

Стимулирование ИННОВАЦИЙ

Страны рассчитывают на преимущества ядерной энергетики следующего поколения

Юдит Перера

За несколько последних лет был предпринят ряд международных инициатив, в рамках которых рассматривались средне- и долгосрочные перспективы развития ядерной энергетики. Среди таких инициатив можно назвать проект «Международный форум “Поколение IV”» (ГИФ), инициатором которого выступили США, Международный проект МАГАТЭ по усовершенствованным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО) и «Европейская сеть “Микеланджело” по обеспечению конкурентоспособности и устойчивости ядерной энергетики в ЕС» (Миканет). Были проведены также два крупных исследования – “Разработка усовершенствованных ядерных реакторов: возможности международного сотрудничества”, организованное МАГАТЭ совместно с Международным энергетическим агентством (МЭА) ОЭСР и Агентством по ядерной энергии (АЯЭ) ОЭСР, и “Будущее ядерной энергетики” – междисциплинарное исследование Массачусетского технологического института (МТИ).

Эти инициативы во многом схожи, поскольку все они нацелены на разработку усовершенствованных ядерных систем, включая реакторы и топливные циклы. Хотя импульсом для их реализации послужили одни и те же настоятельные потребности стран, они имеют определенные различия, например, в том, какое внимание в них уделяется ядерному топливному циклу. Два проекта – ГИФ и ИНПРО – это те инициативы, которые могут послужить развитию международного сотрудничества на этом направлении.

Проект ГИФ

По существу, ГИФ является инициативой США. В 1997 г. Комитет советников по науке и технологиям при президенте США рассмотрел состояние национальных НИОКР по энергетике и разработал программу мер, направленных на решение задач в области энергетики и охраны окружающей среды в следующем столетии. В программе отмечается важность выбора направления развития ядерной энергетики, обеспечивающего удовлетворение будущих энергетических потребностей, включая проведение целенаправленных НИОКР для преодоления основных препятствий на пути продвижения в выбранном направлении, таких как проблемы обращения с отработавшим топливом, распространения, экономической эффективности и безопасности. В свою очередь Министерство энергетики США (МЭ) разработало проект “Инициатива по исследованиям в области ядерной энергии” (NERI), призванный содействовать решению технических и научных проблем, от которых будет зависеть использование ядерной энергии в США в будущем. В 1998 г. решением МЭ образован независимый Консультативный комитет по исследованиям в области ядерной энергетики (NERAC), оказывающий консультационные услуги министру и директору Управления по ядерной энергии, науке и технологиям (NE) в отношении программы гражданской ядерной технологии МЭ.

Проект ГИФ нацелен на осуществление совместных разработок и демонстрацию одной или нескольких ядерных энергетических систем четвертого поколения, которые могли бы обеспечить высокий уровень экономической эффективности, безопасности, надежности и устойчивости. Введение их в коммерческую эксплуатацию возможно к 2030 г. В рамках проекта проводится обмен опытом, осуществляется совместное использование ресурсов и пилотных установок, что позволяет повысить эффективность работ и избежать их дублирования (см. таблицу с перечислением членов ГИФ).

В документе “Национальная энергетическая политика” (НЭП), выпущенном в мае 2001 г. Группой по разработке политики в области энергетики при вице-президенте, выражается поддержка усилению роли ядерной энергии в качестве одного из основных источников удовлетворения растущих энергетических потребностей США. В сентябре 2002 г. подкомитет NERAC по планированию разработок технологий четвертого поколения подготовил “технологический план действий” в отношении ядерных энергетических систем поколения IV. В координации с ГИФ для дальнейших совместных исследований и разработок были отобраны шесть инновационных концепций реакторных технологий и соответствующих технологий топливного цикла, которые должны были также служить в качестве ориентиров для инновационных проектов НИОКР, реализуемых при содействии NERI. Эти концепции включают:

