

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

ФЭИ–0310

В. И. Усанов, В. В. Коробейников, В. М. Декусар, А. Е. Егоров,
А. Л. Мосеев, О. С. Гурская, Л. П. Пупко

**ЦЕЛИ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТОВ ИНПРО
С УЧАСТИЕМ РОССИЙСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

Обнинск – 2019

В. И. Усанов, В. В. Коробейников, В. М. Декусар, А. Е. Егоров,
А. Л. Мосеев, О. С. Гурская, Л. П. Пупко

Цели и основные результаты проектов ИНПРО с участием российских организаций : Обзор ФЭИ-0310. — Обнинск, АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», 2019. — 43 с.

В работе представлен обзорный материал о целях и результатах конкретных проектов, осуществленных в рамках международного проекта ИНПРО с участием российских организаций с 2001 г., когда началась деятельность по проекту. За прошедшие два десятилетия своего развития проект ИНПРО доказал, что он является успешным международным проектом с широкой поддержкой стран — членов МАГАТЭ, отраженной в резолюциях Генеральных конференций этой организации. С российской стороны основной вклад в проект вносят специалисты, номинированные Госкорпорацией «Росатом». В настоящем обзоре дана информация о проектах ИНПРО, выполненных с участием российских организаций и, как правило, инициированных российской стороной.

The paper provides overview of specific projects carried out in the framework of the INPRO international project with the participation of Russian organizations since 2001, when activities on the project began. Over the past two decades of its development, the INPRO project has proved that it is a successful international project with wide support from the IAEA member states, which was reflected in the resolutions of the General Conferences of this organization. The main contribution to the project from the Russian side is made by specialists nominated by the State Atomic Energy Corporation Rosatom. The materials provide information on INPRO projects carried out with the participation of Russian organizations and, as a rule, initiated by the Russian side.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Цели и результаты проектов по задаче 1 «Глобальные сценарии»	6
1.1 Совместная оценка ЯЭС с реакторами на быстрых нейтронах и замкнутым ЯТЦ в проекте JointStudy	7
1.2 Развитие атомной энергетики в 21 веке: глобальные сценарии и региональные тенденции	9
1.3 Проект «Роль тория в ЯТЦ будущих ЯЭС».....	11
1.4 Глобальная архитектура инновационных ЯЭС с тепловыми и быстрыми реакторами и замкнутым ядерным топливным циклом	12
1.5 Синергетические взаимодействия региональных групп стран с ядерной энергетикой, оцененные с позиций устойчивости.....	19
1.6 Ключевые индикаторы для оценки инновационных ЯЭС (проект KIND)...	23
1.7 Проект «Дорожные карты для перехода к глобально устойчивым ЯЭС» (ROADMAPS)	25
2 Цели и результаты проектов по задаче 2 «Инновации» секции ИНПРО	29
2.1 Проект по изучению правовых и институциональных вопросов относительно транспортабельных ядерных энергетических установок (ТЯЭУ)	30
2.2 Обзор инновационных реакторных концепций по предотвращению тяжелых аварий и минимизации их последствий (проект RISC).....	33
2.3 Анализ ядерного топлива и ядерного топливного цикла будущих ядерных энергетических систем (FANES).....	36
2.4 Отходы от инновационных типов реакторов и ядерных топливных циклов (проект WIRAF).....	37
2.5 Исследование развертывания малых модульных реакторов с заводской загрузкой ядерного топлива (проект TNPP2)	37
2.6 Совместные подходы к заключительной части ядерного топливного цикла: драйверы развития, правовые, институциональные и финансовые препятствия	38
3 Итоги и основные результаты выполнения проектов, осуществленных в рамках ИНПРО с участием российских организаций	40
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	42

ВВЕДЕНИЕ

Международный проект по Инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО)[1] был инициирован на Генеральной конференции Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) в 2000 г. с целью аналитической и организационной поддержки разработки долгосрочных стратегий развития ядерной энергетики (ЯЭ) в странах — членах МАГАТЭ на основе концепции устойчивого развития.

Концепция ИНПРО об устойчивости ядерно-энергетических систем базируется на концепции устойчивого развития Организации Объединенных Наций (Комиссии Брундтланд, 1987): «развитие, которое удовлетворяет потребности нынешнего поколения без ущерба для возможности будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности» [1]. Одной из составляющих устойчивого развития является необходимость устойчивого энергоснабжения. Оно достигается с помощью планирования энергетической системы, учитывающей все доступные варианты энергоснабжения для удовлетворения будущего спроса на энергию, и определения роли ядерной энергетики в устойчивой системе энергообеспечения. В ИНПРО была разработана методология детальной оценки устойчивости ядерно-энергетических систем (ЯЭС), которая позволяет судить об устойчивости ЯЭС и определить недостатки в существующих или планируемых ЯЭС. Удовлетворение допустимых пределов по всем критериям во всех областях оценки означает, что оцениваемая ЯЭС соответствует требованиям устойчивого развития. В этом контексте в дальнейшем используется термин «устойчивая ЯЭС».

За 15 лет своего развития проект ИНПРО доказал, что он является успешным международным проектом с постоянно растущим числом участников, общее число которых достигло в настоящий момент 42 (страны-члены и международные организации) и продолжает расти, что обеспечило широкую поддержку проекта, отраженную в резолюциях Генеральных конференций МАГАТЭ и других международных встреч на высшем уровне. С января 2014 г. организация деятельности по проекту ИНПРО осуществляется секцией ИНПРО Департамента ядерной энергии МАГАТЭ. Аналитические и консалтинговые услуги секции ИНПРО являются составной частью интегрированного пакета услуг МАГАТЭ, предоставляемых странам-членам с учетом уровня их технологического развития и планов по развитию национальных ЯЭС.

Секция ИНПРО взаимодействует со странами-участницами в рамках совместных проектов, направленных на изучение разнообразных вопросов, связанных с вопросами инновационного развития ЯЭС на принципах ус-

тойчивого развития. Результаты выполненных проектов демонстрируют, что ядерные технологии способны обеспечить существенный вклад в удовлетворение растущих энергетических потребностей 21 века, а технологические и институциональные инновации содействуют улучшению национальных и глобальной ЯЭС в контексте целевых установок концепции устойчивого развития.

В проекте ИНПРО с российской стороны участвуют номинированные Госкорпорацией «Росатом» специалисты. Основной вклад вносят сотрудники АО «ГНЦ РФ — ФЭИ» и НИЦ «Курчатовский институт». В приведенных материалах дана информация о проектах ИНПРО, выполненных с участием российских организаций и, как правило, инициированных российской стороной. Материалы по проектам ИНПРО, инициированные другими странами — участницами ИНПРО, в которых Россия не участвовала или участвовала на уровне отдельных российских экспертов, в данный обзор не вошли.

В рамках действующей организационной структуры управления проектом ИНПРО деятельность по проекту осуществляется по четырем программным областям (задачам). В задаче 1 «Глобальные сценарии» секции ИНПРО разрабатываются глобальные и региональные сценарии развития ядерной энергетики с использованием разработанных инструментов научно-технического анализа, способствующие формированию глобального видения устойчивого развития ядерной энергетики в текущем столетии и за его пределами. В задаче 2 «Инновации» рассматриваются инновационные технологии ядерной энергетики и институциональные механизмы, которые поддерживают развитие устойчивой ядерной энергетики в государствах-членах МАГАТЭ. Целью задачи 3 «Оценка устойчивости и стратегии» является методическая помощь государствам-членам в разработке устойчивых долгосрочных национальных стратегий в области ядерной энергетики и принятии решений о развертывании ЯЭС посредством применения методологии ИНПРО. Деятельность по задаче 4 «Диалог и распространение результатов проекта» состоит в организации и проведении под эгидой МАГАТЭ представительного форума заинтересованных сторон для оказания поддержки в координации технической политики, в объединении обладателей технологий и пользователей, в обмене идеями и информацией о долгосрочных стратегиях развития ядерной энергетики.

Конкретные проекты осуществляются в ходе выполнения задач «Глобальные сценарии» и «Инновации». Ниже приводится обзор основных результатов, полученных при выполнении совместных проектов с участием российских организаций по этим задачам.

1 Цели и результаты проектов по задаче 1 «Глобальные сценарии»

Сценарные исследования помогают определить и смоделировать различные варианты перехода от нынешнего реакторного парка и используемых в настоящее время ядерных топливных циклов (ЯТЦ), которые по некоторым позициям подвергаются критике, к будущим ЯЭС, в полной мере отвечающим требованиям устойчивого развития. В рамках данной задачи исследуется роль сотрудничества между странами на пути к устойчивым ЯЭС, ведется поиск и определяются взаимовыгодные стратегии сотрудничества поставщиков и пользователей технологий ЯЭ.

Концептуальной и инструментальной основой всех исследований секции ИНПРО являются методики оценки соответствия характеристик ЯЭС требованиям устойчивого развития и сценарный анализ эволюции ЯЭС [2], основанные на методологии ИНПРО [3] и помогающие выявить пробелы в существующих и планируемых ЯЭС, а также продемонстрировать, какие из технологических или институциональных инноваций необходимы для улучшения характеристик ЯЭС по критериям устойчивого развития.

В таблице 1 приводится обзор завершенных и ведущихся проектов сотрудничества в рамках задачи 1 «Глобальные сценарии» секции ИНПРО.

Таблица 1. Завершенные и ведущиеся в рамках задачи 1 секции ИНПРО проекты сотрудничества

Проекты	Сроки
Совместная оценка ЯЭС с реакторами на быстрых нейтронах и замкнутым ЯТЦ (Joint Study) [4]	2005—2007
Развитие атомной энергетики в 21 веке: глобальные сценарии и региональные тенденции [4]–[5]	2009—2010.
Роль тория в ЯТЦ будущих ЯЭС (ThFC) [4]–[6]	2007—2010
Глобальная архитектура инновационных ЯЭС с тепловыми и быстрыми реакторами и замкнутым ядерным топливным циклом (GAINS) [4]–[7]	2008—2011
Синергетические взаимодействия региональных групп стран с ядерной энергетикой, оцененные с позиций устойчивости (SYNERGIES) [4]–[8]	2012—2017
Ключевые индикаторы для оценки инновационных ЯЭС (KIND) [4]–[9]	2014—2018
Сравнительная оценка инновационных ядерных энергетических систем (CEINS)	с 2017 г. по настоящее время
Дорожные карты для перехода к глобальным устойчивым ЯЭС (ROADMAPS)	2013—2018

Заключительные отчеты по проектам совместной оценки ЯЭС с реакторами на быстрых нейтронах и замкнутым ЯТЦ, развития атомной энергетики в 21 веке, роли тория в ЯТЦ будущих ЯЭС, глобальной архитектуре инновационных ЯЭС и синергетическому взаимодействию региональных групп были изданы в виде публикаций МАГАТЭ. Заключительные отчеты по проектам «Дорожная карта для перехода к глобальным устойчивым ЯЭС — ROADMAPS» и «Ключевые индикаторы для оценки инновационных ЯЭС — KIND» находятся в завершающей стадии публикации. Работы по проекту «Сравнительная оценка инновационных ЯЭС — CEINS» в настоящее время продолжаются.

1.1 Совместная оценка ЯЭС с реакторами на быстрых нейтронах и замкнутым ЯТЦ в проекте Joint Study

В совместном исследовании (Joint Study)[10] по критериям устойчивого развития оценивалась ЯЭС, основанная на замкнутом ЯТЦ с реакторами на быстрых нейтронах. Основными задачами исследования были определение основных этапов для развертывания ЯЭС на базе быстрых реакторов и замкнутого ЯТЦ и рассмотрение возможных направлений совместных исследований, разработок, программ НИР и НИОКР. В исследовании анализировались национальные программы развития ЯЭ Китая, Франции, Индии, Японии, Республики Кореи и Российской Федерации с акцентом на анализ особенностей разрабатываемых концепций быстрых реакторов и систем замкнутого ЯТЦ. Национальные сценарии были сопоставлены по трем аспектам: роль и масштабы развития ЯЭ, типы проектируемых технологий, доступные ресурсы.

