

# Усовершенствованные ядерные реакторы: основные аспекты глобального развития

*Новые атомные электростанции проектируются и вводятся в строй во многих странах на основе современных достижений в области безопасности и эксплуатации ядерных реакторов*

В настоящее время значительные усилия в мире направляются на развитие усовершенствованных ядерных реакторов. В эту работу вовлечены различные организации, включая правительства, отрасли промышленности, энергопредприятия, университеты, национальные лаборатории и исследовательские институты. Совокупные расходы на разработку новых конструкций, совершенствование технологий и связанные с ними исследования по основным типам реакторов составляют, по расчетам, свыше 1,5 млрд. долл. США в год.

Осуществляя мероприятия в рамках своей программы ядерной энергетики, МАГАТЭ служит международным источником объективной справочной информации по находящимся в стадии разработки различным принципам проектирования и состоянию проектов, а также по типичным мировым тенденциям их развития.

Полный спектр проектов или принципов проектирования усовершенствованных ядерных реакторов охватывает их различные типы — эволюционные, а также инновационные, требующие значительных усилий по разработке. Естественная разделительная линия между этими двумя категориями обусловлена необходимостью строительства и эксплуатации прототипа или демонстрационной установки с целью доведения концепций с многочисленными новшествами до стадии готовности к коммерческой реализации, поскольку такая установка представляет основную часть необходимых ресурсов. До окончательного принятия проекта первой электростанции данного типа в эволюционной категории или прототипа и/или демонстрационной установки — во второй проекты обеих категорий нуждаются в инженерном обеспечении и, возможно, в дополнительных научных исследованиях и разработках, а также в испытаниях на соответствие техническим условиям. Объем таких научно-исследовательских работ и испытаний на соответствие техническим условиям зависит как от степени новизны конструкции, так и от уже проделанной для ее реализации работы, а также от возможности использовать имеющийся опыт. Это особенно верно в отношении проектов второй категории, где для утверждения концепции может понадобиться всего лишь демонстрационная установка, при условии что разработка и ис-

пытания на соответствие техническим условиям в основном завершены. Возможен и прямо противоположный случай, когда в дополнение к инженерному проектированию могут потребоваться научно-исследовательские работы, разработка технико-экономического обоснования, испытания на соответствие техническим условиям и прототип и/или демонстрационная установка (*см. вставку на стр. 20*). Необходимо решать разные задачи, а связанные с ними расходы будут зависеть в качественном выражении от степени отличия новых конструкций от уже существующих. В частности, такие расходы резко возрастают, если программой разработки проекта предусмотрена необходимость строительства реактора.

**Пон Эйр Чжун,  
Юрген Купиц  
и  
Джон Кливленд**

## Обзор программ развития реакторов с водяным охлаждением

В некоторых развитых странах основные усилия направляются на разработку крупных блоков с легководными реакторами (LWR) мощностью более 1000 МВт (эл.). При этом обычно ставится цель добиться определенных усовершенствований по сравнению с существующими конструкциями. Количество изменений и модификаций в каждой конкретной конструкции сводится, как правило, к минимуму. Это делается в целях максимального использования уже успешно оправдавших себя конструктивных особенностей и компонентов с учетом опыта, приобретенного в процессе лицензирования, строительства, ввода в строй и эксплуатации реакторов с водяным охлаждением, действующих в настоящее время.

Как правило, диапазон усовершенствований конструкции весьма широк. При проектировании новых реакторов ставятся общие цели повышения надежности, удобства для пользователя, улучшения экономических показателей, а также повышения безопасности.

**Усовершенствованные легководные реакторы (ALWR).** В ряде стран осуществляется разработка легководных ядерных реакторов большой мощности. Разрабатываются также проекты усовершенствованных установок средней мощности, при этом в большинстве случаев особое внимание обращается на использование пассивных систем безопасности и безопасных по самой своей природе элементов.

**Соединенные Штаты Америки.** В США крупномасштабные программы по разработке усовершенствованных легководных реакторов были

Г-н Чжун является директором Отдела ядерной энергетики и топливного цикла. Г-н Купиц — руководитель Секции по развитию ядерной технологии данного Отдела, а г-н Кливленд — старший сотрудник Секции. В подготовке статьи принимал также участие бывший сотрудник Отдела г-н Тор Педерсен.

начаты уже в середине 80-х гг. В 1984 г. Научно-исследовательский институт в области электроэнергии (EPRI) в сотрудничестве с Министерством энергетики США и при участии американских проектировщиков атомных электростанций приступил к осуществлению программы по разработке требований энергопредприятий к усовершенствованным легководным реакторам для использования в качестве руководства в процессе их проектирования и создания. В данной программе и ее финансировании принимали участие некоторые иностранные энергопредприятия. Были разработаны требования энергопредприятий к крупным реакторам с кипящей водой (BWR) и реакторам с водой под давлением (PWR) мощностью 1200—1300 МВт (эл.), а также к средним реакторам BWR и PWR мощностью около 600 МВт (эл.).

