

Устойчивое

Ю. Соколов и Р. Битти

развитие ядерной энергетики

Разработанные в МАГАТЭ средства оценки помогают государствам-членам в стратегическом планировании и принятии решений по вопросам устойчивого развития и развертывания ядерной энергетики.

Для долгосрочного и стратегического планирования эволюции энергосистем и потенциальной роли в них ядерной энергии необходимо глубокое понимание динамики изменения технологий и инноваций. Тщательное рассмотрение связанных с энергетикой инфраструктур, социальных предпочтений, направлений экономического развития и экологических ограничений должно быть частью развертывания национальной ядерно-энергетической программы. Оценка ядерно-энергетических систем (ОЯЭС) является неотъемлемой частью национального развития ядерной энергетики наряду с энергетическим планированием и развитием ядерной инфраструктуры с использованием разработанного в МАГАТЭ подхода “рубежей” для первых атомных электростанций. В частности, принятие ядерно-энергетической программы связано с охватывающими несколько поколений последствиями и обязательствами, актуальными в течение более чем 100 лет.

Целью энергетического планирования является обеспечение того, чтобы в решениях относительно инфраструктур спроса и предложения на энергетическом рынке учитывались интересы всех заинтересованных сторон, рассматривались все возможные варианты предложения и спроса на энергию и чтобы эти решения были согласованы с общими целями национального устойчивого развития. Решение о том, чтобы ядерная энергия стала частью диверсифицированной структуры энергетики, должно включать выбор реакторной технологии, развитие инфраструктуры, необходимой для первых станций, и понимание всего спектра последствий и соображений, связанных с развертыванием устойчивой ядерно-энергетической системы. Оно должно включать инновации в области ядерных технологий и институциональных механизмов, способствующие глобальной эволюции и вызываемые ею.

Ядерно-энергетическая система охватывает полный спектр ядерного топливного цикла, т.е. начиная с горной добычи и до конечных состояний для всех отходов, а также связанные с ними институциональные механизмы. Ядерно-энергетические системы характеризуются сложными инфраструктурами и продолжительным сроком службы, зачастую охватывающим несколько поколений. Кроме того, для развития или расширения ядерной энергетики требуются значи-

тельные времена подготовки и ресурсы, особенно для проектирования и коммерциализации новых и инновационных элементов. Ядерно-энергетические системы должны оцениваться комплексно, т.е., с учетом всех возможных аспектов устойчивого развития, в том числе трех взаимозависимых и взаимно укрепляющих основополагающих элементов – социального развития, экономического развития и охраны окружающей среды, – связанных между собой эффективными правилами и учреждениями.

Оценка ядерно-энергетических систем с помощью методологии ИНПРО

С целью оказания государствам-членам помощи в оценке их долгосрочного стратегического планирования для существующих или будущих ядерно-энергетических систем, в рамках Международного проекта по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам МАГАТЭ (ИНПРО) была разработана “методология ИНПРО”, в создании которой участвовали 300 международных экспертов, в том числе эксперты Международного форума “Поколение IV” (МФП). Оценка ядерно-энергетических систем – это комплексный подход, в котором методология ИНПРО, являющаяся признанным на международном уровне инструментом, используется в поддержку долгосрочного планирования и принятия стратегических решений относительно развития и внедрения в государствах-членах ядерной энергетики.

Предпосылкой для ОЯЭС является исследование энергетического планирования в случае стран-новичков – или национальной энергетической стратегии для стран со зрелой ядерно-энергетической программой – в рамках которого определяется потенциальная роль ядерного сектора в структуре энергообеспечения на национальном уровне, однако с должным учетом региональных и глобальных тенденций. Модели энергетического планирования МАГАТЭ помогают специалистам в области энергетического планирования проводить такие исследования. Национальные компетентные органы, отвечающие за энергетическую политику или планирование ядерно-

ИНПРО: Партнерство в целях развития диалога и инноваций

Международный проект МАГАТЭ по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО) играет важную роль в понимании будущего развития ядерно-энергетических систем в национальной, региональной и глобальной перспективе, а также инноваций в области технологий и институциональных механизмов в поддержку этого развития.

ИНПРО, учрежденный в рамках обязательства государств – членов МАГАТЭ оказывать помощь в обеспечении доступности ядерной энергии для цели удовлетворения энергетических потребностей XXI века устойчивым образом, объединяет усилия обладателей и пользователей технологий, позволяя совместно рассматривать международные и национальные меры, способствующие реализации необходимых инноваций в ядерных реакторах и топливных циклах.