Все страны, участвовавшие в исследовании и являющиеся одновременно разработчиками быстрых технологий, предпочли поэтапный способ внедрения быстрых реакторов в национальную ЯЭС: начиная с сооружения малого экспериментального реактора (<50 МВт, цель — проверка годности концепции), опытно-промышленного образца (~100 МВт, цель — удостовериться в том, что все технические вопросы решены), первого прототипа коммерческого реактора (~1000 МВт, цель — доказать конкурентоспособность) и, наконец, развертывание серии коммерческих реакторов на временном интервале от 2020 до 2050 г. Аналогичный поэтапный подход был рекомендован для развертывания технологий замкнутого ЯТЦ. Участники проекта заключили, что первыми коммерческими реакторами на быстрых нейтронах, скорее всего, будут натриевые реакторы, использующие оксидное топливо, а полномасштабному ритмичному развертыванию ЯЭС с реакторами на быстрых нейтронах в замкнутом ЯТЦ будет предшествовать определённый переходный этап.

Как показано на рисунке 1, основные различия между национальными программами заключались в сроках реализации и в конкретных особенностях конструкции активной зоны быстрого реактора 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. В исследовании было показано, что реакторы на быстрых нейтронах с системой замкнутого ЯТЦ могут быть эффективно развернуты в рамках регионального или международного сотрудничества, что позволит в большей мере реализовать потенциал таких систем. Важным выводом совместного исследования явилось также заключение о том, что комплексная сбалансированная программа НИОКР является абсолютно необходимой в различных предметных областях, особенно для экономики и безопасности. Модификации дизайна, такие как упрощение конструкции, повышение выгорания топлива, строительство малых серий реакторов, способствуют повышению конкурентоспособности ЯЭС на базе быстрых реакторов. Отмечена целесообразность разработки концептуальных проектов быстрых реакторов, альтернативных натриевым. Однако оценка этих технологий с той же степенью достоверности возможна лишь после подтверждения их технической осуществимости, надежности и экономичности.



Рис.1. Общие черты и различия национальных ядерно-энергетических программ[10]

Соответствующие рекомендации были интегрированы в программы НИОКР всех участников исследования. Эти улучшения могут сделать затраты на электроэнергию, производимую системой быстрых реакторов, сопоставимой с затратами на производство электроэнергии тепловыми реакторами и электростанциями на ископаемом топливе. В рамках реализации проекта была в полной мере осознана и отдельно подчеркнута важность междисциплинарного подхода и роли международного сотрудничества в содействии тому, чтобы национальные ЯЭС на основе быстрых реакторов замкнутого ЯТЦ стали жизнеспособной альтернативой традиционным источникам энергии.

Участники проекта отметили, что для более полной оценки ЯЭС, основанной на замкнутом ЯТЦ с быстрыми реакторами, необходимо расширение рамок исследования и определение места и роли быстрых реакторов в архитектуре национальных и глобальной ЯЭС не только с быстрыми, но и с тепловыми реакторами, составляющими основу современной ядерной энергетики.

Совместное исследование ИНПРО по оценке ЯЭС с быстрыми реакторами, показало эффективность организации работ по задачам, представляющим интерес для многих участников ИНПРО, в виде проектов совместных исследований. В дальнейшем эта форма сотрудничества, направленная на идентификацию потребностей стран в научных и исследовательских разработках, необходимых для создания и развертывания инновационных реакторов и ЯТЦ, а также на анализ и оценку стратегий развития национальных и глобальной ЯЭС, стала одной из главных в деятельности ИНПРО.

1.2 Развитие атомной энергетики в 21 веке: глобальные сценарии и региональные тенденции

В исследовании глобальных сценариев и региональных тенденций развития ЯЭ в 21 веке[11] была предпринята попытка оценить максимально возможный вклад инновационных ЯЭС на базе быстрых реакторов и замкнутых ЯТЦ в решение проблемы глобального энергопотребления.

Рассматривались три сценария роста производственных мощностей с различными целями в отношении установленной мощности к концу столетия: низкий (LOW) — 2500 ГВт (эл.), средний (MODERATE) — 5000 ГВт (эл.) и высокий (HIGH) — 10 000 ГВт (эл.). Все три глобальных сценария, оцененные в исследовании, основывались на предположении, что количество природного урана, который будет потреблен к концу столетия, не должно превысить 20 млн тонн. На рисунке 2 показана ожидаемая авторами исследования корреляция между ростом мощностей и структурой мировой ЯЭС. С ростом мощностей (ось ординат) можно прогнозировать инноваци-

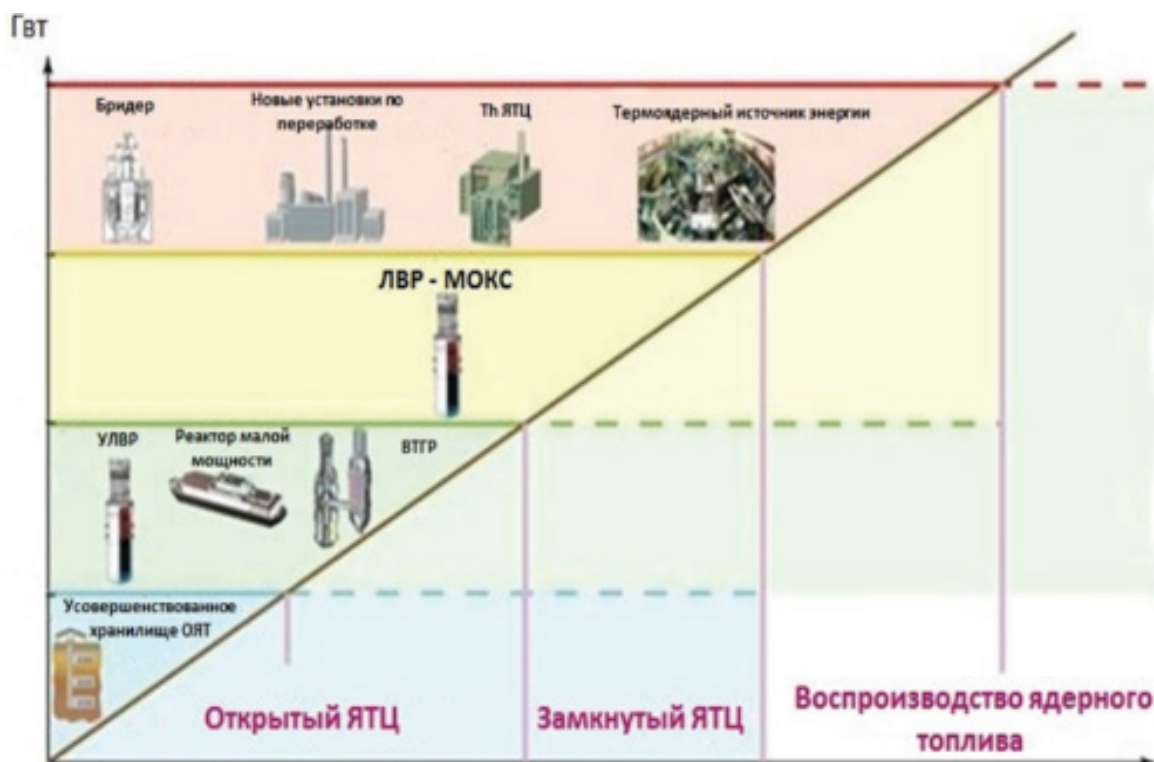


Рис. 2. Структура мировой ЯЭС для сценариев, определенных в [11]

онное развитие в реакторных технологиях и в ядерном топливном цикле (ось абсцисс).

В исследовании рассматривались возможные пути развития глобальной ЯЭС: различные сочетания тепловых и быстрых реакторов, включая эволюционные тепловые реакторы; тепловые реакторы с высоким коэффициентом воспроизводства, например реакторы, работающие в ^{233}U -Th ЯТЦ; различные тепловые и быстрые реакторы малой и средней мощности, высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы; быстрые реакторы с различными коэффициентами воспроизводства, использующие U или Th как топливное сырье, а ^{235}U или Pu, или ^{233}U — как делящийся материал.

Исследование привело к следующим основным выводам:

- с учетом всех известных концепций быстрых реакторов, включая самые передовые с высокими коэффициентами воспроизводства, глобальный потенциал ЯЭ к концу столетия будет ограничен примерно 12 000 ГВт (эл.), согласно предположениям относительно урановых ресурсов, сделанным в данном исследовании;

- быстрые реакторы с натриевым теплоносителем могут значительно способствовать сохранению глобальных урановых ресурсов;

- некоторые инновационные технологические альтернативы, такие как термоядерные нейтронные источники, если бы они стали применяться на промышленном уровне в нынешнем веке, могли бы эффективно помочь

решению проблем, связанных с ресурсами и высокоактивными отходами, а также повысить потенциал ЯЭ;

– совместные международные центры ЯТЦ способны эффективно обслуживать разные регионы и разные страны в отдельном регионе. Такие центры ЯТЦ могут предоставлять целый комплекс услуг, включая обогащение урана и переработку отработанного топлива, а также обеспечение топливом тепловых и быстрых реакторов. Отходы, полученные в результате переработки, могут утилизироваться на региональных установках по обращению с радиоактивными отходами или возвращаться в регион или страну происхождения, как это делается в настоящее время.

1.3 Проект «Роль тория в ЯТЦ будущих ЯЭС»

В проекте «Роль тория в ЯТЦ будущих ЯЭС» [12], [4]–[6] исследовалось потенциальное значение тория для дополнения уран–плутониевого ЯТЦ в рамках нескольких сценариев, предполагавших значительное увеличение использования атомной энергии в мире. ЯТЦ на основе тория (^{232}Th) делает возможным использование обширных запасов этого ядерного материала, чтобы обеспечить в перспективе крупномасштабное внедрение ЯЭС и способствовать устойчивому развитию ЯЭ. Более подробно в исследовании рассматривались следующие вопросы:

- потенциал для снижения потребностей в обогащении ^{235}U и в природном уране в случае использования тория;
- потенциал для сокращения запасов долгоживущих радиоактивных отходов путем снижения производства плутония и младших актинидов;
- возможные преимущества от увеличения мировых ресурсов делящихся материалов путем воспроизводства ^{233}U из тория;
- оценка мощностей производства и переработки для промышленного использования топлива в ЯТЦ на основе тория.

В общей сложности было рассмотрено восемь ЯЭС, состоящих из различных сочетаний 10 типов тепловых реакторов в открытых и замкнутых ЯТЦ. Помимо этого, было исследовано семь вариантов ЯТЦ с сочетаниями 12 типов тепловых и быстрых реакторов с замкнутыми ЯТЦ. Исследование показало следующее:

- тяжеловодные реакторы могут эффективно использовать ториевые ЯТЦ для воспроизводства и сжигания ^{233}U , т. е. торий может использоваться однократно без рециркуляции;
- внедрение ториевого топлива в однократный ЯТЦ легководных реакторов путем замещения части их (обогащенного) уранового топлива торием, очевидно, потребует значительных модификаций стратегии топливного режима (напр., для ториевых сборок с крайне высоким выгоранием топлива);

– использование тория в тепловых реакторах с рециркуляцией может привести к примерно такому же снижению потребностей в уране, обогащении и производстве топлива, которого можно достичь путем внедрения смешанного уран-плутониевого оксидного топлива;

– проведенные экономические оценки показывают, что ториевый ЯТЦ с переработкой может конкурировать с уран-плутониевым открытым ЯТЦ при цене на природный уран выше ~ 400 долл. США/кг в зависимости от стоимости переработки;

– с учетом некоторых национальных условий применение тория можно считать дополнительной возможностью для ЯТЦ с быстрыми реакторами, хотя глобально такая система едва ли может конкурировать с успешно внедряемыми энергетическими системами, использующими быстрые реакторы без тория.

1.4 Глобальная архитектура инновационных ЯЭС с тепловыми и быстрыми реакторами и замкнутым ядерным топливным циклом

В совместном проекте ИНПРО по глобальной архитектуре инновационных ЯЭС с тепловыми и быстрыми реакторами и замкнутым ЯТЦ (GAINS) [13] были рассмотрены технические и некоторые институциональные проблемы развития глобальной архитектуры устойчивой ЯЭ в 21 веке. 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. В проекте были намечены приемлемые варианты для перехода к такой архитектуре.

