

Передовая технология и усовершенствованная конструкция тяжеловодных реакторов

Некоторые страны продолжают выделять средства на развитие тяжеловодных реакторов

Дж.Дж. Липсетт и Дж.Т. Данн

В настоящее время в шести странах мира в стадии строительства или эксплуатации находятся 44 коммерческих тяжеловодных реактора. В течение ряда лет эти реакторы удерживали мировое первенство с точки зрения высокого коэффициента использования установленной мощности в течение года или всего срока службы реактора и доказали, что они являются жизнеспособной альтернативой легководных реакторов.

Кроме того, в дополнение к высоким коэффициентам использования установленной мощности в базовом режиме тяжеловодные реакторы продемонстрировали, когда в этом возникла необходимость, очень хорошие возможности работы в режиме следования за нагрузкой. Критически важное оборудование, компоненты, например, топливо и парогенераторы, обладают превосходными рабочими характеристиками, расходы на топливо для таких реакторов были очень низкими благодаря использованию в качестве топлива природного урана.

Тяжеловодные реакторы являются относительно новой технологией, и их потенциал активно развивается благодаря исследованиям в области создания конструкций усовершенствованных тяжеловодных реакторов в Аргентине, Индии, Канаде и Японии.

Г-н Липсетт и г-н Данн участвуют в реализации проекта создания усовершенствованного реактора CANDU, Чок-Риверская ядерная лаборатория, Чок-Ривер, Канада.

*CANDU – зарегистрированная торговая марка.

Основные характеристики тяжеловодных реакторов

Существует два основных типа коммерческих тяжеловодных реакторов. В одном из них, созданном фирмами Сименс и Крафтверке Юнион (KWU) в Западной Германии, активная зона реактора полностью размещается в баке под давлением. Второго типа, реактор CANDU был разработан канадской фирмой Атомик энерджи оф Кэнада (AFCL) в сотрудничестве с фирмой Онтаро Хайдро и канадскими промышленными фирмами-изготовителями оборудования*. В этом реакторе вместо одного бака под давлением используется несколько сот каналов. В обоих типах тяжеловодных реакторов в качестве замедлителя используется тяжелая вода, и им присущи одни и те же основные характерные черты:

- Прекрасный баланс нейтронов позволяет практически применять разомкнутый топливный цикл с использованием природного урана. Кроме того, возможна реализация широкого диапазона других альтернатив топливного цикла.

Перегрузка топлива на мощности дает несколько фундаментальных преимуществ: более высокие коэффициенты использования установленной мощности благодаря отсутствию необходимости в периодических остановах реактора для перегрузки топлива, сниженные потребности во внутриреакторных механизмах контроля за реактивностью и распределением потока нейтронов, замена негерметичных твэлов без останова реактора и легкий доступ к оборудованию для проведения технического осмотра в процессе эксплуатации.

- Небольшие изменения реактивности во всем диапазоне рабочих режимов, начиная от холодного состояния после останова до работы на полную мощность. Это снижает потребность в устройствах контроля за реактивностью и максимально

Коммерческие тяжеловодные реакторы, находящиеся в настоящее время на стадии строительства или в эксплуатации

	К-во блоков	Общая мощность (МВт _{эл.})
<i>Реакторы с корпусом под давлением</i>		
Аргентина	2	367–750
<i>Канальные реакторы</i>		
Аргентина	1	648
Индия	12	220–250
Канада	22	540–935
Пакистан	1	137
Корейская Республика	1	679
Румыния	5	705
Всего	44	25013

уменьшает возмущения в распределении потока нейтронов, а также потенциальные проблемы, связанные с локальным перегревом топлива в переходных режимах. Кроме того, это облегчает осуществление автоматического контроля за реактивностью в замкнутом контуре, что повышает гибкость эксплуатации в режимах следования за нагрузкой.

Относительно большое расстояние между ячейками решетки тяжеловодных реакторов позволяет физически отделить теплоноситель от замедлителя. Во всех действующих в настоящее время коммерческих тяжеловодных реакторах в качестве теплоносителя используется тяжелая вода под давлением; однако в некоторых странах для оценки возможностей использования в качестве теплоносителя двуокиси углерода, легкой воды и органических жидкостей были построены экспериментальные и прототипные тяжеловодные канальные реакторы. Совсем недавно Япония объявила о своих намерениях построить коммерческий (600 МВт_{эл.}) демонстрационный реактор с использованием кипящей воды в качестве теплоносителя.

