

# РАЗВИТИЕ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ И ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ НЕОБХОДИМОСТЬ ИННОВАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ

Д. МАДЖУМДАР, Ю. КУПИЦ, Г. РОГНЕР, Т. ШИ, Ф. НИХАУС И К. ФУКУДА

С наступлением нового века представляется все более очевидным, что глобальное развитие и рост населения ставят вопрос о том, сможет ли Земля остаться пригодной для обитания человека. Особенно следует отметить, что усиливается осознание неотложной необходимости удовлетворять растущие потребности людей в электричестве и воде без ущерба для окружающей среды.

За истекшие 50 лет ядерная энергия прошла путь от новейшего научного открытия до одного из самых важных компонентов энергетической структуры в более чем 30 странах. В 1999 г. ядерная энергия обеспечивала в семнадцати странах 25% и более их потребностей в электричестве. Одновременно все больше стран проявляют интерес к развитию и демонстрации разнообразных применений ядерной энергии, таких как использование реакторов для опреснения морской воды.

На этом фоне можно было бы ожидать усиления тенденции роста производства ядерной энергии. Но дело обстоит иначе, и ее будущий вклад в решение проблем устойчивого развития энергетики представляется неопределенным. Состояние ядерной энергетики в мире являет смешанную картину: в Западной Европе и Северной Америке строительство новых атомных электростанций прекращено, однако в нескольких странах Азии и некоторых регионах Восточной Европы производство ядерной энергии продолжает расти.

Основные факторы, обуславливающие такую смешанную картину, — это озабоченность и непонимание в отношении трех комплексов злободневных проблем:

- безопасность и сохранность ядерного материала;
- связь между ядерной энергией и ядерным оружием;
- экологические и экономические аспекты ядерной энергии и ядерного топливного цикла.

Чтобы ядерная энергия могла вносить существенный вклад в удовлетворение будущего энергетического спроса, необходимо решить эти актуальные вопросы. В реальном смысле ее приемлемость в качестве будущего энергетического варианта будет зависеть от успешного практического решения проблем, с которыми пришлось столкнуться в процессе развития ядерной энергетики в XX столетии.

Каждая проблема может быть решена с помощью мер в трех взаимосвязанных областях.

■ **Технология.** Характеристики технологии сами по себе в значительной степени определяют ключевые аспекты безопасности, сохранности и нераспространения, а также экологические и экономические факторы.

■ **Юридические и институциональные рамки.** Коммерческие контракты, государственные

законодательные акты, регулирующие положения, а также межправительственные соглашения и конвенции устанавливают основополагающие правила в области развития и применения ядерной энергии.

■ **Надзор и контроль.** Контроль, осуществляемый владельцами и операторами ядерных установок, местной и государственной властью, региональными и международными организациями, а также заинтересованными группами граждан, имеет целью обеспечить уверенность в том, что необходимая структура надзора над ядерными операциями существует и действует.

В каждой из этих трех взаимосвязанных областей проводилась и проводится работа самого разнообразного характера; фактически последние полвека породили индустрию, которая укротила ядерную энергию и поставила ее на службу человечеству до такой степени, что в настоящее время она обеспечивает шестую часть мировых потребностей в электричестве. Это важное достижение.

Однако проблемы настоящего времени отличаются от тех, с которыми приходилось сталкиваться в течение последних десятилетий, и существенно различаются также в разных частях мира. Они особенно остро стоят

---

*Г-н Маджумдар — эксперт из Соединенных Штатов в Секции планирования и экономических исследований Департамента ядерной энергии МАГАТЭ, г-н Рогнер — руководитель Секции. Г-н Купиц — руководитель Секции по развитию ядерной технологии, г-н Фукуда — руководитель Секции материалов ядерного топливного цикла того же Департамента. Г-н Ши — руководитель Бюро по трехсторонней инициативе Департамента гарантий. Г-н Нихаус — руководитель Секции оценки безопасности Департамента ядерной безопасности МАГАТЭ.*

в развивающихся странах, нуждающихся в электричестве для облегчения бремени нищеты и удовлетворения насущных потребностей человека в процессе устойчивого развития. Предстоит еще многое сделать в области оказания помощи развивающимся странам, заинтересованным в использовании ядерной энергии как варианта производства электричества.

Очень немногие из имеющихся средств для решения задач, присущих каждой из трех проблемных областей, позволяют осуществить простые или краткосрочные усовершенствования. Они потребуют постоянных усилий в течение длительного периода времени и совместной работы по поиску инновационных решений, способных дать ответ на важнейшие вопросы, устранить озабоченность и непонимание среди людей.

Учитывая состояние мировой энергетики и требования устойчивого развития, центральной целью должно стать укрепление основы для увеличения потенциального вклада ядерной энергии в снабжение электричеством. Такие шаги могут предприниматься в рамках согласованных программ по технологиям, правовым и институциональным рамкам и режимам контроля, необходимым для обеспечения общественной и политической поддержки.

