

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ШЕЛЬФ-М

Калугина К.М., Кривошеин И.Н. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Введение

Атомная станция малой мощности с унифицированной реакторной установкой (РУ) ШЕЛЬФ-М предназначена для использования в качестве источника электроснабжения объектов, расположенных в районах с практически отсутствующей энергетической и транспортной инфраструктурой. В основе проектирования реакторной установки лежит расчетное обоснование принятых конструкторских решений, в том числе проведение нейтронно-физических исследований.

1. Методы расчетов и описание расчетного кода

Нейтронно-физические расчеты водо-водяного реактора РУ ШЕЛЬФ-М проведены с использованием программного комплекса (ПК) MCU-NR [1] с банком данных MDBNR61. Библиотека содержит 428 нуклидов в поточечном представлении. ПК MCU-NR позволяет выполнять прецизионные нейтронно-физические расчеты методом Монте-Карло с решением газокинетического уравнения переноса нейтронов и непрерывным описанием спектра нейтронов.

2. Описание расчетной модели

Для расчетов в соответствии с согласованными исходными данными [2] сформирована трехмерная прецизионная полномасштабная модель реактора с детальным описанием конструкции и материального состава всех элементов активной зоны (а.з.). Расчетная модель (рисунок 1) содержит более 800 000 объектов и 25 000 материальных зон.

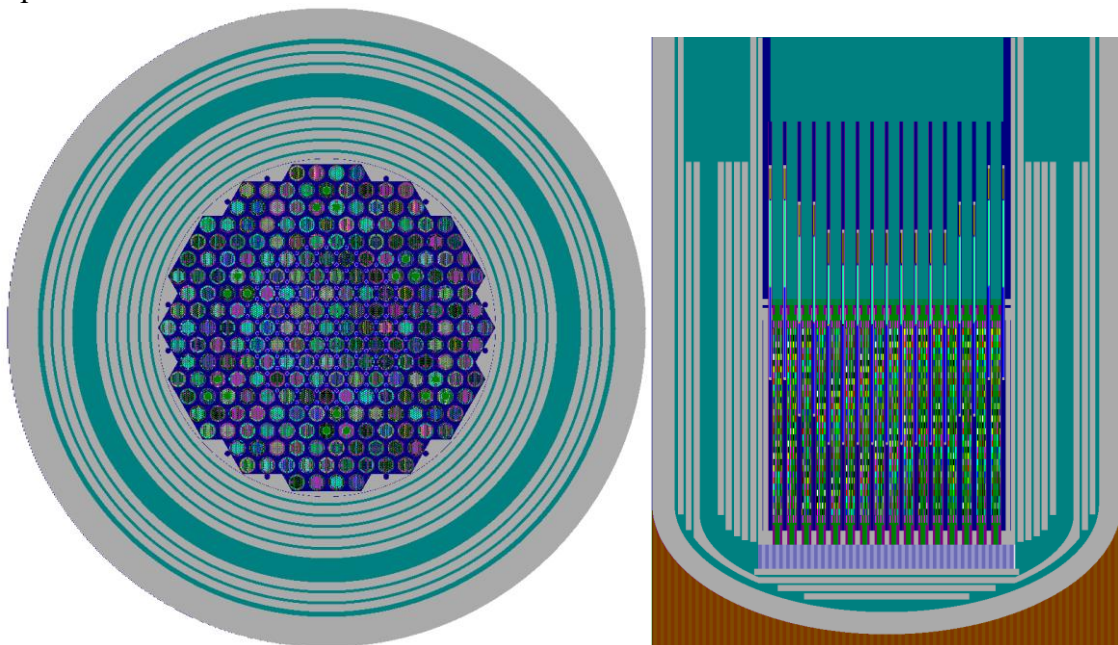


Рис.1. Расчетная модель а.з. РУ ШЕЛЬФ-М

По результатам многовариантных нейтронно-физических расчетов сформирована загрузка активной зоны.

В состав активной зоны входят 18 стержней аварийной защиты (АЗ), которые размещены в 18 ТВС с гильзами и 474 стержня компенсирующих групп (КГ), объединенных в девять компенсирующих групп: три центральные (ЦКГ), состоящие из 46 стержней каждая, три средние (СКГ), состоящие из 48 стержней каждая, и три периферийные (ПКГ), состоящие из 64 стержней каждая.

Картограмма расположения ТВС в активной зоне показана на рисунке 2.