В настоящее время в большинстве тяжеловодных реакторов в качестве топлива используется природный уран, очень часто это обусловлено стремлением сохранить независимость от установок по обогащению урана. Использование в качестве топлива урана небольшого обогащения позволяет значительно сократить издержки топливного цикла и повысить коэффициент использования топлива. Кроме того, на существующих тяжеловодных реакторах можно эффективно использовать плутоний и/или уран, выделенный из отработавшего топлива легководных реакторов (LWR), что обеспечивает синергизм тяжеловодных и легководных реакторов. В длительной перспективе благодаря использованию тория можно будет значительно уменьшить зависимость от урана.

Цели опытно-конструкторских работ и разработок

Основная цель непрерывных программ опытно-конструкторских работ и разработок заключается в снижении издержек производства электроэнергии

при сохранении высокого уровня безопасности и рабочих характеристик. Кроме того, очень важно добиться высокой уверенности в безопасности усовершенствованных конструкций тяжеловодных реакторов, так как такая тенденция наблюдается в мире в отношении всех типов реакторов. Это можно сделать, продемонстрировав, что в основе высокой безопасности лежит эксплуатационный опыт, отработанная технология и результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Усиление безопасности. Действующие тяжеловодные реакторы уже продемонстрировали высокую эксплуатационную безопасность, которая непрерывно совершенствуется благодаря внедрению результатов и опыта технологических разработок. Что касается будущих реакторов, то в различных странах уже намечен целый ряд мероприятий по поддержанию или повышению уровня безопасности станций, персонала и населения, а также доверия к этой безопасности.

Еще одна цель, поставленная перед несколькими национальными программами, заключается в уменьшении дозозатрат эксплуатационного и технического персонала. Она достигается с помощью таких средств, как тщательная оптимизация процессов обращения с тритием, раннее обнаружение утечек, быстрое обнаружение и удаление негерметичных твэлов без останова реактора, усиление защиты и повышение качества очистки теплоносителя, а также усиление контроля за герметизирующими материалами. Многие страны поставили перед собой аналогичную задачу сохранить на нынешнем уровне или уменьшить выбросы АЭС, работающих в номинальном режиме, которые уже сейчас, как правило, составляют менее 1 % от предельных уровней выбросов, установленных регулируемыми органами.

Для повышения эффективности работы оператора и уменьшения потенциальной возможности эксплуатационных ошибок персонала разрабатываются усовершенствованные БШУ. В конструкции таких усовершенствованных БШУ используется многолетний опыт коммерческой эксплуатации реакторов CANDU, управляемых с помощью числовых компьютеров. К числу подобных усовершенствований относится применение экспертных систем и других компьютеризированных методов, направленных на снижение рабочей нагрузки оператора и повышение качества представляемой информации.

Тяжеловодные реакторы обладают многими чертами, характерными для реакторов с внутренне присущей безопасностью. Особенный интерес вызывает высокое отношение объемов воды и топлива, так как замедлитель представляет собой поглотитель тепла с отдельным контуром теплоносителя. Холодный замедлитель в канальных тяжеловодных реакторах также является благоприятной средой для установки устройств контроля за реактивностью и позволяет использовать полностью независимые сбросные стержни управления и системы останова реактора с помощью инжекции жидких поглотителей нейтронов. Все это поможет обеспечить низкую вероятность расплава активной зоны.

Использование пассивных методов охлаждения в дополнение к системам охлаждения замедлителя рассматривается как следующий логический шаг на

пути усовершенствования этой характеристики. Обеспечение отвода остаточного тепла в окружающую среду благодаря системе охлаждения защитной оболочки или замедлителя позволит значительно снизить вероятность крупных аварий и увеличить период безопасного аварийного расхолаживания реактора.

Снижение издержек. Капитальные затраты на строительство АЭС являются наиболее значимой компонентой издержек производства электроэнергии. Для эффективного снижения капитальных затрат необходимо уменьшить стоимость оборудования и рабочей силы, а также максимально снизить ставку процента во время строительства. Существует несколько различных путей достижения этих целей: (1) принципиальное изменение компоновки станции в целях значительного сокращения запланированных сроков строительства; (2) разработка укрупненных трубных или строительных модулей, которые можно было бы изготавливать на заводе и транспортировать по воде или суше на строительную площадку. Это поможет не только снизить затраты, но и сократить график строительства и повысить контроль за качеством; (3) стандартизация конструкций реакторов, которые можно будет строить на различных площадках и которые позволят заключать различные контракты, что приведет к уменьшению затрат и сокращению графика строительства; (4) усовершенствование и внедрение компьютеризированных систем проектирования, составления документации и управления, обеспечивающих уменьшение прямых затрат на рабочую силу и повышение качества работы.

