



ФЭИ
РОСАТОМ

Определение оптимального соотношения реакторов типа ВВЭР к БН в двухкомпонентном замкнутом топливном цикле

30.05.2024 г, Обнинск

Научно-практическая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (НЕЙТРОНИКА-2024)»

Исанов К.А., Коробейников В.В.

АО ГНЦ РФ - ФЭИ



Следующим этапом развития ядерной энергетики является переход к замкнутому ядерному топливному циклу (ЗЯТЦ).

Использование плутония в тепловых реакторах позволит замкнуть ядерный топливный цикл по делящимся материалам или уменьшить потребление U-235.

Плутоний в тепловых реакторах может использоваться в качестве МОКС-топлива (Pu+U238) или РЕМИКС-топлива (Pu+U235+U238):

- 1) Загрузка 1/3 активной зоны МОКС-топливом
- 2) 100% загрузка активной зоны РЕМИКС-топливом с содержанием плутония не более 5%

Характеристики расчетных моделей



ФЭИ
РОСАТОМ

Табл. 1, Расчетные параметры реактора типа БН

Параметр	Значение
Тепловая мощность, МВт	2800
Электрическая мощность, МВт	1200
Тип топлива	МОХ
Количество ТВС в а,з,, шт	432
ТВЭЛ в ТВС, шт	271
Диаметр ТВЭЛ, см	0,93
Шаг ТВЭЛ, см	1,05
Кратность перегрузок	4
Ежегодное ТВС подпитки/выгрузки, шт	108
Длительность топливной кампании, эфф,сутки	1320
Длительность реакторной микро-кампании, эфф, сутки	330
Нижняя торцевая зона воспроизводства (НТЗВ)	Соответствует ТВС а,з, (её торцевая часть)
Кратность перегрузок НТЗВ	4
ТВС боковой зоны воспроизводства (БЗВ), шт,	174
Кратность перегрузок БЗВ	8
Ежегодное ТВС БЗВ подпитки/выгрузки, шт,	21

Табл. 2, Расчетные параметры реактора типа ВВЭР

Параметр	Значение
Тепловая мощность, МВт	3200
Электрическая мощность, МВт	1200
Тип топлива	REMIX
Количество ТВС в а,з,, шт	163
ТВЭЛ в ТВС, шт	271
Диаметр ТВЭЛ, см	0,93
Шаг ТВЭЛ, см	1,05
Кратность перегрузок	4
Ежегодное ТВС подпитки/выгрузки, шт	40
Длительность топливной кампании, эфф,сутки	1200
Длительность реакторной микро-кампании, эфф, сутки	300
Стартовая концентрация борной кислоты, г/кг	8-10
Среднестационарная за кампанию концентрация борной кислоты, г/кг	4-5
Температура замедлителя, С	310
Плотность замедлителя, г/см3	0,72