В течение всего периода своего существования МАГАТЭ играет ключевую роль в инициировании и координации международных усилий по мирному применению ядерной энергии. В настоящее время, когда ядерная энергетика находится на распутье в том, что касается ее будущего развития, деятельность Агентства в области ядерной энергии и ядерного топливного цикла приобретает дополнительное значение. В данной статье приводится обзор глобальной ситуации в контексте важнейших задач, которые предстоит решить, а также рассматривается необходимость координирован-

ных долгосрочных действий для обеспечения прогресса в развитии ядерной энергетике с самого начала нового столетия. По мере расширения глобального энергетического рынка у ядерной энергии появляется потенциал для увеличения своего вклада в производство электричества, а также в разнообразные конечные неэлектрические применения энергии в различных областях.

## ГЛОБАЛЬНАЯ СИТУАЦИЯ

Вклад ядерной энергии в будущее энергообеспечение зависит от нескольких ключевых факторов. На ее будущее окажут влияние степень глобальной приверженности стратегиям устойчивого развития энергетики и признание роли ядерной энергии в этих стратегиях. Другие ключевые факторы, влияющие на принятие решений о строительстве новых электростанций, — это технологическая зрелость, экономическая конкурентоспособность, обеспеченность финансированием и приемлемость для общества. Понимание ответственности энергетических вариантов и связанных с ними экологических проблем, а также информирование и просвещение общественности будут также играть важную роль. Постоянная бдительность в отношении безопасной эксплуатации действующих электростанций — еще один исключительно важный фактор сохранения возможности для ядерной энергии обеспечить себе место в будущих энергетических стратегиях.

По сути своей, задачи, стоящие перед ядерной энергетикой, требуют дальнейших научно-технических исследований и разработок не только в целях совершенствования имеющейся ядерной реакторной технологии и технологии топливного цикла, но и в целях разработки инновационных типов реакторов и топливных циклов, гарантирующих невозможность их использования в целях распространения

ядерного оружия и характеризующихся повышенной эффективностью, более низкими затратами и более высокими уровнями безопасности.

**Семь основных областей.** Глобальные перспективы ядерной энергии могут быть охарактеризованы в рамках следующих семи основных областей.

**Технология.** Ядерная технология разрабатывается уже в течение пяти десятилетий. Значительное количество заказов на строительство коммерческих электростанций стало поступать в 60-е гг., а их ширококомбинированная коммерческая эксплуатация началась в 70-е гг. В настоящее время ядерная энергия обеспечивает от 6 до 7% первичной энергии в мире. В своем большинстве действующие электростанции работают хорошо и продолжают совершенствоваться.

Тем не менее в связи с несколькими аспектами их работы возникли проблемы, и в некоторых случаях электростанции были досрочно остановлены или были завершены, но не вводились в строй. Количество начатых строительством атомных электростанций достигло пика в 70-х гг., а их подключение к сети — в 80-х, тогда как нынешние уровни обоих этих показателей намного ниже значений, достигнутых ранее.

Осуществляемую в настоящее время деятельность в области развития технологии в рамках ядерноэнергетической индустрии можно охарактеризовать по трем общим категориям:

■ **Действующие коммерческие установки.** Усовершенствования в области технического обслуживания, эксплуатации, технического обеспечения, снабжения топливом и увеличения срока службы.

■ **Эволюционные конструкции.** Усовершенствования в области конструкций и эксплуатации в ближайшем будущем, означающие умеренные изменения в коммерческих установках,

эксплуатируемых в настоящее время.

■ **Иновационные конструкции.** Достижения в области проектирования и эксплуатации АЭС, представляющие собой значительный отход от ныне действующих коммерческих установок, в целях перспективного разветвления в будущем.

В последние годы в различных странах зародилось множество идей относительно конструкций новых энергетических реакторов и топливных циклов. Некоторые из этих конструкций могли бы вдохнуть новую жизнь в ядерную энергетику, но только в случае их разработки, опробования и испытания в условиях, способствующих их успешному завершению и выходу на стадию коммерческого использования. Ядерные разработки требуют много времени. На разработку и испытание концепции нового ядерного реактора уходит от 15 до 20 лет, в зависимости от наличия постоянной политической поддержки и необходимых ресурсов. Отбор и демонстрация наиболее многообещающего варианта, который должен стать средством значительного расширения ядерной энергетики, может занять намного больше времени. Требуется энергичные усилия по сохранению, использованию и наращиванию уже накопленных необходимых знаний и опыта.

**Безопасность.** Существующий в настоящее время высокий уровень ядерной безопасности достигнут в результате постоянных усовершенствований на основе накопленного в мире опыта. Меры по обеспечению безопасности обычно принимаются на основе заключения о том, что они "разумно практически осуществимы", как это отмечается в публикации "*Безопасность ядерных установок*" Серии изданий по безопасности МАГАТЭ. Некоторые страны при принятии решений об усовершенствованиях применяют формальный процесс анализа затраты/выгоды. В случае неопределенностей следует прини-

мать консервативные решения. Учитывая настоящий и будущий высокий уровень функционирования техники, особое внимание следует обращать на управление эксплуатационной безопасностью.