Шестнадцать участников из разных регионов мира – Бельгии, Канады, Китая, Чехии, Франции, Индии, Италии, Японии, Республики Корея, Российской Федерации, Словакии, Испании, Украины, США, Комиссии Европейского Союза, а также Аргентины в качестве наблюдателя – провели скоординированные исследования и подготовили заключительный отчет по проекту GAINS.

Широкий состав участников, взаимодействие специалистов из «сообщества» тепловых и быстрых реакторов, сотрудничество с аналогичными международными инициативами, помощь и опыт экспертов МАГАТЭ способствовали успеху проекта (рис. 3).

Основными результатами проекта стали:

1) создание методологического подхода (принципы, предположения и граничные условия) для проведения сравнительной оценки различных конфигураций архитектуры глобальной ЯЭС;



Рис. 3. Участники проекта GAINS — рабочая встреча (МАГАТЭ, 2010)

2) разработка согласованных сюжетов развития глобальной ЯЭ и долгосрочных сценариев спроса на атомную энергию до 2100г.;

3) создание гетерогенной модели мировой ЯЭ, учитывающей особенности подходов в отношении конечного этапа ЯТЦ различных стран и адаптация расчетных инструментов;

4) подготовка базы данных существующих и будущих ядерных реакторов и ЯТЦ;

5) результаты анализа сценариев перехода от нынешней ЯЭ к архитектуре будущей ЯЭС, построенной на использовании инновационных технологических решений.

Ниже кратко обсуждены некоторые из этих результатов.

В проекте были рассмотрены два альтернативных сценария увеличения мощностей ЯЭ — 2500 и 5000 ГВт (э) к концу столетия соответственно. Участниками была разработана аналитическая основа для оценки сценариев перехода к будущим устойчивым ЯЭС на основе детального анализа материальных потоков в ЯЭС по набору ключевых показателей эффективности, данных по реакторам и объектам ЯТЦ с учетом возможных моделей сотрудничества между странами в области ЯТЦ.

Все предыдущие исследования глобальных сценариев ЯЭ, даже те, которые учитывали региональную специфику [11], были основаны на так называемой однородной модели мир, в которой предполагалось, что все страны мира или региона реализуют одну политику в отношении ядерных реакторов и ЯТЦ, а также используют одинаковые технологические возможности. В отличие от этого, в проекте GAINS была введена модель разнородного мира, включающая различные группы стран, не персонифицированных, но объединённых на основании стратегии обращения с облучен-

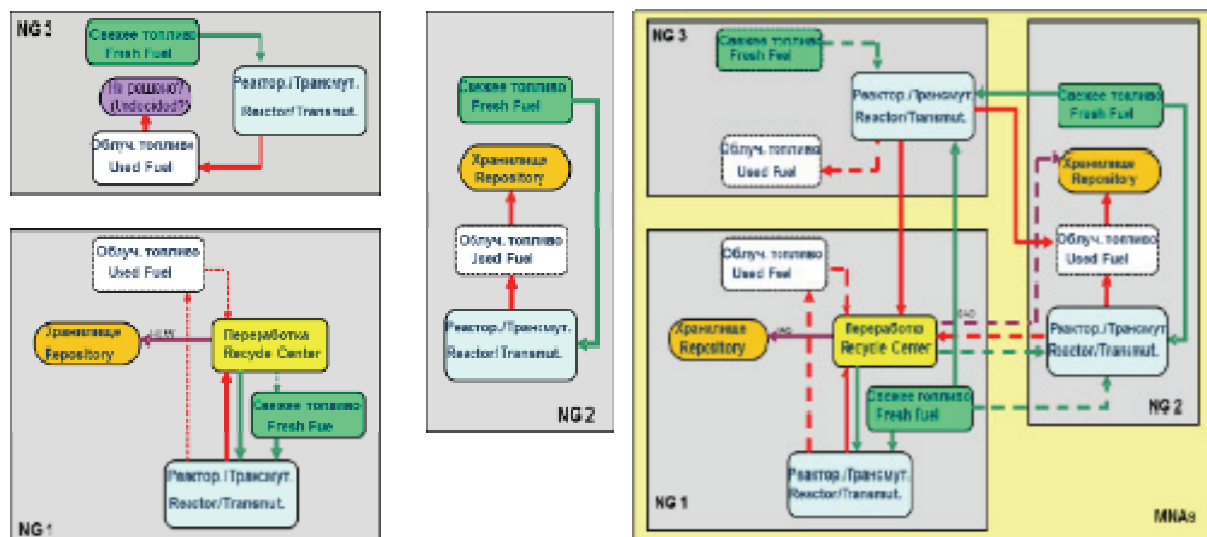


Рис. 4. Гетерогенная без взаимодействия (слева) и гетерогенная синергетическая (справа) модели глобальной ЯЭ, детально исследованные в проекте GAINS [13]

ным топливом (ОЯТ), которой они придерживаются в области ЯТЦ. В проекте были разработаны и детально исследованы гетерогенная модель глобальной ЯЭС без взаимодействия стран в ядерно-энергетической области и гетерогенная синергетическая модель глобальной ЯЭС, построенная на основе предположения о тесном сотрудничестве стран, использующих ядерную энергию (рис. 4).

Для проведения анализа были определены следующие три группы стран: страны первой группы (Г1) осуществляют переработку ОЯТ и придерживаются программ по разворачиванию 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.

Используемый в анализе подход не предполагает распределение отдельных стран по группам, но определяет долю будущей глобальной выработки ядерной энергии, приходящуюся на каждую группу. Для проведения исследований по проекту базовое отношение Г1 : Г2 : Г3 изменялось во времени так, что к концу столетия оно составило 40 : 40 : 20. Был выполнен анализ чувствительности к изменениям долей энерговыработки, приходящуюся на каждую группу.

В таблице 2 приведен набор ключевых показателей, которые отражали различные аспекты требований устойчивого развития: ресурсы ядерных материалов, выгружаемое отработанное топливо, радиоактивные отходы и младшие актиниды, услуги по ЯТЦ и пр., и на основании которых выполнялась оценка эффективности сценариев разворачивания инновационных ЯЭС.

Было принято, что существующие ЯЭС, которые почти полностью основываются на тепловых реакторах, работающих в открытом ЯТЦ, останутся основным источником производства ядерной энергии, по крайней мере, ещё на несколько десятилетий. Тем не менее выполненный анализ подтвердил результаты многочисленных национальных и международных исследований, которые демонстрируют, что инновации в реакторных технологиях и ЯТЦ являются эффективным средством улучшения показателей ЯЭС по критериям устойчивого развития.

Таблица 2. Ключевые показатели и оценочные параметры проекта GAINS [13]

Пункт	Ключевой показатель (КИ)/ оценочный параметр (ЕР)	Единицы
Производство электроэнергии		
КИ-1	Мощности по производству электроэнергии для реакторов каждого типа	ГВтэ
ЕР-1.1	(а) Вводимые в эксплуатацию и (б) выводимые из эксплуатации мощности	ГВтэ/год
Ресурсы ядерных материалов		
КИ-2	Среднее производство электроэнергии на единицу массы природного урана	ГВт год/кт ТМ
ЕР-2.1	Суммарная потребность в природных ядерных материалах	кт ТМ
КИ-3	Количество материалов прямого использования на единицу вырабатываемой энергии	кг/ГВт год
ОЯТ		
КИ-4	Количество ОЯТ на единицу вырабатываемой энергии	тТМ/ГВт год и м ³ /ГВт год
РАО и минорные актиниды		
КИ-5	Количество РАО на единицу вырабатываемой энергии	м ³ /ГВт год или кт/ГВт год
ЕР-5.1	Радиотоксичность и остаточное тепловыделение отходов, включая ОЯТ, предназначенных для захоронения	Зв/кВтч и кВт/т
ЕР-5.2	Количество минорных актинидов на единицу вырабатываемой энергии	кг/ГВт год
Услуги топливного цикла		
КИ-6	Производительность предприятий по (а) обогащению урана и (б) переработке топлива на единицу мощности	(т МПИ ² /год) / ГВтэ и (ЕРР/год)/ГВтэ
КИ-7	Годовое количество топлива и отходов, транспортируемых между группами стран	ктТМ/год

EP-7.1	Категория ядерного материала, транспортируемого между группами	Категория I, II, или III [12]
Безопасность		
KI-8	Ежегодный совокупный риск на единицу произведенной электроэнергии	1/МВт час; или качественное обсуждение
Стоимость и инвестиции		
KI-9	Дисконтированная стоимость единицы электроэнергии (LUEC)	долл. США / МВт час
EP-9.1	Капитальные затраты на строительство N-го энергоблока	млрд долл. США; долл. США / кВтэ
KI-10	Оцененные инвестиции в НИОКР до пуска в эксплуатацию N-го энергоблока	млрд долл. США
EP-10.1	Дополнительные характеристики и преимущества	Качественное описание в виде текста

Инновационные реакторы, которые, как ожидается, будут иметь большое влияние на архитектуру будущих ЯЭС, включают усовершенствованные легководные реакторы, усовершенствованные тяжеловодные реакторы, быстрые реакторы, высокотемпературные реакторы, а также, возможно, электроядерные установки и/или жидкосолевые реакторы. Реакторы малой и средней мощности, первоначально включенные в проект GAINS, в конечном счете не оценивались, поскольку они по рассматриваемым ключевым показателям не отличались существенным образом от значений показателей реакторов аналогичного типа большой мощности. Сочетание различных типов реакторов и связанных с ними ЯТЦ создает множество возможных архитектур ЯЭС, способных содействовать решению актуальных задач, стоящих перед ЯЭ, таких как производство различных энергопродуктов, оптимальное использование природных ресурсов, минимизация радиоактивных отходов и пр.

Эффективность синергетического подхода может заключаться не только в новых технологических и технических возможностях, способствующих улучшению показателей устойчивости ЯЭС, но также и в новых возможностях международного сотрудничества, выражающихся в использовании взаимодополняющих возможностей стран-поставщиков и стран-пользователей ядерно-энергетических технологий. В проекте показано, что синергетический подход на основе сочетания технических и институцио-

нальных решений обладает значительным потенциалом для решения проблем накопления ОЯТ и плутония в нем. Как известно, применение открытого ЯТЦ на тепловых реакторах приводит к возрастанию накопления ОЯТ и плутония в нем пропорционально объему тепловой энергии, вырабатываемой АЭС. Без синергетического подхода в модели разнородного мира снижение темпов накопления ОЯТ будет наблюдаться при внедрении быстрых реакторов и связанных с ними замкнутых ЯТЦ только в некоторых странах, обладающих этими технологиями, но это не решит проблему в глобальном масштабе.

Синергетическая глобальная ЯЭС делает возможным принципиальное решение данной проблемы. В такой системе страны с открытым ЯТЦ могут отправить ОЯТ в страны, осуществляющие переработку ОЯТ и рециркуляцию делящихся материалов ядерного топлива. В этом случае накопление отработавшего топлива на глобальном или региональном уровне можно будет снизить или даже свести к минимальному уровню, ограничив список долгоживущих радиоактивных отходов младшими актинидами и продуктами деления (или только продуктами деления, если в дальнейшем окажется возможным сжигать младшие актиниды в специальных реакторных системах трансмутации).

Моделирование показало также возможность более эффективного использования ресурсов в глобальной синергетической системе ЯЭ, которая делает доступными для использования ресурсы, которые нельзя было бы использовать иным образом, путем дополнительного извлечения энергии от рециркуляции делящихся материалов из ОЯТ, отправляемого в страны, обладающими соответствующими технологиями.

Результаты исследования, выполненного участниками GAINS совместно с экспертами из секции экономики и планирования (PESS) МАГАТЭ, показали важное значение ключевого индикатора КИ-10 «Оцененные инвестиции в НИОКР», касающиеся роли стоимости работ по исследованиям и проектированию для развёртывания инновационных ЯЭС и возврата вложенных в ЯЭС финансовых средств.

Влияние вводимых инновационных мощностей на период возврата затрат на НИОКР показано на рис. 5. Видно, что если вводимые мощности составляют более 30 ГВт(эл), тогда затраты на НИОКР могут быть возвращены в течение 20 лет, если объем инвестиций составляет 10 млрд долл. США, и в течение 35 — 40 лет, если они составят 30 — 40 млрд долл. Если с вводимые мощности составляют около 10 ГВт (эл), то расходы на НИОКР, составляющие более 10 млрд долл., не оправданы, так как они вряд ли будут возвращены в приемлемые для инвестора сроки.