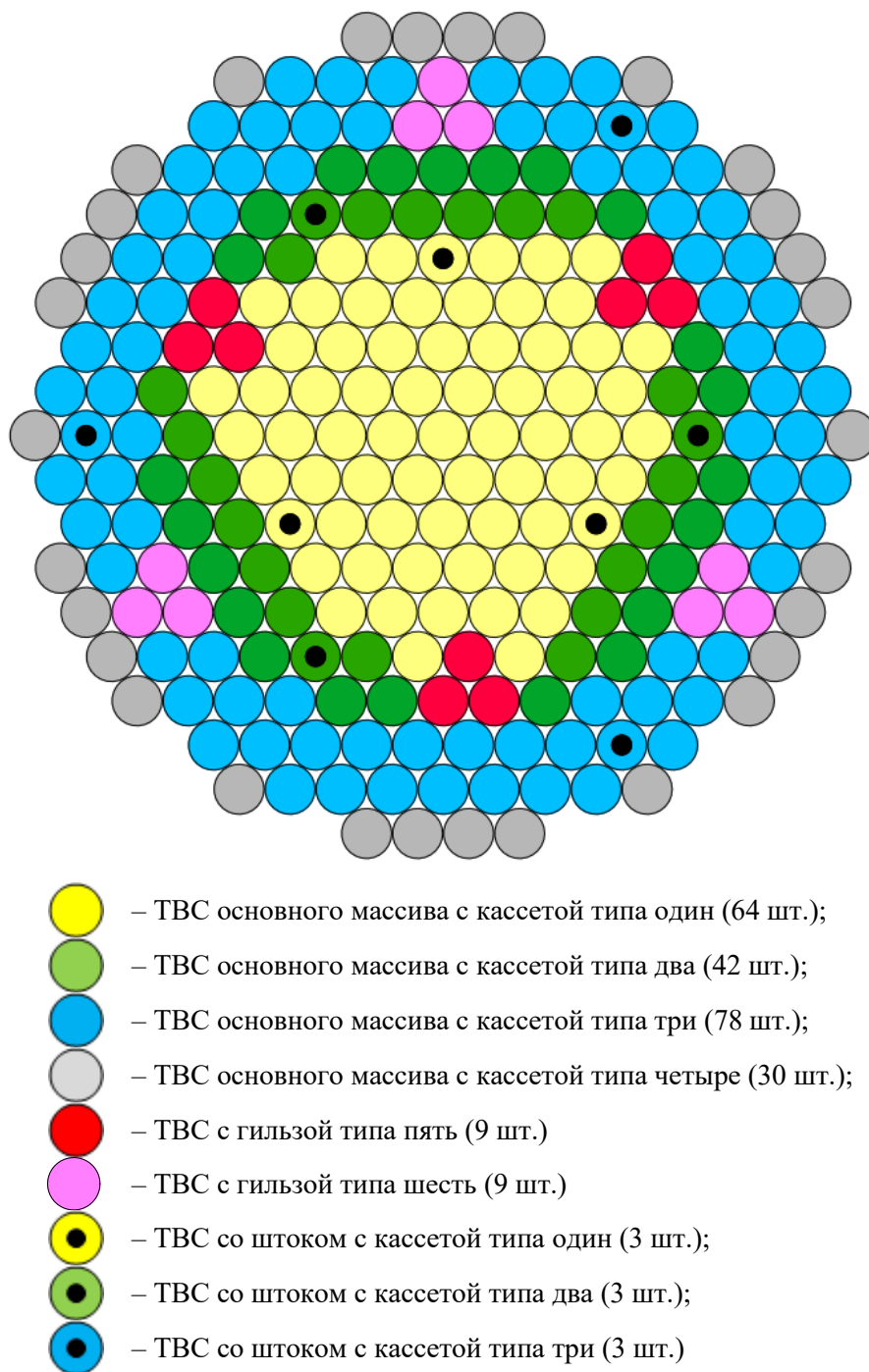


Рис. 2. Схема размещения ТВС в а.з.

Для выравнивания энерговыделения в активной зоне в указанных конструкциях ТВС применены шесть типов кассет, отличающихся количеством ТВЭЛОВ, обогащением топлива (от 14 % до 19,7 %), высотой поглощающей части (от 600 мм до 750 мм)

и плотностью гадолиния (от 2,4 г/см³ до 3,2 г/см³) в стержнях выгорающего поглотителя (СВП).

В таблице 1 представлены основные характеристики СВП для различных типов ТВС.

Таблица 1

Характеристики СВП

Тип ТВС	Число СВП	Плотность Gd в СВП, г/см ³	Загрузка Gd элемента, г	Загрузка в ТВС, г	Высота поглощающей части СВП, мм
1	6	3,2	28,7	172,0	750
2	6	3,2	26,8	160,6	700
3	6	2,4	17,2	103,2	600
4	—	—	—	—	—
5	6	3,2	26,8	160,6	700
6	6	2,4	17,2	103,2	600

Параметры загрузки топлива и выгорающего поглотителя в активной зоне представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры загрузки топлива и выгорающего поглотителя

Характеристика	Загрузка, кг
Загрузка U	1294,5
Загрузка ²³⁵ U	246,9
Загрузка гадолиния	29,1
Загрузка В ₄ С в КГ	27,02
Загрузка титаната диспрозия в КГ	90,69
Загрузка В ₄ С в стержнях АЗ	1,83
Загрузка бора в сплаве БС-15-3 в стержнях АЗ	1,12

3. Кампания реактора

Расчетное моделирование кампании реактора на номинальном уровне мощности проводилось по программе MCU-NR с учетом трехмерного выгорания топлива, поглотителей в СВП, борных пластинах (БП), стержнях АЗ и КГ, и перемещения КГ в ходе кампании с сохранением формы радиального поля энерговыделения.