ИНПРО обеспечивает форум для обсуждения и сотрудничества экспертов и лиц, определяющих политику, из промышленно развитых и развивающихся стран по всем аспектам устойчивого планирования, развития и внедрения ядерной энергетики. Он способствует развитию взаимовыгодного диалога между странами, обладающими ядерными технологиями, и странами, рассматривающими возможность освоения этих технологий с целью создания нового потенциала в области ядерной энергетики. Он также предлагает государствам-членам поддержку в областях национального стратегического планирования и принятия решений относительно развития и внедрения ядерной энергетики и повышает информированность о вариантах технологических инноваций на будущее.

Государства – члены МАГАТЭ и признанные международные организации могут стать членами ИНПРО при условии, что они вносят вклад в этот проект. Вклады могут представлять собой передачу в дар внебюджетных средств, предоставление услуг бесплатных экспертов, выполнение исследований по оценке с использованием методологии ИНПРО или участие в совместных проектах ИНПРО.

Со времени создания ИНПРО в 2001 году число его членов возросло до 31. На эти страны приходится 75% мирового ВВП и 65% мирового населения.

Еще десять стран имеют статус обозревателя, поскольку они рассматривают возможность стать членами проекта или принимают в нем участие на рабочем уровне. Кроме того, ИНПРО сотрудничает с другими международными инициативами, в том числе с Международным форумом “Поколение IV” (МФП) и Европейской платформой устойчивого развития ядерной энергетики (ЕПУРЯЭ) с целью достижения эффективной синергии и исключения дублирования усилий.

Этот проект, финансируемый главным образом за счет внебюджетных взносов, теперь получит новый импульс благодаря недавнему решению Российской Федерации в течение пяти лет предоставлять для него ресурсы; это повышает его стабильность и позволяет осуществлять долгосрочное планирование. В последнее время деятельность в рамках ИНПРО была консолидирована по пяти главным направлениям, которые также составляют основу плана действий по проекту на 2010 и 2011 годы. Двенадцать совместных проектов оказывают поддержку деятельности при активном участии членов ИНПРО.

энергетических систем, могут инициировать полную оценку или предварительную ОЯЭС.

При выполнении ОЯЭС с использованием методологии ИНПРО проводится оценка всех ядерных установок данной ядерно-энергетической системы, от горнодобывающей промышленности и до конечных состояний для всех отходов, включая окончательное захоронение высокоактивных отходов, и всех связанных с ними институциональных мер. Рассматривается полный жизненный цикл ядерных установок (“от рождения до смерти”), т.е. проектирование, строительство, эксплуатация и снятие с эксплуатации, и ядерная система оценивается в семи определенных разработчиками методологии областях, которые в совокупности охватывают аспекты устойчивого развития: экономика, инфраструктура (институциональные механизмы), обращение с отходами, устойчивость с точки зрения нераспространения, физическая защита, окружающая среда (воздействие стресс-факторов и истощения ресурсов) и безопасность реакторов и установок ядерного топливного цикла.

Страны, давно осуществляющие ядерные программы, а также ядерные “новички”, рассматривающие возможность осуществления новых ядерных программ, могут проводить ОЯЭС с целью определения возможных пробелов в своих ядерных программах и действий, необходимых для устранения этих пробелов. Потенциальными клиентами являются:

- ❶ разработчики ядерных технологий, стремящиеся оценить долгосрочную стратегию развития и внедрения с целью подтвердить ее устойчивость и правильную сбалансированность ядерных установок;
- ❷ опытные пользователи ядерных технологий, стремящиеся повысить информированность о ключевых заинтересованных сторонах и получить помощь в стратегическом планировании и принятии решений, касающемся расширения их ядерно-энергетических систем;
- ❸ потенциальные новые пользователи технологий, стремящиеся определить вопросы, которые необходимо рассмотреть при принятии решений относительно поэтапного развития ядерно-энергетической системы, т.е. развития требуемой ядерной инфраструктуры и строительства первой атомной электростанции.

Национальные оценки

Недавно несколько стран выполнили ряд национальных ОЯЭС: Аргентина, Армения, Бразилия, Индия, Республика Корея и Украина. Кроме того, восемь стран, т.е. Канада, Китай, Франция, Индия, Япония, Республика Корея, Российская Федерация и Украина провели совместное исследование ядерно-энергетической системы, состоящей из реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем и замкнутым топлив-

Направления программы ИНПРО

Оценки ядерно-энергетических систем (ОЯЭС) с помощью методологии ИНПРО

Недавно ИНПРО перешагнул важный рубеж, осуществив разработку и применение методологии ИНПРО, которая может оказать помощь странам в комплексной оценке нынешних и будущих ядерно-энергетических систем и поддерживает долгосрочное стратегическое планирование и принятие решений. После первой серии успешных исследований еще восемь стран проявили интерес к оценке существующих или будущих ядерно-энергетических систем с целью определения того, соответствуют ли они национальным критериям устойчивого развития.