Сейчас достигнут широкий международный консенсус, включающий промышленность и регулирующие органы, в отношении показателей безопасности будущих реакторов. Они предложены Международной консультативной группой по ядерной безопасности (ИНСАГ). В основном требуется, чтобы безопасность будущих реакторов была в десять раз выше по сравнению с показателями, установленными для действующих в настоящее время реакторов (т. е. показатели  $10^{-5}$  в год для частоты повреждения активной зоны ядерного реактора и  $10^{-6}$  в год для крупных радиоактивных выбросов на будущих электростанциях). В документе ИНСАГ-12 отмечается, что "еще одна цель в отношении этих будущих реакторов состоит в практическом исключении последствий аварии, которые могут привести к крупным начальным радиоактивным выбросам, тогда как тяжелые аварии, предполагающие на более поздней стадии разрушение защитной оболочки ядерного реактора, будут учтены в процессе проектирования с использованием реалистических допущений и тщательного расчетного анализа, с тем чтобы их последствия потребовали лишь осуществления защитных мер, ограниченных во времени и пространстве".

Без изменений технологии такие усовершенствования приводят к увеличению стоимости ядерной энергии, как капитальных, так и эксплуатационных расходов. Следовательно, трудная задача в области проектирования и демонстрации будущих электростанций состоит в том, как добиться столь высоких уровней безопасности и при этом сократить расходы для обеспечения конкурентоспособности на энергетическом рынке.

В принципе, разумеется, такая задача не является неразрешимой. Одновременное повышение эксплуатационной безопасности и экономических показателей технологии всегда было одним из основных факторов стимулирования инженерной изобретательности и новаторства.

Эволюционные конструкции исследуют пути повышения безопасности, которые с технической стороны включают применение современных технологий управления, упрощение систем безопасности, использование усовершенствованных конструкций и увеличение времени срабатывания, необходимого для активации систем безопасности и действий оператора. Что касается программного обеспечения, такие решения несут в себе потенциал сокращения бремени, связанного с демонстрацией соответствия требованиям. Кроме того, более высокий уровень технических знаний и усовершенствованные компьютерные программы вносят вклад в обеспечение эксплуатационной безопасности. Еще один элемент — "принятие решений на основе информации о риске", цель которого состоит в сосредоточении усилий на важнейших проблемах безопасности; это может привести к ужесточению одних — но и ослаблению других — требований. Уделяется также внимание упрощению процесса лицензирования и повышению его предсказуемости.

В иновационных конструкциях в еще большей мере находят применение элементы, повышающие внутренне присущую безопасность. В частности, в них стремятся показать, что передовые конструкции или новые элементы способны исключить необходимость устанавливать некоторые системы безопасности, требуемые для действующих в настоящее время реакторов; они или не потребуются вообще или потребуются только для защиты инвестиций в электростанции, но не для охраны здоровья людей или обеспечения безопасно-

сти. В таких случаях оборудование может быть все же установлено; однако его не нужно классифицировать как относящееся к категории обеспечения безопасности, что в настоящее время ощутимо повышает его стоимость. Подобные конструкции также существенно сокращают затраты труда на разработку мер, необходимых для управления аварией и подготовки на случай возникновения аварийной ситуации.

#### **Физическая сохранность.**

Для предотвращения несанкционированного владения ядерными и другими опасными радиоактивными материалами, а также для предупреждения умышленного разрушения ядерных установок или преднамеренного рассеяния таких материалов во время их транспортировки необходимы адекватные защитные меры и надежная международная структура.

**Обращение с отработавшим топливом и радиоактивными отходами.** Обращение с отработавшим топливом и радиоактивными отходами вызывает постоянную озабоченность общественности. В нескольких странах немалую проблему представляет нехватка мощностей для хранения отработавшего топлива. Вместе с тем оно должно будет храниться в течение более длительного периода времени на площадке ввиду отсутствия установки по его удалению. Отсутствие демонстрации установки для постоянного удаления отходов увеличивает обеспокоенность и вносит факторы неопределенности относительно эксплуатации ядерных установок в будущем, еще более подрывая общественную поддержку, политическую волю и финансовую жизнеспособность. Инновационные концепции ядерных топливных циклов с новыми технологиями могут помочь снизить нагрузки на окружающую среду путем сокращения объемов и токсичности отходов, повысить безопасность, укрепить режим нераспространения и

экономическую эффективность ядерной энергии.

