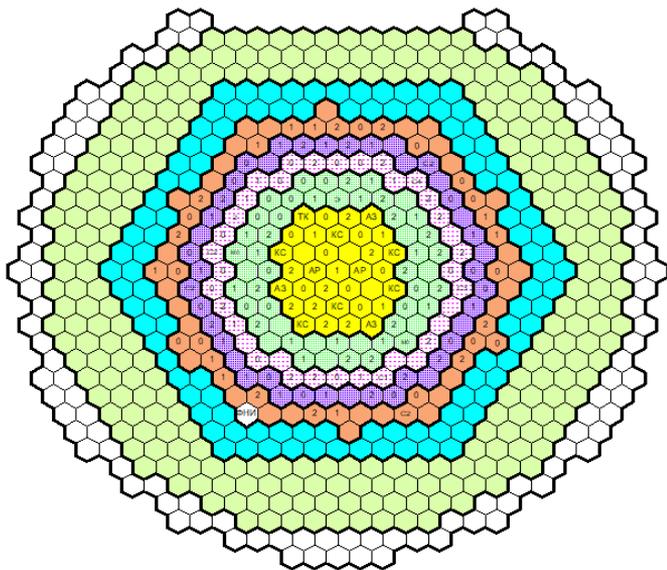
Основные направления и этапы:

- 1973-1981 : урановое топливо
- 1978-1981 : ампульные образцы U и Pu
- 1982-1983 : вставка МОКС топлива из 7 ТВС
- 1987-1988: металлическое урановое топливо
- 1987-1992: исследования ториевого цикла
- 1990-1992: облучение МА в БН-350
- 2002-2005: радиохимические исследования МА

