

ных требований, одна или более конструкций пассивных установок, утвержденных сертификатом КЯР;

- принятый энергетическими предприятиями и утвержденный КЯР документ о требованиях, формулирующий требования энергетических предприятий США и международных предприятий к конструкции;
- подробные планы строительства, обосновывающие 36-месячный срок строительства пассивных установок;
- вероятностные оценки риска (ВОР) и анализы аварий, подтверждающие выполнение требования по предотвращению и уменьшению последствий аварии;
- определение функциональных задач во взаимосвязи человек-машина.

На третьей стадии энергетические предприятия выделяют финансовые и технические ресурсы на работы по конструированию пассивной установки.

EPRI и участники программы по ALWR работают в настоящее время над реализацией этой важной стадии. Работа координируется с осуществляемой министерством энергетики программой поддержки сертификации конструкций установок.

В заключение следует сказать, что имеет место активное и широкое стремление к разработке требований и конструкций усовершенствованных пассивных легководных реакторов. Эти конструкции обещают быть технически более простыми и экономически более дешевыми, чем настоящие установки. Выражается надежда, что они послужат основой для широкой и обновленной программы по атомной энергетике в США и во всем мире.

Усовершенствования в существующих легководных реакторах

Обзор требований к установкам и общие тенденции

П.И. Мейер и В. Грюнер

На ядерные реакторы приходится значительная доля производимой в мире электроэнергии; в 1988 г. ими выработано 17 % от всего произведенного электричества. Из 429 находившихся на конец 1988 г. во всем мире в эксплуатации ядерных реакторов 320 – легководные реакторы (LWR) общей электрической мощностью 263 ГВт или около 85 % общих установленных ядерных мощностей, составляющих 311 ГВт. Из строящихся 105 атомных электростанций 79 с реакторами LWR. Эти данные ясно показывают, что реакторы LWR как с водой под давлением, так и кипящие (PWR и BWR), являются сегодня „рабочими лошадками“, обеспечивающими основной вклад ядерной энергетики в производство электроэнергии. Соединенные Штаты Америки, СССР, Франция, Федеративная Республика Германия, Япония, Корейская Республика и многие другие страны выбрали LWR из-за их испытанной надежности и экономической жизнеспособности.

Несколько тысяч реакторо-лет работы этих реакторов позволили приобрести опыт, который может стать основой для дальнейшей их разработки. Основные направления разработок сосредоточены на усовершенствованиях эволюционного типа существующих конструкций, выражающихся в упрощении включаемых в них систем, уменьшении времени строительства, улучшении условий содержания реакторов, оптимизации конструкции активной зоны, повышении управляемости и надежности, а также в сокращении стоимости строительства, топлива, эксплуатации и содержания. В США разрабатываются концепции крупных реакторов эволюционного типа (на 1200 МВт_{эл}) и небольших пассивных реакторов (на 600 МВт_{эл}) на основе определенных требований к их конструкции и экономическим характеристикам, определенным Институтом ис-

Г-н Мейер – заместитель директора, а г-н Грюнер – старший директор группы KWU фирмы „Сименс“, Федеративная Республика Германия.

следований по электроэнергетике (EPRI) после завершения соответствующей работы с поставщиками и энергетическими предприятиями.

Программы разработок по конструированию, строительству и эксплуатации основываются, главным образом, на хорошо проверенных и надежных технологиях, что облегчает операторам и соответствующим государственным органам лицензирование нового поколения LWR. Даже концепции небольших реакторов, конструируемых в соответствии с требованиями EPRI, предусматривают использование систем и компонентов уже действующих установок. Большая часть требований связана с проблемами планирования, строительства и эксплуатации.

Характеристики современных установок

Для правильной оценки современных установок, имея ввиду новое поколение реакторов, необходимо мерило, по которому можно было бы определить степень новшества или прогресса в увеличении безопасности и экономической конкурентоспособности новых установок.

Новые концепции конструкций предполагают усовершенствования в строительстве, управлении и безопасности. Естественно, что, как и любой товар, такие усовершенствования должны пройти проверку на соответствие самому современному технологическому уровню, достигнутому в каждой из этих областей. Современное состояние может быть показано на примере недавно завершенных в ФРГ АЭС Конвой. Три реактора PWR на 1300 МВт_{эл}, каждый, коммерческая эксплуатация которых недавно началась, были переданы заказчиком. Их строительство не вышло за рамки выделенных средств и было закончено раньше установленных контрактами сроков в среднем на 4 месяца для каждого реактора. Это свидетельствует о том, что меры, принятые по стабилизации осуществления проектов, оказались очень успешными, даже в условиях ухудшающегося отношения общественности к атомной энергетике. Особые обстоятельства, такие как приостановка строительства по решению суда, указывают на то, что 4,5 года — вполне реальный срок строительства крупной установки на 1300 МВт_{эл}. Теоретически строительство меньших установок с меньшим количеством оборудования и объемом бетонных работ осуществимо в более короткие сроки.

