

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТОПЛИВА РБМК-1000 С ПОНИЖЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЭРБИЯ

Алимов Ю.В., Кузнецов П.Б., Рождественский И.М., Слободчиков А.В.,
Давыдов В.К., Жирнов А.П., Лебедев С.С., Рождественский М.И.
(АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Введение

В течение длительного времени энергетические реакторы РБМК-1000 используются не только для производства электроэнергии, но и для наработки радионуклида ^{60}Co . В настоящее время ведутся работы по обоснованию производства короткоживущих радиоизотопов медицинского назначения. Потенциальные объемы производства радионуклидов с использованием реакторов РБМК-1000 являются значительными.

Необходимым условием безопасной эксплуатации реакторов РБМК-1000 является поддержание парового коэффициента реактивности (ПКР) в установленном эксплуатационном диапазоне (0,3–0,8) $\beta_{\text{эф}}$.

В процессе длительной кампании реактора РБМК-1000 радиационные повреждения графита приводят к деформации графитовой кладки и искривлению топливных каналов (ТК). Ремонт графитовой кладки осуществляется путем продольной резки графитовых блоков. Резка и удаление части графита позволяет уменьшить искривление ТК и восстановить их работоспособность. Уменьшение массы графита приводит к увеличению уран-графитового отношения и уменьшению ПКР.

Как показали результаты расчетных исследований и опыт эксплуатации энергоблока № 2 Курской АЭС, полная выгрузка кобальтовых дополнительных поглотителей (ДП) из активной зоны реактора РБМК-1000 может быть недостаточной для того, чтобы сохранить ПКР в эксплуатационном диапазоне в течение 45 – 50 лет эксплуатации реактора. Поддержание ПКР в эксплуатационном диапазоне при эксплуатации энергоблока требует снижения непроизводительного поглощения в активной зоне.

Ключом к безопасной и эффективной эксплуатации реакторов РБМК-1000 является снижение начального содержания эрбия в топливе, что позволяет компенсировать снижение ПКР в результате ремонта кладки в процессе длительной кампании, сохранить объемы производства радионуклида ^{60}Co и организовать производство короткоживущих радиоизотопов медицинского назначения.

В реакторах РБМК-1000 применяется уран-эрбиевое топливо на основе регенерированного урана обогащением 2,8 % по изотопу ^{235}U с весовым содержанием эрбия 0,6 %. Освоена промышленная технология изготовления тепловыделяющих сборок (ТВС) с уран-эрбиевым топливом, в котором обогащение топлива составляет от 2,5 % до 3,2 %, массовое содержание эрбия - от 0,3 % до 0,7 %.

1. Определение мощности свежих ТВС

Мощность свежих ТВС при выборе состава нового уран-эрбиевого топлива является определяющей характеристикой. Снижение содержания поглотителя (эрбия) в топливе приводит к увеличению мощности свежих ТВС. Увеличение мощности свежих ТВС допустимо в пределах, которые определяются возможностями компенсации за счет перераспределения стержней РР и соответствующими изменениями при планировании перегрузок топлива.

Определение параметров свежих ТВС в равновесно отравленном состоянии с различным составом уран-эрбиевого топлива (УЭТ) проведены на модели двумерной полячейки 4x4 по ПК MCU-RBMK. В полячке 13 ячеек с ТВС со штатным топливом (2,8 % + 0,6 % Er) со средним выгоранием топлива 15 МВт·сут/кг, две ячейки КРО с извлеченными РО и одна ячейка ТВС с пониженным содержанием эрбия. Средняя мощность ТВС окружения составляет 2,4 МВт.

В таблице 1 представлены значения мощности и коэффициента размножения нейтронов в ячейке (K_{∞}) свежих ТВС с различным составом УЭТ в горячем отравленном состоянии.