Общая схема нуклидной кинетики актинидов и эксперименты в реакторе БН-350



Методика облучения: капиллярные образцы-свидетели



Картограмма реактора БН-350

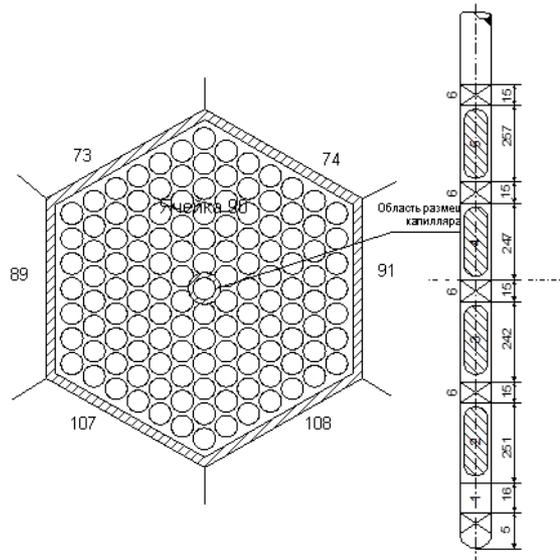


Схема ТВС, капилляра с образцами

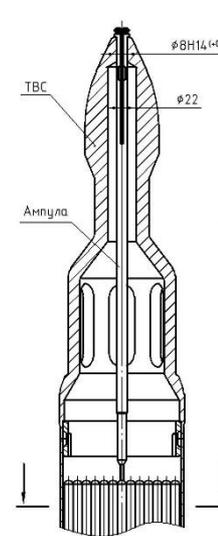
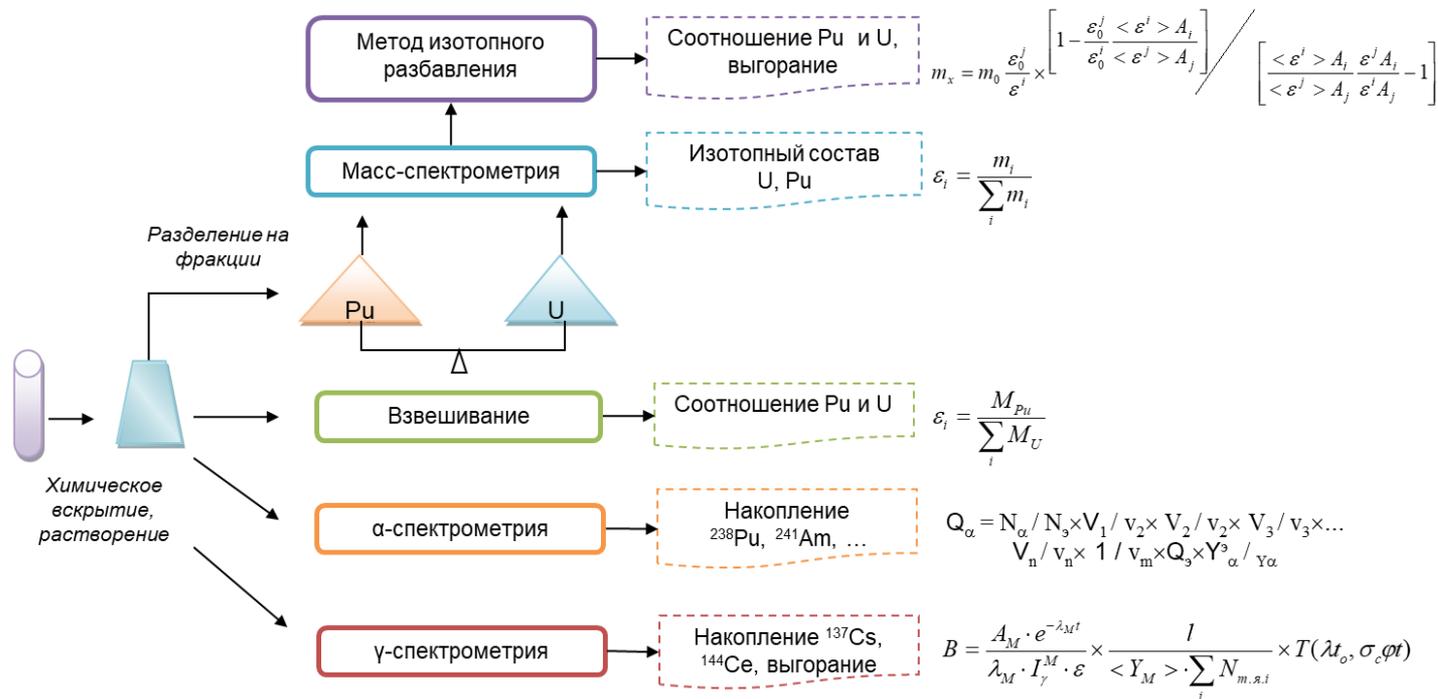


Схема крепления

Комплексная гавирадиохимическая методика анализа состава топлива и образцов-свидетелей

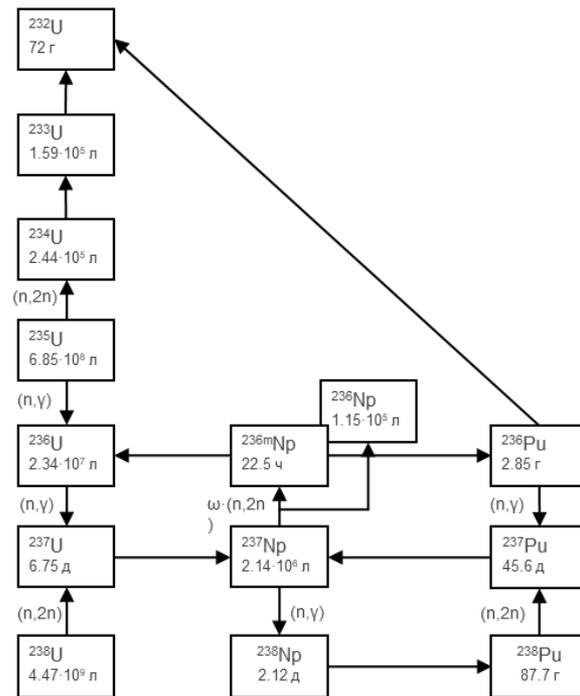


Исследования уранового топлива 1-го типа загрузки

Даты	Кол-во образцов	Состав образца	Зона
1973 –1976	9	U-235 (26%)	ЗБО
1973 –1976	7	U-235 (17%)	ЗМО
1973 –1976	22	Обедненный уран	ЗБО, ЗМО, Экран
Всего	38		

Основные каналы изотопных превращений и базовые цепочки описываются корректно.

