

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ —  
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени А. И. ЛЕЙПУНСКОГО

**ФЭИ - 0309**

В. И. Усанов, Л. П. Пупко

**РОЛЬ И ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ПРОЕКТА ИНПРО  
В МЕЖДУНАРОДНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Обнинск – 2019

УДК 621.039

**В. И. Усанов, Л. П. Пупко**

Роль и основные достижения проекта ИНПРО в международной деятельности : Обзор ФЭИ – 0309. — Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2019. — 24 с.

В работе представлен обзор с краткими сведениями о проекте ИНПРО, его роли в международной деятельности и основных достижениях с момента организации проекта 2000 г. За прошедшие два десятилетия своего развития под эгидой МАГАТЭ проект ИНПРО достиг значимых результатов, получил широкую поддержку стран — членов МАГАТЭ и, по существу, стал программой работы Агентства в области развития инновационных ядерно-энергетических систем. В приведенных материалах дана информация об основных результатах деятельности проекта по созданию уникальной платформы для сотрудничества стран-поставщиков ядерно-энергетических технологий и стран-пользователей, по разработке инновационных подходов в сфере технологий, в институциональных вопросах и инфраструктуре глобальной ядерной энергетики.

The paper presents a brief review of the role of INPRO project in international activities and its main achievements since organization in 2000. Over the past two decades of development under the auspices of the IAEA, the project has achieved significant results. It received wide support from the IAEA member states and became the Agency's program of work in the field of development of innovative nuclear energy systems. The materials provide information on the main results of the project on creation of a unique platform for cooperation between the supplier countries of nuclear energy technologies and user countries, on development of innovative approaches in the field of technology, institutional issues and the global nuclear energy infrastructure.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Создание и первый этап развития ИНПРО .....	4
2 Разработка и опробование методологии ИНПРО .....	8
3 Создание аналитической основы для оценки сценариев развивающейся ЯЭС по критериям ИНПРО и разработка гетерогенной модели глобальной ЯЭС.....	10
4 Комплексные услуги ИНПРО по предоставлению инструментов моделирования ЯЭС .....	16
5 Инновационные технологические решения и институциональные механизмы для повышения устойчивости национальных ЯЭС (задача 2 ИНПРО «Инновации») .....	17
6 Первый этап создания Дорожной карты МАГАТЭ .....	21
7 Диалог–форум ИНПРО и распространение результатов проекта.....	23

## **1. Создание и первый этап развития ИНПРО**

Международный проект по Инновационным Реакторам и Топливным Циклам (ИНПРО), инициированный Россией, является успешным примером международного сотрудничества, осуществляемого под эгидой МАГАТЭ.

6 сентября 2000 года в ООН на Саммите тысячелетия Президент Российской Федерации выдвинул инициативу по энергетическому обеспечению устойчивого развития человечества, кардинальному решению проблем нераспространения ядерного оружия и экологическому оздоровлению планеты Земля.

В рамках этой инициативы Россия предлагала реализовать при участии МАГАТЭ международный проект, который способствовал бы осуществлению долговременного обеспечения человечества энергией безопасным и экологически приемлемым способом на основе ядерных технологий и предотвращению использования этих технологий для целей создания ядерного оружия.

Разрабатываемый подход должен кардинальным образом улучшить существующую сегодня ядерную энергетику с ее проблемами нераспространения, ресурсными и экологическими ограничениями. Предполагалось, что инновации в технологической сфере, а также в сфере организации ядерного топливного цикла на национальном и глобальном уровнях станут основным инструментом решения поставленных сложных задач, которые в полном объеме могут быть реализованы в течение 21 века.

На 44-й сессии Генеральной Конференции МАГАТЭ 18 сентября 2000 г. инициатива Президента Путина была отмечена и высказана готовность оказать поддержку в координации этого проекта. В 2000 году МАГАТЭ, следуя резолюции Генеральной Ассамблеи (GC(44)/RES/21), инициировало международный проект ИНПРО. На совещании представителей стран-членов МАГАТЭ и других международных организаций, которое состоялось 27–28 ноября 2000 г., были обсуждены цели и условия осуществления проекта, выработано техническое задание и приняты соответствующие руководящие документы.

Главными целями ИНПРО были определены следующие:

- помочь удостовериться в том, что ядерная энергетика в 21 веке будет способна внести достойный вклад в удовлетворение энергетических потребностей устойчивого развития человечества;
- объединить обладателей и пользователей технологий для совместной выработки международных и внутригосударственных действий, требуемых для достижения желаемых инноваций в области ядерных реакторов и топливных циклов;

– создать представительный форум всех заинтересованных сторон, которые смогли бы оказать позитивное влияние и посильную помощь в деятельности существующих организаций, а также поддержку развивающимся инициативам на национальном и международном уровнях.

Страны, разделяющие цели ИНПРО и принимающие в нем участие, стали основой и движущей силой проекта. На рисунке 1 показана диаграмма роста числа участников проекта ИНПРО.

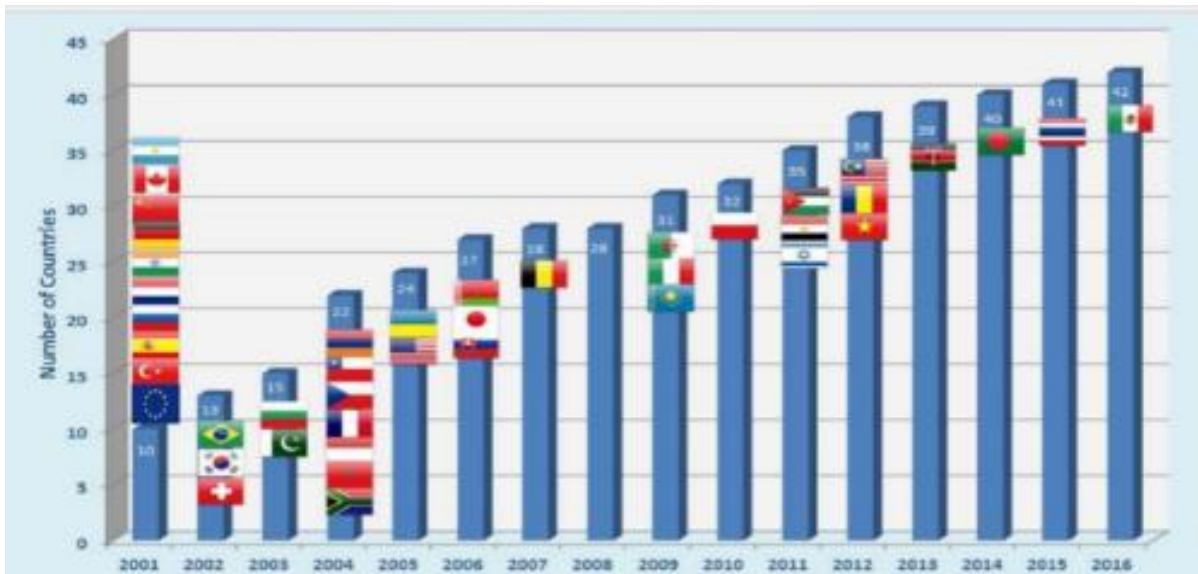


Рис.1. Страны-участницы проекта ИНПРО



Рис. 2. Организационная структура проекта ИНПРО

Основными элементами организационной структуры проекта ИНПРО (рис. 2) являются:

1) Руководящий комитет, осуществляющий общее руководство проектом (рис. 3).