Структура системы с реактором типа БН



Схема рецикла РЕМИКС-топлива



Схема рецикла РЕМИКС-топлива с плутонием подпитки



ФЭИ
РОСАТОМ



Доля плутония подпитки в системе

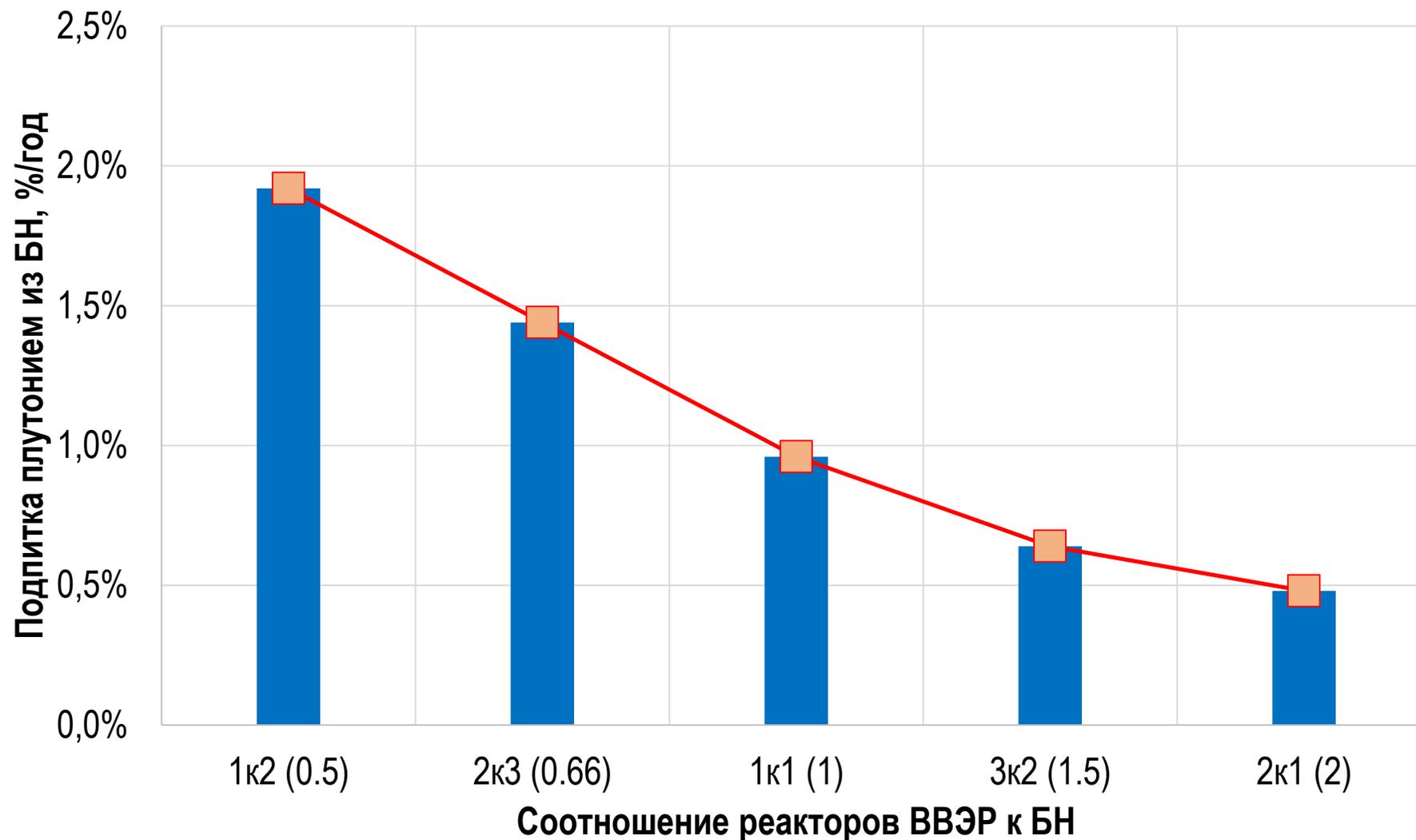


Рис. 1, Подпитка плутония из БН в зависимости от соотношения реакторов в системе

Доля плутония в топливе по мере рецикла

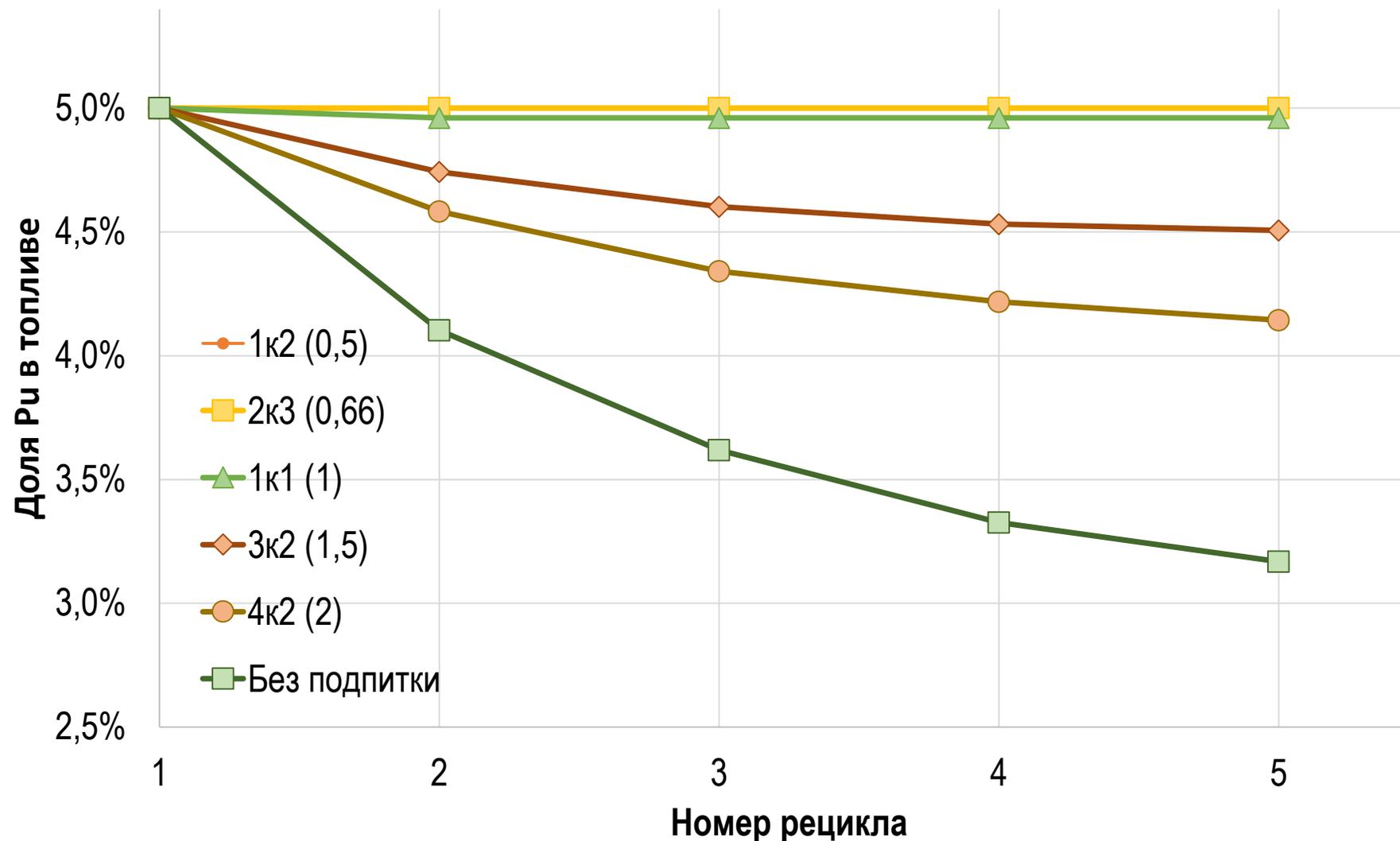


Рис. 2, Доля плутония в топливе по мере рецикла от соотношения реакторов в системе

