

**WORLD
ENERGY
COUNCIL**

Сценарии развития мировой энергетики | 2019



БУДУЩЕЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ: ПОИСК ГАРМОНИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ПЕРЕХОДЕ

При содействии Всемирной ядерной ассоциации
и Института Пауля Шеррера

О МИРОВОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СОВЕТЕ

Мировой энергетический совет (МИРЭС) является ведущей независимой организацией, объединяющей лидеров и специалистов-практиков в области энергетики, выступающей за доступную, стабильную и экологичную энергетическую систему на благо всего человечества.

Основанный в 1923 году, МИРЭС является глобальной энергетической площадкой, и ориентируется на весь спектр использования энергетических ресурсов. В его состав входят более 3000 организаций-членов из почти 90 стран, представляющих правительства, частные и государственные корпорации, научно-исследовательскую сферу, общественные организации и других различных стейкхолдеров сферы энергетики. Мы информируем о мировых, региональных и национальных стратегиях в области энергетики путем проведения мероприятий высокого уровня, таких как Мировой энергетический конгресс, посредством публикаций авторитетных исследований, а также работы через обширную сеть членов МИРЭС для содействия развитию диалога в области мировой энергетической политики.

С подробной информацией можно ознакомиться на сайте www.worldenergy.org и на странице Twitter @WECouncil.

Опубликовано Мировым энергетическим советом в 2019 году.

Авторские права принадлежат Мировому энергетическому совету © 2019 г. Все права защищены. Разрешается использование или воспроизведение всей публикации или ее части при условии включения следующей цитаты в каждый экземпляр или передаваемое сообщение: «Используется с разрешения Мирового энергетического совета»

Мировой энергетический совет
Зарегистрирован в Англии и Уэльсе
№ 4184478

Идентификационный номер VAT: GB 123 3802 48

Юридический адрес

62–64 Cornhill
London
EC3V 3NH
United Kingdom

ОБ ОТЧЕТЕ

В отчете «Будущее атомной энергетики: поиск гармонии в энергетическом переходе» представлен ряд глобальных сценариев, описывающих альтернативные пути развития атомной энергетики в горизонте до 2060 г. Отчет составлен на базе Сценариев развития мировой энергетики Мирового энергетического совета – «Джаз-модерн» (Modern Jazz), «Незаконченная симфония» (Unfinished Symphony) и «Хард-рок» (Hard Rock), с учетом наработок лидеров энергетического сектора.

Настоящий отчет направлен на содействие обмену знаниями и повышение качества диалога между членами МИРЭС, экспертами и лидерами энергетики и другими участниками процесса формирования энергетической политики.

Настоящий отчет составлен при содействии Всемирной ядерной ассоциации.

Архетипы сценариев развития мировой энергетики, использованные в настоящем отчете, были разработаны МИРЭС в 2016 г. совместно с компанией Accenture Strategy и институтом Пауля Шерпера.

СОДЕРЖАНИЕ

РЕЗЮМЕ	2
1 ВВЕДЕНИЕ	5
2 МЕНЯЮЩИЙСЯ ЛАНДШАФТ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	9
3 МИР ДО 2060 ГОДА	17
В ЧЕМ ЗАКЛЮЧЕНА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ?	18
КЛЮЧЕВЫЕ ФАКТОРЫ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ	20
4 СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	23
«ДЖАЗ-МОДЕРН»	24
«НЕЗАКОНЧЕННАЯ СИМФОНИЯ»	28
«ХАРД-РОК»	33
5 НОВЫЕ ИМПЕРАТИВЫ СОТРУДНИЧЕСТВА	37
ПРИЛОЖЕНИЕ	41
ОПИСАНИЕ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	42
ИСТОЧНИКИ	48
МОДЕЛИРОВАНИЕ	49
ПЕРЕЧЕНЬ РИСУНКОВ И ТАБЛИЦ	50
МЕТОДОЛОГИЯ	51
ТАБЛИЦЫ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ДАННЫМИ	54
БЛАГОДАРНОСТИ	60

РЕЗЮМЕ

Все больше признается тот факт, что ядерная энергия займет свое место в будущем глобальном энергетическом балансе и будет вносить вклад в устойчивое развитие. Однако на развитие ядерной энергетики и возрастание её роли в рамках общемирового перехода к безуглеродной энергетике будет влиять ряд факторов.

Темпы и направления глобального перехода к безуглеродной энергетике являются частью гораздо более широкого комплекса общемировых изменений. В настоящее время идет процесс так называемого «Большого перехода» (Grand Transition), который предполагает фундаментальный социально-экономический сдвиг в свете грядущей эры цифровой и экологической эффективности. В более широком контексте перспективы атомной и других форм производства энергии определяются сложным и непредсказуемым взаимодействием глобальных факторов, таких как децентрализация, декарбонизация, цифровизация и геополитика. Появляются многочисленные развилки на пути к успешному общемировому переходу к низкоуглеродной энергетике.

Инновации будут играть в этом процессе важнейшую роль не только за счет новых, более совершенных энергетических технологий: возросшее количество и качество инноваций также привело к появлению множества новых методов производства, торговли, а также использования первичной энергии и электроэнергии в таких сферах, как транспорт, строительство и эксплуатация зданий, промышленность.

Осознавая разнообразие перспектив развития ядерной энергии, Мировой энергетический совет (далее — «МИРЭС») при содействии Всемирной ядерной ассоциации (далее — «Ассоциация») привлёк ведущих лидеров энергетического сектора для обмена взглядами о перспективах будущего отрасли, что стало основой данного секторального отчета. Основные наработки также были использованы в обновлении Сценариев развития мировой энергетики МИРЭС.

В данном отчете будущее ядерной энергетики рассматривается сквозь призму Сценариев развития мировой энергетики МИРЭС: «Джаз-модерн» (Modern Jazz), «Незаконченная симфония» (Unfinished Symphony) и «Хард-рок» (Hard Rock) – трех вероятных альтернативных путей будущего энергетики. В отчете также описываются вероятные последствия для роли ядерной энергии в глобальном энергетическом переходе.

В программе «Гармония» (Harmony), координируемой Всемирной ядерной ассоциацией, изложено видение будущего электроэнергии с учетом цели обеспечения к 2050 году доли ядерной генерации не менее чем 25 % от общемирового объема производства электроэнергии, в рамках стремлений к созданию чистого и надежного низкоуглеродного мирового энергобаланса. Программа «Гармония» работает со всем энергетическим сообществом, чтобы заручиться поддержкой ключевых стейкхолдеров для обеспечения низкоуглеродного будущего, при максимальном вкладе ядерной энергетики.

РАЗВИТИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ТРЁХ СЦЕНАРИЯХ

Согласно трем сценариям ядерная энергетика будет частью энергобаланса, однако каждый сценарий предусматривает весьма отличные друг от друга пути развития:



Сценарий **«Джаз-модерн» (Modern Jazz)** представляет инновационный, ориентированный на глобальный рынок мир, коренным образом преобразившийся за счет цифровых технологий. Согласно сценарию «Джаз-модерн», ядерная энергетика обладает потенциалом к модернизации, начиная с сооружения новых реакторов и заканчивая оказанием различных услуг, а также потенциалом к сохранению статуса предпочтительного энергоресурса, в частности в крупнейших ядерных державах и странах с развивающейся экономикой, которые увеличивают свои мощности ядерной генерации. При таком сценарии к 2060 году на долю ядерной энергетики будет приходиться 8,5 % от общего объема производимой электроэнергии. Установленная мощность АЭС увеличится на 52 % с 407 ГВт в 2015 году до 620 ГВт в 2060 году.



Сценарий **«Незаконченная симфония» (Unfinished Symphony)** представляет собой мир, в котором скоординированные и устойчивые модели экономического роста сочетаются с ориентацией на применение низкоуглеродных источников. Данный сценарий предусматривает повсеместное использование ядерной энергии в качестве одной из надежных и доступных мер реагирования на изменение климата. При таком сценарии доля ядерной энергетики достигнет 13,5 % от общего объема производства электроэнергии к 2060 году, а установленная мощность увеличится почти в три раза – до 1003 ГВт. В дополнение к проектам по сооружению новых АЭС и продлению срока службы существующих, значительный вклад в мировой парк ядерных реакторов вносят новые ядерные технологии (малые модульные реакторы, плавучие установки и реакторы IV поколения).



В сценарии **«Хард-рок» (Hard Rock)** рассматриваются последствия относительно слабого и неустойчивого мирового экономического роста в условиях ориентации стран на развитие национальных экономик. При таком сценарии доля ядерной энергетики в общемировом производстве электроэнергии достигнет 12,5 % к 2060 году, при этом установленная мощность в 2060 году вырастет на 70 % – до 696 ГВт. Мировая атомная отрасль будет фокусироваться на сооружении новых реакторов на развивающихся рынках и продление срока эксплуатации АЭС в странах с развитой экономикой.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ЛИДЕРОВ ОТРАСЛИ

1 ИННОВАЦИИ ВЛИЯЮТ НА ВСЮ ЦЕПОЧКУ СОЗДАНИЯ СТОИМОСТИ. КАК УСКОРИТЬ ТЕМПЫ ИХ ОСВОЕНИЯ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ?

Ускоряющиеся темпы внедрения инноваций, особенно в рамках цифровизации, размывают границы энергетического сектора и дают возможность новым игрокам выйти на рынок. Заглядывая в будущее, можно сказать, что цифровизация способна повысить эффективность атомной отрасли и обеспечить возможность принятия более обоснованных решений в отношении строительства новых объектов и продлению срока службы существующих. Однако рост эффективности в других секторах, включая возобновляемые источники энергии (ВИЭ), накопление и хранение энергии, а также улавливание и хранение двуокси углерода, также ускорится. Относительные темпы освоения новых технологий в атомной отрасли можно увеличить за счет международного сотрудничества в области гармонизации процессов регулирования, что позволит реализовывать проекты реакторов по всему миру с минимальными изменениями. Данный подход позволил бы значительно снизить затраты и нивелировать факторы неопределенности при реализации проектов.

Ядерная энергетика является одним из наиболее рентабельных способов производства электроэнергии во многих странах, и управление проектами в данной отрасли активно совершенствуется. Отрасль должна и дальше обеспечивать успешную реализацию проектов, как это происходит в рамках текущих программ в Азии, России и других регионах, где успехи проектов

наглядно демонстрируют возможности ускорения темпов внедрения инноваций и использования преимуществ цифровизации и стандартизации для обеспечения конкурентоспособности ядерной энергетики в целом.

2 УПРАВЛЕНИЕ БАЛАНСОМ МЕЖДУ ГИБКОСТЬЮ И СТАБИЛЬНОСТЬЮ. КАКИМ ОБРАЗОМ ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА МОЖЕТ СОЗДАТЬ УСЛОВИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ, ГИБКИХ И НАДЕЖНЫХ СИСТЕМ?

В рамках всех трех сценариев электрификация по-прежнему является движущей силой декарбонизации. Вместе с тем, рост производства возобновляемой энергии на базе источников периодического действия связан с системными издержками. Помимо обеспечения чистой и низкоуглеродной энергии, ядерная энергетика вносит вклад в стабильность всей системы и её устойчивость. В настоящее время данный вклад не учитывается при сравнении стоимости выработки электроэнергии. Проекты реакторов малой и средней мощности, которые сейчас находятся на стадии разработки или строительства в разных странах и, как ожидается, будут полностью коммерциализованы в ближайшие 10-15 лет, могли бы открыть существенные возможности для синергии при использовании гибридных энергетических систем с комбинированным использованием ВИЭ и атомных реакторов. Сокращение расходов на электролиз на АЭС также открывает возможности для содействия развитию мировой торговли водородом, что во многом зависит от глобального сотрудничества в поиске новых, экономически привлекательных решений в области производства, поставок и дистрибуции водорода.

3 КАКИМ ОБРАЗОМ ОБЕСПЕЧИТЬ ПОНИМАНИЕ И ПРИЗНАНИЕ СОЗДАВАЕМОГО АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКОЙ ПОЗИТИВНОГО ВКЛАДА В ДЕКАРБОНИЗАЦИЮ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ?

Несмотря на растущую глобальную осведомленность о климатических изменениях и о роли ядерной энергетики как низкоуглеродного источника энергии, для создания равных конкурентных условий, в которых сопоставлялись бы все издержки различных технологий, требуется усиленная поддержка со стороны лиц, определяющих политику. В публичном пространстве повышение осведомленности о преимуществах ядерной энергии является отправной точкой для разъяснения оснований для включения ядерной энергетики в «зелёные» инициативы.

Вопросы обращения с отработавшим ядерным топливом и высокорadioактивными отходами остаются открытыми во всех трех сценариях. Общественность и игроки отрасли совместно работают над их окончательным решением. В настоящее время, в нескольких странах на стадиях разработки и строительства находятся долгосрочные хранилища, которые, как ожидается, обеспечат безопасное окончательное захоронение небольших объемов этих материалов.

Нейтральная в технологическом отношении политика, которая позволяет рассматривать все виды низкоуглеродных технологий, включая ядерную энергию, будет играть основополагающую роль для стимулирования инвестиций и сокращения затрат с целью создания наилучшей стоимости для потребителей.

Каким образом ядерная энергия впишется в энергетическую систему будущего будет зависеть от четырех критически важных вызова и возможности: ускоренное освоение технологий, синергия ВИЭ и ядерной энергии, эффективное использование имеющихся преимуществ атомной энергии, и лидерство, нацеленное на долгосрочную повестку. Возможные последствия этих процессов, с которыми сталкиваются лидеры мировой атомной индустрии и энергетического сектора подробно изложены в данном отчете.

Глава 1

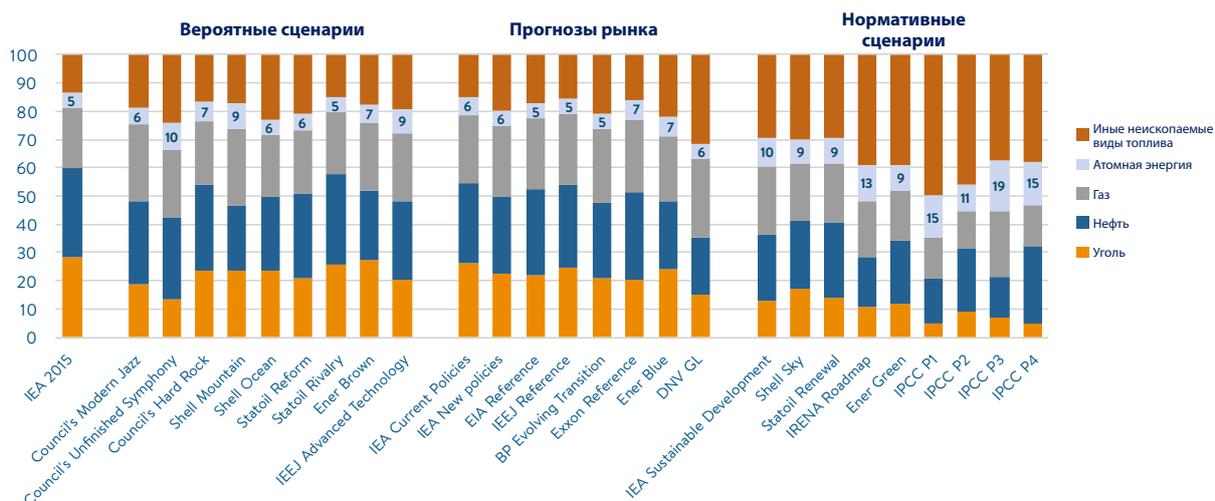
ВВЕДЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Во всем мире наблюдаются быстрые, фундаментальные трансформации энергетических систем за счет новых технологий, развивающихся ускоренными темпами, на фоне все более обширных изменений в социальной сфере, геополитике и окружающей среде.

Очевидно, что ядерная энергия будет частью мирового энергобаланса в течение грядущих десятилетий, однако её доля и темпы роста будут зависеть от ряда факторов. Некоторые из них в значительной степени определяются развитием самой атомной отрасли, например, скоростью внедрения инноваций в области новых ядерных технологий и формированием политики в отношении обращения с накопившимися отходами. При этом другие факторы, например, энергетическая политика, устройство рынков и механизмов финансирования, формируются и находятся под влиянием более широкого круга стейкхолдеров за пределами атомной отрасли. Многие нормативные сценарии, опирающиеся на конкретные целевые показатели, прогнозируют рост сектора ядерной энергетики. Например, согласно специальному отчету Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) о глобальном потеплении на 1,5 °С, к 2040 году доля ядерной энергии в общем объеме производимой электроэнергии составит до 19 % (трехкратный рост относительно аналогичного показателя 2010 года), что будет способствовать выполнению обязательств по Парижскому соглашению (в рамках РКИК ООН) и достижению Целей устойчивого развития ООН (Рисунок 1).

Рисунок 1: Структура первичного энергетического баланса к 2040 г. и доля атомной энергетики (%)



Источник: «Обзорное сравнение сценариев развития мировой энергетики» (Global Energy Scenarios Comparison Review), 2019 г., Мировой энергетический совет

Из-за глубокой неопределенности в отношении будущего развития энергетики, возникает большое разнообразие версий о развитии и роли ядерной энергии в успешном глобальном переходе к альтернативным источникам энергии. В качестве нейтральной с точки зрения технологий и географии организации, Мировой энергетический совет (далее — «МИРЭС») при содействии Всемирной ядерной ассоциации (далее — «Ассоциация») разработали отчет о будущей роли ядерной энергии. Данные прогнозы оказали влияние на новые глобальные концепции ядерной энергетики, разработанные МИРЭС, в которых будущее ядерной энергетики рассматривается сквозь призму трех глобальных сценариев: «Джаз-модерн» (Modern Jazz), «Незаконченная симфония» (Unfinished Symphony) и «Хард-рок» (Hard Rock). В контексте каждого сценария описывается вероятная роль ядерной энергетики до 2060 г. Данные сценарии подкрепляются иллюстративной количественной оценкой и отмечают пространство возможностей совместных действий для стейкхолдеров отрасли.

СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ МИРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Начиная с 2010 года, МИРЭС разрабатывает Сценарии развития мировой энергетики с целью оказания содействия лидерам энергетического сектора в адаптации к новым реалиям, возникающим по мере того, как глобальная энергетическая система претерпевает коренные изменения в контексте так называемого «Великого перехода».

В условиях «Великого перехода» возникает ряд путей развития энергетики. В 2016 году МИРЭС представил три сценария развития энергетики до 2060 года, такой горизонт был взят для поддержания дискуссии о климатических изменениях. Хотя все три сценария отражают одни и те же предопределенные факторы, в каждом отдельном сценарии делается разный акцент на том, каким образом могут проявляться четыре критических фактора неопределенности. Каждая сюжетная линия описывает вероятные события. Эти сценарии не следует рассматривать как прогнозы или траектории достижения целевых показателей, и ни один из них не отстаивает какой-либо вариант будущего развития как предпочтительный.

«Джаз-модерн» (Modern Jazz) представляет инновационный, ориентированный на глобальный рынок мир, коренным образом преобразившийся за счет цифровых технологий. Сценарий «Незаконченная симфония» (Unfinished Symphony) представляет мир, в котором появляются более скоординированные и устойчивые модели экономического роста с массовой ориентацией на применение низкоуглеродных источников в будущем. В сценарии «Хард-рок» (Hard Rock) рассматриваются последствия относительно слабого и неустойчивого мирового экономического роста в условиях ориентации стран на развитие национальных экономик.

В рамках подготовки к 24-му Всемирному энергетическому конгрессу МИРЭС проверил обоснованность сценариев и принял решение сохранить существующую систему моделей. При этом МИРЭС обновил и переориентировал некоторые предпосылки развития мировой энергетики и расширил горизонт до 2040 года с целью изучения быстро меняющейся картины инновационного развития. Результат данной работы будет полезен для лидеров энергетического сектора в ситуации, когда они сталкиваются с явлением т.н. «подрывных инноваций» и последствиями перехода к низкоуглеродным и устойчивым источникам энергии.

ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЦЕНАРИЕВ

Для лидеров энергетического сектора применение сценариев в процессах принятия решений представляется полезным по трём причинам:

- Сценарии открывают возможность для конструктивного решения проблем в условиях глубокой неопределенности;
- Они предоставляют возможности для открытого и продуктивного диалога, где взгляды участников могут различаться;
- Они позволяют избежать ловушек при прогнозировании и помогают подготовиться к непредвиденным ситуациям будущего, независимо от желаний или ожиданий лиц, принимающих решения.

В данном разделе представлены два различных способа применения Сценариев развития мировой ядерной энергетики.

1. Платформа для качественного диалога – обеспечение равных конкурентных условий

Одним из наиболее значительных направлений применения сценариев является создание площадки для диалога по наиболее сложным и спорным вопросам. При наличии существенных разногласий, в обычных условиях открытое и честное обсуждение бывает практически невозможно. Представителям той или иной стороны приходится постоянно отстаивать свои позиции и зачастую попытка взглянуть на ситуацию глазами оппонента рассматривается как идеологически неверный шаг.

В таких ситуациях, когда «политическая» обстановка накалена, дискуссия может быстро превратиться в спор; или же, если к этому располагают обстоятельства, на неприятных моментах будут просто из вежливости не заострять внимание. В таких ситуациях команда, состоящая из людей с различными точками зрения, может совместно разрабатывать и использовать сценарии даже тогда, когда они не могут прийти к общей идеологической позиции. Ведь сценарии – это только версии того, что может произойти, а не то, что должно произойти или произойдет.

Зачастую в процессе создания определенного сценария у людей, придерживающихся противоположных позиций, появляется возможность понять другую точку зрения и увидеть потенциальные возможности для сотрудничества. Восприятие информации, излагаемой оппонентом, меняется и зачастую это позволяет достичь взаимопонимания.

Существует значительное расхождение во мнениях относительно роли ядерной энергии при создании доступных условий для декарбонизации и всеобщего процветания. С одной стороны, в политической риторике все чаще признается та роль, которую ядерная энергия может играть в достижении целей Парижского соглашения и в создании новых условий для промышленного развития. С другой стороны, обсуждение политики, которая могла бы открыть новые и более эффективные пути развития атомной энергетической отрасли, зачастую игнорируется или избегается. Обсуждение вопросов на базе сценариев может помочь в выявлении проблем, связанных с выбором стратегического курса, а также способствовать выработке новых политических подходов.

2. Претворение нормативного прогноза и видения в жизнь

Нормативный прогноз (видение) представляет собой символическую картину будущего, которая отражает общие ценности и призвана мотивировать на практические изменения. Во избежание появления иллюзий необходимо, чтобы в основе видения лежали реальные факты и предпосылки. Реализации видения в виде конкретных действий можно достичь посредством «обратного прогнозирования» от будущего к настоящему для разработки рациональных и функциональных планов действий и дорожных карт с реалистичными контрольными точками и бюджетами.

Наряду с созданием нового общего видения, можно применить ряд сценариев для стресс-теста имеющегося видения на прочность в различных контекстах, с целью выявления и устранения пробелов между желаемыми событиями и событиями, к которым необходимо быть готовыми.

ВСЕМИРНАЯ ЯДЕРНАЯ АССОЦИАЦИЯ – ПРОГРАММА «ГАРМОНИЯ»

Международное сообщество атомщиков при взаимодействии со Всемирной ядерной ассоциацией разработало программу «Гармония», в которой излагается видение будущего электроэнергетики с целью содействия глобальным усилиям по решению проблем, связанных с «энергетическим переходом». Цель состоит в том, чтобы до 2050 года ядерная энергетика обеспечивала не менее 25% генерации электроэнергии в составе надежного и чистого мирового энергобаланса. Это потребует строительства не менее 1000 ГВт новых атомных мощностей.

Программа «Гармония» преследует три цели:

- Создание равных конкурентных условий на энергетических рынках, которые будут стимулировать инвестиции в будущую экологически чистую энергетику, где атомная энергия будет рассматриваться наравне с прочими способами генерации с низким уровнем выбросов углерода, и где будет признаваться её ценность для надежного и устойчивого мирового энергобаланса.
- Обеспечение унифицированных процессов регулирования для обеспечения более согласованного, эффективного и предсказуемого режима лицензирования деятельности в сфере использования атомной энергии, а также для содействия значительному росту атомных энерго мощностей и своевременному лицензированию новых проектов реакторов.
- Создание эффективной парадигмы безопасности, ориентированной на подлинное благосостояние населения, где преимущества атомной энергии в отношении безопасности для здоровья и окружающей среды оцениваются наравне с другими типами генерации.

Глава 2

Меняющийся ландшафт ядерной энергетики

2. МЕНЯЮЩИЙСЯ ЛАНДШАФТ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Исторически сложилось так, что масштабные изменения в ядерной энергетике занимали срок от десятилетия и более; это отражает реальный факт, что на проектирование, финансирование и сооружение атомных станций требуются годы. Однако при использовании методики сценариев внимание лиц, принимающих решения, переориентируется на изменения за пределами сферы энергетике, а также на новые технологии, находящиеся на начальных стадиях своего развития. Данный процесс отслеживания информации из различных источников призван предложить альтернативные точки зрения на ключевые драйверы изменений, которые будут формировать будущее ядерной энергетике.

В 2019 году МИРЭС и Всемирная ядерная ассоциация совместно провели серию из 18 глубинных интервью с лидерами сферы энергетике и других секторов экономики с целью анализа текущего и будущего состояния атомной энергетике. Опрошенным было предложено определить основные изменения в политических, инвестиционных и общественных взглядах за последние три-пять лет, основные факторы, которые будут определять развитие ядерной энергетике в будущем, а также различные формирующиеся на сегодняшний день сценарии развития ядерной энергетике на ближайшие два десятилетия.

Ниже приведены обобщенные данные, полученные в результате интервью, представленные по принципу актуальности (низкая или высокая частота упоминаний) и степени совпадения позиций опрошенных экспертов.

АНАЛИЗ МНЕНИЙ ЭКСПЕРТОВ – ОБОБЩЕНИЕ ДАННЫХ ГЛУБИНЫХ ИНТЕРВЬЮ



Источник: Обобщение серии интервью, Мировой энергетический совет, Всемирная ядерная ассоциация

Интервью проливают свет на следующие реалии:

- Обсуждение вопросов, касающихся будущего ядерной энергетики, отличается разобщенностью, и, хотя нет никаких сомнений в том, что ядерная энергия является экономически выгодным источником энергии с низким уровнем выбросов углерода, не существует единого мнения о том, каким образом преимущества ядерной энергии в плане обеспечения энергетической безопасности будут оценены и учтены в рамках либерализованной рыночной системы. Сотрудничество в инновациях и гибридные энергетические системы могут помочь найти необходимое решение.
- Перед ядерной энергетикой стоят два ключевых вопроса: будут ли взяты под контроль на рынках ОЭСР сроки строительства и стоимость реакторов большой мощности; и удастся ли отрасли вовремя вывести на рынок реакторы малой и средней мощности? Ответы на данные вопросы будут играть важную роль в определении того, кто будет использовать ядерную энергию в будущем, и каким образом они будут ее использовать. Также важно продолжать заниматься вопросами ядерных отходов и обращения с отработавшим ядерным топливом.
- Среди новейших возможностей для инноваций – потребительская логика «по требованию», цифровизация энергоуслуг, доступная декарбонизация, а также гибкость между поставками и хранением, открывают новые возможности развития ядерных технологий нового поколения.
- Возможности для эффективного использования синергии и сопутствующих выгод: в тех случаях, когда ядерная энергия в политическом и социальном отношении становится частью процесса перехода на экологически чистые источники энергии, сопутствующие выгоды будут включать в себя увеличение количества децентрализованных источников переменной возобновляемой энергии, доступную и более глубокую декарбонизацию, а также большую экономическую и экологическую выгоду в виде новых рабочих мест и устойчивого землепользования.

Прочие данные, полученные в результате интервью и углубленного поиска информации из различных источников, представлены ниже.

РОЛЬ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

Высокая удельная мощность и надежность ядерных энергетических установок делают их пригодными для обеспечения базовых нагрузок энергетической системы. По сравнению с ископаемым топливом, ядерная энергия обладает двумя отличительными преимуществами. Во-первых, она является низкоуглеродным источником энергии. Во-вторых, она является предсказуемым и относительно недорогим источником электроэнергии: стоимость топлива на единицу мощности является предельной и не колеблется по цене так же сильно, как ископаемое топливо. Современные ядерные технологии могут вписаться в крупные энергосистемы промышленно развитых стран. Предполагается, что при коммерческом внедрении атомные станции малой и средней мощности (АС МСМ) будут легко совместимы с относительно малыми энергосистемами с низким уровнем производственного потребления и неразвитым сетевым хозяйством, или же с децентрализованными энергосистемами. Проекты АС МСМ обещают быть более гибкими при выборе площадок и эксплуатации, а также смогут поставлять тепло наряду с электричеством.

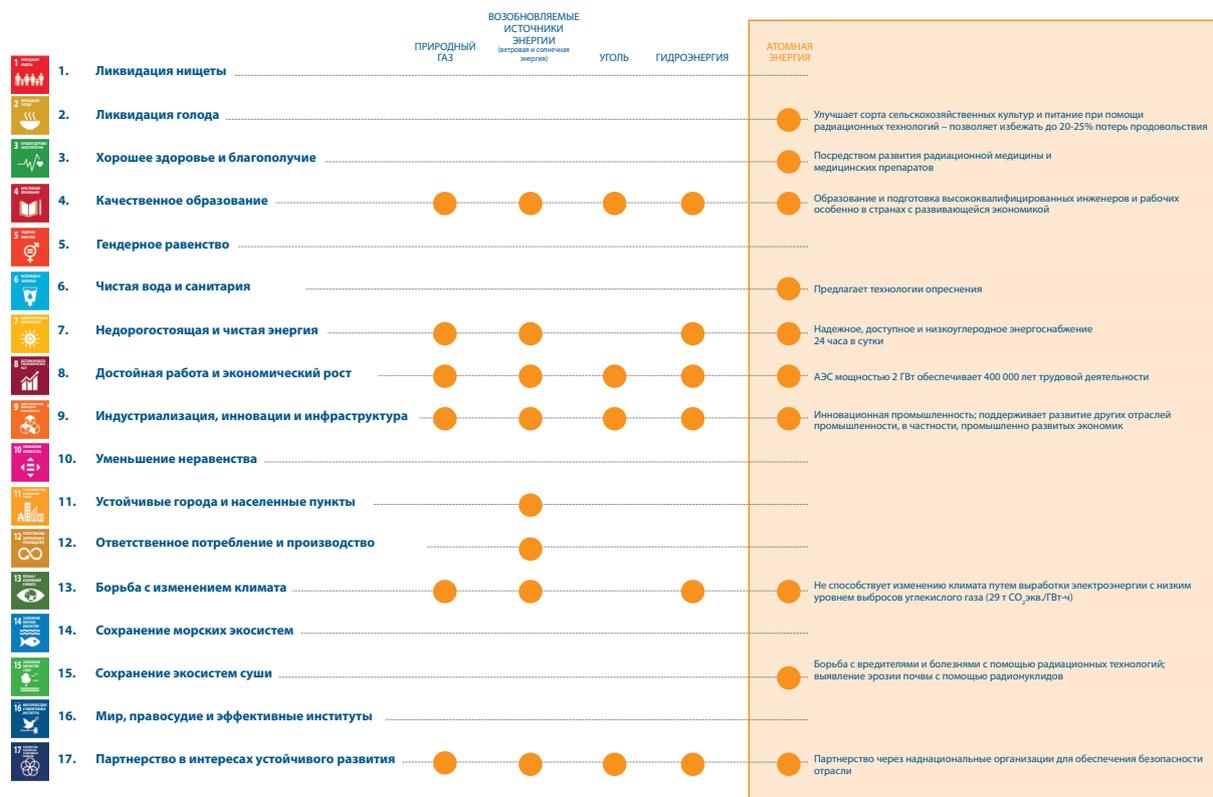
УСКОРЕНИЕ ТЕМПОВ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ

Некоторые недавние проекты по сооружению новых АЭС в странах ОЭСР были отмечены перерасходом средств и задержками, что негативно сказалось на потенциале всей атомной энергетической промышленности. Многие отраслевые эксперты ожидают, что цифровая революция трансформирует информационный обмен, улучшит управление проектами и сократит затраты на строительство. Цифровые технологии уже оказывают влияние на ядерную промышленность во всем мире. Кроме того, можно рассчитывать на повышение доходности посредством продления срока эксплуатации, модернизации или повышения мощности АЭС. Использование цифровых технологий на протяжении всего жизненного цикла ядерной энергетической установки – от разработки проекта до строительства и эксплуатации, капитального ремонта, модернизации – может помочь отрасли добиться поэтапного изменения производительности и повысить прозрачность взаимодействия с регуляторами.

ПРОГРАММА УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ООН

Цели ООН по устойчивому развитию, принятые в 2015 году, определяют направление новых мировых концепций, международных обязательств и национальных приоритетов. Атомная энергетика обладает преимуществами по целому ряду социальных, экологических и экономических показателей по сравнению с другими источниками энергии. Развитие атомной энергетики и промышленности содействует как минимум 10 из 17 целей.

ВКЛАД АТОМНОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ДОСТИЖЕНИЕ ЦЕЛЕЙ ООН ПО УСТОЙЧИВОМУ РАЗВИТИЮ



Источник: Анализ Мирового энергетического совета

ПОТЕНЦИАЛ СИНЕРГИИ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Непостоянность некоторых ВИЭ остается проблемой для систем электроснабжения, поскольку она требует повышения гибкости и дополнительных издержек за счет хранения, балансировки и передачи электроэнергии. Ядерная энергетика способна обеспечить надежные поставки низкоуглеродной электроэнергии, что имеет решающее значение для стабильности всей энергосистемы. Опыт Франции и Германии хорошо продемонстрировал способность АЭС адаптироваться к системе и возможность наращивать использование ВИЭ энергии при меньших затратах. Ядерная энергетика в данной роли снижает потребность в большем количестве электростанций для обеспечения пиковой нагрузки, таких как газовые электростанции с технологиями улавливания, использования и хранения углерода.

Существуют возможности интеграции ядерной энергетической системы с системами ВИЭ и хранения электроэнергии, что будет способствовать разработке гибридных интегрированных энергетических

При более внимательном рассмотрении, однако, видны другие критические различия в национальных стратегиях развития атомной энергетики стран-участниц ОЭСР и стран, не входящих в неё. В Европе стратегии развития включают в себя атомные электростанции большой мощности, зачастую строящиеся по одной в странах с разными нормативными и лицензионными требованиями. Для стран-участниц ОЭСР атомная энергетика – важный источник надежной и доступной низкоуглеродной энергии для обеспечения базовой нагрузки в энергосистеме с ограниченной зависимостью от колебаний цен на топливо по сравнению с системами на ископаемом топливе. В то же время, страны-участницы ОЭСР эксплуатируют устаревающие реакторы, и содержат ядерное наследие, включая отработавшее топливо и радиоактивные отходы, и заменяют низкоуглеродные мощности на новые ядерные или иные.