Изменение запаса реактивности по кампании приведено на рисунке 3. Критические положения стержней КГ для характерных точек кампании приведены в таблице 3.

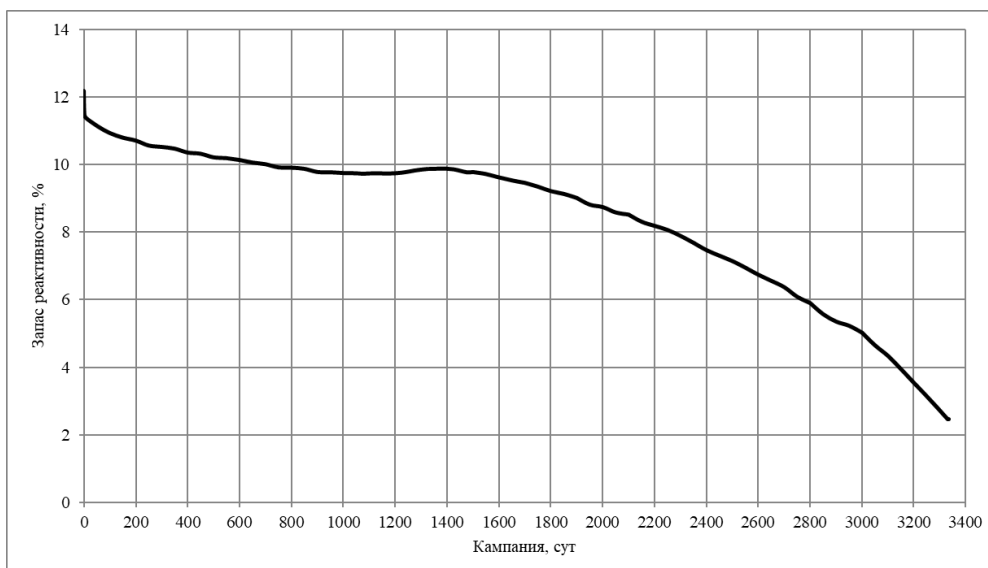


Рис. 3. Изменение запаса реактивности по кампании

Таблица 3

Критическое положение стержней КГ для характерных точек кампании

Точка по кампании, сут	ЦКГ, см	СКГ, см	ПКГ, см
2	56	42	24
250	52,5	39	19
700	50	37	19
1075	53	40	19
1425	57,5	48,5	19
1675	52	48,5	19
2025	39,5	40	15
2500	26,5	24	10
2700	24	17,5	5
3150	16	5	0
3243	14,5	0	0
3334	10,85	0	0

Начальное значение запаса реактивности на номинальном уровне мощности в равновесно отравленном состоянии составляет 11,5 % (16,4 $\beta_{эф}$). В процессе выгорания запас реактивности уменьшается и на момент времени 1675 эф. сут (40 200 ч) достигает 9,5 % (13,6 $\beta_{эф}$), на момент времени 3334 эф. сут (80016 ч) достигает 2,5 % (3,5 $\beta_{эф}$).

Результаты расчетов накопления осколков деления в активной зоне в процессе кампании приведены на рисунке 4.

