

УДК 621.039

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСИ ГАФНИЯ В ЦИРКОНИИ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ВВЭР НА КОЭФФИЦИЕНТ РАЗМНОЖЕНИЯ НЕЙТРОНОВ

Стрижёва Е.М.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Сорокин В.В.

Потребление энергии в мире растет намного быстрее, чем ее производство, а промышленное использование новых перспективных технологий в энергетике по объективным причинам начнется не ранее 2030 года. Все острее встает проблема нехватки ископаемых энергоресурсов. Возможности строительства новых гидроэлектростанций тоже весьма ограничены. Не стоит забывать и о борьбе с парниковым эффектом, накладывающей ограничения на сжигание нефти, газа и угля на тепловых электростанциях.

Обеспокоенность по поводу доступа к энергетическим ресурсам, изменения климата, качества воздуха и энергетической безопасности обуславливает важную роль ядерной энергетики в обеспечении энергоснабжения в XXI веке. В настоящее время в 31 стране мира находится в эксплуатации 449 ядерных энергетических реакторов. На них приходится приблизительно 11% мирового производства электроэнергии (по состоянию на 12 октября 2016 года). Ядерная энергетика отличается низкими уровнями выбросов углерода и обеспечивает надёжное, экологически безопасное и недорогое производство электроэнергии.

Реакторы ВВЭР являются самым распространенным типом реакторов в мире. Самое главное преимущество ВВЭР перед другими типами — большая безопасность, значение которого полностью осознали, к сожалению, лишь после Чернобыльской катастрофы, хотя это было известно давно.

Одной и многих мер по обеспечению безопасности АЭС с реакторами ВВЭР является глубоко эшелонированная защита. Стратегия глубоко эшелонированной защиты опирается на последовательные уровни защиты и включает ряд физических барьеров на пути выхода радиоактивных веществ или излучений во внешнюю среду.

Радиоактивные вещества образуются, как известно, в топливе в результате реакции деления и в первом контуре в результате активации теплоносителя и продуктов коррозии. На пути распространения осколков деления при их потенциально возможном выходе из топливной композиции в окружающую среду в современных реакторах имеется, как правило, четыре барьера:

- 1) топливная матрица,
- 2) оболочка ТВЭЛа,
- 3) герметичная граница контура теплоносителя,
- 4) защитная оболочка (контейнмент).

Хорошая герметичность оболочки ТВЭЛОВ необходима для исключения попадания продуктов деления топлива в теплоноситель, что может повлечь распространение радиоактивных элементов в первый контур охлаждения реактора. Контроль герметичности оболочек на работающем реакторе производится по уровню этих элементов в первом контуре реактора. Также химическая реакция урана, плутония и их соединений с теплоносителем может повлечь деформацию ТВЭЛа и другие нежелательные последствия. Также для эффективной работы необходимо минимизировать взаимодействие оболочки с нейтронным потоком (во избежание потери нейтронов). При выборе материала оболочек ТВЭЛОВ очень важно, чтобы он обладал малым сечением захвата нейтронов, хорошей теплопроводностью, прочностью в нормальных условиях эксплуатации.

По совокупности своих ядерных, физических и технологических свойств цирконий является одним из лучших материалов оболочек ТВЭЛОВ, охлаждаемых водой, паром и пароводяной смесью до 300—350 °С.

У чистого металлического циркония сечение захвата тепловых нейтронов равно 0,18 барнам. В земной коре цирконию всегда сопутствует гафний. В циркониевых рудах, например, его содержание обычно составляет от 0,5 до 2,0%. Химический аналог циркония (в менделеевской таблице гафний стоит непосредственно под цирконием) захватывает тепловые нейтроны в 500 раз интенсивнее циркония. Даже незначительные примеси гафния сильно сказываются на ходе реакции. Например, 1,5%-ная примесь гафния в 20 раз повышает сечение захвата циркония, что сказывается на коэффициенте размножения нейтронов, а, следовательно, и на длительности работы загрузки топлива.

Перед техникой встала проблема — полностью разделить цирконий и гафний. Если индивидуальные свойства обоих металлов весьма привлекательны, то их совместное присутствие делает материал абсолютно непригодным для атомной техники.