Таких коротких сроков строительства, а они наблюдались во Франции и Японии при сооружении таких же или аналогичных установок, можно добиться путем тщательной и детальной стандартизации такого не столь заметного, но дорогостоящего и трудоемкого оборудования, как вентили, трубопроводы, опоры, закладные части и кабельные желоба. Эти компоненты, используемые на атомных станциях в больших количествах, при жестких требованиях к их качеству сводятся к ограниченному числу и сочетаниям различных типов и размеров. Они собираются с помощью компьютерных баз данных, из которых берутся все данные для документов, необходимых для закупок, изготовления, строительства и контроля за качеством.

Хорошая управляемость означает непрерывную работу станции при внутренних и внешних переходных процессах, гибкость в режиме следования за нагрузкой и короткие сроки ревизии. За последние восемь лет стали редкими непреднамеренные остановки реактора (примерно одна на реакторо-год). Способность к автоматической адаптации к нагрузке в особых условиях энергосети, таких как корректировка выходной мощности в связи с энергетическими флуктуациями или требованиями к контролю за частотой, а также непрерывное функционирование реактора при отключении насосов первого контура, достижимы с помощью специальной контрольной системы. Такая система включается между обычной системой контроля и системой защиты реактора с целью стабилизации переходных параметров вне обычной контрольной зоны.

Короткие сроки ревизий обеспечиваются тщательной подготовительной работой операторов, а также целым рядом предусмотренных конструктивных средств, облегчающих проведение ревизий. К их числу относятся доступ к противоаварийной оболочке реактора во время его работы, расположение бассейна с топливом внутри этой оболочки, существенно сокращенное количество сварных швов, подлежащих инспектированию при работе установки, и сложное оборудование для ремонтных инспекционных работ.

Пассивные средства безопасности уже включены в существующие конструкции водных реакторов. Еще большее внимание уделяется применению систем пассивной безопасности при разработке новых реакторных концепций. Для каждого реактора характерно комбинирование активных и пассивных средств безопасности для обеспечения высокого общего уровня его безопасности и надежной защищенности при всех возможных событиях. В разных конструкциях, использующих пассивные средства, соотношение этих элементов безопасности может быть различным.

Лицензионность является важным аспектом безопасности, поэтому целесообразно осуществлять разработку конструкций постепенно и с учетом уже принятых, испытанных и лицензированных конструкций. Выдача лицензий новым революционным концепциям безопасности во многом зависит от политического климата в области лицензирования, установившегося в стране, и признания достаточности средств безопасности с точки зрения выполнения установленных требований.

Требования к будущим установкам

В различных странах перспективы на разработку концепций будущих реакторов различны. Во Франции и Федеративной Республике Германии разработана высокостандартизованная, испытанная и надежная технология, которая демонстрирует превосходные рабочие качества.

Федеративная Республика Германия планирует внесение усовершенствований в следующее поколение легководных реакторов PWR на основе технологии Конвой. Фирма „Электриситэ де Франс“ (ЭДФ) намерена придерживаться того же принципа в своей эволюционной программе, основанной на

совершенствовании конструкции без существенных изменений. ЭДФ начала исследование „REP-2000“ для определения будущих стандартов французских реакторов PWR в 2000 г. и после. Будут рассмотрены проблемы эксплуатации в режиме следования за нагрузкой, экономической эффективности и эксплуатационной гибкости. В целях повышения эффективности использования топлива на реакторах PWR Комиссариат по атомной энергии, ЭДФ и фирма „Фраматом“ начали совместную программу по оценке возможности создания конвертируемого реактора со спектральным смещением – RCVS. Предполагается, что до 2002 или 2005 г. RCVS не будет закончен и что раньше начала 90-х годов не начнется исследование проблем его детального конструирования.