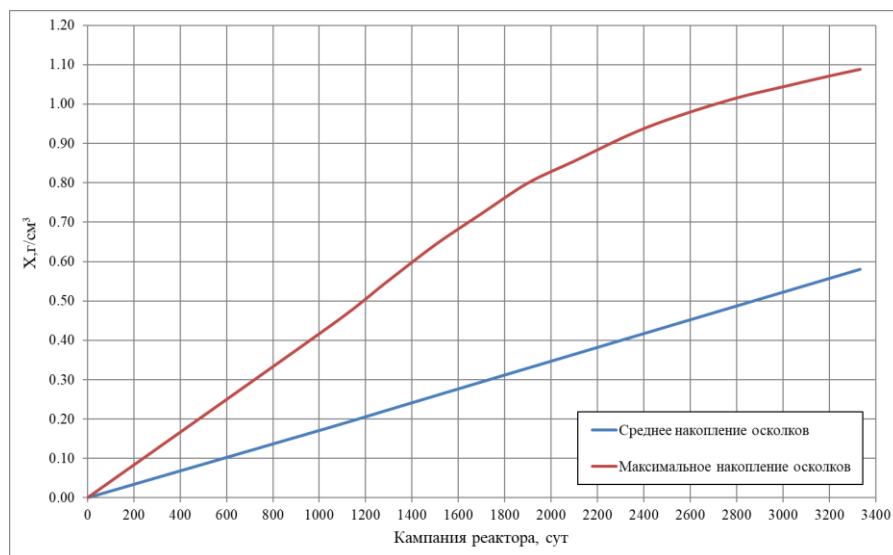


Рис. 4. Накопление осколков деления в топливе

Через 3334 эф. сут среднее накопление осколков деления в топливе составляет 0,58 г/см³. Максимальное локальное накопление осколков составляет 1,09 г/см³. Коэффициент объемной неравномерности выгорания топлива и накопления осколков на конец кампании составил 1,87.

Максимальное выгорание ¹⁰B на конец кампании в стержнях АЗ (сплав БС-15-З) составило 16,5 %. Максимальное выгорание ¹⁰B на конец кампании в стержнях КГ (В₄С) составило 5,3 %.

4. Распределение мощностей в ТВС

Картограммы мощностей ТВС в горячем отравленном состоянии реактора на номинальном уровне мощности с нормировкой на среднее значение в начале (2 эф. сут) и в конце кампании (3334 эф. сут) приведены на рисунках 5, 6. Распределение мощностей ТВС имеет симметрию 120°.

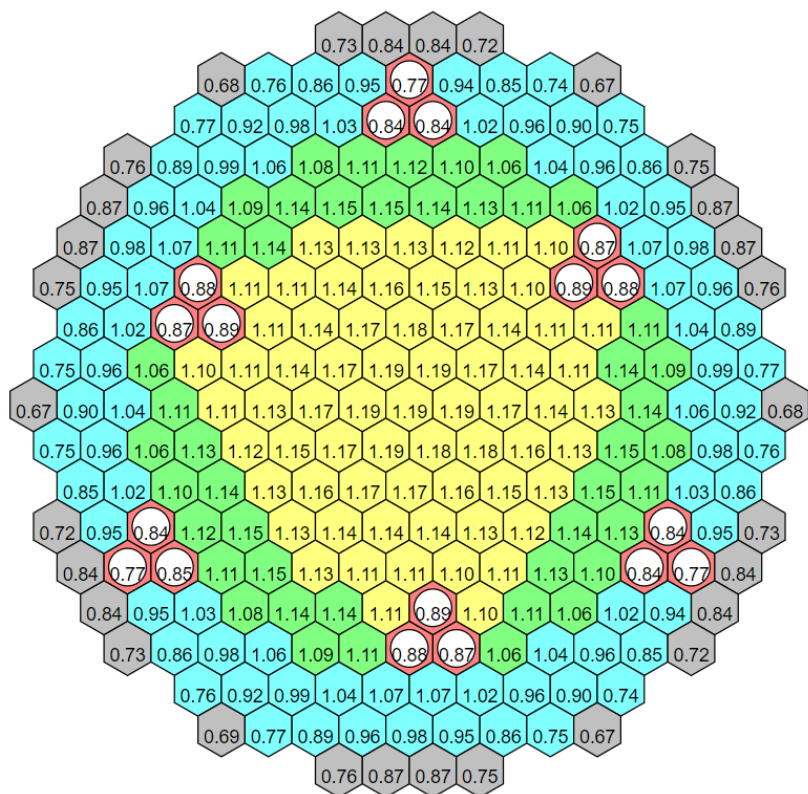


Рис. 5. Картограмма мощностей ТВС (2 эф. сут), отн. ед.