Члены ИНПРО	Члены как ИНПРО, так и ГИФ	Члены ГИФ
Аргентина	Аргентина	Аргентина
Болгария	Бразилия	Бразилия
Бразилия	Канада	Канада
Германия	Республика Корея	Республика Корея
Индия	Франция	Соединенное Королевство
Индонезия	Швейцария	Соединенные Штаты
Испания	Южная Африка	Франция
Канада	Организация-член:	Швейцария
Китай	Европейская комиссия	Южная Африка
Нидерланды		Япония
Пакистан		Организации-члены:
Республика Корея		ФОРАТОМ
Российская Федерация		Европейская комиссия
Турция		
Франция		
Чешская Республика		
Швейцария		
Южная Африка		
Организация-член:		
Европейская комиссия		

Участники ИНПРО по состоянию на июнь 2004 г. В совещаниях ГИФ участвуют наблюдатели из Евратома, МАГАТЭ и Агентства по ядерной энергии.

▶ газоохлаждаемый реактор на быстрых нейтронах (GFR) – гелиевоохлаждаемый реактор на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом;

▶ высокотемпературный реактор (VHTR) – реактор с графитовым замедлителем и гелиевым охлаждением, имеющий открытый урановый топливный цикл;

▶ сверхкритический водоохлаждаемый реактор (SCWR) – высокотемпературный реактор, охлаждаемый водой под высоким давлением, с режимом работы выше термодинамической критической точки воды;

▶ реактор на быстрых нейтронах, охлаждаемый жидким натрием (SFR), – охлаждаемый жидким натрием реактор на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом, что обеспечивает эффективное обращение с актинидами и конверсию воспроизводящего урана;

▶ реактор на быстрых нейтронах, охлаждаемый свинцовым сплавом (LFR), – реактор на быстрых нейтронах, охлаждаемый свинцом в виде свинцово-висмутового эвтектического жидкого металлического сплава, с замкнутым топливным циклом, что обеспечивает эффективную конверсию воспроизводящего урана и надлежащее обращение с актинидами;

▶ реактор на расплавленных солях (MSR) – производит энергию деления в циркулирующей топливной смеси расплавленных солей с использованием реактора на надтепловых нейтронах и полного топливного цикла с рециклом актинидов.

Ожидается, что эти реакторы могут быть введены в действие в течение следующих трех десятилетий. Их относительные преимущества заключаются в сокращении капитальных затрат, повышении ядерной безопасности, минимальном производстве ядерных отходов и дальнейшем снижении риска распространения материалов оружейного класса. Работа начата по четырем из выбранных систем. Ядерные энергетические системы поколения IV должны отвечать следующим требованиям:

▶ Устойчивость: обеспечение чистоты воздушной среды, долгосрочной работоспособности систем и эффективного использования топлива для производства энергии повсюду в мире; сведение к минимуму производства ядерных отходов и обеспечение надлежащего обращения с ними, а также сокращение сроков их хранения.

▶ Экономическая эффективность: обеспечение более низких расходов в течение срока службы по сравнению с другими энергетическими системами и уровня финансовых рисков, сопоставимого с рисками других энергетических проектов.

▶ Безопасность и надежность: обеспечение более высокого уровня безопасности и надежности по сравнению с другими системами; сведение к минимуму вероятности и степени повреждения активной зоны; исключение необходимости вмешательства со стороны в случае чрезвычайной ситуации.

▶ Устойчивость в плане нераспространения и физической защиты: характеристики, затрудняющие или препятствующие утечке или хищению материалов, пригодных для оружейного использования, а также обеспечение повышенной физической защиты от террористических актов.

По результатам исследований в рамках проекта ГИФ были определены четыре категории ядерного топливного цикла: открытый, с частичным повторным использованием плутония, с полным повторным использованием плутония и с полным повторным использованием трансураниевых элементов. Предполагается, что эти циклы будут применяться как минимум до конца столетия в соответствии с прогнозами относительно

спроса на энергию, подготовленными Мировым энергетическим советом и Международным институтом прикладного системного анализа.