**Нераспространение.** Возможность потенциальной связи между ядерной энергией и ядерным оружием представляет особую важность для международного режима нераспространения и служит основанием для гарантий МАГАТЭ. Как известно, пятнадцать государств-членов разработали методы обогащения урана, и хотя технология химической переработки в настоящее время применяется лишь в одном государстве — члене МАГАТЭ, не обладающем ядерным оружием, сохраняется озабоченность в отношении того, что современные и будущие ядерные энергетические операции могут поощрять разработку основных технологий, связанных с приобретением ядерного оружия, и предоставлять их.

События в Ираке и Корейской Народно-Демократической Республике привели к расширению и укреплению международного режима нераспространения, включая готовность государств-членов воздерживаться от оказания помощи потенциальным нарушителям такого режима в приобретении ключевых технологий и ноу-хау, установление поставщиками контроля над чувствительными материалами, установками и оборудованием, а также укрепление гарантий МАГАТЭ, особенно в отношении их способности обнаруживать незаявленные операции по обогащению и переработке. Любое государство, начинающее сегодня осуществлять программу приобретения ядерного оружия, столкнется с гораздо более трудными препятствиями на пути получения международной помощи, значительно возросшей перспективой раскрытия такой программы до ее осуществления и большей вероятностью согласованных ответных действий по обеспечению нераспространения в случае ее обнаружения.

**Экономика.** Глобальная тенденция дерегулирования и роста конкуренции в выработке элект-

ричества, а также неизменно низкие цены на ископаемое топливо и избыток базисных мощностей в развитых странах тормозят рост числа атомных электростанций. Несмотря на рентабельность большинства ныне действующих АЭС, количество заказов на строительство новых весьма мало.

Наличие во многих регионах мира дешевого природного газа и технологические прорывы в области газотурбинных технологий наряду с прогрессом в сфере угольных технологий уменьшили экономическую привлекательность новых атомных электростанций для стран, не имеющих свободного доступа к природному газу и углю или придающих большое значение обеспечению энергоснабжения.

Исследования, проведенные Международным энергетическим агентством (МЭА) и Агентством по ядерной энергии (АЯЭ) Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), наряду с исследованиями в США и МАГАТЭ показали, что характерные для настоящего времени высокие нормы прибыли и соответствующие короткие периоды окупаемости осложняют сохранение конкурентоспособности новых атомных электростанций в регионах с легким доступом к газу или с запасами отечественного угля. Высокие начальные капитальные затраты и относительно долгие сроки строительства сводят на нет преимущество ядерной энергии, заключающееся в низкой стоимости топлива. В настоящее время некоторые системы, работающие на природном газе, могут быть построены со значительно более низкими капитальными затратами и в течение менее одной трети времени по сравнению с равной по мощности атомной электростанцией. Таким образом, рост ядерных энергетических мощностей в ближайшей перспективе ожидается лишь в ограниченном числе стран, не располагающих собственными энергетическими ресурсами или

инфраструктурами добычи и использования природного газа.

**Общественная и политическая приемлемость.** Несмотря на надежную и безопасную работу ядерных энергетических реакторов, когда безопасность зависит от сложных технических систем и компетентности обслуживающего персонала, у общественности возникают озабоченность и непонимание. Хотя разработаны конструкции ядерных реакторов эволюционного типа с улучшенными характеристиками безопасности по сравнению с действующими электростанциями, во многих странах поддержка ядерной энергии снизилась. Требуются энергичные усилия для более эффективного пропагандирования достигнутых успехов и обеспечения понимания общественностью ядерной энергии в контексте глобального энергетического спроса, конкурирующих энергетических систем, а также регулирующих и технологических условий, в которых функционируют системы выработки электричества.

## ПОТРЕБНОСТЬ В ИННОВАЦИОННЫХ МЕРАХ

В долгосрочной перспективе положение на глобальном энергетическом рынке остается неопределенным, но результаты многих анализов, включая недавнее заявление Мирового энергетического совета, убедительно свидетельствуют в пользу необходимости сохранения ядерной энергии в качестве варианта (см. соответствующую статью, стр. 2). Продолжающийся рост населения и спроса на энергию, особенно в развивающихся странах, в сочетании с наличием и пониманием феномена глобального изменения климата, подчеркивают глобальную необходимость быстрого и широкого развертывания электростанций, работающих на неископаемом топливе.

В марте 2000 г. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК)

одобрила Специальный доклад о сценариях выбросов (СДСВ) на период до 2100 г. В этих сценариях прогнозируется большой спрос на безуглеродные энергетические технологии после 2020 г.

Перспективы развертывания ядерной энергетики, как правило, весьма хороши. Эти сценарии дают разные прогнозы относительно ее доли в общем объеме производимой энергии, но в них постоянно подтверждается большой потенциал ее роста — от 350 ГВт (эл.) в настоящее время до 2000—5000 ГВт (эл.) к 2050 г. и 3500—10 600 ГВт (эл.) к 2100 г. (см. соответствующую статью на стр. 31). По существу диапазон глобальных ядерных энергетических мощностей на 2050 г. предполагает в этих сценариях их прирост по 50—150 ГВт (эл.) в год в течение 2020—2050 гг.

