

УВЕЛИЧЕНИЕ ПРЕИМУЩЕСТВ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ БЛАГОДАРЯ СОТРУДНИЧЕСТВУ МЕЖДУ СТРАНАМИ

Проект сотрудничества ИНПРО
«Синергетические взаимодействия региональных
групп стран с ядерной энергетикой, оцененные
с позиций устойчивости»
(SYNERGIES)

ОБЗОР ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОГО ОТЧЕТА



INPRO

International Project on
Innovative Nuclear Reactors
and Fuel Cycles

Содержание

Аннотация	3
1. Введение.....	4
2. Основные проблемы повышения устойчивости ЯЭС и возможные решения в рамках проекта SYNERGIES.....	6
3. Тематические исследования в рамках проекта SYNERGIES	13
4. Совместное решение проблем на региональном и глобальном уровнях	14
4.1 Интеграция национальных ядерно-энергетических программ и международного сотрудничества	14
4.2. Региональное сотрудничество	18
5. Синергия между реакторными технологиями	20
5.1. Синергия между технологиями, направленная на использование плутония, и перспективы международного сотрудничества в этой области	20
5.2. Технологическая синергия, направленная на обращение с отходами	23
6. Движущие силы и препятствия на пути к реализации синергетических подходов.....	26
7. Кратко- и среднесрочные меры по повышению устойчивости ядерной энергетики.....	27
8. Аналитический взгляд на синергетический подход и его реализацию	28
9. Заключение	29
Справочные материалы	30
Сокращения	31

Аннотация

В 2000 году было начато осуществление Международного проекта по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО) с целью оказания содействия в обеспечении устойчивости ядерной энергетики с целью удовлетворения растущих энергетических потребностей в XXI веке. Деятельность в рамках ИНПРО направлена на решение основных задач глобальной устойчивости ядерной энергетики, а также на оказание поддержки в вопросах разработки долгосрочных стратегий ее развития.

В настоящей брошюре представлены основные результаты проекта сотрудничества «Синергетические взаимодействия региональных групп стран с ядерной энергетикой, оцененные с позиций устойчивости» (SYNERGIES). Проект осуществлялся в рамках задачи «Глобальные сценарии» ИНПРО, предусматривающей проведение анализа региональных и глобальных сценариев развития ядерной энергетики с целью получения целостного представления о возможных вариантах устойчивого развития ядерной энергетики в мире в текущем столетии.

Заключительный отчет по проекту SYNERGIES был опубликован в 2018 году в Серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии [1].

Проект был реализован в 2012–2015 годах усилиями экспертов из 23 государств — членов МАГАТЭ и одной международной организации. При проведении тематических исследований рассматривались два основных вопроса:

- Возможно ли реализовать устойчивую на глобальном уровне ядерную энергетику?
- Какие технологии и формы международного сотрудничества необходимы для перехода к устойчивой ядерной энергетике в глобальном масштабе?

Благодаря тематическим исследованиям, проведенным в различных странах, была проанализирована потенциальная возможность повышения устойчивости ядерно-энергетических систем (ЯЭС) путем: i) повышения их экономической эффективности и конкурентоспособности; ii) обеспечения эффективности использования ресурсов и решения проблем утилизации отходов; iii) повышения защищенности от распространения (устойчивости с точки зрения нераспространения); iv) обеспечения высокого уровня ядерной безопасности и физической ядерной безопасности; v) повышения социального и общественного принятия.

В результате осуществления проекта был сделан вывод, что синергетические взаимодействия между технологиями реакторов различных типов и соответствующими топливными циклами уже реализованы в некоторых странах и продемонстрировали свою практическую ценность. В тоже время такого рода взаимодействия представляются перспективными также в решении задач эффективного использования делящихся материалов, обращения с радиоактивными отходами, а также улучшения экономической конкурентоспособности и обеспечения защищенности от распространения.

В проекте был также рассмотрен вопрос о сотрудничестве между странами — обладателями и странами — пользователями ядерных технологий с применением синергетического подхода. Результаты тематических исследований позволили сформировать более полное представление о движущих силах и препятствиях, присущих различным формам партнерств в разработке и осуществлении национальных ядерно-энергетических программ.

Проект позволил определить такие различные формы взаимодействия между странами, как: сотрудничество (ядерная торговля) на начальной и конечной стадиях ядерного топливного цикла; оказание обладателями технологий поддержки в осуществлении национальных программ НИОКР и развертывании ядерно-энергетических систем в странах — пользователях технологий; устойчивое региональное сотрудничество; совместная разработка и совершенствование инструментов для моделирования сценариев сотрудничества, способных повысить устойчивость ядерной энергетики на региональном и глобальном уровнях.

1. Введение

В 1987 году в докладе Всемирной комиссии по вопросам окружающей среды и развития Организации Объединенных Наций [2] (часто называемом докладом Комиссии Брундтланд) устойчивое развитие было определено как развитие, которое отвечает «потребностям нынешнего поколения, не лишая будущие поколения возможности удовлетворять свои потребности». В главе 7 раздела III доклада Комиссии Брундтланд, в частности, представлены замечания, касающиеся ядерной энергии. Основное внимание в докладе уделяется решению ряда институциональных и технологических проблем (называемых «ключевыми вопросами») устойчивого развития ядерной энергетики. В докладе Комиссии Брундтланд были выделены и сформулированы семь ключевых вопросов:

- риски распространения;
- экономика;
- риски для здоровья и окружающей среды;
- риски ядерных аварий;
- удаление радиоактивных отходов;
- достаточное развитие национальных и международных институтов (с особым акцентом на межпоколенческие и транснациональные обязанности);
- общественное принятие.

С тех пор произошел ряд значимых событий, связанных с устойчивым развитием, однако ни одно из них не изменило определение, данное в докладе Комиссии Брундтланд [3–4].

В частности, на Конференции Организации Объединенных Наций по устойчивому развитию («Рио+20»), состоявшейся в 2012 году, был принят итоговый документ «Будущее, которого мы хотим» [5], в котором изложены практические меры, направленные на обеспечение устойчивого развития. На Конференции «Рио+20» государства-члены взяли на себя обязательство разработать комплекс Целей устойчивого развития (ЦУР) на основе целей в области развития, сформулированных в Декларации тысячелетия Организации Объединенных Наций, и с использованием повестки дня в области развития на период после 2015 года.

В 2015 году была начата разработка новой универсальной, комплексной программы преобразований в виде повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года. Итоговый документ по повестке дня был представлен на саммите в сентябре 2015 года, и Генеральная Ассамблея Организации Объединенных Наций официально приняла эту программу, получившую название «Преобразование нашего мира: повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года», а также комплекс из 17 целей в области устойчивого развития (ЦУР) и 169 соответствующих задач [6].

Существует две основные ЦУР, с которыми напрямую связаны ЯЭС: недорогостоящая и чистая энергия (ЦУР 7) и борьба с изменением климата (ЦУР 13). Повышение устойчивости ядерной энергетики приводит к устранению многих проблем общественного принятия и в конечном итоге к увеличению доли ядерной энергии в мировом производстве энергии, что оказывает положительное влияние на смягчение последствий изменения климата.

Деятельность ИНПРО сфокусирована на ключевых проблемах глобальной устойчивости ядерной энергетики и разработке долгосрочных ядерно-энергетических стратегий, с тем чтобы ядерная энергетика была доступной и приемлемой по затратам для удовлетворения национальных энергетических потребностей. В сотрудничестве с государствами — членами МАГАТЭ в рамках ИНПРО были определены требования к устойчивости ЯЭС в соответствии с концепцией устойчивого развития Организации Объединенных Наций.

Для решения конкретных вопросов, связанных с разработкой и внедрением устойчивых ЯЭС, в ИНПРО была разработана методология оценки устойчивости ЯЭС [7, 11]. В этой методологии ИНПРО согласно концепции устойчивого развития Организации Объединенных Наций предусмотрены семь предметных областей, которые являются ключевыми для ядерной энергетики: экономика, обращение с отходами, инфраструктура, защищенность от распространения, физическая защита, окружающая среда и безопасность.

Ежегодно около 10 500 тонн отработавшего ядерного топлива добавляется к накопленным в мире 270 000 тоннам, по которым ожидаются решения государств, использующих ядерную энергетику. Количество отработавшего ядерного топлива будет продолжать расти в связи с ожидаемым развитием ядерной энергетики, если не будут внедрены безопасные, надежные и устойчивые технические решения в этом направлении. Это одна из основных проблем в обеспечении устойчивости ЯЭС; кроме того, в ядерной энергетике имеются проблемы, связанные с экономической конкурентоспособностью, ядерной безопасностью, защищенностью от распространения и физической ядерной безопасностью. Несмотря на значительное развитие ядерных технологий, поиск конкурентоспособных, экологически безвредных и безопасных решений, которые являются социально и политически приемлемыми, остается непростой задачей.

Одно из направлений деятельности ИНПРО в области глобальных сценариев связано с изучением сценариев перехода к будущим ЯЭС с повышенной устойчивостью для достижения понимания ключевых проблем и возможностей, связанных с таким переходом. Эта деятельность направлена на разработку и изучение долгосрочных сценариев с целью определения технологических вариантов, экономических показателей, инфраструктуры и механизмов сотрудничества применительно к будущим ЯЭС, которые обеспечат повышение устойчивости ядерной энергетики в региональном и глобальном масштабах.

В настоящее время несколько проектов сотрудничества по задаче «Глобальные сценарии» завершены, другие находятся в процессе осуществления, и эта задача направлена на разработку и применение аналитических инструментов моделирования сценариев развития ЯЭС с целью определения возможностей для совместного внедрения технологических инноваций и сотрудничества между странами в интересах повышения устойчивости ЯЭС. Один из таких проектов сотрудничества назывался «Синергетические взаимодействия региональных групп стран ядерной энергетикой, оцененные с позиций устойчивости» (SYNERGIES) [1]. Он стал продолжением проекта сотрудничества «Глобальная архитектура инновационных ядерно-энергетических систем с тепловыми и быстрыми реакторами и замкнутым топливным циклом» (GAINS) [3], в результате осуществления которого были разработаны методические основы для анализа и оценки сценариев перехода к устойчивым ЯЭС [12]. Проект SYNERGIES был инициирован вследствие значительного интереса, проявленного странами — членами ИНПРО к дальнейшей разработке и применению синергетического подхода GAINS, но уже преимущественно на региональном, а не глобальном уровне а качестве метода оценки использования технологических инноваций и сотрудничества между странами (в области ядерной торговли) в целях повышения устойчивости ядерной энергетики. Основная цель этого проекта состояла в том, чтобы определить и оценить взаимовыгодные формы сотрудничества, а также движущие силы и возможные препятствия, связанные с созданием устойчивых в региональном и глобальном масштабах ЯЭС на основе синергетики i) имеющихся и инновационных ядерно-энергетических технологий и ii) различных формы сотрудничества (ядерной торговли) между странами. Синергия в контексте ядерной энергетики — это те действия, которые страна или группа стран могут предпринять, с тем чтобы облегчить (т.е. обеспечить, ускорить и оптимизировать) процесс развертывания ЯЭС с повышенной устойчивостью.

Проект был осуществлен в 2012–2016 годах под эгидой МАГАТЭ экспертами из Алжира, Аргентины, Армении, Бельгии, Болгарии, Вьетнама, Израиля, Индии, Индонезии, Испании, Италии, Канады, Китая, Малайзии, Пакистана, Польши, Республики Корея, Российской Федерации, Румынии, Соединенного Королевства, США, Украины, Франции, Японии а также Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР). Важным преимуществом проекта было то, что страны-участницы проекта имели разные индивидуальные предпочтения, а также обладали различными компетенциями в области развития ядерной энергетики и международного сотрудничества.

В настоящей брошюре представлено краткое изложение основных результатов проекта SYNERGIES.

2. Основные проблемы повышения устойчивости ЯЭС и возможные решения в рамках проекта SYNERGIES

Концепция устойчивости ЯЭС стала разрабатываться ИНПРО с целью расширения возможностей ядерной энергетики по удовлетворению энергетических потребностей в XXI веке в соответствии с принципами и целями, изложенными в «Повестке дня в области устойчивого развития» ООН [13–14]. В ИНПРО были разработаны два методологических подхода для оценки устойчивости: «Оценка устойчивости ядерно-энергетических систем» (NESA) [7–11], которая представляет собой методологию всесторонней оценки ЯЭС, и методическая основа для анализа и оценки различных сценариев перехода к устойчивым ядерно-энергетическим системам, получившая название методическая основа GAINS [13].

Выбор индикаторов для оценки устойчивости в подходе GAINS в широком смысле основан на методологии ИНПРО для оценки ЯЭС, но в большинстве случаев не дублирует ее. Он сужен и ориентирован на те области, которые важны именно для анализа сценариев (т.е. оценка может выполняться посредством анализа материальных потоков и соответствующего экономического анализа). Индикаторы, рассматриваемые в GAINS, относятся к следующим основным областям: наличие ресурсов и генерация отходов, соответствующие кривые мощности рассматриваемых ядерных реакторов, радиоактивность и радиотоксичность отходов, потребности в услугах топливного цикла, затраты и необходимые инвестиции. Другие важные области, такие как безопасность и физическая защита, не охватываются индикаторами GAINS, но предполагается, что они могут быть проанализированы с помощью других оценок в рамках методологии ИНПРО.