В 1986 г. Министерство энергетики США в сотрудничестве с EPRI и проектными организациями приступило к реализации программы сертификации проектов электростанций эволюционной категории на основе нового лицензионного процесса, после чего в 1990 г. началась реализация аналогичной программы для электростанций средних размеров с пассивными системами безопасности. В соответствии с новым лицензионным процессом проектировщикам атомных электростанций предоставляется право направлять свои проекты в Комиссию по ядерному регулированию (NRC) на сертификацию. После сертификации конструкции в коммерческую сеть поступают стандартизованные компоненты (блоки), которые энергопредприятие может заказать, будучи уверенным, что все общие проблемы, касающиеся конструкции и ее безопасности, решены. Процесс лицензирования позволяет энергокомпаниям подавать заявку на получение комбинированной лицензии на строительство и эксплуатацию новой станции. Если станция построена в соответствии с предварительно одобренными спецификациями, компания может ввести электростанцию в строй сразу же после завершения ее строительства, считая, что никаких новых проблем, связанных с безопасностью, не возникло.

В Комиссию по ядерному регулированию на сертификацию в рамках программы ALWR Министерства энергетики были представлены четыре проекта усовершенствованных реакторов, разработанных в США. Два проекта крупных электростанций эволюционной категории — System 80+ компании ABB-Combustion Engineering и ABWR компании "Дженерал электрик" — получили окончательное одобрение в 1994 г. и сертификат в мае 1997 г. Проект AP-600 [600 МВт (эл.)] компании "Вестингауз", находящийся на рассмотрении в Комиссии по ядерному регулированию, получит окончательное одобрение предположительно в марте 1998 г. До середины 1996 г. на рассмотрении Комиссии находился также проект упрощенной конструкции реактора BWR мощностью 600 МВт (эл.) компании "Дженерал электрик", но затем она прекратила работу над ним и переориентировала свои усилия на разработку реактора большей мощности. Первая в своем роде инженерно-аналитическая программа FOAKE (детально разработанный план для проверки стоимости и графика строительства), одобренная в соответствии с Законом

о политике в области энергетики 1992 г., завершена в отношении реакторов ABWR в сентябре 1996 г.; завершение аналогичной работы по реактору AP-600 планируется на 1998 г. Энергетическая компания на Тайване, Китай, недавно выбрала конструкцию ABWR компании "Дженерал электрик" для двух новых блоков, ввод в эксплуатацию которых планируется на 2004 г.

**Франция и Германия.** В Европе компании "Фраматом" и "Сименс" создали совместную компанию Nuclear Power International, разрабатывающую модель нового усовершенствованного реактора — европейскую версию реактора с водой под давлением (EPR) мощностью 1500 МВт (эл.) с повышенной безопасностью. Проектирование базовой конструкции будет завершено в середине 1997 г., а ее проверка будет осуществляться совместно представителями французских и германских органов, ответственных за обеспечение безопасности. Данная процедура будет в значительной мере стимулировать практическую гармонизацию требований этих двух стран в сфере безопасности, которая впоследствии может быть закреплена на более широкой основе. Компания "Сименс" вместе с другими германскими энергопредприятиями занята также проектированием усовершенствованного реактора SWR-1000 на кипящей воде, в котором найдет применение целый ряд элементов пассивной безопасности — для включения функций безопасности, для отвода остаточного тепла и для удаления тепла из защитной оболочки реактора.

**Швеция и Финляндия.** В Швеции компания ABB Atom при участии финской электростанции Teollisuuden Voima Oy (TVO) разрабатывает реактор BWR-90, представляющий собой усовершенствованный вариант реакторов BWR, действующих в обеих странах.

**Республика Корея.** В 1992 г. в Республике Корея приступили к разработке усовершенствованного реактора, известного как корейский реактор следующего поколения (KNGR) типа PWR мощностью 4000 МВт (тепл.). Базовая конструкция разрабатывается в настоящее время компанией KEPSCO (Korea Electric Power Corporation) при поддержке корейской ядерной индустрии. Завершение типового рабочего проекта планируется на 2000 г.

**Российская Федерация.** В России ведутся разработки реактора эволюционного типа В-392, представляющего собой усовершенствованный реактор ВВЭР-1000; еще один вариант разрабатывается в сотрудничестве с финской компанией Imatran Voima Oy (IVO). В стадии разработки находятся также модель эволюционного типа ВВЭР-640 (В-407) средней мощности с системами пассивной безопасности и ВПБЭР-600 более современной интегрированной конструкцией. Начало строительства первого блока ВВЭР-640 планируется в 1997 г. в Сосновом Бору. С КНР обсуждается вопрос о строительстве двух реакторов ВВЭР мощностью 1000 МВт (эл.).

