

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОРИЙ-ПЛУТОНИЕВОГО КОМПОЗИТА В РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКЕ ВВЭР-1000

Баталов А.А.¹, Кнышев В.В.²

¹ Томский политехнический университет, ИЯТШ, 0А21, aab210@tpu.ru

² Томский политехнический университет, ИЯТШ, ассистент, vvk28@tpu.ru

Введение

Атомная энергетика представляет собой многообещающую отрасль, обладающую огромным потенциалом для производства электроэнергии, ведь один грамм урана способен генерировать столько же энергии, сколько 3 тонны угля, и практически полной независимостью от внешних факторов, таких как погода или сезонные изменения. Благодаря этому ее развитие рассматривается как потенциальная замена углеводородной энергетике. Однако, насколько реальна эта перспектива? Действительно, запасы урана огромны. По оценкам Международного агентства по атомной энергии, их хватит на несколько столетий, если использовать современные технологии. Но вот в чем загвоздка: эти ресурсы конечны, а значит, проблема нехватки энергии рано или поздно вернется, что мотивирует ученых разных стран на расширение ресурсной базы данной отрасли, за счет совершенствования существующих ядерных циклов и поиска альтернатив урановому топливу. Существующие ядерные установки имеют сложное устройство, рассчитанное на определенные условия их эксплуатации, откуда возникает другой вопрос: возможно ли безопасное применение новых топливных композитов в существующих реакторах?

Поэтому цель данной работы заключается в оценке последствий и изменений эксплуатационных характеристик, вызванных применением одной из потенциальных топливных смесей, а именно торий-плутониевого диоксида, в самом распространенном на данный момент ядерном реакторе – ВВЭР-1000.

Описание алгоритма

Оценка проводилась с использованием программных комплексов MCU и WIMS, рассчитанных для статистической оценки процессов, происходящих в элементарной ячейке ядерного реактора, а также посредством математических расчетов. В ходе исследования активная зона установки принимается за совокупность ТВС, представленных эквивалентными цилиндрическими объектами, разбитыми на подзоны, как это показано на рис. 1.

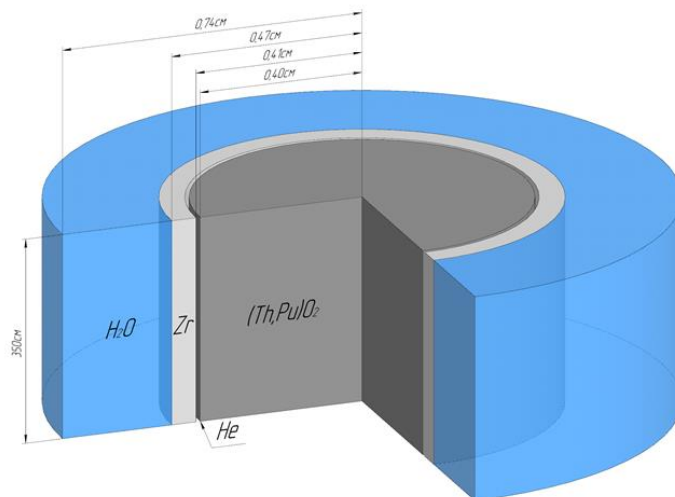


Рис. 1. Устройство элементарной ячейки активной зоны

В первую очередь необходимо было убедиться в работоспособности топливной сборки, для понимания целесообразности проведения исследований, а также подобрать состав смеси для обеспечения энерговыработки аналогичной стандартному топливу. С этой целью был проведен расчет, топливные параметры которого совпадали с параметрами для уранового топлива. Длительность кампании определялась с помощью коэффициента размножения, за счет регистрации момента падения его значения

ниже единицы, а полная электрическая энерговыработка – посредством перемножения количества эффективных суток и электрической мощности установки для выбранного топлива. Оптимальное обогащение определяется путем сравнения полученного результата с энерговыработкой урана.