В свете уже упомянутых выше проблем трудно прогнозировать пяти-десятикратный рост ядерных энергетических мощностей на основе лишь существующих эволюционных технологий. Для обеспечения полноправного участия ядерной энергии на будущем мировом энергетическом рынке необходимо проведение инновационных научно-исследовательских работ и опытно-конструкторских разработок. Рассмотрим следующие аспекты:

■ **Стоимость.** Необходимо повышать конкурентоспособность ядерной энергии на регулируемом международном энергетическом рынке, особенно в регионах с легким доступом к газу и/или с небольшими местными сетями, а также в сфере неэлектрических ядерных применений.

■ **Совместимость инфраструктуры.** По имеющимся прогнозам, значительная доля будущего увеличения спроса на электричество придется на страны, плохо знакомые с ядерной энергией. Всем им невозможно быстро создать инфраструктуру для эксплуатации ядерных реакторов и службы по обеспечению

начальной и конечной стадий топливного цикла. Аналогичным образом, проведение обследований безопасности и лицензионные требования в отношении строительства и эксплуатации атомных электростанций на местах должны быть обеспечены по разумным ценам.

■ **Безопасность.** В результате постоянно осуществляемых научно-исследовательских работ и опытно-конструкторских разработок безопасность будущих реакторов все более повышается. Одна из целей состоит в практическом исключении аварийных последствий, могущих привести к крупным начальным выбросам радиоактивности. Для сокращения расходов требуются инновационные решения, которые могли бы повысить безопасность путем упрощения систем и более рационального использования новейших проектных основ и средств обеспечения безопасности.

■ **Гарантии.** Значительный рост числа атомных электростанций в мире и последовавшее за ним увеличение объемов плутония в отработавшем топливе попадают в сферу действия гарантий МАГАТЭ. Но еще более это справедливо, однако, в отношении распространения технологий критического обогащения урана и извлечения плутония.

Расходы на инспекции, необходимые для обеспечения достаточной степени уверенности в том, что государства-члены продолжают соблюдать свои обязательства по нераспространению, существенно различаются в зависимости от характера применяемой технологии. Если за основу взять легководный реактор, то инспекционные расходы для реактора с перегрузкой топлива на мощности будут примерно в пять раз выше, для завода по обогащению урана — в десять раз и для завода по химической переработке — в 100 раз.

Следует разрабатывать такие инновационные решения в конструкциях реакторов и в струк-

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, СВЯЗАННЫЕ С ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВНЫМ ЦИКЛОМ

Атрибут	Процесс и система	Соответствующие страны	Характеристики
Состав топлива и процесс	Пиропроецесс	Япония, Россия, США	Объем ядерных отходов меньше и технологическая установка проще, чем в технологии жидкостной ("влажной") обработки (ожидаются экономические и экологические преимущества).
	Виброупакованное топливо	Россия, Швейцария	Топливные частицы образуются непосредственно из кислых растворов при переработке (ожидаются экономические выгоды, сравнимые с преимуществами порошковой технологии).
	Система DUPIC	Канада, Республика Корея	Плутоний не выделяется из отработавшего топлива реакторов PWR (ожидается гарантия невозможности использования в целях распространения).
	Ториевое топливо (торий-уран, торий-плутоний)	Индия, США	Источник тория огромен. Топливо состава торий-уран образует меньше второстепенных актинидов (ВА) по сравнению с уран-плутониевым топливом.
	Инертная матрица (топливо)	Франция, Япония, Швейцария	Благодаря химически устойчивому оксиду отработавшее топливо рассматривается в качестве отходов (ослабление воздействия на окружающую среду).
Система разделения и трансмутации (P-T)	Возбуждаемая ускорителем система	Франция, Япония, США	Получаемая высокая энергия нейтронов разрушает ВА, долгоживущие продукты деления (ДЖПД). Подкритическая активная зона обеспечивает повышенную безопасность.
	Система P-T с быстрым реактором (БР)	Япония, Россия	Существующая технология БР применяется для разрушения ВА, ДЖПД.
Реакторная система	Быстрый реактор [свинец (+ висмут)]	Россия	Повышенная безопасность с использованием свинцового теплоносителя.

турах топливного цикла, которые позволили бы осуществлять существенное расширение атомной энергетики при одновременной минимизации доступа к ядерным материалам в формах, пригодных для прямого использования в атомном оружии или других ядерных взрывных устройствах, а также к технологиям по производству таких материалов.

■ **Наличие ресурсов.** Традиционные источники урана могут оказаться в конечном итоге слишком дорогими для поддержания многократного роста глобальной ядерной энергетики на базе обычных ядерных реакторов на тепловых нейтронах. Требуется разработка всеобъемлющего плана по оценке и удовлетворению будущих потребностей.

Таковы основные причины, по которым необходимо разрабатывать инновационные конструк-

ции реакторов и топливных циклов в дополнение к реакторам эволюционного типа.

