

БОЛЕЕ ВЫСОКИЕ ЦЕЛИ

ТЕХНОЛОГИЯ И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

ВЛАДИМИР ОНУФРИЕВ И ПАТРИК МЕНЬЮТ

По сравнению с электростанциями, работающими на ископаемом топливе, атомные электростанции характеризуются высокими начальными инвестициями, но низкими ценами на топливо. Атомная электростанция мощностью в 1 тыс. МВт использует, например, около 30 т урана в год, в то время как угольная электростанция требует около 2,6 млн. т угля, а электростанция, работающая на мазуте, — около 2 млн. т мазута.

В условиях современной меняющейся ситуации на рынке энергии все больше стран стремятся привести в ранее регулируемый рынок электричества элементы конкуренции. С точки зрения развития ядерной энергетики это означает, среди прочего, что в целях сохранения конкурентоспособности все расходы, связанные с ядерным топливом, должны поддерживаться на более низком уровне по сравнению с соответствующими расходами электростанций, работающих на ископаемом топливе. Давление экономических факторов наряду с экологическими требованиями стало поэтому движущей силой в осуществлении мер, направленных на совершенствование технологии и рабочих характеристик ядерного топлива без риска нарушения уровней безопасности.

Поиск более совершенных экономических характеристик топлива на атомных электростанциях сопряжен с проведением широкомасштабных и обстоятельных исследований. Эти исследования включают оценку конструкции, поведения, рабочих характеристик и надежности топливных элементов в различных эксплуатационных условиях и на различных типах реакторов. Особый интерес вызывает уве-

личение сроков службы ядерного топлива, и за последние десятилетия отмечается тенденция к достижению "более высоких степеней выгорания" топлива в большинстве типов реакторов. Все это привело к общей экономии связанных с топливом расходов и сокращению объемов отработавшего ядерного топлива, которым необходимо распорядиться. В то же время высокая степень выгорания предъявляет повышенные требования к рабочим характеристикам топлива. Поэтому в настоящее время проводятся исследования по оценке поведения топлива при различных заданных степенях выгорания. Постепенное повышение степени выгорания топлива разрешается лишь в случае представления лицензионным органам свидетельств того, что это может быть достигнуто без риска для безопасности и надежности топлива. Исследования сконцентрированы в основном на ряде явлений, способных потенциально ограничить срок службы топлива в различных эксплуатационных условиях.

В рамках Международной рабочей группы по технологии и характеристикам топлива для водоохлаждаемых реакторов МАГАТЭ оказывает поддержку объединенным усилиям национальных и международных экспертов в этой области. Кроме того, оно организует проекты координированных исследований с привлечением национальных институтов для изучения конкретных технических аспектов, а также руководит реализацией проектов технического сотрудничества по передаче технологий, знаний и опыта. В данной статье содержится обзор отдельных видов деятельности; при этом особое внимание уделяется тем из них,

которые непосредственно относятся к целям достижения более высокой степени выгорания ядерного топлива.

ОПЫТ В ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВА

При различных эксплуатационных условиях ядерные топливные сборки подвергаются воздействию агрессивных сред, характеризующихся синергическим воздействием напряжения, тепла, химического состава охлаждающей воды и облучения. Упомянутые эффекты приводят к прогрессирующей деградации механических и физических свойств материалов оболочек и других структурных компонентов сборок топливных и регулирующих стержней. Повышенные степени выгорания топлива предъявляют дополнительные требования к этим механическим и физическим свойствам, и значительная часть научных исследований и разработок направлены на создание усовершенствованных материалов, в том числе таких, например, которые в меньшей степени подвержены коррозии.

В целом надежность ядерного топлива в последние годы неуклонно повышается. Для легководных реакторов, основного типа реакторов, находящихся в эксплуатации в мире, коэффициенты отказа ТВЭЛ составляют 10^{-5} , что равняется примерно десяти в год на миллион задействованных топливных стержней. Предупреждение и контроль дефектов топлива обусловлены соображениями экономики

Г-н Онуфриев и г-н Меньют — сотрудники Отдела ядерного топливного цикла и технологий обращения с отходами.

и безопасности. Достижение "нулевого коэффициента отказа ТВЭЛ", что на практике означает снижение коэффициента отказа ТВЭЛ до 10^{-6} , является целью электрокомпаний и торговцев топливом на ближайшую перспективу.