2) Руководитель Проекта, осуществляющий управление проектом, — заместитель Генерального директора МАГАТЭ, Директор Департамента ядерной энергетики.

3) Международная группа, состоящая из назначенных странами-участницами экспертов, работающая в офисе ИНПРО Департамента по атомной энергии МАГАТЭ, координирующая и осуществляющая деятельность по проекту, опираясь на деятельности специалистов в государствах — членах МАГАТЭ.

4) Технические эксперты государств — членов Агентства.

5) Секретариат МАГАТЭ, оказывающий поддержку по административным, техническим и финансовым вопросам.

Финансирование ИНПРО осуществляется за счет внебюджетных взносов его членов и бюджетных средств Агентства. Страны — участницы ИНПРО могут вносить свой вклад в проект несколькими способами: предоставлением внебюджетных средств, предоставлением экспертов для работы в МАГАТЭ, выполнением согласованных исследований по оценке систем ядерной энергетики; участием в проектах ИНПРО.



Рис. 3. Участники 15-го заседания Руководящего комитета ИНПРО

Основные подходы к организации и осуществлению ИНПРО обеспечили эффективную деятельность проекта, которая постоянно поддерживалась резолюциями Генеральной конференции МАГАТЭ и соответствующими Генеральными ассамблеями Организации Объединенных Наций. Принципиальная организационная структура, разработанная при создании проекта, в основных чертах сохранилась до сих пор, но с ходом проекта ее элементы развивались и изменялись.

В 2009 году был разработан план действий ИНПРО, состоящий из четырех программных областей (задач): «Глобальные сценарии» — разработка глобальных и региональных сценариев, способствующих формированию глобального видения устойчивого развития ядерной энергетики, «Инновации» — изучение инновационных технологий ядерной энергетики и институциональных механизмов, которые поддерживают ее устойчивое развитие, «Оценка устойчивости и стратегии» — помощь государствам-членам в разработке долгосрочных национальных стратегий посредством применения методологии ИНПРО, «Диалог-форум» — создание представительного форума заинтересованных сторон для объединения обладателей технологий и пользователей, оказания позитивного влияния и поддержки в координации технической политики, взаимодействии с другими международными организациями и инициативами.

С января 2014 г. организация деятельности по проекту ИНПРО осуществляется секцией ИНПРО Департамента ядерной энергии МАГАТЭ.

ИНПРО, являясь междисциплинарным проектом, предусматривает тесное сотрудничество внутри МАГАТЭ с тем, чтобы обеспечить взаимодействие и взаимодополняемость с другими программами МАГАТЭ. В рамках ИНПРО ведется работа по взаимодействию и координации деятельности с крупными международными проектами с целью исключения какого-либо дублирования.

С момента возникновения ИНПРО прошел различные этапы развития, в реализации которых российские участники из различных российских организаций, в первую очередь специалисты ГНЦ РФ – ФЭИ и РНЦ «Курчатовский институт», внесли значительный вклад. Первым значимым результатом проекта стала разработка и опробование методологии ИНПРО — инструмента оценки инновационных ядерно-энергетических систем (ЯЭС) по критериям устойчивого развития.

## **2 Разработка и опробование методологии ИНПРО**

Условия и критерии развития мировой энергетики с конца XX века существенно изменились. Мировое сообщество осознает риски, связанные с ростом потребления энергии, такие как повышение уровня загрязнения, ускорение истощения ресурсов, накопление отходов и прочие угрозы. Отвечая на эти угрозы, ООН разработала концепцию устойчивого развития человечества, определяющую необходимость оптимального сочетания социальных, экологических и экономических факторов во всех сферах деятельности человека, включая энергетический сектор. В документах ООН были определены общие принципы и критерии устойчивого развития человечества и требования к устойчивому энергоснабжению как части общей концепции устойчивого развития.

Эти требования стали побудительным мотивом для дискуссий о том, какие источники энергии будут соответствовать растущим запросам общества и генерировать энергию безопасным, экологически чистым и доступным для потребителей образом. На национальном и международном уровнях стали формироваться представления об «экологически чистых» энерготехнологиях, способных обеспечить решение ключевых задач энергообеспечения устойчивого развития человечества. Во многих случаях ядерная энергетика оказывалась за рамками этих представлений.

В основе заключений относительно места ядерной энергетике в энергетике будущего, как правило, лежат качественные соображения и оценки, которые дают существенно разные ответы о ее роли в устойчивом развитии человечества и приводят к разным практическим решениям: от полного отказа от ядерной энергетике в одних странах до ускоренного ввода ядерных мощностей в других.

Миссию по разработке конкретных требований устойчивого развития применительно к ядерной энергетике на основе количественных оценок приняло на себя МАГАТЭ. Была разработана методология ИНПРО – инструмент оценки существующих и будущих ЯЭС по критериям устойчивого развития, которая обеспечила возможность принятия всесторонне обоснованных решений в отношении развития ядерной энергетике или отказа от нее. Термин «ядерно-энергетическая система» в методологии ИНПРО охватывает все компоненты ядерной энергетике, от начальных этапов производства, например, добычи сырья, до завершающих этапов, таких как окончательное удаление радиоактивных отходов, а также все способы применения ядерной энергии, в том числе, производство электроэнергии, высокотемпературного тепла и водорода, опреснение морской воды, отопления жилых районов и т. д.



Методология ИНПРО (рис. 4) представляет собой трехступенчатую иерархическую структуру, состоящую из базовых принципов, требований пользователя и критериев, в соответствии с которыми производится оценка инновационных ядерных энергетических систем в областях экономики, инфраструктуры, обращения с РАО, устойчивости к распространению, физической защиты, безопасности ядерных установок и воздействия на окружающую среду.

Базовые принципы формулируют руководящие правила, которым должна соответствовать ЯЭС. Требованиями пользователя являются условия, которые должны быть выполнены для того, чтобы достичь приемлемости данной ЯЭС для пользователей. Критерии используются для оценки того, отвечает ли ЯЭС этим требованиям. При этом считается, что она соответствует концепции устойчивого развития, если отвечает всей совокупности критериев, требований пользователя и базовых принципов ИНПРО.

