

УДК 621.039.543.4

Ю.А. Киташова (4 курс, каф. УЯР), А.П. Еперин, д.т.н., проф.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТАВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Анализ причин аварии на Чернобыльской АЭС показал, что к катастрофическим последствиям привели недостатки конструкции стержней регулирования и неоптимальное уран-графитовое отношение, в результате чего паровой коэффициент реактивности  $\alpha_{\text{ф}}$  составил (4...5) $\beta$ . После аварии на всех блоках АЭС с реактором РБМК, в том числе и на Ленинградской АЭС, были проведены мероприятия по повышению безопасности реакторов. На первом этапе на ЛАЭС паровой коэффициент был снижен до  $1\beta$  путем загрузки дополнительных поглотителей (ДП) и увеличения оперативного запаса реактивности. На втором этапе был осуществлен переход на топливо с обогащением 2,4 %.

В настоящее время осуществляется перевод реакторов типа РБМК на уран-эрбиевое топливо. В основу методики перевода реакторов ЛАЭС на уран-эрбиевое топливо заложен принцип сохранения нейтронно-физических характеристик, обеспечивающих ядерную безопасность (средней энерговыработки ТВС, коэффициентов и эффектов реактивности, максимальных мощностей, коэффициентов запаса до кризиса теплообмена и линейной нагрузки на ТВЭЛ) в эксплуатационных пределах, установленных паспортом на РУ.

В ходе расчетно-экспериментальных работ на ЛАЭС было определено, что обогащение топлива в тепловыделяющих сборках РБМК-1000 до 2,6 % с добавлением выгорающего поглотителя в виде оксида эрбия, позволяет повысить безопасность реактора за счет:

- снижения парового коэффициента реактивности до требуемого уровня;
- уменьшения максимальной мощности ЭТВС;
- уменьшения неравномерности полей энерговыделения и улучшения управляемости реактора;
- исключения из активной зоны ДП и устранения проблем, связанных с хранением дополнительных высокоактивных отходов.

При этом существенно улучшаются экономические характеристики реакторов РБМК: повышается глубина выгорания выгружаемого топлива, снижается расход ТВС, уменьшаются затраты на хранение и транспортировку отработавшего топлива.

Экспериментальные результаты подтвердили тенденцию поведения основных нейтронно-физических характеристик реакторов при загрузке ЭТВС, которая прогнозировалась расчетами. Опыт эксплуатации ЭТВС показал, что значительно снизился выход ТВС по причине негерметичности, что связано со снижением линейных нагрузок и температур топлива за счет выравнивания поля энерговыделения и наличия отверстий в таблетках.

Редкоземельный элемент эрбий является выгорающим поглотителем с нейтронно-физическими свойствами, уникально проявляющихся в условиях РБМК. Природный эрбий содержит шесть изотопов. Основную роль в поглощении нейтронов играют  $\text{Er}^{166}$  и  $\text{Er}^{167}$ . Наиболее важный изотоп  $\text{Er}^{167}$  имеет сильный резонанс при энергии 0,47 эВ. Его присутствие и является основной причиной уменьшения парового коэффициента реактивности. Механизм воздействия  $\text{Er}^{167}$  на паровой коэффициент (или эффект обезвоживания) заключается в том, что при обезвоживании каналов спектр нейтронов сдвигается в сторону более высокой энергии. Этот сдвиг приводит к повышению

поглощения нейтронов в  $\text{Er}^{167}$ , т.е. в присутствии эрбия появляется дополнительная отрицательная составляющая в эффекте обезвоживания. Расчетные исследования показали, что размер и положение резонанса  $\text{Er}^{167}$  на энергетической оси являются оптимальными для его использования в урановом топливе РБМК.

Наибольший опыт эксплуатации ЭТВС РБМК- $\beta$ 1000 накоплен на 2-м энергоблоке (ЭБ) ЛАЭС. Загрузка ЭТВС в реактор 2-го блока началась в апреле 1996 года. В настоящее время осуществляется этап полного перевода 2-го ЭБ на уран-эрбиевое топливо. В соответствии с программой загрузки ЭТВС, осуществляется периодические измерения парового и быстрого мощностного коэффициентов реактивности. Результаты измерений подтвердили прогнозируемое уменьшение парового и быстрого коэффициентов реактивности. На данный момент  $\alpha_{\text{ф}}$  находится на уровне 0,7 $\beta$ .

Загрузка ЭТВС и выгрузка ДП привели к росту глубины выгорания топлива. К концу загрузки ~700 ЭТВС средняя глубина выгорания топлива в активной зоне возросла по сравнению с состоянием до начала загрузки ЭТВС на 8,6 %, а в настоящий момент — на 14,8 %. Моделирование загрузки предсказывало уменьшение коэффициента неравномерности энерговыделения и улучшение условий перегрузок топлива. Опыт эксплуатации ЭТВС на 2-м блоке подтвердил данные тенденции.

Дальнейшее улучшение качества топлива, используемого в РБМК-1000, предлагается осуществить за счет поэтапного повышения его обогащения — вначале до 2,8%, затем — до 3%. Согласно расчетам, использование топлива с обогащением 2,8% и содержанием эрбия 0,6% позволит: получить величину  $\alpha_{\text{ф}}$ , лежащую в середине допустимого диапазона (0...1) $\beta$ , а точнее 0,6 $\beta$ ; увеличить глубину выгорания топлива до 30 МВт-сут/kgU, т.е. на 8...10% по сравнению с топливом обогащения 2,6% и соответственно уменьшить расход ЭТВС, сохранить условия работы ЭТВС в активной зоне практически неизменными.