Как показал опыт, открытый цикл требует наибольшего количества урана в качестве исходного материала и производит больше всего отходов в виде отработавшего топлива, однако все же меньше по сравнению с другими энергетическими технологиями. Урановых ресурсов достаточно для поддержания открытого цикла по крайней мере до середины столетия. Однако лимитирующим фактором является нехватка площадей для хранения отходов. Это становится важной проблемой, для решения которой уже через несколько десятилетий потребуются сооружения новых хранилищ. В долгосрочной перспективе через 50 лет лимитирующим фактором станет также нехватка урановых ресурсов.

Системы, использующие полностью замкнутый топливный цикл, могут сократить потребность в площадях для хранения и снизить требования к их характеристикам, однако расходы при этом не должны превышать приемлемые уровни. Замкнутые топливные циклы позволяют разделять ядерные отходы на части и обеспечить наиболее эффективное обращение с каждой из частей. Передовые стратегии обращения с отходами включают такие методы, как трансмутация выбранных нуклидов, экономически рентабельное использование теплоты, выделяемой при радиоактивном распаде, гибкое промежуточное хранение и подготовка отходов для захоронения в специфической геологической среде. Такие системы также позволяют рассчитывать на сокращение, по крайней мере на порядок, срока радиотоксичности отходов, предназначенных для геологического захоронения, поскольку предусматривают повторное использование большинства долгоживущих радиоактивных элементов.

Различные реакторы также могут соединяться в симбиозных топливных циклах, включая комбинации из тепловых реакторов и реакторов на быстрых нейтронах. Актиниды из тепловых систем могут повторно использоваться в системах с быстрыми нейтронами, что приводит к сокращению запасов актинидов повсюду в мире. Повышение степени выгорания в тепловых реакторах с газовым или водяным охлаждением также может способствовать утилизации актинидов в симбиозной системе. Тепловые системы могут выполнять и дополнительные функции, такие как производство водорода в высокотемпературных газоохлаждаемых реакторах или в экономичных легководных реакторах, что является одним из направлений общей стратегии по обеспечению более устойчивого будущего.

По данным исследований ГИФ, ядерная энергия занимает уникальное положение на рынке, поскольку расходы на ее топливный цикл составляют лишь около 20% стоимости производства. Высказывается предположение, что замена открытого цикла более усовершенствованным топливным циклом не потребует чрезмерных расходов.

Международный проект: ИНПРО

Проект ИНПРО был начат в 2000 г. государствами – членами МАГАТЭ, принявшими резолюцию, направленную на поддержку использования ядерной энергии в качестве устойчивого ресурса, способного удовлетворять энергетическим потребностям XXI в. Для того чтобы ядерная составляющая играла значимую роль в глобальном энергоснабжении, потребуется разработать инновационные подходы к решению проблем, связанных с экономической конкурентоспособностью, безопасностью, отходами и потенциальным риском распространения. Рассчитанный на более долгосрочную перспективу, чем другие инициативы, ИНПРО является единственным проектом, в рамках которого подход к решению насущ-

ных проблем осуществляется с учетом специфических нужд потенциальных пользователей в развивающихся странах. Принятое в ИНПРО определение “пользователей” охватывает широкий круг заинтересованных сторон, включая инвесторов, разработчиков, операторов АЭС, регулирующие органы, местные органы власти и организации, правительства, неправительственные организации и СМИ, а также конечных потребителей энергии.

В рамках ИНПРО все заинтересованные государства – члены МАГАТЭ, как обладатели, так и пользователи технологии, объединяются для совместного рассмотрения международных и национальных мер, которые необходимо принять с целью разработки инновационных проектов ядерных реакторов и топливных циклов. В таких проектах должна использоваться надежная и экономически конкурентоспособная технология, основанная – насколько это возможно – на системах с компонентами внутренней безопасности, минимизирующими риск распространения и оказания какого-либо воздействия на окружающую среду. Цель проекта – положить начало сотрудничеству всех заинтересованных сторон, которое оказывало бы влияние и дополняло деятельность существующих учреждений и программ, осуществляемых на национальном и международном уровнях с использованием накопленного опыта и знаний.