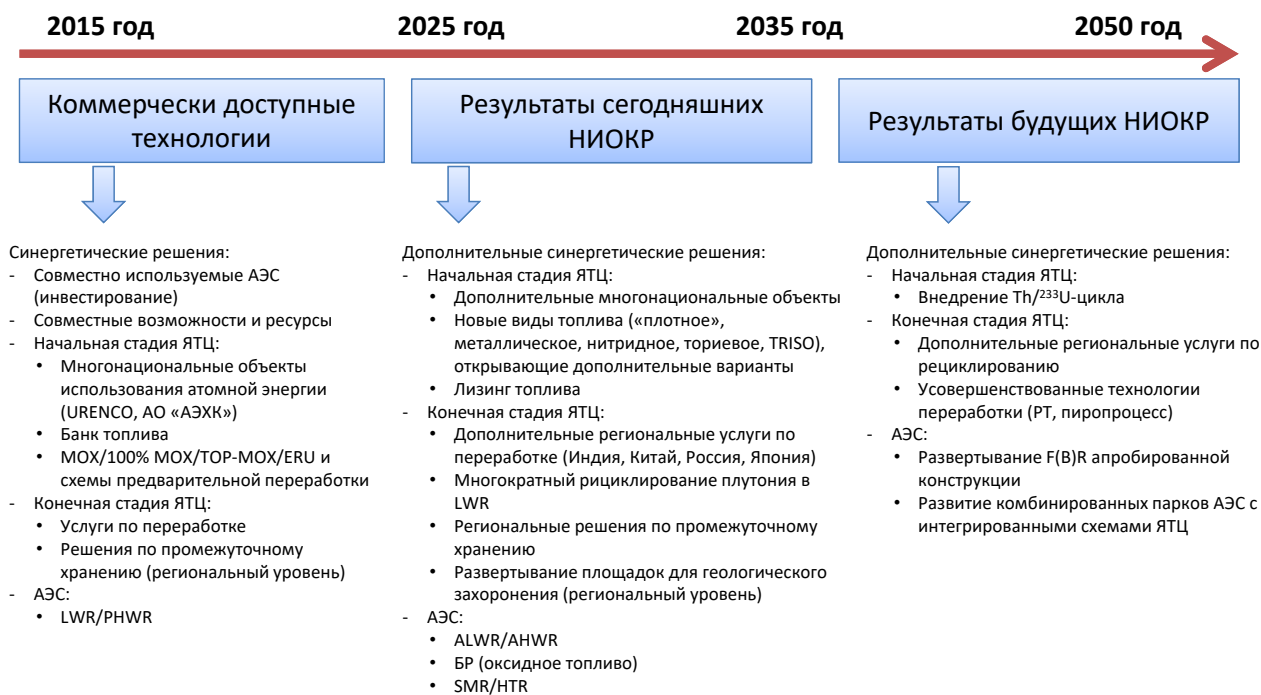
В проекте сотрудничества SYNERGIES использовались и были дополнительно усовершенствованы тот же подход и те же индикаторы, что и в проекте GAINS [13]. Цель исследований состояла в том, чтобы изучить сценарии перехода к устойчивым решениям в области ядерной энергетики как для стран — обладателей, так и для стран — пользователей технологий с позиций достаточности ресурсов и минимизации отходов, своевременного достижения требуемых мощностей ядерной энергетики, минимизации долгоживущих радиотоксичных отходов, а также увеличения преимуществ использования широким кругом стран дорогостоящих в разработке инновационных технологий при приемлемых затратах, достигаемых за счет взаимовыгодного сотрудничества со странами — обладателями технологий в области ядерного топливного цикла.

С учетом целей и задач проекта SYNERGIES (анализ материальных потоков и экономический анализ) в рассмотрение были включены следующие основные проблемы повышения долгосрочной устойчивости ядерной энергетики:

- a) прогрессирующее накопление отработавшего ядерного топлива, порождающее бремя для будущих поколений;
- b) неэффективное использование природных ресурсов делящихся материалов, которое в будущем может привести к истощению ресурсной базы делящихся материалов;
- c) наличие в отработавшем ядерном топливе материалов прямого использования (плутония), первоначально в облученной форме и через несколько сотен лет уже в форме, которая может быть классифицирована как необученная, что может привести к проблемам, которые будут оставаться актуальными на протяжении длительного периода (порядка сотен тысяч лет), в области защищенности от распространения и физической безопасности в случае прямого захоронения отработавшего ядерного топлива в виде отходов в государствах, не обладающих ядерным оружием;
- d) огромные инвестиции, требующиеся для разработки и внедрения инновационных технологий в ядерной энергетике, ведущие к неприемлемо высокой стоимости таких инноваций для многих существующих и потенциальных пользователей ядерных технологий;
- e) риски, связанные с глобальным распространением чувствительных технологий обогащения урана и переработки отработавшего ядерного топлива, устранение последствий которых ляжет тяжелым бременем на плечи будущих поколений.

Известно, что не все страны, использующие или планирующие использовать ядерную энергетику, смогут самостоятельно решить все перечисленные выше проблемы, связанные с обеспечением устойчивости. Даже

если это будет технически возможно в случае некоторых из таких стран, решить все проблемы повышения устойчивости в одиночку будет экономически затруднительно. Большинство этих стран будут полагаться на импорт «коммерчески доступных» ядерно-энергетических технологий и поставки ядерного топлива и других услуг ядерного топливного цикла со все большим акцентом на региональное или международного сотрудничество между странами. Можно ли реализовать глобальное развертывание устойчивой ядерной энергетики и какие технологии и формы международного сотрудничества потребуются для продвижения вперед в направлении развития устойчивой ядерной энергетики в глобальном масштабе? Этот основной вопрос был изучен в проекте сотрудничества SYNERGIES на примере тематических исследований стран-участниц. Эти исследования проводились исходя из полного набора возможных решений, представленных на рис. 1.



PT — разделение и трансмутация; AHWR — усовершенствованный тяжеловодный реактор; ALWR — усовершенствованный легководный реактор; ERU — обогащенный уран; F(B)R — быстрый реактор/быстрый реактор-размножитель; HTR — высокотемпературный реактор; LWR — легководный реактор; MOX — смешанное оксидное топливо; PHWR — корпусной тяжеловодный реактор; SMR — модульный реактор малой мощности; TOP MOX — контракт на поставку MOX-топлива, по которому поставляемое MOX-топливо содержит больше плутония, чем отработавшее топливо, переработанное для получения MOX-топлива; TRISO — трехструктурное изотропное топливо

Рис. 1. Полный набор решений, рассмотренных в проекте SYNERGIES

Набор возможных решений основан на существующих, эволюционных и инновационных технологиях с потенциалом повышения устойчивости ядерной энергетики. Варианты технологических решений были структурированы на основе обобщенных вариантов топливного цикла с привязкой обобщенных вариантов реакторов к вариантам топливного цикла. Это было сделано ввиду того, что реакторные технологии могут быть общими для нескольких вариантов топливного цикла, при этом число вариантов топливного цикла ограничено и они хорошо известны. Подробная информация о ядерных реакторах, связанных с определенными вариантами топливного цикла, приводится в приложении V публикации [1].

Для технологий топливного цикла были определены следующие варианты:

Вариант А. Открытый топливный цикл

В настоящее время — это наиболее распространенный, хотя и не единственный вариант, реализованный в большинстве стран, использующих ядерную энергетику. Сегодня в открытом (незамкнутом) топливном цикле работают многочисленные легководные реакторы (LWR), включая реакторы с графитовым замедлителем, газоохлаждаемые реакторы, тяжеловодные реакторы (HWR), а также реакторы некоторых других типов.

Вариант В. Рецикл отработавшего топлива только с физической переработкой

Этот вариант предусматривает однократное повторное использование (рецикл) отработавшего ядерного топлива реакторов определенного типа в ядерных реакторах другого типа без химической переработки. Такой подход позволяет в небольшой степени экономить ресурсы природного урана и уменьшить объем отработавшего ядерного топлива, предназначенного для окончательного захоронения, избегая при этом использования технологии химической переработки, чувствительной с точки зрения нераспространения. НИОКР, проведенные по этой технологии применительно к однократному рециклу отработавшего топлива LWR в HWR — прямое использование отработавшего топлива PWR в реакторах CANDU (DUPIC-процесс), показали, что данные технологии находятся на уровне отработки, допускающем практическую реализацию. Вместе с тем, такой топливный цикл до сих пор не был осуществлен.

Вариант С. Ограниченное рециклирование отработавшего топлива

Этот вариант направлен на улучшение использования ресурсов и минимизацию подлежащих окончательному захоронению отходов. Ограниченное рециклирование сокращает объемы отработавшего ядерного топлива, позволяет добиться некоторого улучшения использования ресурсов и обеспечивает доступность ресурсов воспроизводящего топлива для последующих вариантов повышения устойчивости, тем самым обеспечивая некоторую гибкость для управления использованием ядерных материалов в долгосрочной перспективе. Достижимый эффект аналогичен по масштабу, хотя и несколько больше, чем в варианте В, представленном выше.

Этот вариант требует разработки и осуществления чувствительной с точки зрения нераспространения промышленной (химической) переработки отработавшего топлива и изготовления топлива из ранее облученных материалов. Некоторые государства-члены уже внедрили эти технологии и успешно применяют их в коммерческом масштабе в течение нескольких десятилетий, предоставляя ряду других стран услуги по приему возвращаемого отработавшего ядерного топлива с возвратом конечных отходов — остеклованной смеси продуктов деления и минорных (младших) актинидов и смешанного оксидного топлива LWR, а также топлива в рамках услуг по поставке переработанного урана. Такой опыт иллюстрирует возможность предупреждения получения широкого доступа к технологиям химической переработки, чувствительным с точки зрения нераспространения, путем концентрации производства на ограниченном количестве объектов, предоставляющих услуги по рециклированию клиентам в других странах.

К реакторам, работающим (или потенциально могущим работать) по этому варианту, относятся LWR, опционально HWR, сверхвысокотемпературные реакторы (VHTR) и реакторы с водяным охлаждением сверхкритических параметров (SCWR).

Вариант D. Полный рецикл отработавшего топлива

С использованием замкнутого топливного цикла и воспроизводством делящихся материалов все природные ресурсы делящегося (^{235}U) и воспроизводящего (^{238}U) урана и тория (^{232}Th) могут быть в конечном счете использованы путем преобразования всех делящихся материалов в воспроизводящие материалы с их последующим делением. Этот вариант повышения устойчивости позволяет реализовать практически полное использование энергетического потенциала ядерного топлива. Данный вариант обеспечивает также снижение на порядок (в 10 раз) бремени радиотоксичности долгоживущих высокоактивных отходов (ВАО) благодаря исключению плутония из отходов.

В случае полной реализации варианта D использование ранее добытого урана, который в настоящее время содержится в отработавшем ядерном топливе и запасах обедненного урана, позволит решить проблему исчерпания топливных ресурсов и обеспечения топливом в течение очень длительных периодов времени (>1000 лет) без дополнительной добычи природного урана. Такой вариант также поможет в достижении целей, определенных Комиссией Брундтланд в отношении использования невозобновляемых ресурсов [2]. Хотя нынешнее поколение будет использовать имеющиеся в настоящее время ресурсы, будущие поколения смогут извлечь больше энергии из оставшихся ресурсов, чем все предыдущие поколения вместе взятые.

Этот вариант требует разработки и развертывания технологий реакторов-размножителей или реакторов, работающих в равновесном топливном режиме (с коэффициентом воспроизводства ~ 1), но при этом он уменьшает или исключает необходимость использования чувствительной с точки зрения нераспространения технологии обогащения урана.

Вариант D может основываться на использовании урана или тория в качестве источника воспроизводящих материалов, включая материалы из отработавшего топлива LWR. Однако для его реализации может потребоваться очень много времени, поскольку его внедрение в большинстве стратегий будет ограничиваться наличием плутония или ^{233}U из отработавшего ядерного топлива и может потребовать ввода в строй большого количества быстрых реакторов (до 60% и более в пропорциональном отношении от всех ядерных генерирующих мощностей). Вместе с тем, чтобы стать реальностью в будущем, соответствующие технологии должны разрабатываться в настоящее время.

Как и вариант C, вариант D (полный рецикл отработавшего топлива) позволит предупредить получение широкого доступа к чувствительным с точки зрения нераспространения технологиям мокрой или сухой химической переработки благодаря концентрации производства на ограниченном количестве объектов, предоставляющих услуги по рециклированию клиентам в рамках механизмов международной ядерной торговли в других странах, не имеющих перерабатывающих предприятий.

К реакторам, которые могут работать в соответствии с этим вариантом, относятся, в частности, реакторы-размножители или реакторы, работающие в равновесном топливном режиме, и реакторы-выжигатели, которые используют избыточные делящиеся материалы, нарабатываемые в реакторах-размножителях. Таким образом, в их число могут входить LWR, HWR, натриевые и свинцовоохлаждаемые быстрые реакторы, газоохлаждаемые быстрые реакторы, VHTR и жидкосолевые реакторы (MSR).

Вариант E. Трансмутация минорных актинидов или минорных актинидов и продуктов деления

Замкнутый топливный цикл, в котором рециклируются все актиниды и захораниваются только продукты деления, обеспечит получение максимальных выгод от использования ресурсов при одновременной минимизации опасностей, которую создают отходы. В случае этого варианта, основанном на технологиях предыдущих вариантов, требуется дополнительная разработка и внедрение технологий переработки топлива и отделения минорных актинидов, изготовления топлива, содержащего минорные актиниды/мишени, а также технологий дистанционного изготовления топлива/мишеней.

Несколько десятилетий назад рассматривалась также возможность трансмутации долгоживущих продуктов деления наряду с минорными актинидами. Поскольку было установлено, что в долгосрочной перспективе радиотоксичность долгоживущих продуктов деления намного меньше, чем у минорных актинидов, дальнейшие исследования в этой области были практически свернуты.

К ядерным установкам, которые могут быть использованы в соответствии с вариантом E (трансмутация минорных актинидов или минорных актинидов и продуктов деления), относятся реакторы на быстрых нейтронах, электроядерные установки ADS (ЭЛЯУ) с ускорителями-драйверами и жидкосолевые реакторы (MSR). Хотя в некоторых государствах-членах отмечается существенный прогресс в области НИОКДР по таким инновационным технологиям, реалистичные сроки их внедрения можно прогнозировать только на вторую половину нынешнего столетия.

Вариант F. Окончательное геологическое захоронение всех отходов

Вариант F (окончательное геологическое захоронение отработавшего ядерного топлива/радиоактивных отходов высокого уровня активности) применим ко всем вариантам A–E, описанным выше. Соответственно к каждому обобщенному варианту топливного цикла может быть добавлен вариант F (например, это может быть AF, BF, CF и т.д.), и только с таким дополнением они могут рассматриваться в плане обеспечения или повышения устойчивости.

Однако материал для захоронения будет разным в различных вариантах. В вариантах A–C это будет отработавшее ядерное топливо (плюс ВАО в случае варианта C), а в вариантах D и E — только ВАО. В случае варианта D захораниваемый материал — это смесь продуктов деления и минорных актинидов; в варианте E — комбинация продуктов деления, в которой потенциально не содержатся или имеются лишь некоторые долгоживущие продукты деления и минорные актиниды.

В существующих ЯЭС предусматривается будущее захоронение всех отходов и в настоящее время разрабатывается несколько проектов по окончательному захоронению, однако на сегодняшний день действующих пунктов захоронения отработавшего ядерного топлива или ВАО не существуют. Вариант F предназначен для решения политически важной проблемы обращения с отходами путем

захоронения отработавшего ядерного топлива и/или ВАО. Целесообразно, по-видимому, также предусмотреть возможность извлечения отработавшего ядерного топлива и ВАО из захоронений с тем, чтобы не ограничивать выбор для будущих поколений, которые, возможно, сочтут целесообразным использовать отработавшее ядерное топливо в качестве ресурса или внедрять усовершенствованные технологии обращения с ВАО.

Прямое захоронение отработавшего ядерного топлива может сопровождаться необходимостью долгосрочного обеспечения дополнительных мер по гарантиям и обеспечению физической ядерной безопасности. Например, в рамках существующих проектов пунктов захоронения предусматривается 100-летний период эксплуатации в открытом режиме с подходом к применению гарантий в течение всего периода, который уже был определен. В соответствии с положениями соглашений о всеобъемлющих гарантиях, однако, гарантии в отношении ядерного материала могут быть прекращены только в том случае, если будет установлено, что этот материал является нерегенерируемым, но это может быть не так даже после закрытия пунктов для захоронения. Следовательно, к истечению 100-летнего срока необходимо будет точно определить, как именно будут применяться гарантии в течение последующего очень длительного периода. В настоящее время нет согласия в отношении того, как действовать в долгосрочной перспективе, но предлагаемые концепции изучаются.