**Япония.** Министерство торговли и промышленности Японии осуществляет программу модернизации технологии легководных реакторов, концентрируя внимание на разработке реакторов LWR будущего с учетом перспективных целей и требо-

ваний к конструкции. Японские энергопредприятия в сотрудничестве с поставщиками ядерного оборудования проектируют модель крупного усовершенствованного реактора PWR эволюционной категории мощностью 1350 МВт (эл.), строительство спаренного блока которого планируется на площадке Цуруга. Кроме того, в 1991 г. началось исследование по усовершенствованию и эволюции реакторов BWR. Оно предусматривает создание эталонного реактора BWR мощностью 1500 МВт (эл.) с учетом накопленного опыта эксплуатации и обслуживания реакторов этого типа. В стадии осуществления находятся также программы разработки японского упрощенного варианта реакторов BWR (JSBWR) и PWR (JSPWR) с участием энергопредприятий и поставщиков ядерного оборудования. Японский научно-исследовательский институт по атомной энергии (JAERI) изучает концептуальные конструкции усовершенствованных реакторов с водяным охлаждением, уделяя особое внимание использованию систем пассивной безопасности. Сюда относятся разрабатываемый JAERI реактор с пассивной системой безопасности (JPSSR) и реактор PWR с интегрированными системами (SPWR).

**Китай.** Институт ядерной энергии КНР (Chengdu) осуществляет разработку реактора AC-600, усовершенствованного варианта PWR, в котором применяются пассивные системы безопасности для удаления тепла.

Во всех упомянутых выше странах разрабатываемые усовершенствованные реакторы LWR характеризуются значительными конструкционными упрощениями, повышенными конструкционными запасами по параметрам и различными улучшениями технических и эксплуатационных процедур. Сюда следует отнести улучшенные рабочие характеристики топлива, более высокую степень выгорания, усовершенствованный интерфейс человек—машина с использованием компьютеров и модернизированных устройств отображения информации, повышенную стандартизацию электростанций, улучшенные условия строительства и обслуживания, более совершенную профессиональную подготовку операторов и обучение на тренажерах.

**Тяжеловодные ядерные реакторы (HWR).** Помимо легководных реакторов свою экономическую эффективность, безопасность и надежность подтвердила также технология тяжеловодных реакторов. Примерно 7% всех действующих в настоящее время АЭС оснащены тяжеловодными реакторами. Отдельные страны располагают хорошо наложенной инфраструктурой и регулирующей базой. Это в первую очередь относится к Канаде, явившейся пионером в развитии концепции тяжеловодных реакторов. Разработаны два типа коммерческих тяжеловодных реакторов, варианты напорной трубы и камеры давления, и оба они полностью доказали свою пригодность. В настоящее время имеются тяжеловодные реакторы мощностью от нескольких сотен МВт (эл.) до примерно 900 МВт (эл.). Замедление тяжелой воды дает высокую экономию нейтронов и позволяет использовать в качестве топлива природный уран, что ведет к снижению расходов на топливо по сравнению с легководными реакторами. Однако количество делящегося материала весьма ограничено,

и поэтому в конструкциях с напорными трубами применяется непрерывная перегрузка топлива в целях достижения уровня реактивности, требуемого для работы АЭС. Эффективность непрерывной перегрузки топлива успешно продемонстрирована, коэффициенты ежегодной и проектной нагрузки напорных труб большей части тяжеловодных реакторов считаются лучшими среди всех типов коммерческих реакторов. Показатели безопасности также оказались очень хорошими.

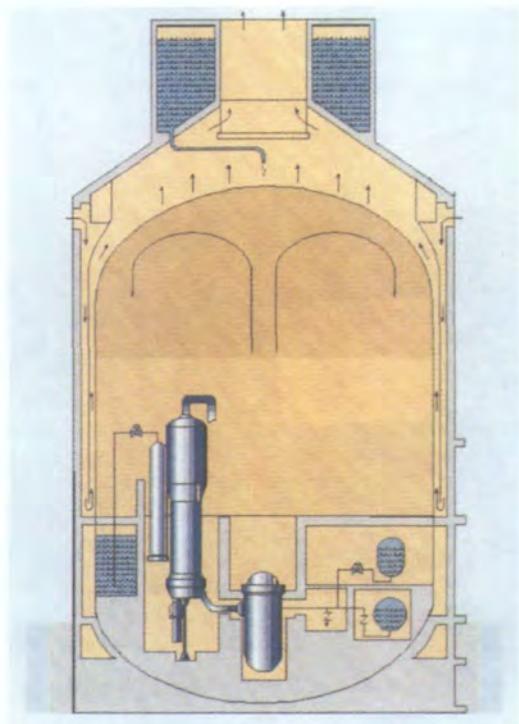
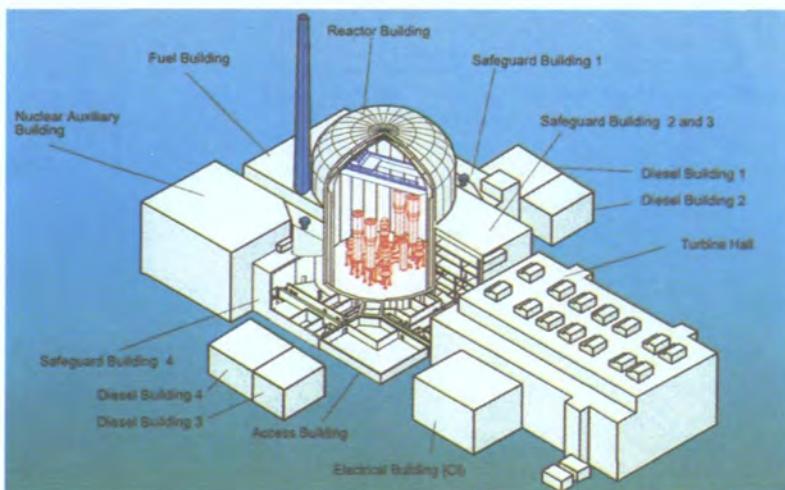
**Канада.** Осуществляемая в Канаде программа проектирования и разработки тяжеловодных реакторов нацелена в первую очередь на снижение стоимости АЭС и эволюционное совершенствование их эксплуатационных характеристик и безопасности. В Циньшане (Китай) строятся два новых блока с реакторами CANDU-6 мощностью 715 МВт (эл.) каждый, усовершенствованными по сравнению с более ранними вариантами данной модели. Базовые инженерные работы продолжаются на строительстве реактора CANDU-9 мощностью 935 МВт (эл.), представляющего собой адаптированный одноблочный вариант реакторных блоков, действующих в Дарлингтоне, Канада. Двухлетняя проверка реактора CANDU-9 на соответствие условиям лицензирования, завершенная Комиссией ядерной безопасности Канады в январе 1997 г., установила, что он отвечает национальным требованиям лицензирования. Продолжаются исследования, направленные на создание усовершенствованных вариантов этих моделей реакторов, с целью введения в них дальнейших эволюционных усовершенствований и повышения выходной мощности более крупного реактора до 1300 МВт (эл.).