Глобальное видение устойчивого развития ядерной энергетики

Посредством формулирования потенциальных сценариев и согласования представлений относительно долгосрочного глобального развития и развертывания ядерной энергетики ИНПРО помогает странам-новичкам, а также “зрелым” ядерным странам понять потенциал технических инноваций и новых институциональных и юридических подходов к развитию и построению устойчивой ядерной “архитектуры” в XXI веке, включая возможные сценарии перехода.

Содействие внедрению инноваций в области ядерных технологий

Ключевой деятельностью в этой области является содействие сотрудничеству членов ИНПРО в области некоторых инновационных ядерных технологий и связанных с ними НИОКР, вносящих вклад в устойчивое развитие ядерной энергетики.

Содействие внедрению инноваций в области институциональных мер

Помимо полного спектра ядерного топливного цикла, частью ядерно-энергетической системы являются также институциональные меры. К таким мерам относятся соглашения, договоры, национальные и международные правовые основы или режимы, и конвенции. Для внедрения новых конструкций реакторов могут потребоваться инновационные подходы к институциональным мерам, в частности для нестационарных реакторов и реакторов малой и средней мощности. ИНПРО способствует развитию сотрудничества в этой области и оказывает странам поддержку в области разработки и осуществления инновационных мер.

Форум для диалога в рамках ИНПРО

Эта комплексная область имеет целью содействие обмену информацией между обладателями ядерных технологий и пользователями технологий, с тем чтобы обеспечить соответствие будущих технических и институциональных инноваций их ожиданиям.

Участниками проекта ИНПРО являются Алжир, Аргентина, Армения, Беларусь, Бельгия, Болгария, Бразилия, Германия, Индия, Индонезия, Испания, Италия, Казахстан, Канада, Китай, Республика Корея, Марокко, Нидерланды, Пакистан, Российская Федерация, Словакия, Соединенные Штаты Америки, Турция, Украина, Франция, Чешская Республика, Чили, Швейцария, Южная Африка, Япония и Европейская комиссия. www.iaea.org/INPRO

ным циклом (см. врезку “Замкнутый топливный цикл с реакторами на быстрых нейтронах”).

Национальные исследования по ОЯЭС проводились странами, являющимися как пользователями, так и разработчиками технологий, и включали различные шкалы оценок. Аргентина и Украина оценивали устойчивость своих запланированных национальных ядерно-энергетических систем, проводя оценку всех установок ядерного топливного цикла. Бразилия, Индия и Республика Корея оценивали конкретные конструкции реакторов и соответствующие топливные циклы в некоторых областях методологии ИНПРО. Группа из Бразилии выбрала конструкцию реактора IRIS и провела его оценку в таких областях, как безопасность и экономика. Кроме того, была проведена оценка конструкции ядерного реактора с фиксируемой засыпной зоной (FBNR) на устойчивость в таких областях, как безопасность и устойчивость с точки зрения нераспространения. В индийском исследовании изучалась проблема замены органического топлива водородом в транспортном секторе. Главная цель корейского исследования состояла в том, чтобы разработать качественный анализ с целью определения уровня устойчивости с точки зрения нераспространения топливного цикла DUPIC, в котором отработавшее топливо PWR перерабатывается в свежее топливо для реакторов CANDU. Армения выполнила ОЯЭС прежде всего с целью ознакомления национальных принимающих решения лиц со всеми вопросами планируемой ядерно-энергетической программы замены

приблизительно в 2025 году имеющегося реактора на более крупный реактор.

В рамках совместного исследования изучалось несколько возможных сценариев посредством моделирования того, как различные ядерные технологии могут способствовать достижению расширенной роли ядерной энергии и какого рода проблемы и подходы можно было бы рассмотреть с целью обеспечения легкого перехода к замкнутому ядерному топливному циклу с реакторами на быстрых нейтронах.

Методология ИНПРО

Методология ИНПРО организована в виде трехуровневой иерархии, включающей Основные принципы, Требования пользователей и Критерии, состоящие из показателей и допустимых пределов. Эти элементы используются в семи областях оценки ИНПРО. В том случае, если соблюдены все принципы, требования и критерии, оцениваемая ядерно-энергетическая система представляет собой источник энергии, согласованный с критериями устойчивого развития страны. Если оценка указывает на пробел, то следует осуществлять дальнейшие исследования в рамках НИОКР.