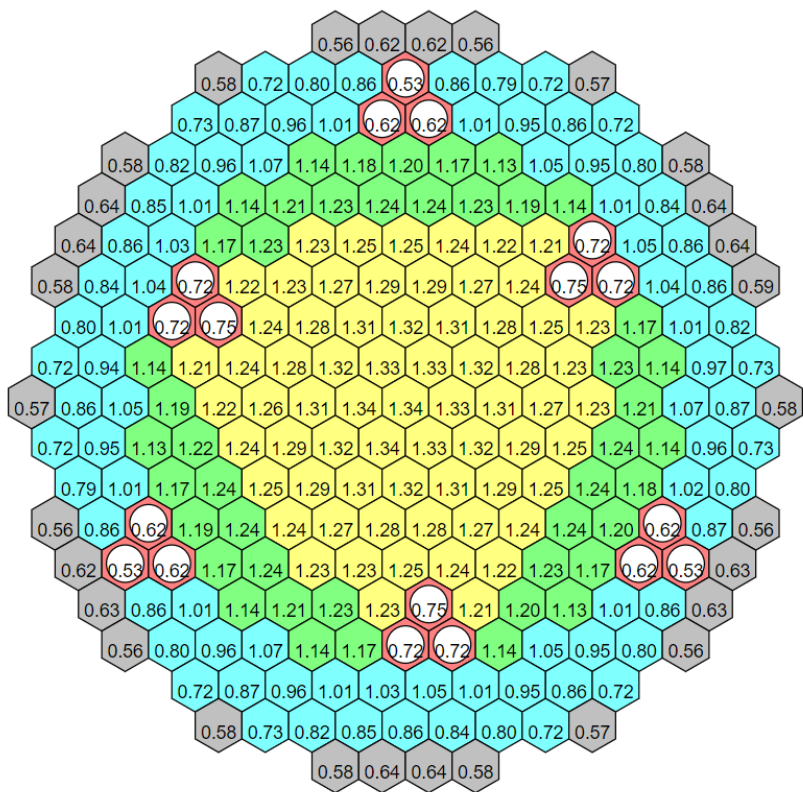


Рис. 6. Картограмма мощностей ТВС (3334 эф. сут), отн. ед.

Аксиальные распределения энерговыделения на номинальном уровне мощности в начале (2 эф. сут) и в конце кампании (3334 эф. сут) приведены на рисунках 7, 8. Распределение представлено в шести типах ТВС. Максимум высотной неравномерности в начале кампании наблюдается в ТВС типа один ($K_z = 1,86$) в конце кампании наблюдается в ТВС типа пять ($K_z = 2,13$).

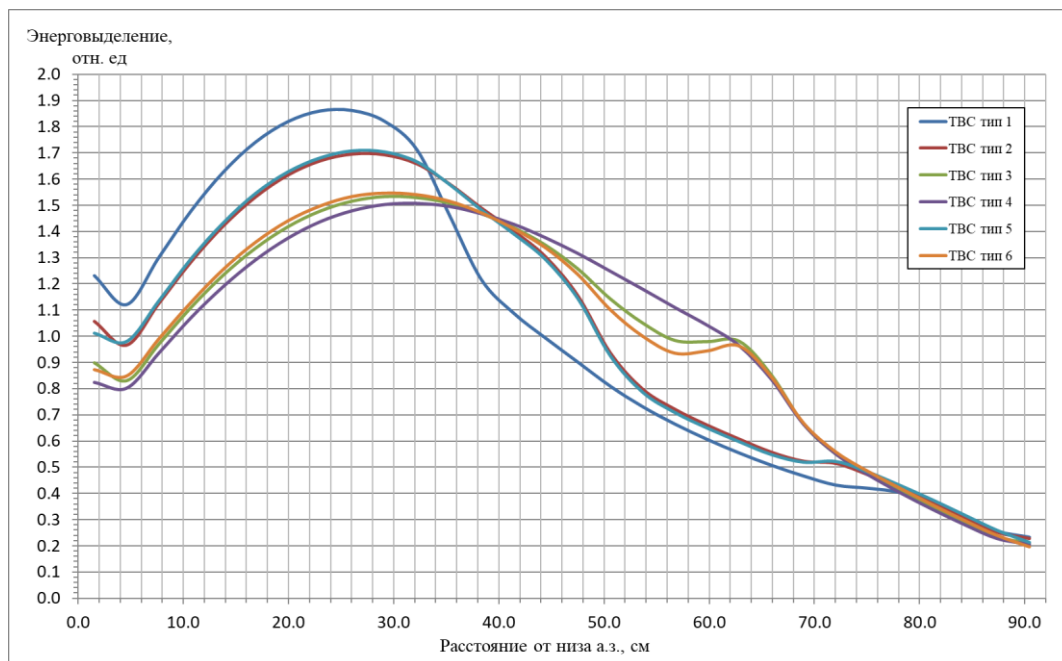


Рис. 7. Аксиальное распределение энерговыделения в ТВС (2 эф. сут)