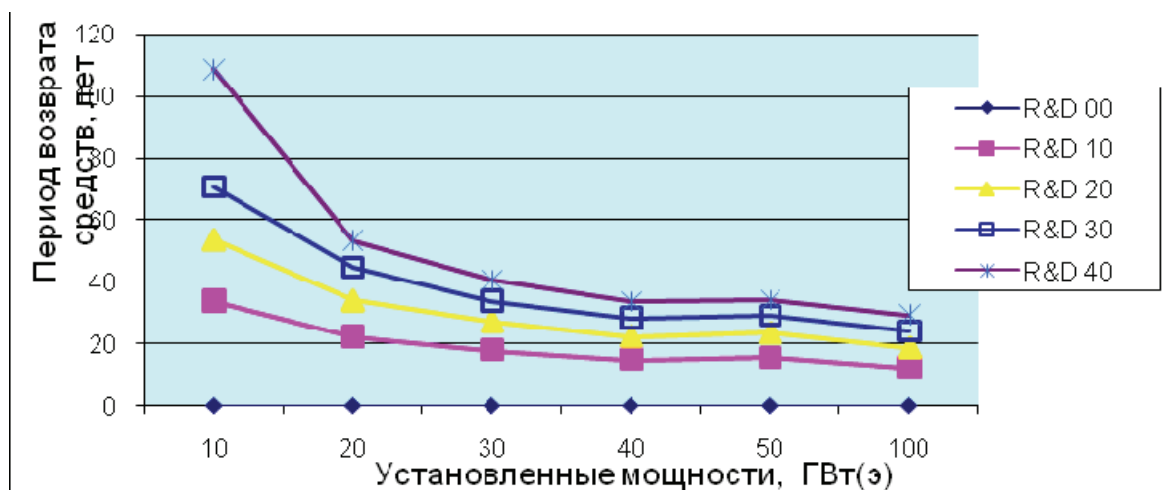


Рис. 5. Период возврата инвестиций в НИОКР для инновационных ЯЭС с различным объёмом инвестиций

Таким образом, проект GAINS показал, что в силу одних только экономических причин лишь несколько стран в мире с масштабными программами по развитию ЯЭ способны нести бремя разработки технологий и осуществление проектов быстрых реакторов и замкнутого ЯТЦ. Следовательно, глобальная ЯЭС, по всей видимости, будет развиваться на протяжении 21 века в соответствии с моделью разнородного мира с разными ЯЭС на национальном уровне, но в большинстве стран, с использованием тепловых реакторов в открытом ЯТЦ. В заключении по проекту GAINS отмечено, что сделанные в нем выводы относительно выгод построения архитектуры будущих ЯЭС на основе синергетического сотрудничества между странами, а также относительно возможных рисков, следует рассматривать только как предварительные.

Для более глубокого понимания движущих сил и возможных препятствий на пути сотрудничества, была отмечена необходимость проведения дальнейших совместных исследований стран-членов МАГАТЭ. Проект GAINS заложил рамочную основу (GAINS Framework) для проведения таких исследований, включающую разработку согласованных сюжетов развития глобальной ЯЭС, выбор ключевых индикаторов для проведения сравнительной оценки вариантов, подготовку базы данных и расчетных кодов для моделирования и других элементов инструментария, необходимого для создания облика будущей глобальной устойчивой ЯЭС. В последующем она широко использовалась при проведении сценарных исследований в проектах ИНПРО.

1.5 Синергетические взаимодействия региональных групп стран с ядерной энергетикой, оцененные с позиций устойчивости

Проект «Синергетические взаимодействия региональных групп стран с ЯЭ, оцененные с позиций устойчивости» (SYNERGIES) был инициирован в 2012 г. Основываясь на результатах проекта GAINS, которые указывали, что развитие ЯЭ в 21 веке будет проходить по гетерогенной модели мира, в проекте SYNERGIES делается акцент на количественную оценку сценариев перехода к устойчивым ЯЭС и изучение мотиваций стран для сотрудничества в рамках такого перехода. Алжир, Армения, Беларусь, Бельгия, Болгария, Канада, Китай, Египет, Франция, Индия, Индонезия, Израиль, Италия, Япония, Республика Корея, Малайзия, Пакистан, Польша, Румыния, Россия, Испания, Украина, США, Вьетнам, Агентство по ядерной энергии ОЭСР выступили в качестве участников и наблюдателей проекта. Кроме того, в качестве наблюдателей на некоторых совещаниях по проекту участвовали эксперты Великобритании, которые также предоставили результаты исследований по одному из сценариев для публикации в окончательном отчете по проекту. Заключительный отчет по проекту опубликован в 2018 году [14].

Основными целями проекта SYNERGIES являются оценка взаимовыгодных схем сотрудничества между странами и определение движущих сил и препятствий на совместном пути к глобальным устойчивым ЯЭС. В частности, проект SYNERGIES нацелен на определение краткосрочных (2013 — 2030 гг.) и среднесрочных (2030 — 2050 гг.) совместных действий, позволяющих достичь устойчивости ЯЭС в долгосрочной перспективе. Исследуются возможные синергетические эффекты (взаимодействие нескольких факторов, эффект от которого существенно превосходит сумму эффектов от этих факторов по отдельности), связанные с совместной реализацией технологических решений и схем сотрудничества между странами. В рассмотрение включены различные типы реакторов и ЯТЦ, учтены неопределенности в темпах роста спроса на ЯЭ, возможные схемы сотрудничества между странами.

Основу проекта составляли 28 тематических исследования стран-участниц проекта и членов секции ИНПРО в двух крупных направлениях:

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

Семейство сценариев, рассмотренных участниками проекта, включало:

- эволюционное развитие ЯЭС в открытом ЯТЦ и однократный цикл плутония в реакторах с тепловым спектром нейтронов;
- ввод в ЯЭС небольшого числа быстрых реакторов для мультирецикла плутония в легководных и быстрых реакторах;
- масштабный ввод быстрых реакторов с переработкой топлива тепловых реакторов для наращивания темпов роста мощностей быстрых реакторов;
- трансмутацию минорных актинидов;
- переход к ^{233}U -Th ЯТЦ и сценарии со смешанным U/Pu/Th ЯТЦ.

Тематическое исследование Армении продемонстрировало, что тесное сотрудничество со страной-поставщиком, позволяющее минимизировать затраты на НИОКР и инфраструктуру ЯЭС, является ключевым условием коммерческого использования ядерной энергии в небольшой стране. Ядерный реактор, построенный по зарубежному проекту, и услуги ЯТЦ, поставляемые из-за рубежа, обеспечивают 39 % внутреннего производства электроэнергии страны, что вносит существенный вклад в энергообеспечение страны. Эта модель сотрудничества может быть применима во многих странах с небольшими программами, особенно в странах-новичках.

Аргентина, Румыния и Украина рассмотрели модель, в которой выполнение национальных программ НИОКР поддерживается международным сотрудничеством, которое ускоряет реализацию национальных стратегий развертывания и дает возможность участвовать в международных проектах НИОКР, направленных на решение долгосрочных задач ядерной энергетики. Общественное мнение в этих странах поддерживает дальнейшее развертывание ЯЭ. Правительства рассматривают ЯЭ как стабильный компонент национальной энергетической системы, принимая во внимание безопасность поставок, надежность, экономическую эффективность и низкие выбросы парниковых газов. Все страны этой группы используют и намерены использовать в будущем АЭС зарубежного дизайна и, частично, зарубежные технологии долгосрочного хранения ОЯТ. Региональные решения для хранения ОЯТ рассматриваются как перспективные разработки.

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. Раз-

личные перспективные варианты технологического развития на основе сочетания реакторных технологий разного типа и соответствующих топливных циклов были представлены в проекте SYNERGIES Европейским Союзом (программа *EU27*) и странами – обладателями технологии: Бельгией, Индией, Испанией, Канадой, Китаем, Россией, Францией, Японией. Часть результатов кратко изложена ниже.

Канадские специалисты рассмотрели вариант утилизации переработанного низкообогащенного урана (НОУ) из LWR в тяжеловодный реактор (HWR) и сценарий повторного сжигания америция из LWR в HWR. Первое исследование показало, что НОУ с низким уровнем выгорания, поставляемый в HWR вместо природного урана, потенциально может сэкономить до 230 долларов США / кг в расходах на топливную загрузку. При определенных затратах на переработку и ценах на уран экономия на топливе делает вариант переработки экономически обоснованным. Анализ сжигания америция в HWR показал снижение объемов утилизации высокоактивных отходов и дал оценку экономики варианта в зависимости от затрат на разделение, обращение с америцием и цены на природный уран. В исследовании отмечено, что существующая ситуация в части затрат на обращение с ОЯТ и цен на природный уран не в достаточной степени мотивирует проведение работ по реализации обоих вариантов.

Большое внимание в проекте было уделено решению проблемы утилизации плутония. Участниками проекта из Китая, России, Франции, Японии и ЕС были получены здесь существенные результаты. В основу российского исследования вопросов по обращению с ОЯТ и утилизации плутония легла схема двухкомпонентной системы тепловых и быстрых реакторов с замкнутым ЯТЦ (рис. 6).

В исследовании показано, что реализация такой схемы дает возможность остановить накопление ОЯТ тепловых реакторов и плутония в ОЯТ, или даже уменьшить количество плутония в системе до заданных минимальных потребностей, за счет переработки ОЯТ и сбалансированного по-



Рис. 6. Схема топливного цикла при многократном рецикле плутония в двухкомпонентной системе тепловых и быстрых реакторов

требления выделенного плутония в виде МОКС топлива тепловых и быстрых реакторов. Потребление природного урана в такой системе может быть уменьшено вдвое в случае стабилизации спроса на электроэнергию АЭС и до ста раз в случае высокого спроса на ядерную электроэнергию при высокой доле быстрых реакторов в ЯЭС.

Кроме того, более полное использование плутония способствовало бы также эффективной реализации его энергетического потенциала, укреплению режима нераспространения и являлось значительным преимуществом при окончательном удалении РАО с экологической точки зрения.

В тематических исследованиях Франции и ЕС оценивались промышленные перспективы технологии разделения и трансмутации минорных актинидов (МА). Получен ряд результатов, представляющих интерес для долгосрочных стратегий по обращению с ОЯТ, в том числе стратегии России:

- трансмутация МА значительно уменьшает их объем в геологическом хранилище, однако количество МА в реакторах и установках ЯТЦ увеличивается;

- трансмутация Am приведет после 120 лет временного хранения к уменьшению в 7,3 раза зоны обслуживания зоны захоронения и до 9,8 при трансмутации всех МА;

- увеличение содержания МА в топливе потребует значительных модификаций оборудования для решения проблем тепловой и радиационной защиты при производстве и переработке топлива;

- трансмутация всех МА чрезвычайно затруднена кюрием, и ограничения на порядок превышают случай, когда трансмутируется только америций;

- экономические исследования показывают, что увеличение затрат, связанных с процессом трансмутации, может варьироваться от 10 до 20% в быстрых натриевых реакторах и от 30 до 35 % в ADS.

Общий вывод по результатам совместного проекта SYNERGIES состоит в том, что показатели устойчивости ЯЭС могут быть существенно улучшены за счет использования синергии ее технических составляющих (комбинаций между реакторными технологиями различных типов) и синергии в институциональной сфере (путем расширения двухсторонних и многосторонних связей между странами с различным уровнем развития ядерно-энергетической инфраструктуры).

Как показано в проекте, комбинации топливных циклов широко используемых легководных реакторов и реакторов с более высоким нейтронным потенциалом (HWR, SFR, ADS) могут способствовать решению проблем обращения с радиоактивными отходами, рационального использования делящихся материалов (плутония, урана и тория), укрепления режима ядерного нераспространения.

Улучшение ключевых показателей ЯЭС на основе двух- и многосторонних взаимовыгодных соглашений уже стало обычным явлением на начальной стадии ЯТЦ. Проект SYNERGIES определил некоторые возможности по совместному решению имеющихся проблем на заключительной стадии ЯТЦ. В качестве одного из наиболее перспективных направлений повышения показателей устойчивого развития на заключительной стадии ЯТЦ в проекте рассмотрены различные варианты сотрудничества стран – держателей технологии со странами-пользователями, которое помогает распространить преимущества инновационных ядерных технологий на все страны мира, позволяя улучшить экономику, снизить риски серьезных аварий, трансграничного радиоактивного загрязнения и нарушения режима нераспространения.