Инновационность методологии ИНПРО состоит в том, что в этом проекте впервые к стали рассматривать не только отдельные элементы ЯЭС, но и подходить ее оценке комплексно как к целостной взаимосвязанной системе. Вместе с тем, ИНПРО дает возможность учесть конкретные условия государств-членов, как индустриально развитых, так и развивающихся.

В ходе создания методологии ИНПРО и после того, как было выпущено первое руководство для пользователей по ее применению, странами-участницами проекта ИНПРО на национальном уровне в тесном взаимодействии с международной группой проекта проводилась работа по установлению работоспособности, эффективности и полноты методологии.



Рис. 4. Структура методологии ИНПРО

Первое опробование методологии ИНПРО было проведено на примере оценки быстрого реактора БН-800, основные проектные решения по которому к этому времени были определены, а реактор находился в стадии строительства. Затем оценки национальных ЯЭС с использованием методологии ИНПРО были выполнены другими странами. Аргентина выполнила оценку перспективного ЯТЦ страны по всем областям методологии ИНПРО, Армения — оценку ЯЭС с ограниченной мощностью электросетей; Бразилия — оценку для двух малых инновационных реакторов, Индия — оценку ЯЭС по производству водорода в контексте перспектив его использования на транспорте, Республика Корея — оценку устойчивости к распространению ЯТЦ на основе технологии DUPIC, Украина — оценку вариантов конфигурации ЯЭС. По результатам всех этих работ были подготовлены отчеты, содержащие замечания и предложения по улучшению методологии.

Полученный опыт позволил создать комплект методик, инструментов и средств для оценки ЯЭС с применением методологии ИНПРО (NESA). На его основе были проведены детальные оценки национальных ЯЭС Беларуси, Индонезии, оценки безопасности и экономики быстрых натриевых реакторов Индии, Китая и России.

Одним из главных результатов применения методологии и соответствующих средств к выбранным для оценки ЯЭС стало определение приоритетных направлений НИОКР, позволяющее существенно улучшить характеристики этих ЯЭС по критериям устойчивого развития. В настоящее время методология ИНПРО является единственным согласованным на международном уровне руководством по оценке ядерно-энергетических систем по критериям устойчивого энергетического развития.

### **1.3 Создание аналитической основы для оценки сценариев развивающейся ЯЭС по критериям ИНПРО и разработка гетерогенной модели глобальной ЯЭС**

В 2004 году Россия инициировала совместное исследование ИНПРО по оценке ЯЭС, основанной на замкнутом ЯТЦ с быстрыми реакторами, к которому присоединились Канада, Китай, Индия, Республика Корея, Франция и Украина. На момент проведения оценки Китай, Индия, Республика Корея, Россия, Франция и Япония активно осуществляли свои национальные программы развития быстрых реакторов.

Используя методологию ИНПРО, участники проекта показали, что быстрые реакторы с натриевым теплоносителем могут стать важным этапом в развитии ЯЭС. Они прошли все стадии разработки, в достаточной степени освоены и в перспективе 15 – 30 лет способны комплексно удовлетворить всем сформулированным критериям ИНПРО. Основные различия между

национальными программами заключались в сроках реализации и в конкретных особенностях конструкции активной зоны быстрых реакторов и их параметров (коэффициент воспроизводства, тип топлива и пр.). Эти различия обусловлены позицией стран относительно роли ЯЭ в будущем и планируемыми темпами роста национальных ядерно-энергетических мощностей.

Общей актуальной задачей развития направления было признано завершение создания инфраструктуры замкнутого ЯТЦ на основе проверенных временем технологий и решение ряда вопросов, которые позволили бы в полной мере обеспечить выполнение всех требований методологии ИНПРО в области ядерной безопасности и экономики.

В области ядерной безопасности это относится в частности к обоснованию выполнения требования методологии ИНПРО об исключении переселения либо эвакуационных мероприятий вне пределов промышленной площадки. В области экономики — это достижение приемлемых для конкретных стран экономических показателей. В совместном исследовании было показано, что в результате инновационных решений в конструкции натриевых быстрых реакторов снижение металлоемкости и удельных капитальных затрат по сравнению с первыми проектами было весьма значительным. Рисунок 5 показывает достигнутый и ожидаемый прогресс в снижении металлоемкости и удельных капитальных затрат в российских реакторах БН.

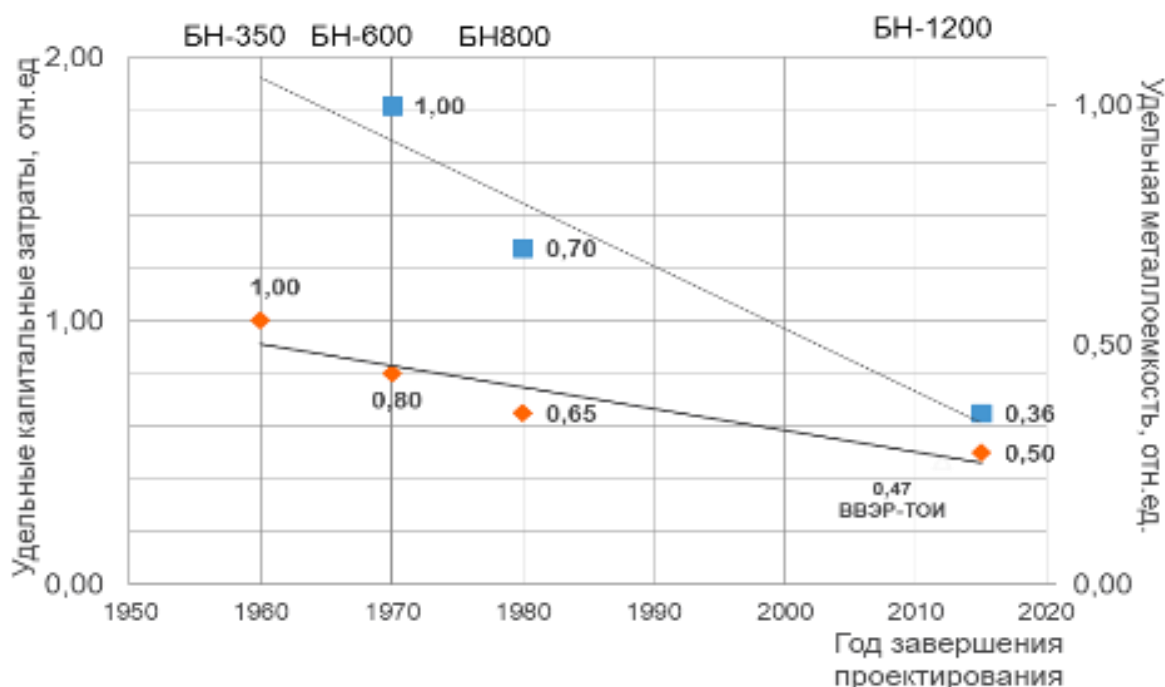


Рис. 5. Динамика снижения металлоемкости и удельных капитальных затрат в проектах российских быстрых реакторов

Рекомендации по улучшению показателей быстрых реакторов с натриевым теплоносителем для их приведения к требованиям методологии ИНПРО были интегрированы в программы НИОКР всех стран, разрабатывающих эти реакторы.