Выполненные расчеты показали, что при обогащении 5 % ториевое топливо значительно уступает урановому по энерговыработке. Однако, при обогащении 7 % и плотности топлива 9400 кг/м^3 при тепловой мощности 3000 МВт, длительность топливной кампании сборки на торий-плутониевой композите составит 1237 эффективных суток. Это значительно больше, чем время работы ВВЭР-1000 на диоксиде урана, примерно на 100 суток. В связи с этим, столь длительная эксплуатация приведет к значительному изменению нуклидного состава микротоплива и его структуры, а также к изменению теплофизических свойств и температуры топлива.

Затем проводится анализ влияния водно-топливного отношения ($S_{\text{вод}}/S_{\text{топ}}$) на длительность топливной кампании. Для этого был проведен ряд однотипных расчетов, отличных друг от друга концентрацией молекул воды и варьированием водно-топливного отношения в пределах от 1,0 до 5,0 с шагом 0,2. Сравнив полученные длительности кампаний, определяем оптимальную геометрию с наибольшим количеством эффективных суток.

Анализ спектров потоков нейтронов на начало и конец кампании показал, что у уранового топлива значительно больше тепловых нейтронов, а его спектр мягче, чем у торий-плутониевого топлива. Для повышения эффективности использования исследуемого топлива рекомендуется уменьшить водно-топливное отношение со стандартного 2,0 до 1,2 для переориентации ТВС на использование быстрых нейтронов. Это позволит увеличить время работы сборки на 50,5 суток, как видно из рис. 2.

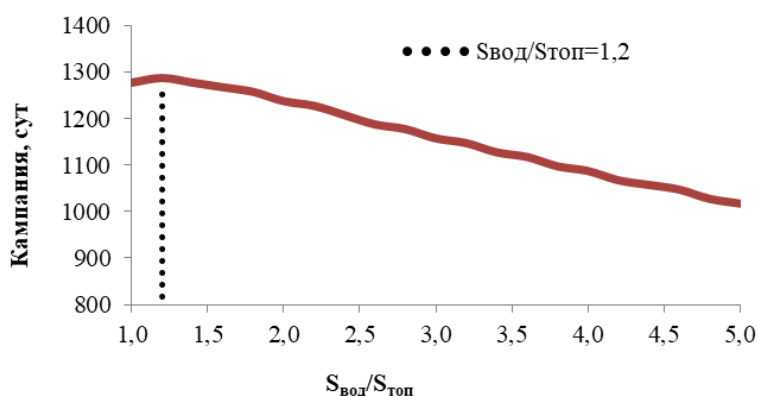


Рис. 2. Зависимость времени работы реактора от водно-топливного отношения

Изменение геометрии элементарной ячейки активной зоны скажется на ее эксплуатации, посредством изменения плотностей потоков групп быстрых и промежуточных нейтронов в большую сторону, а соответственно и увеличение радиационного фона, требующего внедрения в установку дополнительной радиационной защиты. Подобное изменение не входит в рамки установленной работы и будет рассмотрено отдельно в будущих трудах.

Для реакторов ВВЭР, теплоноситель прокачивается через ТВС в активной зоне. В случае гексагональных тепловыделяющих сборок, расстановка твэлов осуществляется в шестиугольных ячейках. Расчет водно-топливного отношения производился посредством отношения площадей поперечного сечения, соответствующих зон. Для достижения наибольшей продуктивности торий-плутониевого топлива, необходимо уменьшить шаг расстановки до 11,85 мм. Для обеспечения универсальности применения ТВС с новой геометрией в существующих реакторах размер под ключ ТВС должен оставаться неизменным (234 мм). Однако, этот фактор приводит к возникновению пустотного пространства, которое заполняется теплоносителем при эксплуатации, нарушая водно-топливное отношение внешнего контура.

Лучшими вариантами для решения возникшей проблемы стали:

- А. Установка выгорающего поглотителя в образовавшихся пустотах;
- В. Внедрение ячеек с чистым торием, служащих зоной воспроизводства вторичного топлива.
- С. Увеличение и внедрение новых ребер жесткости для повышения устойчивости ТВС.

Остановиться было решено на третьем варианте, включающем увеличение и добавление новых ребер жесткости для повышения устойчивости. Причиной тому стало то, что это единственный из предложенных вариантов, не подразумевающий частичное поглощение нейтронного потока, которое потенциально скажется на жесткости спектра и оптимальной геометрии.

При выборе формы и толщины ребер и увеличении существующих элементов были рассмотрены различные вариации расположения ячеек. Целью было определить форму свободного пространства, которая была бы удобна для модификаций. Приоритетными точками для размещения ячеек были углы, центры ребер и радиусы между этими точками и центром шестиугольника, а также пространство вокруг центрального канала. Прочие ячейки располагались равномерно вокруг них.

Оптимальным решением, на котором решено остановиться, представлено на рис. 3.

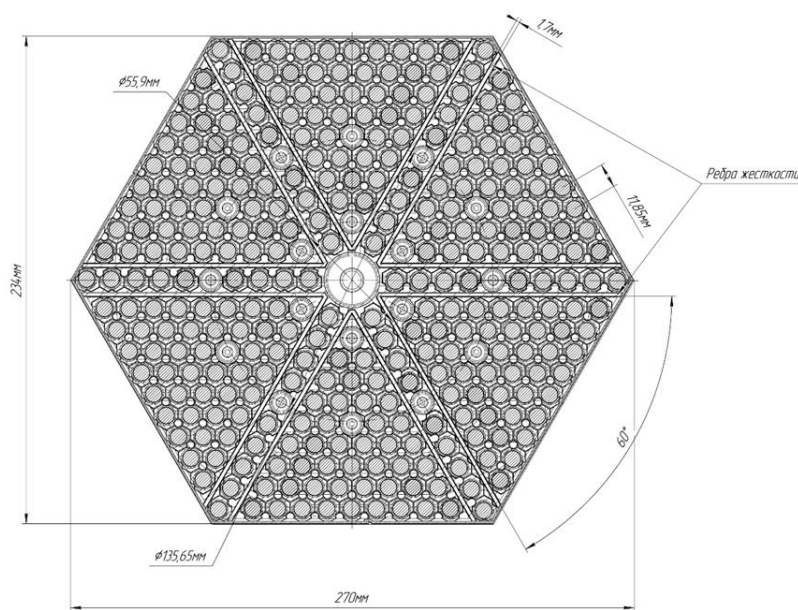


Рис. 3. Смоделированная дистанционирующая решетка с водно-топливным отношением 1,2

После рассмотрения возможности применения торий-плутониевого топлива со стороны нейтронно-физических параметров, были проведены расчёты теплофизических критериев нового композита, превышение которых может привести к его плавлению и поломке реактора. Для этого были выполнены расчёты с использованием основных теплофизических закономерностей.

Первым делом была определена удельная объёмная плотность тепловыделения в топливной таблетке при условии, что максимумы энерговыделения по высоте и радиусу совпадают и соответствуют положению – центр.

После тепловой канал был «разбит» на 10 участков, нумерация которых начинается от участка входа теплоносителя, а длина каждого участка равна 35 см. Такое деление позволяет заменить непрерывное косинусоидальное распределение по высоте на кусочное и добиться более точных результатов.

При более продуктивной геометрии для правильной работы реактора теплоноситель, по расчётам, будет вынужден течь со скоростью от 10 до 11,5 м/с. Это не удовлетворяет техническому устройству реактора ВВЭР-1000, где скорость теплоносителя не превышает 10 м/с. При использовании реактора в таких условиях он не способен долго эксплуатироваться, что приведёт его к поломке и ЧС на реакторе. Устойчивость смоделированной ТВС таким нагрузкам будет рассмотрена в будущих работах. Потому использование торий-плутониевого топлива с максимальной эффективностью не безопасно и для его использования необходимо среднее используемое водно-топливное отношение равное 2,0. При нём скорость теплоносителя опустится до 8-9,5 м/с, удовлетворяющих условиям эксплуатации.

На основе вышеупомянутых расчетов и условия равномерности состава и свойств композита на протяжении всей работы была определена температура в самой топливной таблетке, и на основе всех полученных данных был построен график зависимости температуры от радиуса тепловыделяющей сборки для максимальной температуры (рис. 4.).

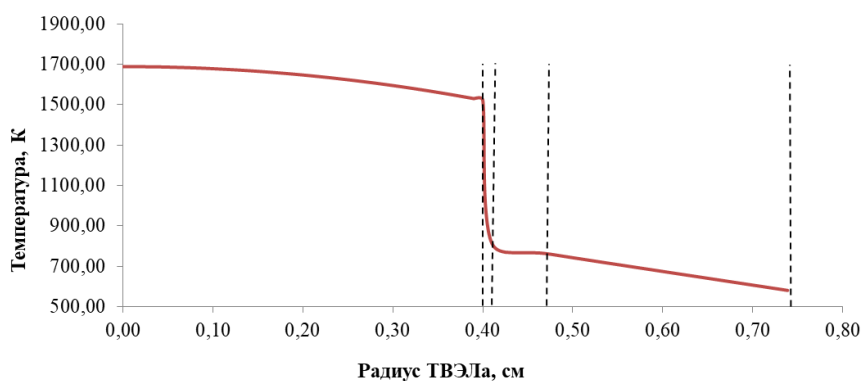


Рис. 4. Распределение максимальной температуры по радиусу ТВС

Также используя энергию Гиббса было спрогнозировано какие оксидные и галогенные соединения могут образоваться при высоких температурах из элементов с наибольшими концентрациями, исходя из чего было рассчитано изменение теплопроводности торий-плутониевого топлива в результате выгорания.

Заключение

Таким образом, была рассмотрена возможность перехода наиболее распространённого реактора ВВЭР-1000 с уран-плутониевого цикла на торий-урановый.

Найдена наиболее эффективная геометрия с водно-топливным отношением 1,2, которая позволит достичь рекордного значения топливной кампании в 1287,5 суток.

Однако, как показали расчеты, эксплуатация нового топлива с лучшей эффективностью невозможна, что обусловлено недостаточной вибрационной устойчивостью существующей конструкции. По этой причине стоит придерживаться стандартного водно-топливного отношения 2,0. Такие изменения приведут к уменьшению работы реактора на 50,5 суток.

Было получено, что максимальная температура, возникающая в топливе на начало работы, будет равна 1687 К, что меньше максимальной температуры, возникающей в урановом топливе, на 100 К.

При дальнейшей работе теплопроводность топлива изменяется вместе с нуклидным составом с 21,5 Вт/(м·К) до минимального значения в 18,24 Вт/(м·К). Вместе с тем максимальная температура в исследуемом композите подымится до 1719,3 К, в то время как температура в урановом топливе возрастает до 2400 К. Столь значительное снижение в температурах позволит снизить нагрузку на топливный композит обезопасить использование установки.

Полученные параметры в будущем будут использованы для проведения моделирований в среде ЛОГОС.

Список использованных источников

1. Изменение эксплуатационных характеристик водо-водяного корпусного энергетического реактора модели ВВЭР-1000 при внедрении торий-плутониевого композита в топливную загрузку / А.А. Баталов, В.В. Кнышев // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. – 2023. – № 4.
2. Русинкевич А.А. Термодинамические эффекты в переносе продуктов деления в микротопливе при глубоких выгораниях: дисс. ... канд. тех. наук. – Москва : Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 2016. – 135 с.
3. Pazirandeh A., Ghaseminejad S., Ghaseminejad M. Effects of various spacer grid modeling on the neutronic parameters of the VVER-1000 reactor // Annals of Nuclear Energy. – 2011. – Vol. 38. – P. 1978–1986.
4. Алексеев С.В., Зайцев В.А. Торий в ядерной энергетике. – Москва : Техносфера, 2014. – 288 с.