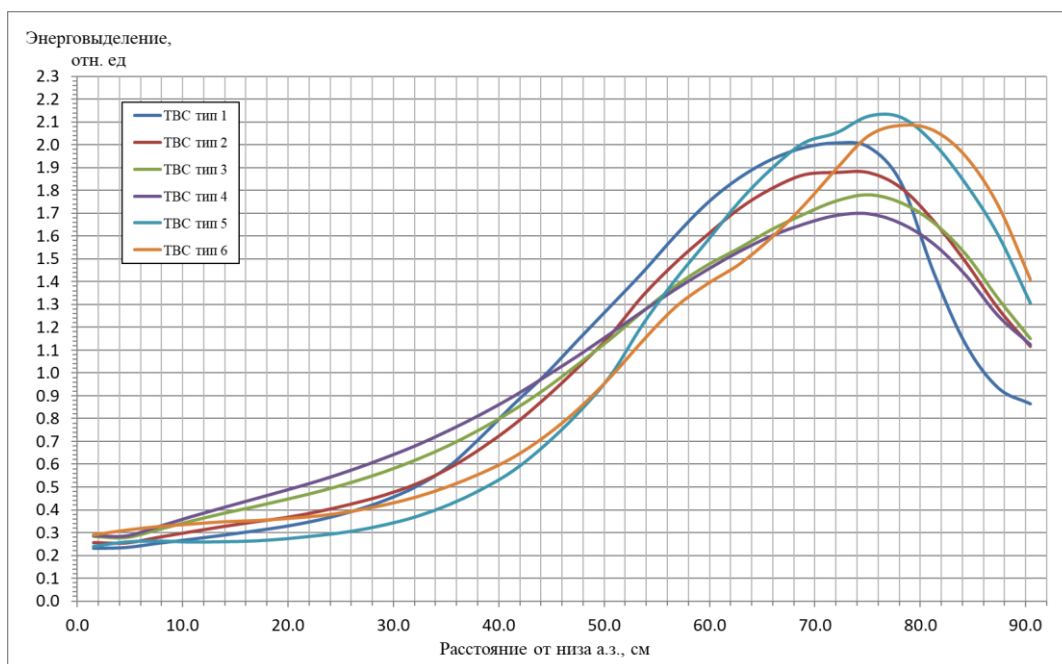


Рис. 8. Аксиальное распределение энерговыделения в ТВС (3334 эф. сут)

5. Распределение плотности потока нейтронов и флюенса нейтронов

В таблицах 4, 5 представлены значения максимальной плотности потоков нейтронов и флюенса в конструктивных элементах а.з. на номинальном уровне мощности в начале, середине и конце кампании для нейтронов с энергией больше 0,1 МэВ соответственно.

Таблица 4

Максимальная плотность потоков нейтронов в конструктивных элементах а.з. на начало, середину и конец кампании для нейтронов с энергией больше 0,1 МэВ

Элемент	Плотность потока нейтронов (2 эф.сут / 1675 эф.сут / 3334 эф.сут), $10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$					
	ТВС тип 1	ТВС тип 2	ТВС тип 3	ТВС тип 4	ТВС тип 5	ТВС тип 6
Оболочки ТВЭЛОВ	12,4/13,1/ 15,4	10,8/12,2/ 13,2	9,2/10,6/ 10,8	6,5/6,7/ 6,3	9,4/9,9/ 11,0	8,1/8,9/ 8,8
Оболочки СВП (вытеснителей)	10,9/11,6/ 13,5	9,8/11,0/ 12,0	8,4/9,7/ 9,8	6,0/6,3/ 5,9	8,9/9,5/ 10,5	7,6/8,5/ 8,5
Оболочки стержней АЗ (тип 5)	0,20/0,15/0,91					
Оболочки стержней АЗ (тип 6)	0,17/0,13/0,79					
Оболочки стержней ЦКГ	8,2/7,5/9,4					
Оболочки стержней СКГ	5,6/6,4/3,6					
Оболочки стержней ПКГ	3,3/2,2/2,9					

Таблица 5

Максимальный флюенс нейтронов в конструктивных элементах а.з. на середину и конец кампании для нейтронов с энергией больше 0,1 МэВ

Элемент	Флюенс нейтронов (1675 эф.сут / 3334 эф.сут), 10^{22} см^{-2}					
	ТВС тип 1	ТВС тип 2	ТВС тип 3	ТВС тип 4	ТВС тип 5	ТВС тип 6
Оболочки ТВЭЛОВ	1,8/4,4	1,7/4,1	1,4/3,7	0,9/2,4	1,4/3,3	1,2/3,0
Оболочки СВП (вытеснителей)	1,6/3,9	1,5/3,7	1,3/3,3	0,9/2,3	1,3/3,2	1,2/2,9
Оболочки стержней АЗ (тип 5)	0,03/0,12					
Оболочки стержней АЗ (тип 6)	0,02/0,11					
Оболочки стержней ЦКГ	1,1/3,3					
Оболочки стержней СКГ	0,86/2,5					
Оболочки стержней ПКГ	0,40/1,2					

6. Нейтронно-физические характеристики реактора

Нейтронно-физические характеристики реактора в начале, середине и конце кампании на номинальном уровне мощности приведены в таблице 6. При расчетах энерговыделения в конструктивных элементах реактора решена задача переноса и взаимодействия нейтронов и гамма-квантов со средой.