В выводах по итогам исследования было отмечено, что для более полной оценки быстрых реакторов необходимо расширение рамок исследования и определение места и роли этой составляющей в архитектуре ЯЭС, включающей тепловые и быстрые реакторы.

Совместное исследование показало эффективность организации работ в ИНПРО в виде проектов совместных исследований. В дальнейшем эта форма сотрудничества стала одной из основных в деятельности ИНПРО.

В проекте «Развитие атомной энергетики в 21 веке: глобальные сценарии и региональные тенденции — Global Vision» (2009—2010 гг.), в осуществление и результаты которого российские специалисты внесли основной вклад, рассмотрены проблемы развития мировой ЯЭ в части, касающейся формирования глобального ЯТЦ. Параметрические исследования развития мировой атомной энергетики показали, что с использованием прогнозируемых ресурсов урана и с учетом экспертных предположений в части развития технологий ядерных реакторов и ЯТЦ в 21 веке можно реализовать генерацию ядерной энергии в масштабах, обеспечивающих стабилизирующее

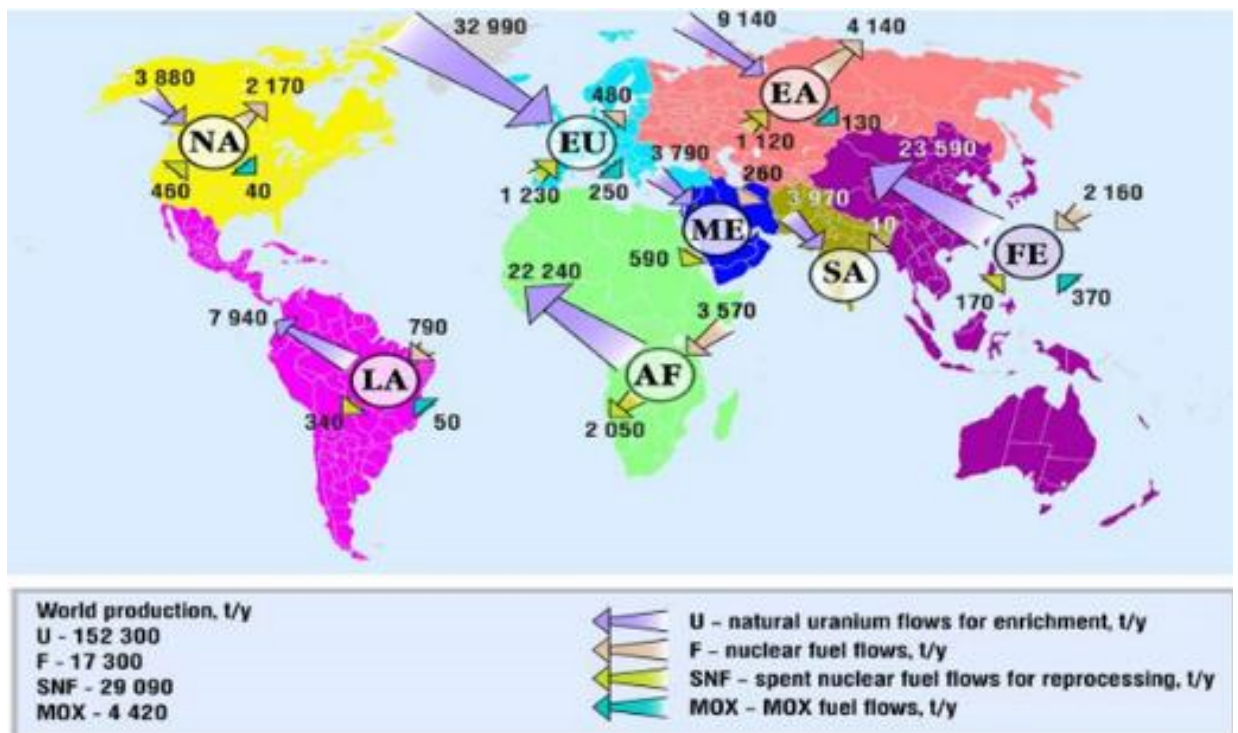


Рис. 6. Потoki урана, уранового и уран-плутониевого топлива и отработавшего топлива в сценарии масштабного развития мировой ядерной энергетики

воздействие атомной энергетики на энергообеспечение устойчивого развития мировой экономики. Рисунок 6 показывает схему межрегионального обмена природным ураном, ядерным топливом и предоставления услуг странами — обладателями технологии странам-пользователям, которая обеспечила в расчетном моделировании существенную долю атомной энергетики в энергообеспечение устойчивого развития мировой экономики.

В проекте «Глобальная архитектура инновационных ЯЭС с тепловыми и быстрыми реакторами и замкнутым ЯТЦ» (GAINS) (2008—2011), участие в котором приняло 16 стран, была создана методическая основа для построения и анализа сценариев развития ЯЭ и разработана гетерогенная модель глобальной ЯЭС.

Архитектура в этом проекте понималась как система с реакторами разных типов, установками ядерного топливного цикла и другими компонентами ЯЭС, взаимодействующими между собой и с объектами внешней инфраструктуры.

Методология ИНПРО, в значительной степени завершенная к этому времени, являлась важным методическим руководством в деятельности участников проекта GAINS. Однако она не в полной мере отвечала целям и задачам проекта GAINS. В то время как методология ИНПРО служит руководством для детальной оценки той или иной конкретной ЯЭС с фиксированными характеристиками, в проекте GAINS потребовалась разработка методов и инструментов для сравнения и оценки динамики развития структуры ЯЭС во времени. Созданный для решения данной задачи инструментарий включает:

- согласованные сюжеты развития глобальной ЯЭ и сценарии спроса на атомную энергию до 2100 г.;
- гетерогенную модель мировой ЯЭ, учитывающую особенности подходов в отношении конечного этапа ЯТЦ различных стран;
- разработку и адаптацию необходимых расчетных инструментов;
- подготовку баз данных существующих и будущих ядерных реакторов и ЯТЦ;
- анализ результатов моделирования сценариев, построенный на использовании ключевых индикаторов и оценочных параметров, отражающих значимые цели, которые должны быть достигнуты путем осуществляемых в системе инновационных технологических решений.

