

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ВЫГОРАЮЩИХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ В ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКЕ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

Монгуш С.А., Шматок А. А.,
Научный руководитель: Наймушин А. Г., ст. преподаватель
Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: Mongusch-S@mail.ru

Основу атомной энергетики в России составляют энергетические реакторы типа ВВЭР, которые являются надежными и безопасными в эксплуатации. В настоящее время усовершенствование реакторов ВВЭР ведется в направлении повышения глубины выгорания ядерного топлива. Высокая глубина выгорания обеспечивается выполнением более длительного топливного цикла. Удлинения кампании реактора возможно путем повышения начального обогащения топлива, что приводит к необходимости компенсации высокой избыточной реактивности в начале топливных циклов [1]. Компенсация избыточной реактивности возможна путем введения выгорающих поглотителей (ВП). Использование ВП позволяет избежать чрезмерного использования борного регулирования и снизить нагрузку на управляющие стержни.

В качестве выгорающих поглотителей в реакторах ВВЭР целесообразно использовать материалы, имеющих высокие сечения поглощения нейтронов со значениями более 1000 барн, таких как Eu, Sm, Dy, Gd, Er, Cd и Hf. Кроме выбора материала важен выбор способа размещения поглотителя в топливной сборке, при этом важно учитывать как технологические, так и физические аспекты.

В качестве выгорающего поглотителя реакторах ВВЭР-1000 используется оксид гадолиния, равномерно распределенный по объему топливных таблеток. При использовании уран-гадолиниевого топлива возникают определенные проблемы: замещение уранового топлива оксидом гадолиния ведет к уменьшению массы топливного элемента; уран-гадолиниевое топливо имеет более низкую теплопроводность по сравнению с диоксидом урана, что приводит к небольшому ухудшению его термодинамических свойств.

Анализируются альтернативные способы размещения выгорающих поглотителей в реакторе ВВЭР. Способы размещения выгорающих поглотителей моделировались в расчетном прецизионном пакете программ MC5, который обеспечивает возможность моделирования процессов переноса нейтронов, аналоговыми и неаналоговыми методами Монте-Карло на основе оцененных ядерных данных с учетом изменения изотопного состава материалов. Геометрический модуль позволяет моделировать системы с произвольной геометрией, используя простые тела или поверхности с помощью функции: пересечения, дополнения и объединения. В качестве расчетной модели рассматривалась реальная тепловыделяющая сборка

типа 35ZSU реактора ВВЭР-1000 [2]. Анализировалось три вида расположения выгорающих поглотителей: гомогенного, гетерогенного в виде проволоки в центральной отверстии диоксида урана и в виде напыления на тепловыделяющую таблетку. Расчет проводился до величины глубины выгорания равной $65 \text{ МВт} \cdot \text{сут/кг}$ при значении удельной мощности $50 \text{ МВт} \cdot \text{сут/кг}$.

Анализ гомогенного размещения оксида гадолиния показал, что зависимость бесконечного коэффициента размножения от глубины выгорания на кривых для топлива с оксидом гадолиния не достигают кривой с чистым диоксидом урана даже после практически полного выгорания гадолиния. Это связано с уменьшением ядерной концентрации диоксида урана и ростом концентрации оксида гадолиния, что показано на рис.1. Уменьшение концентрации топлива приводит к падению теплопроводности в два раза по сравнению с чистым ураном. Выгорания изотопов гадолиния линейный характер в диапазоне 0,2 % до 6 %. При увеличении массовой доли гадолиния на 1 %, время, требующееся на выгорание, возрастает примерно на 68 суток [3]. Для стандартной кампании реактора ВВЭР-1000 в 300 суток, при условии практически полного выгорания поглотителя за это время, потребуется содержание доли гадолиния до 2,2 % весовых, для кампании в 480 суток - до 5 %, для кампании в 660 суток - до 7,7 %.

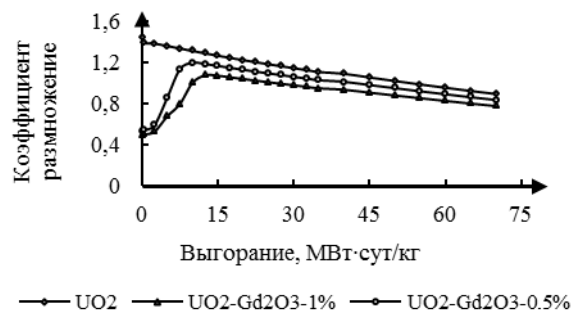


Рис.1. Зависимость бесконечного коэффициента размножения от глубины выгорания топлива при различном содержании оксида гадолиния в гомогенном размещении

При гетерогенном размещении оксида гадолиния в центре топливной таблетки в виде проволоки существенно замедляется темп выгорания поглотителя по сравнению с вариантом с гомогенным размещением его в топливе. Это связано с тем, что поток тепловых нейтронов падает, проходя через слой топлива, а, следовательно, уменьшается и скорость реакции поглощения нейтронов. Результаты расчета представлены на рис.2.