Изотопный состав урана и его выгорание описывается с точностью 3%

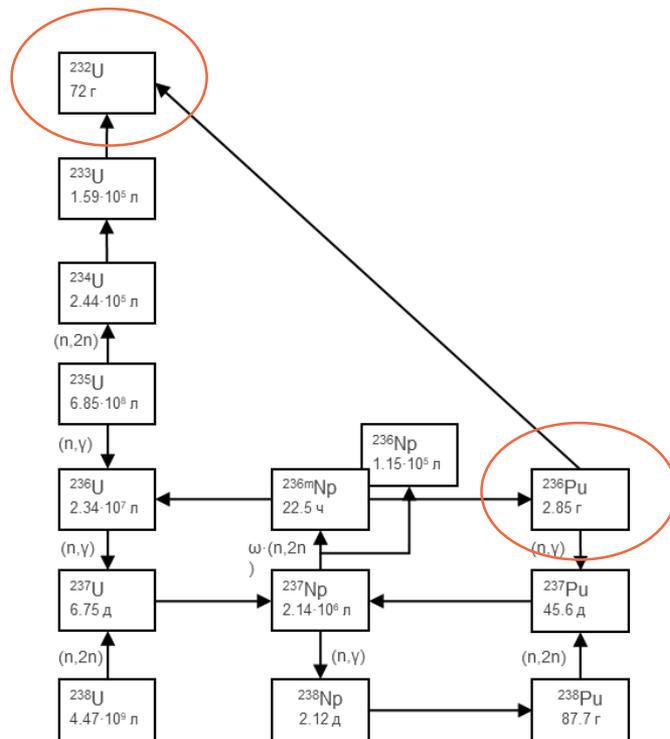


Исследования образцов U-236 и Np-237

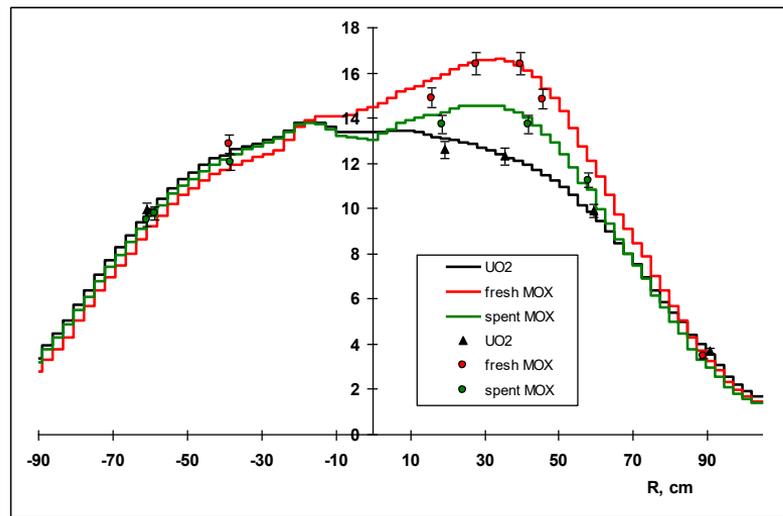
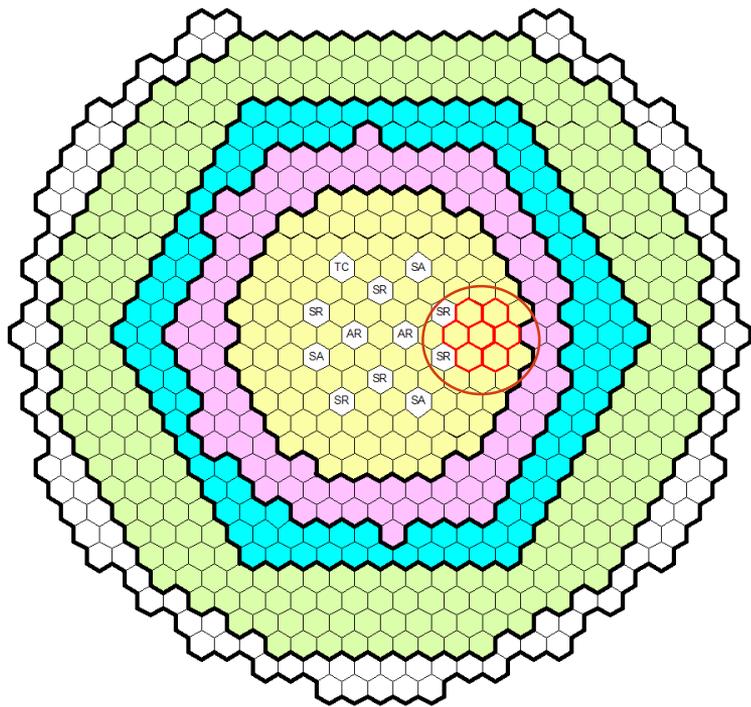
Даты	Кол-во образцов	Состав образца	Зона
1977-1978	2	U-236 (99.66%)	ЗБО, Экран
1977 - 1978	4	Np-237 (100%)	ЗБО, ЗМО, Экран
Всего	38		

