

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РЕАКТОРА ИГР

Сураев А.С., Витюк В.А., Иркимбеков Р.А., Жанболатов О.М.
(Филиал ИАЭ НЯЦ РК, г. Курчатов, Казахстан)

Введение

Национальным ядерным центром Республики Казахстан эксплуатируется два исследовательских реактора – ИВГ.1М и ИГР. При этом конверсия реактора ИВГ.1М [1] была успешно завершена в 2022 году, а реактора ИГР находится на этапе расчетного обоснования сохранения его нейтронно-физических физических характеристик. В этой связи вопросы эффективного управления кампанией реактора ИВГ.1М с новым топливом выходят на первый план.

Таким образом, цель данной работы заключается разработке и расчетном обосновании возможных сценариев (вариантов) топливной кампании реактора ИВГ.1М с низкообогащенным топливом, которые обеспечат его эффективное использование и прогнозирование потребности в новом топливе.

Разработаны десять сценариев кампании реактора, отличающиеся вариантами замены ВОТК, количеством замен и предполагаемой длительностью кампании топлива. Выполнены нейтронно-физические расчеты реактора ИВГ.1М для всех предлагаемых сценариев, при этом максимальная интегральная годовая мощность реактора принята равной 1440 МВт·ч.

В процессе разработки сценариев кампании реактора ИВГ.1М соблюдались требования, которые способствует получению наиболее эффективного алгоритма перестановки топлива. Основные из них приведены ниже:

- активная зона должна быть разбита на группы ВОТК, манипуляции с которыми будут проводиться одновременно,
 - группы ВОТК должны быть максимально симметричны по отношению к центральной оси активной зоны,
 - запас реактивности реактора перед очередной заменой ВОТК не должен быть менее $2 \beta_{\text{эфф}}$ при температуре активной зоны 20 °С.
- Кроме этого, были определены возможные виды манипуляций с ВОТК:
- замена отработавших ВОТК на свежие, с размещением выгоревших ВОТК на долговременное хранение,
 - перестановка ВОТК из первого или второго ряда в третий ряд, с размещением ВОТК третьего ряда на долговременное хранение,
 - разворот ВОТК на 180° вокруг его центральной оси.

1. Характеристики предлагаемых сценариев кампании реактора ИВГ.1М

Согласно двум первым требованиям к разрабатываемым сценариям замены топлива на реакторе ИВГ.1М, разработаны картограммы загрузок активной зоны (АЗ) реактора (рис. 1). На этих картограммах все ВОТК разбиты на 3, 4, 5, 6, 8 или 10 групп. Данные картограммы предполагают, что кампания топлива, в зависимости от режимов эксплуатации реактора и его загруженности исследовательскими проектами, может длиться от трех до десяти лет.

Трехлетняя кампания предполагает интенсивную эксплуатацию реактора в течение трех лет и проведение работ по перегрузке активной зоны не чаще одного раза в год. Это позволяет сократить среднее время перегрузки активной зоны и за счет этого увеличить максимальное время эксплуатации реактора. Однако, при этом выгорание и коэффициент использования топлива будут низкими.

Поскольку при перегрузках топлива возможно обеспечить большую степень выгорания отработавшего топлива, то целесообразно предположить возможность топливной кампании более трех лет.

Кампания топлива длительностью 10 лет предполагает иной крайний случай, при котором реактор может простаивать в течение длительных промежутков времени. Если такие периоды простоя предвидятся, целесообразно разбить загрузку реактора на большее количество циклов. Это позволит снизить финансовые риски, связанные с поставкой топлива, достичь максимального допустимого значения выгорания отработавшего топлива и повысить эффективность его использования в ИВГ.1М.

Первый сценарий замены отработавшего топлива – эталонный. Предполагает разовую перегрузку реактора при достижении минимального запаса реактивности.

Второй сценарий предполагает перестановку всего топлива единовременно без его замены для достижения максимального выгорания при однократной перегрузке. Перестановка планируется после достижения 60 % выгорания урана-235 от эталонного.

Третий сценарий ориентирован на максимальную интенсивность эксплуатации реактора и предполагает три этапа замены топлива в течение кампании. По такому сценарию, при каждой перегрузке, должны заменяться по две ВОТК первого и второго ряда и шесть ВОТК третьего ряда. Замена топлива производится группами, в соответствии с картограммой, представленной на рис. 1а.

Четвертый сценарий, как и предыдущий, ориентирован на максимальную интенсивность эксплуатации реактора при четырехлетней длительности кампании топлива. В рамках этого сценария предполагается замена топлива группами, в соответствии с рис. 1б. Очередность замены топлива будет определена по результатам расчетов.

Пятый сценарий предполагает возможность пятилетней кампании топлива с ежегодной перегрузкой. Картограмма, соответствующая этому сценарию, представлена на рис. 1в. Очередность замены топлива будет определена по результатам расчетов.