В сфере изучения ИНПРО – ядерные реакторы и установки топливного цикла, которые, как ожидается, будут введены в действие в будущем, вместе с соответствующими топливными циклами. Проведение исследований в рамках ИНПРО будет продолжаться, как предполагается, 50 лет, но это не означает, что изучаемые технологии будут внедрены в течение этого периода. Тем не менее в этот период будут сосуществовать технологии разных поколений – действующие, эволюционные и инновационные. Пока проект ИНПРО не связан с разработкой какой-либо конкретной технологии.

В 2001–2003 гг. в ходе фазы 1А проекта ИНПРО был разработан ряд требований к инновационным ядерным технологиям, которые включают основополагающие принципы (ОП), требования пользователей (ТП) и критерии и предназначены для сравнения различных концепций и подходов в отношении ключевых вопросов, обсуждаемых в связи с будущей ролью ядерной энергии, – экономической конкурентоспособности, безопасности, обращения с отходами, распространения, сохранности и физической защиты и устойчивости. На этом этапе не только были выработаны технологические требования, но и предложены рекомендации по административным и правовым вопросам, а также по вопросам инфраструктуры, главным образом в контексте развивающегося процесса глобализации. Фаза 1А была завершена в июне 2003 г.; ее результатом стала разработка методологии и руководящих принципов по оценке различных концепций и подходов.

Работа в рамках фазы 1В, которая началась в июле 2003 г., предусматривает оценку методологии ИНПРО, для чего будут проведены целевые исследования и рассмотрены инновационные ядерно-энергетические технологии, предоставленные государствами-членами. Это рассмотрение будет проводиться членами ИНПРО на основе ОП, ТП, критериев и методологий, разработанных в ходе фазы 1А. Будет также осуществлен предварительный сбор информации по усовершенствованному реактору и топливным циклам. Шесть государств – членов ИНПРО предложили провести национальные целевые исследования, предусматривающие применение методологии ИНПРО к отобранным национальным инновационным ядерно-энергетическим системам (ИЯЭС):

▮ Аргентина: система CAREM-X, включающая реактор CAREM и процесс обогащения топлива SIGMA;

▮ Индия: реактор APHWR и топливный цикл, включающий трансмутацию отходов с помощью реактора-размножителя на быстрых нейтронах (FBR) и иницируемые ускорителем системы (ADS);

▮ Республика Корея: технология топливного цикла DUPIC;

▮ Российская Федерация: семейство реакторов БН-800 на нитридном топливе и с соответствующим топливным циклом в равновесном состоянии;

▮ Китай: высокотемпературный реактор с засыпкой из шаровых ТВЭЛов;

▮ Чешская Республика: реактор на расплавленных солях (концепция, выбранная Международным форумом “Поколение IV” – ГИФ).

Кроме того, чтобы обеспечить всю возможную полноту проверки методологии, несколько групп независимых экспертов проводят целевые исследования технологий, не охваченных национальными исследованиями.

Окончательные результаты национальных и нескольких целевых исследований будут представлены на 7-м заседании Руководящего комитета ИНПРО в конце 2004 г. Затем будет проведена проверка инновационных концепций ядерных реакторов и топливных циклов на предмет соответствия выбранным требованиям и критериям. На основе результатов первой фазы в ходе фазы 2 будут рассмотрены имеющиеся технологии и изучен вопрос о целесообразности и осуществимости международного проекта.

Изначально ИНПРО получал политическую, финансовую и техническую поддержку от государств – членов МАГАТЭ (в частности, России, которая вносила значительный вклад в финансирование проекта), но с 2004 г. его финансирование частично включено в регулярный бюджет МАГАТЭ (см. таблицу с перечислением членов ИНПРО).