Для ряда стран, не входящих в ОЭСР, атомная энергетика является решением для удовлетворения растущего спроса на энергию и дает возможность промышленного развития без увеличения вредных выбросов. Некоторые страны рассматривают строительство АЭС на новых площадках, тогда как другие останавливаются на добавлении одного-двух дополнительных энергоблоков к уже работающим АЭС.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К РАЗВИТИЮ ПАРКА АЭС

Электроэнергия, вырабатываемая АЭС, может обладать конкурентоспособной ценой, со значительной частью прибыли за счёт строительства стандартизированных проектов, максимальным использованием модульных компонентов при строительстве и реализации программ комплексного сооружения парка АЭС. Такой комплексный подход или серийное строительство – наиболее эффективный метод развития национальной атомной энергетики, поскольку он снижает стоимость технологии по ходу её освоения и обеспечивает экономию за счёт эффекта масштаба на всей производственно-сбытовой цепи. Обычно он ведет к сокращению сроков строительства и значительному снижению стоимости энергоблоков. Недавние программы по сооружению АЭС в таких странах, как Россия, Китай, Южная Корея, Япония и Индия, показали преимущества программ комплексного строительства. К другим странам, пошедшим по пути комплексного подхода или выразившим желание встать на него, относятся государства Ближнего Востока (например, Объединенные Арабские Эмираты, Саудовская Аравия, Иран, Турция и Египет), а Южная Африка, Нигерия и Бразилия также включили такую возможность в свои будущие планы.

В результате роста населения, экономического развития и спроса на электроэнергию ряд развивающихся стран рассматривает использование ядерных энергетических технологий. По данным Международного агентства по атомной энергии, 28 стран, иногда называемых «новичками», впервые рассматривают, планируют или реализуют национальные атомные энергетические программы, в то время как еще 20 стран выразили интерес атомной энергетике и в той или иной мере развитию ядерную инфраструктуру. Эти процессы указывают на продолжающееся распространение мирного использования атомной энергии в восточном и южном направлениях.

Другие признаки нового или возобновленного интереса к развитию атомной энергетики, как в странах-участницах ОЭСР, так и в странах, не входящих в нее, концентрируются вокруг инноваций в сфере ядерных технологий следующего поколения, в том числе менее капиталоемкие технологии ММР и так называемые микрореакторные энергосистемы, которые подходят для отдаленных территорий, не имеющих доступа к централизованным энергосетям. Более подробная информация о различных поколениях уже существующих и перспективах для новых ядерных технологий представлена в Приложении.

АТОМНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И ЕЁ ПОТЕНЦИАЛ В ПОВЕСТКЕ РАЗВИТИЯ

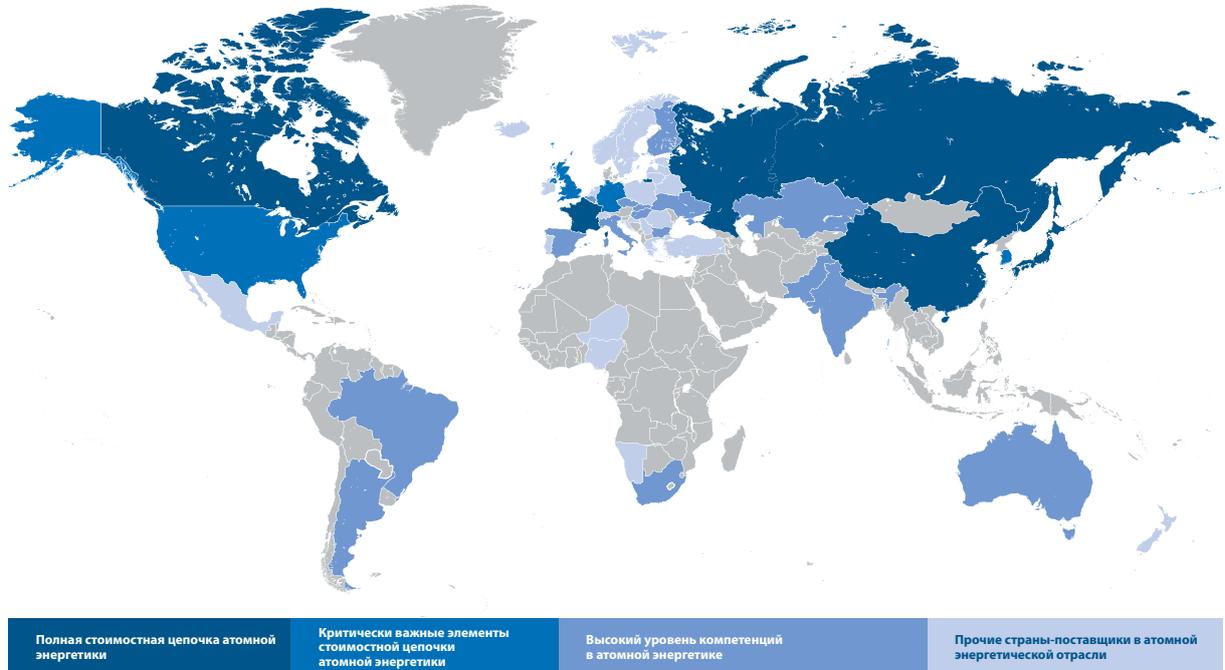
Выбор между строительством отдельных станций и комплексными программами имеет значительное влияние на инвестиции в повышение квалификации и возможностей рабочей силы.

Атомная промышленность требует особых квалификаций, ресурсов и знаний – начиная с академического образования и наукой и заканчивая навыками работы на специализированных производственных площадках и объектах использования атомной энергии. Во всем мире миллионы высококвалифицированных работников заняты в общей производственно-сбытовой цепи атомной промышленности. На сегодняшний день очень немногие страны обладают полным спектром квалификаций на всех переделах ядерного топливного цикла. Еще несколько стран делают шаги к развитию собственных квалификаций как в рамках полной стоимостной цепочки атомной энергетики, так и в отдельных её компонентах.

На государственном уровне, ряд стран обладает богатыми опытом, квалификацией и потенциалом в сфере атомной энергетики. Сегодня основные вендоры ядерных реакторов находятся в Канаде, Китае, Франции, Японии, Корее, России и США. Также, некоторые передовые стоимостной цепочки атомной энергетики располагаются в Аргентине, Бразилии, Индии и Великобритании.

КАРТА: НАВЫКИ И МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

В более чем 40 странах на всех континентах присутствуют различные квалификации в отрасли, распространяющиеся на всю стоимостную цепочку атомной энергетики: от проектирования, строительства, и производства оборудования до эксплуатации и вывода из эксплуатации, а также на весь ядерный топливный цикл: от добычи урана до обращения с отработавшим топливом и радиоактивными отходами.



Источник: Анализ Мирового энергетического совета по данным Группы ядерных поставщиков

Для некоторых стран развитие ядерной энергетики стало стратегическим решением, отразившимся в инвестициях в комплексные атомные производственно-сбытовые цепочки, мощное развитие человеческих ресурсов, стимулирование промышленной политики и создание соответствующих вспомогательных институтов. Такой подход выходит далеко за рамки развития одной лишь атомной энергетики и может касаться уже государственных задач и устремлений страны к достижению целей устойчивого развития ООН. Для национальных правительств важным фактором в принятии решений по использованию атомной энергии в будущем является соответствующий уровень государственной заинтересованности в данном секторе. В перспективе, распространение цифровых технологий в данном секторе и рост спроса на дополнительные услуги в области поставок электроэнергии со стороны конечных потребителей (т.н. energy-plus) также потребуют развития новых навыков.

РАЗОБЩЕННОСТЬ ПОЛИТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ И ОБЩЕСТВЕННАЯ ПРИЕМЛЕМОСТЬ

Политическая поддержка атомной энергетики в значительной степени зависит от страны и региона. Общественная приемлемость формируется экономическими, социальными и культурными факторами. Опросы общественного мнения регулярно показывают, что наивысший уровень поддержки атомной энергетики приходится на районы, находящиеся в непосредственной близости от объектов использования атомной энергии. В этих районах существует концентрация знаний об атомной отрасли. Опросы показывают меньший уровень поддержки в районах, отдаленных от атомных объектов, в которых большая часть населения не знакома с атомной энергетикой, а мнение сформировано в основном за счёт СМИ.

В качестве промышленного и энергетического решения атомная энергетика останется крайне зависимой от политической, социальной и экономической конъюнктуры.

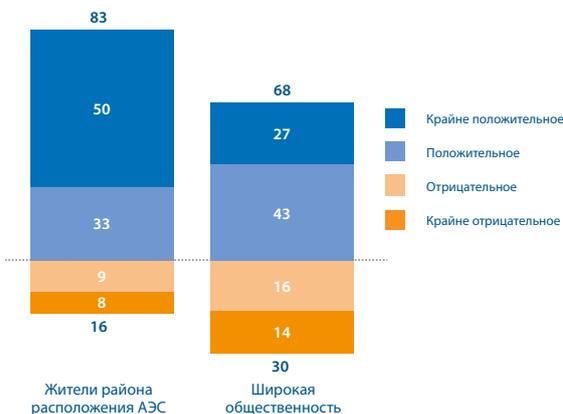
ФРАГМЕНТАРНЫЙ ХАРАКТЕР ОБЩЕСТВЕННОЙ ПРИЕМЛЕМОСТИ И РАБОТА С НЕЙ

Наивысшие уровни поддержки отмечены в тех странах, в которых значительная часть энергии вырабатывается АЭС с некоторыми исключениями, такими как Германия и Япония. В то же время, и в более крупных государствах существуют различия в уровне общественной приемлемости.

Также, опросы общественного мнения регулярно показывают, что наивысшие уровни положительного отношения к атомной энергетике отмечаются в районах, расположенных рядом с объектами использования атомной энергии, где имеется больше информации об их работе.

Отношение к атомной энергии

Каково, в целом, Ваше мнение о том, что атомная энергия – это один из способов генерации электроэнергии в США: крайне положительное, положительное, отрицательное, крайне отрицательное?» (2015)



Источник: The Hill, 2015 г.

Понимание крупных изменений в глобальной картине атомной энергетики будет содействовать определению роли атомной энергетики в новых траекториях развития мирового хозяйства до 2060 г.

Глава 3

Мир

в 2060 году

3. МИР В 2060 ГОДУ

ЧТО УЖЕ ПРЕДРЕШЕННО? «ВЕЛИКИЙ ПЕРЕХОД»

Энергосистемы находятся на стадии перехода от эпохи, где доминируют углеводороды, к перспективе изобилия доступной чистой энергии и всеобщего доступа к электроэнергии. Возникают новые участники рынка, размываются границы секторов. Растущее разнообразие новых источников чистой энергии отражается в появлении новых стейкхолдеров – как внутри энергетического сектора, так и за его пределами.

В мире наблюдаются снижение темпов роста населения, внедрение новых технологий, повышение осознанности в части защиты окружающей среды, а также значительное смещение экономического и геополитического центра в сторону Азии.

Все вместе эти факторы формируют принципиально новый контекст для мировой энергетической системы. Совет называет этот процесс «Великим Переходом».

А ЧТО ЕЩЁ НЕ ОПРЕДЕЛЕНО?

Факторы неопределенности крайне важны в формировании траектории развития энергетики. Советом определены четыре критические фактора неопределенности.

Каковы будут темпы технологических инноваций, и каково будет их влияние на рост производительности в эпоху автоматизации и низкого прироста рабочей силы?

Распространение новых технологий и цифровизация влияют на всю стоимостную цепочку и обеспечивают потенциал для колоссальных изменений в части энергоэффективности существующих систем, а также в появлении новых источников энергии и методов её потребления. Вооруженные цифровыми технологиями потребители создают спрос на так называемые «energy-plus service», где энергия является частью более широкого пакета услуг культура ответственного потребления стимулирует безотходную экономику «совместного потребления». Конвергенция технологий и социальные перемены ведут к неожиданным сдвигам, бросающим вызов традиционным бизнес-моделям и государственным институтам. Однако, плоды роста производительности распределяется неравномерно – в различных вариантах развития могут наблюдаться разные темпы технологических инноваций с непредсказуемым на данный момент влиянием на энергетические рынки и их участников.

Как будут развиваться наднациональное управление и геополитика?

Мир столкнулся со смещением сил на рынке в сторону стран, не входящих в ОЭСР – в основном, Азиатского региона, среди которых главными двигателями экономического роста являются Индия и Китай. Геополитическая повестка выходит за пределы сферы нефти и газа, охватывая технологии, изменение климата и несырьевые энергоресурсы. Принцип мультилатерализма ослабляется новой геостратегической конкуренцией, и возникает многополярный, характеризующий регионализацией мировой порядок. Теперь уже неясно, какие форму и направление примет соперничество между государствами, и может ли быть выстроенная сплоченная система наднационального управления – новый глобальный порядок, служащий всеобщим нуждам.

Каковы будут приоритеты для правительств, бизнеса и общественности в области изменения климата, охраны окружающей среды и устойчивого развития?

Возрастает различие во взглядах на будущее политических, финансовых и технологических аспектов энергетического перехода. Растущая конвергенция различных тем на повестке, таких как климат, благосостояние, качество воздуха и устойчивое развитие, стимулирует применение согласованных политик и стратегий. В условиях растущего количества экстремальных погодных явлений, оказывающих негативное влияние на критическую инфраструктуру, во многих странах важной частью повестки стала адаптация. Однако, остается под вопросом, каковы будут приоритеты для правительств в области проблем окружающей среды, благополучия и устойчивого развития. Кроме того любые политические курсы должны будут пройти через призму общественного одобрения, с точки зрения их влияния на потребительские возможности, образ жизни, землепользование и др.

Какой подход к управлению энергетическим сектором будет предпочтителен: государственный, рыночный или смешанный?

Ключевыми инструментами для стимулирования изменений являются государственные директивы, рыночные силы и их совокупность. В дальнейшем развитие будет определяться подбором механизмов, являющихся драйверами инвестиций в устойчивую энергетику, а также «доступностью» энергетического перехода в целом.

Эти четыре фактора неопределенности взаимосвязаны и создают основу для трёх разработанных Советом уникальных сценариев развития мировой энергетики в горизонте до 2060 года – «Джаз-модерн» (Modern Jazz), «Незаконченная симфония» (Unfinished Symphony) и «Хард-рок» (Hard Rock). Общее представление о четырех предопределенных факторах, критических факторах неопределенности, а также характеристиках трех сценариев приведены рисунке ниже.



Источник: Мировой энергетический совет, «Accenture Strategy», Институт Пауля Шерпера

КЛЮЧЕВЫЕ ФАКТОРЫ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В РАМКАХ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Помимо вышеупомянутого широкого спектра неопределенностей существуют определенные факторы, которые окажут влияние на будущее атомной энергетики и объем введенных в строй к 2060 году мощностей АЭС. Многое будет зависеть от достижения консенсуса в отношении роли атомной энергетики в энергетическом переходе, увеличения срока службы действующих АЭС и политике в отношении сооружения новых. Эти вопросы тесно связаны с темпами технологических и институциональных инноваций.

ОЦЕНКА АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ИНСТИТУЦИОНАЛЬНЫХ ИННОВАЦИЙ

Несмотря на то, что атомная энергетика играет очевидную роль в низкоуглеродном энергобалансе и уже стала одним из основных факторов, способствующих достижению целей устойчивого развития ООН, различные политические платформы продолжают обсуждать роль атомной энергетики в переходе к «зеленой» энергетике. Европейская Комиссия разрабатывает «зеленую таксономию» – классификацию энергоресурсов, отвечающих требованиям маркировки экологической безопасности ЕС, направленной на перераспределение финансовых потоков в сторону декарбонизации. Дебаты по поводу положения атомной энергетики в «зеленой таксономии» продолжаются, однако ее включение в этот перечень остается неясным. Проекты по сооружению новых АЭС зачастую исключаются из сферы полномочий международных организаций, осуществляющих поддержку крупных инфраструктурных проектов, как, например, Всемирный банк. Дебаты о положении атомной энергетики при введении маркировки экологической безопасности в энергетике будут одними из главных факторов неопределенности, определяющими дальнейшее финансирование отрасли.

В то же время, существует некоторый прогресс в изменении восприятия атомной энергетики финансово-инвестиционным сообществом. Некоторые финансовые аналитики включают проекты атомной энергетики в отчеты о финансировании экологического и устойчивого развития. В 2018 году доля условно «зеленых» проектов в атомной энергетической отрасли составила 9,2 млрд. долларов США по сравнению с 5,2 млрд. долларов США в 2016 году. Подобное финансирование предоставляют, например, Финляндия и Швейцария. Это, однако, составляет всего лишь 3 % от общего объема финансирования экологических проектов в энергетическом секторе, и развитие данной ситуации в будущем остается неясным.

Что касается институциональных инноваций, применение новых типов реакторов, таких как реакторы поколения IV, ММР и плавучих энергоблоков, откроет возможности для углубления международной кооперации в области лицензирования (в т.ч. транспортировки) новых типов реакторов, материалов и ядерного топлива. Гармонизация и рационализация лицензионных процессов позволят снизить стоимость и повысить эффективность процессов планирования сооружения новых АЭС.