В Японии ведется разработка крупных реакторов PWR и BWR; фирмы „Мицубиси“ и „Вестингауз“ конструируют реактор APWR, а фирмы „Хитачи“, „Тосиба“ и „Дженерал электрик“ – реактор ABWR. Энергетическое предприятие „Токио электрик пауэр компани“ будет сооружать на АЭС Касивазак-Карива два блока с реакторами ABWR. Техническая разработка в Японии следующего поколения реакторов LWR завершится не ранее 2005 г. Для того, чтобы отвечать будущим социальным и экономическим потребностям, следующее поколение легководных реакторов должно быть рассчитано на дальнейшее усиление функций их активных зон, включая использование сборок из смешанного окисного топлива (MOX), улучшение рабочих характеристик топлива, совершенствование методов обеспечения безопасности конструкции, применение передовых технологий и усовершенствование сейсмической технологии.

Безопасность имеет первостепенное значение с самого начала строительства и эксплуатации атомных электростанций и нуждается в жесткой системе контроля и наблюдения, создаваемой регламентирующими органами и международными организациями на основе широкого использования национальных и международных кодексов, правил и инструкций. Вопрос о том, какие меры по безопасности требуются для сведения риска для здоровья и безопасности людей до приемлемого уровня, регулируется исчерпывающими процедурами лицензирования в сочетании с публичными слушаниями и разбирательством в административных судах. Общественное мнение придерживается, особенно после чернобыльской аварии, очень сдержанной позиции в отношении атомной энергетики; поскольку представление общественности о риске, связанном с ядерной энергией, значительно отличается от фактического его уровня.

Трудно определить, какие меры по безопасности будут способствовать социальному принятию ядерной энергии в ближайшем будущем, но представляется, что следующие критерии могут указать правильное направление:

- Существующие станции должны продолжать нормальную работу, так как увеличение эксплуатационного опыта является ключевым элементом в деле обеспечения безопасности станций.
- Возрастная структура действующих станций (возраст около половины атомных станций Федеративной Республики Германии – менее 10 лет) и проводимые в настоящее время исследования

по возможности продления их жизни, свидетельствуют о том, что в течение нескольких десятилетий новые станции будут сосуществовать со старыми при сравнимых концепциях безопасности.

- Новые конструкции, особенно при размещении их на новых площадках, должны обладать способностью ограничивать пределами станции последствия аварий с тем, чтобы исключить необходимость аварийных мер на окружающей ее территории.

Перевод этих в значительной мере общих критериев в конкретные принципы невозможен для конструкторов станции на чисто национальной основе. В самом деле, последствия чернобыльской аварии значительно улучшили понимание того, что ядерная безопасность – действительно международная проблема. Дальнейшая разработка проблем безопасности должна осуществляться координированно через национальные границы. Это, безусловно, относится к Европейскому сообществу на период после 1992 г., поскольку в нем должен быть достигнут консенсус в отношении кодексов правил и норм хотя бы относительно влияния атомных электростанций на окружающую среду в условиях нормальной работы и необычных условий. Возможно, что члены сообщества, не имеющие атомной энергетики, изъявляют желание участвовать в этом процессе гармонизации.

Увеличение доли атомной энергетики на электроэнергетическом рынке за последние 10 лет в четыре раза (с 10 до 40 %) является наилучшим свидетельством экономической конкурентоспособности ядерной энергии в Федеративной Республике Германии. Условия энергетического рынка ФРГ, очевидно, изменятся после 1992 г., поскольку в планах Европейского сообщества – изменение правил и устранение препятствий обмену товарами и услугами в пределах сообщества. Прогнозировать мировые рыночные цены на энергию будет, очевидно, не легче, чем в прошлом, поэтому проектная цифра стоимости производства электроэнергии должна быть зафиксирована в сообществе на самом низком уровне. Примером может служить стоимость ядерной энергии во Франции, где ранняя рационализация типового и серийного производства станций стала средством достижения настоящего объема экспорта.

Однако и страны с меньшими энергосетями рассматривают ядерную энергию в качестве возможного выбора. Некоторые из этих стран не располагают в достаточном количестве собственными ресурсами и вынуждены импортировать энергию. Такие страны могут стать потенциальными пользователями небольших атомных электростанций в целях стабилизации будущего энергетического рынка. Помимо низкой стоимости производства электроэнергии, жизненный интерес представляют также меньшие расходы на строительство небольших станций по сравнению с крупными установками. Более того, включение атомной энергетики в национальную энергетическую программу дает определенные сопутствующие эффекты. Для строительства требуются большие, разнообразные и квалифицированные усилия промышленности. Позже, на стадии эксплуатации для долговременной надежной работы станции потребуются хорошо оборудованная и высокоэффективная индустрия услуг.