Таблица 1

Мощность и K_{∞} СТВС

Состав топлива ТВС	MCU-RBMK	
	W, МВт	K_{∞}
Топливо обогащением 2,8 %		
2,8 % ^{235}U + 0,6 % Er; (0,3 % ^{236}U)	2,75	1,150
2,8 % ^{235}U + 0,6 % Er; (0,6 % ^{236}U)	2,76	1,149
2,8 % ^{235}U + 0,6 % Er; (1,0 % ^{236}U)	2,81	1,158
2,8 % ^{235}U + 0,35 % Er; (0,6 % ^{236}U)	2,98	1,219
Топливо обогащением 2,6 %		
2,6 % ^{235}U + 0,41 % Er; (0,3 % ^{236}U)	2,76	1,178
2,6 % ^{235}U + 0,41 % Er; (0,6 % ^{236}U)	2,80	1,182
2,6 % ^{235}U + 0,35 % Er; (0,7 % ^{236}U)	2,85	1,198
Топливо обогащением 2,7 %		
2,7 % ^{235}U + 0,3 % Er; (0,6 % ^{236}U)	2,97	1,225
2,7 % ^{235}U + 0,35 % Er; (0,6 % ^{236}U)	2,91	1,209
2,7 % ^{235}U + 0,4 % Er; (0,6 % ^{236}U)	2,87	1,195
2,7 % ^{235}U + 0,45 % Er; (0,6 % ^{236}U)	2,84	1,181

Мощность свежей ТВС с топливом (2,8 % ^{235}U + 0,6 % Er) при среднем содержании ^{236}U 0,6 % составляет 2,76 МВт. Снижение содержания эрбия с 0,6 % до 0,35 % в топливе обогащением 2,8 % приводит к увеличению мощности свежей СТВС с 2,76 МВт до 2,98 МВт.

Снижение обогащения топлива с 2,8 % до 2,7 % при содержании эрбия 0,35 % снижает мощность СТВС до 2,91 МВт. По результатам расчетов увеличение мощности свежей ТВС с топливом (2,7 % ^{235}U + 0,35 % Er) по сравнению с топливом (2,8 % ^{235}U + 0,6 % Er) составляет 0,15 МВт.

Небольшое увеличение мощности СТВС в процессе перегрузок при переходе на топливо с пониженным содержанием эрбия (2,7 % ^{235}U + 0,35 % Er) по сравнению со штатным топливом (2,8 % ^{235}U + 0,6 % Er) может компенсироваться стержнями РР и УСП. В методике планировании перегрузок целесообразно учесть отличия параметров свежих СТВС с пониженным содержанием эрбия.

Снижение содержания эрбия до 0,3 % (2,7 % ^{235}U + 0,3 % Er) приводит к увеличению мощности СТВС до 2,97 МВт. Для УЭТ (2,6 % ^{235}U + 0,35 % Er) мощность СТВС составляет 2,85 МВт.

Более точная оценка мощностей СТВС с УЭТ (2,7 % + 0,35 % Er) получена по результатам полномасштабных трехмерных расчетов реактора по кодам MCU-RBMK и SADC0.

В качестве исходных состояний используются реальные состояния реакторов РБМК-1000 энергоблока № 4 Курской АЭС (БД ИИС Скала-микро 04.11.2022), энергоблока № 3 Ленинградской АЭС (БД ИИС Скала-микро 05.12.2022), энергоблока № 1 Смоленской АЭС (БД ИИС Скала-микро 04.12.2022).

В каждом реакторе выбраны пять ячеек ТК, в которые одновременно загружаются пять свежих ТВС с УЭТ (2,7 % + 0,35 % Ер) и с УЭТ (2,8 % + 0,6 % Ер).

Результаты расчетов мощностей свежих ТВС при загрузке в реакторы РБМК-1000 приведены в таблицах 2-4.

Таблица 2

Мощность свежих ТВС, МВт (Энергоблок № 4 КуАЭС)

Ячейка ТК	MCU-RBMK			SADCO		
	2,8 + 0,6	2,7+0,35	Отл, МВт	2,8 + 0,6	2,7+0,35	Отл, МВт
55-41	2,82	3,00	0,18	2,77	2,94	0,18
52-36	2,89	3,08	0,19	2,83	3,00	0,17
30-44	2,79	3,00	0,21	2,85	3,04	0,19
17-45	2,76	3,01	0,25	2,86	3,11	0,25
15-27	2,66	2,89	0,23	2,84	3,09	0,25
Среднее	2,78	3,00	0,22	2,83	3,04	0,21

Таблица 3

Мощность свежих ТВС, МВт (Энергоблок № 3 ЛАЭС)

Ячейка ТК	MCU-RBMK			SADCO		
	2,8 + 0,6	2,7+0,35	Отл, МВт	2,8 + 0,6	2,7+0,35	Отл, МВт
61-42	2,88	3,05	0,17	2,82	3,00	0,18
46-47	2,77	2,89	0,12	2,62	2,78	0,16
41-61	2,62	2,75	0,13	2,77	2,93	0,15
36-17	2,73	2,92	0,19	2,82	2,96	0,14
20-31	2,72	2,97	0,25	2,78	2,92	0,14
Среднее	2,74	2,92	0,18	2,76	2,92	0,16