Цель работы: определение накопления Pu-236 и сечения $(n,2n)$ на Np-237

Основной результат: сечение $(n,2n)$ в файлах ENDF/B завышено в ~ 2 раза



Исследования вставки с МОХ-топливом



Исследования влияния вставки с МОХ топливом на распределение нейтронного поля в реакторе БН-350

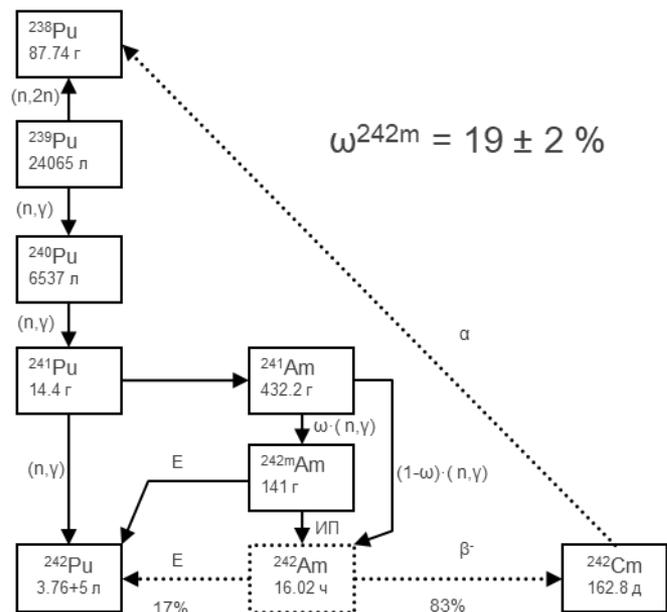
Исследования МОКС топлива в БН-350

Даты	Кол-во образцов	Состав образца	Зона
1981	1	Pu-239 (95%)	ЗМО
1981	2	МОХ (ВВЭР) Pu-239 (74%)	ЗМО
1982 - 1983	9	МОХ: 21% Pu, 79% U	7Pu (LEZ)

Изотопный состав плутония по основным изотопам описывается с точностью 5%

Для минорных изотопов (Am, Cm) уровень расхождений выше – 10% для Am и до 2 раз для Cm

Определен коэффициент ветвления реакции захвата ^{241}Am (Гончаров Р.К., Хомяков Ю.С.)

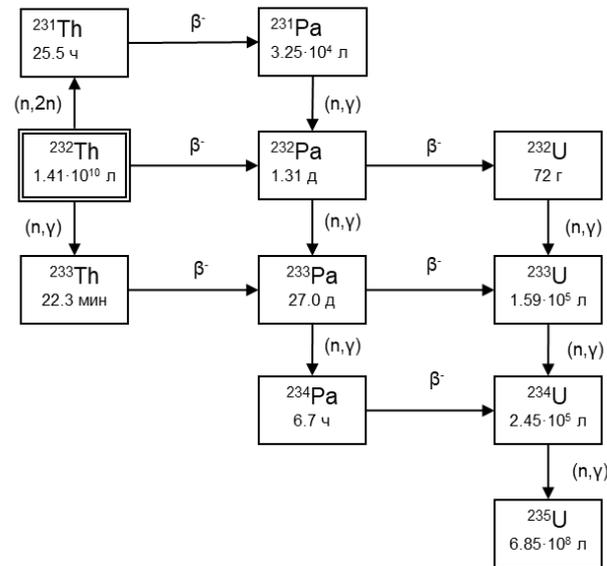


Исследования в обоснование ториевого цикла

Даты	Кол-во образцов	Состав образца	Зона
1987-1988	8	Оксид Th	Наружный экран
1990-1992	6	Металлический Th	Экран
1990-1992	1	Th	ЗМО
1990-1992	2	U-233	ЗМО
1990-1992	1	U-234	ЗМО

Изотопный состав урана-233 при облучении тория описывается с точностью 20% (U-232 -12%)

При облучении урана-233 точность выше :1-4%



Исследовано накопление U-232 при облучении в различных зонах БН-350: минимальное накопление в глубоких слоях бокового экрана

Исследования по трансмутации МА (1)

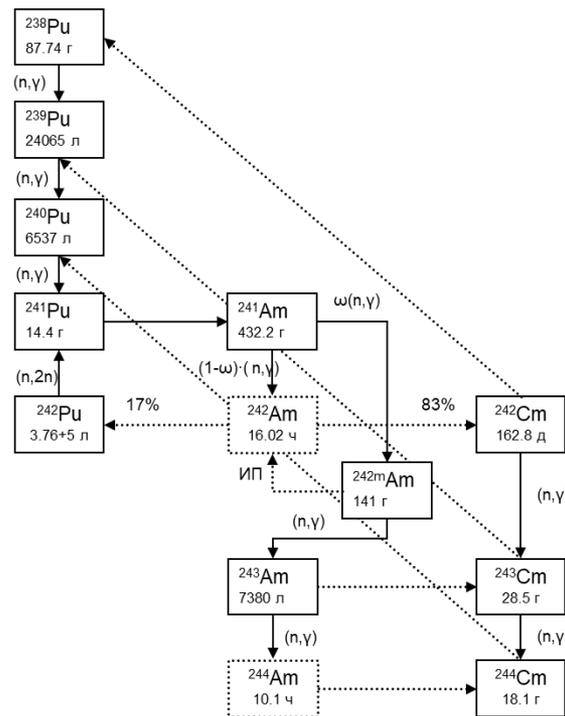
Даты	Кол-во образцов	Состав образца	Зона	Основной нуклид	Выгорание основного нуклида	Накопление дочерних нуклидов	Выгорание
1990-1992	1	Np-237	ЗМО	Am-241	35%	25.5%	9.5%
1990-1992	2	Am-241	ЗМО	Np-237	35%	25%	10%
1990-1992	1	Pu-238	ЗМО	Cm-244	44%	33%	10%
1990-1992	2	Pu-240	ЗМО	Pu-240	20%	9%	11%
1990-1992	2	Cm-244	ЗМО	Pu-238	34%	12%	22%

Исследования трансмутации Am

Изотоп	BNAB-90	BNAB-93	BROND3	ENDF/B6.r7	JENDL3.3
Pu-238	0.94	0.97	1.11	0.92	0.89
Pu-239	0.77	0.79	0.93	0.73	0.73
Pu-242	1.01	1.05	1.20	0.96	0.95
Am-241	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Am-242m	1.30	1.26	1.16	1.25	2.25
Am-243	0.88	0.87	0.93	0.83	1.29
Cm-242	1.09	1.07	0.99	1.06	1.87
Cm-243	0.76	0.73	0.84	0.45	0.61
Cm-244	0.43	0.59	0.60	0.54	0.88

Эксперимент подтвердил суммарное выгорание тяжелых атомов ~9.1-9.5%

Выжигание МА сопровождается большой вероятностью образования вторичных актинидов: ~26-28%