Повышение рабочих характеристик. Для сохранения высоких коэффициентов использования установленной мощности конструкторы должны решить целый ряд проблем. Достижение 94%-ных коэффициента использования установленной мощности в течение всего срока службы реактора – такая цель поставлена перед некоторыми новыми конструкциями. В течение следующих 10 лет по мере достижения конечного проектного срока эксплуатации все большего числа реакторов электроэнергетические компании будут уделять больше внимания проектному сроку службы реакторов и возможности его продления путем замены компонентов или их модернизации. В силу того, что для АЭС характерны крупные капитальные и низкие эксплуатационные затраты, любая станция, срок эксплуатации которой можно будет продлить, будет экономически привлекательна.

Перспективы опытно-конструкторских работ и внедрения

В соответствии с энергетическими прогнозами спрос на электроэнергию в мире в течение следующего столетия будет неуклонно расти благодаря росту населения, усиливающейся урбанизации и ожидаемому более высокому потреблению электроэнергии на душу населения, в частности в странах, стоящих на пороге индустриализации. Электротехнологии отличаются гибкостью, чистотой, безопасностью и эффективностью применения в быту и промышленности.

Надежное производство дешевой электроэнергии с помощью ядерной энергии означает занятость не только в области ядерной, но и других сложных технологий с более низкими издержками производства.

Крупные и средние энергоблоки с тяжеловодными реакторами. Мощность большинства тяжеловодных реакторов, находящихся в коммерческой эксплуатации, лежит в диапазоне 540–935 МВт_{эл.} Считается, что такой диапазон мощности реакторов по-прежнему будет представлять интерес для стран с крупными хорошо развитыми энергосистемами, а также для стран, где ожидаются относительно высокие темпы роста энергопотребления.

Конструкция стандартизованного энергоблока CANDU-6 (раньше он назывался CANDU-600) основана на конструкции успешно эксплуатируемых энергоблоков станции Пикеринг А (4-540 МВт_{эл.}) в провинции Онтарио, Канада. В настоящее время в эксплуатации находятся четыре одноблочных АЭС с тяжеловодным реактором CANDU-6 (две в Канаде; одна в Аргентине и одна в Корейской Республике) и 5 блоков строятся в Румынии. Мощность каждого из этих девяти энергоблоков составляет 640–680 МВт_{эл.} В течение последних 5 лет конструкция энергоблока CANDU-6 постоянно совершенствовалась, в настоящее время он носит название CANDU-6 Mark 2 и имеет мощность около 800 МВт_{эл.} Для энергоблока CANDU-6 Mark 2 характерна повышенная безопасность, высокие коэффициенты готовности и использования. Внедрен ряд изменений в конструкцию для снижения капитальных затрат и сроков строительства.

В провинции Онтарио, Канада, близится к завершению строительство АЭС Дарлингтон (4-935 МВт_{эл.}). АЭС Дарлингтон стала результатом непрерывного усовершенствования многоблочных АЭС с реакторами CANDU, начиная с АЭС Брюс-А (4-826 МВт_{эл.}) и Брюс-В (4-845 МВт_{эл.}), которые находятся в эксплуатации уже в течение нескольких лет. Основное внимание было направлено на усовершенствование основных конструкций, уменьшение числа наиболее важных компонентов систем, улучшение доступа к компонентам и системам, более широкое использование компьютеров для управления станцией, а также в системах управления, защиты и дозиметрического контроля.

В Федеративной Республике Германии начало серии тяжеловодных реакторов с корпусом под давлением фирмы Сименс положил многоцелевой исследовательский реактор MZFR (57 МВт_{эл.}). Тяжеловодные реакторы этого типа установлены на АЭС Атуча-1 и Атуча-2, кроме того, в Аргентине в настоящее время строится тяжеловодный реактор мощностью 750 МВт_{эл.} Прогресс был достигнут в области уменьшения содержания трития, стержней управления с гидравлическими приводами, мощности хранилищ топлива и альтернативных топливных циклов.