Шестой сценарий аналогичен пятому, но предполагает перестановку ВОТК из первого или второго ряда в третий для достижения большего выгорания топлива. При этом новые ВОТК устанавливаются только в первый и второй ряды. Картограмма, соответствующая этому сценарию, представлена на рис. 1в.

Седьмой сценарий предполагает проведение шести замен топлива в течение всей кампании. Это возможно при снижении интенсивности эксплуатации реактора и увеличении длительности кампании топлива до шести лет. Картограмма, соответствующая этому сценарию представлена на рис. 1г.

Восьмой сценарий предполагает организовать замену топлива восемь раз в течение восьмилетней кампании при низкой интенсивности эксплуатации реактора. В рамках данного сценария предполагается менять по три ВОТК вместе в первом и втором рядах и по четыре – пять ВОТК единовременно в третьем ряду (рис. 1д).

Девятый вариант ориентирован на десятилетнюю кампанию топлива. В рамках этого сценария предполагается замена ВОТК симметрично расположенных относительно оси активной зоны (рис. 1е).

Десятый вариант предполагает десятилетнюю кампанию топлива и аналогичен девятому сценарию (рис. 1е), но отличается тем, что перестановка ВОТК осуществляется из первого или второго ряда в третий для достижения большего выгорания топлива. При этом новые ВОТК устанавливаются только в первый и второй ряды.

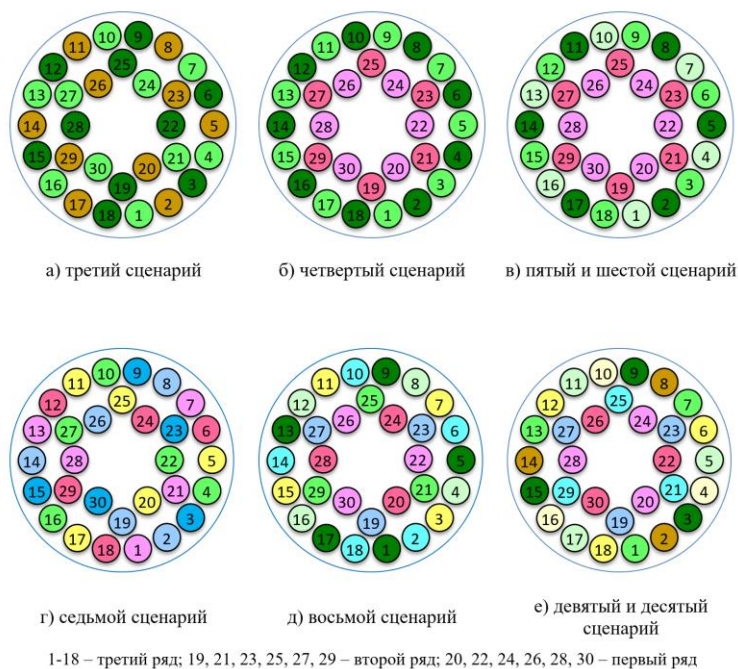


Рис. 1. Картограмма распределения BOTK по группам

2. Программные методы расчета выгорания топлива

2.1. Программный код MCNP 6.1

MCNP (Monte Carlo N-Particle) разработан в Лос-Аламосской национальной лаборатории (Los Alamos National Laboratory) в США на языках программирования

ANSI C и FORTRAN (90 и 95) [2]. MCNP моделирует истории частиц для получения решения задачи переноса, не решая при этом уравнение переноса как таковое. Можно показать, что уравнение, описывающее распределение вероятности плотности частиц для элементов фазового пространства совпадает с интегральным уравнением переноса. Метод Монте-Карло может быть использован для теоретически точного описания взаимодействий частиц (нейтронов, фотонов) с материалами на основе статистического подхода и особенно полезен для сложных задач, которые не могут быть решены с применением компьютерных программ, использующих детерминистические методы. В практическом применении метод Монте-Карло приводит к реалистичным результатам вычислений. Для проведения расчетов реактора ИВГ.1М имеется прецизионная модель реактора [3, 4].

2.2. Программный код WIMS-D5B

WIMS-D (Winfrith Improved Multigroup Scheme) – универсальная программа предназначена для нейтронно-физического расчета ячеек ядерных реакторов (включая расчет выгорания). Код WIMS [5] использует детерминистические методы, основанные на дифференциальном и конечно-разностном представлении уравнения Больцмана, которые не требуют больших вычислительных ресурсов, что упрощает основной этап моделирования, заключающийся в решении уравнения переноса на этапе расчетных оценок и поисковых исследований для целей проекта. 69-групповая система констант на основе оцененной базы ядерных данных ENDF/B-VII.0 [6] позволяет рассчитывать ячейки реакторов разных типов. Геометрический модуль программы WIMS позволяет создавать двумерную (R, Z-геометрию) цилиндрическую ячейку кластерного типа, что делает эту программу удобным расчетным инструментом исследования нейтронно-физических параметров активной зоны ИВГ.1М и эволюции топливного состава.