Основные причины отказов ТВЭЛ до настоящего времени обусловлены главным образом недостатками их первоначальных конструкций и производства. В целях решения этих проблем разрабатываются и внедряются новые конструкции топливных стержней и тепловыделяющих сборок. Известно, например, что металлические осколки в первом контуре системы охлаждения легководных реакторов являются причиной значительной части отказов ТВЭЛ, примерно 40—50%. В результате электрокомпания разработали программы по выявлению и устранению источников металлических осколков, а продавцы топлива предлагают "противоосколочные" топливные конструкции.

В целях контроля характеристик при высоких степенях выгорания топлива и обеспечения данных для подтверждения достоверности прогнозирующих компьютерных программ проводятся исследования, называемые постиррадиационными анализами. К ним относятся как исследования контрольного разрушающего типа, так и более сложные разрушающие анализы и измерения. Проверка необходима и для новых топливных концепций, и для новых плакировочных материалов.

Изучение топлива с помощью моделирования важно как с экономической точки зрения, так и с точки зрения безопасности. Надежное прогнозирование поведения топлива при всех условиях эксплуатации необходимо при проведении расчетов безопасности в процессе проектирования. Для этих целей разработаны компьютерные программы. На основе полученных знаний о поведении топлива в нормальных и необычных условиях разрабатываются правила эксплуатации в целях предупреждения отказов ТВЭЛ и возможных выбросов делящихся материалов в окружающую среду или

в чрезвычайных ситуациях — в целях предотвращения серьезных повреждений топлива и активной зоны реактора и любых возможных опасностей. В рамках данной методологии топливные оболочки являются первым барьером безопасности.

Даже с помощью простейших компьютерных программ можно получить адекватные эксплуатационные параметры в целях обеспечения безопасности эксплуатации при соблюдении установленных консервативных пределов. Моделирование рабочих характеристик топлива и включение данных о них в программы также имеют важное значение для получения более реалистических прогнозов поведения топлива, что в свою очередь вносит вклад в совершенствование экономических показателей эксплуатации реактора.

СОВМЕСТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках рабочей группы МАГАТЭ эксперты изучили результаты исследований и эксплуатационного опыта и пришли к выводу, что характеристики топлива являются удовлетворительными с точки зрения текущих требований на реакторах с водяным охлаждением. Однако существует необходимость в проведении дальнейших научных исследований в некоторых областях в свете предпринимаемых усилий по достижению еще более высокой степени выгорания ядерного топлива. К их числу относятся следующие исследования:

Контроль водно-химического режима. При высоких температурах вода, вступающая в контакт со структурными материалами, становится агрессивной средой, а это означает, что надежность тепловыделяющих сборок наряду с другими системами атомных электростанций зависит от химического состава воды, циркулирующей в системах охлаждения. Коррозия является одним из наиболее важных процессов, вызывающих деградацию топливных стержней. В 80-е гг. технические требования к водно-химическому режиму постепенно ужесточались, и такой "чем чище, тем лучше" подход привел в результате к существенным

улучшениям, хотя по-прежнему остается безусловной необходимость дальнейшего снижения коррозии. В последнее время химики улучшают технические характеристики охлаждающей воды, обычно путем добавления в нее химикатов. Проведенные исследования позволили лучше понять механизм коррозии. В настоящее время водно-химические режимы становятся все более специфическими в отношении каждой отдельной электростанции. Например, операторы станций располагают новыми инструментами (калькуляционными кодами и программами) для оптимизации водно-химических параметров и режимов на основе действующих спецификаций, но с учетом особенностей станции.

Изучение этих проблем продолжается в рамках двух проектов координированных исследований МАГАТЭ.

Эксплуатационные аномалии.

В 90-е гг. из некоторых стран поступали сообщения о проблемах, связанных с изгибанием тепловыделяющих сборок и опусканием регулирующих стержней во время операций по останову реакторов. Хотя время сброса нагрузки в данных случаях не выходило за рамки технических спецификаций конкретных реакторов, эти аномалии были подвергнуты тщательному анализу и расследованию. Изучение этих аномалий, включая феномен заполненных водой промежутков между тепловыделяющими сборками, продолжается. Осуществлен ряд контролер по предотвращению повторного возникновения упомянутых выше проблем.

Облучение и другие эффекты.