В вариантах С–Е, где необходимы крупномасштабная переработка отработавшего ядерного топлива, хранение и перемещение плутония, а также изготовление плутониевого топлива, потребуются осуществление наиболее строгих гарантий и мер по обеспечению физической ядерной безопасности в отношении запасов материалов в балк-форме и в виде предметов, которые отсутствуют в вариантах А и В, описанных выше. Вместе с тем имеется практический пример применения гарантий при переработке отработавшего ядерного топлива в промышленных масштабах.

Вариант А обеспечения устойчивости является основополагающим для любой устойчивой ЯЭС. Варианты В–Е могут постепенно повысить ресурсную устойчивость ЯЭС, а также существенно снизить объемы отходов в долгосрочной перспективе. Это, в свою очередь, может способствовать реализации варианта F (окончательное геологическое захоронение всех отходов). Однако необходимо позаботиться о том, чтобы внедряемые усовершенствованные технологии и инфраструктура существенно не увеличивали общие затраты. Экономическая конкурентоспособность по сравнению с другими вариантами энергетики является и останется важной движущей силой в развитии ядерной энергетики, наряду с национальными и международными соображениями, такими как диверсификация ресурсов или решение экологических проблем, например сокращение выбросов парниковых газов. Следует также отметить, что переход от варианта AF к варианту EF может осуществляться в динамике с участием многих стран и партнеров.

На рис. 2 представлена схема возможного комбинирования различных технологических вариантов для достижения синергии в повышении устойчивости ЯЭС. Такого рода синергия между технологиями может быть рассмотрена странами с развитыми технологическими возможностями и достаточно масштабной национальной ЯЭС. В случае других стран единственным возможным решением представляется сочетание технологических вариантов и сотрудничества с развитыми странами.

Следует отметить, что даже для по сути «технологической» синергии, которая может быть реализована в рамках одной масштабной национальной ядерно-энергетической программы, сотрудничество с другими странами будет в большинстве случаев полезным для достижения, ускорения или оптимизации синергетических взаимосвязей между технологиями.

Одним из эффективных решений по предоставлению возможности использования преимуществ, обеспечиваемых вариантами с повышенной устойчивостью, для более широкого круга пользователей является сотрудничество между странами в области эксплуатации объектов топливного цикла. Как было показано в предыдущих исследованиях ИНПРО [1], такое сотрудничество позволит странам новичкам и странам с небольшими ядерно-энергетическими программами снизить вложения в разработку технологий и инфраструктуры, помогая им получить выгоды, обеспечиваемые вариантами с повышенной устойчивостью. Базовый принцип методологии ИНПРО в области инфраструктуры предусматривает разработку и применение региональных и международных механизмов. Анализ преимуществ сотрудничества в ядерном топливном цикле был одной из целей совместного проекта SYNERGIES. В этом проекте были исследованы варианты увеличения преимуществ использования инноваций посредством синергетического сотрудничества в области ядерных топливных циклов.

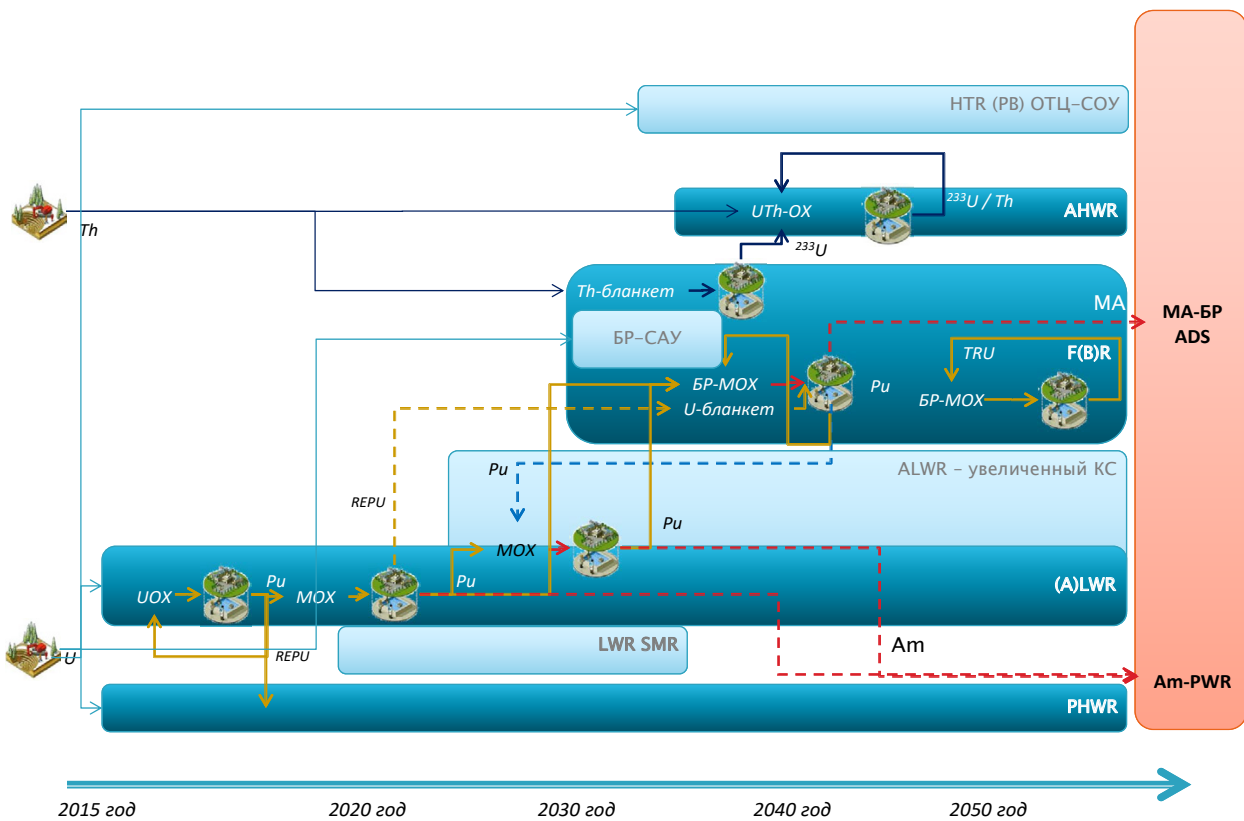


Рис. 2. Схематическое представление рассматриваемой возможной синергии между технологиями

Сотрудничество может способствовать достижению улучшений по всем тематическим направлениям ИНПРО, относящимся к устойчивости. Безопасность повышается благодаря обмену не только передовыми технологиями, но также информацией и знаниями о требованиях к безопасности и сертификации конструкции, а также людскими ресурсами. Защищенность от распространения и ядерная физическая безопасность могут быть повышены путем ограничения количества объектов, на которых используются технологии обогащения и переработки, и объема связанных с ними запасов делящихся материалов. Экономическая эффективность и инфраструктурная составляющая улучшаются благодаря оптимизации инвестиций в исследования и разработки, а также за счет улучшения обучения и реализации эффекта масштаба при создании и эксплуатации более крупных установок топливного цикла. Безопасность энергоснабжения может быть улучшена с помощью политических договоренностей. Наконец, в вопросах, касающихся охраны окружающей среды и обращения с отходами, улучшения достигаются посредством обеспечения возможности для большего числа стран воспользоваться выгодами от реализации вариантов ЯЭС с повышенной устойчивостью, например путем использования услуг в области топливного цикла, предоставляемых странами, в которых имеются предприятия по рециклированию, или благодаря участию в многосторонних схемах захоронения отходов.

Важно отметить, что торговля и сотрудничество в ядерной области в целом существенно отличаются от торговли и сотрудничества в других областях более жестким регулированием, например путем заключения соглашений между странами, а также между странами и МАГАТЭ. Эти «соглашения о сотрудничестве в области мирного использования атомной энергии» содержат более сложные условия, ограничения и обязательства, чем те, которые предусмотрены в соглашениях, регулирующих торговлю товарами, изделиями и услугами. Текущее состояние международной торговли и сотрудничества в области ядерной энергетики и ядерных топливных циклов представлено ниже.

Нынешний режим ядерной торговли регулируется преимущественно двусторонними соглашениями о сотрудничестве в области мирного использования атомной энергии (далее называемыми «двусторонними соглашениями»). Эти соглашения обычно охватывают условия ядерной торговли между двумя государствами в широком смысле, включая общие правовые условия, ограничения и обязательства, которые будут применяться ко всем заключенным сделкам и видам деятельности (например, так называемому «предполагаемому экспорту» или deemed exports в англоязычном варианте, включающему

торговлю интеллектуальной собственностью) между сторонами в течение срока действия договора. Часто условия двусторонних соглашений являются взаимными, и обе стороны имеют равные правовые условия и обязательства, хотя иногда могут быть и некоторые различия в случае, если они согласовываются между сторонами. В эти двусторонние соглашения также включаются так называемые «последующие договоренности», обычно предусматриваемые в качестве приложений к соглашениям, которые определяют дополнительные условия и обязательства, применяемые к конкретным сделкам, согласованным предметам и видам деятельности, связанными с данным двусторонним соглашением [15]. Заключаемые под «зонтиком» соглашений и последующих договоренностей контракты должны полностью соответствовать условиям этого правового инструментария в сфере торговли.

Как правило, государство становится участником торговли в ядерной области путем переговоров и заключения ряда двусторонних соглашений с различными государствами-обладателями и государствами-потребителями. Таким образом, правовая основа торговли развивается в соответствии с потребностями растущей ядерной отрасли государства как за счет импорта, так и экспорта в зависимости от конкретной ситуации. Она обеспечивает надежные поставки государству и обычно содержит обязательства, в том числе связанные с безопасностью, физической безопасностью и нераспространением, обеспечивающие соблюдение двусторонних соглашений. В процессе торговли происходит накопление и распределение ядерных материалов, услуг и оборудования, а также вместе с тем обязательств по двусторонним соглашениям. В результате возникает сложная структура международно-правовой взаимозависимости между государствами, которые на законных основаниях сотрудничают в области ядерной энергетики. При этом важно отметить, что национальная политика, законы, правила ввоза и захоронения радиоактивных отходов и ОЯТ других стран, положения о передаче и переработке ядерных материалов в двусторонних соглашениях, различия в возможностях партнеров в области проведения НИОКДР, в уровне экспертных знаний, инфраструктуре, кадровом обеспечении и финансировании могут являться препятствиями для эффективного осуществления международной торговли и сотрудничества в области ядерной энергетики и ядерного топливного цикла.

В редких случаях заключаются более широкие многосторонние соглашения о сотрудничестве. Наиболее ярким примером является «Договор об учреждении Европейского сообщества по атомной энергетике» (далее именуемый «Договор о Евратоме»), подписанный в 1957 году [16]. С помощью Договора о Евратоме был создан единый ядерный рынок, и теперь условия этого договора распространяются на всех членов Европейского Союза.

На первый взгляд соглашения, регулирующие международную торговлю и сотрудничество в области ядерной энергетики и топливного цикла могут препятствовать обеспечению конкурентоспособности в торговле в условиях менее регулируемых рынков. Однако развитие ядерной энергетики и ядерная торговля в мирных целях подразумевают передачу значительного объема уникальных обязательств и ответственности. Сложный режим ядерной торговли помогает управлять такими специфическими и уникальными рисками, связанными с развитием ядерной энергетики. Несмотря на редкость, некоторые примеры многосторонних соглашений (например, Договор о Евратоме [V.13]), а также растущее число поставщиков и двусторонних соглашений между некоторыми странами (атомные электростанции, поставки топлива и услуг) указывают на то, что в будущем преимущества конкурентной торговли, по-видимому, будут достигаться в отношении разнообразных поставок в области ядерной энергетики и ядерного топливного цикла в рамках устоявшихся моделей регулирования международной торговли и сотрудничества в ядерной сфере. Международное сотрудничество также имеет решающее значение для разработки следующего поколения ядерных реакторов.

3. Тематические исследования в рамках проекта SYNERGIES

Тематические исследования, проведенные в рамках проекта SYNERGIES, позволили наметить пути решения проблем повышения устойчивости региональных и глобальных ЯЭС и проанализировать их. Участники этих мероприятий провели углубленные исследования на страновом уровне, в которых изучалось развитие ядерной энергетики в долгосрочной перспективе в соответствующих странах, рассматривалась синергия между различными технологиями и вариантами регионального и глобального сотрудничества. Всего было проведено 27 тематических исследований. В этих тематических исследованиях в соответствии с подходом SYNERGIES был проанализирован ряд сценариев, охватывающих различные технологические варианты и возможности сотрудничества применительно к конкретным условиям и национальным целям. В 21 тематическом исследовании конкретно рассматривается синергия между технологиями, в 20 тематических исследованиях — синергетическое сотрудничество на конечной стадии ядерного топливного цикла с привязкой к синергии в технологиях, а в 12 — возможные совместные решения на региональном или глобальном уровнях. В большинстве этих тематических исследований в качестве инструмента моделирования при разработке и анализе сценариев для ЯЭС использовалась модель MESSAGE-NES MAGATЭ [17].

На рис. 3 представлены виды синергетических взаимодействий, рассмотренных в тематических исследованиях с целью повышения устойчивости ЯЭС. В течение первого периода, показанного на рис. 3, синергия стимулируется преимущественно «взаимовыигрышными» ситуациями, формируемыми нынешними технико-экономическими решениями. В течение третьего (последнего) и в некоторой степени второго (промежуточного) периода применяется в большей мере ориентированный на «видение» подход к повышению устойчивости ЯЭС, которая будет достигаться за счет внедрения технологических решений, предлагаемых разработчиками инновационных технологий.