2.3. Программный код MC-Delta

Данный программный код разработан в Национальном ядерном центре для проведения расчетов выгорания топлива ядерных реакторов в 2013 году. Программа используется совместно с кодом MCNP и позволяет существенно сократить время расчетов циклов кампании реактора.

3. Результаты расчетов

Для расчетов параметров разработанных сценариев кампании использована программа MCNP6 [2] и нейтронно-физическая модель реактора [3] с максимально приближенным соответствием материальных и геометрических параметров. Детально произведено моделирование каждой тепловыделяющей сборки с учетом индивидуальной композиции. Для получения данных по запасу реактивности СКР полностью введены в активную зону и развернуты регулирующие барабаны. Нейтронно-физические расчеты кампании с низкообогащенным топливом проводились с эксплуатационной мощностью 6 МВт и годовой интегральной мощностью в 1440 МВт·ч, для оценки запаса реактивности при максимальном режиме эксплуатации [7].

3.1. Первый сценарий

Расчеты показывают, что при первичной загрузке свежим топливом всех ВОТК и энерговыработке в 5760 МВт·ч, запас реактивности составляет 2,3 бээфф при исходном значении 6,62 бээфф. При достижении этого значения энерговыработки начинались перестановки топлива по всем сценариям, которые рассмотрены ниже, поскольку к пятому году эксплуатации запас реактивности становится меньше величины 2 бээфф (1,54 бээфф).

Первый сценарий замены отработавшего топлива предполагал разовую перегрузку реактора при достижении минимального запаса реактивности. Запас реактивности в реакторе после загрузки свежего топлива составил 6,27 бээфф. При единовременной замене всего топлива запас реактивности не достигает исходного значения, поскольку накопившиеся в течение кампании изотопы лития в бериллиевых элементах снижают реактивность реактора. В связи с этим, следующие 4 года эксплуатации реактора после полной замены топлива, заканчиваются снижением запаса реактивности до 1,93 бээфф.

Результаты расчетов первого сценария представлены на рис. 2.

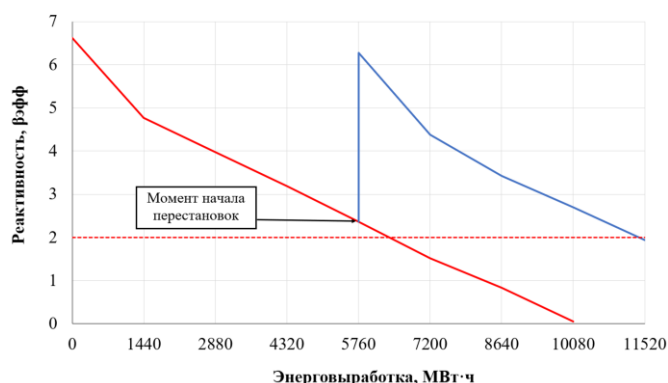


Рис. 2. Изменение запаса реактивности в первом сценарии

3.2. Второй сценарий

Во втором сценарии рассмотрен разворот всех ВОТК на 180° вокруг их центральной оси единовременно для оценки перспективности данной операции в

будущем. Запас реактивности реактора увеличивается на 0,3 β эфф, что практически не позволяет сколь-нибудь существенно продлить кампанию топлива. В дальнейшем, при расчетах сценариев данная манипуляция с ВОТК не применялась.

Результаты расчетов второго сценария представлены на рис. 3

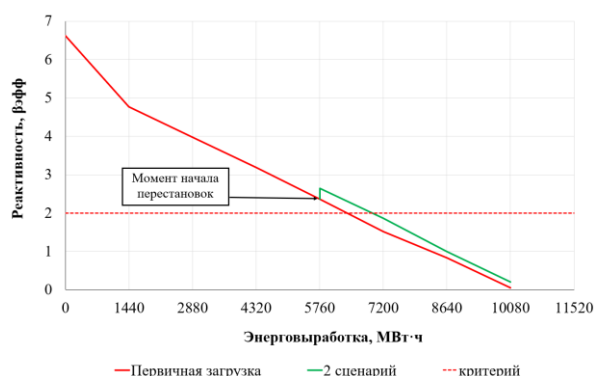


Рис. 3. Изменение запаса реактивности во втором сценарии

3.3. Третий сценарий

Третий сценарий ориентирован на максимальную интенсивность эксплуатации реактора и предполагает три этапа замены топлива в течение кампании.

Согласно картограмме, на первой перегрузке отработавшее топливо заменили на свежее в ВОТК № 24 и 30 первого ряда, ВОТК № 21 и 27 второго ряда, ВОТК № 1, 4, 7, 10, 13, 16 третьего ряда. Проведенные расчеты показали, что запас реактивности после перегрузки составил 3,5 β эфф, и что после года эксплуатации реактора реактивность уменьшилась до 2,38 β эфф.