**Индия.** Здесь также ведутся разработки усовершенствованного тяжеловодного реактора мощностью 500 МВт (эл.) и планируется строительство блоков с такими реакторами. В этом проекте используется опыт, полученный в процессе эксплуатации в Индии тяжеловодных реакторов мощностью 220 МВт (эл.) национальной конструкции.

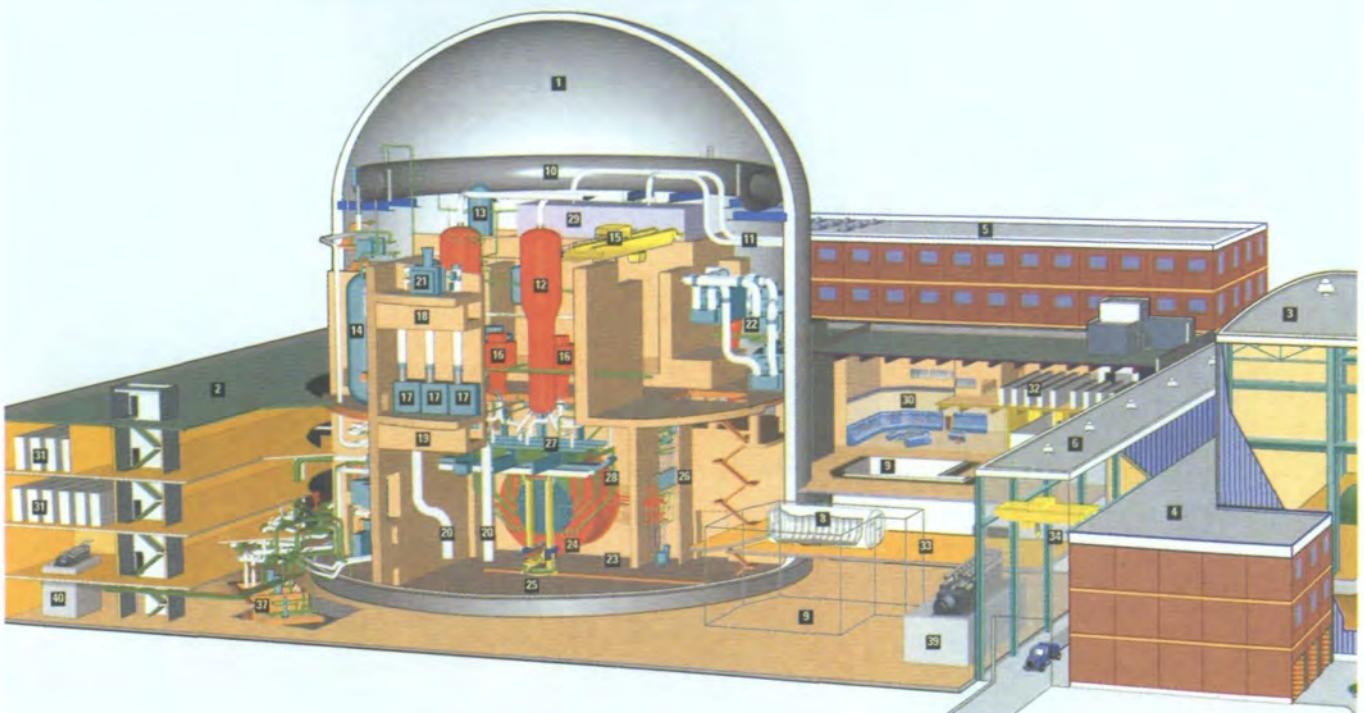
**Последние важные события.** К числу таких событий в 1996 г. в сфере реакторов с водяным охлаждением следует отнести пуск в эксплуатацию новых АЭС в некоторых странах: реактора Genkai-4 PWR мощностью 1130 МВт (эл.) и первых двух усовершенствованных реакторов с кипящей водой (ABWR) мощностью 1315 МВт (эл.) в Касивадзаки Карива (Япония); первого реактора с водой под давлением мощностью 1455 МВт (эл.) (N4 PWR) в Шо (Франция); тяжеловодного реактора Чернаводэ-1 мощностью 650 МВт (эл.) в Румынии и реактора с водой под давлением Watts Bar-1 мощностью 1165 МВт (эл.) в США.