Таблица 6

НФХ реактора по кампании

Характеристики	2 сут	1675 сут	3334 сут
Эффективный коэффициент размножения нейтронов $K_{эф}$	0,9996	1,0004	1,0006
Запас реактивности, %	11,5	9,5	2,5
Энерговыделение в твэлах, МВт	33,9	33,9	34,0
Коэффициент аксиальной неравномерности энерговыделения по а.з.	1,67	1,78	1,89
Коэффициент радиальной неравномерности энерговыделения	1,19	1,19	1,34
Среднее выгорание урана, МВт·сут/кг (г/см ³)	–	48,9 (0,29)	96,4 (0,58)
Максимальное выгорание урана, МВт·сут/кг (г/см ³)	–	119,7(0,72)	180,6(1,09)
Средняя линейная нагрузка на твэл, Вт/см	28,6		
Максимальная линейная нагрузка на твэл, Вт/см	74,7	78,3	88,6
Максимальный запас реактивности (холодное разотравленное состояние), %	15,6	13,9	9,2
Коэффициент реактивности по температуре топлива, $10^{-5} 1/^\circ\text{C}$	–1,6	–2,2	–2,3
Коэффициент реактивности по температуре теплоносителя в межканальном пространстве, $10^{-4} 1/^\circ\text{C}$	–1,0	–2,3	–2,7
Коэффициент реактивности по температуре теплоносителя в межтвэльном пространстве, $10^{-4} 1/^\circ\text{C}$	–2,8	–2,7	–2,6
Суммарный коэффициент реактивности по температуре теплоносителя, $10^{-4} 1/^\circ\text{C}$	–3,8	–5,0	–5,3
Температурный эффект реактивности топлива*, % $\Delta K/K$	–0,5	–0,8	–0,7
Полный температурный эффект реактивности, % $\Delta K/K$	–3,7	–4,1	–4,4
Подкритичность в холодном разотравленном состоянии (стержни КГ полностью введены, АЗ извлечены), %	11,2	18,6	34,9
Средняя ППН в а.з., $10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	0,94	1,01	1,05
Средний флюенс быстрых нейтронов $E > 0,1 \text{ МэВ}$ в а.з., 10^{21} см^{-2}	–	7,8	18,6
Эффект отравления, %	1,1	1,8	1,9
Время жизни мгновенных нейтронов, 10^{-5} с	1,1	1,7	2,0
Эффективная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{эф}$	0,0070	0,0064	0,0062
* Изменение температуры топлива от 27°C до 311°C .			

Эффективности РО СУЗ в начале, середине и конце кампании на номинальном уровне мощности приведены в таблице 7.

Таблица 7

Эффективности РО СУЗ

Характеристики	2 сут	1675 сут	3334 сут
Эффективность АЗ, %	1,4	1,6	1,5
Эффективность АЗ без одной наиболее эффективной группы (тип 5), %	1,1	1,3	1,2
Эффективность ЦКГ, %	3,9	6,2	9,5
Эффективность СКГ, %	5,7	7,5	10,4
Эффективность ПКГ, %	3,8	4,4	4,4
Полная эффективность КГ, %	19,5	29,4	51,8
Полная эффективность КГ вместе с АЗ, %	20,9	31,0	53,4
Полная эффективность КГ вместе с АЗ без одной наиболее эффективной группы (тип 5), %	20,6	30,6	53,0
Полная эффективность АЗ вместе с КГ без одной наиболее эффективной группы ЦКГ, %	10,6	15,5	26,6
Полная эффективность АЗ вместе с КГ без одной наиболее эффективной группы СКГ, %	12,9	17,9	33,3
Полная эффективность АЗ вместе с КГ без одной наиболее эффективной группы ПКГ, %	12,9	18,1	33,8

Расчеты дифференциальной эффективности КГ проведены в начале, середине и конце кампании на номинальном уровне мощности. Определены скорости перемещения КГ, которые удовлетворяют требованиям п. 2.3.3.14 НП-082[3]: для ЦКГ – 1,5 мм/с, для СКГ и ПКГ – 2 мм/с.

7. Авария отказа компенсирующих групп

Для анализа ядерной безопасности реактора рассмотрены сценарии с отказом и выводом из а.з. каждой группы КГ, при этом остальные группы КГ находятся в полностью погруженном положении. Расчеты проведены в начале кампании (2 эф. сут) в холодном разотравленном состоянии.

На рисунке 9 представлено изменение $K_{эф}$ в зависимости от положения отказавшей группы КГ.