В проекте обсуждены некоторые технические, экономические и политические препятствия в реализации потенциала синергетического подхода в ядерной энергетике. Лучшее понимание преимуществ и препятствий синергетического подхода и нахождение решений по их преодолению имеет большое значение для определения и осуществления совместных действий государств — членов МАГАТЭ в целях повышения жизнеспособности и устойчивости глобальной ядерно-энергетической системы. Проект SYNERGIES явился важной вехой на этом пути.

1.6 Ключевые индикаторы для оценки инновационных ЯЭС (проект KIND)

Совместный проект «Ключевые индикаторы для оценки инновационных ЯЭС» (KIND) [15] направлен на разработку методик и инструментов, необходимых для проведения сравнительного анализа устойчивости и эффективности ЯЭС. В проекте получило дальнейшее развитие направление исследований, связанных с выбором небольшого, но представительного числа ключевых индикаторов, характеризующих состояние, перспективы, выгоды и риски, связанные с инновационными ЯЭС. Этот подход вместе с адаптированными в проекте современными методами агрегации экспертных оценок с учетом неопределенности объективной и субъективной природы обеспечивают возможность проведения многофакторной сравнительной оценки ЯЭС и позволяют выполнить ранжирование, сортировку альтернатив, а также осуществить обоснованный выбор наиболее приемлемой компромиссной альтернативы.

Для достижения поставленной задачи в проекте проводится:

- разработка наборов ограниченного числа ключевых индикаторов, основанных на предложенных участниками проекта конкретных задачах сравнительной оценки;

- адаптация и разработка передовых методов агрегирования экспертных оценок с использованием количественных и оценочных данных с учетом их неопределенностей совместно с методами анализа на чувствительность и неопределенность;

- изучение потенциала подхода в связи с его возможным применением к другим проблемам (сравнительная оценка сценариев развития ЯЭС и сравнительная оценка ядерных и неядерных энергетических систем), в том числе для стран-новичков.

Актуальность и своевременность проекта KIND обусловлена тем, что в настоящее время глубоко 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. Решение задачи сравнительной оценки эффективности и устойчивости ЯЭС в многокритериальной постановке позволяет осуществить поиск согласованных технических, институциональных, структурных решений, определить компромиссные значения параметров системы, сбалансированных по различным выгодам и рискам, провести сравнительный многокритериальный анализ возможных альтернатив с количественной оценкой их сильных и слабых сторон.

В рамках проекта даны предварительные рекомендации и разработаны соответствующие инструментальные средства для реализации полного цикла применения методов поддержки принятия решений при многих критериях для сравнительной оценки ЯЭС в части выбора:

- шкал оценки значений индикаторов;
- метода агрегации экспертных оценок (мультиатрибутивные методы, методы идеальной точки, методы семейства ранжирования, другие гибридные методы);
- параметров отношения к риску (нейтралитет, отвращение, склонность к риску);
- вида функций ценности (линейная, полиномиальная, экспоненциальная, логарифмическая, кусочно-непрерывная формы);
- значений весовых факторов (прямой, рейтинг, ранжирование, парные сравнения, методы отклонений (swing));
- метода анализа неопределенности и чувствительности (прямые, стохастические методы, иные усовершенствованные методы);
- способа представления результатов (цветовые коды и тепловые карты, агрегация индикаторов в ограниченное число категорий).

В рамках проекта проведен ряд количественных сравнительных расчетных оценок инновационных ЯЭС, основанных на реакторах типа PWR, PHWR, SFR, и сценариев их развертывания, рассмотренных в проекте GAINS. Результаты этих исследований продемонстрировали работоспособность разрабатываемого инструментария и возможность получения на его основе дополнительной информации, количественно отражающей сильные и слабые стороны рассматриваемых вариантов, а также сравнение ядерных и неядерных энергетических систем.

В настоящее время методы и рекомендации, выработанные в проекте KIND, проходят проверку в ходе выполнения совместного проекта «Сравнительная оценка инновационных ядерно-энергетических систем» (CEINS). Проводится оценка нескольких ЯЭС, представляющих интерес для стран-новичков и стран-поставщиков, и проводится анализ полученных результатов. Рассматривается возможность применения разработанного в проекте KIND подхода не только к инновационным ядерно-энергетическим технологиям, но и для сравнительной оценки сценариев развития энергетического сектора на национальном или региональном уровнях, а также в других задачах, представляющих интерес для стран — участниц проекта.

1.7 Проект «Дорожные карты для перехода к глобально устойчивым ЯЭС» (ROADMAPS)

Проект совместных исследований ИНПРО ROADMAPS — Дорожные карты [2] инициирован Россией. В рамках проекта, стартовавшего в ноябре 2014 года, участниками выполнялась ответственная и сложная задача — разработка и пробное использование структурированного подхода и формата МАГАТЭ к достижению глобальной устойчивой ядерной энергетики — Дорожная карта МАГАТЭ. Для решения этой задачи проводился анализ состояния и перспектив развития мировой ядерной энергетики, рассматривались модели международного сотрудничества и создавался электронный формат для документирования действий, объема работ и сроков реализации конкретных программ по улучшению показателей устойчивого развития национальных ЯЭС. На первых этапах проекта его участниками являлись Армения, Бангладеш, Бельгия, Вьетнам, Китай, Индия, Индонезия, Япония, Малайзия, Пакистан, Румыния, Россия, Таиланд, Украина и США. На заключительной стадии Вьетнам и США приняли статус наблюдателей.

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. Электронный

формат Дорожной карты, разработанный российскими участниками проекта, был принят в качестве шаблона МАГАТЭ для использования странами-членами.

Активную позицию в определении приоритетов развития проекта занимал и представитель США. Представители Армении, Беларуси, Бельгии, Румынии, Украины и Японии участвовали на всех совещаниях по проекту и внесли значительный вклад в решении поставленных задач. Остальные страны-участницы предоставляли существующие национальные стратегии и программы развития ядерной энергетики, демонстрировали отдельные результаты использования методологии и электронных инструментов проекта, полученные применительно к конкретным условиям этих стран.

На рисунке 7 показана схема, которая легла в основу электронного шаблона Дорожных карт развития ЯЭС стран — участниц проекта. Модель включает информационные блоки, описание механизмов достижения ус-

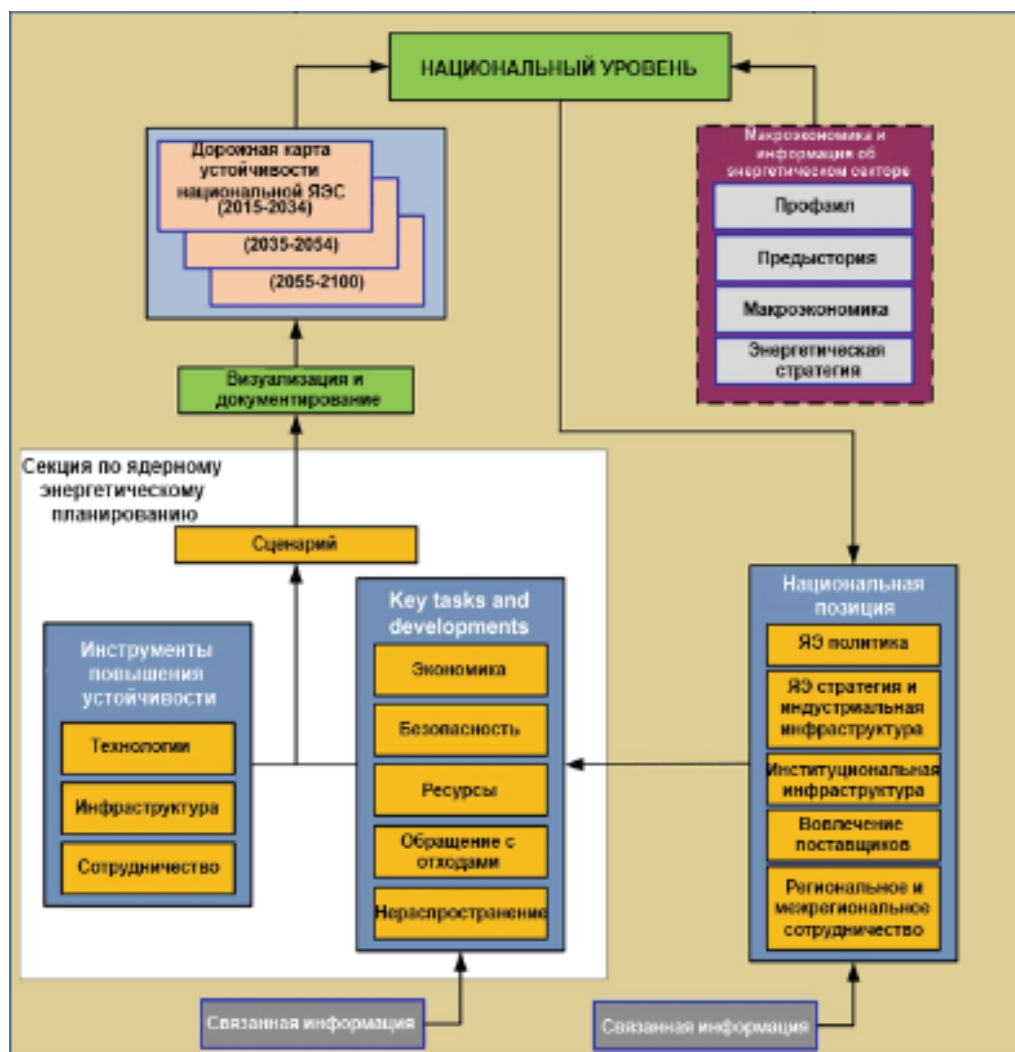


Рис. 7. Схема организации информационных потоков в шаблоне дорожной карты

тойчивости, подробное описание каждого этапа расчета. Структура шаблона Дорожной карты, реализованная в электронном виде с использованием таблиц Excel (ROADMAP Excel Tool), включает несколько элементов, объединенных общей логикой для описания текущего состояния и планов развития ЯЭС на долгосрочную перспективу, а также для обеспечения экспертов необходимыми данными и аналитической поддержки лиц, принимающих решения в вопросах, связанных с переходом к устойчивой ЯЭС.

Основные структурные компоненты дорожной карты следующие:

- 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.

Соответствующая информация в шаблоне Дорожной карты дается на 20 excel-листах, сведенных в следующие основные группы:

- Main (Navigation panel) – стартовая страница (панель навигации);
- General — общая информация (профиль страны, метрики, ключевые события);
- Ядерный топливный цикл (реакторный флот, производство электроэнергии, добыча и переработка природного урана, конверсия, обогащение, изготовление топлива, хранение ОЯТ, переработка ОЯТ, окончательная геологическая изоляция ОЯТ).

В Армении, Беларуси, России, Румынии, Таиланде и Украине были проведены тематические исследования по разработке национальных дорожных карт с единых разработанных в проекте позиций, и результаты представлены в заключительный отчет по проекту.

На рисунке 8 приведен пример excel-листа с экспертным прогнозом развития реакторного флота России до 2100 года с учетом строительства реакторных блоков за рубежом.

При построении российской дорожной карты предполагалось, что Россия будет предоставлять услуги по свежему топливу реакторов ВВЭР, которые были и будут построены за рубежом. Что касается ОЯТ, то принималось, что после 2035 года половина стран с российскими ВВЭР выберет вариант возврата ОЯТ в страну происхождения.