### ИННОВАЦИОННЫЕ НИОКР

**Инновационные конструкции реакторов.** В настоящее время 40% всех атомных электростанций, находящихся в стадии строительства (23% всех строящихся мощностей) главным образом в развивающихся странах, подпадают под категорию реакторов малой [менее 300 МВт (эл.)] и средней [менее 700 МВт (эл.)] мощности. Они включают базовые технологии действующих в настоящее время крупных атомных электростанций. Реакторы эволюционного типа малой мощности (такие как AP-600, VVER-640, PHWR-500 и CANDU-6) также основаны на существующих установках.

Однако необходимость инновационных НИОКР признана ядерной индустрией и странами, которые верят в выгоду, жизнеспособность и важность ядерной энергии как таковой в долгосрочной перспективе. В настоящее время значительные НИОКР в области инновационного ядерного топливного цикла и реакторных концепций ведутся в ряде стран, включая Аргентину, Канаду, Китай, Францию, Индию, Италию, Японию, Республику Корея, Россию, Южную Африку и США (см. таблицу и вставку).

Внимание сосредоточено на разработке реакторов малой и средней мощности, сочетающих в себе различные комбинации, включающие относительную простоту конструкции, экономию средств в результате массового производства, сокращение расходов на освоение площадки, длительный срок службы активной

## РЕАКТОРЫ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ НА СТАДИИ РАЗРАБОТКИ В МИРЕ

Реакторы малой мощности проектируются и разрабатываются в целом ряде стран. Они включают:

■ Реактор **Carem-25** с водой под давлением мощностью 25 МВт (эл.) разрабатывается в Аргентине. Данный реактор проектируется со встроенным парогенератором, который может быть включен в процесс опреснения воды.

■ Реактор **KLT-40** с водой под давлением мощностью 40 МВт (эл.) разрабатывается в Российской Федерации. Он проектируется в качестве варианта монтируемого на барже реактора малой мощности, используемого для производства электричества на ледоколах, а также для выработки тепла в северной части Сибири.

■ Высокотемпературный реактор **PBR** мощностью 114 МВт (эл.) разрабатывается в Южной Африке. Этот модульный газоохлаждаемый реактор с засыпкой из шаровых тепловыделяющих элементов проектируется с однократным топливным циклом и повышенными характеристиками безопасности благодаря использованию топливных частиц с керамическим покрытием и высокой теплоемкостью.

■ Реактор **SMART** с водой под давлением мощностью 100 МВт (эл.) разрабатывается в Республике Корея. Его концептуальная конструкция почти завершена; она включает встроенный парогенератор для многоцелевых применений, в том числе для опреснения морской воды.

■ Реактор **NHR-200** с водой под давлением мощностью 200 МВт (эл.) разрабатывается в Китае. Там же планируется достижение к 2001 г. начальной критичности малого высокотемпературного реактора мощностью 10 МВт (тепл.) для неэлектрических применений.

■ Тяжеловодный реактор **AHWR** мощностью 235 МВт (эл.) разрабатывается в Индии. Это усовершенствованный реактор с вертикальной трубой, использующий топливо на ториевой основе и включающий элементы пассивного охлаждения.

■ Газоохлаждаемый реактор **GT-MHR** мощностью 285 МВт (эл.) разрабатывается совместными усилиями Соединенных Штатов, Российской Федерации, Франции и Японии.

зоны, практически автоматизированное дистанционное управление, централизованные ремонтно-эксплуатационные службы и службы перегрузки топлива.

Россия продемонстрировала коммерческую эксплуатацию реакторов малой мощности для производства тепла и электричества в отдаленных районах. В 1999 г. Соединенные Штаты приступили к реализации Инициативы по проведению научных исследований в области ядерной энергии с целью разработки концепций усовершенствованного реактора и топливного цикла и осуществлению научных прорывов в ядерной технологии для преодоления препятствий на пути рас-

ширенного применения ядерной энергии.

Во многих странах на стадии исследования находятся инновационные конструкции, направленные на создание блоков меньшей мощности и в более сжатые сроки, а также с более низкими капитальными затратами. Цель этих исследований состоит в разработке экономичных конструкций с повышенной безопасностью и элементами, гарантирующими невозможность их использования в целях распространения. Это не просто уменьшенные варианты старых конструкций. Отличительными чертами таких реакторов являются возможность строительства

на площадке с использованием изготовленных в заводских условиях блоков и компонентов, включая полнокомплектные модули для быстрого монтажа. Выражается также надежда на то, что финансировать строительство таких реакторов будет легче, и они смогут быть пригодными для развертывания в регионах с умеренно развитыми сетями энергоснабжения.