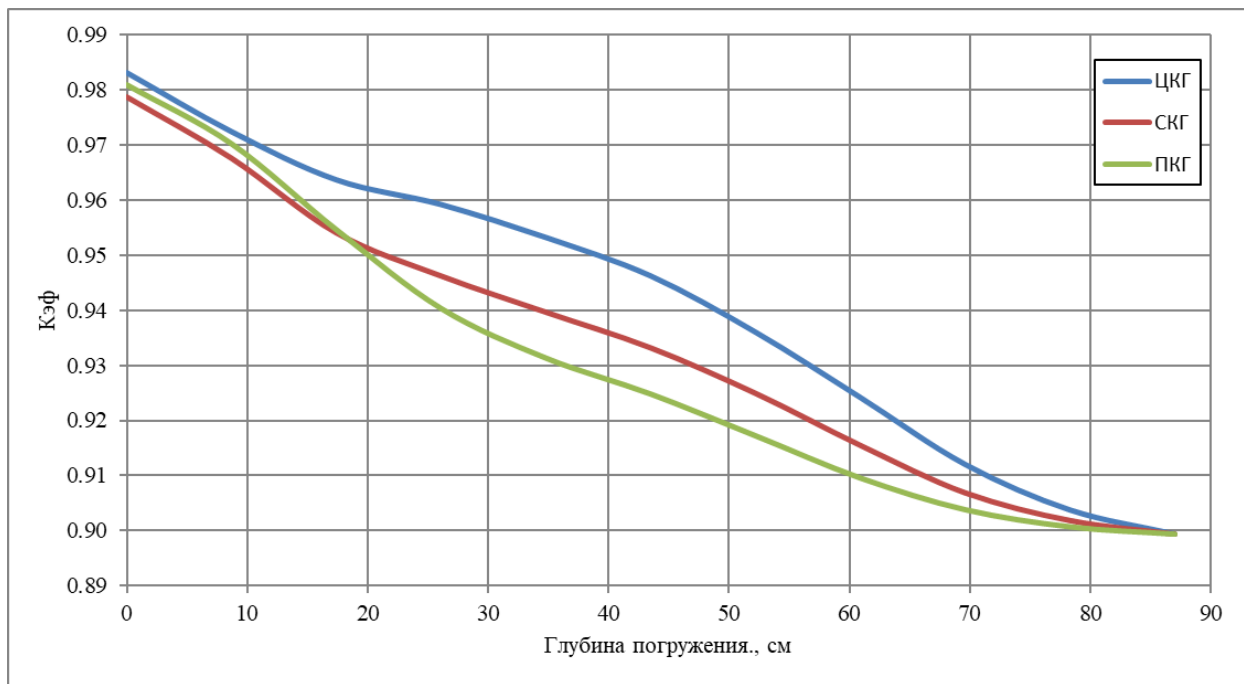


Рис. 9. Зависимость $K_{эф}$ от глубины погружения группы КГ

В холодном разотравленном состоянии при погружении всех КГ в а.з. с учетом полного вывода одной любой КГ из а.з. реактор находится в подкритичном состоянии.

Подкритичность для варианта с отказом ЦКГ составляет 1,7 %, для варианта с отказом одной группы СКГ составляет 2,2 % и для варианта с отказом одной группы ПКГ составляет 1,9 %.

Эффективности КГ достаточно, чтобы обеспечить подкритичность холодного разотравленного состояния активной зоны реактора с учетом отказа одной группы КГ в любой момент кампании.

Заключение

По результатам расчетов сформирована начальная загрузка активной зоны. Определены обогащение топлива в ТВС, а также параметры выгорающих поглотителей в ТВС, обеспечивающие компенсацию значительной части начального запаса реактивности и профилирование радиального и аксиального распределения энерговыделения в активной зоне.

Выбраны две независимых системы остановки. Система, выполняющая функцию аварийной защиты, имеет 18 рабочих органов, объединенных в 6 групп. Вторая система остановки реактора, выполняющая также функцию управления мощностью и реактивностью, имеет 9 групп рабочих органов, объединенных в три независимых зоны.

Произведено расчетное моделирование кампании реактора с поддержанием критичности путем перемещения органов СУЗ и с учетом выгорания топлива и поглотителей. Максимальное выгорание топлива составляет 180,6 МВт·сут/кг. Максимальное накопление осколков в топливном сердечнике составляет 1,09 г/см³. Нейтронно-физические характеристики реактора обеспечивают номинальный уровень мощности и достижение кампании 3334 эф. сут (80016 ч).

Реактор имеет отрицательные значения коэффициентов реактивности по температуре топлива и температуре теплоносителя. В случае наложения отказов на срабатывание наиболее эффективной компенсирующей группы достигается глубокое подкритическое состояние.

Список литературы

- 1 АО «НИКИЭТ». РБМК-От-5303. Верификация ПС MCU-NR с банком данных MDBNR61 и каналом подготовки исходных данных GENIFER для определения нейтронно-физических характеристик и радиационных характеристик реакторов РБМК-1000. Инв. № Е.211-001-15489, 2023
- 2 АО «НИКИЭТ» 121.200 ИД. Исходные данные для проведения нейтронно-физического расчета активной зоны РУ ШЕЛЬФ-М. Инв.№ Е.121-8953, 2023
- 3 НП-082-07. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. Москва, 2007.