Главной отличительной особенностью методологии ИНПРО является ее нацеленность на предоставление информации относительно потенциала ядерной энергии и последствий ее использования. При этом учитываются уровень развития той или иной страны и ее энергетические потребности, а также оцениваются соответствующие затраты усилий, ресурсов и времени. Такая методология будет содействовать членам ИНПРО в определении и оценке компонентов, необходимых для будущей ядерно-энергетической системы, таких как реакторы и установки для обработки отходов, изготовления и повторного использования топлива. Государства смогут также определить масштабы НИОКР и демонстрационной деятельности, необходимые для совершенствования и обеспечения соответствия существующих компонентов системы будущим применениям и, при необходимости, для разработки новых компонентов.

Что касается экономического аспекта, то ИНПРО рассматривает четыре сценария возможной в будущем ситуации на рынке. Эти сценарии различаются в прогнозах относительно уровней глобализации и регионализации и во взглядах на экономический рост в сопоставлении с экологическими ограничениями. Как ожидается ИНПРО, экономически конкурентоспособные ИЯЭС смогут сыграть важную роль в удовлетворении будущих энергетических потребностей. Однако для обеспечения конкурентоспособности суммарной удельной стоимости энергии должны учитываться и регулироваться все стоимостные компоненты (капитальные затраты, расходы на эксплуатацию и обслуживание, стоимость топлива и т. д.). Ограничение расходов на топливо предполагает снижение капитальных затрат и расходов на эксплуатацию установок топливного цикла, включая шахты, установки по обработке и обогащению, а также по переработке топлива, снятие

установок с эксплуатации и длительный период обращения с отходами от них.

В отношении устойчивости ИНПРО разработал два базовых принципа, один из которых касается снижения уровня воздействия ядерной энергетики на окружающую среду, а второй – возможностей ИЯЭС служить средством устойчивого энергоснабжения в XXI в. В качестве главной задачи рассматривается охрана окружающей среды, и для сохранения устойчивости система должна быть полностью обеспечена важными ресурсами (такими, как делящийся/воспроизводящий материал или вода) в течение всего расчетного срока службы. Кроме того, эффективность использования ресурсов в ИЯЭС должна быть по крайней мере не ниже, чем в приемлемых альтернативных системах, как ядерных, так и неядерных.

Что касается безопасности, то принципы и требования ИНПРО основаны на экстраполяции текущих тенденций и учете потенциальных интересов развивающихся стран и стран с переходной экономикой. Основными компонентами безопасности ядерных реакторов являются контроль реактивности, отвод тепла из активной зоны, изоляция радиоактивных материалов и радиационная защита. Обеспечение безопасности установок топливного цикла предусматривает контроль за докритическим состоянием и химическими процессами, отвод тепла, выделяющегося при распаде радионуклидов, недопущение выброса радиоактивных веществ и радиационную защиту. Разработка ИЯЭС должна базироваться на всеобъемлющем анализе их жизненного цикла с учетом рисков и воздействия топливного цикла в целом.

Безопасность обращения с отходами, в сравнении с ядерными установками, требует других временных параметров, исходных условий и методов. Разработанные МАГАТЭ девять принципов обращения с радиоактивными отходами были приняты в ИНПРО без изменений.

Поскольку рост спроса на электроэнергию ожидается в основном в развивающихся странах, ИНПРО уделяет этим странам особое внимание. Для стран, нуждающихся лишь в небольшом числе АЭС, было бы нерациональным разворачивать полномасштабную структуру для внутренних поставок электроэнергии. Большую часть инфраструктуры, необходимой для строительства и эксплуатации систем ядерной энергетики, а также ее обслуживание могли бы обеспечить международные компании.

Необходимость глобального сотрудничества

Существует общее согласие в отношении необходимости международных усилий по разработке новых ядерных технологий. В связи с этим обсуждалась возможность налаживания взаимодействия между существующими проектами, которая уже реализуется на практике.