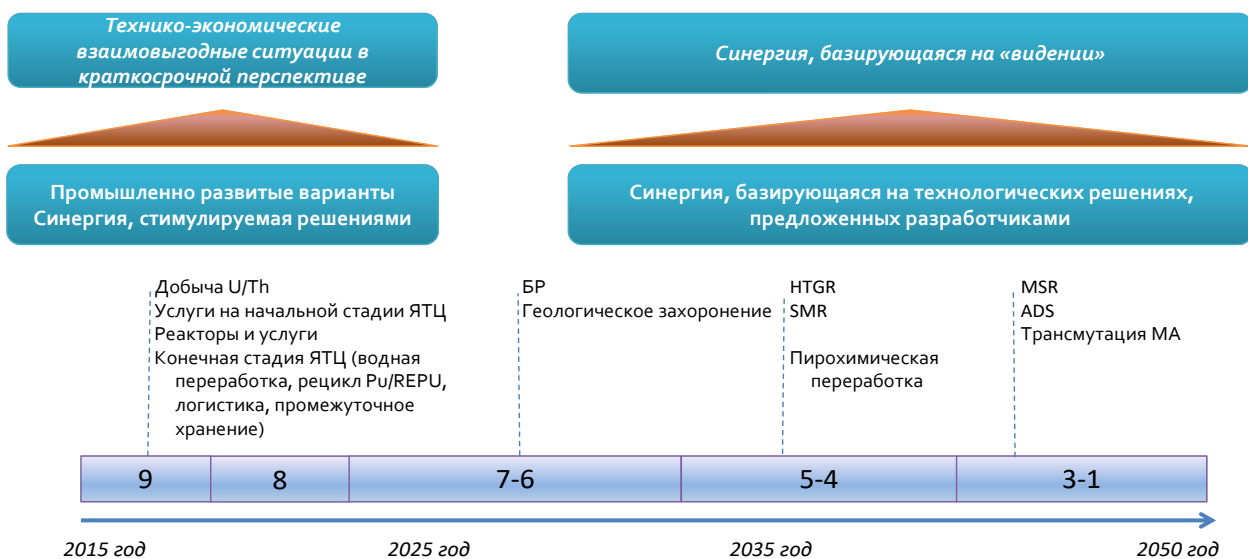


Рис. 3. Виды синергетических взаимодействий в рамках модели SYNERGIES (нижние значения соответствуют степени технологической готовности в условных единицах [18])

Помимо оценки преимуществ различных синергетических вариантов в тематических исследованиях были проанализированы движущие силы, которые могут служить аргументами в пользу выбора определенного синергетического подхода, а также были выявлены потенциальные препятствия на пути к реализации такого подхода. Эти исследования могут помочь в разработке планов действий или дорожных карт в области проектирования, направленных на повышение устойчивости ЯЭС.

4. Совместное решение проблем на региональном и глобальном уровнях

4.1 Интеграция национальных ядерно-энергетических программ и международного сотрудничества

В тематических исследованиях, проведенных рядом стран-участниц, были рассмотрены возможности интеграции национальных ядерно-энергетических программ с международным сотрудничеством, направленным на решение долгосрочных проблем в повышении устойчивости ядерной энергетики. Этими странами была также сделана попытка найти оптимальный баланс между собственными возможностями и возможностями внешних партнеров. Некоторые из них уже продемонстрировали общие подходы к региональному и межрегиональному сотрудничеству. В качестве примеров можно привести тематические исследования Армении, Аргентины, Индонезии, Румынии и Украины.

Правительства этих стран рассматривают ядерную энергетику как стабильный компонент национальной структуры энергопроизводства, учитывая связанные с ней безопасность энергоснабжения, надежность оборудования, экономическую эффективность и низкий уровень выбросов парниковых газов (ПГ). Общественное мнение в этих странах также поддерживает дальнейшее развертывание ядерной энергетики. Все страны этой группы намерены и в дальнейшем расширять использование ядерной энергетики. Они рассматривают региональные решения по хранению отработавшего топлива как наиболее перспективное направление в данной области. В этих странах имеются программы НИОКР по развитию ядерной энергетики, в которые включены исследования, затрагивающие несколько этапов ядерных топливных циклов.

Аргентина располагает мощностями для всех этапов открытого (незамкнутого) ядерного топливного цикла и разрабатывает малые модульные реакторы (SMR) собственной конструкции. Аргентина планирует стать региональным поставщиком ядерно-энергетических технологий в Латинской Америке и даже глобальным поставщиком аргентинского модульного реактора малой мощности CAREM (рис. 4).

Эксперты из Аргентины разработали два сценария будущего развития ядерной энергетики в стране, которые включают в себя использование АЭС, поставляемых из-за рубежа, АЭС собственной разработки и полное использование возможностей собственного топливного цикла. Однако было установлено, что имеющихся в наличии запасов урана будет недостаточно для расширения ядерной энергетики, и придется значительно увеличить импорт урана. Было также установлено, что продолжение национальных НИОКР в сочетании с участием в международных проектах по НИОКР, таких как Международный форум «Поколение-IV», является ключом к устойчивому развитию ядерной энергетики в Аргентине.

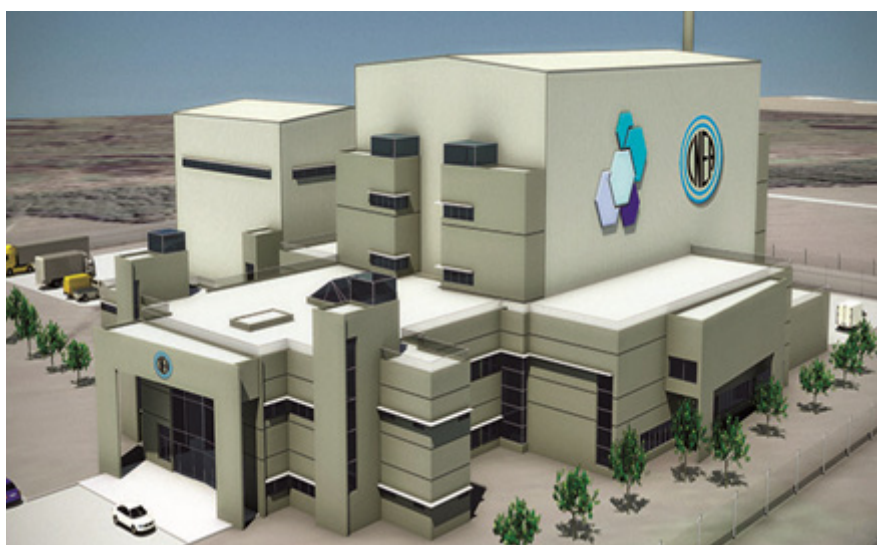


Рис. 4. CAREM — аргентинский реактор PWR малой мощности (25 МВт (эл.)).

[Источник: «Advances in Small Modular Reactor Technology Development, A Supplement to IAEA Advanced Reactor Information System (ARIS)» («Достижения в разработке модульных реакторов малой мощности — Дополнение к Информационной системе по усовершенствованным реакторам (АРИС) МАГАТЭ»), брошюра МАГАТЭ, 2018]

Румыния располагает двумя реакторами типа CANDU 6, работающими на АЭС «Черноводэ». Ее актуальная политика — это открытый (незамкнутый) ядерный топливный цикл, основанный на национальных установках, без операций по обогащению или переработке, которые запрещены национальным законодательством. Оработавшее ядерное топливо хранится во временных хранилищах мокрого и сухого типа. Было построено приповерхностное хранилище с несколькими барьерами для окончательного захоронения низко- и среднеактивных отходов (НАО) АЭС «Черноводэ». Проводятся исследования геологической среды для глубинного геологического хранилища оработавшего ядерного топлива и высокоактивных отходов (ВАО).

Румынские эксперты проанализировали три сценария будущего развития ядерной энергетики: а) базовый вариант, включающий 4 тяжеловодных реактора (HWR): 2 существующих и 2 новых блока; б) пессимистический вариант только с двумя существующими блоками; в) оптимистический вариант, предусматривающий 4 HWR и еще 1 усовершенствованный реактор PWR (1000 МВт(эл.) или усовершенствованный HWR). Используя модель MESSAGE MAGATЭ они определили для каждого сценария предполагаемую долю ядерной энергетики в общем объеме производства электроэнергии, годовые потребности в ядерном топливе, годовое и совокупное потребление урана, годовой объем выгруженного оработавшего топлива и оработавшего топлива, размещенного во временных хранилищах влажного и сухого типа, а также общий объем инвестиций, необходимый для развития атомной энергетики в период до 2050 года.

Было установлено, что с экономической точки зрения усовершенствованный HWR является наилучшим вариантом, за которым следует усовершенствованный PWR. С добавлением двух блоков каждого из усовершенствованных реакторов HWR и PWR ядерная мощность достигнет 3,8 ГВт (эл.), обеспечивая около 45% потребностей в электроэнергии в 2050 году. Местных ресурсов урана будет достаточно для снабжения реакторов HWR топливом, которое будет производиться на местных предприятиях начальной стадии топливного цикла. Для усовершенствованных PWR и HWR топливо должно будет импортироваться. Оработавшее ядерное топливо HWR будет храниться во временном сухом хранилище и по массе достигнет порядка 8 кт ТМ (рис. 5), в то время как оработавшее ядерное топливо усовершенствованного PWR будет храниться за пределами страны в региональном хранилище. В румынском предметном исследовании учитывается международное сотрудничество в области поставок реакторов и услуг топливного цикла, включая хранение оработавшего ядерного топлива для усовершенствованных PWR.

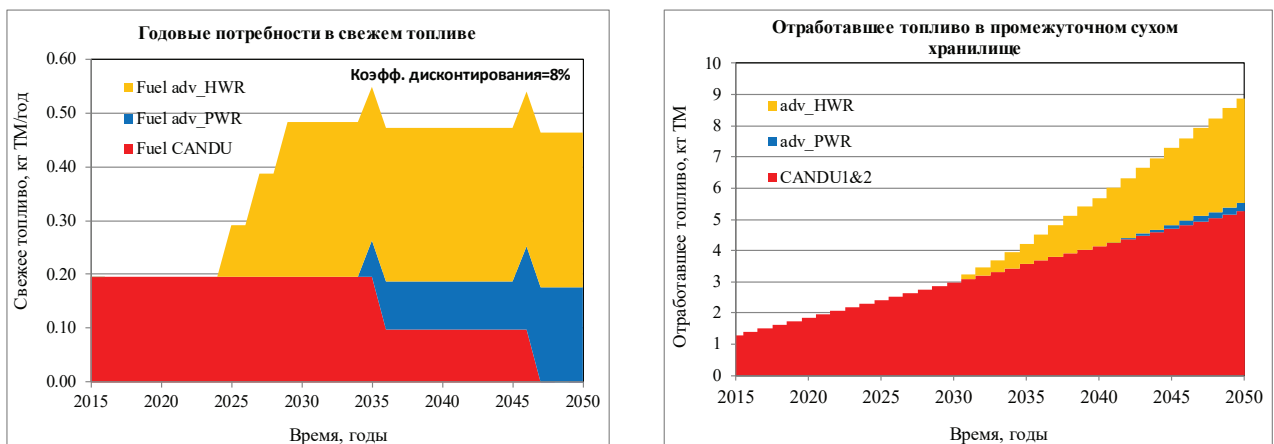


Рис. 5. Годовые потребности в свежем топливе (слева) и совокупный объем оработавшего топлива в хранилищах (справа).

В тематическом исследовании Украины изучалось использование ядерной энергетики для совместного производства электроэнергии и тепла. Сценарии с внедрением SMR и сверхкритических водяных реакторов (SCWR) были разработаны с использованием модели MESSAGE MAGATЭ. Эти сценарии предполагали открытый (незамкнутый) ядерный топливный цикл с захоронением оработавшего ядерного топлива. Результаты показали, что SCWR являются более экономичными по сравнению с усовершенствованными LWR и позволят уменьшить накопление оработавшего ядерного топлива (рис. 6). Однако для разработки и развертывания парка SCWR потребуются международное сотрудничество в области ядерного топливного цикла, особенно для обогащения урана и спекания таблеток топлива. Что касается конечной стадии ядерного топливного цикла, то целесообразно будет рассмотреть возможность создания регионального комплекса для долгосрочного хранения оработавшего ядерного топлива, с тем чтобы оптимизировать экономические расходы и минимизировать использование установок для сухого хранения оработавшего ядерного топлива на каждой АЭС.

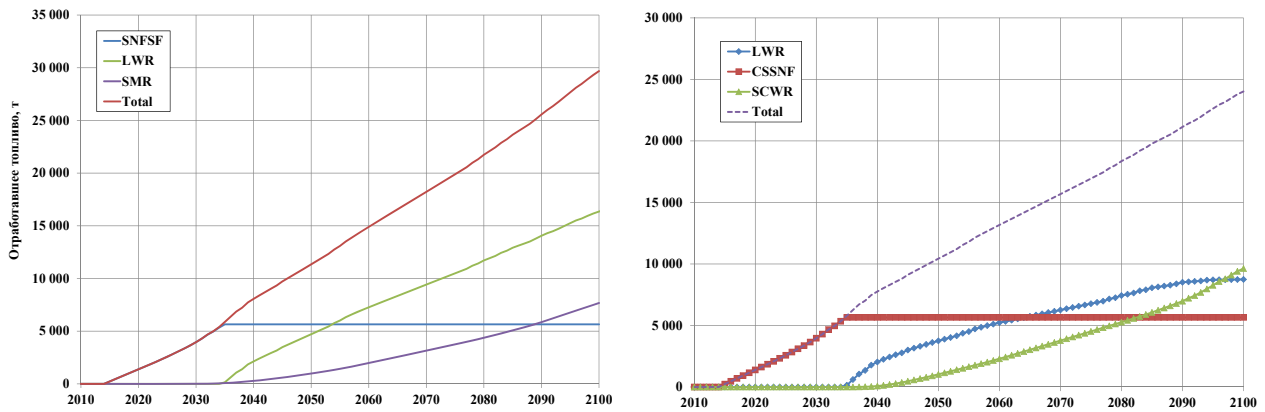


Рис. 6. Совокупное накопление отработавшего топлива в двух сценариях.

Еще одно тематическое исследование, посвященное изучению международного сотрудничества, было проведено экспертами из Индонезии. В настоящее время Индонезия не имеет АЭС, но неоднократно заявляла о своем намерении построить АЭС на основе зарубежных проектов, продолжая при этом национальные программы НИОКР. Индонезийское исследование было направлено на оценку наиболее жизнеспособного варианта стратегий топливного цикла для поддержки устойчивости осуществления ядерно-энергетических программ на основе потенциала национальных, региональных и международных механизмов в области ядерного топливного цикла. Были оценены пять вариантов ядерного топливного цикла (рис. 7):

- а) однократный топливный цикл на основе PWR мощностью 1000 МВт (эл.) с топливом на диоксиде урана (UO_2) и захоронением отработавшего ядерного топлива в геологическом хранилище;
- б) однократный рецикл плутония в виде MOX топлива в PWR, включающий традиционную переработку топлива LWR, рециклирование выделенного плутония (Pu) в виде U-Pu MOX-топлива в PWR, захоронение ВАО, образующихся в результате переработки и прямое захоронение отработавшего ядерного MOX-топлива в геологическом хранилище;
- в) прямое использование отработавшего топлива PWR в реакторе CANDU (HWR), предусматривающее изготовление топлива реактора CANDU из отработавшего ядерного топлива PWR без химического разделения делящегося материала и продуктов деления;
- г) синергетический топливный цикл LWR–FR, в котором быстрые реакторы используются для сжигания как ^{235}U , так и трансурановых элементов (TRU). Отработавшее ядерное топливо PWR будет перерабатываться для получения топлива, содержащего TRU, с целью использования в реакторах на быстрых нейтронах, а оставшийся уран, выделенный из отработавшего топлива PWR, будет захоронен как HCAO. Топливо с TRU после сжигания в быстром реакторе будет многократно перерабатываться с помощью пиропроцесса, и извлеченные TRU будут использоваться в быстром реакторе для замыкания ядерного топливного цикла;
- е) однократный топливный цикл Th-U в PWR.