Существенным достижением проекта GAINS стала разработка гетерогенной модели мировой ядерной энергетики. Ранее многие исследования глобальных сценариев ЯЭ были основаны на так называемой однородной модели развития мировой ЯЭ, в которой предполагалось, что все страны мира или региона реализуют одну политику в отношении ядерных реакторов и

ЯТЦ, а также обладают одинаковыми технологическими возможностями. В отличие от этого, в проекте GAINS была предложена модель, включающая различные группы стран, не персонифицированных, но объединенных на основании стратегии развития своих ЯЭС. Были определены следующие три группы стран: страны первой группы (Г1) осуществляют переработку ОЯТ и придерживаются программ по развертыванию быстрых реакторов; в группе Г2 ОЯТ планируется удалять в геологические хранилища или отправлять на переработку в страны Г1; страны группы Г3 отправляют ОЯТ в группы Г1 или Г2. На английском языке эти группы были обозначены как NG1 (Non-geographic Group 1), NG2 NG3, соответственно.

На рисунке 7 представлены два варианта гетерогенной модели глобальной ЯЭС: модель без взаимодействия стран и модель, построенная на основе сотрудничества стран, использующих ядерную энергию.

Выполненные в проекте GAINS исследования показали, что глобальная архитектура ЯЭС, в которой страны-пользователи получают на основе международного сотрудничества услуги по инновационным ядерным технологиям, достигает того же уровня устойчивости, что и в странах — обладателях технологий. Этого вывод иллюстрировался в проекте примерами решения ряда задач, стоящих перед глобальной ядерной энергетикой, на основе сочетания (синергии) технических и институциональных решений, осуществляемых на основе взаимодополняющих интересов и возможностей разных стран в гетерогенной модели мира. В дальнейшем разработанный в проекте GAINS подход использовался и развивался в проектах ИНПРО SYNERGIES и ROADMAPS.

В проекте «Синергетические взаимодействия региональных групп стран с ЯЭ, оцененные с позиций устойчивости» (SYNERGIES) были продемонстрированы некоторые реализованные и исследуемые в современной ядерной энергетике варианты использования гетерогенной синергической модели.

В проекте представлены результаты 28 тематических исследований стран — участниц проекта и членов секции ИНПРО в двух крупных направлениях:

- по улучшению показателей устойчивости ЯЭС за счет сочетания реакторных технологий и топливных циклов разного типа (синергия технологий);
- по оценке эффективности синергетических сценариев сотрудничества между странами в развитии инфраструктуры ЯЭС и топливного цикла (синергия сотрудничества).

В проекте показаны ожидаемые выгоды и трудности реализации сочетания следующих реакторных технологий и соответствующих ЯТЦ:

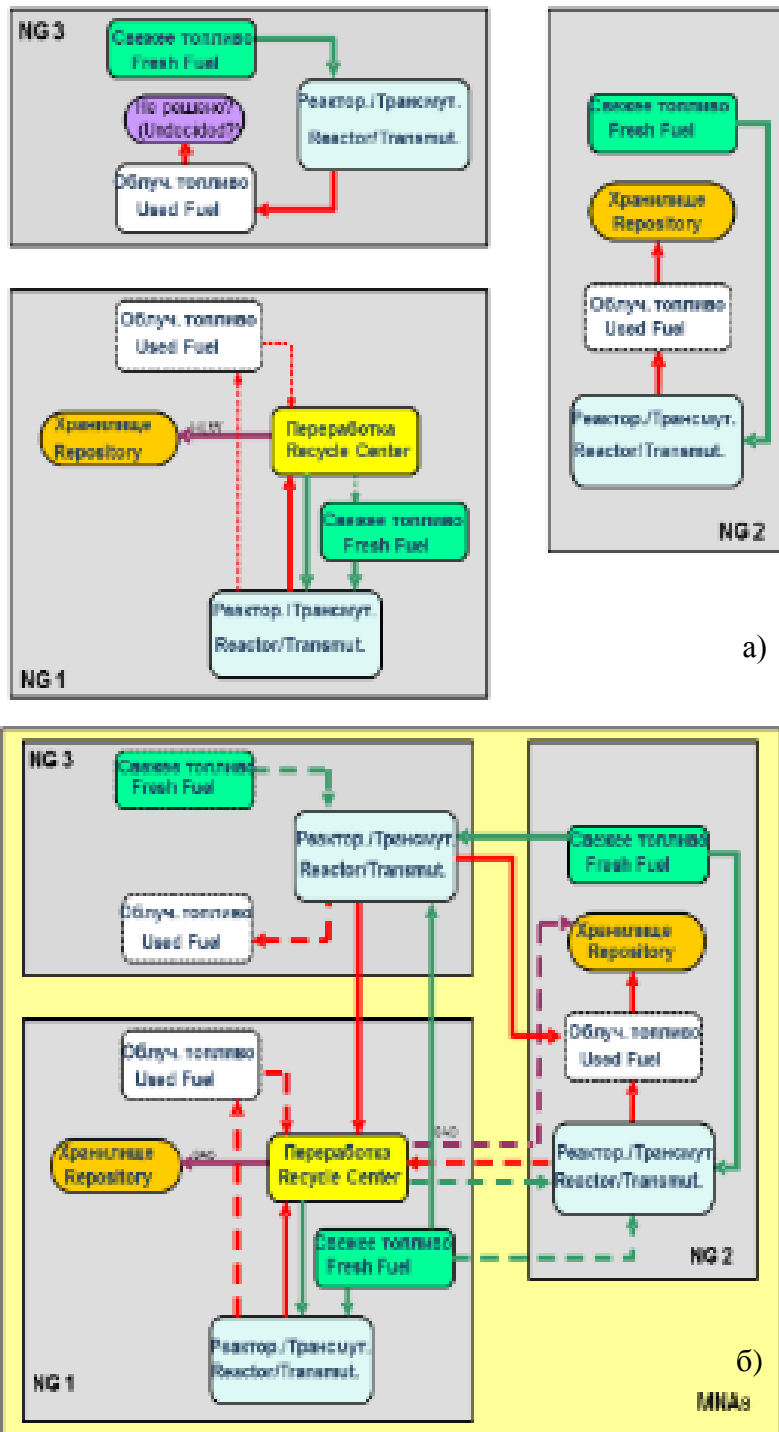


Рис. 7. Гетерогенные модели глобальной ЯЭ :

а) гетерогенные без взаимодействия; б) гетерогенная синергетическая

– связанных по топливу тепловых реакторов с переработкой отработанного уранового топлива и использованием выделенного плутония в виде МОКС топлива;

– взаимодействующих по топливу легководных реакторов и небольшого числа быстрых реакторов с мультирециклом плутония;

- тепловых и быстрых реакторов с использованием выделенного плутония тепловых реакторов в быстрых реакторах для наращивания темпов роста их мощностей;
- тепловых реакторов и реакторных систем других типов для трансмутации минорных актинидов из тепловых реакторов;
- реакторов различных типов с  $^{233}\text{U}$ -Th ЯТЦ и со смешанным U/Pu/Th ЯТЦ.