Технологические цели ГИФ и требования пользователей ИНПРО как необходимые характеристики передовых технологий во многом схожи или совпадают в том, что касается экономики, безопасности, экологии, топливного цикла и отходов, устойчивости к распространению и устойчивости в целом. Аналогичны, по-видимому, и их подходы к проверке и отбору предлагаемых к рассмотрению инновационных концепций. Однако между ними есть и ряд существенных отличий:

▶ ГИФ уже реализует программу НИОКР, тогда как в ИНПРО только завершается формулирование требований пользователей.

▶ Деятельность в рамках ГИФ направлена исключительно на удовлетворение потребностей нескольких промышленно развитых стран, тогда как проект ИНПРО предусматривает более углубленное рассмотрение проблем ядерной энергетики в целом с учетом специфики стран и регионов.

▶ Как ожидается, ИНПРО будет разработан более широкий спектр предложений по инновационным технологиям реакторов и ядерного топливного цикла, который удовлетворял бы потребностям практически всех стран, а не только имеющих развитую атомную промышленность.

▶ ИНПРО ведет также поиск путей решения проблем, выходящих за пределы технологических требований, в частности исследуются потенциальные преимущества международного сотрудничества в создании необходимой инфраструктуры для отдельных стран и возможности совершенствования правовых и институциональных структур. ИНПРО готов рассматривать потребности развивающихся стран.

▶ ГИФ ограничивается рассмотрением отдельных систем ядерной энергетики и связанных с ними топливных циклов.

▶ В ИНПРО считают, что необходимо использовать комбинации таких систем в увязке с различными сценариями развития ядерной энергетики на национальном, региональном и глобальном уровнях.

У ГИФ и ИНПРО есть база для более тесного сотрудничества, поскольку направленность их усилий различна. Членами ГИФ в основном являются поставщики технологий, поэтому в рамках этого проекта рассматриваются очень сложные технологические системы. Напротив, ИНПРО видит в качестве будущего рынка для ядерной энергетики Азию, включая развивающиеся страны, которым нужны более простые, но надежные системы. ИНПРО, в состав которого входят члены из числа развивающихся стран, обеспечивает лучшее понимание их нужд и требований.

Роли инноваций как ключевого фактора для будущего ядерной энергетики была посвящена Международная конференция МАГАТЭ по инновационным технологиям для ядерных топливных циклов и ядерной энергетики, проходившая в Вене в июне 2003 г. Председатель индийской Комиссии по атомной энергии д-р Анил Какодкар подчеркнул важность ядерной составляющей в диверсифицированной структуре энергетики. Однако он считает, что в области ядерной энергетики между развивающимся и развитым миром существует глубокий конфликт. Он добавил, что, по мнению многих развивающихся стран, меры по нераспространению были направлены главным образом на недопущение сколь-либо значимой по содержанию и масштабам передачи технологий.

На сессии Генеральной конференции МАГАТЭ в сентябре 2003 г. государствами-членами была принята резолюция, в которой подчеркивались необходимость международного сотрудничества в разработке инновационной ядерной технологии, а также высокий потенциал и значимость коллективных усилий. В ней также указывается на необходимость объединения усилий с другими международными инициативами в разработке инновационной ядерной технологии.

Очевидно, что в наши дни международное сотрудничество становится все более тесным, хотя на этом пути еще предстоит преодолеть немало препятствий. Судя по всему, в ближайшем будущем проекты ИНПРО и ГИФ приступят к координации своей деятельности.

Юдит Перера имеет 15-летний опыт литератора, редактора и консультанта по ядерной энергетике и смежным темам. Данная статья подготовлена на основе ее доклада, опубликованного в журнале "Nuclear Engineering International" за январь 2004 г. Эл. почта: JudithPerera@aol.com. Более подробную информацию о работе МАГАТЭ по проекту ИНПРО можно найти на веб-сайте www.iaea.org/INPRO/