Таблица 4

Мощность свежих ТВС, МВт (Энергоблок № 1 САЭС)

Ячейка ТК	MCU-RBMK			SADCO		
	2,8 + 0,6	2,7+0,35	Отл, МВт	2,8 + 0,6	2,7+0,35	Отл, МВт
61-41	2,79	2,93	0,14	2,77	2,99	0,12
55-50	2,71	2,89	0,18	2,72	2,91	0,19
50-25	2,81	3,02	0,21	2,80	2,94	0,14
32-60	2,70	2,90	0,20	2,76	2,92	0,16
23-33	2,69	2,75	0,16	2,66	2,76	0,10
Среднее	2,74	2,90	0,16	2,74	2,90	0,16

Средняя оценка увеличения мощности свежих ТВС с УЭТ (2,7 % + 0,35 % Ер) по сравнению с УЭТ (2,8 % + 0,6 % Ер) по ПК MCU-RBMK составляет 0,19 МВт. Средняя оценка увеличения мощности свежих ТВС с УЭТ (2,7 % + 0,35 % Ер) по сравнению с УЭТ (2,8 % + 0,6 % Ер) по ПК SADCO составляет 0,17 МВт.

Предварительная оценка увеличения мощности свежих ТВС, полученная по ПК MCU-RBMK на модели двумерной полячейки, составляет 0,15 МВт и согласуются с результатами реакторных расчетов.

Для проверки возможности сохранения мощности свежих ТВС на исходном уровне на примере энергоблока № 4 Курской АЭС по ПК SADCO проведены расчеты компенсации мощностей свежих ТВС путем погружения ближайшего стержня РР. ОЗР поддерживается путем извлечения других стержней РР при сохранении исходного значения K_r . Погружение ближайшего стержня РР выполняется до достижения

исходного значения мощности при загрузке свежих ТВС (2,8 % + 0,6 % Er). Результаты расчетов приведены в таблице 5.

Таблица 5

Компенсация мощностей ТК

Ячейка		Н _{pp} , м		W, МВт	W, МВт	W _{кор} , МВт
ТК	РР	Исх.	Кор.	2,8+0,6	2,7+0,35	2,7+0,35
55-41	56-41	1,00	1,80	2,77	2,94	2,76
52-36	52-35	0,63	1,60	2,83	3,00	2,79
30-44	30-43	0,00	1,60	2,85	3,04	2,79
17-45	16-45	1,25	2,25	2,86	3,11	2,82
15-27	14-27	2,10	2,75	2,84	3,09	2,81

Анализ результатов показывает, что компенсация мощности свежих ТВС может обеспечивать данный параметр на уровне штатного топлива, которое в данный момент успешно используется в активных зонах реакторов РБМК-1000.

2. Определение кампании ТВС

Расчеты изменения изотопного состава УЭТ с пониженным содержанием эрбия проведены на модели бесконечной ячейки топливного канала с использованием независимых программных средств ПК MCU-RBMK и программы WIMS-D4.

С использованием независимых программных средств ПК MCU-RBMK и программы WIMS-D4 проведены расчеты ячейки с выгоранием топлива (2,7 % + 0,35 % Er) и топлива (2,8 % + 0,6 % Er).

Зависимости K_{∞} от выгорания топлива приведены на рисунке 1 (значком W отмечены результаты WIMS-D4).

Значения коэффициента размножения нейтронов (K_{∞}) в ячейке СТВС для штатного топлива (2,8 % + 0,6 % Er) и для топлива (2,7 % + 0,35 % Er) составляют 1,149 и 1,209 соответственно.

Бóльшие значения K_{∞} в СТВС с топливом (2,7 % + 0,35 % Er) обеспечивают больший рост ОЗР при перегрузке, уменьшение темпа перегрузок и увеличение выгорания топлива.