С точки зрения перспектив инновационных конструкций следует отметить две передовые реакторные технологии с безводным охлаждением. Это одноконтурные высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы и быстрые реакторы со свинцовым/свинцово-висмутным теплоносителем. Модульный реактор с гелиевым охлаждением и засыпкой из шаровых тепловыделяющих элементов PBR-114 МВт (эл.) из Южной Африки привлек внимание во всем мире, поскольку он претендует на обладание всеми необходимыми характеристиками (включая рыночную конкурентоспособность). Русские тоже сделали аналогичные заявления, хотя и в более крупном масштабе, по поводу своего реактора на быстрых нейтронах со свинцовым охлаждением.

Все эти реакторы вселяют надежду, что озабоченность в связи с развитием ядерной энергии в некоторой степени уменьшится. Важно будет выбрать те из них, которые являются наилучшими вариантами для дальнейших разработок и демонстрации.

**Инновационные ядерные топливные циклы.** С самого начала развития ядерной энергетики в 60-х гг. схема замкнутого топливного цикла с реактором-размножителем воспринималась в качестве наилучшего выбора для широкомасштабного развития отрасли. Однако в настоящее время требуются качественно новые усилия для решения ряда проблем, связанных с обеспечением нераспространения, предотвращения и уменьше-

ния ущерба окружающей среде, экономикой, потребностями повышенной безопасности и сохранности.

Желательные характеристики инновационных ядерных топливных циклов можно определить в связи с теми целями, которых надо достичь:

- Экономическая конкурентоспособность топливных циклов.
- Минимизация радиоактивных отходов.
- Поддержка целей нераспространения, а именно, чтобы ядерные материалы нельзя было легко приобрести или преобразовать для использования в мирных целях.
- Дальнейшее повышение безопасности посредством технологических процессов.

Хотя широкомасштабные программы по инновационным ядерным топливным циклам в настоящее время не осуществляются, многие страны с ядерными энергетическими программами изучают их.

Все упомянутые концепции ядерных топливных циклов тоже дают надежду на устранение, по крайней мере отчасти, озабоченности в связи с развитием атомной энергетики. Необходимо добиться реализации общих целей по внедрению инноваций в области ядерной энергетики и в конечном счете сконцентрировать внимание на топливных циклах, способных устранить или свести к минимуму эту озабоченность.

Хотя нынешние инновационные программы НИОКР имеют общие цели, их подходы и конкретные цели различаются. Результатом этого является широкое разнообразие концепций реакторов и топливных циклов. В некоторых программах предпринимается попытка по-новому взглянуть на старые концепции, если усовершенствования материалов и других технологий сделали их снова жизнеспособными. В других программах проявляется стремление внедрить инновационные системы вместо более традиционных в целях

достижения существенных усовершенствований. В то же время отдельные программы нацелены на изыскание радикально новых вариантов.

Инновационные НИОКР в настоящее время охватывают практически все важнейшие типы ядерных топливных циклов и энергетических установок — легководные реакторы, тяжеловодные, газоохлаждаемые и ядерные реакторы с жидкометаллическим охлаждением. Исследуются также и другие типы реакторов. Взгляд на инновационные НИОКР показывает, что в настоящее время в мире на стадии разработки находятся от 40 до 50 различных концепций. Некоторые из них находятся на стадии начального концептуального планирования, другие — на более продвинутом этапе базового проектирования и лишь немногие приближаются к созданию прототипов или демонстрационных блоков.

Еще большее разнообразие существует и в отношении требований в таких решающих областях, как безопасность, обращение с отходами, нераспространение, потребление ресурсов и виды применений энергии. Например, несмотря на то, что все концепции в области экономики производства нацелены на обеспечение конкурентоспособности на будущем энергетическом рынке, существуют различные мнения по поводу того, должны ли они стать конкурентоспособными за счет потенциального введения налогов на выбросы CO<sub>2</sub> и повышения цен на ископаемое топливо или нет. В свете подобных неопределенностей ядерная энергия должна стремиться отстаивать свои собственные права.

По мнению некоторых специалистов в области безопасности, современные усовершенствованные легководные реакторы достаточно безопасны для их широкомасштабного развертывания, поскольку они не наносят ущерба окружающей среде (отсутствие значительных выб-

росов радиоактивности вне площадки даже в случае тяжелой аварии). Другие считают, что общественность может принять концепцию широкомасштабного развертывания ядерной энергетики лишь в том случае, если будет предложен реактор нового типа без существенных отказов топлива, как это иногда утверждается в отношении модульных высокотемпературных реакторов.

В области обращения с радиоактивными отходами некоторые специалисты считают, что непосредственное подземное захоронение отработавшего топлива является достаточно безопасным выбором и что для обеспечения его приемлемости для общества требуется лишь его практическая демонстрация. Другие настаивают на том, что для обеспечения общественной поддержки широкомасштабного развертывания ядерной энергетики необходимо устранение долгоживущих опасных нуклидов путем их сжигания или трансмутации. Существуют разные мнения по поводу того, какие опасные элементы должны быть устранены и до какой степени. Еще одной аналогичной проблемой является извлечение отработавшего топлива.