Мощности существующих предприятий начального этапа ЯТЦ в России в основном достаточны для удовлетворения долгосрочных потребностей ЯЭС страны и обеспечения экспортных услуг. Наиболее сложной задачей на этом этапе, в решении которой существенную роль играет международное сотрудничество, является покрытие спроса на природный уран. Рынок услуг по заключительной стадии ЯТЦ только начинает развиваться, и

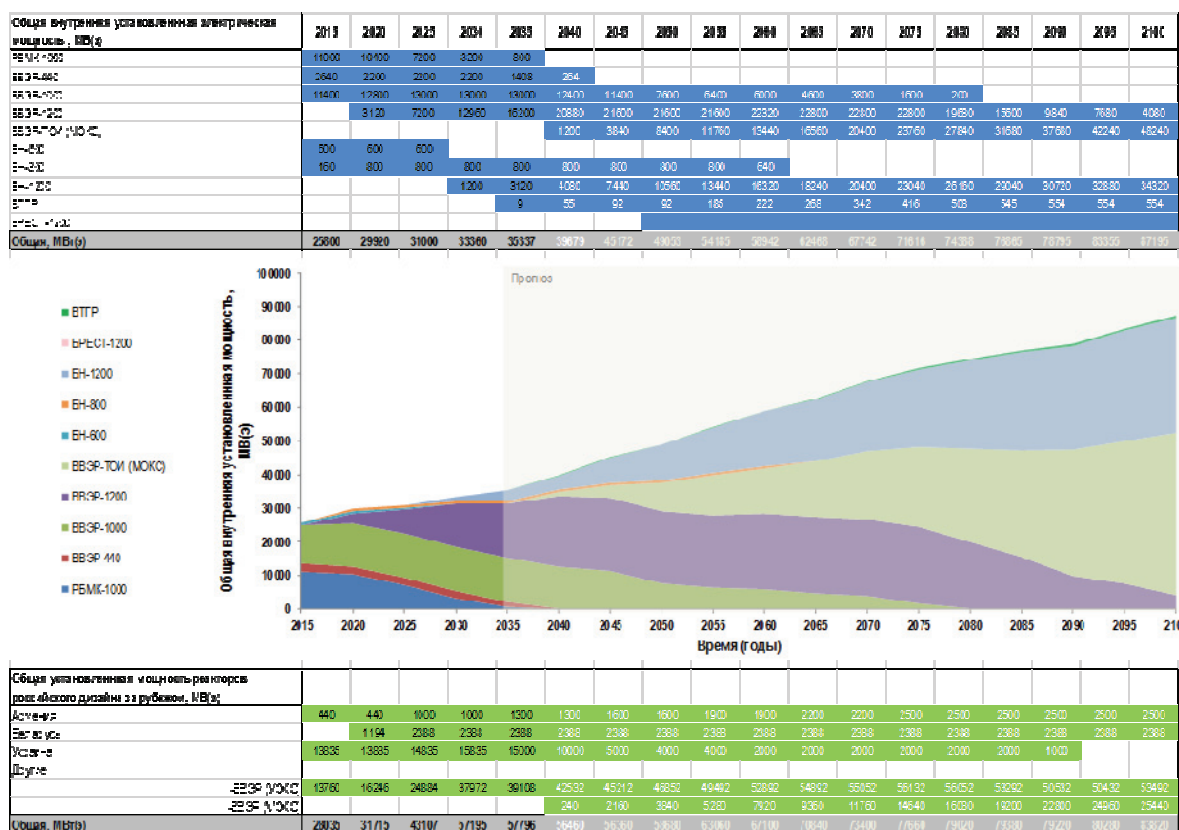


Рис. 8. Прогноз развития реакторного флота России до 2100 года с учетом строительства реакторных блоков за рубежом

здесь для России открываются большие перспективы по расширению коммерческих поставок услуг на внешние рынки. В то же время существующих в настоящее время мощностей предприятий заключительной стадии ЯТЦ недостаточно для предоставления услуг по переработке и всем этапам обращения с прогнозируемым объемом внутреннего и зарубежного ОЯТ, и требуется увеличение этих мощностей, в том числе по переработке ОЯТ.

Одной из существенных задач при расширении экспорта реакторов ВВЭР и частичном возврате зарубежного ОЯТ является поддержание баланса наработки и использования плутония при выполнении российским ЯТЦ функций регионального центра. Для решения этой задачи необходимо уточнение ряда вопросов стратегии развития ЯЭС России, в том числе вопроса об оптимальных темпах ввода реакторов ВВЭР с урановым топливом и БН с МОКС-топливом, а также вопроса о целесообразности сооружения ВВЭР с МОКС-топливом после 2035 года в России и за рубежом.

Итогом выполнения проекта ROADMAPS стало создание первого образца Дорожной карты МАГАТЭ. В ходе выполнения этой задачи были разработаны общий подход к построению дорожной карты, формат (шаблон) для заполнения данными, электронные средства обработки и визуализации результатов и приведены примеры применения этих инструментов к

национальным стратегиям развития ЯЭС, которые помогают информировать о проблемах, касающихся текущей ситуации и перспектив развития ядерной энергетики. Консолидация различных аспектов стратегии в виде дорожной карты делает картину построения ядерной энергетической системы более понятной для политиков и лиц, принимающих решения.

Результаты выполнения проекта ROADMAPS дают убедительный ответ на вопрос, почему полезно разработать дорожную карту. Проект 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.

2 Цели и результаты проектов по задаче 2 «Инновации» секции ИНПРО

В рамках задачи 2 «Инновации» исследуются конкретные инновационные технологические решения и институциональные механизмы, которые могли бы быть развернуты в 21 веке с целью повышения устойчивости национальных ЯЭС. Данная задача ориентирована прежде всего на поставщиков технологий ЯЭ, заинтересованных в развитии и использовании таких инноваций. Однако результаты и выводы реализуемых в рамках данной задачи проектов также интересны и иным потенциальным потребителям подобного рода инноваций, поскольку за счет сотрудничества между странами преимущества от инновационных технологий могут стать доступными и тем странам, которые не планируют внедрение инноваций на национальном уровне. В таблице 3 представлены завершенные и ведущиеся проекты сотрудничества в рамках задачи 2 секции ИНПРО.

Таблица 3. Завершенные и ведущиеся проекты сотрудничества в рамках задачи 2 ИНПРО

Проекты	Сроки
Изучение правовых и институциональных вопросов относительно транспортабельных ядерных энергетических установок (ТЯЭУ) [4]–[9]	2007—2013
Обзор инновационных реакторных концепций по предотвращению тяжелых аварий и минимизации их последствий (RISC)	2014—2017
Анализ ядерного топлива и ядерного топливного цикла будущих ядерных энергетических систем» (FANES)	2014—2017
Отходы от инновационных типов реакторов и ядерных топливных циклов (WIRAF)	с 2014 г. по настоящее время

Системы реакторов малой и средней мощности: исследование по разворачиванию систем реакторов с заводской загрузкой топлива	с 2014 г. по настоящее время
Совместные подходы к заключительной части ядерного топливного цикла: драйверы развития, правовые, институциональные и финансовые препятствия	с 2016 г. по настоящее время

Заключительный отчет по проекту «Изучение правовых и институциональных вопросов относительно транспортабельных ядерных энергетических установок (ТЯЭУ)» был издан в виде публикации МАГАТЭ. Работы по проектам «Обзор инновационных реакторных концепций по предотвращению тяжелых аварий и минимизации их последствий (RISC)», «Анализ ядерного топлива и ядерного топливного цикла будущих ядерных энергетических систем (FANES)» были завершены в 2017 году, и по ним были подготовлены заключительные отчеты. Работы по проектам «Совместные подходы к заключительной части ядерного топливного цикла: драйверы развития, правовые, институциональные и финансовые препятствия», «Системы реакторов малой и средней мощности: исследование по разворачиванию систем реакторов с заводской загрузкой топлива» и по второму этапу проекта «Отходы от инновационных типов реакторов и ядерных топливных циклов (WIRAF)» в настоящее время продолжаются.

2.1 Проект по изучению правовых и институциональных вопросов относительно транспортабельных ядерных энергетических установок (ТЯЭУ)

Актуальность проекта по изучению правовых и институциональных вопросов и проблем транспортабельных ядерных энергетических установок (ТЯЭУ) определяется перспективами масштабного развития этого инновационного направления в ядерной энергетике. В проекте рассматривалось несколько технических альтернатив и сценариев развертывания, в рамках которых определялись проблемы внедрения ТЯЭУ, оценивалось влияние этого процесса на институциональную инфраструктуру стран-получателей, в том числе на законодательство, права собственности, заключение контрактов и т. д. Обсуждались также возможные подходы к решению возникающих проблем [16].

Основное внимание уделялось разворачиванию ТЯЭУ в странах, отличных от страны происхождения, и потенциальному влиянию ТЯЭУ на инфраструктуру стран-получателей. В исследовании оценивались две технические альтернативы.

Альтернатива 1. ТЯЭУ заводской сборки, заправленная топливом и прошедшая испытания на заводе-изготовителе; обслуживаемая, дозаправ-

ляемая или выводимая из эксплуатации заводом-изготовителем; оснащенная вспомогательным (неядерным) оборудованием на одной барже (или платформе, в случае транспортировки авто- или ж/д транспортом) или со вспомогательным оборудованием на отдельной барже (или платформе), или если вспомогательное оборудование монтируется обычным образом на суше с последующим подключением к реактору на площадке.

Альтернатива 2. ТЯЭУ заводской сборки, прошедшая предварительные (неядерные) испытания, обслуживаемая, заправляемая и дозаправляемая на площадке, с емкостями для хранения свежего и отработанного топлива, находящимися на борту или на площадке. Топливо доставляется на площадку по суше обычным образом или на специальном корабле. Вспомогательное оборудование может находиться на одной барже (или платформе) вместе с топливом, на отдельной барже (или платформе) или монтироваться на суше обычным образом с последующим подключением к реактору на площадке.

В исследовании рассматривались следующие сценарии:

Сценарий 1: Поставщик является эксплуатирующей стороной, а принимающая страна — регулирующим органом. Поставщик предоставляет, эксплуатирует и принимает обратно всю ТЯЭУ, включая отработанное топливо. ТЯЭУ эксплуатируется поставщиком. ТЯЭУ управляется и лицензируется принимающей страной.

Сценарий 2: Принимающая страна является эксплуатирующей стороной и одновременно регулирующим органом. Поставщик предоставляет и принимает обратно всю ТЯЭУ, включая отработанное топливо. ТЯЭУ эксплуатируется юридическим лицом, назначенным принимающей страной, и управляется и лицензируется принимающей страной.

Основные выводы исследования в отношении поставщика:

1) Поставщик ТЯЭУ может выбрать одну из нескольких альтернатив, например: долгосрочная аренда ТЯЭУ, продажа ТЯЭУ с оплатой при доставке, эксплуатация ТЯЭУ и продажа произведенной электроэнергии, пара или любых иных продуктов.

2) Каждая из этих альтернатив может помочь принимающей стране прийти к выводу, что целесообразнее купить ТЯЭУ, а не приобретать реактор для строительства на месте эксплуатации.

3) Признавая обязанности принимающей страны как регулирующего органа, поставщик может счесть необходимым взять на себя обязательства перед принимающей страной по обеспечению доступа к проектным проработкам и техническому обоснованию безопасности с одобрения государственного регулирующего органа страны-поставщика.

Основные выводы исследования в отношении принимающей страны:

1) Для внедрения ТЯЭУ от принимающей страны, возможно, потребуется меньше финансовых и людских ресурсов. Тем не менее существует ряд вопросов, которых принимающая страна не сможет избежать. Эти вопросы должны решаться всеми заинтересованными сторонами в принимающей стране. Создание группы экспертов для рассмотрения всех возможных последствий развертывания ЯЭ в стране остается важной проблемой.

2) Среди ключевых проблем, которые должна решить принимающая страна, нужно отметить обязательства по созданию соответствующего ядерного законодательства, в том числе в отношении вопросов материальной ответственности, а также регулирующего органа с полномочиями, ответственностью и компетентностью для надзора за АЭС.

3) Регулирующий орган принимающей страны должен быть способен устанавливать национальные стандарты для АЭС и обеспечивать соответствие этим стандартам в процессе производства и ввода в эксплуатацию, а также при лицензировании эксплуатации.

4) Регулирующий орган принимающей страны не может передать ответственность за выполнение этой деятельности внешнему подрядчику. Тем не менее будет целесообразно получить советы или рекомендации со стороны других регулирующих органов, включая регулирующий орган поставщика.

5) Принимающая страна будет должна установить критерии для площадки. Меры по охране окружающей среды, планированию противоаварийных мероприятий, безопасности и физической защите должны (как и в отношении типовых АЭС) покрывать все фазы эксплуатационного срока ТЯЭУ и, в частности, транспортировку ТЯЭУ до и после ее монтажа.