В данном тематическом исследовании был сделан вывод о том, что однократный цикл на основе UO_2 -топлива с использованием PWR будет наиболее жизнеспособным вариантом для поддержки ядерно-энергетической программы в Индонезии на устойчивой основе. Если имеющихся урановых ресурсов становится недостаточно (или возникают проблемы с обращением с отработавшим ядерным топливом), можно рассмотреть вариант ограниченного рециклирования с одним рециклом MOX в PWR. Это обеспечит некоторую экономию ресурсов урана и сокращение производства отходов на единицу произведенной энергии. Однако этот топливный цикл создает большой риск распространения из-за существенного рабочего запаса выделенного плутония. Более привлекательным в долгосрочной перспективе этот топливный цикл может стать в сочетании с быстрыми реакторами (стратегия PWR-БР).

Еще один пример — тематическое исследование Армении. В исследовании был представлен подход к минимизации НИОКР и инвестиций в развитие инфраструктуры ядерного топливного цикла посредством сотрудничества с региональными или трансрегиональными поставщиками ядерных технологий. Армения использует открытый (незамкнутый) ядерный топливный цикл для существующего энергетического

блока ВВЭР-440. Отработавшее ядерное топливо после пяти лет хранения в бассейне выдержки реактора перемещается в сухое хранилище. В поисках долгосрочного решения проблемы обращения с отработавшим ядерным топливом эксперты из Армении оценили три различных варианта и рассчитали влияние стоимости обращения с отработавшим ядерным топливом на стоимость выработки электроэнергии. Были рассмотрены три варианта: i) хранение отработавшего ядерного топлива на площадке АЭС; ii) хранение отработавшего ядерного топлива на площадке АЭС и вывоз отработавшего ядерного топлива с площадки АЭС для геологического захоронения; iii) вывоз отработавшего ядерного топлива из Армении для переработки и окончательного захоронения в другой стране.

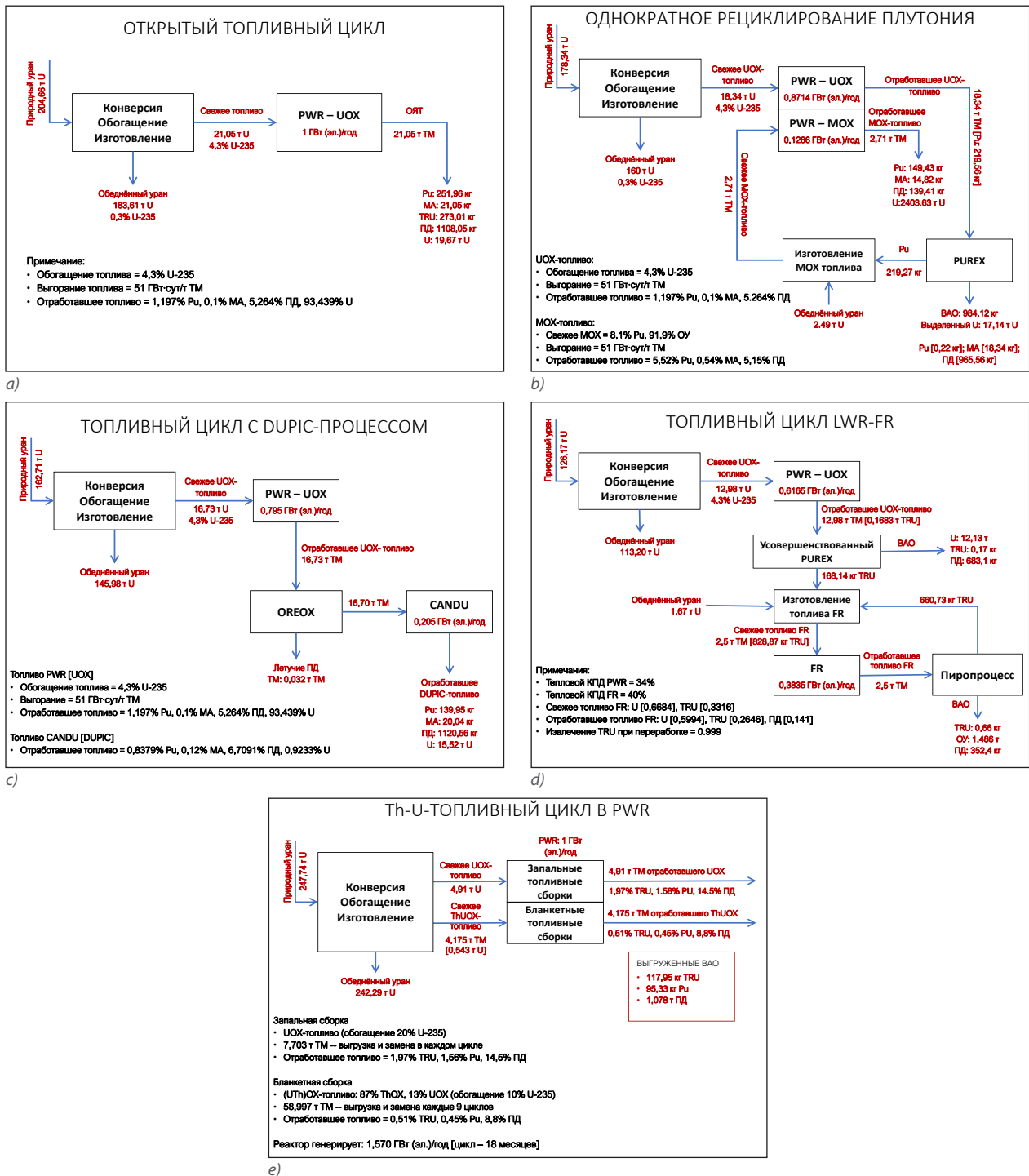


Рис. 7. Варианты топливного цикла, рассмотренные в тематическом исследовании Индонезии

Исследование показало, что приведенные расходы на топливо в стоимости электроэнергии¹ на заключительном этапе ядерного топливного цикла составляют лишь небольшую часть (4%) от полной стоимости генерации электроэнергии. Что еще более важно, было установлено, что стоимость различных вариантов обращения с отработавшим ядерным топливом оказывает незначительное влияние на полную стоимость генерации электроэнергии (LUEC — приведенную удельную стоимость электроэнергии). Таким образом, исследователи пришли к выводу, что вариант со строительством сухого хранилища отработавшего топлива является приемлемым решением проблемы обращения с отработавшим ядерным топливом. Однако, учитывая необходимость обращения с отработавшим ядерным топливом после проектного периода хранения в сухом хранилище отработавшего топлива, экспорт отработавшего ядерного топлива может быть более привлекательным после его выгрузки из бассейна выдержки реактора. Для реализации такого подхода потребуются соответствующие механизмы сотрудничества.

4.2. Региональное сотрудничество

Тесное сотрудничество между странами в области ядерной энергетики — уже свершившийся факт в некоторых регионах, например, в государствах — членах ЕС и в некоторых странах СНГ. Сфера действия таких региональных механизмов сотрудничества может быть расширена с целью повышения устойчивости ЯЭС в каждой участвующей стране, а также на региональном и глобальном уровнях.

В тематическом исследовании «Сценарии EU27» рассматривалось расширенное использование региональных центров ядерного топливного цикла La Hague и MELOX с целью реализации синергетического сотрудничества между странами ЕС. В ходе исследования был рассмотрен вариант ограниченной переработки отработавшего топлива LWR и изготовления MOX-топлива для однократного рецикла в LWR. Результаты показали, что с помощью таких услуг топливного цикла может быть достигнуто снижение потребления природного урана на 10–15% одновременно с минимизацией отходов. Это позволит уменьшить объемы отработавшего ядерного топлива, размещаемые на временное хранение (рис. 8), и снизить потребности в глубинном геологическом захоронении. В целом эти преимущества могут перевесить связанное с ними небольшое повышение затрат на топливо. Если в будущем цены на природный уран увеличатся, этот вариант станет экономически более привлекательным.

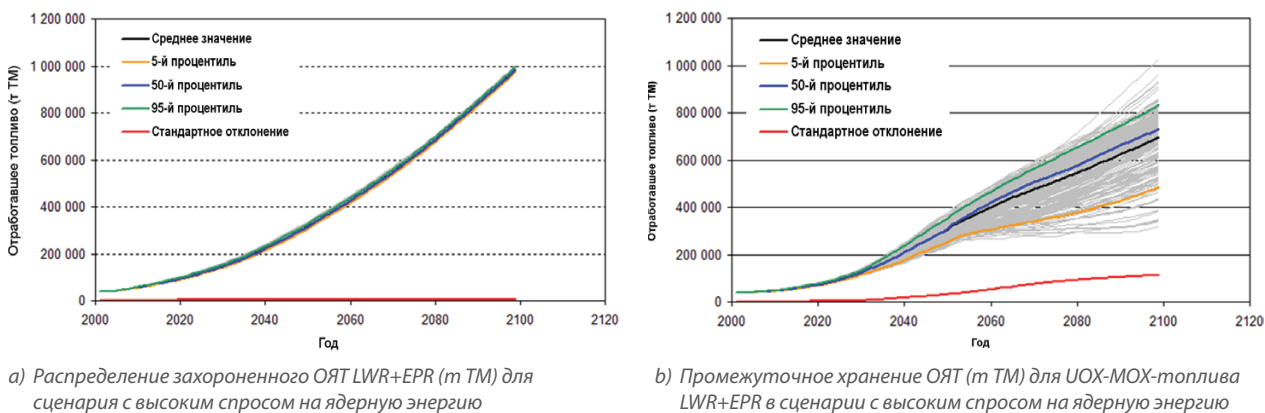


Рис. 8. Сравнение объемов отработавшего ядерного топлива на промежуточном хранении в двух сценариях EU27

В совместном тематическом исследовании, проведенном экспертами Армении, Белоруссии, Российской Федерации и Украины, были проанализированы преимущества продолжения и расширения уже существующего регионального сотрудничества между этими странами по вопросам развертывания и эксплуатации реакторов ВВЭР (рис. 9).

¹ Этот вывод также иллюстрирует тот факт, что одной характеристики — LUEC недостаточно для решения вопросов долгосрочной (межрегиональной) устойчивости. В долгосрочной перспективе стоимостные показатели в четырех рассмотренных случаях могут быть весьма различными, и, соответственно, различным будет и бремя, ложающееся на плечи будущих поколений. При этом, поскольку расходы, понесенные через несколько десятилетий от момента рассмотрения, будут в LUEC фактически сведены на нет, необходим дополнительный анализ денежных потоков для адекватной оценки долгосрочной устойчивости в рассматриваемых случаях. Такая оценка, однако, не была выполнена в рамках представленного исследования.

Для оценки перспектив двухкомпонентной ЯЭС в сценарии этого исследования парк LWR был дополнен быстрыми реакторами. В исследовании был сделан вывод о том, что сотрудничество поставщиков технологий и пользователей на конечной стадии ядерного топливного цикла, по всей вероятности, является неизбежным решением на пути к устойчивой ядерной энергетике в региональном и глобальном масштабах. Были определены следующие движущие факторы, содействующие развитию «взаимовыигрышного» сотрудничества: предотвращение накопления отработавшего (использованного) ядерного топлива и плутония, содержащегося в нем; существенное сокращение потребления урана (в 10 раз и более); использование более дешевых категорий U (например, обедненного или переработанного урана); экономия финансовых и кадровых ресурсов для стран-пользователей; расширение ядерно-энергетического рынка для поставщиков технологий.

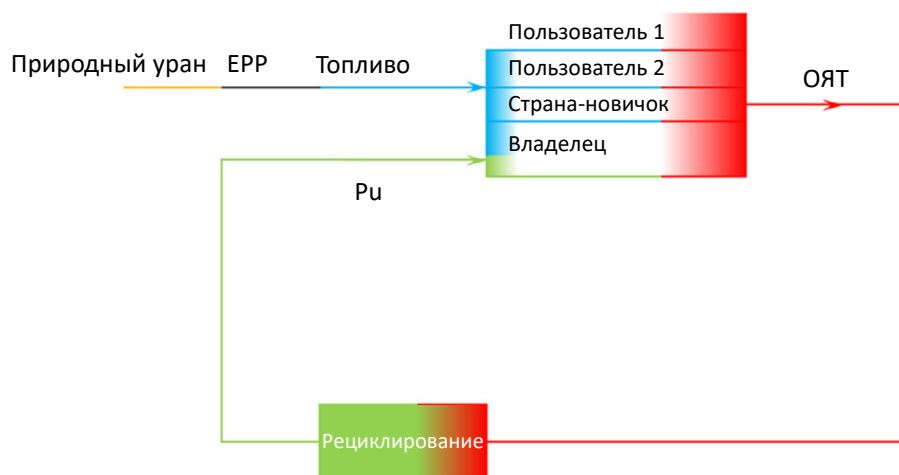


Рис. 9. Схема регионального сотрудничества по вопросам утилизации отработавшего ядерного топлива

В другом региональном предметном исследовании, выполненном экспертами Италии, был проанализирован относительно новый тип регионального сотрудничества. В нем был рассмотрен потенциал сотрудничества между Италией и некоторыми европейскими странами. Италия имеет мораторий на атомную энергетику и не может строить и эксплуатировать АЭС на своей территории; вместе с тем итальянская энергетическая компания участвует в эксплуатации нескольких АЭС за рубежом. В проведенном исследовании рассматривалась возможность создания парка АЭС за пределами Италии — в соседних странах, в которых общественное мнение в отношении ядерной энергетики не является негативным.

Возможность такого рода регионального сотрудничества возникает в силу двух факторов. Первый фактор заключается в быстром росте количества высоковольтных линий, соединяющих национальные электросети европейских стран, который обусловлен значительным увеличением числа работающих в прерывистом режиме возобновляемых источников электроэнергии (ветровая и солнечная электроэнергетика); второй фактор связан с неизбежной необходимостью обеспечения безуглеродной генерации электроэнергии в целях борьбы с изменением климата. В этой связи для стран, которые из-за давления общественного мнения ограничены в строительстве новых АЭС на своей территории, производство за рубежом электроэнергии на АЭС в режиме базовой нагрузки может оказаться выгодным.

В итальянском тематическом исследовании были оценены выгоды от эксплуатации парка PWR за пределами Италии с последующим внедрением в должное время инновационных быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем. Анализ показал, что затраты на топливо могут быть снижены на 34–49% за счет эффекта масштаба при организации услуг по обогащению топлива и переработке отработавшего топлива. Помимо экономических выгод, были также определены экологические выгоды, такие как соблюдение европейских ограничений на выбросы CO₂. Кроме того, будет достигнуто заметное сокращение потребления природного урана и снижение объемов захоронения отходов.