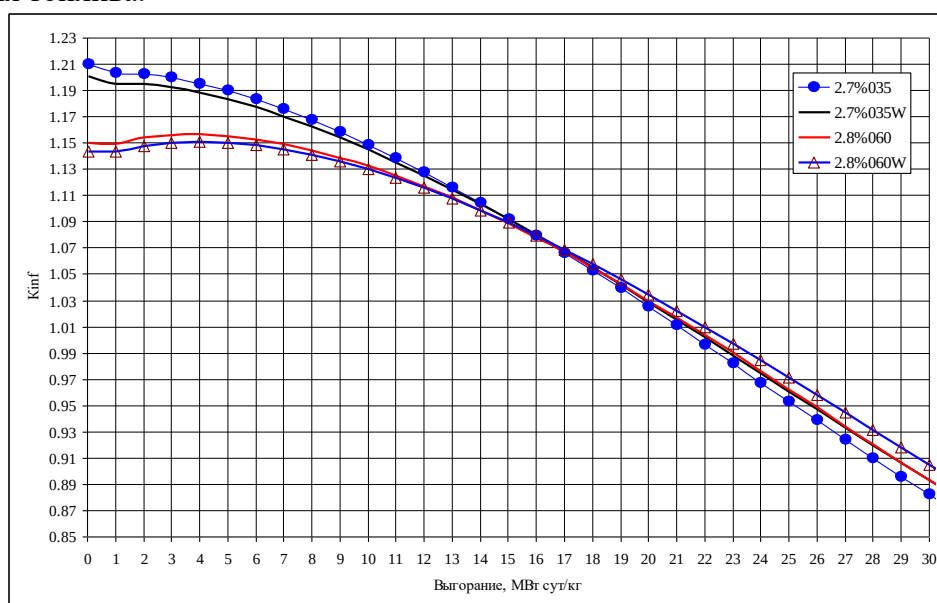


Рис. 1. Зависимости K_{∞} от выгорания топлива

Начальные значения K_{∞} в ячейке (отравленное состояние) составляют 1,209 и 1,195 (топливо 2,7 % + 0,35 % Ер) и 1,149 и 1,140 (топливо 2,8 % + 0,6 % Ер), относительные отклонения составляют 1 %.

Хорошо согласуется характер зависимости K_{∞} от выгорания для двух типов топлива. Для УЭТ (2,7 % + 0,35 % Ер) характерно монотонное снижение K_{∞} в процессе выгорания топлива. При выгорании топлива до 20 МВт·сут/кг значение K_{∞} в ячейке с топливом (2,7 % + 0,35 % Ер) превышает аналогичные значения для топлива (2,8 % + 0,6 % Ер). Для топлива (2,8 % + 0,6 % Ер) при выгорании менее 7 МВт·сут/кг изменения K_{∞} невелики, при выгорании более 7 МВт·сут/кг значение K_{∞} монотонно уменьшается.

На рисунке 2 приведены зависимости ядерной концентрации ^{167}Er (10^{24} см^{-3}) от выгорания топлива для топлива (2,8 % + 0,6 % Ер) и (2,7 % + 0,35 % Ер), полученные по ПК MCU-RBMK и программе WIMS-D4.