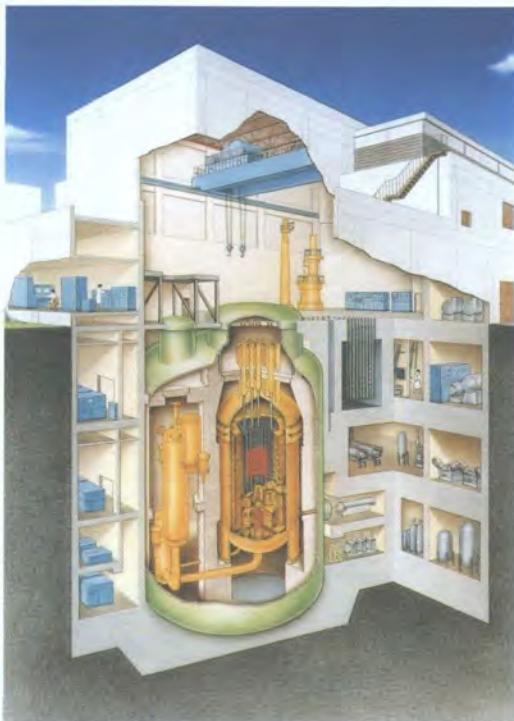
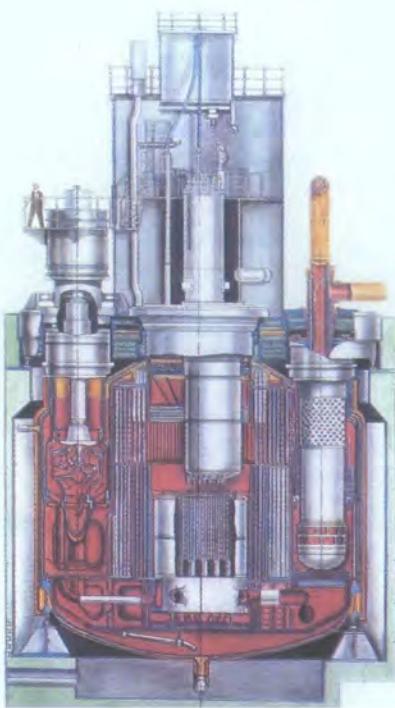
## Обзор программ развития реакторов с газовым охлаждением

В области развития высокотемпературных реакторов с газовым охлаждением (HTGR) осуществляется активная деятельность, особенно в отношении их использования для достижения высокой эффективности производства электричества и технологического тепла. Технический прогресс в области разработки компонентов и технологий в сочетании с международными возможностями



На данной стр.: К числу разрабатываемых в мире усовершенствованных реакторов относятся (слева сверху по часовой стрелке): усовершенствованный реактор на кипящей воде в Японии; AP-600 в Соединенных Штатах; тяжеловодный реактор Candu-9 в Канаде; и европейский реактор на воде под давлением (совместная разработка Франции и Германии). На след. стр.: Схема быстрого реактора-размножителя BN-600 в России; схема японского реактора HTTR; и строительство китайского реактора HTR-10. (Фото: TEPCO; Westinghouse; AECL; NPI; Минатом; JAERI; INET)





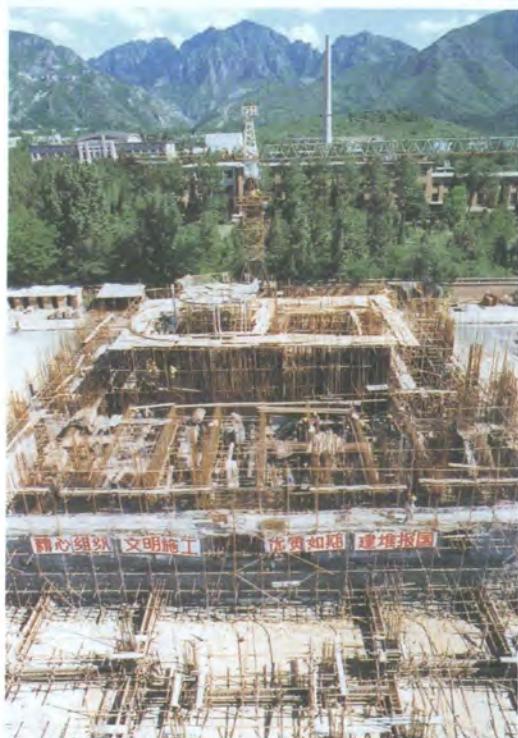
производства, испытания и приобретения таких компонентов обеспечивает прекрасные возможности для коммерциализации реакторов HTGR.