Тенденции последующего развития

Показав на нескольких примерах положение дел с технологией реакторов LWR, следует сосредоточить внимание на наиболее перспективных направлениях дальнейшего развития атомной энергетики. В рамках указанных выше общих тенденций заслуживают внимания следующие направления:

- Существенное сокращение времени строительства и расходов на него требует наличия полного стандартизированного комплекта документов по планированию и строительству задолго до начала строительства. Большое значение имеет стандартизация систем и компонентов с соответствующей технологией, предусмотренной для всей станции, а также строительные чертежи, процедуры пуска и документация.

- Заинтересованность в дальнейшей оптимизации топлива и конструкции активной зоны и в специальном усовершенствовании методов использования топлива вызывается необходимостью решения следующих задач: 1) уменьшение стоимости топливного цикла путем: а) увеличения средней величины выгорания выгружаемого топлива до 45–50 мегаватт-дней на килограмм урана для реакторов PWR и б) улучшения использования урана через оптимизацию конструкции и осуществление передовой стратегии в использовании активной зоны; 2) повышение оперативной гибкости благодаря конструкции активной зоны и станции в отношении а) продолжительности гибкого цикла до двух лет, б) способности к расширению, в) полного рассмотрения настоящих и будущих требований к эксплуатации в режиме следования за нагрузкой в 10 % в минуту в широком энергетическом интервале, и 3) экономия ресурсов природного урана и дальнейшее содействие развитию технологии переработки, чтобы иметь возможность рециклировать плутоний. Меры, требуемые для реализации этих задач, взаимозависимы, и поэтому необходимы тщательные оценки и оптимизация всех связанных с этим факторов.

- Предварительный мониторинг первичного предела давления с помощью соответствующего комплексного и интегрированного использования различных систем контроля уже проводится и охватывает утечки, вибрации, усталость и вставные части. Полученная информация позволит увеличить время профилактического ремонта и повысить надежность предела давления.

- Заложенные в конструкции предохранительных устройств запасы прочности должны быть пересмотрены с учетом знаний, полученных в результате исследований и разработок, проведенных за последние годы некоторыми институтами в рамках международного сотрудничества.

- На основе полученных результатов можно продолжить работу по процедурам управления в случае аварии, не связанной с конструкцией установок. Изучается вопрос о продлении до 30 минут времени для принятия решения оператором при отклонении от нормального функционирования вне конструкционной основы.

- Осуществление контроля за станцией и мобилизация всех ее средств для принятия соответствующих контрмер требуют полной и точной информации о положении станции. Информация позволила понять значение достижений в области взаимосвязей человек-машина; впервые эти достижения были внедрены на установках АЭС Конвой. Вся информация обрабатывается и концентрируется с помощью взаимосвязанных видео-дисплейных установок по параметрам станции в формах, наиболее удобных для оператора. Продолжается разработка проблем широкой дискретизации.

- Тщательная оценка возможностей внедрения пассивных элементов в технические средства безопасности вместе с настойчивым стремлением к упрощению может привести к улучшению условий эксплуатации установок, снижению радиационного облучения и, возможно, повышению коэффициента использования.

В области строительства и эксплуатации будущие разработки должны быть сконцентрированы на сохранении и укреплении экономических преимуществ атомной энергетики перед лицом меняющихся условий на энергетическом рынке. Сокращение времени строительства и удлинение рабочих циклов между ревизиями – самые перспективные направления.

Международный рынок

В следующем десятилетии предполагается увеличение производства электроэнергии как на крупных, так и на небольших атомных электростанциях. В ряде стран уже проводятся исследования по проблемам планирования выбора площадок, лицензирования и технологии в порядке подготовки к тому времени, когда потребуются увеличения мощностей в связи с планами расширения энергосетей. Для укрепления своих позиций на рынке фирмы „Фраматом“ и „Сименс“ договорились создать совместную фирму для маркетинга на международном уровне разрабатываемых атомных электростанций. В Японии продолжается разработка реакторов APWR и ABWR с участием американских продавцов и японских лицензиатов.

В настоящее время международный рынок переживает застой, так как в большинстве промышленных стран наблюдается лишь небольшой рост потребностей в энергии. С другой стороны, развивающиеся страны, в которых имеют место или ожидаются высокие темпы роста энергетических потребностей, не в состоянии финансировать строительство ядерных установок или ограничены в своих бюджетах на последующие годы. Таким образом, основным препятствием в содействии использованию ядерной энергии являются не технические проблемы, а отсутствие финансовых моделей, способных выдержать это международное бремя.