НАЦИОНАЛЬНЫЕ ЯДЕРНЫЕ СТРАТЕГИИ: ПРОДЛЕНИЕ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ И СООРУЖЕНИЕ НОВЫХ АЭС

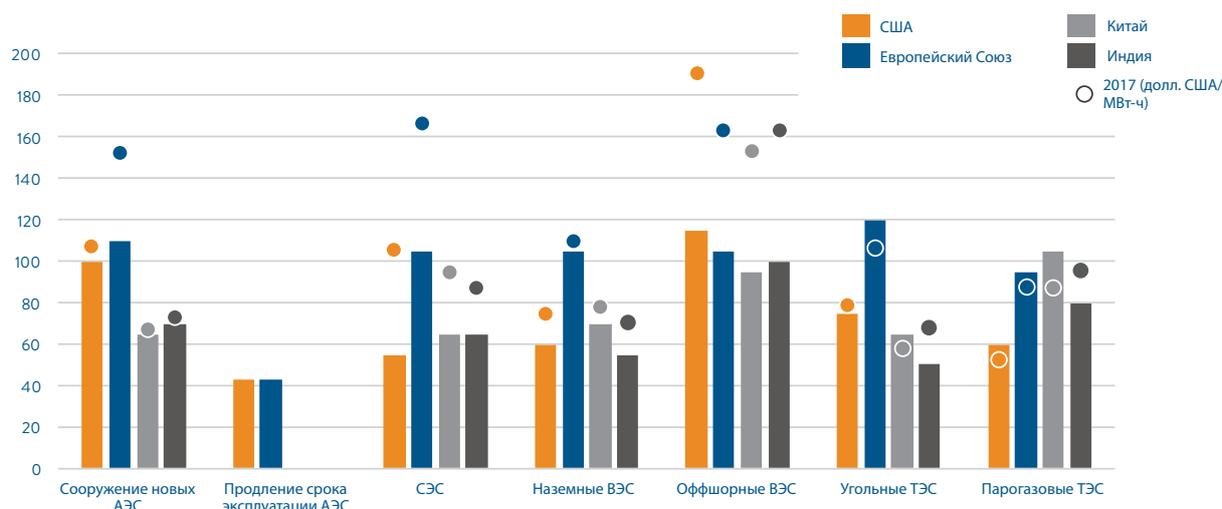
Ядерная энергия может быть и уже, по сути, является одним из наиболее экономически выгодных низкоуглеродных типов производства электроэнергии. Например, в 2017 году в Китае стоимость электроэнергии, выработанной на АЭС, была ниже, чем стоимость электроэнергии других низкоуглеродных типов генерации. Предполагается, что ядерная энергия в Китае останется одной из самых дешевых форм производства электроэнергии до 2040 года. Продление срока эксплуатации существующих реакторов – одно из лучших доступных на рынке направлений для инвестиций в производство электроэнергии, исходя из её нормированной стоимости.

Что касается строительства новых АЭС в странах ОЭСР, соответствующие проекты реализуются во Франции, Финляндии, Японии, Словакии, Корее, Турции, Великобритании и США. Реализация первых в серии новых проектов АЭС в странах, в которых в течение некоторого времени не строились атомные станции, привела к превышению бюджета и сроков. В ядерную энергетическую программу Великобритании включены планы по строительству нескольких атомных электростанций, и, несмотря на задержки, в настоящее время данная программа успешно развивается. Чешская Республика, Словакия, Болгария, Венгрия и Финляндия входят в число стран, планирующих строительство новых АЭС и имеющих локальные цепочки поставок оборудования и услуг в отрасли, также как и высококвалифицированные кадры.

СТОИМОСТНАЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сооружение новых АЭС и продление срока эксплуатации существующих могут быть конкурентоспособными и рентабельными способами генерации низкоуглеродной электроэнергии.

Прогнозируемая нормированная стоимость электроэнергии по технологиям в 2040 г.



Источник: МЭА, 2019 г.

УСКОРЯЮЩИЕСЯ ТЕМПЫ ОСВОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Атомная отрасль имеет особенно длительные инвестиционные и инновационные циклы, а также сверхдлительные жизненные циклы объектов. На строительство АЭС, способной работать более 60 лет, уходит примерно шесть лет. Строительство новых типов реакторов включает в себя многолетние программы НИОКР, за которыми следуют занимающие годы процедуры лицензирования, а также не имеющие аналогов процессы строительства и испытаний.

Рассматривая временной период до 2060 года, можно отметить, что технологические инновации, которые окажут значительное влияние на процесс энергетического перехода, связаны в первую очередь со строительством ММР. Россия только что завершила строительство своей первой плавучей АЭС, предназначенной для снабжения электропитанием удаленных населенных пунктов. Китай близится к завершению строительства небольшого высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР), одновременно с этим страна объявила о запуске проекта по строительству еще одного ММР. Аргентина близится к завершению создания своего прототипа ММР. Несколько других стран, использующих атомную энергию, таких как Канада, Корея, США и Великобритания, активно поддерживают разработку и строительство новых типов реакторов и ММР. В настоящее время США и Канада лицензируют ряд проектов ММР, начало эксплуатации которых планируется в 2020-х годах.

Ожидается, что ММР будут иметь ряд дополнительных применений помимо производства низкоуглеродной электроэнергии, таких как опреснение морской воды, производство водорода и сингазного топлива, а также теплоснабжение жилых и промышленных объектов. Помимо вышеуказанных усовершенствований реакторных технологий, существуют реакторы нового, четвертого поколения, которые предполагают качественный новый уровень безопасности и простоты в эксплуатации, а также замыкание ядерного топливного цикла (ЯТЦ).

Инновации в области реакторных технологий также включают использование толерантного топлива для действующих реакторов, передовые технологии, позволяющие продлить срок службы основного оборудования АЭС, новые способы производства медицинских изотопов, глубинное захоронение отходов, а также многие другие, менее заметные инновации, движимые требованиями регуляторов. Речь, конечно же, идёт и о поиске ответов на вопросы термоядерной энергии в рамках проекта ИТЭР. Многие из этих инновационных разработок могут принести плоды в течение последующих 10-15 лет. Ожидается, что ММР будут оказывать существенное влияние на развитие отрасли в период с 2030 года.



Источник: МАГАТЭ, Мировой энергетический совет, результаты исследований Всемирной ядерной ассоциации

Различные траектории будущего ядерной энергетики формируются при совокупности всех этих факторов, в том числе характерных сугубо для ядерной энергетики критических факторов неопределенности.

Глава 4

Сценарии

развития ядерной

энергетики

4. СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

«ДЖАЗ-МОДЕРН»

Это ориентированный на потребителя, транспарентный, динамичный цифровой мир, характеризующийся энергоэффективностью и быстрой монетизацией инвестиций. Высокий темп инноваций способствует неравномерному, но ускоренному росту производительности и создает потенциал для кардинальных изменений. В этом мире процветает чистая энергия, а электрификация конечных потребителей происходит быстрее, чем ожидалось. Это история экспоненциальных возможностей роста, созданных информированными потребителями, а также снижением цен на энергоносители.

Караван идёт

В мире «Джаз-модерна» инновации происходят быстрее как в части предложения, так и спроса на энергию. В 2020-х годах стоимость производства электроэнергии ВИЭ значительно уменьшается, что приводит к переводу энергоснабжения «с молекул на электроны». Данное обстоятельство, в сочетании с разработкой решений для хранения энергии и ростом спроса на энергетические услуги, привлекает инвестиции как в централизованную, так и в децентрализованную гибридную инфраструктуру. Автоматизация, цифровизация и искусственный интеллект обеспечивают «просьюмеризм» на развитых рынках, когда многие потребители энергии также становятся производителями, поставляя обратно в сеть электроэнергию, полученную, например, от солнечных батарей или находящуюся в резерве.

В этих условиях новой, основанной на потребителях и услугах экономики, атомная отрасль растет медленнее, чем в двух других сценариях. Темпы строительства новых АЭС в странах Европы и Северной Америки замедляются. На многих рынках не оценен по достоинству вклад ядерной энергетики в качестве контролируемого источника электроэнергии за счёт крупных «умных» сетей, децентрализованной генерации, вариативности мощности и эффективного хранения энергии.

Несмотря на то, что продление срока службы существующих реакторов является одной из лучших инвестиций на рынке производства электроэнергии с точки зрения снижения её стоимости, США и ряд стран ЕС оказывают лишь ограниченную поддержку ядерной энергии. В передовых странах стабильность поставок настолько зависит от гибкости со стороны спроса и оптимизации со стороны предложения, что «мощности старого мира» больше не кажутся необходимыми.

Большинство реакторов старшего поколения в США и ЕС запланировано для окончательного останова и вывода из эксплуатации, что к 2040 году снизит объем мощностей для удовлетворения базовой нагрузки для всей энергосистемы. Среди многих стран, которые решили не продлевать срок службы своего парка АЭС, некоторые с трудом пытаются достичь поставленных целей в декарбонизации.

Растущий спрос на услуги по выводу из эксплуатации и, в гораздо меньшей степени, продление срока службы преобразуют ландшафт атомной отрасли в развивающихся странах, где небольшие и инновационные инженерные фирмы широко применяют цифровые технологии для разработки и запуска проектов в области вывода из эксплуатации. Крупные игроки атомной отрасли будут конкурировать с этими динамичными новичками на сервис-ориентированном рынке.

Упрочение экономик новых индустриальных стран

В мире «Джаз-модерна» строительство новых АЭС в 2020-2030 годах в значительной степени обеспечивается Китаем, Индией и Россией, развивающимися экономиками на Ближнем Востоке, такими как Иран, Турция, Египет, а также Бангладеш и Индонезией в 2030-2040 годах. Подобное строительство четко определит будущее атома в качестве источника энергии для стран с развивающейся экономикой.

Основной технологией для централизованных энергосистем будут являться реакторы большой мощности поколений III и III+, предлагаемые, прежде всего, Россией и Китаем. Обе страны постепенно совершенствуют реакторы поколения III+, активно используя цифровые технологии на всех этапах жизненного цикла АЭС. Существует также целый ряд финансовых инструментов, межгосударственных кредитов и финансовой поддержки со стороны стран-вендоров. Данные меры сочетаются с соглашениями о покупке электроэнергии и моделями «строй, владей, эксплуатируй».

Фактором, способствующим развитию волатильного, инновационного мира «Джаз-модерна», являются цифровые технологии, которые коренным образом преобразуют весь энергетический сектор. Также будет наблюдаться рост производительности за счёт цифровизации: цифровые технологии помогут поставщикам и операторам значительно усовершенствовать управление жизненным циклом АЭС, включая их сооружение и эксплуатацию, а также извлечь полезные уроки для проектов по продлению сроков эксплуатации. Все это окажет существенное влияние на общий уровень производительности мировой атомной энергетической промышленности, снижение себестоимости её продукции, что к 2035 году приведёт к безоговорочному доверию клиентов в странах с развивающейся экономикой. В это время ядерная энергия становится основным средством декарбонизации для развивающихся рынков, постепенно вытесняя уголь.

РОЛЬ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Цифровые двойники компанию GE Digital

Технология «Цифровой двойник» представляет собой организованную совокупность передовой аналитики и методов физического моделирования, которая используется для моделирования в реальном времени состояния каждого объекта Цифровой электростанции.

Технология «Цифровой двойник»:

- позволяет тестировать гипотезы на соответствие коммерческим целям и принимать максимально информированные решения;
- контролирует целостность, эффективность или защищенность систем станции, позволяя быстро прогнозировать изменение её состояния;
- способствует снижению затрат на техническое обслуживание (экономия может составить 3,7 миллиарда фунтов стерлингов за 60 лет эксплуатации реакторного парка мощностью 16 ГВт).

Технология Multi-D

Госкорпорации «Росатом»

Ядром технологии Multi-D является подробная информационная модель, которая выходит далеко за рамки обычной трехмерной модели и служит центральным элементом набора взаимосвязанных цифровых инструментов, необходимых для решения определенных задач в контексте различных направлений управления проектами.

Технология Multi-D:

- формализует бизнес-процессы, соответствующие потребностям проекта;
- обеспечивает работу в едином информационном пространстве;
- управляет тремя основными элементами управления проектами: стоимостью, сроками и качеством.

Острова потребления дешевой и чистой энергии

Япония и Корея входят в число стран, сокращающих программы НИОКР в области ядерной энергии до 2030 года и перераспределяющих ресурсы в другие области развития энергетики, такие как цифровизация, создание интеллектуальных энергосистем, хранение энергии и ВИЭ. Ряд других стран, таких как Россия, Канада и Китай, по-прежнему привержены разработке новых ядерных типов реакторов и к 2035 году успешно дебютируют в производстве как промышленных реакторов IV поколения, так и ММР.

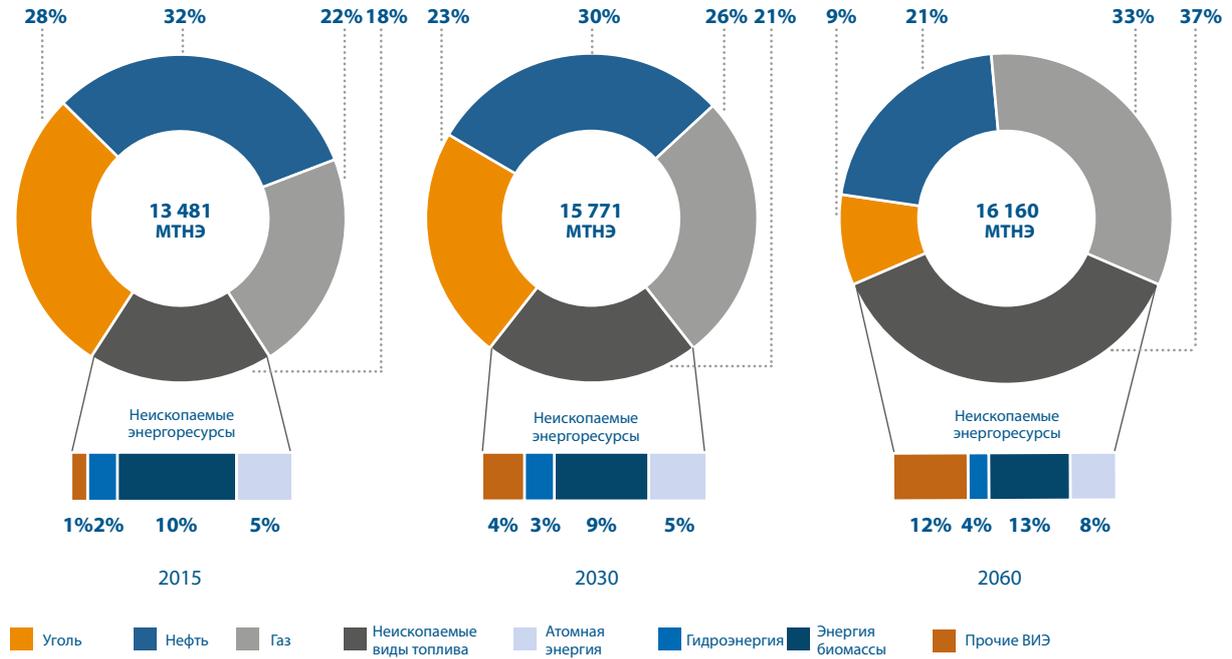
К 2045 году эти новые типы реакторов будут размещены на нескольких площадках, несмотря на то что их экономическая эффективность еще не доказана. ММР могут получить большое распространение благодаря тому, что развивающиеся страны и сельские районы обращаются к децентрализованной электрификации для удовлетворения своих энергетических потребностей.

При этом новые конструкции реакторов оказали лишь незначительное влияние на энергосистему в целом. Исследовательская деятельность в отношении данных реакторов и их сооружение финансируются или гарантируются правительствами. В то время как мир «Джаз-модерна» предполагает более динамичный, хотя и несколько изменчивый сектор цифровой энергетики, отсутствие координации действий на уровне государств приводит к неравномерности в относительных уровнях прогресса в борьбе с изменением климата на национальных уровнях.

В «Джаз-модерне» – мире, ориентированном на рынок, инвесторы предпочитают небольшие проекты с низкой капиталоемкостью и относительно быстрой окупаемостью по сравнению с более крупными проектами, которые требуют государственной поддержки или создания соответствующих институтов.

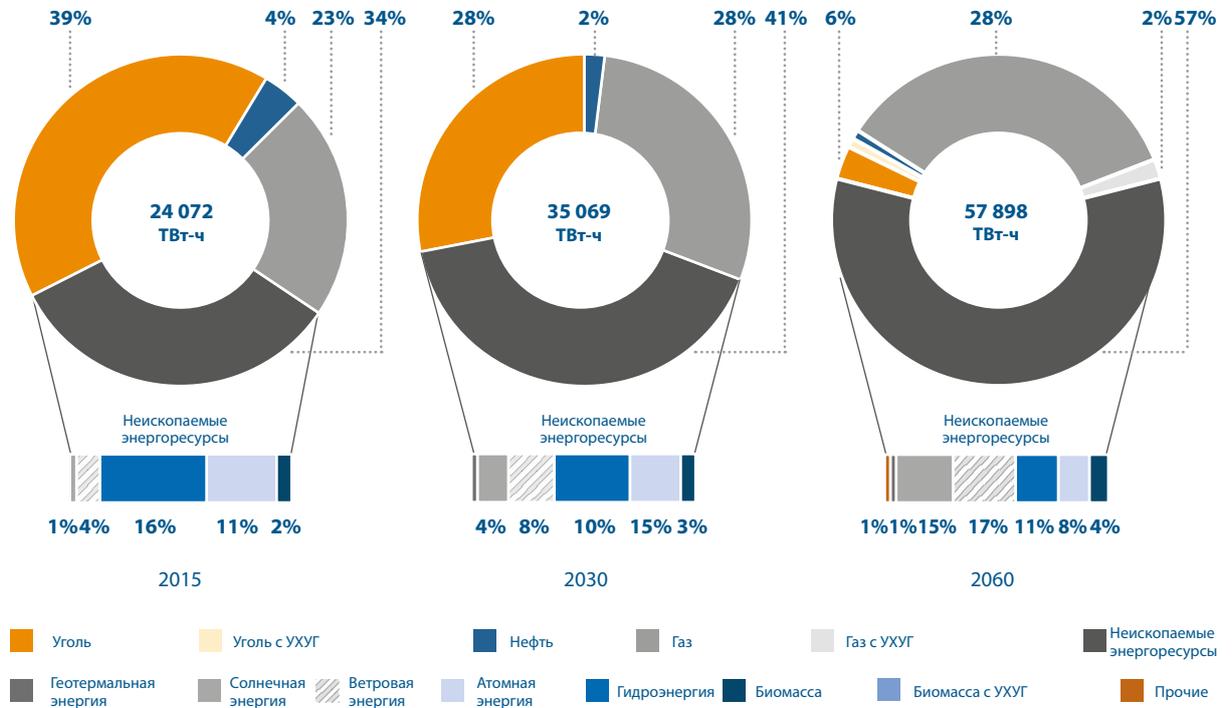
В этом мире электроэнергетическая промышленность претерпевает глубокую трансформацию в сторону низкоуглеродных энергоресурсов. Коэффициент электрификации (количество электроэнергии в конечном потреблении энергии) увеличивается вдвое с 18% в 2015 году до 37% к 2060 году. Из-за конкуренции со стороны других низкоуглеродных источников доля атомной энергетики в мировом энергобалансе к 2060 году составляет всего 8,5% по сравнению с 11% в 2015 году. Установленная мощность АЭС увеличивается примерно на 52% с 407 ГВт в 2015 году до 620 ГВт в 2060 году.