**Соединенное Королевство, Германия и США.** Ядерные реакторы с газовым охлаждением находятся в эксплуатации уже в течение многих лет. В Соединенном Королевстве электричество с помощью ядерной энергии производится в основном на реакторах Magnox, охлаждаемых углекислым газом, и на усовершенствованных газо-

охлаждаемых реакторах (AGR). В других странах также продолжается разработка высокотемпературных реакторов (HTGR) с использованием гелия в качестве теплоносителя и графита в качестве замедлителя. В Германии в течение 21 года успешно эксплуатируется реактор AVR мощностью 13 МВт (эл.), демонстрируя применение технологии HTGR для производства электроэнергии. К числу других реакторов с гелиевым теплоносителем и графитовым замедлителем относятся ториевый высокотемпературный реактор в Германии мощностью 300 МВт (эл.) и реакторы Peach Bottom мощностью 40 МВт (эл.) и Fort St. Vrain мощностью 330 МВт (эл.) в США.

**Южная Африка.** На крупной национальной электростанции Escom в Южной Африке, расположющей установленной генерирующей мощностью около 38 000 МВт (эл.), производится технико-экономическая оценка модульного ядерного реактора с гелиевым охлаждением и засыпкой из шаровых тепловыделяющих элементов. Он будет подключаться непосредственно к газотурбинной системе преобразования энергии с целью увеличения мощности электрической системы станции.

**Китай и Япония.** Для оценки применения ядерной энергии в производстве технологического тепла в этих странах в стадии строительства находятся испытательные реакторы, которые на выходе активной зоны будут развивать температуру 950°C. Продолжается строительство китайского высокотемпературного реактора (HTR-10) в Институте технологии ядерной энергетики (INET); начальной критичности предполагается достичь в 1999 г. Данный реактор с засыпкой из шаровых тепловыделяющих элементов мощностью 10 МВт (тепл.) будет использоваться для испытания и демонстрации технологии и систем безопасности высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (HTGR). Разработка в INET реактора HTGR осу-



ществляется в целях проведения оценки широкого диапазона его применения, который включает производство электричества, пара и тепла для централизованного теплоснабжения, комплексное функционирование цикла парогазовой турбины, производство технологического тепла для реформинга метана. Реактор HTR-10 является первым высокотемпературным газоохлаждаемым реактором, подлежащим лицензированию и строительству в Китае.

Главное место в программе НИОКР в области реакторов HTGR Японии занимает завершение строительства высокотемпературного испытательного реактора для промышленных целей (HTTR) на площадке Японского научно-исследовательского института атомной энергии (JAERI) в Оараи. Данный реактор с гелиевым охлаждением мощностью 30 МВт (тепл.) предназначается для разработки и модернизации технологий строительства усовершенствованных реакторов HTGR и демонстрации эффективности эксплуатации отобранных высокотемпературных систем теплоснабжения. Загрузка топлива в реактор планируется на 1997 г. с достижением начальной критичности в конце года. Пусковая программа физических испытаний реактора HTTR будет продолжена в течение 1998 г.

### Обзор программ развития ядерных реакторов с жидкокометаллическим охлаждением

Реакторы на быстрых нейтронах с жидкокометаллическим охлаждением (LMFR) разрабатываются в некоторых странах уже в течение многих лет. Двадцать таких реакторов, включая пять прототипов мощностью от 250 до 1200 МВт (эл.), уже построены и действуют. Суммарный опыт их эксплуатации составляет около 280 реакторо-лет.

В большинстве случаев опыт в целом является весьма положительным. Повторный запуск и устойчивое функционирование первого крупного демонстрационного реактора на быстрых нейтронах Superphenix мощностью 1200 МВт (эл.) во Франции является важным достижением в области технологии LMFR. Демонстрационный быстрый реактор БН-600 мощностью 600 МВт (эл.) успешно эксплуатировался в России в течение 16 лет со средним коэффициентом нагрузки 77%. В последние годы во Франции, России, Японии, США и Индии были предприняты значительные усилия по снижению капитальных затрат на усовершенствованные реакторы LMFR. Новейшие конструкции этих реакторов, такие, например, как проект европейского быстрого реактора (EPR), весьма близки к достижению экономической конкурентоспособности с реакторами других типов.

В ряде стран, в первую очередь во Франции (с частичным участием Германии, Соединенного Королевства и других европейских стран), Японии, Индии и Российской Федерации, осуществляются значительные программы развития технологии LMFR. В меньших масштабах такая деятельность отмечается и в некоторых других странах.

В ближайшей и среднесрочной перспективе гибкость реакторов LMFR позволит использовать

их в сфере обращения с плутонием и радиоактивными отходами, а также в других возможных целях. В зависимости от геометрии и состава активной зоны быстрые реакторы при заданном уровне мощности и размере активной зоны могут увеличивать, сохранять или снижать инвентарные количества трансурановых элементов. Принимая во внимание такую гибкость, конфигурация/композиция загрузки быстрых реакторов может варьироваться для получения коэффициента конверсии (CR) трансурановых элементов ниже или выше единицы. Если коэффициент конверсии превышает единицу, система реактора превращается в реактор-размножитель, производящий делящиеся материалы в целях удовлетворения возросшего спроса на ядерное топливо (энергию). При коэффициенте конверсии менее единицы быстрый реактор превращается в камеру сгорания и запасы делящихся материалов (а также актинидов) будут сокращаться.