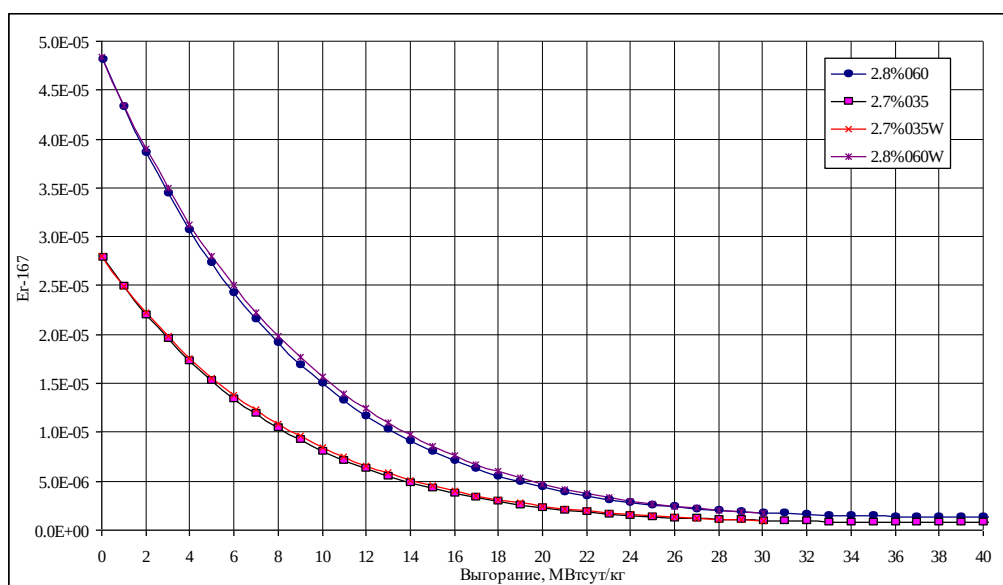


Рис. 2. Ядерная концентрация ^{167}Er в зависимости от выгорания топлива

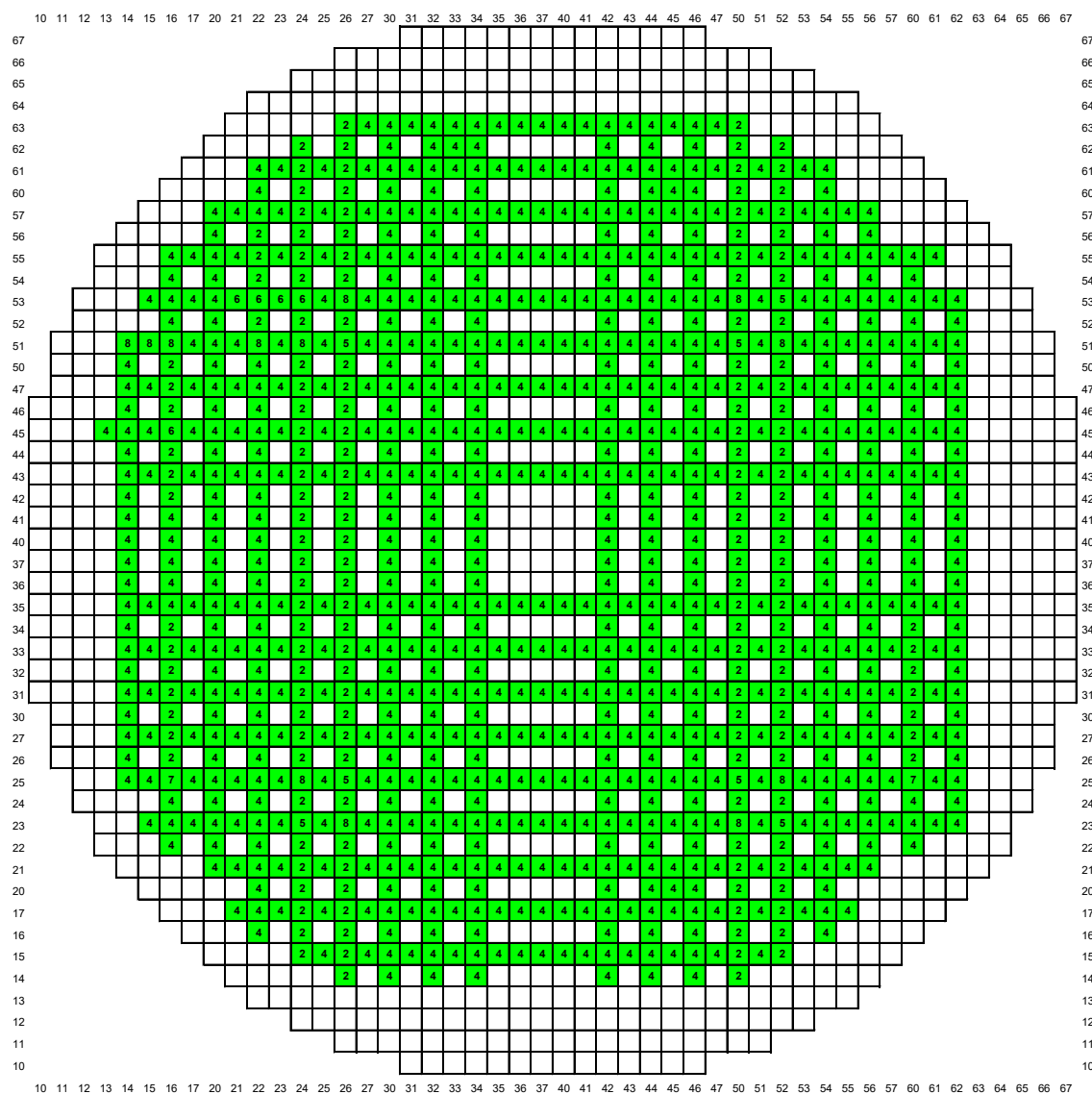
Результаты расчетов K_{∞} и ядерной концентрации ^{167}Er по ПК MCU-RBMK (модуль BURNUP) и WIMS-D4 находятся в хорошем согласии.