В области нераспространения некоторые специалисты предлагают разработку концепций особых реакторов и топливных циклов, гарантирующих невозможность их использования в целях распространения (новые типы топлива, новые технологии переработки топлива без извлечения плутония, новые концепции быстрых реакторов и т. п.) с особым акцентом на внутренние технические характеристики, исключающие возможность переключения ядерного материала. Однако среди исследователей нет единодушного мнения о том, каким образом измерять уровень “гарантии невозможности использования в целях распространения” и до какой степени мы можем полагаться на технические меры.



Ядерное сообщество должно изыскать способ сократить это множество мнений и сосредоточиться на тех немногих, которые наиболее перспективны для успешного развития.

## НЕОБХОДИМОСТЬ МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА

Учитывая ограниченную поддержку НИОКР отдельными правительствами и большое разнообразие концептуальных проектов, необходимо следующие решающие 10—15 лет посвятить созданию реальных ядерных реакторов и топливных циклов, которые могут успешно выступать на рынке. В частности, слишком амбициозные цели в области обращения с отходами, безопасности или нераспространения могут привести к чрезмерному удорожанию ядерной энергии и снижению конкурентоспособности ядерного варианта.

По мере разработки инновационных технологий необходимо также проводить анализ и пересмотр коммерческих, правительственных и межправительственных механизмов в соответствии с достигнутым прогрессом.

Эти вопросы имеют важное значение для возрождения ядерной энергетики в долгосрочной перспективе и должны быть решены как можно скорее. Одним из путей достижения прогресса и консенсуса в отношении некоторых из этих вопросов является международное сотрудничество и глобальная координация НИОКР. Международное сотрудничество между государственными научно-исследовательскими центрами, международными организациями, такими как МАГАТЭ, АЯЭ, Европейская комиссия, и ядерной индустрией может ускорить прогресс путем объединения ресурсов для достижения общей цели. Например, в качестве объекта приложения совместных усилий этих групп можно установить следующие задачи:

■ Оценка будущих потребностей электрокомпаний и роль ядерной энергии в разных рыночных условиях.

■ Разработка комплекта желательных характеристик в области безопасности, сохранности, обращения с отходами, нераспространения и потребления ресурсов для новых реакторных технологий и технологий топливных циклов.

■ Международное сотрудничество в разработке наиболее перспективных концепций.

Эти задачи имеют важное значение для обеспечения уверенности стран в том, что они получают выгоды от ядерноэнергетической технологии как варианта долгосрочного устойчивого энергоснабжения.

**Деятельность МАГАТЭ.** МАГАТЭ имеет долгосрочные программы по оказанию помощи странам в областях, касающихся развития ядерной энергии и топливного цикла. Основные усилия в настоящее время направлены на совершенствование координации деятельности и определение общих целей в соответствии с интересами государств — членов Агентства. Новая ориентированная на результат программа МАГАТЭ и новый подход к бюджету могут помочь Агентству интегрировать все виды своей деятельности в одну программу по инновационным реакторам и топливным циклам для лучшего решения главных проблем развития энергии и ядерной энергетики, стоящих перед странами. В этих рамках должна проводиться оценка глобального развития инновационных реакторов и топливных циклов.

Как отмечается в Среднесрочной стратегии Агентства, главная цель усилий состоит в оказании поддержки и содействия обмену информацией и разработке новых и зарождающихся применений ядерных технологий. Этого можно добиться, обеспечив форум для рассмотрения и стимулирования разработок, связанных

с новыми технологиями в области ядерной энергии и топливного цикла, включая реакторы малой и средней мощности для выработки электричества и тепла, а также для опреснения морской воды; новых технологических разработок, важных для обеспечения конкурентоспособности, безопасности и эффективности; совершенствования реакторов и соответствующих топливных циклов, чтобы сделать невозможным их использование в целях распространения; сокращения накапливаемых радиоактивных отходов. Рассматриваются такие конкретные виды деятельности Агентства, как, например, роль в качестве основного форума для государств-членов, желающих работать над аналогичными конструкционными концепциями. Это окажет существенную помощь в объединении ресурсов и опыта в целях разработки инновационных реакторов и топливных циклов.

Ядерная энергетика находится сегодня на перепутье, и единодушия относительно ее роли в будущем нет. Хотя она на деле доказала свою способность помогать странам в удовлетворении их потребностей в энергии — и при этом она обладает преимуществами по сравнению с другими вариантами выработки электричества в рамках устойчивого развития энергетики — фундаментальной проблемой является достижение более полного осознания в обществе и политических кругах ее роли и приемлемости ее потенциального вклада. Посредством реализации новых инициатив и совместных действий по укреплению международного ядерного сотрудничества МАГАТЭ планирует осуществление более целенаправленной программы для более полного удовлетворения интересов государств-членов в области разработки и демонстрации того, что ядерно-энергетический вариант является жизненно важным элементом мировой энергетики в будущем. □