5. Синергия между реакторными технологиями

5.1. Синергия между технологиями, направленная на использование плутония, и перспективы международного сотрудничества в этой области

В тематических исследованиях, проведенных группами экспертов Китая, Российской Федерации, Украины, Франции и Японии, а также в исследовании, совместно проведенном экспертами МАГАТЭ и российскими специалистами, был рассмотрен ряд вариантов технологической синергии между технологиями тепловых и быстрых реакторов, направленной на использование плутония, и соответствующий потенциал международного сотрудничества на конечной стадии ядерного топливного цикла в целях повышения устойчивости ЯЭС в региональном и глобальном масштабах. Исследования были сфокусированы на решении проблем накопления отработавшего ядерного топлива реакторов PWR и снижения потребления природного урана на основе возможных сценариев реализации замкнутого ядерного топливного цикла.

Во французском исследовании были изучены различные пути использования выделенного плутония в реакторах на тепловых и быстрых нейтронах. В настоящее время ЯЭС Франции основывается на использовании тепловых реакторов, работающих на урановом топливе с частичной загрузкой MOX-топлива с однократным рециклированием плутония. В будущем плутоний может поступать из разных источников, но содержание плутония в свежем топливе LWR-MOX должно оставаться ниже 12% по соображениям безопасности. Внедрение быстрых реакторов позволит максимально использовать плутоний. Однако это потребует крупномасштабного развертывания быстрых реакторов, использующих собственный плутоний, с запуском на плутонии, выделенным из отработавшего топлива тепловых реакторов, что может оказаться невозможным в краткосрочной и среднесрочной перспективе.

Французское исследование показало, что многократное рециклирование плутония будет возможно в условиях использования комбинированного парка реакторов PWR-UOX, PWR-MOX и быстрых реакторов, оптимизированного для достижения равновесия между потреблением и производством плутония. В этом сценарии сводится к минимуму количество быстрых реакторов и максимально увеличивается доля энергии, производимой с помощью реакторов LWR-MOX с использованием ресурсов плутония в качестве топлива. Плутоний, производимый в реакторах PWR-UOX, используется для подпитки реакторов PWR-MOX, как это делается во Франции, и быстрые реакторы с натриевым теплоносителем используются для рециклирования плутония из отработавшего топлива реакторов PWR-MOX для улучшения его качества так, чтобы его можно было бы вновь использовать вместе с отработавшим UOX-топливом для производства свежего топлива для реакторов PWR-MOX (рис. 10)).



Рис. 10. Французский сценарий: а) первый этап, б) второй этап перехода к ЯЭС, основанной на замкнутом ядерном топливном цикле.

В исследовании Российской Федерации рассматривается несколько иной сценарий двухэтапного развертывания системы LWR с быстрыми натриевыми реакторами (рис. 11). Первый этап заключается в однократном использовании плутония, накопленного в реакторах ВВЭР, в качестве топлива для небольшого количества реакторов БН (реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем российской конструкции). На этом этапе реактор БН выступает в роли «потребителя» плутония, накопленного в ВВЭР, реализуя его энергетический потенциал и конвертируя топливо ВВЭР в более компактную форму с улучшенным изотопным составом плутония, что обеспечивает долговременное хранение без существенного накопления ^{241}Am .

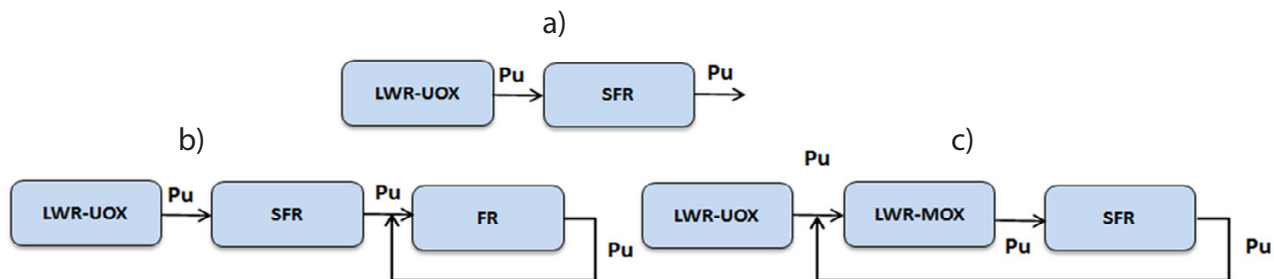


Рис.11. Российский сценарий: а) первый этап, б) второй этап (в случае высокого спроса на ядерную энергию), в) второй этап (в случае стабилизации спроса)

Второй этап включает переработку отработавшего МОХ-топлива реакторов БН и использование выделенного Pu для начальных загрузок реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, работающих в полностью замкнутом ядерном топливном цикле. Такая схема будет пригодной для реализации в ситуации с высоким спросом на ядерную энергию. В случае стабилизации спроса на ядерную энергию баланс производства и потребления плутония может быть обеспечен путем многократного рециклирования МОХ-топлива в системе ВВЭР/быстрые реакторы с натриевым теплоносителем (рис. 11, в).

В рамках тематического исследования, проведенного экспертами Китая, был рассмотрен потенциал быстрых натриевых реакторов, разработанных в стране, применительно к четырем сценариям, рассматривающим многократный рецикл плутония. Было показано, что для достижения национальных целей по развертыванию ядерной энергетики потребуются интенсивное проведение НИОКД с целью разработки и внедрения быстрых натриевых реакторов с металлическим топливом, имеющих коэффициентом воспроизводства выше 1,4, а также соответствующих усовершенствованных технологий переработки.

В тематическом исследовании Японии была изучена возможная роль быстрых реакторов с натриевым теплоносителем и замкнутого ядерного топливного цикла в трех национальных сценариях, отражающих сокращение роли ядерной энергетики в национальном энергобалансе из-за изменения политики в области энергетики после аварии на АЭС «Фукусима-дайити» в 2011 году. Был сделан вывод, что стратегия переработки будет иметь преимущество перед стратегией прямого захоронения и частичной переработки отработавшего ядерного топлива.

Основная цель предметного исследования Украины заключалась в оценке сценариев с LWR/быстрыми реакторами с натриевым теплоносителем как способа снижения объемов накопления отработавшего ядерного топлива. В модель национальной ЯЭС также были включены HWR, работающие на переработанном уране из топлива, использованного в LWR. Оказалось, что замкнутый ядерный топливный цикл, основанный на использовании быстрых реакторов, экономически не привлекателен для Украины в среднесрочной перспективе. Открытый (незамкнутый) ядерный топливный цикл на основе HWR, работающих на регенерированном уране, оказался экономическим более выгодным вариантом.

Основные вопросы межрегионального сотрудничества в контексте будущего развития ЯЭС с LWR/быстрыми натриевыми реакторами были рассмотрены в совместном исследовании экспертов МАГАТЭ и участников проекта от Российской Федерации. В исследовании использовались модель гетерогенного мира и глобальные сценарии, разработанные в рамках проекта сотрудничества GAINS [13]. Предполагалось, что ввод в эксплуатацию систем LWR-MOX/быстрый реактор следует ожидать в нескольких странах, освоивших данные технологии, которым в рамках проекта GAINS было присвоено обозначение ЯГ1 (стратегическая ядерная группа 1). Затем отработавшее топливо LWR стран-пользователей (ЯГ2 — опытные пользователи и ЯГ3 — страны-новички) может быть направлено в страны — обладатели технологий для переработки и изготовления МОХ-топлива, которое будет использоваться в быстрых реакторах стран — обладателей технологий и в LWR стран-пользователей (рис. 12). Таким образом, благодаря международному сотрудничеству преимуществ, обеспечиваемые ЯЭС с LWR/быстрыми натриевыми реакторами, могут стать доступными для широкого круга стран, использующих ядерную энергетику, включая страны-новички и страны-пользователи, которые не в состоянии или не готовы разрабатывать и внедрять у себя такие системы.

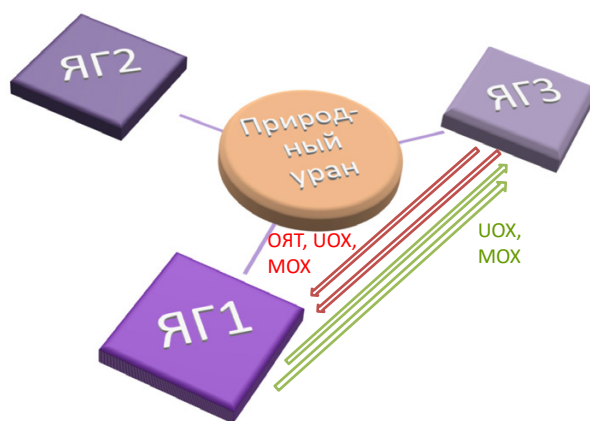


Рис. 12. Синергия на конечной стадии ядерного топливного цикла в глобальном сценарии

В этом исследовании определен ряд движущих факторов, содействующих развитию научно-технической деятельности в области утилизации плутония. ЯЭС, основанные на технологической синергии между реакторами на тепловых нейтронах и реакторами на быстрых нейтронах, позволяют остановить дальнейшее накопление отработавшего ядерного топлива PWR и содержащегося в нем плутония или даже снизить количество плутония до уровня эксплуатационных потребностей с минимизацией объемов хранилищ и минимальными количествами актинидов, накапливаемых при хранении отработавшего ядерного топлива LWR (рис. 13).

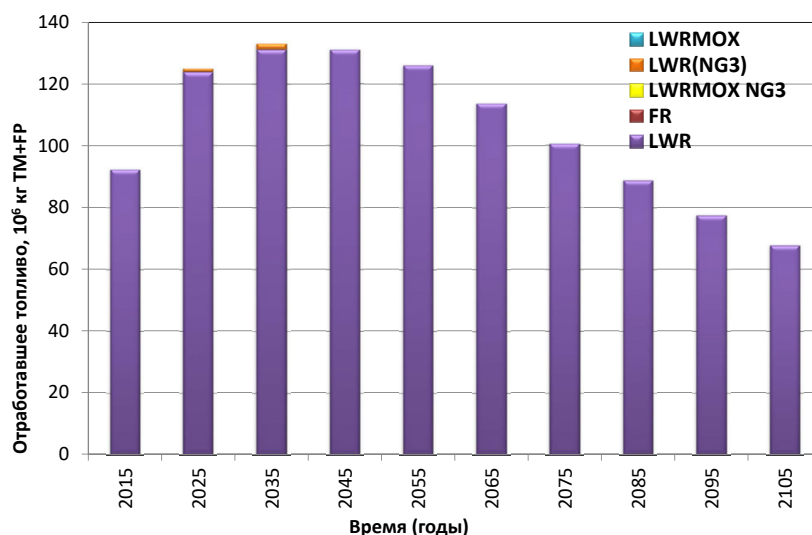


Рис. 13. Долговременное хранение ОЯТ LWR в ЯГ1 (синергетический случай)

В случае стабилизации спроса на ядерную энергию потребность в природном уране в ЯЭС на LWR/быстрых натриевых реакторах со сбалансированным количеством используемого и выгружаемого плутония может быть уменьшена наполовину, а в случае высокого спроса на ядерную энергию и использовании значительной доли быстрых реакторов в системе она может быть снижена в 100 раз. Предотвращение накопления избыточного плутония облегчает применение гарантий МАГАТЭ на конечной стадии ядерного топливного цикла. Отсутствие ощутимого объема плутония в радиоактивных отходах также является важным преимуществом с точки зрения воздействий на окружающую среду.

Наряду с движущими силами были выявлены также возможные препятствия. Среди них низкие темпы разработки и внедрения технологий LWR-MOX и особенно технологий быстрых натриевых реакторов с MOX-топливом, что обусловлено наличием больших и довольно дешевых запасов природного урана, а также высокой ожидаемой стоимостью строительства быстрых реакторов, переработки отработавшего ядерного топлива и изготовления MOX-топлива. На рис. 14 представлены оценки приведенных удельных затрат на топливный цикл.

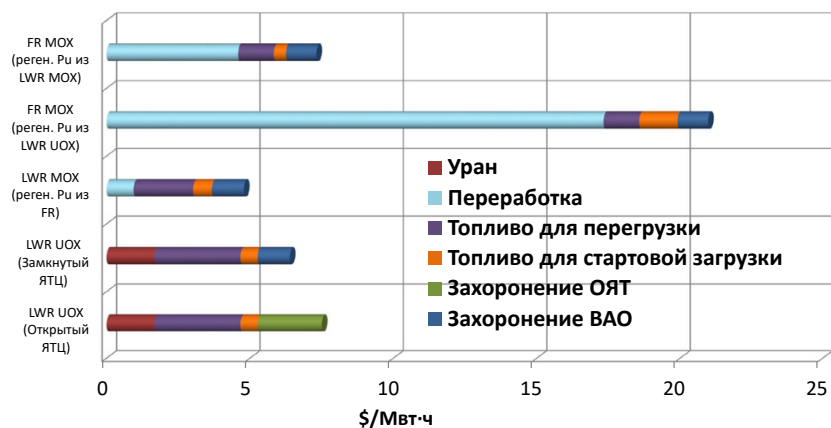


Рис. 14. Приведенные удельные затраты на топливный цикл

5.2. Технологическая синергия, направленная на обращение с отходами

Предметные исследования, проведенные в Бельгии, Испании, Канаде, Китае, Франции и Европейском союзе, были посвящены анализу потенциала технологической синергии в обращении с отходами. Канада представила два предметных исследования по: i) рециклированию переработанного урана (REPU) из LWR в HWR и ii) дожиганию америция из LWR в HWR. Вариант с рециклом REPU в HWR показал лучшую экономику для HWR по сравнению с использованием природного урана при определенных допущениях относительно стоимости природного урана и переработки топлива.

Экономическая ценность REPU определяется как стоимость топлива, которое необходимо было бы использовать для выработки такого же суммарного количества энергии. Так как сборки твэлов с REPU или обогащенным REPU предназначены для замены штатных сборок твэлов, в каждом случае стоимость природного урана и стоимость конструктивных элементов тепловыделяющих сборок являются параметрами, которые влияют на экономическую ценность REPU. Экономическая ценность REPU для прямого рецикла в HWR и повторного обогащения (с целью использования в LWR) показаны на рис. 15. В случае стоимости природного урана, составляющей 90 \$/кг, REPU из отработавшего топлива с выгоранием 33 МВт·сут/кг стоит порядка 230 \$/кг при рецикле в HWR, в то время как при повторном обогащении для использования в LWR стоимость составит 100 \$/кг.