Результаты расчетов нуклидного состава топлива (2,7 % + 0,35 % Ер) используются в библиотеке нуклидного состава ПК MCU-RBMK для полномасштабных реакторных расчетов. Библиотека нейтронных макросечений и коэффициентов диффузии для новых типов топлива с пониженным содержанием эрбия в ПК SADCO получена из ячеечных и реакторных расчетов ПК MCU-RBMK.

3. Определение НФХ при загрузке топлива с пониженным содержанием эрбия

Расчетное моделирование загрузки УЭТ (2,7 %+ 0,35 % Ер) выполнено с использованием ПК SADCO (модуль REPLAN). В качестве исходного состояния для расчетного моделирования загрузки УЭТ (2,7 %+ 0,35 % Ер) используется рабочее состояние реактора РБМК-1000 энергоблока № 4 Курской АЭС на номинальном уровне мощности, зафиксированное ИИС «Скала-микро» 04.11.2022.

Выполнено расчетное моделирование полного перевода реактора на УЭТ (2,7 % + 0,35 % Ер). В сформированном состоянии моделируется ремонт 977 графитовых ячеек. Схема ремонта графитовых колонн показана на рисунке 3. Масса удаленного при ремонте графита составляет 63000 кг. Результаты расчетов нейтронно-физических характеристик реактора на номинальном уровне мощности с использованием ПК MCU-RBMK и ПК SADCO приведены в таблице 6.



- 2 – ячейки, разрезаемые двойным резом 18 мм;
- 4 – ячейки, разрезаемые двойным резом 18 мм;
- 6 – ячейки, разрезаемые на 4 части и дополнительным резом 18 мм;
- 7 – ячейки, разрезаемые на 4 части и дополнительным резом 18 мм;
- 8 – ячейки, разрезаемые на 4 части двойным резом 18 мм;

Рис. 3. – Схема ремонта графитовых колонн

Таблица 6

НФХ реактора с полномасштабной загрузкой ТВС (2,7 % + 0,35 % Er)

Параметр	SADCO	MCU-RBMK
Количество отремонтированных ячеек ТК	977	977
Количество ТВС (2,7 % + 0,35 % Er)	1617	1617
Среднее выгорание топлива, МВт·сут/кг	14,59	14,59
Тепловая мощность реактора, МВт	3200	3200
$K_{эф}$	1,0001	1,0003
Коэффициент радиальной неравномерности энерговыделения	1,41	1,43
Коэффициент аксиальной неравномерности энерговыделения	1,17	1,18
Максимальная мощность ТК, МВт	2,80	2,82
Максимальная линейная мощность твэл, Вт/см	315	317
Оперативный запас реактивности, $\beta_{эф}$	3,91	3,80
Паровой коэффициент реактивности, $\beta_{эф}$	0,33	0,30
Быстрый мощностной коэффициент реактивности, $10^{-4} \beta_{эф}/\text{МВт}$	-2,25	-2,56
Коэффициент реактивности по температуре топлива, $10^{-3} \beta_{эф}/^{\circ}\text{C}$	-2,43	-2,63
Коэффициент реактивности по температуре графита, $10^{-3} \beta_{эф}/^{\circ}\text{C}$	5,68	6,78
Эффект обезвоживания КМПЦ, $\beta_{эф}$	0,44	0,44
Эффект обезвоживания ТК с ТВС, $\beta_{эф}$	-0,04	-0,12
Эффект заполнения ТК с ТВС теплоносителем ($\gamma = 0,78 \text{ г/см}^3$), $\beta_{эф}$	0,17	0,10
Эффект обезвоживания КОСУЗ, $\beta_{эф}$	0,68	0,69
Эффективность АЗ, $\beta_{эф}$	3,89	3,55
Эффективность АЗ-1, $\beta_{эф}$	3,08	3,06
Эффективность БСМ, $\beta_{эф}$	11,6	12,1
Доля запаздывающих нейтронов ($\beta_{эф}$)	0,00577	0,00566
Подкритичность, %	3,7	3,6

Результаты расчетов ПК MCU-RBMK и ПК SADCO совпадают в пределах погрешности расчетов. Нейтронно-физические характеристики реактора находятся в эксплуатационных диапазонах.

Заключение

В данной работе показано, что полный перевод реакторов RBMK-1000 на уран-эрбиевое топливо (2,7 % + 0,35 % Er) позволяет сохранить нейтронно-физические характеристики в эксплуатационных диапазонах при большом количестве отремонтированных ячеек графитовой кладки. При этом сохраняется объем производства радионуклида ^{60}Co (количество загруженных ДП-Со) и существует возможность организации производства короткоживущих изотопов медицинского назначения.