Для расчета второго этапа заменили топливо в ВОТК первого ряда № 20, 26, ВОТК второго ряда № 23, 29 и третьего ряда № 2, 5, 8, 11, 14, 17 на свежее. В результате замены топлива запас реактивности после перегрузки составил 4,04 β эфф, что позволяет реактору проработать два года без загрузки свежего топлива.

Для расчета третьего этапа заменили ВОТК первого ряда № 22, 28, второго ряда № 19, 25 и третьего ряда № 3, 6, 9, 12, 15, 18. В результате замены топлива запас реактивности увеличился до 4,01 β эфф. После двух лет работы на максимальной интегральной мощности реактивность уменьшилась до 1,82 β эфф.

Результаты расчетов данного сценария представлены на рис. 4.

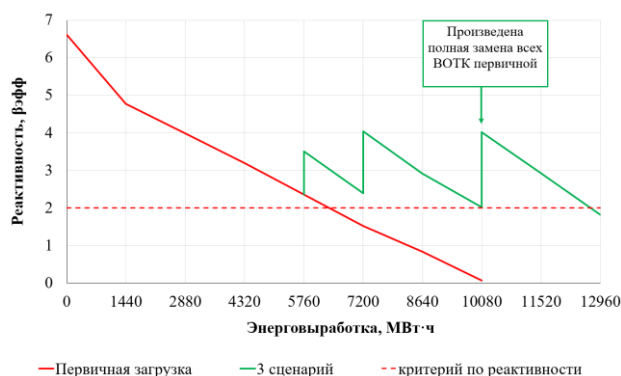


Рис. 4. Изменение запаса реактивности в третьем сценарии

3.4. Четвертый сценарий

Четвертый сценарий, как и предыдущий, ориентирован на максимальную интенсивность эксплуатации реактора. В данном варианте перегрузки производились по схеме «6-9-6-9», т.е. при первой перегрузке происходила замена шести ВОТК первого или второго рядов, при второй – девяти ВОТК третьего ряда, и т.д.

Согласно картограмме, на первой перегрузке произведены замены ВОТК № 19, 21, 23, 25, 27, 29 второго ряда. Проведенные расчеты показали, что запас реактивности после перегрузки составил 3,32 бэфф и после года эксплуатации реактора уменьшился до 2,2 бэфф.

На следующем этапе заменили отработавшее топливо на свежее в ВОТК третьего ряда № 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17. В результате замены топлива запас реактивности увеличился до 3,35 бэфф. После годичной эксплуатации реактивность снизилась до 2,47 бэфф.

Для расчета третьего этапа заменили топливо ВОТК первого ряда № 20, 22, 24, 26, 28, 30. В результате замены топлива реактивность после перегрузки составила 3,73 бэфф. После первого года работы реактивность уменьшилась до 2,69 бэфф.

Для расчета последнего этапа заменено топливо ВОТК третьего ряда № 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18. Запас реактивности возрос до 4,09 бэфф и в результате двухгодичной эксплуатации значение составило 2,17 бэфф.

Диаграмма изменения запаса реактивности в четвертом сценарии представлен на рис. 5.

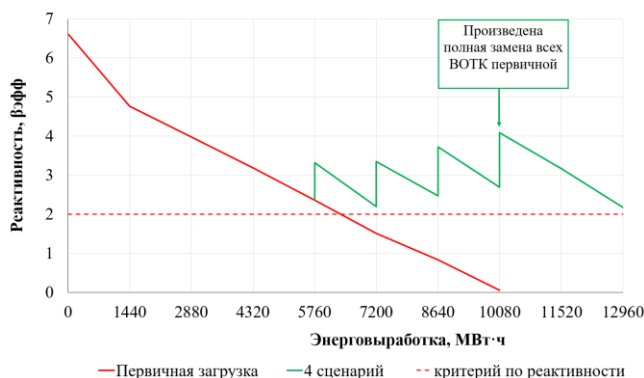


Рис. 5. Изменение запаса реактивности в четвертом сценарии

3.5. Пятый сценарий

Пятый сценарий представляет собой вариант пятилетней кампании топлива с ежегодной перегрузкой.

Согласно картограмме, при первой перегрузке заменили отработавшее топливо на свежее из ВОТК второго ряда № 19, 21, 23, 25, 27, 29. Запас реактивности после замены составил 3,4 бэфф. После годичной эксплуатации реактивность снизилась до 2,32 бэфф.

При второй перегрузке произвели замену топлива ВОТК третьего ряда № 1, 4, 7, 10, 13, 16. Значение запаса реактивности после перегрузки возросло до 3,23 бэфф. В результате годичной эксплуатации реактивность снижается до 2,25 бэфф.

При третьей перегрузке топлива произведена замена топлива ВОТК первого ряда № 20, 22, 24, 26, 28, 30. Реактивность после перегрузки возросла до 3,73 бэфф. В результате годичной эксплуатации реактивность снижается до 2,5 бэфф.