В отношении сотрудничества между странами в развитии инфраструктуры ЯЭС и топливного цикла в проекте продемонстрировано, что сотрудничество со страной-поставщиком, позволяющее минимизировать затраты на НИОКР и инфраструктуру ЯЭС, является ключевым условием коммерческого использования ядерной энергии в небольшой стране.

Группа стран — участниц проекта с развитой ядерной энергетикой на основе тепловых реакторов и открытого ЯТЦ показала, что наряду с выполнением национальных программ НИОКР международное сотрудничество играет значительную роль в ускорении реализации национальных стратегий развертывания ЯЭС и обеспечении участия в международных проектах НИОКР, направленных на решение долгосрочных задач ядерной энергетике.

Для стран — обладателей технологии основным стимулом для сотрудничества является расширение объема бизнеса за счет контрактов на строительство АЭС за рубежом и продаж услуг ЯТЦ. Однако эти страны также заинтересованы в том, чтобы глобальная ядерная энергетика развивалась как устойчивая технология, поскольку инциденты в области ядерной безопасности и экологии или нарушение режима нераспространения с неизбежностью скажутся на ядерно-энергетических программах всех стран.

#### **4 Комплексные услуги ИНПРО по предоставлению инструментов моделирования ЯЭС**

Разработанные и адаптированные в ИНПРО инструменты моделирования ЯЭС предоставляются государствам-членам как часть комплексных услуг МАГАТЭ. Совместные проекты GAINS и SYNERGIES разработали основу для анализа и сравнительной оценки сценариев развития ядерной энергии от существующего парка ядерных реакторов и топливных циклов до будущих архитектур ЯЭС с инновационными технологическими решениями.

Совместный проект ИНПРО KIND продолжил разработку и расширил область применения ключевых индикаторов проекта GAINS к сравнительной оценке вариантов ЯЭС. Актуальность и своевременность проекта KIND обусловлена тем, что в настоящее время осознано, что задача оценки устойчивости и эффективности ЯЭС является многокритериальной. При этом индикаторы, характеризующие безопасность, потребление ресурсов, экономику,



риски несанкционированного распространения и обращения с отходами, как правило, носят конфликтующий характер. Последнее означает, что улучшение значения одного индикатора приводит к ухудшению значений других индикаторов.

В рамках проекта разработаны инструментальные средства и даны предварительные рекомендации для применения методов поддержки принятия решений при многих критериях для сравнительной оценки ЯЭС, которые позволяют осуществить поиск согласованных технических, институциональных и структурных решений и тем самым определить компромиссные значения параметров системы, сбалансированных по различным выгодам и рискам.

По итогам проекта KIND было принято решение проверить методы и рекомендации, выработанные в этом проекте, и провести оценку нескольких ЯЭС, представляющих интерес для стран-новичков и стран-поставщиков, в ходе выполнения совместного проекта «Сравнительная оценка инновационных ядерно-энергетических систем» (CEINS).

## **5 Инновационные технологические решения и институциональные механизмы для повышения устойчивости национальных ЯЭС (задача 2 ИНПРО «Инновации»)**

В проектах ИНПРО «Анализ ядерного топлива и ядерного топливного цикла будущих ядерных энергетических систем» (FANES), «Отходы от инновационных типов реакторов и ядерных топливных циклов» (WIRAF) и RISK исследовались конкретные инновационные технологические решения, которые могли бы быть развернуты в 21 веке с целью повышения устойчивости национальных ЯЭС.

В проекте FANES (2014—2017) было подготовлено обзорное исследование предпосылок для создания инновационных технологий ЯТЦ, их преимуществ, статуса и НИР, необходимых для их коммерциализации; выполнен технико-экономический анализ усовершенствованных и инновационных видов топлива (МОКС, нитридное топливо) и топливных циклов для реакторов БН, БРЕСТ и их влияния на разработку будущих ЯЭС; проведено предварительное исследование топлива РЕМИКС и соответствующего топливного цикла и определены перспективы его использования в будущих ЯЭС. В рамках проекта были рассмотрены возможные направления международного сотрудничества в области ЯТЦ и подготовлены предложения по совершенствованию методологии ИНПРО в части, относящейся к ЯТЦ.

В проекте WIRAF, исследования по второму этапу которого продолжаются, дан обзор национальных стратегий обращения с радиоактивными отходами ряда стран, из которого следует, что все страны, использующие атом-

ную энергию, принимают международно признанные меры в отношении радиоактивных отходов для безопасного обращения с ними и для надежной изоляции от окружающей среды. Все страны, за исключением Франции, России и Японии рассматривают отработавшее ядерное топливо как отходы, которые подлежат изоляции без переработки в глубинных геологических формациях. Политика Франции, России и Японии заключается в переработке отработавшего ядерного топлива с дальнейшим использованием регенерированных продуктов в ядерном топливном цикле с изоляцией высокоактивных отходов в глубинных геологических формациях.

Проведенное качественное и количественное рассмотрение современной ЯЭ с целью сбора и анализа материалов по вопросам радиоактивных отходов на всех этапах открытого и замкнутого ЯТЦ, показало принципиальную возможность сокращения объемов захораниваемых РАО для двухкомпонентной системы ядерной энергетики на основе российских ядерных энерготехнологий тепловых и быстрых реакторов, работающих в едином замкнутом ЯТЦ, по сравнению с однокомпонентной системой на основе только тепловых реакторов и открытым ЯТЦ.

В проекте RISC (2014–2017) Канада, Индия, Корея и Россия продемонстрировали современные реакторные концепции и сделали детальные оценки по одному или более индикаторам в области безопасности с использованием методологии ИНПРО, а также разработали рекомендации по дальнейшему улучшению этих концепций по критериям безопасности. Российская сторона выполнила оценки по безопасности быстрого реактора со свинцово-висмутовым охлаждением СВБР–100.

Центральным вопросом в проекте RISC был анализ решений для достижения целей безопасности, понятных не только специалистам, но и общественности. Постановка целей безопасности в таком ключе и демонстрация прогресса в области безопасности АЭС являются существенным вкладом в доказательство устойчивости ЯЭС.

Основным результатом проекта RISC явилась демонстрация того, что технические и институциональные инновации в ядерных технологиях обеспечивают непрерывное развитие этих технологий до полного соответствия самым строгим требований безопасности, в том числе требованию по исключению передислокации или эвакуации населения за пределы площадок АЭС в случае тяжелой аварии.

Институциональные механизмы для повышения устойчивости национальных ЯЭС входят в круг вопросов, изучаемых в ИНПРО в рамках задачи 2 «Инновации». Одним из важных направлений деятельности в этой области является разработка предложенной Россией темы «Вопросы правового и институционального обеспечения системы атомной энергетики на основе

транспортабельных атомных энергетических установок»: проект TNPP–1 (2007–2013) и проект TNPP–2 (2014 – по настоящее время).