Если же соблюдены не все элементы, то данная ядерно-энергетическая система все же может вносить зна-

Замкнутый топливный цикл с реакторами на быстрых нейтронах

В течение двух лет восемь стран, используя методологию ИНПРО, совместными усилиями проводили оценку ядерно-энергетической системы, основанной на замкнутом топливном цикле с реакторами на быстрых нейтронах (ЗЯТЦ-БР). Цель этого “совместного исследования” состояла в том, чтобы определить, будет ли ЗЯТЦ-БР соответствовать критериям устойчивого развития, определить рубежи для развертывания ядерной энергетики и установить области, в которых потребуется в будущем проведение совместных НИОКР. Этими странами были Индия, Канада, Китай, Республика Корея, Российская Федерация, Украина, Франция и Япония. В качестве эталонной системы на ближайшую перспективу использовалась система ЗЯТЦ-БР, основанная на проверенных технологиях, таких как натриевый теплоноситель, топливные таблетки MOX и водная технология переработки.

Было сделано общее замечание, что оптимизированное будущее для развертывания ядерной энергетики, возможно, не полностью соответствует нынешнему национальному планированию. Исходя из цели превращения ЗЯТЦ-БР в жизнеспособную альтернативу традиционным источникам энергии, в совместном исследовании были определены некоторые слабые места в нынешних национальных подходах, которые должны быть устранены. Это конкретно относится к экономике и безопасности, где необходимы дальнейшие исследования, с тем чтобы достигнуть более низкого уровня риска тяжелых аварий.

Конструкции эксплуатируемых в настоящее время ядерно-энергетических систем с ЗЯТЦ-БР не всегда отвечают экономическим требованиям конкуренции. Упрощение конструкции, увеличение глубины выгорания топлива и сокращение затрат посредством проведения целенаправленных НИОКР наряду со строительством малыми сериями могли бы сделать затраты на атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах сопоставимыми с затратами на электростанции с реакторами на тепловых нейтронах и электростанции на органическом топливе.

В некоторых странах внедрение реакторов на быстрых нейтронах могло бы способствовать эффективному использованию ресурсов ядерного топлива путем расширения использования плутониевого топлива и денаурированного уранового топлива, которое в случае необходимости могло бы нарабатываться в бланкетах реакторов на быстрых нейтронах.

чительный промежуточный вклад в удовлетворение энергетических потребностей страны или региона, но ее необходимо изменять и развивать, с тем чтобы она стала устойчивой в более долгосрочном плане. Результаты ОЯЭС могут быть использованы для придания направления этому развитию.

Порядок проведения ОЯЭС с использованием методологии ИНПРО изложен в публикации МАГАТЭ: “Руководящие материалы по применению методологии оценки инновационных ядерно-энергетических систем: Руководство

Развивая и внедряя новые технологии для оптимального обращения с продуктами ядерного деления и младшими актинидами, система ЗЯТЦ-БР обладала бы потенциалом для обеспечения “прорыва” в плане удовлетворения всех современных требований по обращению с отходами.

В силу технологических особенностей системы ЗЯТЦ-БР ее устойчивость с точки зрения нераспространения может быть сопоставимой с устойчивостью системы на основе незамкнутого ядерного топливного цикла, или быть выше ее. Система ЗЯТЦ-БР – ключевая технология для сбалансированного использования делящихся материалов.

Система ЗЯТЦ-БР требует регионального или многостороннего подхода к услугам начальной и конечной стадий топливного цикла и перехода к глобальной ядерной архитектуре.

Поскольку выводы совместного исследования также требуют там, где это возможно, комплексного подхода и международного сотрудничества, в качестве последующих мероприятий были начаты несколько совместных проектов в рамках ИНПРО, в которых рассматриваются следующие вопросы:

- глобальная архитектура ядерно-энергетических систем на базе реакторов на тепловых и на быстрых нейтронах, включая замкнутый топливный цикл (GAINS);
- комплексный подход к проектированию безопасной системы удаления тепла радиоактивного распада для реактора с жидкометаллическим теплоносителем (DHR);
- оценка усовершенствованных и инновационных ядерных топливных циклов в рамках крупномасштабных ядерно-энергетических систем на основе концепции ЗЯТЦ с целью соблюдения принципов устойчивости в XXI веке (FINITE); и
- исследование технологических проблем, связанных с отводом тепла жидкометаллическими теплоносителями и теплоносителями на солевых расплавах из активных зон реакторов, работающих при высоких температурах (COOL).

по ИНПРО – *Общий обзор методологии*” (Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems: INPRO Manual – Overview of the Methodology) (TECDOC 1575 Rev.1).

Юрий Соколов – заместитель Генерального директора МАГАТЭ, руководитель Департамента ядерной энергии и руководитель проекта ИНПРО. Эл. почта: Y.Sokolov@iaea.org.

Рэнди Битти является руководителем Группы ИНПРО в МАГАТЭ. Эл. почта: R.Beatty@iaea.org.