Проблема разделения гафния и циркония оказалась очень сложной — химические свойства их почти одинаковы из-за чрезвычайного сходства в строении атомов. Для их разделения применяют сложную многоступенчатую очистку: ионный обмен, многократное осаждение, экстракцию. Все эти операции значительно удорожают цирконий, а он и без того дорог. Проблема экономичного разделения циркония и гафния еще ждет своего решения.

Однако при продлении кампании реактора хотя бы на один день речь может пойти об экономии суммы более одного миллиона долларов. Чтобы найти какое-то экономическое равновесие между затратами на очистку циркония от гафния и прибылью от продления работы загрузки топлива, необходимо оценить влияние примеси гафния в цирконии на долговечность кампании ВВЭР.

В реакторах ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 оболочки ТВЭЛов выполнены из сплава Э-110. Современные требования допускают содержание гафния в данном сплаве не более 100 ppm (0,01%). Содержание ниобия — в среднем 1%.

Оценим зависимость коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде от процентного содержания гафния в сплаве циркония.

Коэффициент размножения нейтронов — это отношение числа нейтронов последующего поколения к их числу в предыдущем поколении во всём объёме активной зоны. Основными причинами потери нейтронов являются их поглощение в активной зоне и уход нейтронов за пределы АЗ. Отсутствие утечки означает бесконечно большой объём вещества, а соответствующий ему коэффициент размножения называется коэффициентом размножения в бесконечной среде.

Для определения k_{∞} используем программу ТВС-М. Программа ТВС-М является основной ячейкой программы, используемой для проектных и эксплуатационных расчётов реакторов ВВЭР. Программа создана в РНЦ им. Курчатова. Для двумерного расчёта ТВС в ней применяется комбинация метода ВПС (вероятности первых столкновений) и диффузионного метода. Расчёт сечений основан на использовании банка данных программы MCURFFI/A и программ семейства MCU: CROSS и ТЕРМАК. Учёт резонансного поглощения ведётся с помощью ультратонкого группового приближения.

В программе ТВС-М используется максимально точная (и соответственно максимально сложная) модель расчета пространственно-энергетического распределения нейтронов в отдельной ячейке. Результаты такого расчета применяются затем в расчете кассеты. Программа ТВС-М позволяет проводить расчет однородных топливных решеток с минимальными приближениями. Это обеспечивается благодаря современному уровню библиотеки ядерных данных программы и использованию расчетных методик высокой точности.

Пространственный расчет распределения нейтронов выполняется посредством разбиения ячейки по радиусу на произвольное число геометрических зон и использования метода вероятностей прохождения. Этот метод основан на расчете вероятностей вылета из зоны, пролета через зону и первого столкновения в зоне для падающего на границу зоны нейтрона. Угловое распределение падающих нейтронов описывается в РЗ-приближении. Рассчитываются также вероятности нейтрону, рожденному в зоне с однородным и

изотропным распределением, испытать в ней первое столкновение или выйти из зоны. Таким образом, все вероятности зависят только от параметров данной кольцевой зоны ячейки. В расчете для прилегающей к границе ячейки зоны учитывается реальная форма границы. Эти вероятности позволяют определить обычные вероятности первых столкновений, т.е. вероятности пространственных переходов между зонами ячейки, и с их помощью рассчитать пространственное распределение нейтронов. Поскольку все вероятности зависят только от двух параметров: оптической толщины зоны и соотношения её радиусов, они определяются посредством интерполяции заранее насчитанных по отдельной программе значений. Методика определения вероятностей отдельных зон пригодна для любой конкретной геометрии и является достаточно быстродействующей.

Разбиение на зоны позволяет, в частности, учитывать влияние распределения температуры топлива по радиусу топливной таблетки на сечения резонансных нуклидов и спектр нейтронов в резонансной области энергий.

В области энергий замедляющихся нейтронов $10,5 \text{ МэВ} > E > 4,65 \text{ кэВ}$ (группы 1-12) в каждой группе производится детальный внутригрупповой расчет спектра нейтронов. При этом группа разбивается на произвольное число одинаковых по летаргии интервалов, и затем расчет выполняется в каждой точке разбиения группы.