Рисунок 2: Поставки первичной энергии при сценарии «Джаз-модерн», млн т. н. э., доля в %



Источник: Мировой энергетический совет, Институт Пауля Шеррера, компания «Accenture Strategy»

Рисунок 3: Производство электроэнергии при сценарии «Джаз-модерн» (ТВт-ч), доля в % по типу генерации



Источник: Мировой энергетический совет, Институт Пауля Шеррера, компания «Accenture Strategy»

«НЕЗАКОНЧЕННАЯ СИМФОНИЯ»

Данный сценарий развития представляет собой мир, повестка дня которого выходит за рамки изменения климата и обращает более пристальное внимание к целям ООН по устойчивому развитию, водопользованию, состоянию окружающей среды и экономическому развитию. Целостность подходов стимулирует развитие международного сотрудничества, создание глобальной институциональной структуры и наднациональных политик. Отраслевое регулирование и политика, в конечном итоге, синхронизируются на глобальном уровне для продуманного управления энергетическим переходом с минимальными затратами, учётом внешних факторов и пользы для общества. Несмотря на то, что присутствует общее согласие относительно того, какие действия необходимы для достижения нулевого уровня выбросов, различные регионы следуют своим собственным путем и разрабатывают собственный комплекс энергетических мероприятий для достижения этих целей. При этом признается, что достижение благополучия и устойчивое развитие требуют использования принципа субсидиарности и межотраслевого взаимодействия.

Сила в доверии

«Незаконченная симфония» является миром с интегрированной стратегией развития, на повестке которой находятся климатические цели, экология и благополучие. Благодаря государственной и общественной поддержке в поиске доступных путей глубокой декарбонизации, государственно-частные инвестиции в широкий спектр технологий чистой энергии позволяют отделить рост выбросы CO₂ от экономического развития.

После того, как в 2010-х годах первые несколько западных проектов по строительству новых АЭС превысили график и бюджет, атомная отрасль изучила и позаимствовала передовой опыт новых проектов строительства в Азии, чтобы существенно переосмыслить свой подход к проектированию станций и управлению проектами по их сооружению. Это стало возможным благодаря передаче ведущей роли цифровым технологиям, которые помогли отрасли последовательно реализовывать проекты по всему миру с целью вернуть утраченное доверие рынка.

Более скоординированная климатическая политика, поддерживаемая новыми энергетическими правилами и финансовыми институтами, побудит Европейский Союз пересмотреть свою позицию в отношении роли ядерной энергетики в решении проблемы изменения климата начиная с 2020-х годов. Волна строительства новых ядерных объектов с помощью цифровых технологий прокатилась по ЕС, особенно на рынках Болгарии, Чехии, Финляндии, Венгрии, Словакии и Великобритании, привыкшим к ядерным технологиям и идеально вписывающимся в развивающийся рынок электросетей и электроэнергии ЕС. В 2030 году Южная Корея пересматривает свое решение об отказе от атомной энергии и возобновляет программу строительства новых АЭС.

В 2020–2030 гг. основная доля новых атомных мощностей сооружается с использованием идеологии создания «парка АЭС» в Китае, Индии, России и на Ближнем Востоке. В Африке основные программы строительства атомных объектов запускаются Южной Африкой, Нигерией, Танзанией и другими странами, чтобы удовлетворить растущий спрос на электроэнергию в результате быстрой урбанизации.

Станции строятся вовремя и в рамках бюджета благодаря усилению мировой атомной отрасли, а также широкому использованию цифровых технологий на этапах проектирования, планирования и строительства. Цифровые двойники обеспечивают безопасную, надежную и эффективную работу АЭС.

Продление срока эксплуатации остается одним из главных вопросов атомной энергетической повестки в 2020–2030 гг. как в ЕС, так и в США. Цифровые инструменты приобретают важное значение для анализа и принятия решений. Большинство реакторов «прошлой эпохи» включены в программы продления срока эксплуатации, что позволяет продлить их в работу ещё на 20 или более лет.

В Японии все реакторы подвергаются модернизации и повторному запуску. К 2035 г. Япония также возвращается на мировой рынок атомных технологий в качестве крупного экспортера атомных энергетических технологий, сооружая атомные электростанции в ЕС, США и на Ближнем Востоке. С 2040 г. экспансия атомной промышленности Южной Кореи распространяются на территорию от Ближнего Востока до ЕС и Африки. Растет глобальный спрос на атомную энергетику и конкурентоспособные глобальные цепочки поставок со стороны основных вендоров в России, Франции, Японии, Кореи и Китае.

Сила в инновациях

В мире, когда постепенно сходятся в одну региональные траектории перехода к безуглеродной энергетике при минимальных затратах и наилучшем соответствии потребностям потребителей, атомная энергетика конкурирует с другими типами базовой генерации, такими как угольные электростанции с использованием системы УХУГ и гидроэлектростанции. Во многих случаях атомные технологии выигрывают благодаря своей эффективности, предсказуемости и незначительному влиянию на окружающую среду.

Инновации в областях реакторных технологий поколения III+ и управления жизненным циклом АЭС позволят возвращать доверие клиентов на большинстве рынков ядерных технологий в период 2020–2030 гг. Экономия за счет расширения производства и постоянное освоение новых технологий улучшают производительность отрасли во всем мире.

Светлое будущее атомной отрасли в данном случае обусловлено ускоренными темпами развития инноваций, таких как реакторы IV поколения и ММР. Благодаря высокому спросу и доступности новых инвестиционных инструментов эти реакторы вводятся в эксплуатацию в промышленном масштабе к 2035-2040 гг. и к 2060 г. составят 25-30% от всего объема заказанных мощностей АЭС. После 2040 г. новые типы реакторов станут областью наиболее интенсивной конкуренции между поставщиками из Великобритании, Канады, Китая, Японии, Кореи, России и США.

Институциональные инновации способствуют развитию технического прогресса. К 2030-м гг. будет создано новое международное регулирование и правила лицензирования, что будет содействовать глобальному развертыванию ММР и использованию новых видов ядерного топлива.

Многочисленные финансовые учреждения распространяют традиционные «зеленые облигации» и новые инструменты устойчивого социального финансирования на проекты, связанные с атомной энергетикой, включая сооружение новых АЭС и продление срока эксплуатации существующих. Финансовые учреждения принимают решения на основе цифровых моделей жизненного цикла, представленных вендорами для демонстрации возможностей строительства в рамках сметы и сроков, а также обеспечения более 60 лет эксплуатации станции при самых высоких уровнях безопасности и производительности.

Сила в синергии

В «Незаконченной симфонии» правительства подчёркивают важность взаимосвязи между созданием рабочих мест, здоровьем и благополучием населения и устойчивым развитием. Подобный комплексный подход становится основой для решения многих стран о реализации программ строительства новых АЭС, что стимулирует промышленный рост и развитие кадрового потенциала, при сохранении энергетической и климатической повестки.

По всему миру растет количество звеньев в цепочке создания стоимости в атомной энергетике, привлекая новые рынки, новые предприятия и создавая квалифицированные рабочие места. В целом, развитие атомной энергетике с точки зрения как традиционных, так и прорывных технологий ускорило рост в смежных отраслях атомной энергетике, включая медицину, сельское хозяйство, опреснение и др. Урожайность сельскохозяйственных культур во многих регионах сохраняется благодаря использованию радиоизотопных технологий; миллионы людей лечатся от серьезных заболеваний с помощью радиотерапии; установки для опреснения воды, работающие на атомной энергии, производят пресную воду для миллионов людей в бедных регионах на Ближнем Востоке и в Африке; а университеты и технологические стартапы привлекают лучшие таланты для развития науки и инноваций в атомной энергетике. Все эти события делают атомную энергетике одним из наиболее важных инструментов достижения целей ООН в области устойчивого развития.

В «Незаконченной симфонии» новые политические мандаты и рыночные проекты привлекают государственные и частные инвестиции в производство водорода и торговлю чистой энергией. Атомная энергия используется для производства водорода электролитическим способом, в то время как высокотемпературные реакторы используются для его получения термохимическим способом.

Предприятия и правительства осознают возможность стратегического развития гибридных интегрированных низкоуглеродных энергетических систем, которые включают в себя атомную энергетику, возобновляемые источники энергии и решения по хранению энергии. Вендоры объединяются и создают альянсы с разработчиками проектов ВИЭ для внедрения низкоуглеродных инициатив, таких как строительство береговых и офшорных солнечных и ветряных электростанций в непосредственной близости к атомным электростанциям. Этот подход позволяет эффективно использовать земельные ресурсы и инфраструктуру электросетей, а также строительное оборудование, рабочую силу и производственные объекты. Такие территориально-производственные комплексы доказывают свою экономическую эффективность на национальном уровне для производства низкоуглеродной электроэнергии и помогают удовлетворить потребность в гибкой энергосистеме, сокращении выбросов парниковых газов и оптимальном использовании инвестиционного капитала.

Гибридные энергетические системы также способствуют когенерации для опреснения морской воды, производства водорода, центрального отопления, охлаждения и другие промышленных применений. ММР особенно хорошо подходят для данных полностью интегрированных систем.

СИНЕРГИЯ ДЛЯ ГИБКОЙ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Гибридные энергетические системы на основе атомной энергии и ВИЭ являются технологией, которая позволяет генерировать электроэнергию с возможностью диспетчерского управления и обеспечивать низкоуглеродную тепловую энергию для промышленности по цене ниже альтернативных типов генерации. Такие гибридные системы находятся в совместном управлении и состоят из генерирующего тепловую энергию атомного реактора, цикла тепловой мощности для преобразования тепла в электроэнергию, по меньшей мере одного возобновляемый источника энергии и промышленного процесса, потребляющего тепловую и/или электрическую энергию.

Пример практического использования гибридной энергетической системы на базе АЭС и ВИЭ

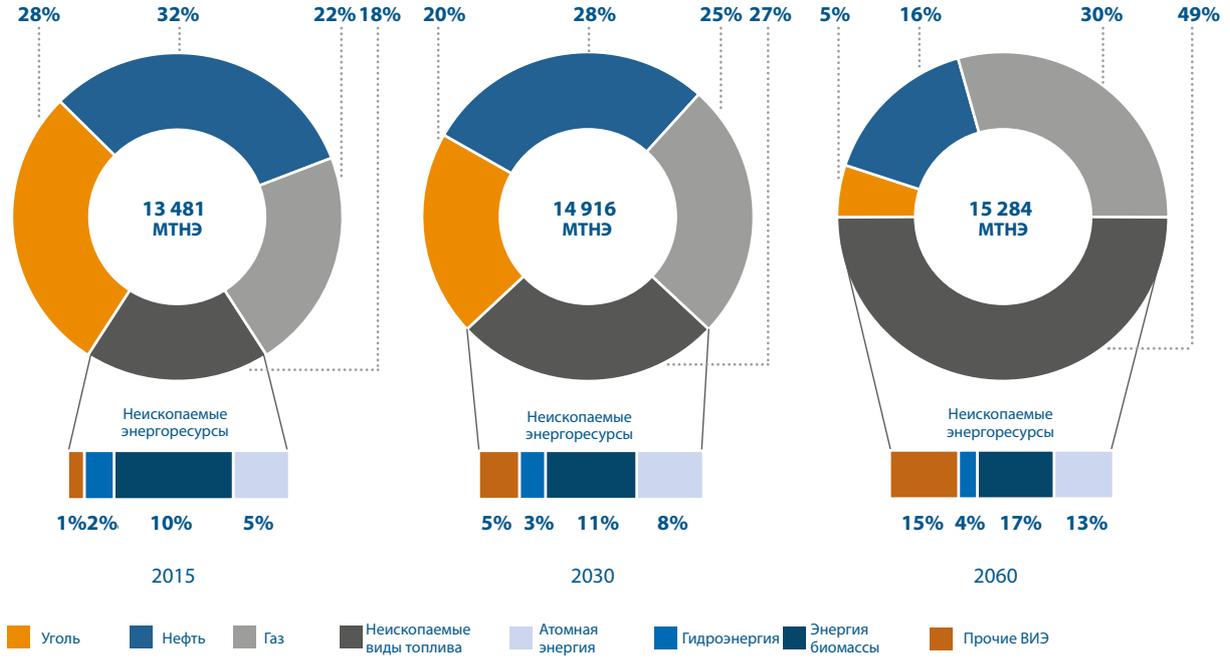


Оранжевые стрелки показывают направление потока тепловой энергии, серые стрелки - направление потока электроэнергии

Источник: Объединенный институт стратегического энергетического анализа, 2016 г.

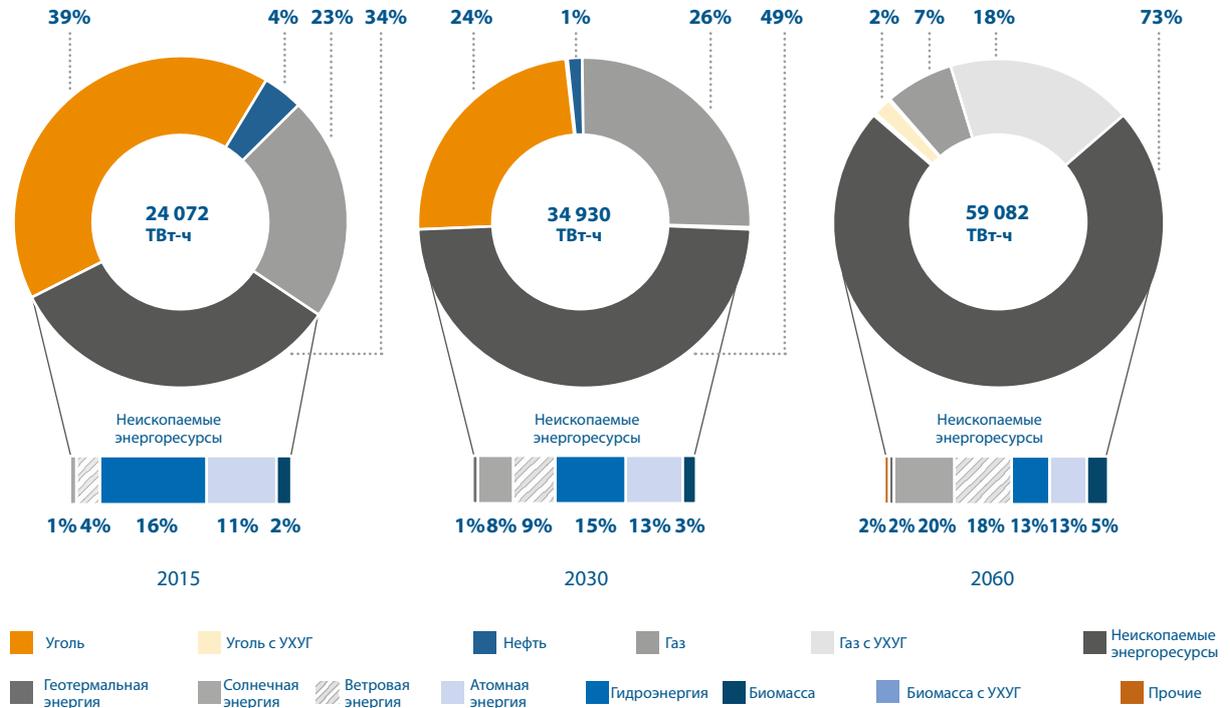
В «Незаконченной симфонии» электрификация и эффективность находятся в авангарде на пути к глубокой и доступной декарбонизации. Им сопутствуют более развитая межсистемная интеграция, интеллектуальные энергосистемы и эффективное управление сетевой нагрузкой. К 2060 г. уровень потребления электроэнергии в конечном потреблении достигнет 41%. На атомную энергию будет приходиться 13,5% от общего производства электроэнергии, а установленная мощность увеличится практически в три раза с 407 ГВт в 2015 г. до 1003 ГВт в 2060 г.