Объективные обстоятельства свидетельствуют о возрастающей актуальности развития атомных станций малой мощности (АСММ). К настоящему времени заявлено более 50 проектов атомных энергетических установок малых и средних мощностей. Ведущие мировые и национальные компании предлагают проекты АСММ. Реализованный проект транспортабельных ядерных установок малой мощности (70 МВт(эл.)) представляет первый в мире плавучий атомный энергоблок «Академик Ломоносов», строительство которого завершено в России (рис. 4).

Исследования вопросов правового и институционального обеспечения транспортабельной АЭ осуществляется в три этапа:

- на первом этапе (проект TNPP–1) осуществлялась экспертиза соответствия ядерному праву жизненного цикла (ЖЦ) транспортабельной атомной энергетики;

- на втором этапе определились актуальные вопросы развития транспортабельной атомной энергетики и правового обеспечения ее ЖЦ;

- на третьем этапе (проект TNPP–2) осуществляется проработка актуальных вопросов правового обеспечения транспортабельной атомной энергетики с ЖЦ «без перегрузки на площадке»: гражданская ответственность за ядерный ущерб, перемещение транспортабельных атомных модулей, без-



Рис. 8. Плавучий атомный энергоблок «Академик Ломоносов»

опасность, нераспространение, физическая защита, лицензирование, подготовка кадров.

Специфические вопросы, касающиеся правовых положений конкретной страны (например, выбор площадки), не рассматриваются.

В проекте показано, что АЭ малых мощностей отличается многообразной спецификой, изначально имеет транспортабельное происхождение, не связанное с традициями большой АЭ, и требует дополнительного изучения с целью достижения максимальной эффективности, приемлемости и безопасности. Ход и полученные результаты работы показали интерес ряда стран к дальнейшим исследованиям в области реакторов малой и средней мощности, включая определение места и облика этой составляющей в общей структуре ЯЭС, оценки их показателей по критериям устойчивости, разработки аспектов правового, институционального и инфраструктурного обеспечения их жизненного цикла.

Действующий проект «Совместные подходы к заключительной части ядерного топливного цикла: драйверы развития, правовые, институциональные и финансовые препятствия» сфокусирован на оценке роли международного сотрудничества в области ЯТЦ, особенно на вопросах, касающихся его заключительной стадии (back end). В проекте рассмотрен ряд конкретных технических и институциональных инноваций в заключительной стадии ЯТЦ, которые обладают потенциалом для того, чтобы внести значительный вклад в рост ядерной энергетики и, возможно, способствовать ее общественной приемлемости.

Наиболее сложным вопросом является создание в стране собственной полной инфраструктуры заключительной стадии ЯТЦ. Решение этого вопроса может быть слишком обременительно для страны. Более приемлемым может стать использование рынка услуг в заключительной части ЯТЦ в рамках международной кооперации. Рынок услуг в заключительной части ЯТЦ в настоящее время ограничен, и одной из главных задач проекта ИНПРО является анализ возможных путей развития этого рынка с учетом нынешнего состояния, перспективного развития технологий по обращению с ОЯТ и международной кооперации в данной области.

Анализ движущих сил и исследование препятствий, определение ключевых задач и планирование возможных путей их решения — все эти и другие результаты, полученные в ходе выполнения проекта его участниками показали, что сотрудничество в заключительной стадии ЯТЦ приобретают все большее значение в процессе жизненного цикла установок ядерной энергетики и является одним из главных резервов долгосрочного устойчивого развития ЯЭ.

## **6 Первый этап создания Дорожной карты МАГАТЭ**

В совместном проекте ROADMAPS ИНПРО были разработаны и прошли пробное испытание структурированный подход и формат к достижению глобальной устойчивой ядерной энергетики — Дорожная карта МАГАТЭ. Направленность проекта ИНПРО и его организационная структура оказались востребованными для выполнения этой ответственной и сложной задачи. Основной вклад в разработку принципиальных подходов и электронных инструментов для документирования действий, объема работ и сроков реализации конкретных программ по улучшению показателей устойчивого развития национальных ЯЭС внесли российские участники.

В ходе выполнения первого этапа задачи создания Дорожной карты МАГАТЭ были разработаны общий подход к построению дорожной карты, формат (шаблон) для заполнения данными, электронные средства обработки и визуализации результатов, а также приведены примеры применения этих инструментов к национальным стратегиям развития ЯЭС. Консолидация различных аспектов построения стратегии развития глобальной ЯЭС в виде дорожной карты делает картину развития более понятной для политиков и лиц, принимающих решения.

В структуру дорожной карты включены следующие составляющие: общая информация о стране, национальные планы и перспективы развития атомной энергетики, показатели состояния и перспектив развития ядерной энергетики, ключевые задачи и разработки, реакторный парк и ядерный топливный цикл. В Армении, Беларуси, России, Румынии, Таиланде и Украине были проведены тематические исследования по разработке национальных дорожных карт с единых разработанных в проекте позиций.

Результаты выполнения проекта ROADMAPS дают убедительный ответ на вопрос: «Почему полезно разработать дорожную карту?».

Разработанный в ROADMAPS формат отразил существенные общие черты развития ядерной энергетики в странах-пользователях и некоторое различие в подходах к реализации стратегии построения национальных ЯЭС. Общими чертами являются:

- нехватка внутренних энергоресурсов, которая диктует необходимость поиска путей обеспечения бесперебойной и надежной поставки электроэнергии потребителям;

- в качестве перспективного источника производства электроэнергии рассматривается ядерная энергетика, которая может устойчивым образом покрывать растущие будущие потребности в электроэнергии и обеспечивать необходимый уровень энергетической безопасности и независимости;

- развитие ядерного варианта в значительной степени ориентировано на возможности зарубежных поставщиков;
- в среднесрочной перспективе предусматривается сухое хранение ОЯТ и реализация открытого ЯТЦ;
- использование инструментов анализа и мониторинга ключевых показателей, разработанных в ROADMAPS, дает ценную информацию для выбора предпочтительного варианта развития ЯЭС.

Проект также показал, что разработанная Дорожная карта МАГАТЭ может способствовать реализации интеграционного подхода двух и более стран к достижению совместной устойчивой системы ядерной энергетики стран — обладателей технологии и стран-пользователей.

Рисунок 9 показывает схему возможного взаимодействия стран — обладателей технологии и стран-пользователей в двухкомпонентной системе, в которую входят тепловые и быстрые реакторы, работающие в замкнутом ЯТЦ.

Быстрые реакторы, по крайней мере на первой фазе создания такой системы, могут находиться в стране — поставщике услуг (или в международном топливном центре), реакторы на тепловых нейтронах могут быть расположены на территории обоих государств-партнеров. Такая система, построенная на синергизме технологий и объективной дополнительной заинтересованности и возможностей, обеспечит существенное повышение показателей устойчивого развития стран-партнеров.

