

УДК 621.039

## РАСЧЁТ УВЕЛИЧЕНИЯ КАМПАНИИ РЕАКТОРА ВВЭР-1200 ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИРКОНИЯ С ПОНИЖЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ГАФНИЯ В ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКАХ

Стрижёва Е.М.

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

Водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР) относится к самому распространенному типу легководных реакторов. Главный аргумент в пользу выбора современных ВВЭР – безопасность. В последних проектах реакторов типа ВВЭР реализованы самые современные подходы к обеспечению безопасности, основанные на принципе глубокоэшелонированной защиты и предполагающие несколько уровней безопасности, оптимальное сочетание многоканальных пассивных и активных систем безопасности.

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 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 четыре барьера:

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

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. Изменения в топливе, реакции топлива с оболочкой и теплоносителем могут привести к деформации ТВЭЛа и другим нежелательным последствиям. 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. Поэтому содержание примеси гафния в цирконии тепло выделяющих сборок нежелательно и требует по возможности максимальной очистки циркония от его природного спутника.

Проблема разделения гафния и циркония является достаточно 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 технологические способы и приемы разделения циркония и гафния являются труднодоступными, многоступенчатыми и достаточно энергоемкими.

Вначале цирконий стали выпускать с примесью гафния 0.05% (весовых) - это уже годилось для работы, но постепенно технология дошла до того, что содержание гафния снизилось до 0.01%. Чем меньше гафния, тем при прочих равных условиях получается больше кампания, больше энерговыработка топлива, лучше экономические показатели.

Однако при продлении кампании реактора хотя бы на один день речь может пойти об экономии суммы более одного миллиона долларов. Чтобы найти 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  $k_{\infty}$  используем программу ТВС-М. Программа ТВС-М является основной ячеечной программой, 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  $P_3$ -приближении (приближении сферических гармоник, использующем полиномы Лежандра до третьего порядка для повышения точности представления углового распределения нейтронов). 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, %	$k_{\infty}$
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

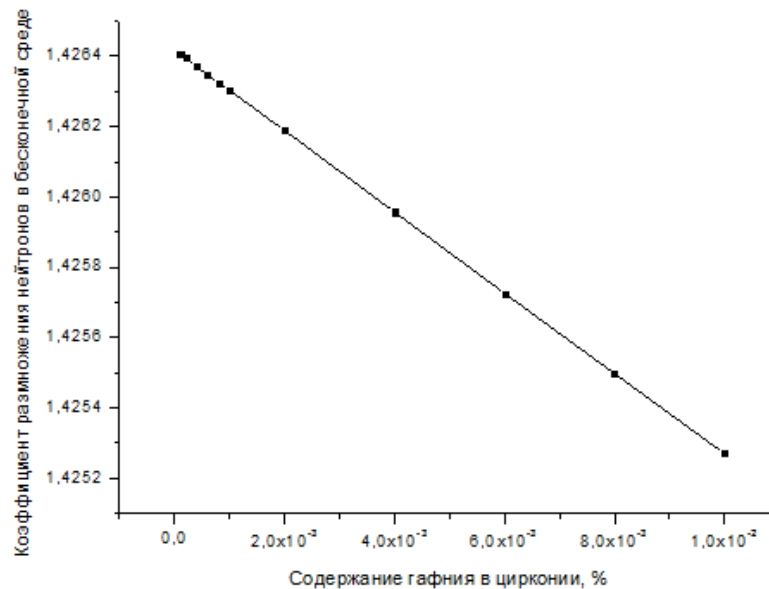


Рисунок 1. Зависимость коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде от процента примеси гафния в цирконии

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,  $k_{\infty}$  увеличилась на 0,001003. В ядерном реакторе ВВЭР такая прибавка может привести к увеличению продолжительности кампании на срок не менее одних суток.

Далее определим время работы реактора до первой перегрузки топлива ( $\tau_{эфф}$ ) при разных  $k_{\infty}$  и узнаем, повлияет ли изменение содержания гафния в цирконии на его значение.

Для расчёта понадобится программа БИПР-7. Данная программа также была разработана в РНЦ "Курчатовский институт" и является основной программой для проектных и эксплуатационных расчетов активных зон реакторов ВВЭР.