Рисунок 4: Поставки первичной энергии при сценарии «Незаконченная симфония», млн т. н. э., доля в %



Источник: Мировой энергетический совет, Институт Пауля Шеррера, компания «Accenture Strategy»

Рисунок 5: Производство электроэнергии при сценарии «Незаконченная симфония» (ТВт-ч), доля в % по типу генерации



Источник: Мировой энергетический совет, Институт Пауля Шеррера, компания «Accenture Strategy»

«ХАРД-РОК»

Данный сценарий представляет собой разобщенный мир с низкими темпами экономического роста, растущей геополитической напряженностью и неразвитым уровнем межгосударственного сотрудничества. Главными задачами стран является укрепление национальной безопасности, создание новых рабочих мест, развитие кадров и решение локальных экологических проблем. Доступная декарбонизация является нормой во всем мире, т. к. страны не готовы жертвовать экономическим ростом ради климатических соображений. Энергетический ландшафт является отражением регионализма, движимого геополитическими факторами и факторами безопасности. Отраслевое регулирование остается слабым, глобальная синхронизация практически отсутствует.

Государственный капитализм на подъёме

С ростом геополитической напряженности и ограниченностью международного сотрудничества, обмен информацией, технологиями и мировым капиталом усложняется. Для обеспечения энергетической безопасности правительства вынуждены опираться на собственные силы, включая природные ресурсы, существующие активы и системы, а также применять меры по стимуляции спроса. Государства уделяют большее внимание созданию рабочих мест, вопросам здравоохранения и локальным экологическим вопросам, в меньшей степени, чем мировым проблемам.

В 2020-2030 гг. новые атомные мощности будут введены в строй главным образом с использованием комплексного подхода к развитию парка АЭС в Китае, Индии, России - странах, которые сделали стратегическую ставку на атомную энергетику как основной источник энергии.

Затем в 2030-2040 гг. национальные программы по сооружению АЭС будут реализовываться на Ближнем Востоке, в том числе в Саудовской Аравии, Объединенных Арабских Эмиратах, Иране, Турции, Египте и других странах. В этих странах основными атомными технологиями остаются реакторы большой мощности поколений III и III+ для централизованных энергосистем. Усовершенствования в конструкции и использование цифровых технологий делают реакторы поколения III+ естественным выбором для всех стран-новичков, поскольку они являются надежным, хорошо изученным, серийным и экономически эффективным решением в области атомной энергетики.

Сдержанный консерватизм

По сценарию «Хард-рок» энергетическая безопасность способствует эффективности, однако разобщенность мира и торговые барьеры препятствуют интенсивному техническому прогрессу. В то время как реакторы поколений III и III+ составляют основу атомных энергетических программ на развивающихся рынках, а также в некоторых развитых странах, инновации внедряются относительно медленно и слабо интегрируются.

Россия и Китай остаются доминирующими игроками на рынке атомных технологий, а большая часть средств на новое строительство поступает от государственных институтов. Строительству новых АЭС способствуют финансовые инструменты, такие как межгосударственные целевые кредиты, а также модели «строй, владей, эксплуатируй», соглашения о закупке электроэнергии и гарантии со стороны национальных правительств или аффилированных с ними организаций.

В 2030 г. Россия и Китай успешно введут в строй промышленные атомные реакторы IV поколения и ММР. К 2045 г. российские и китайские реакторы IV поколения и ММР также будут размещены на других площадках по всему миру. При этом, к 2060 г. ни реакторы IV поколения, ни ММР не окажут существенного влияния на общемировую энергетическую систему.

Замыкание ядерного топливного цикла и развитие модульного принципа строительства остаются главными инновационными приоритетами, главным образом, благодаря государственным программам НИОКР в России и Китае, которые будут реализовываться на протяжении десятилетий.

Несмотря на то, что двустороннее сотрудничество в решении проблем ядерного наследия будет сохраняться, многие страны будут придерживаться позиции, согласно которой обращение с ядерными отходами должно осуществляться в стране их происхождения.

ИНСТИТУЦИОНАЛЬНЫЕ ИННОВАЦИИ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Использование реакторов на быстрых нейтронах, работающих в замкнутом топливном цикле, может повысить эффективность использования запасов урана. Крупномасштабное использование реакторов на быстрых нейтронах в значительной степени снизит зависимость атомной энергии от урановых ресурсов. Данное обстоятельство еще больше повысит устойчивость атомной энергии.

Создание основы для международного сотрудничества по таким техническим вопросам, как захоронение радиоактивных отходов, позволит создать должным образом финансируемый мировой рынок соответствующих продуктов и услуг, а также стимулировать инновации.

Двухкомпонентная ядерная энергетическая система

Двухкомпонентная ядерная энергетическая система включает в себя реакторы на тепловых нейтронах и быстрых нейтронах. Ядерный топливный цикл в данной системе замкнут и самодостаточен. Преимущества такой системы - экологические (снижение потребления природного урана, уменьшение количества ОЯТ) и экономические (снижение затрат и повышение эффективности ядерного топливного цикла).



Раскол на Западе

По сценарию «Хард-Рок» в ОЭСР нет единства в отношении видения дальнейшего развития атомной энергетики. В некоторых странах ОЭСР ядерная энергетика рассматривается как важный источник надежных низкоуглеродных энерго мощностей для обеспечения базовой нагрузки в энергосистеме с ограниченным риском волатильности цен на топливо по сравнению с системами, работающими на ископаемом топливе. В то же время существует значительное количество реакторов, срок службы

которых истекает. В данной ситуации на национальном уровне поднимаются вопросы относительно продления срока службы и решений о необходимости инвестирования в новые реакторы или замены выбывающих мощностей низкоуглеродными источниками, способными соответствовать климатическим обязательствам.

В 2020 г. ЕС и США в целом поддержали политику, которая позволила продлить срок службы существующих реакторов, что с точки зрения нормативной стоимости электроэнергии является одной из лучших доступных на рынке инвестиций в производство чистой электроэнергии. В 2020–2030 гг. у большинства устаревших реакторов в США и ЕС срок службы будет увеличен на 20 лет, что позволит им функционировать в период после 2040–2050 гг.

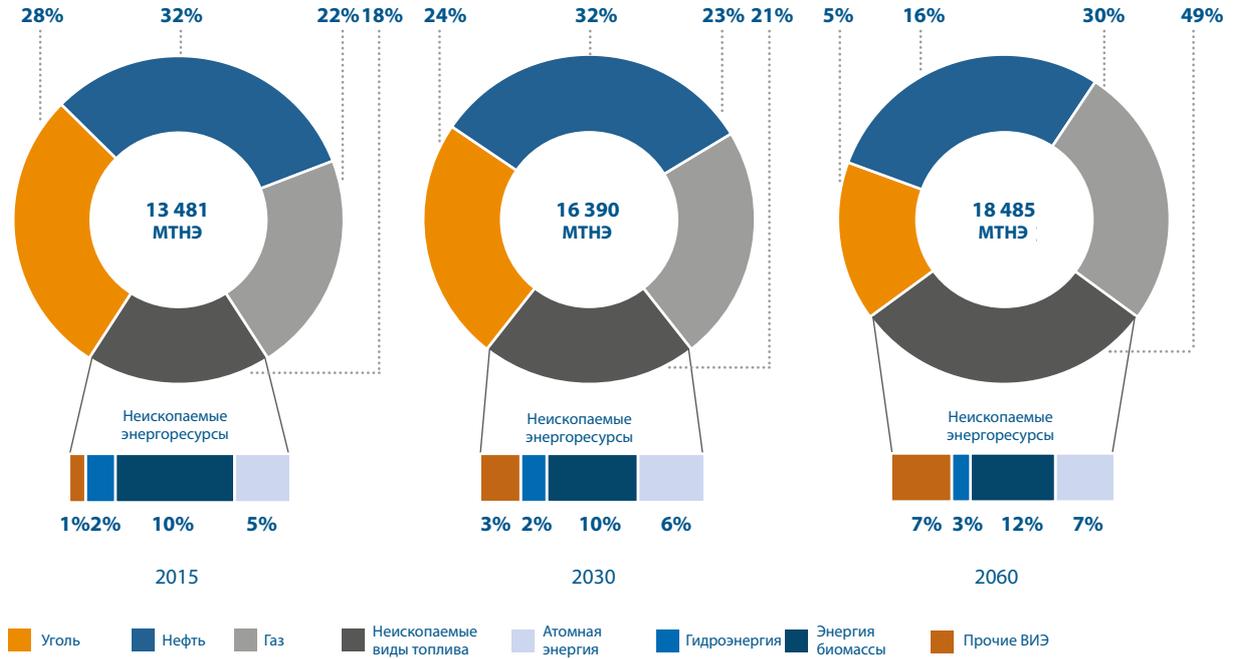
Тем не менее, между 2035 и 2040 гг., когда продление срока службы больше не подходит для большей части существующего парка АЭС в ЕС и США, будут идти жаркие споры о том, как заменить этот значительный объем низкоуглеродных мощностей. Некоторые, ранее занимающие пассивную позицию страны постепенно приступают к сооружению новых атомных станций, чему способствует очевидный успех атомной энергетики в развитых странах, не остановивших свои программы. Тем не менее, останется ряд стран, которые решают отказаться от использования атомной энергии.

При таком сценарии США и большинство стран ЕС неохотно приступают к строительству новых атомных электростанций в 2020–2030 гг., в некоторых случаях вследствие низкого уровня общественной приемлемости, а в других - вследствие неясной экономической эффективности. Тем не менее, некоторые страны идут в противоположном направлении. Чешская Республика, Венгрия, Словакия и Болгария принимают решение продлить свои программы развития атомной энергетики на 2030-2040 гг. Это обеспечивает их не только энергетическим решением, но и возможностью продвигать экологическую повестку, поддерживать экономический рост и развития кадровых ресурсов. Некоторые из этих проектов позволили всем извлечь тяжелые уроки: перерасход средств и нарушение графика заставили участников отрасли и лиц, принимающих решения, пересмотреть свои подходы к проектированию АЭС и управлению проектами по их сооружению.

Во всем мире к 2060 г. некоторые страны будут значительно менее углеродоемкими, чем другие. Воздействие погодных катаклизмов, нехватки воды и изменения климата все чаще ощущаются в различных обстоятельствах. Это вынуждает страны сотрудничать на субрегиональном уровне для создания технологических и экономических решений для ускорения адаптации к изменению климата.

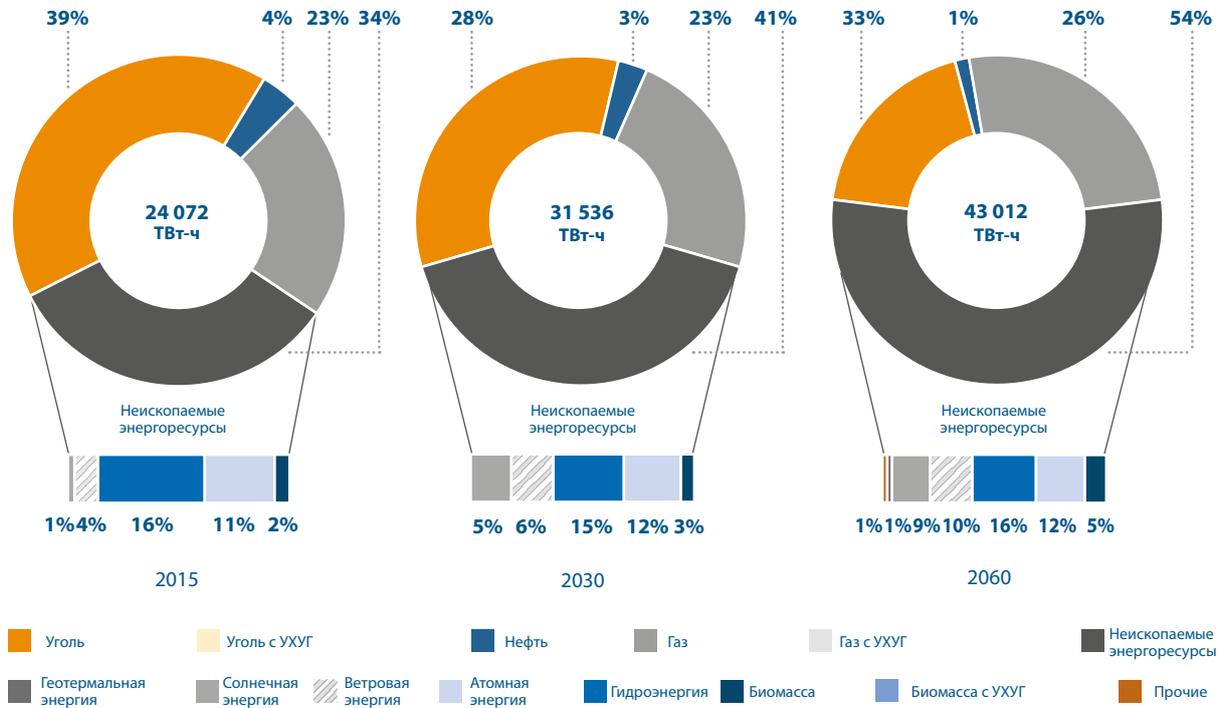
По сценарию «Хард-рок» в 2060 г. на сектор производства электроэнергии будет приходиться 23% от конечного потребления энергии, тогда как в структуре энергопотребления будут преобладать ископаемые виды топлива, хотя и в меньшей степени, чем сегодня. К 2060 г. доля атомной энергетики в производстве электроэнергии достигнет 12,5% по сравнению с 11% в 2015 г. Установленная мощность АЭС увеличится на три четверти с 407 ГВт в 2015 г. до 696 ГВт в 2060 г.

Рисунок 6: Поставки первичной энергии при сценарии «Хард-рок», млн т. н. э., доля в %



Источник: Мировой энергетический совет, Институт Пауля Шеррера, компания «Accenture Strategy»

Рисунок 7: Производство электроэнергии при сценарии «Хард-рок» (ТВт-ч), доля в % по типу генерации



Источник: Мировой энергетический совет, Институт Пауля Шеррера, компания «Accenture Strategy»

Глава 5

Новые императивы сотрудничества

5. НОВЫЕ ИМПЕРАТИВЫ СОТРУДНИЧЕСТВА

До 2060 г. и в дальнейшей перспективе атомная энергия будет являться частью мирового энергетического баланса, однако темп и характер развития событий в отрасли в течение следующих 40 лет не могут быть однозначно предсказаны. Использование сценарного подхода может помочь лидерам энергетической отрасли в работе с факторами неопределенности и подготовке к новым открывающимся возможностям. В приведенном ряде сценариев рассматриваются события, которые могут произойти, а не те, что произойдут или должны произойти. Использование таких сценариев позволяет перенаправить внимание лидеров энергетической отрасли на незнакомые и, следовательно, в большинстве случаев нежелательные и трудные для обсуждения новые реалии.

В настоящем отчете описаны перспективы развития атомной энергетики сквозь призму трех сценариев МИРЭС. Наивысшим уровнем развития атомной энергетики характеризуется «Незаконченная симфония» – сценарий, который подразумевает усиление мирового сотрудничества, политически стимулируемые инновации, создание решений для интеграции и надежности систем, а также описывает дополнительные преимущества на пути к достижению более глубокого и социально справедливого энергетического перехода. В двух остальных сценариях – предпринимательском «Джаз-модерне» и замкнутом в себе «Хард-роке» – рост атомной энергетики в силу различных причин ограничен в большей степени.

При рассмотрении сценариев четыре критических вызова и возможности, возникающие перед мировой атомной промышленностью, становятся более ясными и определяют место атомной энергетики в будущей энергосистеме – обучение (learning), развитие взаимосвязей (linking), максимизация преимуществ (leveraging) и лидерство (leadership).

УСКОРЕНИЕ ОСВОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Исследование, разработка, внедрение и распространение централизованных капиталоемких атомных технологий требуют государственной поддержки и занимают годы даже с появлением ММР. На этом фоне выделяются кривые освоения технологий в других секторах энергетики, включая такие отрасли, как нефтегазовая, транспорт и ВИЭ, которые также стимулируются за счет поддержки со стороны мировых рынков и государств. Совместное применение и изучение передового опыта в строительстве новых АЭС (в частности, России и стран Азии) принесет выгоду тем странам, которые включают комплексные подходы к развитию парка АЭС в свои стратегии. Распространение цифровых технологий играет важную роль в улучшении производительности атомной промышленности во всех трех сценариях, но с различными последствиями в силу ряда факторов.

- Сценарий «Джаз-модерн» – в данном сценарии модульное строительство крупных секций и целых ММР позволяет строить и собирать компоненты в контролируемых условиях. Таким образом, повышается качество, снижаются затраты, и ускоряется выполнение графиков. Результат – высокое качество построенных объектов и применение стандартов наивысшего уровня. В данном сценарии цифровые и информационные технологии позволяют повысить эффективность кооперации и управления производительностью.
- Сценарий «Незаконченная симфония» – сокращение затрат и рисков по проектам будет напрямую зависеть от гармонизации регулирования с целью стандартизации конструкций реакторов на мировом уровне. Это сократит время разработки проектов и повысит конкурентоспособность цепочки поставок. Гармонизации регулирования будет способствовать координация усилий со стороны правительств, кредитных организаций и национальных регулирующих органов.
- Сценарий «Хард-рок» – кривая освоения технологий образуется в результате комплексного подхода и долгосрочной программы создания и поддержания возможностей цепочки поставок. Сокращение затрат достигается посредством серийного производства и практического обучения.

СОЗДАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИНТЕГРАЦИИ

Наблюдается рост понимания того, что значительные непостоянное электроснабжение при низком или нулевом уровне ценообразования на основе предельных издержек представляет собой проблему для энергобезопасности и экономики, в условиях расширения масштабов использования ВИЭ. Общая стоимость электроснабжения в значительной степени растет в силу затрат на дополнительную инфраструктуру для передачи и распределения вместе с ростом доли переменных возобновляемых энергоресурсов. Существует множество различных моделей развития гибридных сетей, а также продолжается поиск методов обеспечения безопасности и новых решений для хранения электроэнергии, в которые входит переключение между снабжением и хранением. Кроме того, предусматривается использование тандема чистой электроэнергии и чистого жидкого топлива при колебаниях спроса и предложения. Несмотря на то, что имеющиеся атомные станции большой мощности электростанции зарекомендовали себя в централизованных энергосистемах, более значимую роль будут играть ВИЭ, интеллектуальные электросети, интегрированные энергосистемы, гибридные и новые ядерные технологии, например, ММР.

- Сценарий «**Джаз-модерн**» – с продолжением влияния распространения цифровых технологий на энергетический ландшафт в целом, большую ценность приобретают ориентированные на потребителя энергосистемы и услуги. В этом сценарии атомной энергетике придется реагировать на новые возможности для клиентоориентированных услуг.
- Сценарий «**Незаконченная симфония**» – сочетание современных реакторов большой мощности с ММР и реакторами нового поколения позволяет декарбонизировать энергетику путем замены ископаемых видов топлива на высокотемпературные реакторы, производить синтетическое топливо и водород и обеспечить энергией удаленные регионы и децентрализованные сети. Необходимо будет реализовать возможности развития гибридных интегрированных низкоуглеродных энергосистем, таких как атомные энергосистемы, системы ВИЭ и системы хранения энергии.
- Сценарий «**Хард-рок**» – атомная энергетика будет играть ключевую роль в централизованных системах, обеспечивая надежность и стабильность поставок электроэнергии, а интеграция с ВИЭ в гибридных энергосистемах обеспечит их большую гибкость.

МАКСИМИЗАЦИЯ ПРЕИМУЩЕСТВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Доступ к полезным, чистым, доступным и надежным типам производства энергии – ключ к эре цифрового благополучия и устойчивого развития, которая позволит обеспечить процветание всего общества.

Конечные потребители ценят преимущества, которые им дает доступ к энергии, будь то электроэнергия, отопление или жидкие виды топлива. Происходит ускоренная цифровизация в энергетике, при этом акцент смещается по производственно-сбытовой цепочке к агрегаторам спроса с формированием новой логики потребления. Сопутствующие преимущества, которые потребители получают вместе с энергией, открывают новые возможности для создания и роста экономической ценности.

Во всех трех сценариях атомная энергетика создает ряд дополнительных преимуществ для таких сфер, как промышленность, здравоохранение, производство продуктов питания, управление водными ресурсами и защита окружающей среды. Новые технологии финансирования будут играть критически важную роль в открытии новых возможностей для атомной энергетике.

ЛИДЕРСТВО, НАЦЕЛЕННОЕ НА ДОЛГОСРОЧНУЮ ПОВЕСТКУ

Правительства стран и международные агентства играют важнейшую роль для определения траекторий и темпов энергетического перехода путем создания подходов к развитию энергетической политики, формированию структуры рынков и достижению устойчивого развития. Это особенно важно для атомных проектов, учитывая связанные с ними высокие капитальные затраты и длительные инвестиционные циклы. Политическая поддержка со стороны правительств играет важную роль в обеспечении притока инвестиций в сооружение новых атомных электростанций.

- Сценарий «**Джаз-модерн**» – развивающиеся страны, где наблюдается рост населения, урбанизация и экономическое развитие, обеспокоены вопросом удовлетворения спроса на энергию и сосредоточены на долгосрочном планировании энергосистемы.
- Сценарий «**Незаконченная симфония**» – растущее понимание в мире относительно увеличения выбросов углерода и необходимость в оперативных действиях по отношению к изменению климата способствует скоординированной политической поддержке всех низкоуглеродных технологий, притоку инвестиций в инфраструктуру и финансированию экологических проектов в области атомной энергетики. Правительства и межправительственные организации играют важную роль в развитии политических курсов на поддержку роли атомной энергетики в системах чистой энергии.
- Сценарий «**Хард-рок**» – в странах постоянно растет обеспокоенность относительно энергетической безопасности и создания комплекса энергоресурсов, включая атомные энергоресурсы, для гарантии надлежащего уровня энергоснабжения.

Будущее атомной энергетики будет зависеть от действий со стороны промышленности, правящих кругов и лидеров в области энергетики. Информация из настоящего отчета может играть важную роль в организации диалога между представителями отрасли и ключевыми участниками рынка в вопросах преодоления современных вызовов и использования имеющихся возможностей. Эти сценарии, а также программа «Гармония», показывают потенциальные пути развития атомной энергетики и помогают воплотить концепции в конкретные действия.

Приложение

ТЕХНОЛОГИИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Международный форум «Поколение IV» (GIF), представляющий правительства 14 стран, определил шесть реакторных технологий, которые, по мнению участников форума, представляют собой будущее атомной энергетики. В эти концепции вошли: газоохлаждаемый быстрый реактор (ГБР), свинцовый быстрый реактор (СБР), жидкосолоевой реактор (ЖСР), сверхкритический водоохлаждаемый реактор (СКВР), быстрый натриевый реактор (БНР) и высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (ВТГР). Они представляют собой результат прогресса в реакторных технологиях с точки зрения их устойчивости, экономичности, безопасности, надежности, а также защищенности от рисков распространения.

Конструкции реакторов IV поколения

	Спектр нейтронов (быстрые/тепловые)	Теплоноситель	Температура (°C)	Давление*	Топливо	Топливный цикл	Мощность (МВт[э])	Применение
Газоохлаждаемые быстрые реакторы	быстрые	гелий	850	высок.	U-238 +	откр., локал.	1200	Электроэнергия и водород
Свинцовые быстрые реакторы	быстрые	свинец или свинец-висмут	480-570	низк.	U-238 +	закр., рег.	20-180** 300-1200 600-1000	Электроэнергия и водород
Жидкосолоевые быстрые реакторы	быстрые	соли фтористых соединений	700-800	низк.	фторид урана в виде соли	закр.	1000	Электроэнергия и водород
Жидкосолоевой реактор – улучшенные высокотемпературные реакторы	тепловые	соли фтористых соединений	750-1000		частицы UO ₂ в призме	откр.	1000-1500	водород
Быстрые натриевые реакторы	быстрые	натрий	500-550	низк.	U-238 и МОКС	закр.	50-150 600-1500	электроэнергия
Сверхкритические водоохлаждаемые реакторы	тепловые или быстрые	вода	510-625	крайне высокое	UO ₂	откр. (тепловые) закр. (быстрые)	300-700 1000-1500	электроэнергия
Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы	тепловые	гелий	900-1000	высок.	UO ₂ , призматические или шаровые ТВЭЛы	откр.	250-300	Водород и электро-энергия

Источник: Всемирная ядерная ассоциация

Первоначально было выбрано шесть технологий, однако одна из них начала развиваться в двух направлениях, в связи с чем ниже приведено описание семи технологий.

Газоохлаждаемый быстрый реактор (ГБР). Как и другие, уже эксплуатируемые или ещё разрабатываемые реакторы с гелиевым охлаждением, ГБР, будут представлять собой высокотемпературные реакторные установки – 850 °C. В них применяется та же технология, что и в ВТР, подходящая для производства энергии, термохимического производства водорода или иного технологического тепла. Расчетная мощностью ГБР составляет 2400 МВт(т)/1200 МВт(э), что достаточно для безубыточного воспроизводства ядерного топлива. Проект имеет толстостенный стальной корпус и три контура мощностью 800 МВт. Для выработки электроэнергии через первый контур проходит косвенный цикл с гелием, на втором – газообразный гелий напрямую приводит в действие газовую турбину (по циклу Брайтона), а через третий контур проходит паровой цикл. Отработавшее топливо перерабатывается на площадке, а все актиниды повторно рециклируются для минимизации выработки долгоживущих радиоактивных отходов.

Свинцовый быстрый реактор (СБР). СБР – многоцелевой реактор на быстрых нейтронах, который может использовать топливные матрицы обедненного урана или тория и выжигать актиноиды

из топлива легководных реакторов. Охлаждение жидким металлом (свинец или относительно легкоплавкий свинцово-висмутовый сплав) проходит при атмосферном давлении посредством естественной конвекции (по крайней мере – для отвода остаточных тепловыделений). В качестве топлива используется металл или нитридное топливо с региональных или центральных заводов по регенерации ядерного топлива, с полным рециклом актинидов. Предусмотрен широкий разброс размеров установки – от «аккумулятора» заводского изготовления со сроком службы 15–20 лет для небольших сетей или развивающихся стран до модульных установок мощностью 300–400 МВт(э) и крупных одноблочных установок мощностью 1400 МВт(э). Рабочая температур уже достигает 550 °С, однако предполагается довести ее до 800 °С с помощью материалов с улучшенными свойствами для придания свинцу коррозионной стойкости при высоких температурах, которые обеспечат термохимическое производство водорода. Предусматривается двухэтапная программа развития для промышленного внедрения: к 2025 г. – для реакторов, работающих при относительно низких температурах и плотности энерговыделения, и к 2040 г. – для усовершенствованных высокотемпературных реакторов.

Жидкосольевой реактор (ЖСР) (два варианта): первый – быстрый реактор с делящимся материалом, растворенным в циркулирующей топливной соли; второй – с топливом в виде твердых частиц в графитовой матрице и солью, используемой исключительно в качестве теплоносителя.

В установках, которые рассматриваются в качестве базовых ЖСР, урановое топливо растворено в теплоносителе-соли фтористого соединения, которая циркулирует по каналам графитовой кладки активной зоны, что приводит к надтепловому (эпитепмическому) спектру нейтронов. Мощность расчетной установки – до 1000 МВт(э). Продукты деления удаляются постоянно, а актиниды полностью рециклируются, при этом возможно добавление плутония и других актинидов вместе с ураном-238 без необходимости производства топлива. Температура теплоносителя составляет 700 °С, с возможностью увеличения до 800 °С. Вторичный контур охлаждения используется для выработки электроэнергии, кроме того, возможно термохимическое производство водорода.

По сравнению с твердо топливными реакторами, системы ЖСР задействуют меньше делящегося материала в активной зоне, характеризуются отсутствием ограничений по радиационному повреждению при выгорании топлива, отсутствием необходимости в производстве твердого топлива и операциях по обращению с отработавшим твердым топливом, а также однородным изотопным составом топлива в реакторе. Эти и другие характеристики могут обеспечить ЖСР уникальными возможностями и рентабельностью по сжиганию актинидов и наращиванию топливных ресурсов.

Быстрый натриевый реактор (БНР). В качестве теплоносителя БНР использует жидкий натрий, что обеспечивает высокую плотность энерговыделения с малым объемом теплоносителя при низком давлении. Он основан на приблизительно 390 реакторо-годах эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением в течение пятидесяти лет в восьми странах, изначально являлся наиболее интересной для форума GIF технологией и остается на первых позициях, несмотря на то, что требует наличия герметичной системы охлаждения.

В качестве топливной матрицы БНР использует обедненный уран, температура теплоносителя составляет 500–550 °С, что позволяет вырабатывать электроэнергию на втором натриевом контуре, тогда как на первом поддерживается близкое к атмосферному давление. Предлагаются три варианта: модульного типа, мощностью 50–150 МВт(э), с введением актинидов в ураново-плутониевое металлическое топливо, требующее электрометаллургической (пирометаллургической) обработки по месту; бассейнового типа, мощностью 300–1500 МВт(э), аналогично предыдущему; контурного типа, мощностью 600–1500 МВт(э), на стандартном МОКС-топливе, возможно с младшими актинидами, и улучшенной регенерацией в водной среде в центрах переработки.

Наиболее современными проектами на сегодняшний день являются энергетический реактор БН-800 на Белоярской АЭС в России (введен в эксплуатацию в 2016 г.) и прототипный реактор-бридер «Кальпакам» мощностью 500 МВт(э) в Индии (ввод в эксплуатацию запланирован на 2020 г.). По большому счету, БН-800 является экспериментальным реактором для исследования топлива быстрых

реакторов. На GIF отмечается, что данную технологию «в ближайшем будущем можно будет внедрить для работы с актинидами» Существенная часть НИОКР в данной области будет направлена на ядерное топливо.

Сверхкритический водоохлаждаемый реактор (СКВР). Данный реактор представляет собой реактор сверхвысокого давления с водным охлаждением, который работает при сверхкритической термодинамической точке воды (374 °C, 22 МПа), что позволяет увеличить теплоотдачу приблизительно на одну треть по сравнению с современными легководными реакторами, от которых эта конструкция берет начало. Сверхкритическая вода (25 МПа, 510–550 °C) напрямую приводит в действие турбину без вторичного контура, что упрощает устройство станции. Рассматриваются два варианта исполнения: корпусный и каналный. Средства пассивной безопасности аналогичны соответствующим средствам упрощенных кипящих водяных реакторов. В качестве топлива используется оксид урана, обогащенный для варианта с открытым топливным циклом. В активной зоне может использоваться спектр тепловых нейтронов с замедлением обычной или тяжелой водой. Кроме того, реактор может быть быстрым с полным рециклом актинидов на основе стандартной технологии переработки ОЯТ. Поскольку данный проект основан на опыте эксплуатации кипящих водяных реакторов и сотен электростанций на ископаемом топливе со сверхкритической водой, его разработка уже представляется возможной, а начало эксплуатации демонстрационного реактора мощностью от 30 до 150 МВт(э) запланировано на 2022 г.

Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (ВТГР). Данные реакторы представляют собой реакторы с замедлением графитом и гелиевым охлаждением, эксплуатация основана на значительном опыте.

Активная зона может состоять из призматических блоков, как, например, японский HTTR, ранняя версия модульного гелиевого реактора с газовой турбиной компании General Atomics и российские разработки, или из шаровых ТВЭЛов, как, например, китайский HTR-10 или HTR-PM и PBMR, который ранее разрабатывался в Южной Африке. Температура на выходе, превышающая 900 °C, с целевым показателем 1000 °C, обеспечивает термохимическое производство водорода посредством промежуточного теплообменника с параллельной выработкой электроэнергии или напрямую с высоким КПД приводит в действие газовую турбину (по циклу Брайтона). При более низких температурах на выходе возможно использование цикла Ренкина для выработки электроэнергии, что и является главной целью демонстрационных проектов. Предусматриваются модули мощностью 600 МВт(т).

В дорожной карте GIF 2014 г. указано, что ВТГР мощностью 600 МВт, предназначенный для производства водорода может произвести более двух миллионов нормальных кубических метров в день. Приоритетом в части НИОКР является квалификация топлива TRISO для работы при температурах до 1250°C и выгоранием 200 ГВт-сут./т. Проводимые в США исследования только позволили достичь этих параметров, а также добиться работоспособности на временном промежутке в сотни часов при температурах 1 600, 1 700 и 1 800 °C. Тем не менее, в краткосрочной перспективе производство электроэнергии и технологические процессы, основанные на высокотемпературном паре, которые требуют температуру на выходе в диапазоне 700-850 °C, имеют наибольший потенциал.

Китай строит показательную промышленную установку HTR-PM в Шидаоване, что создает предпосылки для коммерческой версии ВТГР.

МАЛЫЕ И СРЕДНИЕ РЕАКТОРЫ

Глобальная заинтересованность реакторах малой и средней мощности, или модульных реакторах, растет за счёт низких инвестиционных рисков, сниженных сроков строительства и стоимостью, повышенной совместимостью с электроэнергетическими системами и широким диапазоном применения.

Малые модульные реакторы (ММР) определяются как ядерные реакторы производительностью 300 МВт(э) или ниже, разработанные с использованием технологии модульного строительства в целях экономии, достигаемой за счет серийного производства и сниженных сроков строительства.

В настоящий момент в разработке находится приблизительно 20 конструкций ММР в 10 странах (Аргентина, Китай, Франция, Индия, Италия, Япония, Корея, Россия, Южная Африка и США) для производства электроэнергии внутри страны и, в случае некоторых проектов, для коммерческого экспорта.

Министерство энергетики США оказало значительную поддержку в развитии технологий ММР для получения американскими технологиями доли на этом рынке. Ведомство запустило многолетний проект с долевым участием, направленный на поддержку развития существующих, новых и разрабатываемых проектов реакторов следующего поколения с использованием технологий ММР. В январе 2012 г. министерство энергетики США направило запрос представителям промышленного сектора относительно предоставления заявок на поддержку разработки проектов новых легководных реакторов. Компании Westinghouse, Babcock & Wilcox, Holtec и NuScale Power подали четыре заявки с проектами реакторов мощностью в диапазоне от 225 до 45 МВт(э). На сегодняшний день проект ММР компании NuScale проходит этап лицензирования с целью дальнейшего создания 12-модульной установки в Айдахо, эксплуатация которой запланирована на середину 2020 г.

Великобритания имеет амбициозную правительственную программу по поддержке разработки ММР, которая является частью национальной атомной программы «Sector Deal». В сентябре 2018 г. Министерство торговли, энергетики и промышленной стратегии (BEIS), объявило, что восемь организаций заключили контракты на проведение технико-экономических исследований для первой фазы проекта по разработке и оценке конструкций усовершенствованных модульных реакторов (AMR). Среди них: Advanced Reactor Concepts (ARC-100); DBD (представляет проект HTR-PM китайского Института ядерных и новых энергетических технологий); LeadCold (SEALER-UK); Moltex Energy (стабильный солевой реактор); Tokamak Energy (компактный, сферический модульный термоядерный реактор); U-Battery Developments (компактный ядерный реактор); Ultra Safe Nuclear (микромодульный реактор) и Westinghouse (Westinghouse LFR). В июле 2019 г. правительство Великобритании со стороны Фонда стратегии развития промышленности выделило 18 млн. фунтов стерлингов на поддержку развития проекта ММР под руководством Rolls-Royce.