Таблица 1 – Результаты вычислений программы ТВС-М

Примесь гафния в цирконии, %	k_{∞}
0,0100	1,42527
0,0080	1,425497
0,0060	1,425726
0,0040	1,425957
0,0020	1,426189
0,0010	1,426303
0,0008	1,426325
0,0006	1,426347
0,0004	1,426371
0,0002	1,426395
0,0001	1,426407

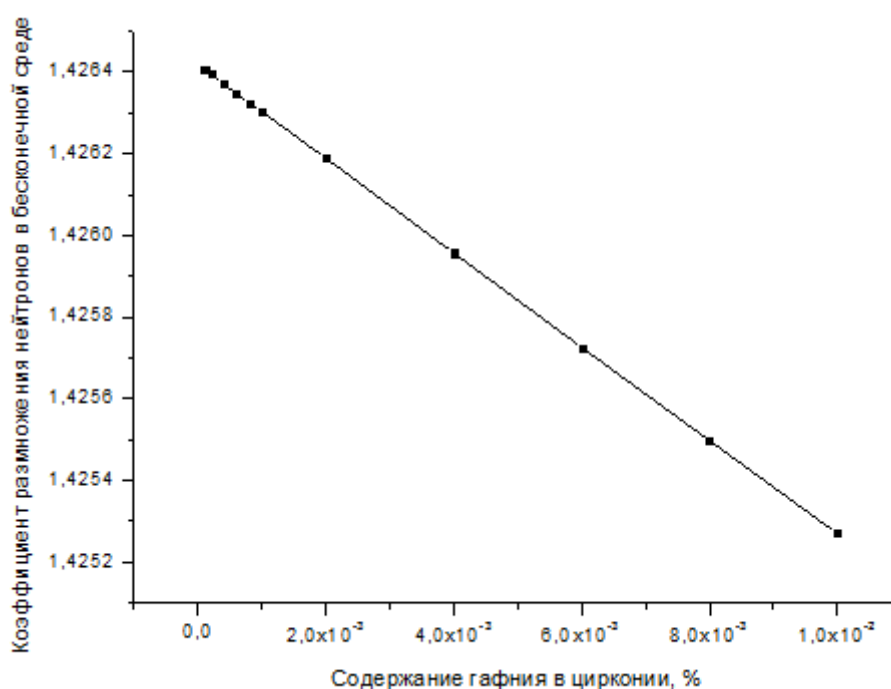


Рисунок 1. Зависимость коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде от процента примеси гафния в цирконии

Зависимость коэффициента размножения от содержания гафния носит линейный характер и может быть описана формулой:

$$k_{\infty} = -0,114925x + 1,426417 ,$$

где x – содержание гафния, %.

Из результатов вычисления программы видно, что при содержании 0,01% гафния в цирконии $k_{\infty} = 1,42527$, а для 0,001% $k_{\infty} = 1,426303$. То есть, при уменьшении содержания гафния в 10 раз, k_{∞} увеличилась на 0,001003. В ядерном реакторе ВВЭР такая прибавка может привести к увеличению продолжительности кампании на срок не менее одних суток.

В дальнейшем планируется рассчитать длительность кампаний реактора при разных k_{∞} и узнать, повлияет ли изменение содержания гафния в цирконии на их долговечность.

Литература

1. Марков Ю.В., Сидоренко В.А. Введение в разработки и обоснования технических характеристик и безопасности эксплуатации реакторных установок типа ВВЭР. – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2013. – 176с.: 45 илл.
2. А. О. Бородин, Б. Н. Оныкий, А. Г. Ананьева: Роль ядерной энергетики в современном мире. Безопасность и стоимость. // Вестник «ЮНИДО в России» [Электронный ресурс]. – 2004. - №4. – Режим доступа: http://www.unido-russia.ru/archive/num4/art4_18/. – Дата доступа: 16.04.2017.
3. Цирконий и его сплавы - Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://leg.co.ua/arhiv/generaciya/teplovydelyayuschie-elementy-yadernyh-reaktorov-28.html>. – Дата доступа: 16.04.2017.