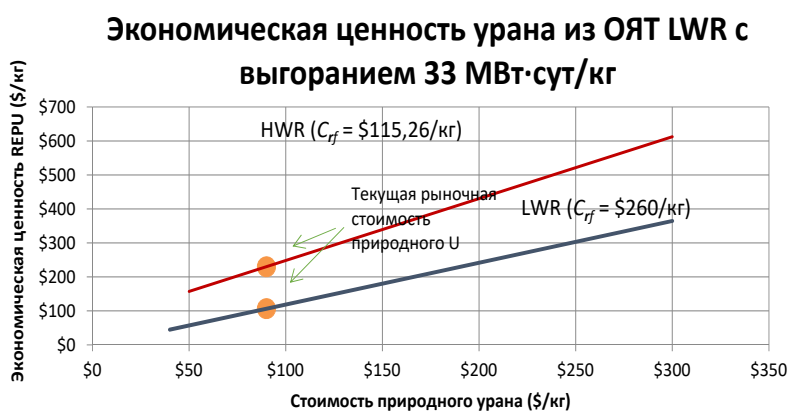


Рис. 15. Изменение экономической ценности переработанного урана в зависимости от стоимости природного урана при постоянных затратах на производство топлива

При стоимости переработки топлива LWR от 1000 до 2000 \$/кг использование REPU не очень привлекательно. Однако, если REPU уже имеется в качестве побочного продукта производства MOX-топлива без дополнительных затрат, то поставки REPU с низким уровнем выгорания для HWR вместо природного урана будут экономически выгодными. Основные преимущества технологической синергии между LWR и HWR могут быть реализованы при обращении с отходами. Америций, накопленный в отработавшем ядерном топливе LWR, может быть трансмутирован в HWR. В канадском исследовании были оценены предотвращенные расходы на захоронение, зависящие от стоимости природного урана, выгорания

топлива LWR, стоимости разделения америция и отработавшего ядерного топлива LWR, а также от уровня обогащения REPU. На рис. 16 показаны минимальные требуемые предотвращенные расходы на утилизацию ВАО для каждого срока хранения и обогащения REPU.

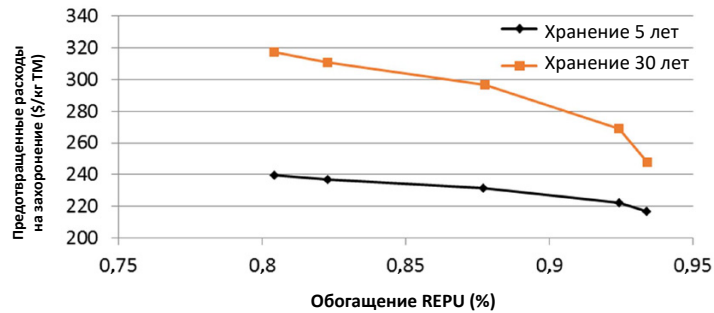


Рис. 16. Минимальные требуемые предотвращенные расходы на утилизацию ВАО для каждого срока хранения и обогащения REPU

Анализ показал, что реализация такого рода технологической синергии позволит значительно снизить остаточное тепловыделение ВАО, что в свою очередь обеспечит более эффективное использование пространства в долговременном хранилище и тем самым повысит устойчивость ЯЭС.

Во французском исследовании были рассмотрены варианты трансмутации долгоживущих радиоактивных элементов и анализировались различные технические и экономические сценарии, предусматривающие оптимизацию процессов трансмутации долгоживущих ВАО, их временного хранения и их захоронения в геологическом хранилище. Было проанализировано шесть следующих сценариев:

- рецикл плутония в быстрых натриевых реакторах (минорные актиниды направляются в отходы);
- рецикл плутония и трансмутация минорных актинидов (или только америция) в быстрых натриевых реакторах в гомогенном варианте (минорные актиниды смешиваются с ядерным топливом);
- рецикл плутония и трансмутация минорных актинидов (или только америция) в быстрых натриевых реакторах в гетерогенном варианте (минорные актиниды помещаются в радиальные экраны в составе матрицы из обедненного диоксида урана);
- рецикл плутония в быстрых натриевых реакторах и трансмутация минорных актинидов в ADS (ЭЛЯУ).

В исследовании было показано, что трансмутация минорных актинидов значительно снижает их объем в геологическом хранилище; однако суммарное количество минорных актинидов в реакторах и на предприятиях по переработке топлива возрастает (рис. 17). Трансмутация Am и минорных актинидов (МА) приведет к уменьшению площади зоны захоронения ВАО после промежуточного хранения в течение 120 лет в 7,3 (Am) и 9,8 раза (МА). Более высокое содержание минорных актинидов на этапах изготовления и переработки топлива потребует значительных изменений в проектировании для обеспечения адекватной тепловой и радиационной защиты. Кроме того, возрастет также степень сложности операций с топливом при эксплуатации установок (загрузка-выгрузка, промежуточное хранение отходов и транспортировка).

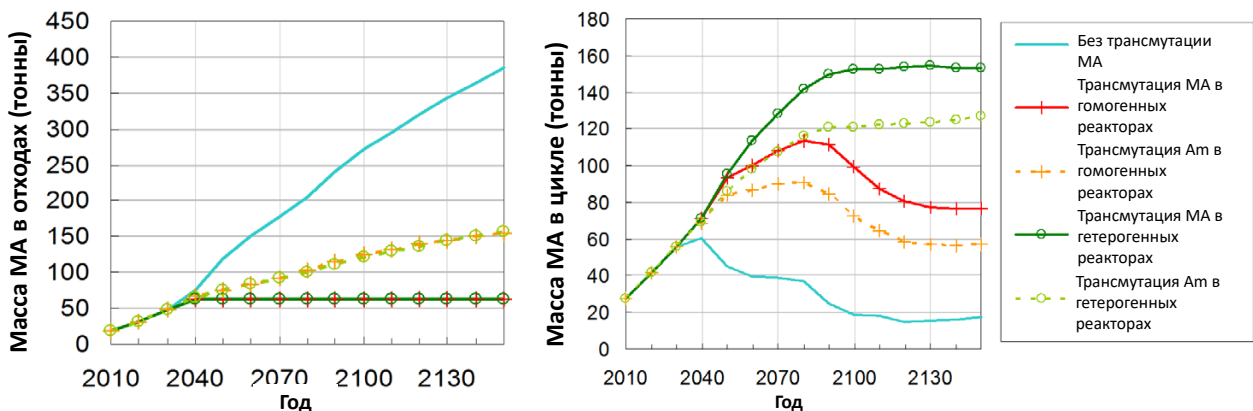


Рис.17. Уменьшение объема минорных актинидов (МА) в отходах и увеличение суммарного количества МА в топливном цикле в сценариях с трансмутацией МА

Осуществление схем, включающих трансмутацию всех минорных актинидов, существенно затрудняется вследствие присутствия кюроя, и ограничения, связанные с реализацией этих схем, часто превышают ограничения, имеющие место в случае сценариев с трансмутацией только америция. Проведенный экономический анализ показывает, что увеличение затрат, связанное с осуществлением процесса трансмутации, может варьироваться в пределах от 5 до 9% при использовании быстрых натриевых реакторов и составляет около 26% в случае трансмутации в ADS (ЭЛЯУ).

В исследовании, проведенном участниками проекта из Испании, изучались экономические последствия долгосрочных вариантов обращения с отходами для европейского парка ядерных реакторов по четырем сценариям, охватывающим период более 200 лет:

- сценарий 1 (СЦН-1) — является референтным сценарием для открытого (незамкнутого) ядерного топливного цикла;
- сценарий 2 (СЦН-2) — предполагает, что после 2021 года LWR будут заменены на LWR поколения III (LWR Gen-III), а затем после 2040 года на быстрые натриевые реакторы;
- сценарий 3 (СЦН-3) — аналогичен СЦН-2, за исключением того, что в 56% быстрых натриевых реакторов используется топливо с минорными актинидами в составе для достижения максимально возможной трансмутации, а в 44% быстрых натриевых реакторов сжигается только плутоний;
- сценарий 4 (СЦН-4) — предполагает, что трансмутация минорных актинидов осуществляется исключительно в ADS (ЭЛЯУ), а быстрые натриевые реакторы предназначены для сжигания и воспроизводства плутония.

Запасы Pu и МА, которые будут накоплены в течение охватываемого исследованием периода в четырех сценариях, показаны на рис. 18. Следует отметить, что применение быстрых натриевых реакторов обеспечивает существенное снижение количества плутония в окончательном захоронении — вплоть до 1% от общего количества. Трансмутация/сжигание МА могут быть реализованы в стратегии, включающей быстрые натриевые реакторы как для генерации электроэнергии, так и трансмутации МА, а также в стратегии, в которой быстрые натриевые реакторы предназначены для генерации электроэнергии, а ADS (ЭЛЯУ) — для сжигания МА. При этом, однако, стоимость производства электроэнергии увеличится на 20–35%. Стоимость захоронения ВАО снижается в 4–5 раз, но это оказывает относительно небольшое влияние на приведенную удельную стоимость электроэнергии (см. также сноску 1 выше)..

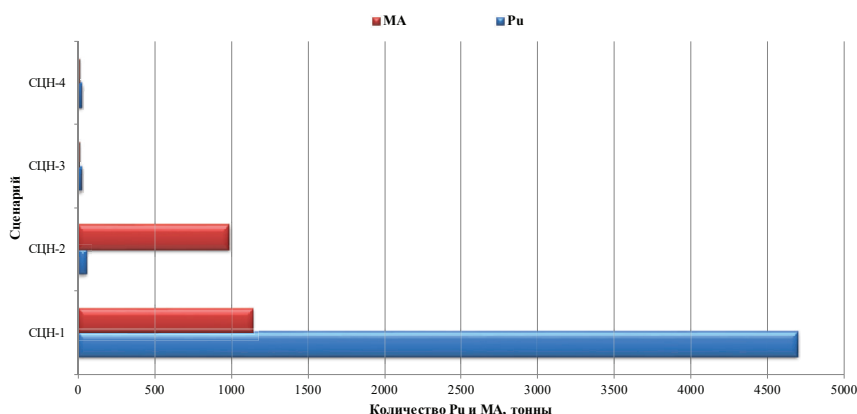


Рис. 18. Количество Pu и МА в хранилищах по окончании циклов в рассмотренных сценариях

В предметном исследовании по трансмутации минорных актинидов в быстрых натриевых реакторах, выполненном участниками проекта из Китая, была проведена сравнительная оценка двух вариантов сжигания МА, образовавшихся при эксплуатации PWR — один вариант связан с быстрыми натриевыми реакторами, использующими трансураниевые элементы в качестве топлива, а в другом варианте рассматривалось использование специальных быстрых натриевых реакторов-дожигателей. Абсолютного победителя выявить не удалось. В случае специальных реакторов-дожигателей, вероятно, будет больше требующих дальнейшего решения проблем, связанных с безопасностью, однако эти реакторы являются более эффективными и могут внедряться в относительно небольших количествах. Результаты исследования показывают, что применительно к таким более дорогостоящим реакторам-дожигателям целесообразными могут стать их совместная с другими странами разработка и совместное владение ими.

6. Движущие силы и препятствия на пути к реализации синергетических подходов

Движущие силы

Экономическая конкурентоспособность ядерной энергетики была определена в качестве основной движущей силы в сотрудничестве между странами. Страны-пользователи технологий и особенно страны-новички ищут решения с минимальными экономическими и финансовыми затратами. С другой стороны, страны-разработчики технологий, которые осуществляют масштабные и дорогостоящие программы научно-исследовательских, опытно-конструкторских и демонстрационных работ (НИОКДР) по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам, нацелены на стратегический рост и расширение присутствия на перспективных национальных и мировых рынках². Синергетическое сотрудничество между разработчиками и пользователями технологий может помочь в достижении экономических выгод, связанных с эффектом масштаба предприятий топливного цикла и экономией ускоренного обучения. Если такие факторы сработают, то это может быть «взаимовыигрышной» стратегией для обеих сторон.

Мотивация стран — обладателей технологий к внедрению инноваций в ядерных реакторах и топливных циклах зависит от наличия и стоимости природных ресурсов (например, урана) и состояния проблемы, связанной с постепенным накоплением отработавшего ядерного топлива тепловых реакторов, эксплуатируемых в открытом (незамкнутом) топливном цикле. На данный момент вопрос не стоит остро, тем не менее возрастающее накопление отработавшего топлива уже начинает создавать проблемы в некоторых странах. По мере возрастания роли этих факторов мотивация как обладателей, так и пользователей технологий к внедрению инновационных технологий и услуг будет также усиливаться.

Тематические исследования, проведенные в рамках проекта SYNERGIES, позволили определить другие потенциальные движущие силы в синергетическом сотрудничестве в области повышения устойчивости ЯЭС, которые могут быть связаны с решением вопросов общественного принятия или социальных проблем, таких как осуществление контроля за запасами плутония в хранилище с целью уменьшения угрозы распространения и повышения уровня физической ядерной безопасности; минимизация объемов ВАО для облегчения выбора приемлемых решений по окончательному геологическому захоронению с минимальными воздействием на окружающую среду и отчуждением земельных участков; укрепление энергетической независимости (снижение зависимости от природного урана с его потенциально изменчивой ценой); сохранение природных ресурсов (например, природного урана для стран с большими целевыми ядерно-энергетическими программами).

Тематические исследования проекта SYNERGIES также показали, что некоторые из вышеупомянутых факторов могут «работать» только тогда, когда соответствующие экономические затраты относительно невелики (несколько процентов от LUEC). Вместе с тем известная современная практика (переработка отработавшего топлива LWR в ЕС и поставка MOX-топлива для однократного рецикла в LWR) указывает на то, что такое сотрудничество все еще ограничено по масштабу и осуществляется более финансово обеспеченными и опытными пользователями. В случае значительного роста общемировой доли ядерной энергетики в условиях потенциальной нехватки ресурсов, накопления ВАО и актуализации проблем, связанных с распространением и физической ядерной безопасностью, можно ожидать, что указанные выше движущие силы в общественном принятии и социальные факторы будут более эффективно способствовать развитию синергетического сотрудничества, нацеленного на повышение устойчивости ядерной энергетики.

Препятствия

В ходе проведенных исследований был выявлен ряд препятствий на пути к реализации синергии между технологиями и развитию синергетического сотрудничества между странами, в том числе:

- национальные законы в некоторых государствах-членах, запрещающие перевозку отработавшего топлива через национальные границы;

² Инвестиции в НИОКДР могут быть учтены в моделях приведенной удельной стоимости электроэнергии (LUEC), если эти затраты охватывают длительный период времени и если вложенные инвестиции материализуются в снижении стоимости строительства и эксплуатации АЭС и предприятий топливного цикла.

- отсутствие или недостаточная проработанность институциональных процедур регулирования торговых операций с ядерным топливом/ВАО и механизмов ценообразования для таких операций;
- национальные законы, разрешающие возвращение конечных отходов (например, продуктов деления и минорных актинидов) только с тем же содержанием изотопов, что и в первоначально экспортированном топливе; это будет затруднять работу крупного поставщика услуг на конечной стадии топливного цикла или международного центра ядерного топливного цикла, которым будет нецелесообразно перерабатывать отработавшее топливо индивидуально для каждого клиента;
- региональные директивы, сужающие конкурентоспособность в области услуг по переработке, и, возможно, многие другие факторы³.