В настоящее время исследуется ряд проблем, связанных с облучением ядерного топлива при более высоких степенях выгорания. Подробная характеристика эволюции микроструктур, вызванной облучением, является ключом к пониманию и прогнозированию деградации физических и механических свойств, обусловленной радиацией (см. фото на стр. 23). Совершенствование фундаментальных теоретических обоснований некоторых вызванных облучением явлений наряду с другими разра-

ботками помогает повысить точность прогнозов, касающихся деформации напорных труб, и полученные сведения способствуют разработке труб с более продолжительными сроками службы.

Образование газообразных продуктов деления непосредственно связано с длительностью облучения топлива. При высоких степенях выгорания это может привести к нежелательным последствиям, в частности к повышению внутреннего давления в стержнях. Изучение данного явления помогает определить факторы, которые должны учитываться при совершенствовании прогнозов о поведении топлива при высоких степенях выгорания. Свой вклад в эту работу вносят исследователи, участвующие в проекте координированных исследований по моделированию топлива. Было изучено 19 различных кодов, что привело к усовершенствованию и подтверждению достоверности элементарных моделей и кодов.

Одновременно в распоряжение десяти стран Восточной Европы передан усовершенствованный код по моделированию рабочих характеристик топлива вместе с руководством по его применению при оценке эксплуатации реакторов и безопасности. Адаптация данного кода к целям прогнозирования поведения топлива, используемого в реакторах типа ВВЭР при нормальных и переходных условиях, осуществляется в настоящее время в рамках проекта по техническому сотрудничеству МАГАТЭ. В стадии исследования находится также еще одна причина структурных изменений топлива, связанная с образованием плутония в процессе облучения. В некоторых странах изучение данного явления осуществляется как часть исследований в области безопасности.

Поведение топлива в аварийных условиях. В целях расширения знаний о поведении топлива в различных условиях проводятся его испытания с помощью сценариев по моделированию аварийных условий. Изучаются два сценария аварийных ситуаций, связанных с вводом реактивности и с потерей теплоносителя. Оба сценария включают испытания рабочих характери-

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ И СТРУКТУРЫ ТОПЛИВА



➡ Краевой слой



➡ Нормальная структура топлива

Исследования показали, что при высоких степенях выгорания структура топлива изменяется, как это видно на сильно увеличенном снимке, полученном с помощью электронного микроскопа. Образуется периферийный краевой слой, характеризующийся сверхмелкими зёрнами, высокой пористостью (от 10 до 20%) и содержанием плутония. В круге слева более крупным планом дано изображение нормальной структуры топлива.

стик топлива в расширенном диапазоне степеней выгорания. Сообщения о первых результатах этих исследовательских программ поступили из некоторых стран в рабочую группу МАГАТЭ в мае 1997 г. Предполагается, что окончательные результаты данных программ явятся решающим фактором в достижении в ближайшие годы желаемых более высоких степеней выгорания топлива.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

В следующее десятилетие тенденции к достижению более высоких степеней выгорания ядерного топлива в соответствии с имеющимися прогнозами будет продолжена, и в первую очередь благодаря экономическим стимулам. Ожидается, что степени выгорания для различных типов топлива, сжигаемого в охлаждаемых водой реакторах, возрастут к 2010 г. примерно на 32% и более. Эти инкрементно повышенные степени выгорания должны пройти испытания и получить оценку до лицензирования использования топлива. В некоторых областях требуются углубленные исследования и разработки, поскольку причины отказа ТВЭЛ в отдельных случаях остаются не до конца понятными даже после расследования. До сих пор отмечалось мало случаев отказов элемен-

тов смешанного оксидного топлива, тем не менее требуются новые экспериментальные данные для изучения поведения дефектных топливных стержней со смешанным оксидным топливом, особенно в условиях высоких степеней выгорания и более длительного времени облучения.

Рабочая группа МАГАТЭ по технологии и характеристикам топлива для водоохлаждаемых реакторов включает экспертов из 26 стран и трех международных организаций. Через эту группу, наряду с другими каналами, МАГАТЭ оказывает помощь странам в получении ими выгод от обмена опытом и технологическими разработками, сосредоточивая усилия на конкретных проблемах и потребностях. Например, МАГАТЭ совместно с Агентством по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития создали Международную экспериментальную базу данных по характеристикам топлива, включающую экспериментальные данные по более чем 300 топливным стержням, с целью использования их в проводимых в странах-участниках научных исследованиях. Эти и другие инициативы вносят вклад в коллективные усилия по решению возникающих технических проблем и в совершенствование эффективной эксплуатации атомных электростанций. □