Кроме того, в исследовании была проанализирована международная правовая основа для развертывания ТЯЭУ. Основные выводы:

- Применимость международных правовых инструментов (конвенций) по ядерной безопасности, радиационной защите и ответственности за ядерный ущерб в отношении сделок по ТЯЭУ, осуществляемых странами, использующими эти инструменты, требует тщательного рассмотрения в свете положений, касающихся сферы каждой отдельной конвенции.

- Международные необязывающие требования и рекомендации, установленные МАГАТЭ, могут применяться к ТЯЭУ. Гибкость «Основных принципов», а также «Требований безопасности» позволяет применять их в индивидуальном порядке по требованию поставщика или принимающей страны, а также обеспечивает их применимость к инновационным техническим разработкам, которые могли не учитываться на стадии проектирования.

– Альтернатива 1 (в ТЯЭУ используются реакторы, загружаемые топливом и проходящие нейтронные испытания на заводе): применяемое международное ядерное право и смежные правила показали, что в этом случае проявляются очевидные «пробелы» и недостаточное освещение определенных операций на ТЯЭУ. Помимо этого, нет достаточной правовой определенности или предсказуемости в эволюции международных правовых рамок.

Поставщики и принимающие стороны ТЯЭУ, желающие работать в атмосфере четких и предсказуемых правовых реалий, могут достичь этой цели, если страна-поставщик и принимающая страна, а также все причастные третьи страны заключат между собой международное соглашение по использованию ТЯЭУ с заводской заправкой.

При отсутствии такого договора поставщик и эксплуатирующая сторона ТЯЭУ будут вынуждены соблюдать действующие национальные законы, правила и международные конвенции.

– Альтернатива 2 (топливо транспортируется отдельно от реактора) не подразумевает необходимости в разработке каких-либо новых правовых инструментов относительно транспорта. Могут потребоваться специальные меры, обеспечивающие возможность перевозки ТЯЭУ (в отличие от топлива) обратно в поставляющую страну. Известны примеры международных перевозок больших облученных компонентов АЭС по специальным соглашениям.

Сценарий 1 (поставщик является эксплуатирующей стороной, а принимающая страна регулирующим органом) и сценарий 2 (юридическое лицо принимающей страны является эксплуатирующей стороной, а принимающая страна выступает регулирующим органом) не создают правовых или институциональных проблем. Важно обеспечить, чтобы коммерческие соглашения по поставкам ТЯЭУ в полном объеме учитывали правовые полномочия поставщика и принимающей страны, а также права на надзор со стороны регулирующего органа принимающей страны, которая в любом случае остается полномочной выдавать лицензии и разрешения на эксплуатацию ТЯЭУ в течение всего срока эксплуатации на своей территории.

2.2 Обзор инновационных реакторных концепций по предотвращению тяжелых аварий и минимизации их последствий (проект RISC)

Непрерывное повышение требований безопасности к современным АЭС с целью уменьшения вероятности тяжёлых аварий, вызывающих необходимость эвакуации населения, приводит в традиционных типах реакторов к наращиванию количества систем и защитных барьеров, ответственных за безопасность. В результате возрастает стоимость электроэнергии АЭС и ухудшаются показатели их конкурентоспособности. Возникает необходи-

мость поиска и перехода в будущем к реакторам со значительно более высоким уровнем внутренней самозащищенности, когда тяжелые аварии, требующие эвакуации населения, будут полностью исключены, так как будут отсутствовать причины, вызывающие тяжелые аварии.

Цель проекта RISC (2014 — 2017) — показать, что эволюция требований безопасности и связанных с ними инноваций позволит избежать эвакуации населения в случае тяжелой аварии на АЭС.

В рамках проекта предусматривалось выполнение несколько мероприятий, в том числе:

1) обзор передовых реакторных концепций (например, поколения 3 и 4), которые разрабатывались после аварий на АЭС Три-Майл-Айленд и в Чернобыле с акцентами на технологии, претендующие на соответствие указанным требованиям по исключению эвакуации населения в случае тяжелой аварии на АЭС;

2) пересмотр тома 8 Руководства ИНПРО по безопасности реакторов с учетом аварии на АЭС Фукусима-1;

3) применение методологии ИНПРО для проведения оценки одной или более концепций на примере условной ЯЭС и предоставление рекомендаций относительно необходимости дальнейшей разработки таких концепций, в том числе доказательство того, что «последний барьер» не рухнет под действием ряда одновременных природных и техногенных катастроф или человеческого фактора;

4) исследование роли многостороннего сотрудничества (например, по унификации требований безопасности) в повышении безопасности глобальной ЯЭС.

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 ядерно-энергетических систем.

Российская сторона выполнила оценки по безопасности быстрого реактора со свинцово-висмутовым охлаждением СВБР-100 (рис. 9).

Основной эффект в обеспечении требуемого для инновационных АЭС уровня безопасности (внутренняя самозащищенность, гарантированное исключение тяжелых аварий) в РУ СВБР-100 [17] достигается за счет следующих характерных особенностей:

– реактор на быстрых нейтронах с химически инертным свинцово-висмутовым теплоносителем — эвтектическим сплавом свинец-висмут в первом контуре;

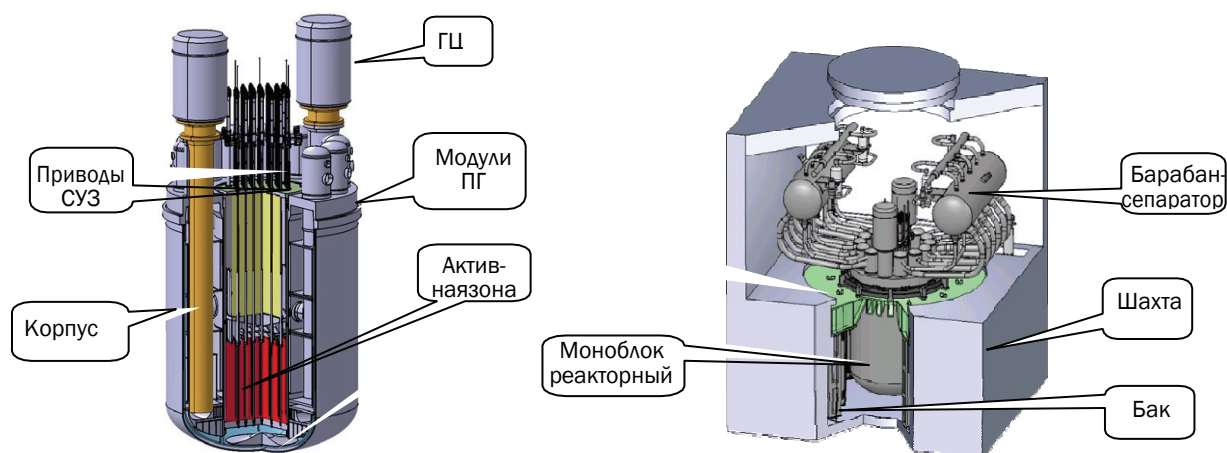


Рис. 9. Реакторный моноблок и компоновка оборудования РУ СВБР-100

- интегральная компоновка реактора, при которой все оборудование первого контура размещено в едином прочном корпусе реакторного моноблока с полным исключением арматуры и трубопроводов;
- реакторный моноблок окружен защитным кожухом и размещен в баке с водой, который является сейсмостойкой опорной конструкцией, выполняющей функции радиационной защиты и системы пассивного отвода тепла при аварийном расхолаживании РУ;
- двухконтурная схема теплоотвода и парогенератор с многократной естественной циркуляцией по второму контуру;
- в теплоотводящих контурах реакторного моноблока обеспечена естественная циркуляция теплоносителей, достаточная для пассивного расхолаживания реактора без опасного перегрева активной зоны;
- значительное сокращение (по сравнению с традиционными реакторами) количества специальных систем безопасности, при этом функции безопасности выполняют системы нормальной эксплуатации;
- основные компоненты реакторного моноблока и реакторной установки выполнены в виде отдельных модулей, при этом обеспечена возможность их замены и ремонта;
- предусмотрена единовременная покассетная выгрузка топлива по окончании кампании активной зоны и загрузка свежего топлива в виде единого картриджа (новой активной зоны);
- ремонт оборудования первого контура и перегрузка топлива могут проводиться без дренирования СВТ при поддержании его в жидком состоянии за счет остаточного энерговыделения активной зоны или работы системы обогрева.

Кроме России еще Канада, Индия и Корея продемонстрировали современные реакторные концепции и сделали детальные оценки по одному или более индикаторам в области безопасности с использованием мето-

логии ИНПРО, а также разработали рекомендации по дальнейшему улучшению этих концепций по критериям безопасности.

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 требованиям безопасности, в том числе требованию по исключению передислокации или эвакуации населения за пределы площадок АЭС в случае тяжелой аварии.

2.3 Анализ ядерного топлива и ядерного топливного цикла будущих ядерных энергетических систем (FANES)

Целью проекта FANES (2014–2017) был анализ существующего ядерного топлива и направления развития ЯТЦ для будущих ЯЭС.

Проект выполнялся во взаимодействии с международными инициативами и учреждениями, в частности с Международной системой для сотрудничества в области ядерной энергии (International Framework for Nuclear Energy Cooperation — IFNEC).

Особый акцент был сделан на вопросы производства ядерного топлива для усовершенствованных и инновационных типов реакторов, которые необходимо решать для устойчивого развития ЯЭ. Исследовалась техническая целесообразность нескольких альтернатив производства усовершенствованного топлива и его переработки в целях выявления ключевых инноваций, необходимых для развертывания будущих ЯЭС.

В результате работы по проекту были подготовлены следующие материалы:

- 1) обзорное исследование предпосылок для создания инновационных технологий ЯТЦ, их преимуществ, статуса и НИР, необходимых для их коммерциализации;

- 2) 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;

- 3) проведено предварительное исследование топлива РЕМИКС и соответствующего топливного цикла, определены перспективы его использования в будущих ЯЭС. Показано, что эта технология позволяет экономить природный уран в ЯТЦ (20–30%) и организовать многократный рецикл регенерированных материалов урана и плутония в ЯТЦ.

В рамках проекта были рассмотрены возможные направления международного сотрудничества в области ЯТЦ и подготовлены предложения по совершенствованию методологии ИНПРО в части, относящейся к ЯТЦ.

2.4 Отходы от инновационных типов реакторов и ядерных топливных циклов (проект WIRAF)

В действующем проекте WIRAF (с 2014 г.) к настоящему времени получены промежуточные результаты.

Представлен обзор национальных стратегий обращения с радиоактивными отходами ряда стран, из которого следует, что все страны, использующие атомную 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 в качестве отходов, 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 и изоляцией высокоактивных отходов в глубинных геологических формациях.

Проведено качественное и количественное рассмотрение всех этапов открытого и замкнутого ядерного топливного цикла современной атомной энергетики с целью сбора и анализа материалов по вопросам радиоактивных отходов, образующихся на начальной стадии ЯТЦ при добыче урана и изготовлении ядерного топлива, при эксплуатации АЭС, на заключительной стадии ЯТЦ и при выводе ядерных установок из эксплуатации. Применение методики оценки потоков РАО проекта WIRAF 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.

2.5 Исследование развертывания малых модульных реакторов с заводской загрузкой ядерного топлива (проект TNPP2)

Основная цель этого действующего проекта заключается в изучении правовых и институциональных вопросов экспортного развертывания транспортабельных ядерных энергетических установок с малыми модульными реакторами (ММР), построенными, загруженными топливом и прошедшими испытания на заводе-производителе. Проект TNPP2 является продолжением и углублением разработки направления, основы которого были заложены проектом ИНПРО по изучению правовых и институциональных вопросов и проблем транспортабельных ядерных энергетических установок (проект ТЯЭУ [16], выполненный в 2008–2013 гг.). В проекте

ТЯЭУ было установлено, что в случае необходимости использования в транспортабельных ядерных энергетических установках реакторов, заправляемых и проходящих испытания на заводе-изготовителе, выявляются очевидные «пробелы» и недостаточное освещение некоторых видов деятельности относительно ТЯЭУ в международном ядерном праве и сопутствующих положениях, а также в не имеющих обязательной силы международных нормах, содержащихся в стандартах по безопасности и рекомендациях по обеспечению защиты МАГАТЭ.