В четвертой перегрузке произвели замену топлива ВОТК третьего ряда № 2, 5, 8, 11, 14, 17. В результате перегрузки наблюдалось увеличение запаса реактивности до 3,46 бэфф. После годичной эксплуатации реактивность уменьшается до 2,63 бэфф.

При последней перегрузке произведена замена ВОТК третьего ряда № 3, 6, 9, 12, 15, 18. Значение запаса реактивности после перегрузки возросло до 3,64 бэфф, что позволяет выработать к концу кампании топлива 12960 МВт ч со снижением запаса реактивности до 2,63 бэфф.

Изменение запаса реактивности в пятом сценарии представлено на рис. 6.

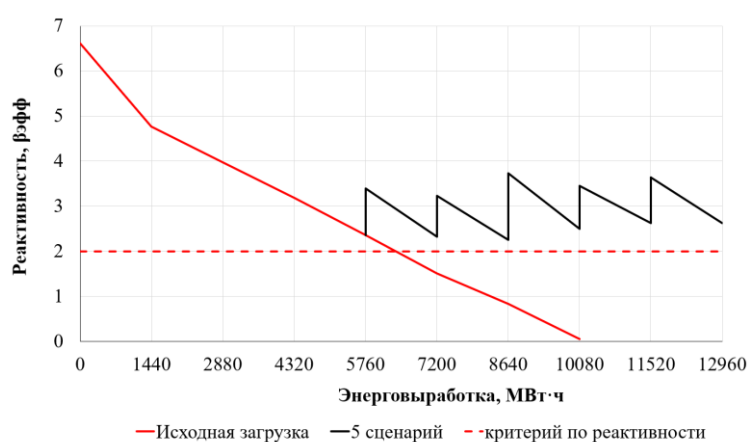


Рис. 6. Изменение запаса реактивности в пятом сценарии

3.6. Шестой сценарий

Шестой сценарий аналогичен предыдущему, но перестановки ВОТК производились из первого или второго ряда в третий для достижения большего выгорания топлива. При этом новое топливо устанавливалось только в первый и второй ряды ВОТК.

При первой перегрузке произведена замена топлива ВОТК второго ряда № 19, 21, 23, 25, 27, 29 на свежее с перестановкой отработавшего топлива данных ВОТК в третий ряд № 1, 4, 7, 10, 13, 16. Значение запаса реактивности после перегрузки возросло до 3,31 бэфф. В результате годовой эксплуатации реактивность падает до 2,3 бэфф.

Затем произвели замену топлива на свежее ВОТК первого ряда № 20, 22, 24, 26, 28, 30. Отработавшее топливо переставили в ВОТК № 2, 5, 8, 11, 14, 17. Значение запаса реактивности после перегрузки возросло до 3,51 бэфф. В результате годовой эксплуатации реактивность падает до 2,69 бэфф.

При третьей перегрузке произведена замена топлива ВОТК третьего ряда № 3, 6, 9, 12, 15, 18 на топливо из ВОТК второго ряда № 19, 21, 23, 25, 27, 29, куда, в свою очередь, было загружено свежее топливо. Значение запаса реактивности возросло до 4,45 бэфф, что позволяет реактору проработать два года без перегрузок. В результате эксплуатации с энергоснабжением 2880 МВт ч реактивность понизилась до 2,81 бэфф.

В четвертой перегрузке произведена замена топлива в ВОТК первого ряда № 20, 22, 24, 26, 28, 30. Отработавшее топливо из данных ВОТК переставили в ВОТК третьего ряда № 1, 4, 7, 10, 13, 16. Запас реактивности увеличился до 3,9 бэфф и после годичной эксплуатации упал до 3,09 бэфф.

На последнем этапе произвели перестановку топлива из ВОТК второго ряда № 19, 21, 23, 25, 27, 29 в ВОТК третьего ряда № 2, 5, 8, 11, 14, 17. Взамен переставленного

топлива из второго ряда загрузили свежее топливо. Запас реактивности повысился до 4,69 бэфф и в результате двух лет эксплуатации уменьшился до 2,95 бэфф.

Диаграмма изменения запаса реактивности в шестом сценарии изображена на рис. 7.

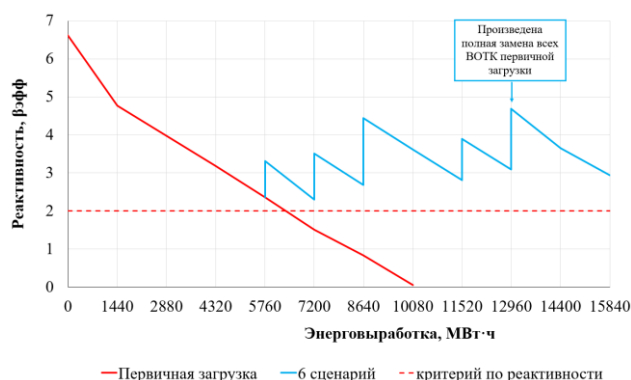


Рис. 7. Изменение запаса реактивности в шестом сценарии

3.7. Седьмой сценарий

В седьмом сценарии предполагалось проведение шести замен топлива в течение всей кампании. Согласно картограмме, заменили ВОТК первого ряда № 28, второго ряда № 21 и третьего ряда № 1, 7, 13. После перегрузки реактивность увеличилась до 2,97 бэфф. Через год эксплуатации реактора реактивность упала до 2,07 бэфф.

На следующем этапе заменили ВОТК первого ряда № 26, второго ряда № 19 и третьего ряда № 2, 8, 14. После замены реактивность составила до 3,04 бэфф и в результате годичной эксплуатации упала до 2,01 бэфф.

В третьей перестановке заменили топливо в ВОТК первого ряда № 30, второго ряда № 23 и третьего ряда № 3, 9, 15. Результаты расчетов показали, что запас реактивности после перестановки вырос до 2,71 бэфф. После годичной эксплуатации реактивность составила 1,85 бэфф, что меньше критерия по минимальному значению реактивности.

Диаграмма запаса реактивности представлена на рис. 8.

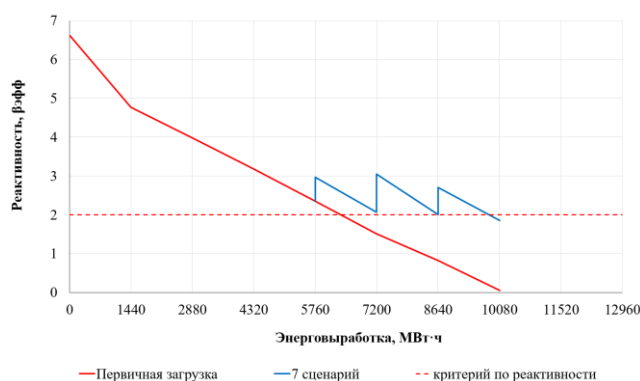


Рис. 8. Изменение запаса реактивности в седьмом сценарии

В данном сценарии с заменой пяти ВОТК при годовой интегральной мощности 1440 МВт·ч, значение запаса реактивности реактора не обеспечивает возможность полноценной эксплуатации реактора. Последующие ежегодные перегрузки не обеспечивают достаточную компенсацию снижения запаса реактивности реактора, откуда следует, что для восстановления ресурса и достижения минимального допустимого критерия в 2 бэфф необходимо увеличить количество заменяемых ВОТК.

3.8. Восьмой сценарий

В восьмом сценарии в расчетах годовая интегральная мощность снижена с 1440 до 1080 МВт·ч. В рамках данного сценария производились замены трех ВОТК в первом и втором рядах одновременно или по четыре – пять ВОТК в третьем ряду. По предыдущим рассчитанным сценариям можно сделать вывод, что малое количество перегружаемых ВОТК на первом шаге не позволяет достаточно увеличить запас реактивности для последующих манипуляций. Поэтому при первой перегрузке топлива произведена замена топлива 11 ВОТК для увеличения оперативного запаса реактивности. Следующие перегрузки топлива производились согласно сценарию.

При первой перегрузке заменили ВОТК первого ряда № 20, 24, 28, ВОТК второго ряда № 19, 23, 27 и ВОТК третьего ряда № 1, 5, 9, 13, 17. Запас реактивности после перегрузки составил 3,41 бэфф. После годичной эксплуатации реактивность снизилась до 2,5 бэфф.

Затем произведена вторая перегрузка с заменой топлива ВОТК третьего ряда № 2, 6, 10, 14, 18. Значение запаса реактивности после перегрузки возросло до 3,19 бэфф. В результате годовой эксплуатации реактивность падает до 2,4 бэфф.

При третьей перегрузке топлива произведена замена ВОТК первого ряда № 22, 26, 30 и ВОТК второго ряда № 21, 25, 29. Запас реактивности после замены возрос до 4 бэфф. После двухгодичной эксплуатации значение составило 2,42 бэфф.

При четвертой перегрузке произведена замена топлива ВОТК третьего ряда № 3, 7, 11, 15. Значение запаса реактивности возросло до 3,18 бэфф. После одного года эксплуатации понизилось до 2,59 бэфф.

В последней перегрузке произведена замена топлива ВОТК третьего ряда № 4, 8, 12, 16. Запас реактивности увеличился до 3,23 бэфф. В результате годичной эксплуатации реактивность уменьшилась до 2,54 бэфф.

Достигнутое значение запаса реактивности позволяет продлить кампанию реактора до 14400 МВт·ч. Таким образом, снижение интенсивности эксплуатации реактора на 25 % увеличивает кампанию реактора по сравнению с первым сценарием и сценариями с частичными перегрузками топлива.

Диаграмма изменения запаса реактивности в восьмом сценарии представлена на рис. 9.

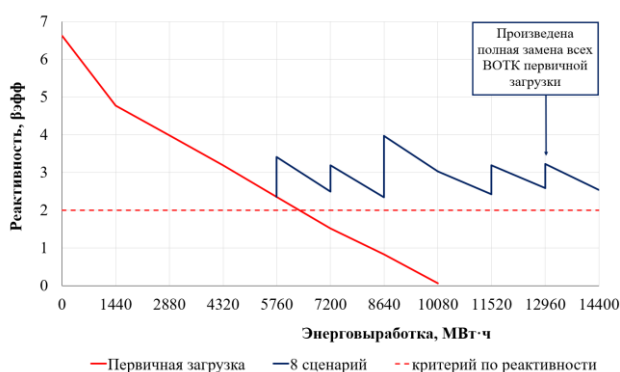


Рис. 9. Изменение запаса реактивности в восьмом сценарии

3.9. Девятый сценарий

В рамках девятого сценария производилась замена ВОТК, симметрично расположенных относительно оси активной зоны. При первой перестановке ВОТК заменили каналы первого ряда № 20, 24, 28. В результате перестановки повышение

реактивности составляет 2,8 бэфф. После года эксплуатации реактивность составляет 2 бэфф.

При второй перестановке заменили топливо в ВОТК второго ряда № 19, 23, 27. После замены топлива реактивность увеличилась до 2,63 бэфф. После года эксплуатации реактивность составила 1,61 бэфф.

Поскольку запас реактивности ниже критерия равного 2 бэфф, данный сценарий не обеспечивает полноценной эксплуатации на максимальной интегральной мощности реактора ИВГ.1М. Данный сценарий аналогичен седьмому сценарию и является приемлемым только при условии увеличения количества единовременно заменяемых ВОТК.

Результаты расчетов запаса реактивности в девятом варианте представлены на рис. 10.

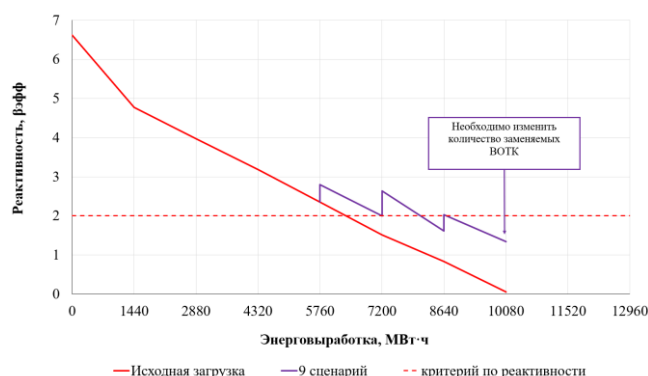


Рис. 10. Изменение запаса реактивности в девятом сценарии

3.10. Десятый сценарий

Десятый вариант аналогичен девятому сценарию по схеме перегрузок, но отличается тем, что перестановка топлива ВОТК осуществлялась из первого или второго ряда в третий для достижения большего выгорания топлива. При этом новое топливо загружалось только ВОТК первого и второго ряда. Данный сценарий идентичен шестому сценарию, за исключением количества переставляемых ВОТК.

При первой перегрузке произведена замена топлива ВОТК первого ряда № 22, 26, 30 на свежее с перестановкой отработавшего топлива данных ВОТК в третий ряд с номерами № 3, 9, 13. Значение запаса реактивности после перегрузки возросло до 2,81 бэфф. В результате годовой эксплуатации реактивность падает до 1,77 бэфф. Поскольку значение запаса реактивности ниже требования для продолжения расчетов, данный сценарий не является удовлетворительным. В случае изменения количества перегружаемых ВОТК с трех до шести, получим подобный шестому сценарию профиль диаграммы запаса реактивности. Поэтому для продолжения расчета решено снизить интенсивность эксплуатации реактора на 50 %.

При второй перестановке произвели перегрузку топлива из ВОТК второго ряда № 19, 23, 27 в ВОТК третьего ряда № 1, 7, 13, свежее топливо загрузили в ВОТК второго ряда. Запас реактивности в результате перестановки увеличился до 2,98 бэфф и после годичной эксплуатации снизился до 2,15 бэфф.

При следующей перестановке в ВОТК третьего ряда № 2, 8, 14 загрузили отработавшее топливо из ВОТК первого ряда № 20, 24, 28, куда, в свою очередь, загрузили свежее топливо. Значение запаса реактивности после перегрузки возросло до 3,57 бэфф. В результате годовой эксплуатации реактивность падает до 2,74 бэфф.

При четвертой перестановке топлива произведена замена топлива ВОТК первого ряда № 20, 24, 28 и ВОТК второго ряда № 19, 23, 27. Отработавшее топливо из этих рядов переставили в ВОТК № 1, 6, 7, 12, 13, 18. Реактивность после перегрузки возросла до 4,26 бэфф. В результате двухгодовой эксплуатации реактивность упала до 2,57 бэфф.

Диаграмма изменения запаса реактивности представлен на рис. 11.

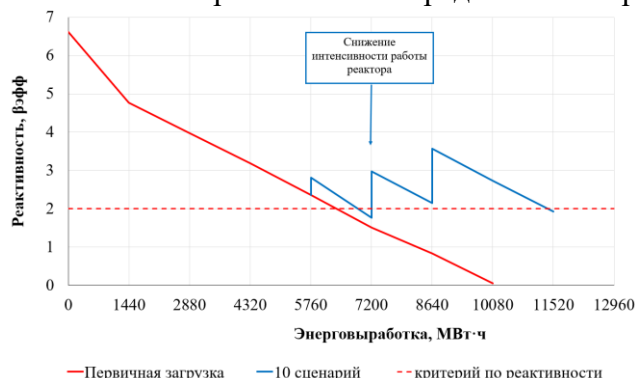


Рис. 11. Изменение запаса реактивности в десятом сценарии

Заключение

Выполнена разработка и расчетное обоснование 10 сценариев реализации кампании топлива исследовательского реактора ИВГ.1М при годовой интегральной мощности реактора 1440 МВт·ч и 1080 МВт·ч.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

- загрузку свежего топлива необходимо производить после выработки 5760 МВт·ч (после первой кампании длительностью четыре года), поскольку при дальнейшей эксплуатации реактора с выгоревшим топливом снижается эффективность его использования. При единовременной замене всего отработавшего топлива на свежее вторая кампания составит четыре года;

- разворот всех ВОТК незначительно увеличивает запас реактивности и является нецелесообразным вариантом;

- сценарии с частичной заменой топлива большого количества ВОТК (третий, четвертый и пятый сценарии) позволяют повысить эффективность использования топлива за счет повышения кампании (максимального выгорания) части топлива. Такие перегрузки топлива приоритетны с экономической точки зрения, так как снижаются единовременные ежегодные расходы на закупку топлива. С точки зрения эксплуатации реактора, повышается эффективность использования топлива и снижается нагрузка на производственные мощности. Учитывая временные затраты на перегрузку десяти и шести ВОТК (37 и 25 рабочих дней соответственно), сценарии с частичной перегрузкой являются приоритетными при максимальном режиме эксплуатации реактора.

- сценарии с перегрузкой топлива пяти и трех ВОТК не позволяют осуществлять полноценную эксплуатацию при максимальной годовой интегральной мощности. Для продления кампании необходимо увеличение количества заменяемых ВОТК при одной перегрузке.

- уменьшение годовой интегральной мощности (сценарий восемь) позволяет увеличить кампанию до энергоснабжения 14400 МВт·ч.

- сценарии с перестановкой отработавших ВОТК первого и второго ряда в третий показывают, что положительный эффект от процедуры зависит от количества заменяемых ВОТК или режима эксплуатации реактора. Перестановки топлива позволяют существенно увеличить кампанию топлива по сравнению с вариантами с частичной перегрузкой. Однако, работы по перестановке ТВС из первого и второго рядов

в третий требуют регламентных работ. Сюда входят необходимость изменения конструкции реактора, сопроводительная документация и непосредственно работы по перегрузке топлива. Данные обстоятельства значительно усложняют осуществление шестого и десятого сценариев кампании реактора.

Данная работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования Комитета науки Министерства высшего образования и науки Республики Казахстан № AP09259736 «Экспериментальные исследования характеристик реактора ИВГ.1М после конверсии».

Список литературы

1. Батырбеков Э.Г., Скаков М.К., Иркимбеков Р.А. и др. Конверсия исследовательского реактора ИВГ.1М // Вестник НЯЦ РК. – 2015. – Вып. 2. – С. 6–18.
2. MCNP-6.1. Monte-Carlo N-Particle Transport Code // Los Alamos National Laboratory; Los Alamos, New Mexico. – 2008.
3. Irkimbekov R.A. Vurim, A.D et.al. *Neutronics Model of the IVG.1M Reactor: Development and Critical-State Verification* // Atomic Energy. – 2019. – Vol. 127. – pp. 69–76. DOI 10.1007/s10512-019-00587-1.
4. Стационарлық нейтронды-физикалық есептемелерге арналған ИВГ.1М реакторының компьютерлік моделі а.с. № 2757 от 24.08.18 Республика Казахстан. *Иркимбеков Р.А. Вурим А.Д. и др.*
5. WIMS D5B. – URL: <https://www.oecd-nea.org/tools/abstract/detail/nea-1507/> (дата обращения 25.03.2022).
6. Nuclear Energy Agency: Evaluated Nuclear Data Library Descriptions. – URL: https://oecd-nea.org/dbdata/data/nds_eval_libs.htm (дата обращения 25.03.2022).
7. Zhanbolatov, O. M., A. D. Vurim, A. S. Surayev, and R. A. Irkimbekov. 2022. “Development of Scenarios For Controlling The Fuel Campaign Of The Ivg.1M Reactor With Leu-Fuel.” *Journal of Physics: Conference Series*, no. 1 (January): 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2155/1/012017>.