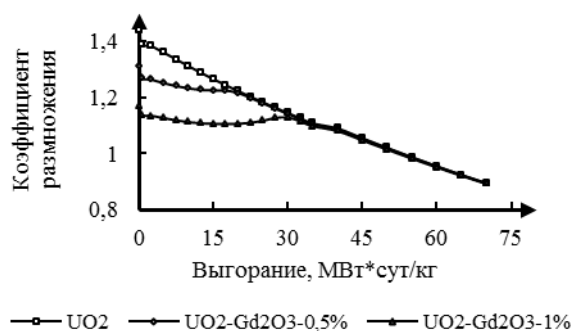


Рис. 2. Зависимость бесконечного коэффициента размножения от глубины выгорания топлива при различном содержании оксида гадолиния в центральном отверстии твэлов

Преимуществом гетерогенного размещения является, то, что материал выгорающего поглотителя располагается не в самом топливе, а, следовательно, не уменьшает его содержания в твэле и не влияет на его теплофизические и механические свойства. Количество выгорающего поглотителя, расположенного в центральном отверстии топливной таблетки, ограничено диаметром этого отверстия [4]. Максимальное содержание оксида гадолиния при полном заполнении центрального отверстия в твэле может составить до 3 % от массы топлива. Время, требующееся на выгорание поглотителя, составляет до 343 суток при содержании поглотителя 0,2 % от массы топлива.

Использование диборида циркония в качестве поглотителя занимает промежуточное положение между гомогенным размещением оксида гадолиния в топливе и его гетерогенным размещением в виде проволоки в центральном отверстии [5]. На рис.3. показано, что начальная компенсация и выбег реактивности не так велики, как в гомогенном расположении оксида гадолиния, и нет такого замедленного высвобождения реактивности, как в гетерогенном варианте расположения гадолиния в виде проволоки.

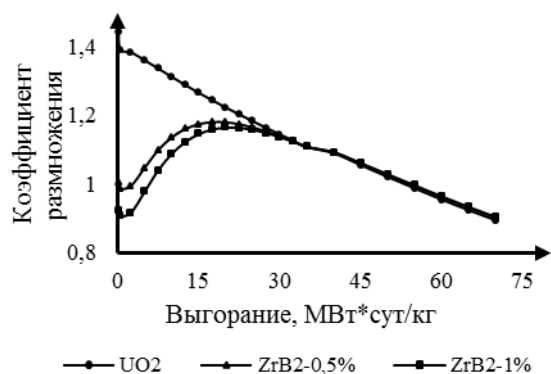


Рис. 3. Зависимость бесконечного коэффициента размножения от глубины выгорания топлива при различной толщине напыления (при различном содержании диборида циркония в твэле)

Способ размещения выгорающего поглотителя в виде напыления сохраняет преимущества и недостатки, свойственные гетерогенному размещению ВП. Главный недостаток, связан с ограничением толщины напыления толщиной зазора между топливной таблеткой и оболочкой твэла [6]. При толщине напыления равной 0,0031 см, что соответствует 1 % весовых, за кампанию длительностью 300 суток выгорает 88 % поглотителя, за кампанию длительностью 480 суток - 95 % поглотителя и за кампанию длительностью 660 суток - 99 %.

Вывод

Для существующих годовых кампаний реактора целесообразно использование гомогенного размещения оксида гадолиния в топливе в виде твэгов. При увеличении кампании до 300 суток требуется от 1 до 2,2 % от массы топлива. Для более длительных кампаний реактора (1,5-2 года) предпочтительно гетерогенное размещение оксида гадолиния в центре топливной таблетки. Для кампании реактора длительностью 18 месяцев требуется 0,6 % Gd₂O₃ от массы топлива, для кампании в 24 месяца – 1,6 %, что в 7,6 и 4,7 раза меньше, чем для варианта с гомогенным размещением соответственно. При использовании в качестве выгорающего поглотителя диборида циркония. Время необходимое для выгорания поглотителя слабо зависит от начального содержания выгорающего поглотителя (толщины напыления). Полное выгорание поглотителя наблюдается лишь в длительных топливных циклах (24 месяца).

Список используемых источников

1. Давахра Сааду. Использование выгорающих поглотителей в реакторах типа ВВЭР: Дис. канд. Тех. Наук : 05.14.03 Москва, 2006 13с.
2. Аль Афров А. М., Андрушенко С. А., Украинцев В. Ф., Васильев Б. Ю., Косоуков К. Б., Семченков Ю. М., Кокосадзе Э. Л., Иванов Е. А. ВВЭР – 1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность. – М.: Университетская книга, Логос, 2006. – 488 с. – 1000 экз
3. С. В. Широков, В. В. Заец. Глубина выгорания ядерного топлива ВВЭР с различными выгорающими поглотителями. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина
4. Патент РФ № 2131626 – Таблетка ядерного топлива с покрытием (ее варианты), способ нанесения покрытия и установка для осуществления способа
5. Патент РФ № 2131626 – Таблетка ядерного топлива с покрытием (ее варианты), способ нанесения покрытия и установка для осуществления способа
6. Кандалов В. Б., Преображенский Д. Г., Романов А. И., Самойлов О. Б., Фальков А. А., Шишкин А. А. Тепловыделяющая сборка ТВСА ВВЭР-1000: направления развития и результаты эксплуатации