В центре внимания проекта — развертывание транспортабельных ядерных энергетических установок с малыми модульными реакторами (ММР) в странах, отличных от страны-производителя. Согласно определению, ТЯЭУ с ММР является ядерной энергетической установкой заводского изготовления, которую можно транспортировать и перемещать и которая после заправки топливом может производить энергетические продукты для конечного потребителя, такие как электричество, технологическое тепло и т. п. ТЯЭУ можно транспортировать физически, но ее проект не позволяет производить энергию во время транспортировки или обеспечивать энергией сам процесс транспортировки.

В проекте принято, что ММР с полным периодом эксплуатации на одной платформе монтируются из заводских транспортабельных модулей на специально выделенной площадке. В проекте проводится подробное рассмотрение возможных проблем развертывания ММР, изготовленных, заправленных и прошедших испытания на заводе-изготовителе, с последующей доставкой на место эксплуатации в страну за пределами страны происхождения. Основное внимание уделяется международным аспектам транспортировки ТЯЭУ с ММР и отношениям между заинтересованными сторонами на различных этапах жизненного цикла установки. Специфические вопросы, касающиеся правовых положений конкретной страны (например, выбор площадки), не рассматриваются. В ходе работы по проекту обсуждается выработка директив и предложений по возможным решениям в случаях, когда это возможно, и обозначаются трудности, возникающие при заполнении «пробелов» в международном ядерном праве относительно эксплуатационного цикла малых модульных реакторов на заводском топливе.

2.6 Совместные подходы к заключительной части ядерного топливного цикла: развития, правовые, институциональные и финансовые препятствия

Проект «Совместные подходы к заключительной части ЯТЦ: драйверы развития, правовые, институциональные и финансовые препятствия» сфокусирован на оценке роли международного сотрудничества в области ЯТЦ, особенно на вопросах, касающихся его заключительной стадии

(backend). Анализ движущих сил и подробное 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 приобретает всё большее значение в процессе жизненного цикла установок ядерной энергетики и является одним из главных резервов создания долгосрочного устойчивого развития ЯЭ.

Одним из ценных источников информации относительно существующей ситуации в заключительной стадии ЯТЦ в разных странах и ожиданий этих стран по решению имеющихся здесь проблем стал 10-й Диалог-форум ИНПРО по совместным подходам к конечной стадии ЯТЦ, проведенный с целью обсуждения результатов первого этапа выполнения проекта с тем же названием и получения рекомендаций для выполнения второго этапа.

Основными задачами на втором этапе проекта стал анализ подходов разных стран по обращению с ОЯТ и РАО с учетом национальных условий, международных стандартов и требований, а также рассмотрение административно-организационных препятствий на пути реализации этих подходов в законодательной, институциональной, финансовой и социальной областях. По оценкам экспертов, к 2050 г. объём ОЯТ в мире может превысить 650 тысяч тонн по ТМ. Часть накапливаемого ОЯТ перерабатывается. При построении стратегии обращения с ОЯТ принимаются во внимание следующие факторы:

- наличие инфраструктуры по обращению с ОЯТ;
- целесообразность создания и развития такой инфраструктуры;
- наличие необходимых ресурсов и возможностей;
- строгий контроль государством коммерческой сферы ядерной энергетики.

В настоящее время рассматриваются три основных направления в обращении с ОЯТ:

- временное хранение в «сухом» или «мокром» варианте;
- геологическое захоронение ОЯТ и РАО;
- радиохимическая переработка и рециклирование выделенных ядерных материалов и захоронение РАО.

Каждое из направлений имеет определенные преимущества и недостатки и требует учета всех факторов, которые могут повлиять на выбор стратегии в конкретной стране. Для реализации выбранных направлений обращения с ОЯТ государству необходимо будет преодолеть целый ряд административно-организационных препятствий.

Наиболее сложным вопросом является создание собственной полной инфраструктуры заключительной стадии ЯТЦ. Решение этого вопроса. может быть слишком обременительно для страны. Более выгодным 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 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. 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.

Проект ИНПРО по исследованию совместных подходов к заключительной стадии ЯТЦ вносит свой вклад в актуальное направление поиска эффективных системных решений в инновационном развитии ЯЭС и условий для их реализации, которые позволят странам, использующим или планирующим использовать ядерную энергию в мирных целях, разработать стратегию рационального обращения с ОЯТ и РАО как часть общей стратегии устойчивого развития мировой ядерной энергетики.

3 Итоги и основные результаты выполнения проектов, осуществленных в рамках ИНПРО с участием российских организаций

К числу наиболее существенных достижений проекта ИНПРО следует отнести:

- создание Методологии ИНПРО, являющейся в настоящее время единственным согласованным на международном уровне руководством по оценке ядерно-энергетических систем по критериям устойчивого энергетического развития;
- разработку методической основы (GAINS Framework) для построения и анализа глобальных и региональных сценариев развития ЯЭ с целью формирования видения перспектив развития ЯЭ, что необходимо для информирования лиц, принимающих решения, для выработки национальной политики в энергетическом секторе экономики, механизмов сотрудничества между странами-членами, улучшения понимания практических шагов по повышению устойчивости ЯЭС на региональном и глобальном уровнях;
- всестороннюю оценку возможностей технических и организационных инноваций, способствующих повышению устойчивости ЯЭС;

– разработку и адаптацию инструментов расчетного анализа для стран — членов МАГАТЭ и предоставление аналитических и консалтинговых услуг в виде интегрированного пакета услуг МАГАТЭ, предоставляемого странам-членам с учетом уровня их технологического развития и планов по развитию национальных ЯЭС.

Итоги выполненных совместных проектов ИНПРО с участием российских организаций позволяют сделать ряд выводов и заключений:

1) анализ динамики развертывания мощностей ЯЭ в мире позволяет заключить, что невысокие темпы развития с большей вероятностью будут соответствовать действительности, чем высокие;

2) в нынешнем веке глобальная ядерная энергетика, вероятно, будет развиваться в соответствии с гетерогенной моделью мира, в которой большинство стран будет продолжать использовать тепловые реакторы в открытом ЯТЦ, и лишь некоторые страны смогут внедрить быстрые реакторы с замкнутым ЯТЦ;

3) синергетическое сотрудничество между странами в области ЯТЦ, когда страны, проводящие политику открытого ЯТЦ, будут отправлять отработавшее топливо своих реакторов странам, придерживающимся политики рециклирования топлива, могло бы усилить положительный эффект от технологических инноваций в достижении устойчивости ЯЭ и принести выгоды как для широкой группы пользователей ядерных технологий, так и для группы стран, развивающих ядерную технологию;

4) при увеличении доли быстрых реакторов в мире можно было бы существенно сократить накопление отработавшего топлива, выгружаемого из легководных реакторов, обеспечить экономию запасов природного урана и реализовать эффективные решения по использованию плутония;

5) демонстрация экономически приемлемого замкнутого ЯТЦ в странах, утилизирующих отработавшее топливо, имеет решающее значение для построения глобальной инновационной ЯЭС с полным использованием энергетического потенциала плутония, решением проблемы накопления ОЯТ и снижением риска несанкционированного использования ядерного топлива;

6) использование тория может предоставить возможности для решения ряда проблем, влияющих на развертывание ядерной энергетики в некоторых регионах мира, хотя экономические выгоды от использования тория проявятся только при высокой стоимости природного урана;

7) страны, которые не придерживаются программ по быстрым реакторам, могли бы выиграть от синергетического подхода, так как в этом случае снижаются потребности в долгосрочном хранении отработанного топлива и окончательном удалении отходов;

8) выполненные проекты продемонстрировали, что существует ряд важных юридических и институциональных препятствий для сотрудничества между странами в области ЯТЦ. Они будут рассматриваться более подробно, и поиск их преодоления станет важным направлением деятельности в будущих проектах ИНПРО.

Опыт, приобретенный в работе над совместными проектами секции ИНПРО с участием российских специалистов, выполненные концептуальные и инструментальные разработки, полученные новые научные и прикладные результаты, рекомендации и выводы востребованы не только непосредственными участниками проектов, но оказываются полезными и для более широкого круга экспертов, заинтересованных в поиске путей усиления роли ядерной энергетики в решении задач устойчивого развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. UNITED NATIONS, World Energy Assessment, Energy and the Challenge of Sustainability, United Nations Publications, Sales No.OO.II.B5. New York (2000)
2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Web Page of Task 1 “Global Scenarios”:— URL: <http://www.iaea.org/INPRO/activities/index.html>
3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Introduction to the Use of the INPRO Methodology in a Nuclear Energy System Assessment, IAEA Nuclear Energy Series NP-T-1.12, Vienna (2010)
4. Выполнение задач «Глобальные сценарии», «Инновации», «Оценка устойчивости и стратегии» и «Диалог-форум ИНПРО по глобальной устойчивости ядерной энергетики» в рамках участия в Международном проекте по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО): Отчет ФЭИ, инв. № 224/5.42.02–16/13254 / рук. работы В.И. Усанов — Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ, 2018.
5. Орлов В.В., Пономарев Л.И. Ядерные проблемы термоядерной энергетики // Атомная энергия. — 2018. — Т. 24. — Вып. 2. — С. 105—113.
6. Велихов Е.П., Ковальчук М.В., Ильгисонис В.И. и др. Ядерная энергетическая система с реакторами деления и синтеза – стратегический ориентир развития отрасли // ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез. — 2017. — №4. — С. 5—13.
7. Алексеевский Л. Д. Поиск возможной структуры стационарной системы будущей ядерной энергетики с замкнутым ядерным топливным циклом на основе исследования нуклидных балансов // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. — 2008. — №2. — С. 21—26.
8. Моряков А.В., Зинченко А.С., Цибульский В.Ф. и др. Оценка возможности наработки делящихся изотопов для реакторов деления в бланкете

термоядерного реактора // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. — 2019. — Вып. 2. — С. 38—46.

9. Егоров А.Ф., Коробейников В.В. Применение многокритериального анализа для сравнения инновационных ядерно-энергетических систем // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. — 2017. — Вып. 2. — С. 5—13.

10. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Assessment of Nuclear Energy Systems Based on a Closed Nuclear Fuel Cycle with Fast Reactors [IAEA-TECDOC-1639, Vienna \(2010\)](#), (rev1 2012)

11. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Energy Development in the 21st Century: Global Scenarios and Regional Trends, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-1.8, Vienna (2010). — URL: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1476_web.pdf

12. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy Systems, IAEA Nuclear Energy Series, NF-T-2.4, IAEA, Vienna, (2011).

13. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Framework for Assessing Dynamic Nuclear Energy Systems for Sustainability, Final Report of the INPRO Collaborative Project on Global Architectures of Innovative Nuclear Energy Systems with Thermal and Fast Reactors and a Closed Nuclear Fuel Cycle (GAINS), IAEA Nuclear Energy Series NP-T-1.14, Vienna, (2013): Web page. — URL: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1598_web.pdf

14. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Enhancing benefits of nuclear energy technology innovation through cooperation among countries: final report of the INPRO collaborative project SYNERGIES. IAEA Nuclear Energy Series NF-T-4.9 (2018). Web page: <http://www.iaea.org/INPRO/CPs/SYNERGIES/index.html>

15. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Web page of the KIND collaborative project. — URL: <http://www.iaea.org/INPRO/CPs/KIND/index.html>

16. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Legal and Institutional Issues of Transportable Nuclear Power Plants: A Preliminary Study, IAEA Nuclear Energy Series NG-T-3.5, Vienna (2013). — URL: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1624_web.pdf.

17. Зродников А.В., Драгунов Ю.Г., Степанов В.С., Тошинский Г.И. и др. Многоцелевой свинцово-висмутовый модульный быстрый реактор малой мощности СВБР 75/100 // Доклад на Межд. конф. МАГАТЭ «Инновационные ядерные технологии и инновационные топливные циклы», IAEA CN-108-36, 2003. CD-ROM.

Подписано к печати 15.06.20. Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 1,4. Уч.-изд. л. 2,3.
Тираж 30 экз. Заказ № 134.

Отпечатано в ОПиНТИ методом прямого репродуцирования с оригинала авторов.
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.
ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского