

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОХ-ТОПЛИВА В СОВРЕМЕННЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Саттарова П. С., Коледа Д. П.

Зацепин Е. Н. – канд. техн. наук, доцент

В настоящее время в ядерной энергетике основным видом ядерного топлива является диоксид урана, в котором собственно делящийся элемент – это изотоп  $^{235}\text{U}$ , а в реакциях поглощения нейтронов другим изотопом  $^{238}\text{U}$ , образуется плутоний  $^{239}\text{Pu}$ . Излученный из облученного ядерного топлива плутоний может быть использован для необходимого обогащения делящимся элементом ядерного топлива диоксида урана с недостаточным содержанием изотопа  $^{235}\text{U}$ . Такой подход позволяет снизить потребление урана, запасы которого неизбежно истощаются, а также решить проблему утилизации нарабатывающегося в энергетических реакторах плутония и ликвидации запасов оружейного плутония.

В связи с этим чрезвычайно актуально направление, связанное с использованием МОХ- топлива- смешанного уран-плутониевого топлива на базе диоксидов  $\text{UO}_2$  и  $\text{PuO}_2$  (от англ. Mixed-Oxide fuel).

Ядерный топливный цикл описывает путь, по которому топливо попадает в ядерный реактор и по которому его покидает. Термин «топливный цикл» предполагает, что отработанное ядерное топливо может повторно использоваться на ядерных установках в свежих тепловыделяющихся элементах после специальной обработки.

Существуют два вида топливных циклов: открытый и замкнутый. Открытый топливный цикл представляет собой топливную цепочку: добыча природного урана, обогащение, создание ТВЭЛ (тепловыделяющих элементов), использование ТВЭЛ на ядерных электростанциях, захоронение ОЯТ (отработанное ядерное топливо (плутоний)). В настоящее время такой топливный цикл используется в Канаде, Швеции и США.

Замкнутый топливный цикл отличается от открытого цикла тем, что для производства ТВЭЛ используется МОХ-топливо. Данный топливный цикл используют: Великобритания, Франция и Япония. Стоит также отметить, что в последнее время все больше стран начинают осваивать замкнутый топливный цикл, например, США и РФ, в связи с тем, что использование данного цикла решает множество проблем связанных с ОЯТ.

Для производства МОХ-топлива может служить обедненный уран с перерабатывающих заводов или из отходов обогатительных производств, а также природный уран. Плутониевый компонент МОХ-топлива выделяется из облученного топлива ядерных реакторов.

МОХ-топливо может использоваться как в тепловых реакторах, так и в реакторах на быстрых нейтронах. При этом содержание плутония в топливе для тепловых реакторов составляет 4...5 %, а для реакторов на быстрых нейтронах существующие технологии обеспечивают значения до 45 %. Наиболее эффективно применение МОХ-топлива в реакторах на быстрых нейтронах.

В настоящее время существуют два принципиально различных метода получения МОХ – топлива.

Первый заключается в механическом смешивании исходных порошков диоксидов урана и плутония (МСО), подготовке пресс-порошка с высокой равномерностью перемешивания диоксидов, смешивании его со связкой (например, со стеаратом цинка). Далее осуществляется обычный процесс прессования и спекания таблеток, их шлифовка (если это необходимо) и контроль качества.

Другой способ состоит в осаждении порошкообразного твердого раствора ( $\text{U}$ ,  $\text{Pu}$ )  $\text{O}_2$  из нитратных растворов соединений урана и плутония. В этом методе предъявляются высокие требования к степени очистки азотнокислых растворов урана и плутония.

Основная доля МОХ-топлива в мире производится с использованием технологии механического смешивания. При этом порошкообразные диоксиды урана и плутония загружаются в необходимых соотношениях в шаровые мельницы, где смесь измельчается и путем добавления  $\text{UO}_2$  корректируется окончательный состав смешанных порошков.

С целью повышения качества получаемых порошков, упрощения технологических процессов, снижения выхода жидких отходов технология производства МОХ-топлива на базе азотнокислых соединений урана и плутония постоянно совершенствуется. В целом общим направлением совершенствования технологии производства МОХ-топлива является сокращение количества операций с соответствующим уменьшением отходов, а также повышение уровня механизации и дистанционное управление всем технологическим процессом.

Поведение МОХ-топлива под облучением в целом соответствует поведению диоксида урана  $\text{UO}_2$ . Важнейшей проблемой оксидного топлива является взаимодействие под облучением топливной композиции с оболочкой твэла, приводящее к коррозионному повреждению. Интенсивность такого взаимодействия зависит в значительной степени от так называемого кислородного коэффициента (КК) – отношения количества атомов кислорода к урану или суммарному количеству атомов урана и плутония. Поскольку интенсивность коррозии оболочки за счет взаимодействия с топливом меньше для более низких значений КК, МОХ-топливо в этом отношении имеет преимущество по сравнению с обычным диоксидом урана.

В последние годы в связи с сокращением ядерных вооружений США и России значительное внимание уделяется вопросам, связанным с утилизацией оружейного плутония. В качестве основного варианта рассматривается возможность его вовлечения в топливный цикл легководных реакторов - прямая замена части уранового топлива на МОКС-топливо, не сопровождающаяся изменениями конструкции активной зоны и режимов эксплуатации энергоблока.

В отличие от уранового топлива, при использовании которого неизбежно накапливаются запасы плутония, использование МОКС-топлива позволяет, кроме наработки электроэнергии, сжигать накопленный плутоний.

При использовании только уранового топлива в реакторе мощностью 900 МВт примерно через каждые три года имеет место во наработка плутония в количестве 780 кг на одну активную зону. Такой же реактор, загруженный МОКС-топливом на 30 процентов, позволяет вырабатывать электроэнергию без увеличения общего количества плутония. При стопроцентной загрузке МОКС-топливом реактор будет не только вырабатывать электроэнергию, но и сжигать более полутора тонн плутония на одну активную зону.

МОХ-топливо давно и успешно применяют в о многих ядерных державах для легководных реакторов типа PWR, получивших наибольшее распространение. МОКС-топливо используется в 33 реакторах Франции, Германии, Бельгии и Швейцарии. Получена лицензия и подана заявка на загрузку такого топлива еще в 22 реактора (сведения за 2004 г.)

В настоящее время топливо из регенерированного плутония используется все шире. Подтверждением к большему применению МОКС-топлива в легководных реакторах является намерение Японии перевести в ближайшее время четыре реактора МОКС-топливо PWR и BWR, а к 2010 завершить перевод 18 реакторов. Другим подтверждением служит решение Министерства энергетики США о проектировании установки FFF (Fuel Fabrication Facility) для изготовления МОКС-топлива с использованием и оружейного плутония. Полагают, что через 10 лет до 50 легководных реакторов будут работать с частичной загрузкой зоны МОКС-топливом.

В России расчетные исследования возможности использования энергетического плутония в реакторах ВВЭР-1000, легководных реакторах, аналогичных зарубежным PWR, проводятся уже более 15 лет. В настоящее время проведены работы по модернизации топливного цикла реакторов ВВЭР-1000, что позволило достичь существенного улучшения целого ряда принципиальных параметров. В частности, эффективность аварийной защиты увеличена примерно на 25 процентов и снижен поток нейтронов на корпус реактора. Анализ расчетов активной зоны ВВЭР-1000, загруженной на одну треть МОКС-топливом, показал, что характеристики безопасности находятся в допустимых для этого типа реактора пределах.