**Китай.** Фундаментальные исследовательские работы по реакторам LMFR в Китае начались в 1964 г. С тех пор и до 1987 г. основные исследования проводились в области нейтроники, термогидравлики и натриевой технологии. В течение 1991—1992 гг. было завершено концептуальное проектирование китайского экспериментального быстрого реактора (CEFR) мощностью 15 МВт (эл.). В 1992—1993 гг. концептуальная модель была одобрена и были проведены исследования по ее оптимизации. С 1993 г. и далее основные усилия были направлены на разработку рабочего проекта.

**Франция.** Коммерческое внедрение реакторов LMFR во Франции отложено. В то же время ведутся разработки другого важного аспекта применения этих реакторов — трансмутации долгоживущих отходов и сжигания плутония. Текущие программы по эксплуатации реакторов Superphenix (SPX) мощностью 1200 МВт (эл.) и Phenix мощностью 350 МВт (эл.) отражают эти требования. Одной из целей продления срока службы реактора Phenix еще на 10 лет является необходимость проведения экспериментов в области облучения.

**Индия.** В Индии действует испытательный ядерный реактор на быстрых нейтронах (FBTR). Основные технические программы включают разработку топлива, облучение материалов и натриевую технологию. Внедрение реакторов-размножителей на быстрых нейтронах связывается с их экономической приемлемостью. В настоящее время отбираются важнейшие проектные параметры для прототипа реактора-размножителя на быстрых нейтронах (PFBR) мощностью 500 МВт (эл.). В 1997—1998 гг. основное внимание будет сосредоточено на подготовке рабочего проекта, инженерном проектировании, натриевой и материаловедческой технологии. Важной целью является также сокращение времени строительства.

**Япония.** Прототип реактора LMFR Monju мощностью 280 МВт (эл.) достиг начальной критичности в апреле 1994 г. и был подключен к энергетической сети в августе 1995 г. Эксплуатация реактора была приостановлена в декабре 1995 г. по причине утечки в нерадиоактивном вторичном контуре охлаждения. В стадии разработки находится проект демонстрационного реактора

размножителя на быстрых нейтронах (DFBR) мощностью 660 МВт (эл.), строительство которого предполагается в начале следующего столетия. В дополнение к этому основному направлению ведутся исследования в области разработки технологий, способных удовлетворить разнообразные потребности общества в будущем. Эти потребности включают снижение воздействия на окружающую среду и гарантии нераспространения ядерного оружия — требования, предполагающие расширение вариантов выбора технологии.

**Республика Корея.** Республика Корея планирует разработать к 2001 г. концептуальный проект своего первого реактора на быстрых нейтронах мощностью 330 МВт (эл.) на площадке Калимер. Строительство планируется с расчетом достижения критичности в 2011 г.

**Российская Федерация.** Россия располагает богатым опытом эксплуатации экспериментальных реакторов и реакторов-прототипов на быстрых нейтронах (БР-10, БОР-60 и БН-600). Исследования направляются на повышение безопасности и надежности реакторов и обеспечение экономической конкурентоспособности быстрых реакторов с жидкокометаллическим охлаждением по сравнению с другими источниками энергии. Поскольку эти усилия потребуют определенного времени, на ближайшее будущее предусматривается использование реакторов LMFR для сжигания плутония и второстепенных актинидов.

**Соединенные Штаты.** В 1993 г. правительство США объявило, что финансирование разработки реакторов из федеральных фондов должно распространяться лишь на те проекты, которые обладают потенциалом коммерческого применения в кратчайшие сроки. В результате этого были приостановлены программы развития усовершенствованных реакторов LMFR и интегрированного реактора на быстрых нейтронах (IFR). Однако компания "Дженерал электрик" в сотрудничестве с иностранными партнерами продолжает осуществление крупномасштабной программы по проектированию и разработке реакторов на основе усовершенствованных технологий LMFR и IFR.

## Деятельность МАГАТЭ в поддержку развития ядерно-энергетических технологий

В качестве международного форума для обмена научно-технической информацией МАГАТЭ играет определенную роль в организации встреч экспертов в целях обмена в международном масштабе информацией по национальным программам, тенденциям в области безопасности и требований пользователей, влиянию аспектов безопасности на проектирование электростанций и по координации научно-исследовательских программ в области передовых реакторных технологий.

Деятельность в области развития ядерно-энергетических технологий осуществляется на основе рекомендаций международных рабочих групп (МРГ). Это по существу комитеты из ведущих представителей национальных программ и международных организаций по каждому из основных типов реакторов.

В поддержку своей функции по международному обмену информацией МАГАТЭ осуществило в последнее время издание двух технических документов: "Состояние проектов усовершенствованных легководных реакторов" и "База данных по реакторам на быстрых нейтронах". Проблемы, рассмотрение которых предполагается осуществить в 1997 г., включают совершенствование компонентов и технологий реакторных систем с целью повышения готовности и надежности действующих и перспективных реакторов.