В программе БИПР-7 активная зона реактора представляется несколькими симметричными секторами, в каждом из которых размещение ТВС с одинаковыми расчетными нейтронно-физическими свойствами и с одним и тем же расчетным номером  $n$  симметрично повторяется. Программа позволяет рассчитывать сектора симметрии с углами  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$  и  $360^\circ$ . Благодаря наличию симметрии расчеты выполняются только для одного сектора, что существенно упрощает и ускоряет обсчет картограмм загрузок. Для математического описания физических процессов реальная активная зона, в которой ТВС размещены в плане по треугольной сетке, представляется моделью, где непрерывное изменение свойств в объеме активной зоны заменяется дискретным, по узлам, в которых сосредоточены все физические свойства, усредненные по сечению ТВС (рисунок 2). По высоте ТВС берется  $m$  узлов ( $1 < m < 10$ ), и, таким образом, активная зона представляется в виде пространственной сетки. В каждом узле сетки с координатами  $(n, m)$  определяется ряд характеристик, меняющихся со временем при выгорании: размножающие свойства ( $k_{\infty}$ ), зависящие от сорта топлива, местные мощностные эффекты, эффекты отравления самарием иксеноном, глубина выгорания топлива, поле плотностей потоков нейтронов, поле энерговыделений и т. д. Рабочие ТВС представляются неподвижной пространственной сеткой узлов. Реальная решетка стержней СУЗ представляется подвижной пространственной сеткой узлов.

В программе БИПР-7 реализуется методика расчета, основанная на решении двухгрупповых диффузионных уравнений для трехмерной геометрической модели ВВЭР.

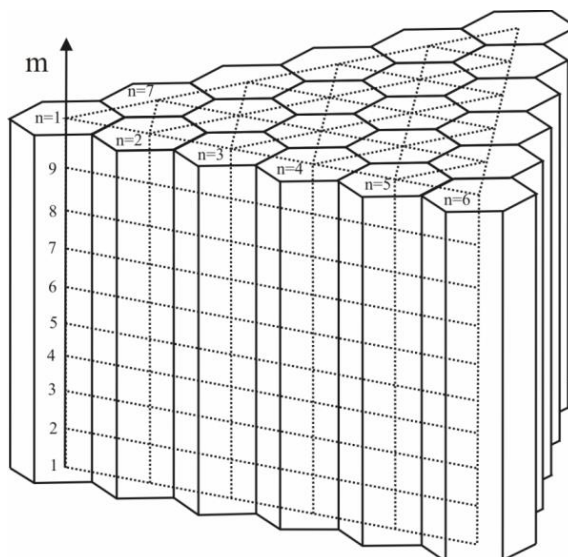


Рисунок 2. Модель активной зоны в программе БИПР-7

С помощью программы БИПР-7 определим  $\tau_{эфф}$  в двух случаях: со стандартным содержанием примеси гафния в цирконии (0,01%,  $k_{\infty}=1,42527$ ) и с уменьшенным содержанием в 10 раз (0,001%,  $k_{\infty}=1,426303$ ).

Результаты вычислений программы БИПР-7 представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты вычислений программы БИПР-7

$k_{\infty}$	$\tau_{эфф}, \text{СУТОК}$
1,42527	341,54
1,426303	342,45

Из результатов вычисления видно, что при содержании увеличении  $k_{\infty}$  на 0,001033 (уменьшении содержания гафния в 10 раз) время работы реактора увеличилось почти на сутки (0,91 суток = 21,84 час).

Чтобы понять, какая выгода из рассматриваемого технического решения, рассчитаем отпуск энергии за это время для АЭС мощностью 2400 МВт:

$$\mathcal{E}_t = N \cdot \tau_{эфф} \cdot \left(1 - \frac{\Delta \mathcal{E}_{сн}}{100}\right) = 2400 \cdot 21,84 \cdot \left(1 - \frac{7,48}{100}\right) = 47,7 \cdot 10^3 \text{ МВт} \cdot \text{ч},$$

где  $N$  – мощность АЭС,

$\Delta \mathcal{E}_{сн}$  – расход электроэнергии на собственные нужды, для Белорусской АЭС составляет не более 7,48% от номинальной мощности.

Тариф на электроэнергию принимаем  $\tau_{ээ} = 93 \frac{\$}{\text{МВт} \cdot \text{ч}}$ .

Тогда объем реализации электричества за эти часы будет составлять:

$$V_{рт} = \mathcal{E}_t \cdot \tau_{ээ} = 47,7 \cdot 10^3 \cdot 93 = 4,44 \text{ млн. \$};$$

Выполненные нейтронно-физические и экономические расчеты показывают, что применение промышленно доступного сплава циркония с уменьшенным количеством гафния позволит увеличить время работы реактора почти на сутки и получить дополнительную прибыль 4,44 млн \$ за один интервал между перегрузками топлива.

Данное техническое решение может быть рекомендовано для использования на Белорусской АЭС.

### Литература

1. Проект АЭС-2006. Основные концептуальные решения на примере Ленинградской АЭС-2. ОАО «СПбАЭП». – СПб.: Ин-т «Атомэнергопроект», 2011. – 40 с.
2. Семечков Ю.М. Использование топлива в реакторах ВВЭР: состояние и перспективы // журнал РЭА, 2014. - №11
3. 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.
4. 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/](http://www.unido-russia.ru/archive/num4/art4_18/). – Дата доступа: 16.04.2017.
5. Цирконий и его сплавы - Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://leg.co.ua/arhiv/generaciya/teplovyydelyayuschie-elementy-yadernyh-reaktorov-28.html>. – Дата доступа: 16.04.2017.