Доля U-235 в топливе по мере рецикла

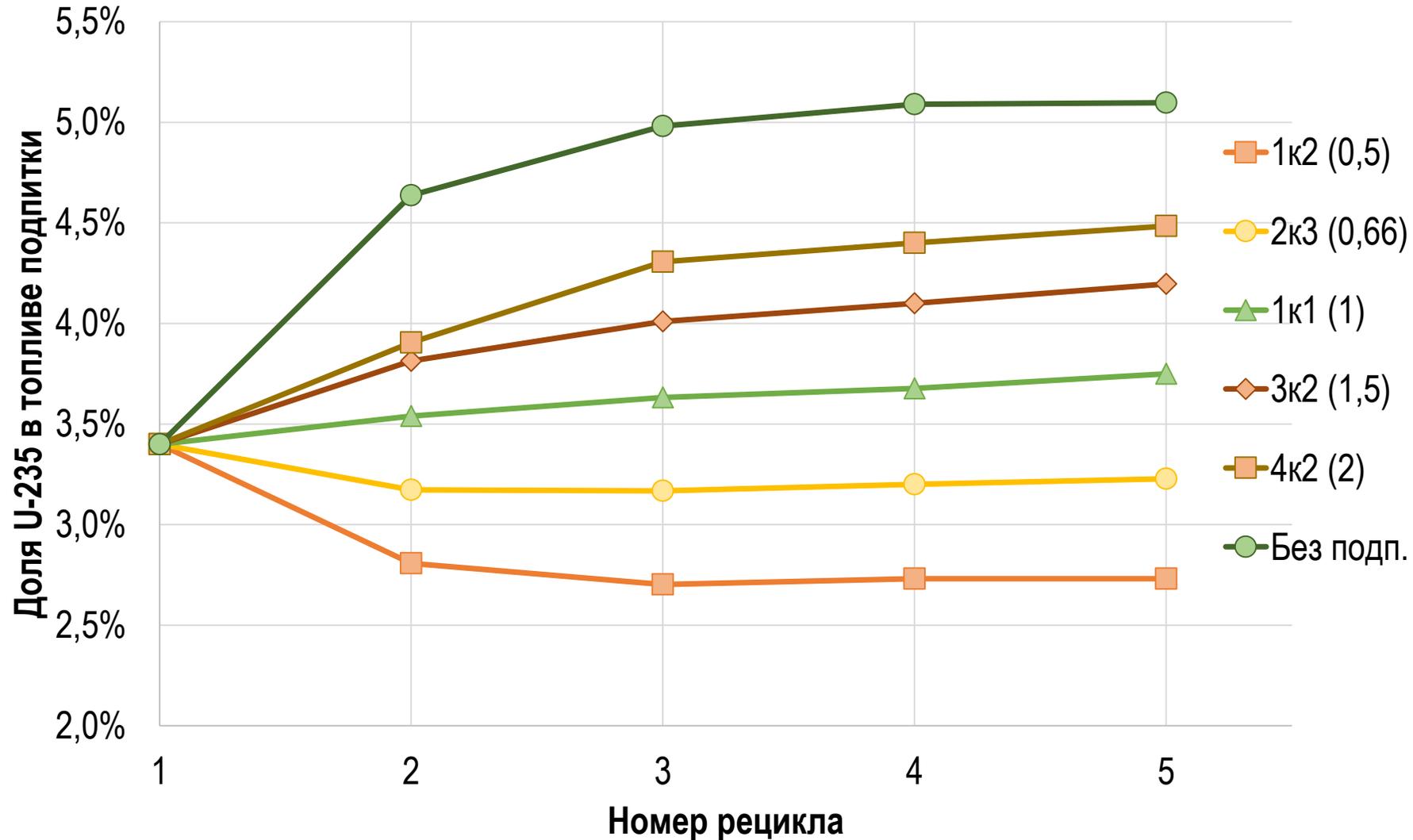


Рис. 3, Доля U-235 в топливе по мере рецикла от соотношения реакторов в системе

Доля U-236 в топливе по мере рецикла

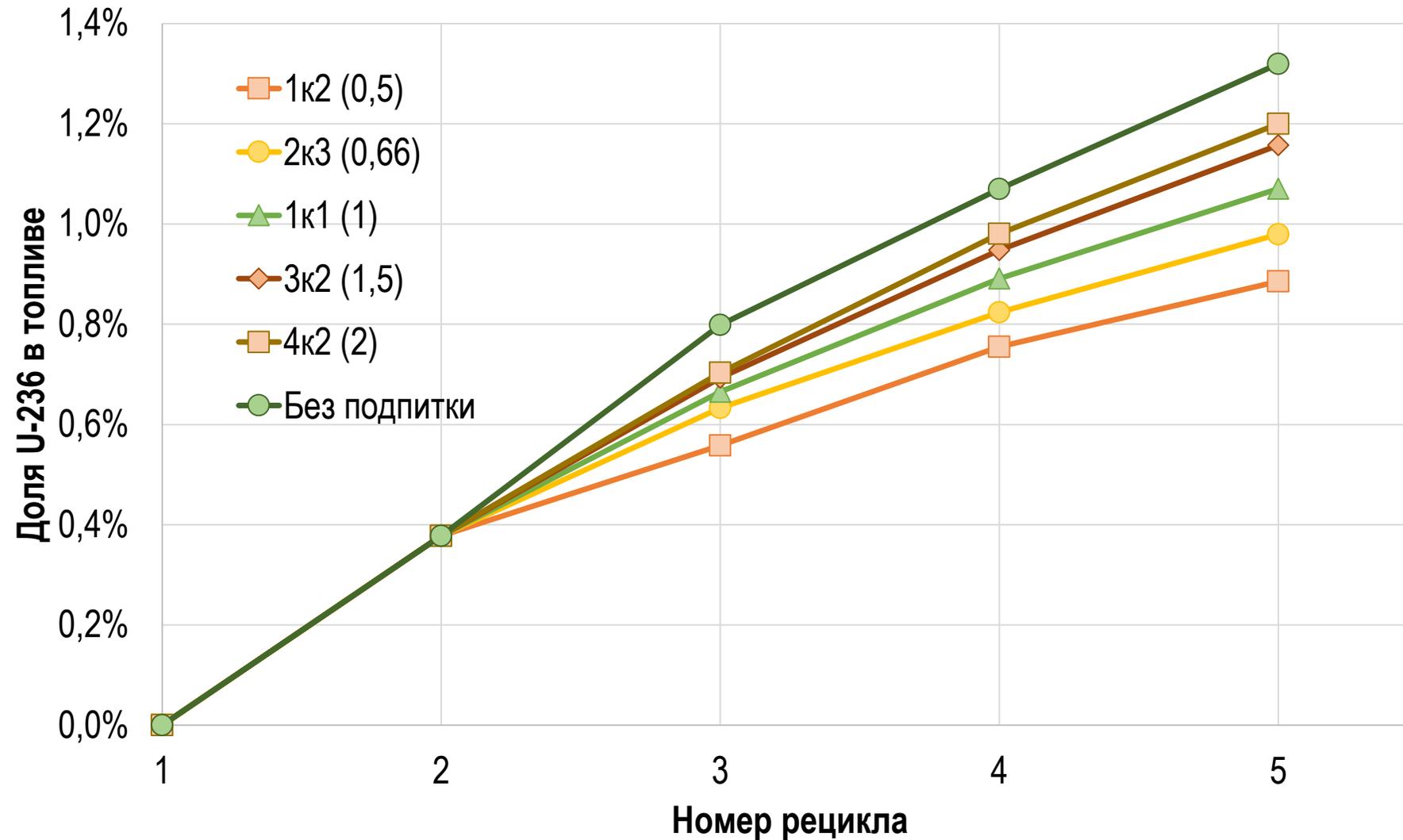