**Улучшение взаимопонимания.** Такие термины, как эволюционная, пассивная и инновационная конструкции, широко используются при описании усовершенствованных АЭС и, как правило, без определения, а иногда в значениях, противоречащих друг другу. Ввиду важности единообразного понимания населением и техническим сообществом в целом сообщаемой информации желательно добиться последовательности и международного консенсуса в отношении использования терминов при описании различных категорий усовершенствованных конструкций.

Принимая во внимание рекомендации проектных организаций, научно-исследовательских институтов и правительственные организации в области реакторостроения, МАГАТЭ в 1991 г. осуществило издание широко используемого ныне документа "Термины, имеющие отношение к безопасности усовершенствованных атомных электростанций". Недавно МАГАТЭ, используя аналогичный подход и получив консультации у заинтересованных сторон, опубликовало "Термины для описания новых усовершенствованных атомных электростанций". Цель данного документа состоит в уточнении значений терминов путем проведения различия между этапами проектирования электростанций, отражающего разную степень готовности конструкции (например, носят ли они экспериментальный характер, обладая некоторыми еще не испытанными конструктивными особенностями, или являются станциями эволюционного типа в том смысле, что сохраняют многие проверенные на практике компоненты действующих станций).

**Совместные исследования.** Международные рабочие группы рекомендуют МАГАТЭ создать международные программы совместных исследований в областях, представляющих общий интерес. Такая совместная деятельность осуществляется посредством программ координированных исследований (CRP), рассчитанных, как правило, на три—шесть лет и зачастую связанных с экспериментальной деятельностью. Такие программы позволяют распределять усилия на международной основе и использовать опыт и знания исследователей из участвующих в них институтов.

МАГАТЭ, например, координировало работу по сбору и систематизации базы данных о термофизических свойствах целого спектра материалов для легководных и тяжеловодных реакторов в широком диапазоне температур; эта база данных была опубликована. Недавно были также опубликованы результаты совместных работ по поведению материалов реакторов с жидкокометаллическим охлаждением. В рамках других совместных программ МАГАТЭ создает комплекты данных о термогидравлических связях для реакторов с водяным и

### Усовершенствованные конструкции

В настоящее время разрабатываются проекты различных типов новых атомных электростанций, называемых обычно усовершенствованными ядерными реакторами. Как правило, проект усовершенствованной атомной электростанции — это конструкция, которая в данный момент представляет интерес, при этом ожидается, что по сравнению с ее предшественниками и/или действующими конструкциями она будет усовершенствована. К числу усовершенствованных конструкций относятся конструкции эволюционного типа и проекты, требующие значительных усовершенствований. Последние колеблются от умеренных модификаций существующих проектов до разработки абсолютно новых проектных концепций. Они отличаются от конструкций эволюционного типа тем, что требуют создания прототипа или демонстрационной установки. Иными словами, для определения того, нужна ли такая станция, необходима дополнительная работа.

### Эволюционные конструкции

Проект эволюционного типа представляет собой усовершенствованную конструкцию с незначительными или умеренными модификациями по сравнению с существующими конструкциями, при этом особое внимание обращается на сохранение отработанных конструкционных элементов в целях минимизации технологического риска. Разработка эволюционной конструкции требует, самое большое, проведения инженерно-технических испытаний на соответствие техническим условиям.

### Инновационные конструкции

Инновационный проект представляет собой усовершенствованную конструкцию, содержащую радикальные концептуальные изменения в подходах к проектированию или в конфигурации систем по сравнению с существующей практикой. В подобных случаях, по всей вероятности, потребуются значительные научно-исследовательские работы, разработка технико-экономического обоснования и создание прототипа или демонстрационной установки.

#### Деятельность и затраты на разработку усовершенствованных конструкций в зависимости от вносимых в существующие конструкции изменений



жидкометаллическим охлаждением, которые целесообразно использовать при анализе функционирования и безопасности реакторов. Основное внимание в области реакторов с газовым охлаждением сосредоточено на четырех конкретных технических аспектах, которые, по прогнозам, обеспечивают высокую степень безопасности усовершенствованных высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов, но эффективность которых должна быть еще подтверждена. Эти аспекты охватывают: безопасное поведение нейтронной физики в активной зоне реактора; способность топливных частиц с керамическим покрытием удерживать продукты деления даже в крайне тяжелых аварийных условиях; способность конструкций обеспечить диссиацию теплоты радиоактивного распада посредством естественных механизмов переноса тепла; и безопасное поведение топлива и активной зоны реактора при химическом воздействии (проникновение воздуха или воды). Деятель-

ность в сфере применения высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов сосредоточена на проектировании и оценке систем использования тепла на японском реакторе HTTR.

Все эти виды деятельности свидетельствуют о глобальном сотрудничестве в развитии усовершенствованных типов ядерно-энергетических реакторов. По мере реализации национальных планов и введения в строй новых АЭС можно ожидать дальнейших усовершенствований в области их экономики, надежности и безопасности. С помощью своих международных рабочих групп по усовершенствованным реакторам МАГАТЭ будет стимулировать международный обмен информацией по некоммерческим технологиям и совместные исследования. Оно будет также оказывать содействие странам в гармонизации требований пользователей и сохранении ключевой технической информации по усовершенствованным ядерно-энергетическим системам. □