Программа развития тяжеловодных реакторов в Индии основана на использовании тяжеловодных канальных реакторов мощностью 235 МВт_{эл.} Сейчас разрабатываются более современные конструкции АЭС с двумя энергоблоками мощностью 500 МВт_{эл.}; с 1997 г. планируется пустить в коммерческую эксплуатацию 6 энергоблоков мощностью 500 МВт_{эл.} Конструкции энергоблоков мощностью 500 МВт_{эл.} будут усовершенствованы с точки зрения компо-

новки станции, защитной оболочки, реакторных систем, обращения с топливом, перегрузки топлива на мощности и СУЗ. Наиболее важным аспектом, лежащим в основе всей индийской программы, по-прежнему является развитие национального научно-технического потенциала, охватывающего все аспекты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, машиностроения, производства, строительства и эксплуатации. Это стремление нашло свое отражение в непрерывных изменениях и стандартизации целого ряда характеристик конструкций реакторов.

В Японии ведется разработка усовершенствованного тяжеловодного реактора (УТР) с использованием тяжелой воды в качестве замедлителя, кипящей воды – в качестве теплоносителя и плутония – в качестве топлива. Конструкция реактора УТР основана на прототипном реакторе Фуген мощностью 165 МВт_{эл.}, находящемся в коммерческой эксплуатации с 1979 г. Эксплуатация реактора Фуген позволила успешно продемонстрировать расчетные характеристики смешанно-окисного топлива. Цель программы создания демонстрационного реактора УТР мощностью 606 МВт_{эл.} заключается в его пуске в коммерческую эксплуатацию в 1997 г.

Небольшие энергоблоки с тяжеловодными реакторами. Меньшие по размеру и мощности энергоблоки являются перспективными для стран с низкими темпами роста нагрузки и менее крупными энергосистемами, кроме того, они не столь чувствительны с точки зрения финансирования. Эти факторы типичны и характерны для многих стран.

Новый тяжеловодный реактор Аргос мощностью 380 МВт_{эл.}, разрабатываемый одной аргентинской машиностроительной компанией в сотрудничестве с западногерманской фирмой Сименс, представляет собой усовершенствованную модель серии канальных тяжеловодных реакторов фирмы Сименс, для которой характерна повышенная безопасность и эксплуатационная экономичность, а также уменьшенные капитальные затраты.

Канадская фирма AECL создает новую модель реактора CANDU – CANDU-3 – мощностью 480 МВт_{эл.}. Отличительной чертой конструкции реактора CANDU-3 будет повышенная безопасность, 94 %-ный коэффициент использования установленной мощности, 30-месячный период строительства и возможность его строительства почти на любых площадках мира как в одноблочном, так и многоблочном варианте. В настоящее время между канадскими электроэнергетическими компаниями и представителями некоторых стран ведутся переговоры, которые, как ожидается, приведут к принятию в ближайшем будущем решений о строительстве одного или нескольких энергоблоков.

Существующая сейчас в Индии база, состоящая из 4-х канальных тяжеловодных реакторов мощностью 235 МВт_{эл.}, расширится и будет дополнена еще 8 энергоблоками, строительство которых уже нача-



АЭС Дарлингтон

лось, и 4 энергоблоками, которые решено пустить в коммерческую эксплуатацию после 1996 г.

В дополнение к надежному производству дешевой электроэнергии технологию тяжеловодных реакторов можно потенциально применять для теплоснабжения городских районов и промышленного производства тепла, пригодного, например, для добычи нефти *in-situ* из месторождений битуминозного песка.

Выводы

В качестве системы производства электроэнергии коммерческие тяжеловодные реакторы продемонстрировали целый ряд преимуществ. К их числу относятся длительная безопасная эксплуатация, высокие коэффициенты использования установленной мощности в течение года и всего срока службы реактора, низкие топливные затраты и широкий диапазон других характеристик, которые в целом служат доказательством абсолютной надежности данной технологии.

Существуют прекрасные потенциальные возможности дальнейшего совершенствования конструкции тяжеловодных реакторов. Разделение систем теплоносителя и замедлителя делают возможным дальнейшее повышение их безопасности. Известные возможности технологии тяжеловодных реакторов используются пока еще не полностью, а перспективы, открываемые благодаря гибкости усовершенствованных топливных циклов и различным областям применения, указывают на то, что она, по-прежнему, будет приносить высокие дивиденды на капиталовложения в научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую работу.