В области безопасности поставка освоенной реакторной технологии, помощь в создании современных национальных требований по ядерной без-

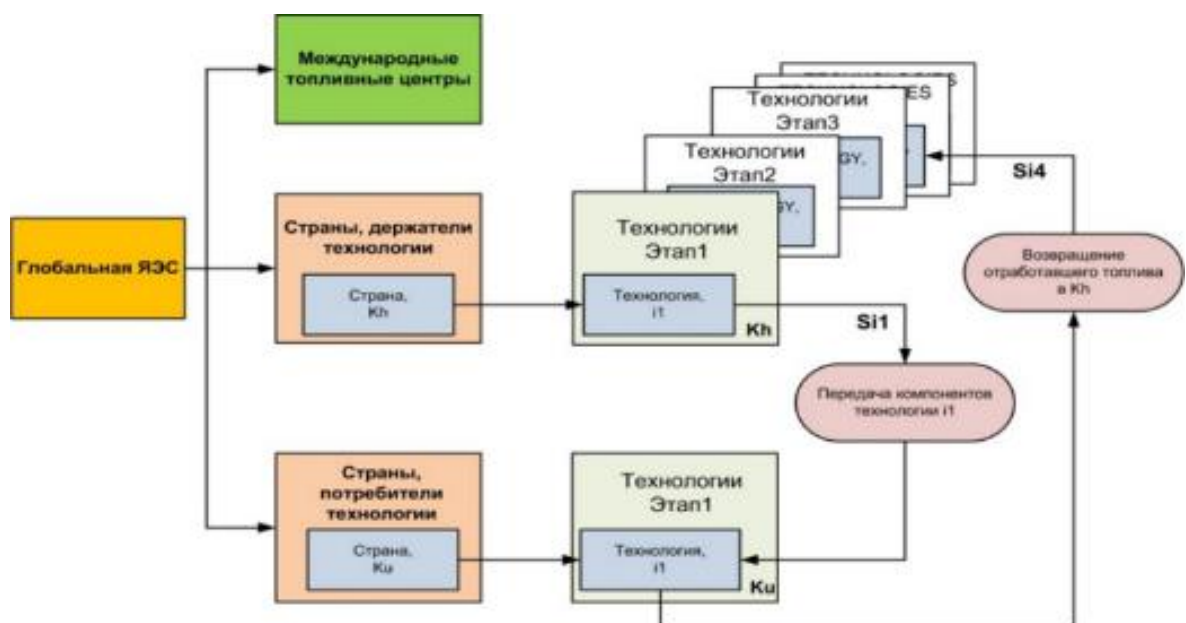


Рис. 9. Схема сотрудничества стран — обладателей технологии и стран-пользователей в двухкомпонентной системе

опасности и в подготовке кадров страной-поставщиком позволяют обеспечить в стране-получателе те же стандарты при эксплуатации блоков АЭС, что и в стране-поставщике. В области экономики страна-получатель комплексных услуг минимизирует расходы на создание всего комплекса физической инфраструктуры ЯЭС, что кардинально снижает ее расходы на ядерно-энергетическую программу. Кроме того, расширение масштаба производства, необходимого для обеспечения потребностей объединенной ЯЭС стран-партнеров, позволяет организовать работу промышленных предприятий поставщика в оптимальном режиме, что должно привести к снижению капитальных затрат на поставляемый реакторный блок и на стоимость топлива.

За счет замещения в системе делящегося урана плутонием происходит значительное снижение потребления природного урана, и переход на использование дорогостоящих категорий природного урана при исчерпании его дешевых запасов для страны-получателя может быть отложен на десятки лет. В области обращения с ОЯТ модель полного и окончательного возврата ОЯТ поставщику свежего ядерного топлива открывает для страны-получателя услуг перспективу кардинального решения проблемы, являющейся одной из наиболее чувствительных и острых тем общественных дискуссий. Исключение хранения ОЯТ и плутония в нем в значительной степени способствует и решению проблемы нераспространения.

Россия продемонстрировала принципиальную возможность реализации подобной схемы. Для решения задачи увеличения доли ядерной энергетики в мировом энергопроизводстве при выполнении требований устойчивого развития разработка согласованных дорожных карт и движение в направлении усиления международного сотрудничества является объективной необходимостью.

## **7 Диалог–форум ИНПРО и распространение результатов проекта**

Уникальным направлением деятельности ИНПРО является Программная область 4 (задача 4): диалог государств-членов и распространение результатов проекта. На площадке МАГАТЭ регулярно, как правило два раза в год, собирается авторитетный форум представителей государств-членов для обсуждения тем, имеющих отношение к устойчивому развитию ядерной энергетики и одобренных Руководящим комитетом ИНПРО. На диалог-форуме ИНПРО происходит постоянный обмен идеями и информацией о долгосрочных стратегиях и сценариях развития ядерно-энергетических систем и связанных с ними техническими и институциональными инновациями, обеспечивается диалог пользователей ядерных технологий и обладателей технологии и координация с другими международными организациями и инициа-

тивами. В результате диалога обладатели технологий могут лучше понять потребности и проблемы пользователей технологий, а пользователи могут лучше понять возможности и ограничения технологий и услуг, предоставляемых обладателями технологий. В дополнение к обсуждению вопросов, связанных с задачами обеспечения устойчивого развития глобальной ядерной энергетики, диалог-форум дает также возможность собравшимся представителям государств-членов и других международных организаций и инициатив лучше понять в рамках неформального общения перспективы координации реализуемых стратегий и программ.

К настоящему времени проведено восемнадцать диалог-форумов, посвященных наиболее актуальным темам развития ядерной энергетики. Организация и эффективная работа диалог-форумов ИНПРО, результаты которых вызывают большой интерес государств — членов МАГАТЭ и активно используются ими, является одним из существенных достижений проекта.

Основной вывод, который следует из анализа результатов проекта ИНПРО, его роли в международной деятельности и основных достижениях заключается в том, что всестороннее рассмотрение задач перехода к устойчивым ЯЭС на национальном, региональном и глобальном уровнях становится неотъемлемой частью работы, поддерживающей процесс принятия решений в государствах — членах МАГАТЭ. Проект МАГАТЭ ИНПРО в настоящее время является единственным международным проектом в области ядерной энергетики, который осуществляет функции разработки согласованной глобальной стратегии устойчивого развития отрасли как важной составляющей мировой энергетики.

Несмотря на многоплановость направлений деятельности, все мероприятия ИНПРО нацелены на развитие целостного методологического подхода и единого структурированного инструментария, необходимых для решения разнообразных задач, возникающих в связи с вопросами устойчивости ЯЭС. Развитие подобного инструментария требует совершенствования концепции «устойчивости» ЯЭС, методов оценки и сравнительного анализа альтернатив, расчетных средств динамического моделирования эволюции ЯЭС, методик анализа технологических и институциональных инноваций и организации диалога между разработчиками и пользователями технологий в вопросах долгосрочной устойчивости ЯЭС.