Своевременное преодоление вышеупомянутых институциональных инфраструктурных препятствий является необходимым шагом в обеспечении синергетического сотрудничества между странами в области повышения устойчивости ядерной энергетики. В ближайшей и среднесрочной перспективе приоритетными могут стать задачи внесения изменений в национальное законодательство и разработки новых институциональных процедур, так как для решения этих задач может потребоваться время. Первым шагом в этом направлении может быть более детальное изучение сферы правовых и институциональных вопросов в странах — обладателях технологий, странах — пользователях технологий и странах-новичках.

Наконец, политическая и экономическая нестабильность были также определены как факторы, которые могут препятствовать сотрудничеству между странами.

7. Кратко- и среднесрочные меры по повышению устойчивости ядерной энергетики

Основная концепция проекта SYNERGIES в обеспечении устойчивости базируется на принципе «целое больше, чем сумма его частей». Если один партнер в синергетическом сотрудничестве добивается улучшения устойчивости, то другой партнер тоже может обеспечить такое же улучшение, но без необходимости инвестирования в технологии и соответствующую инфраструктуру. Международное сотрудничество может способствовать распространению преимуществ инновационных технологий на тех пользователей, которые не планировали самостоятельно разрабатывать и внедрять их в своей стране.

Для непрерывного обеспечения и улучшения долгосрочной устойчивости ядерной энергетики в глобальном масштабе необходимы кратко- и среднесрочные меры. Кратко- и среднесрочные меры по развитию технологий направлены на разработку и демонстрацию опорных технологий, способствующих повышению устойчивости. Доведение этих технологий в ближайшей и среднесрочной перспективе до уровня зрелости будет способствовать повышению устойчивости в долгосрочной перспективе, даже если обладатели этих технологий используют их только для национальных программ. Использование этих технологий в рамках синергетического сотрудничества для оказания содействия в реализации других менее развитых программ будет способствовать дальнейшему укреплению глобальной устойчивости. Ключевой задачей для всех перспективных ядерных технологий является улучшение экономических показателей.

Вследствие увеличения объемов ОЯТ в ближайшей и среднесрочной перспективе необходимо запустить в действие геологические хранилища для захоронения ОЯТ или увеличить мощности по переработке и ввести в эксплуатацию геологические хранилища для захоронения ВАО. Любой из этих вариантов позволит сократить накопления ОЯТ, одновременно обеспечивая решение проблемы отходов, отсутствующее в сегодняшних ЯЭС.

Успешное открытие и эксплуатация одного или нескольких хранилищ скорее всего уменьшит неопределенности в общественном принятии, связанные с ядерными отходами, и улучшит общественное отношение к конкретным проектам хранилищ, что позволит перейти к ускоренному развертыванию региональных хранилищ, принимающих отходы из разных стран. В зависимости от критериев приемки отходов ввод хранилищ в действие также может повлиять на решения о том, что более предпочтительно: прямое захоронение или переработка ОЯТ.

³ В этом контексте также могут быть затронуты вопросы общественного принятия, безопасности и защищенности от распространения.

8. Аналитический взгляд на синергетический подход и его реализацию

Синергия между технологиями, связанными с определенными типами реакторов и их топливными циклами (например, это может быть переработка или рециклирование отработавшего ядерного топлива в MOX-топливо, разделение и трансмутация), а также сотрудничество между обладателями и пользователями технологий, включая страны-новички, могут способствовать ускорению перехода к ЯЭС с повышенной устойчивостью. Однако сотрудничество будет жизнеспособным только в том случае, если оно основано на «взаимовыигрышной» стратегии как для поставщиков, так и для пользователей («пользуясь вместе, мы выигрываем вместе»). При этом, синдром неприятия чужой разработки со стороны некоторых владельцев технологий или стран, стремящихся обладать технологиями, может препятствовать сотрудничеству. Синергетическое сотрудничество на конечной стадии топливного цикла обеспечивает более высокие темпы роста мощностей и ведет к укрупнению централизованных предприятий топливного цикла, позволяя выигрывать от экономии ускоренного обучения и эффекта масштаба и поддерживать реализацию «взаимовыигрышных» совместных стратегий благодаря получаемым всеми экономическим выгодам.

Реализация национальных сценариев или совместных сценариев развития ядерной энергетики может столкнуться с многочисленными препятствиями, связанными с материальным дисбалансом в определенные моменты времени или недоступностью/неравномерным использованием мощностей на конечной стадии топливного цикла. Потенциальное наличие препятствий указывает на целесообразность тщательного анализа сценариев развития ядерной энергетики при определении долгосрочных национальных ядерно-энергетических стратегий, а также при оценке вариантов сотрудничества с другими странами. Чтобы результаты такого анализа были значимыми и практически достижимыми, необходим тщательный сбор и проверка исходных данных.

Синергетическое сотрудничество между странами на конечной стадии топливного цикла может столкнуться с препятствиями институционального и инфраструктурного характера. Поиск путей преодоления таких препятствий является необходимым шагом, позволяющим сотрудничающим странам двигаться в направлении устойчивой ядерной энергетики. В ближайшей и среднесрочной перспективе приоритетными могут стать задачи внесения изменений в национальное законодательство и разработки новых институциональных процедур, так как для решения этих задач может потребоваться время. В качестве первого шага здесь необходимо будет более конкретно и детально изучить совокупность правовых и институциональных вопросов в заинтересованных странах, являющихся обладателями технологий, пользователями технологий, и в странах-новичках.

Участники Диалог-форума ИНПРО, посвященного движущим силам и препятствиям в региональном сотрудничестве на пути к устойчивым ЯЭС, состоявшегося в Вене в 2012 году, обсудили синергетические подходы, способные объединить различные варианты ЯЭС в разных странах в глобальную ЯЭС с повышенной устойчивостью. Все участники форума поддержали идею о том, что такое синергетическое развитие может и будет полезным, однако движение в сторону его реализации должно в первую очередь исходить от нынешних лидеров в области ядерных технологий (например, Индии, Китая, Республики Корея, Российской Федерации, Соединенных Штатов Америки, Франции и Японии).

Синергетическое сотрудничество на конечной стадии ядерного топливного цикла между странами — обладателями технологий и странами — пользователями технологий, по-видимому, начнется с услуг, которые поставщики будут предоставлять пользователям технологий по индивидуальным контрактам, регулируемым двусторонними соглашениями между странами. При этом некоторые пользователи технологий могут отдать предпочтение заключению двусторонних соглашений со странами, которые являются принимающими для поставщиков, и предполагаемое появление в ближайшей или среднесрочной перспективе достаточно большого числа поставщиков способно обеспечить определенную конкуренцию, препятствующую монополизации услуг. Однако на форуме представители стран-новичков подчеркнули, что вариант аутсорсинга услуг на конечной стадии ядерного топливного цикла является предпочтительным только в краткосрочной перспективе. В среднесрочной и долгосрочной плане они считают предпочтительным международное решение по конечной стадии ядерного топливного цикла, исключая любые монопольные или картельные подходы.

9. Заключение

В настоящей брошюре представлены только основные результаты и выводы проекта сотрудничества SYNERGIES. Полная информация по проекту представлена в итоговом отчете по проекту «Enhancing Benefits of Nuclear Energy Technology Innovation through Cooperation among Countries, Final Report of the INPRO Collaborative Project on Synergistic nuclear energy regional group interactions evaluated for sustainability» («Увеличение преимуществ инновационных технологий ядерной энергетики благодаря сотрудничеству между странами»), опубликованном в 2018 году в качестве публикации NF-T-4.9 в Серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии [1]. Эта публикация содержит также несколько дополнений с информацией, полезной для дальнейших исследований вариантов повышения устойчивости ядерной энергетики.

В дополнении I представлены ключевые индикаторы для оценки сценариев сотрудничества по повышению устойчивости ЯЭС, использованные в тематических исследованиях. В дополнении II представлены данные, методы и инструменты экономической оценки. Дополнение III содержит краткое описание подхода GAINS. В дополнении IV кратко излагаются основные выводы четвертого Диалог-форума ИНПРО в том, что касается движущих сил и препятствий в региональном сотрудничестве на пути к устойчивым ЯЭС. В дополнении V представлена концепция вариантов повышения устойчивости ядерной энергетики.

Полные отчеты о тематических исследованиях, выполненных в рамках проекта SYNERGIES, включены в CD-ROM, прилагаемый к публикации [1].

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Enhancing Benefits of Nuclear Energy Technology Innovation through Cooperation among Countries, Final Report of the INPRO Collaborative Project on Synergistic nuclear energy regional group interactions evaluated for sustainability (SYNERGIES), IAEA Nuclear Energy Series NF-T-4.9, (2018)
<https://www.iaea.org/publications/12200/enhancing-benefits-of-nuclear-energy-technology-innovation-through-cooperation-among-countries-final-report-of-the-inpro-collaborative-project-synergies>
2. BRUNDTLAND COMMISSION, World Commission on Environment and Development, "Our Common Future", Oxford University Press, Oxford (1987)
3. ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, Конференция по окружающей среде и развитию, том I, Резолюции, принятые на Конференции (издание Организации Объединенных Наций, в продаже под № R.93.I.8 и исправление), Рио-де-Жанейро (1992)
4. UNITED NATIONS, World Energy Assessment, "Energy and the Challenge of Sustainability", (United Nations Publication, Sales No. 00.III.B.5), New York (2000).
5. ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, «Будущее, которого мы хотим», Итоговый документ Конференции Организации Объединенных Наций по устойчивому развитию, Рио-де-Жанейро, 20–22 июня 2012 года: https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/66/288&Lang=R
6. ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года», 2015: <https://undocs.org/ru/A/RES/70/1>;
<https://undocs.org/ru/A/RES/70/1>;
<https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>
7. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems. IAEA-TECDOC-1575, Vienna (2008)
8. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Infrastructure: A report of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO) IAEA Nuclear Energy Series NG-T-3.12, Vienna (2014).
9. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Economics: A report of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO) IAEA Nuclear Energy Series NG-T-4.4, Vienna (2014).
10. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact from Depletion of Resources: A report of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO) IAEA Nuclear Energy Series NG-T-3.13, Vienna (2015).
11. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact of Stressors: A report of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO) IAEA Nuclear Energy Series NG-T-3.15, Vienna (2016).
12. Analytical Framework for Analysis and Assessment of Transition Scenarios to Sustainable Nuclear Energy Systems, IAEA/INPRO Brochure, Vienna (2014)
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, (2013):
14. ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, Наше общее будущее (Доклад Генеральной Ассамблеи), Всемирная комиссия по вопросам окружающей среды и развития, ООН, Нью-Йорк (1987):
https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/42/427&Lang=R
15. THE U.S. GOVERNMENT FEDERAL REGISTER, Subsequent Arrangement between the United States and India, Vol. 75, No. 95, May 18, 2010, Notices, p. 27768

16. EUR-LEX ACCESS TO EUROPEAN UNION LAW, Consolidated version of the treaty establishing the European Atomic Energy Community; 2012/C 327/01
17. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A Users' Guide, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-5.2, IAEA, Vienna (2016):
18. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, Technology Readiness Assessment Guide, DOE G 413.3-4 10-12-09, Washington D.C. (2009)
www.directives.doe.gov
19. Advances in Small Modular Reactor Technology Development, A Supplement to IAEA Advanced Reactor Information System (ARIS), IAEA Brochure 2018

Сокращения

АРИС	Информационная система по усовершенствованным реакторам
АЭС	атомная электростанция
АЯЭ-ОЭСР	Агентство по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития
БН	быстрый натриевый (реактор), реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем российской конструкции
БР	быстрый реактор, реактор на быстрых нейтронах
ВАО	высокоактивные отходы
ВВЭР	водо-водяной энергетический реактор российской конструкции
ЕРР	единица работ разделения
ЕС	Европейский союз
ИНПРО	Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам
КС	критический стенд
МА	минорные актиниды, младшие актиниды
МАГАТЭ	Международное агентство по атомной энергии
НИОКДР	научно-исследовательские, опытно конструкторские и демонстрационные работы
НИОКР	научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
НСАО	низко- и среднеактивные отходы
ОТЦ	открытый топливный цикл, незамкнутый топливный цикл
ОЯТ	отработавшее ядерное топливо
ПГ	парниковые газы
ПУРЕКС-процесс	процесс очистки плутония и урана методом экстракции
РТ	разделение и трансмутация
СНГ	Содружество Независимых Государств
СОУ	среднеобогащенный уран
ФВ	фотовольтаика, солнечная фотовольтаика, солнечная энергетика
ЦУР	цель устойчивого развития
ЯГ	ядерная группа (группа стран, объединенных по характеру ядерной стратегии)

ЯЭС	ядерно-энергетическая система
ADS	ADS (ЭЛЯУ, электроядерная установка с ускорителем-драйвером)
AHWR	усовершенствованный тяжеловодный реактор
ALWR	усовершенствованный легководный реактор
(A)LWR	легководный реактор (усовершенствованный легководный реактор)
CANDU	канадский дейтериево-урановый реактор (корпусной тяжеловодный реактор)
CAREM	аргентинский модульный реактор малой мощности
DU	обедненный уран
DUPIC	DUPIC-процесс (прямое использование отработавшего топлива PWR в реакторах CANDU)
EPR	европейский реактор с водой под давлением (эволюционный энергетический реактор) — французский проект
ERU	обогащенный уран
FBR	быстрый реактор-размножитель (реактор-размножитель на быстрых нейтронах)
F(B)R	быстрый реактор/быстрый реактор-размножитель
GAINS	проект сотрудничества ИНПРО «Глобальная архитектура инновационных ядерно-энергетических систем с тепловыми и быстрыми реакторами и замкнутым топливным циклом
HTGR	высокотемпературный газоохлаждаемый реактор
HTR	высокотемпературный реактор
HWR	тяжеловодный реактор
LUEC	приведенная удельная стоимость электроэнергии
LWR	легководный реактор
MELOX	завод по рециклированию ядерного топлива группы «Орано» (бывшей «АРЕВА») во Франции
MESSAGE	Модель для анализа альтернативных стратегий энергоснабжения и их общего воздействия на окружающую среду (аналитический инструмент ИНПРО)
MOX	смешанное оксидное топливо
MSR	жидкосолевой реактор, реактор на расплавах солей
NESA	оценка ядерно-энергетических систем (по методологии ИНПРО)
OREOX	окисление и восстановление оксидного топлива
PHWR	корпусной тяжеловодный реактор
PWR	реактор с водой под давлением
REPU	переработанный уран
SCWR	сверхкритический водоохлаждаемый реактор
SFR	реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (быстрый натриевый реактор)
SMR	модульный реактор малой мощности
TOP-MOX-топливо	ядерное топливо на основе MOX-топлива, разработанное группой «Орано» (бывшей «АРЕВА»)
TRISO	трехструктурное изотропное топливо
TRU	трансураны (трансурановые элементы)
UOX	урановое оксидное топливо
VHTR	сверхвысокотемпературный реактор



INPRO

International Project on
Innovative Nuclear Reactors
and Fuel Cycles