Рис. 4, Доля U-236 в топливе по мере рецикла от соотношения реакторов в системе

Доля U-235+U-236 в топливе по мере рецикла

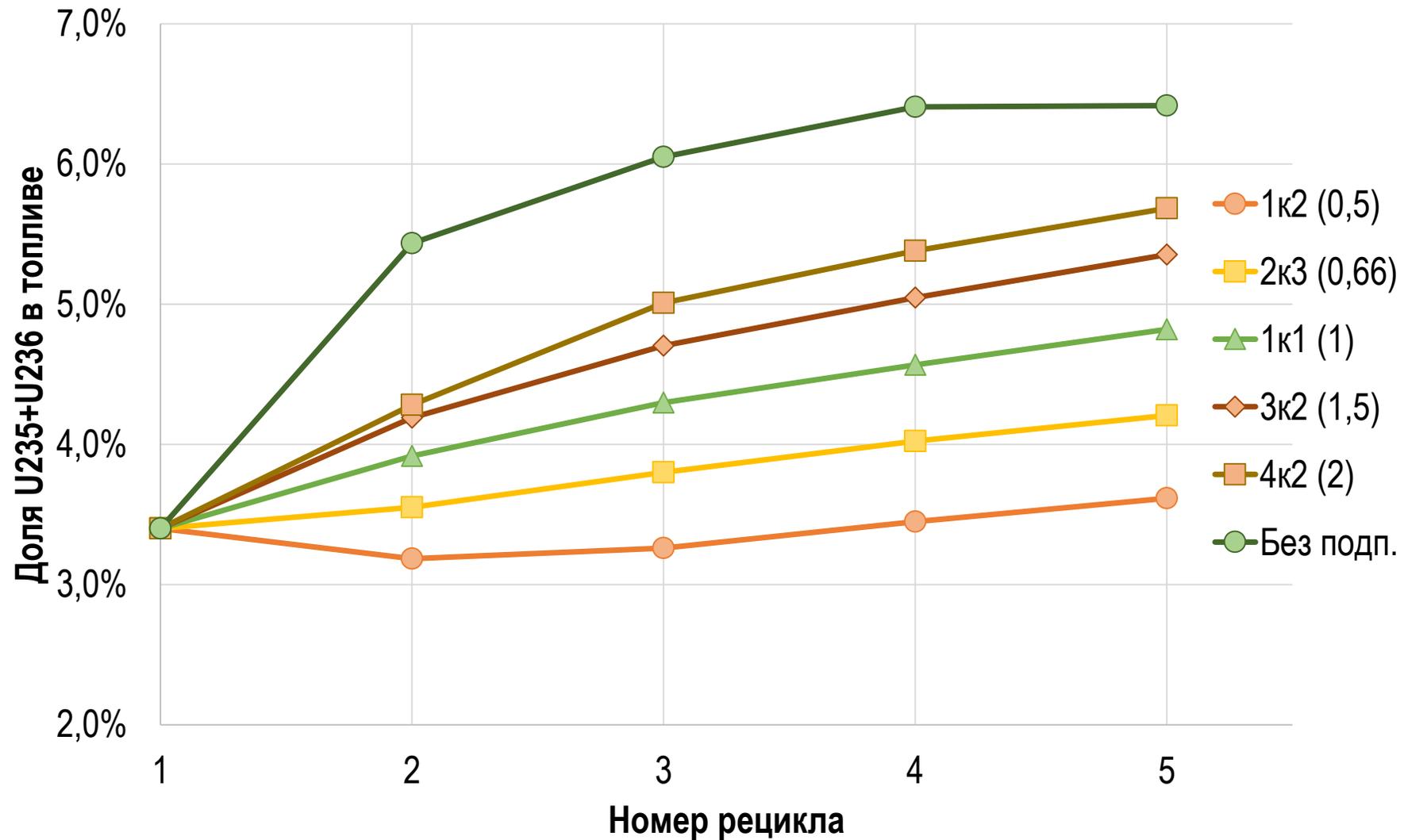


Рис. 5, Доля U-235+U-236 в топливе по мере рецикла от соотношения реакторов в системе

Усредненная подпитка U-235 за пять рециклов

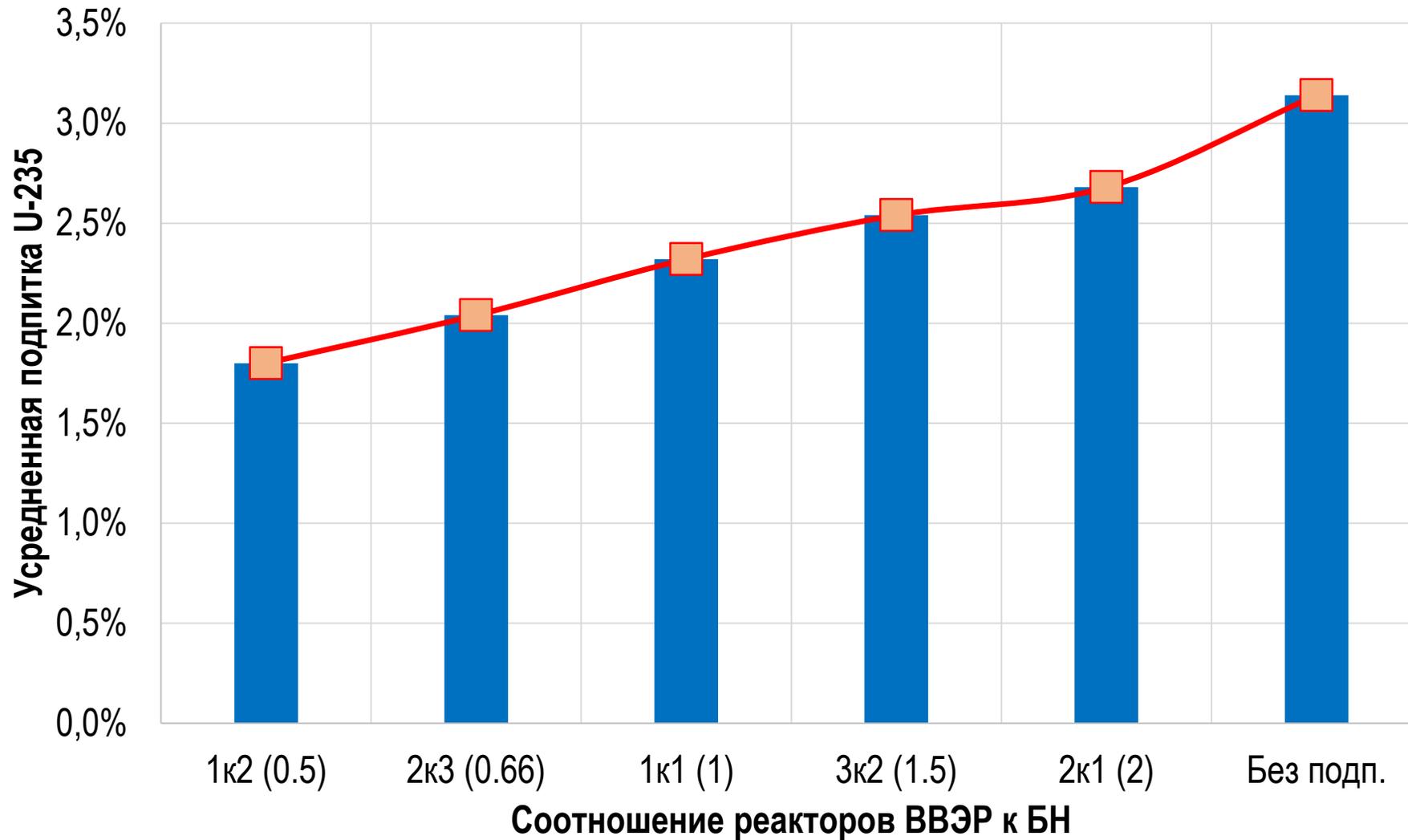


Рис. 6, Усредненная за пять рециклов величина подпитки U-235 в зависимости от соотношения реакторов в системе

Суммарная выгрузка Am за пять рециклов

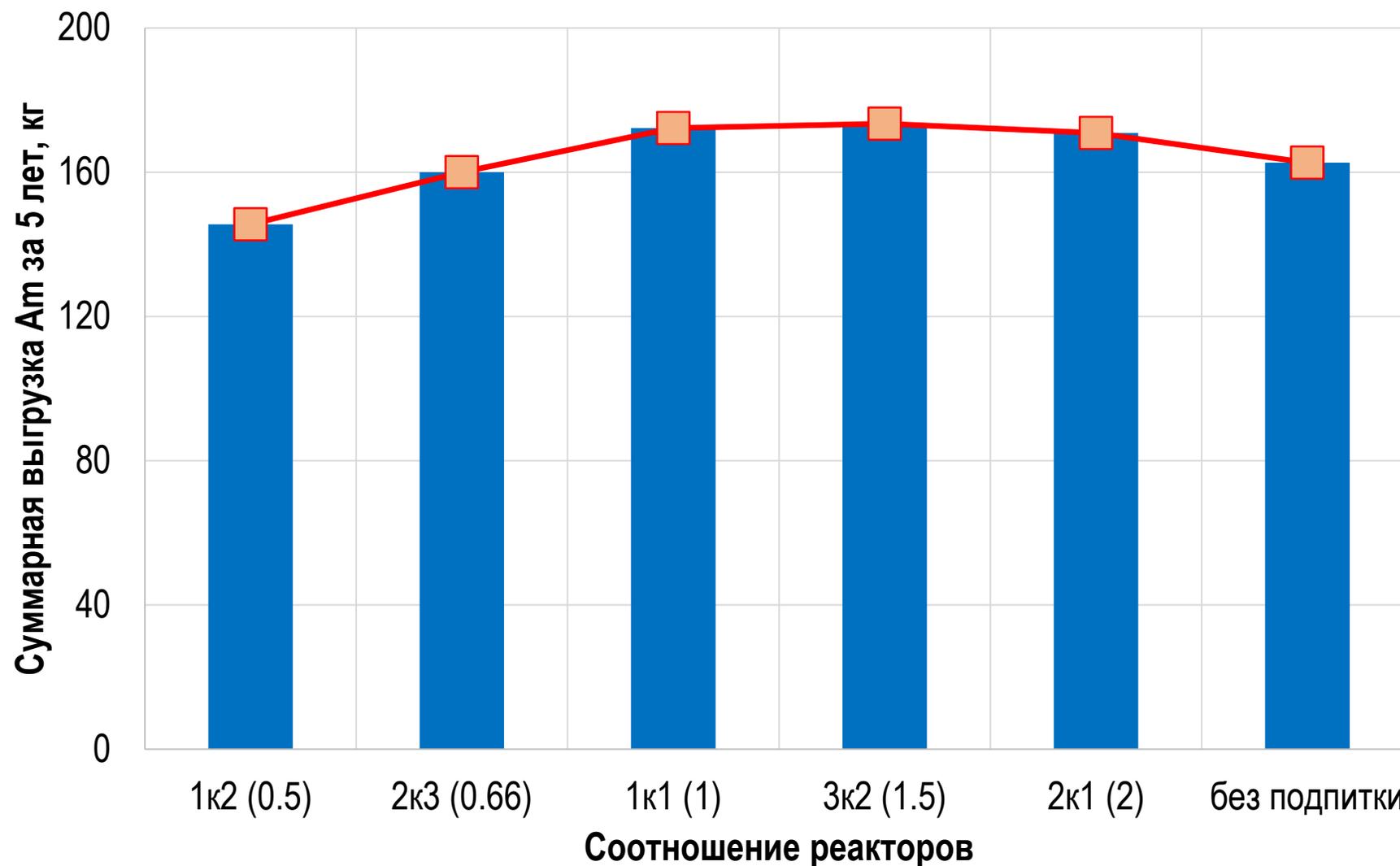


Рис. 7, Суммарная за пять рециклов выгрузка Am в зависимости от соотношения реакторов в системе

Суммарная выгрузка C_m за пять рециклов

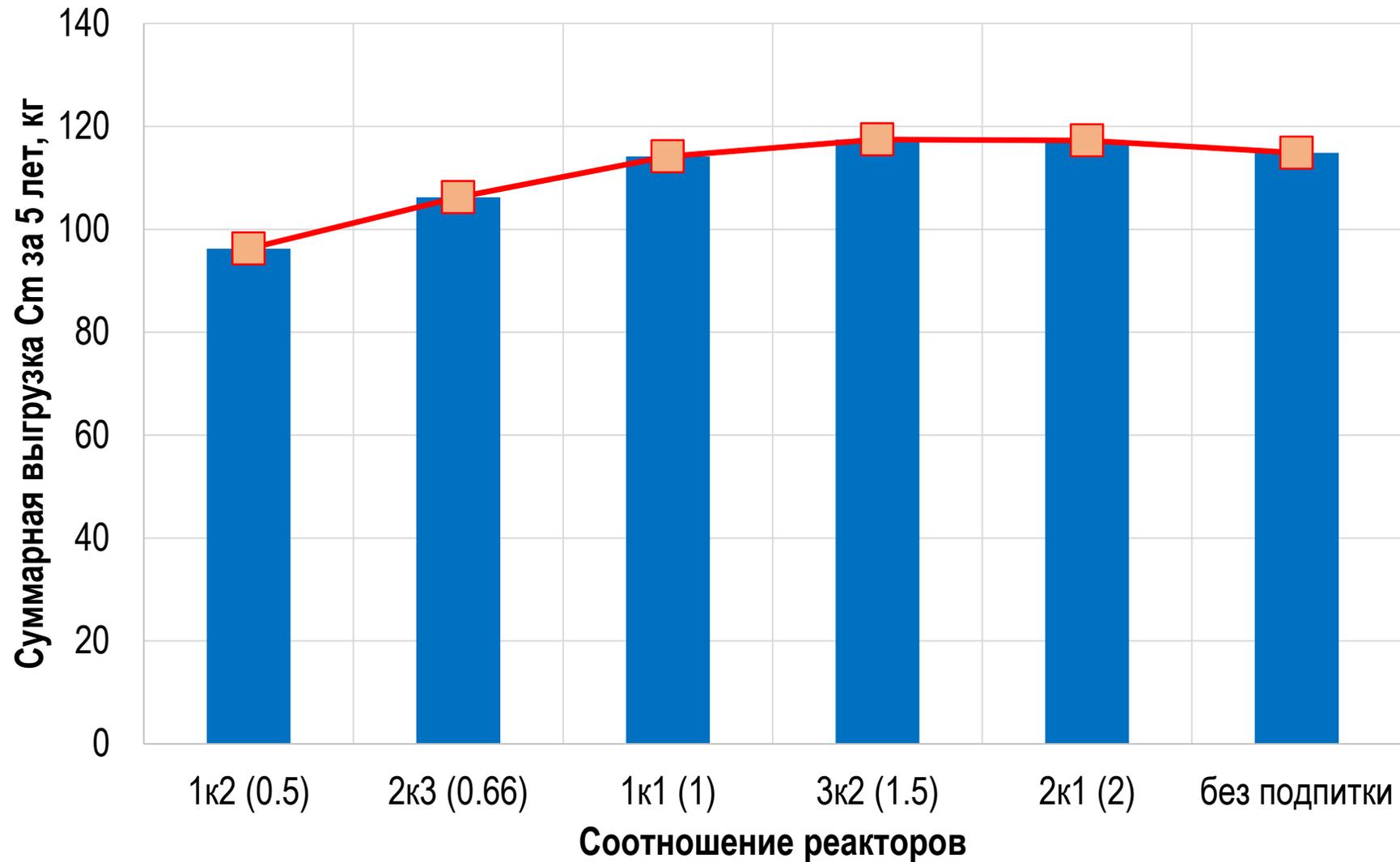


Рис. 8, Суммарная за пять рециклов выгрузка C_m в зависимости от соотношения реакторов в системе

Накопление U-232 на пятый рецкил



Табл. 3, Накопление U-232

Соотношение реакторов в системе	Накопление U-232, 1E-7% U-232/U
1к2 (0,5)	7,27
2к3 (0,66)	7,53
1к1 (1)	7,71
3к2 (1,5)	7,62
2к1 (2)	7,38
РЕМИКС-топливо без подпитки	7,35

Качество рециклируемого плутония (1/6)



Табл. 4, Качество рециклируемого плутония в РЕМИКС-топливе без внешней подпитки

Номер цикла	Качество плутония	Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242
1-ый цикл	Начало кампании	3,0%	55,0%	24,0%	12,0%	6,0%
	Конец кампании(без выдержки)	3,5%	46,1%	24,5%	18,0%	7,9%
2-ой цикл	Начало кампании	3,5%	48,1%	25,6%	14,6%	8,2%
	Конец кампании(без выдержки)	4,6%	45,2%	22,9%	18,0%	9,2%
3-ий цикл	Начало кампании	4,6%	47,2%	23,9%	14,7%	9,6%
	Конец кампании(без выдержки)	5,7%	45,8%	21,4%	17,4%	9,8%
4-ый цикл	Начало кампании	5,7%	47,7%	22,3%	14,1%	10,2%
	Конец кампании(без выдержки)	6,6%	46,3%	20,4%	16,9%	9,8%
5-ый цикл	Начало кампании	6,6%	48,2%	21,2%	13,7%	10,3%
	Конец кампании(без выдержки)	7,3%	46,6%	19,8%	16,5%	9,7%

Качество рециклируемого плутония (2/6)



Табл. 5, Качество рециклируемого плутония в РЕМИКС-топливе в системе 1к2 (0,5)

Номер цикла	Качество плутония	Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242
1-ый цикл	Начало кампании	3,0%	55,0%	24,0%	12,0%	6,0%
	Конец кампании(без выдержки)	3,5%	46,1%	24,5%	18,0%	7,9%
2-ой цикл	Начало кампании	2,2%	66,4%	17,3%	9,0%	5,1%
	Конец кампании(без выдержки)	3,1%	50,1%	23,1%	16,9%	6,8%
3-ий цикл	Начало кампании	1,9%	68,9%	16,3%	8,5%	4,4%
	Конец кампании(без выдержки)	3,2%	50,9%	22,9%	16,7%	6,3%
4-ый цикл	Начало кампании	1,9%	69,4%	16,2%	8,4%	4,0%
	Конец кампании(без выдержки)	3,3%	51,3%	22,8%	16,6%	6,0%
5-ый цикл	Начало кампании	2,0%	69,7%	16,1%	8,3%	3,9%
	Конец кампании(без выдержки)	3,4%	51,2%	22,8%	16,7%	5,9%

Качество рециклируемого плутония (3/6)



Табл. 6, Качество рециклируемого плутония в РЕМИКС-топливе в системе 2к3 (0,66)

Номер цикла	Качество плутония	Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242
1-ый цикл	Начало кампании	3,0%	55,0%	24,0%	12,0%	6,0%
	Конец кампании(без выдержки)	3,5%	46,1%	24,5%	18,0%	7,9%
2-ой цикл	Начало кампании	2,5%	61,8%	19,4%	10,4%	5,9%
	Конец кампании(без выдержки)	3,4%	48,7%	23,3%	17,2%	7,4%
3-ий цикл	Начало кампании	2,5%	63,6%	18,4%	10,0%	5,5%
	Конец кампании(без выдержки)	3,6%	49,4%	23,0%	17,0%	7,1%
4-ый цикл	Начало кампании	2,6%	64,2%	18,2%	9,8%	5,2%
	Конец кампании(без выдержки)	3,8%	49,7%	22,8%	16,9%	6,8%
5-ый цикл	Начало кампании	2,7%	64,3%	18,1%	9,8%	5,1%
	Конец кампании(без выдержки)	4,0%	49,7%	22,8%	16,8%	6,7%

Качество рециклируемого плутония (4/6)



Табл. 7, Качество рециклируемого плутония в РЕМИКС-топливе в системе 1к1 (1)

Номер цикла	Качество плутония	Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242
1-ый цикл	Начало кампании	3,0%	55,0%	24,0%	12,0%	6,0%
	Конец кампании(без выдержки)	3,5%	46,1%	24,5%	18,0%	7,9%
2-ой цикл	Начало кампании	2,8%	57,2%	21,5%	11,9%	6,6%
	Конец кампании(без выдержки)	3,7%	47,3%	23,5%	17,5%	8,0%
3-ий цикл	Начало кампании	3,0%	58,3%	20,5%	11,5%	6,7%
	Конец кампании(без выдержки)	4,1%	47,7%	23,0%	17,2%	7,9%
4-ый цикл	Начало кампании	3,3%	58,7%	20,1%	11,3%	6,7%
	Конец кампании(без выдержки)	4,5%	47,9%	22,8%	17,1%	7,8%
5-ый цикл	Начало кампании	3,6%	58,8%	19,9%	11,2%	6,6%
	Конец кампании(без выдержки)	4,8%	48,1%	22,6%	16,9%	7,7%

Качество рециклируемого плутония (5/6)



Табл. 8, Качество рециклируемого плутония в РЕМИКС-топливе в системе 3к2 (1,5)

Номер цикла	Качество плутония	Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242
1-ый цикл	Начало кампании	3,0%	55,0%	24,0%	12,0%	6,0%
	Конец кампании(без выдержки)	3,5%	46,1%	24,5%	18,0%	7,9%
2-ой цикл	Начало кампании	3,0%	54,6%	22,7%	12,7%	7,1%
	Конец кампании(без выдержки)	3,9%	46,5%	23,4%	17,7%	8,4%
3-ий цикл	Начало кампании	3,4%	55,1%	21,6%	12,4%	7,6%
	Конец кампании(без выдержки)	4,4%	46,9%	22,7%	17,4%	8,6%
4-ый цикл	Начало кампании	3,8%	55,5%	20,9%	12,1%	7,7%
	Конец кампании(без выдержки)	4,9%	47,2%	22,3%	17,1%	8,5%
5-ый цикл	Начало кампании	4,2%	55,8%	20,5%	12,0%	7,6%
	Конец кампании(без выдержки)	5,4%	47,2%	22,0%	17,0%	8,4%

Качество рециклируемого плутония (6/6)



Табл. 9, Качество рециклируемого плутония в РЕМИКС-топливе в системе 2к1 (2)

Номер цикла	Качество плутония	Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242
1-ый цикл	Начало кампании	3,0%	55,0%	24,0%	12,0%	6,0%
	Конец кампании(без выдержки)	3,5%	46,1%	24,5%	18,0%	7,9%
2-ой цикл	Начало кампании	3,1%	53,1%	23,3%	13,1%	7,3%
	Конец кампании(без выдержки)	4,0%	46,1%	23,4%	17,8%	8,7%
3-ий цикл	Начало кампании	3,6%	53,4%	22,1%	12,9%	8,0%
	Конец кампании(без выдержки)	4,6%	46,7%	22,5%	17,4%	8,9%
4-ый цикл	Начало кампании	4,1%	54,0%	21,2%	12,6%	8,2%
	Конец кампании(без выдержки)	5,2%	46,8%	21,9%	17,2%	8,9%
5-ый цикл	Начало кампании	4,6%	54,2%	20,7%	12,3%	8,2%
	Конец кампании(без выдержки)	5,7%	47,0%	21,6%	17,0%	8,7%



Табл. 10, Доля подпитки U-235 от соотношения реакторов в системе

Соотношение реакторов в системе	1 БН	2 БН	3 БН	Потребление U-235 в стандартном РЕМИКС-топливе
1 ВВЭР	2,3%	1,8%		3,2
2 ВВЭР	2,7%	2,3%	2,0%	
3 ВВЭР		2,5%	2,3%	

Табл. 11, Эффект экономии U-235 от соотношения реакторов в системе

Соотношение реакторов в системе	1 БН	2 БН	3 БН	Экономия U-235 в стандартном РЕМИКС-топливе
1 ВВЭР	49%	60%		30%
2 ВВЭР	41%	49%	55%	
3 ВВЭР		31%	49%	



Табл. 12, Результаты

Соотношение реакторов в системе	Среднее потребление U-235	Экономия U-235	Наработка МА, кг/5 лет
1к2 (0,5)	1,8%	60%	240
2к3 (0,66)	2%	55%	265
1к1 (1)	2,3%	49%	285
3к2 (1,5)	2,5%	41%	290
2к1 (2)	2,7%	39%	285
РЕМИКС-топливо без подпитки	3,2%	30%	280

The background is a solid blue color. On the right side, there is a decorative graphic consisting of numerous thin, white, curved lines that fan out from a point near the bottom right towards the top right, creating a sense of motion or a stylized wave.

Спасибо за внимание

Исанов Кирилл Алексеевич, инженер-исследователь