Исследования трансмутации Np, Pu-238

Нуклид	²³⁷ Np, ячейка 89	
	Деление, (выгорание) т.а.	Накопление дочерних актиноидов
²³⁴ U	-	1.3%
²³⁷ Np	6.5%	-
²³⁸ Np	0.04%	-
²³⁶ Pu	-	~2.5·10 ⁻⁵ %
²³⁸ Pu	3.6%	21.9%
²³⁹ Pu	0.2%	1.3%
²⁴⁰ Pu	-	0.05%
Сумма	~10.3%	~24.6%
Трансмутация основного нуклида	~34.9%	

Нуклид	²³⁸ Pu		Сопутствующие нуклиды	
	Деление, выгорание	Накопление вторичных актиноидов	Деление, выгорание	Накопление вторичных актиноидов
²³⁴ U	0.7%	4.7%	-	-
²³⁸ Pu	20.7%	-	-	-
²³⁹ Pu	1.5%	7.1%	6.2%	-
²⁴⁰ Pu	-	0.4%	0.3%	0.9%
²⁴¹ Pu	-	-	0.3%	-
²⁴¹ Am	-	-	-	0.2%
Сумма	~22.3%	~12.3%	~6.8%	~1.1%
Трансмутация нуклида	~34.6%		~7.9%	

Для быстрых реакторов эффективен путь трансмутации МА путем превращения Am и Np в Pu

Получение отношений сечений на актинидах по результатам анализа состава топлива БН-350

- ✓ Разработана методика и получены важные индексы, которые невозможно прямо измерить другими способами (величина $^{239}\alpha$)
- ✓ Полученные результаты являются опорными для российской системы констант БНАБ

Изотоп	σ_x/σ_{f5}	БНАБ-93	БНАБ-93	БНАБ-93
		ЗМО	ЗБО	МОХ подзона
U-235	α	-2 ± 3	10 ± 4	-
U-236	fiss	4 ± 5	1 ± 5	0 ± 6
	capt	5 ± 5	-	-
U-238	fiss	3 ± 3	3 ± 5	2 ± 4
	capt	-1 ± 3	1 ± 3	0 ± 4
	n,2n	-5 ± 11	10 ± 10	-
Np-237	fiss	4 ± 4	-2 ± 5	3 ± 5
	capt	-	-3 ± 6	-
	n,2n	4 ± 6	2 ± 6	-
Pu-239	fiss	1 ± 3	0 ± 3	0 ± 4
	α	2 ± 4	15 ± 6	1 ± 3
	n,2n	-	-	-6 ± 7
Pu-240	fiss	3 ± 5	4 ± 5	-
	capt	0 ± 5	-	9 ± 6
Pu-241	α	-8 ± 11	-	1 ± 6
Am-241	capt	0 ± 8	-	-11 ± 5

Облучательные эксперименты в мире

Nuclide	EBR-II, США	PFR, Великобритания	PHENIX, Франция	JOYO, Япония	BN-350, Россия
Th-232	X	X	X		X
U-233	X	X	X		X
U-234		X	X		X
U-235	X	X	X		X
U-236		X			
U-238	X	X	X		X
Np-237	X	X	X	X	X
Pu-238		X	X		X
Pu-239	X	X	X		X
Pu-240	X	X	X		X
Pu-241	X	X	X		
Pu-242		X	X		
Am-241		X	X	X	X
Am-243		X	X	X	
Cm-243		X			X
Cm-244		X	X	X	X

Ведущие ученые и специалисты

- ✓ Троянов М.Ф. – директор ФЭИ
- ✓ Казанский Ю.А. – начальник отдела 19
- ✓ Звонарев А.В. - начальник лаб. 53
- ✓ Сметанин Э.Я. – начальник радиохимического отдела
- ✓ Павлович В.Б. - СНС
- ✓ Скориков Н.В. – начальник лаборатории БН-350
- ✓ Николаев М.Н. и специалисты лаб. 103
- ✓ Бушуев А.В. и коллеги МИФИ
- ✓ Специалисты НИИАР

Спасибо за внимание !

Хомяков Юрий Сергеевич

Начальник отдела науки АО «Прорыв»,
доктор физ.-мат. наук

Моб. тел.: +7 (926) 371 05 51

E-mail: hus@proryv2020.ru

www.proryv2020.ru

Июнь 2022 г.