Канада также проявляет интерес к поддержке развития технологии ММР. Министерство природных ресурсов Канады в 2018 г. опубликовало «Дорожную карту разработки канадских малых модульных реакторов» и предоставило ряд рекомендаций по четырем тематическим основам для координации будущих действий для правительства, промышленности и других стейкхолдеров. В апреле 2019 г. Комиссия по ядерной безопасности Канады получила первую заявку на лицензирование проекта ММР, разрабатываемого Global First Power при поддержке Ontario Power Generation и Ultra Safe Nuclear Corporation. Данная заявка представляет собой предложение по созданию станции с микромодульным реактором на реке Чалк в Онтарио.

За несколько десятилетий Россия разработала и ввела в строй множество ММР. Россия эксплуатирует атомные ледоколы с 1957 г., когда на воду был спущен первый в мире атомный ледокол «Ленин». В текущих ледоколах класса «Арктика» используются два реактора ОК-900А мощностью 171 МВт каждый. Ледоколы класса «Таймыр», пригодные для речного судоходства, оснащены одним реактором КЛТ-40М производительностью 135 МВт. Будущие ледоколы планируется оснащать новыми реакторами РИТМ-200 мощностью 175 МВт каждый и РИТМ-400 мощностью 315 МВт. Кроме того, в настоящий момент в разработке находится ряд малых версий реактора ВВЭР, включая разработанный «ОКБМ Африкантов» проект ВБЭР-300 с производительностью 325 МВт(э). В Научно-исследовательском и конструкторском институте энерготехники (НИКИЭТ) разрабатываются кипящий водяной реактор ВК-300 пригодный как для производства электроэнергии (250 МВт[э]), так и для совмещения производства тепла и электроэнергии с опреснением, а также БРЕСТ-300, свинцовый быстрый реактор.

ПЛАВУЧАЯ АТОМНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ

Технология плавучих АЭС используется начиная с конца 1950 гг. в ледоколах. Она также использовалась при обеспечении электроэнергией зону Панамского канала.

Плавучий энергоблок, предлагаемый российской Госкорпорацией «Росатом» представляет собой объединение двух технологий: ранее использовавшихся на ледоколах современных легководных реакторов и плавучих платформ, применяемых в оффшорной добыче нефти и газа. В наши дни существуют технологии и процедуры, которые позволяют в сравнительно сжатые сроки построить и ввести в эксплуатацию плавучие АЭС.

Реакторы для таких АЭС спроектированы таким образом, чтобы производить электроэнергию в течение трех-пяти лет без замены топлива, что снижает общие расходы на производство электроэнергии для промышленных потребителей и для конечных пользователей. Концепция также позволяет снизить входные барьеры для потребителей, которым, например, не требуется атомная станция на 60 лет.

Другим преимуществом является мобильность. Плавучие блоки могут быть произведены в одной стране и экспортированы в другие, что обеспечивает гибкое производство электроэнергии для поддержки районов, которые в значительной степени зависят от солнечных и ветряных электростанций, а также удаленных районов, которые полностью полагаются на ископаемое топливо, доставляемое морским путем.

Росатом остается мировым лидером в разработке и строительстве плавучих атомных электростанций и единственной компанией, которая в 2019 г. ввела в эксплуатацию г. Певек первую плавучую атомную электростанцию «Академик Ломоносов». Суммарная мощность двух реакторов станции составляет в 70 МВт(э), что достаточно для обеспечения энергией города с населением в 100 000 человек.

В июле 2017 г. Росатом объявил о создании второго поколения плавучих АЭС, т.н. «Оптимизированных плавучих энергоблоков» (ОПЭБ), в которых будут использоваться два реактора РИТМ-200М, аналогичные реакторам, установленным на ледоколах последних моделей. РИТМ-200М мощнее в сравнении с реакторами КЛТ-40С (на 50 МВтэ каждый), их топливо обогащено практически до 20 %, а его замена необходима всего лишь раз в 10-12 лет на базах обслуживания, следовательно, хранение запаса топлива на борту не требуется.

Параллельно, ряд китайский корпораций работает над тем, чтобы представить в 2020 г. аналогичную технологию. Учёные из США также проводят исследования в данной области, продвигая экономическую обоснованность применения плавучих атомных станций в своей стране. Кроме того, в свое время французская компания Naval Group представила проект подводного реактора Flexblue.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. World Energy Council (2016), World Energy Scenarios 2016 – The Grand Transition, https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World-Energy-Scenarios-2016_Full-Report.pdf
2. World Nuclear Association, The Harmony Programme, <https://www.world-nuclear.org/harmony>
3. OECD-NEA, Cost of Decarbonisation – System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables (2019), <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2019/7299-system-costs.pdf>
4. EU Technical Expert Group on Sustainable Finance (2019), Financial a Sustainable European Economy, https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/business_economy_euro/banking_and_finance/documents/190618-sustainable-finance-teg-report-taxonomy_en.pdf
5. ROSATOM, Modern Reactors of Russian Design, www.rosatom.ru/en/rosatom-group/engineering-and-construction/modern-reactors-of-russian-design/
6. World Nuclear Association, Small Nuclear Power Reactors, www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx
7. NuScale Power (2017), NuScale Power Launces Ambitious Action Plan for UK SMR Deployment Within The Next Decade, www.newsroom.nuscalepower.com/press-release/uscacle-power-launches-ambitious-action-plan-uk-smr-deployment-within-next-decade
8. Nuclear Street (2018), Nuvia Selected As Technical Adviser On UK’s Modular Reactor Program, www.nuclearstreet.com/nuclear_power_industry_news/b/nuclear_power_news/archive/2018/10/30/nuvia-selected-as-technical-adviser-on-uk_2700_s-modular-reactor-program-103001#.W-_gPTgzbyN
9. Natural Resources Canada (2018), A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors, https://smrroadmap.ca/wp-content/uploads/2018/11/SMRRoadmap_EN_nov6_Web-1.pdf
10. International Atomic Energy Agency, Deployment Indicators for Small Modular Reactors Methodology, Analysis of Key Factors and Case Studies, IAEA TECDOC No. 1854, <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1854web.pdf>
11. U.S. Department of Energy, Advanced Small Modular Reactors (SMRs), www.energy.gov/ne/nuclear-reactor-technologies/small-modular-nuclear-reactors
12. World Nuclear News, First Canadian SMR licence application submitted, www.world-nuclear-news.org/Articles/First-Canadian-SMR-licence-application-submitted
13. Rosatom, Floating nuclear power plant The Akademik Lomonosov has received an operating license, www.rosatom.ru/en/press-centre/news/floating-nuclear-power-plant-the-akademik-lomonosov-has-received-an-operating-license-/?sphrase_id=775161
14. The Generation IV International Forum, <https://www.gen-4.org/gif/>

МОДЕЛИРОВАНИЕ

15. BGR (2016), Reserves, Resources and Availability of Energy Resources 2015 – Annual report.
16. Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Hannover, Germany. (BGR: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), www.bgr.bund.de/EN/Themen/Energie/Downloads/energiestudie_2015_en.html
17. Densing M., Turton H., Bauml G. (2012), Conditions for the successful deployment of electric vehicles – a global energy system perspective, *Energy*, 47, pp.137–149. [joint work with Volkswagen AG]
18. Gul T., Kypreos S., Turton H. and Barreto L. (2009), An energy-economic scenario analysis of alternative fuels for personal transport using the Global Multi-regional MARKAL model (GMM). *Energy*, 34, pp. 1423–1437.
19. Rafaj, P. (2005), Analysis of Policies Contributing to Sustainability of the Global Energy System Using the Global Multi-regional MARKAL Model (GMM). PhD No. 16122, ETH Zurich, Switzerland.
20. International Energy Agency (2015a), Extended world energy balances – year 2010. IEA/OECD Library, Paris; www.iea.org/statistics/topics/energybalances/
21. Turton, H., Panos, V., Densing, M., Volkart, K. (2013), Global Multi-regional MARKAL (GMM) model update: disaggregation to 15 regions and 2010 recalibration. PSI Report, Paul Scherrer Institute, Switzerland, ISSN: 1019-0643, https://www.psi.ch/sites/default/files/import/eem/PublicationsTabelle/PSI-Bericht_13-03.pdf
22. U.S. Energy Information Administration (2015), EIA International Energy Statistics, Washington, www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm
23. Global Energy Observatory (2015), Global Energy Observatory, Los Alamos (USA), globalenergyobservatory.org/
24. International Energy Agency (2015b), IEA Electricity Information Statistics Database, Paris, www.iea.org/statistics/relateddatabases/electricityinformation/
25. Panos E., Turton H., Densing M., Volkart K. (2015), Powering the growth of Sub-Saharan Africa: The Jazz and Symphony scenarios of World Energy Council, *Energy for Sustainable Development*, Vol. 26, pp. 14-33, Elsevier doi:10.1016/j.esd.2015.01.004 ISSN 0973-0826
26. Panos E., Densing M., Volkart K. (2016), Access to electricity in the World Energy Council's global energy scenarios: An outlook for developing regions until 2030, *Energy Strategy Reviews*, Vol. 9, pp. 28-49. Elsevier doi:10.1016/j.esr.2015.11.003
27. Volkart, K., Mutel, C. Panos, E. (2018), Integrating life cycle assessment and energy system modelling: Methodology and application to the world energy scenarios, *Sustainable Production and Consumption*, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.07.001>
28. Kober, T., Panos, E., Volkart K. (2018), Energy system challenges of deep global CO2 emissions reduction under the World Energy Council's scenario framework, In Giannakidis G., K. Karlsson, M. Labriet, B. Ó Gallachóir (eds.) *Limiting Global Warming to Well Below 2°C: Energy System Modelling and Policy Development*, pp. 17-31

ПЕРЕЧЕНЬ РИСУНКОВ И ТАБЛИЦ

Рисунок 1: Структура первичного энергетического баланса к 2040 г. и доля атомной энергетики (%)	6
Рисунок 2: Поставки первичной энергии при сценарии «Джаз-модерн», млн т. н. э., доля в %	27
Рисунок 3: Производство электроэнергии при сценарии «Джаз-модерн» (ТВт-ч), доля в % по типу генерации	27
Рисунок 4: Поставки первичной энергии при сценарии «Незаконченная симфония», млн т. н. э., доля в %	32
Рисунок 5: Производство электроэнергии при сценарии «Незаконченная симфония» (ТВт-ч), доля в % по типу генерации	32
Рисунок 6: Поставки первичной энергии при сценарии «Хард-рок», млн т. н. э., доля в %	36
Рисунок 7: Производство электроэнергии при сценарии «Хард-рок» (ТВт-ч), доля в % по типу генерации	36
Таблица 1. Экономические показатели при сценарии «Джаз-модерн»	54
Таблица 2. Производство первичной энергии при сценарии «Джаз-модерн», в млн. т. н.э.	54
Таблица 3. Атомная энергетика в производстве первичной энергии по регионам при сценарии «Джаз-модерн», в млн. т. н.э.	54
Таблица 4. Производство электроэнергии по типу генерации при сценарии «Джаз-модерн», в ТВт-ч	55
Таблица 5. Объемы выбросов углекислого газа при сценарии «Джаз-модерн»	55
Таблица 6. Установленная мощность АЭС по регионам при сценарии «Джаз-модерн», в ГВт	55
Таблица 7. Экономические показатели при сценарии «Неоконченная симфония»	56
Таблица 8. Производство первичной энергии при сценарии «Неоконченная симфония», в млн. т. н.э.	56
Таблица 9. Атомная энергетика в производстве первичной энергии по регионам при сценарии «Неоконченная симфония», в млн. т. н.э.	56
Таблица 10. Производство электроэнергии по типу генерации при сценарии «Неоконченная симфония», в ТВт-ч	57
Таблица 11. Объемы выбросов углекислого газа при сценарии «Неоконченная симфония»	57
Таблица 12. Установленная мощность АЭС по регионам при сценарии «Неоконченная симфония», в ГВт	57
Таблица 13. Экономические показатели при сценарии «Хард-рок»	58
Таблица 14. Производство первичной энергии при сценарии «Хард-рок», в млн. т. н.э.	58
Таблица 15. Атомная энергетика в производстве первичной энергии по регионам при сценарии «Хард-рок», в млн. т. н.э.	58
Таблица 16. Производство электроэнергии по типу генерации при сценарии «Хард-рок», в ТВт-ч	59
Таблица 17. Объемы выбросов углекислого газа при сценарии «Хард-рок»	59
Таблица 18. Установленная мощность АЭС по регионам при сценарии «Хард-рок», в ГВт.	59

МЕТОДОЛОГИЯ



Моделирование по методу MARKAL

Была проведена количественная оценка сценариев с помощью мульти-региональной модели MARKAL (Global Multi-Regional MARKAL Model – GMM). GMM является инструментом для количественной оценки и дополнения сценариев, разработанных МИРЭС. Технология GMM позволяет последовательно и комплексно моделировать мировую энергетическую систему с учетом технологических и экономических факторов при количественной оценке долгосрочных энергетических переходов.

Модель управляется вводимыми предположениями, отображающими сюжеты сценария, и применяет алгоритм оптимизации для определения наименее затратной долгосрочной конфигурации глобальной энергетической системы с точки зрения социального планирования с совершенным прогнозированием. GMM принадлежит к серии моделей типа MARKAL (MARKet ALlocation), где акцент сделан на детальном представлении поставок, преобразования и конечного потребления энергии (так называемая «восходящая» модель).

Модель GMM представляет собой технологически подробную модель оптимизации затрат, разработкой которой протяжении нескольких лет занималась кафедра экономики энергетики

Институт Пауля Шеррера (PSI) (Источники: Rafaj, 2005; Gül et al., 2009; Densing et al., 2012, Turton et al, 2013, Panos et al. 2015, Panos et al. 2016, Volkart et al. 2018, Kober et al. 2018.) Мировой энергетический совет выступил в качестве партнера с целью поддержки дальнейшей разработки и распространения модели для повышения прозрачности, доступности и надежности моделирования сценариев развития мировой энергетики. При этом МИРЭС и PSI предоставляют модель GMM в открытом доступе, доступную для всех членов МИРЭС (при условии получения лицензирования). Данные инструменты не направлены непосредственно на моделирование экономики за пределами энергетического сектора, который представлен в виде набора внешних входных данных, влияющих на модель, в основе которых лежит последовательное развитие сценария. GMM применяется для определения комбинации технологий и вариантов использования энергоносителя с наименьшими издержками с целью предоставления энергоуслуг за счет алгоритма оптимизации рыночного равновесия. С помощью алгоритма можно одновременно определить необходимые инвестиционные и эксплуатационные решения по оборудованию, а также решения по поставкам первичных энергоресурсов для каждого региона, представленного в модели, что позволит установить равновесие между стоимостью каждого энергоносителя, количеством, поставляемым производителями, и количеством, требуемым потребителями. Дополнительную информацию о модели и ее методологии можно найти на сайте Института Пауля Шеррера¹.

География

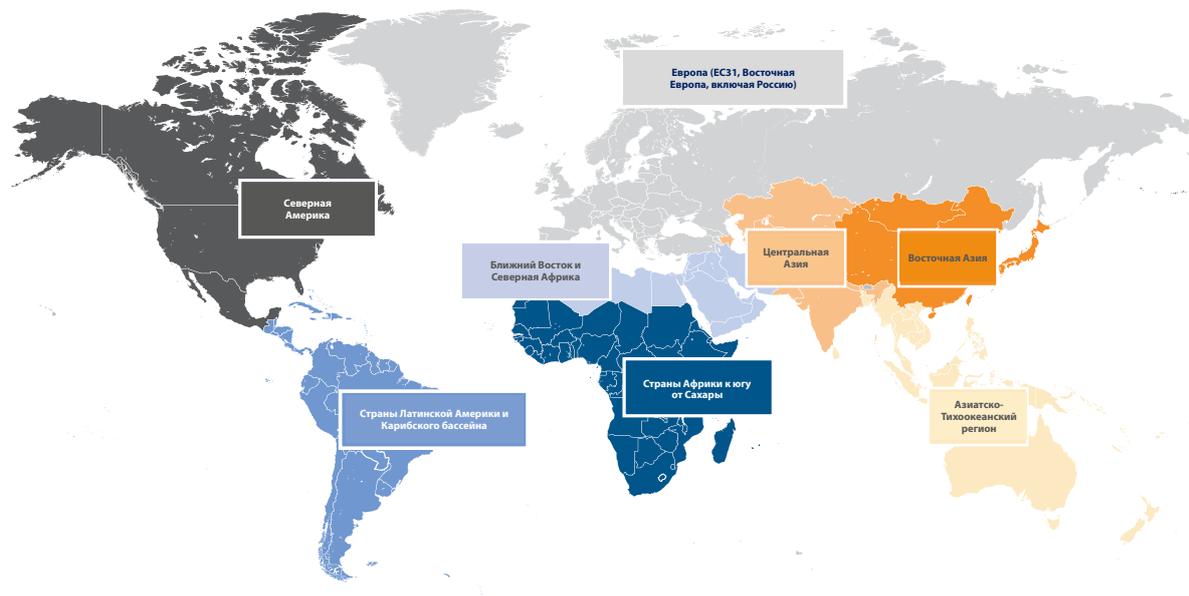
В модели Института Пауля Шеррера представлены 17 регионов по всему миру. В настоящем докладе Мирового энергетического совета представлено восемь регионов мира, оказывающих наиболее значительное воздействие на энергетический сектор, как показано на рисунке ниже. Моделирование основных стран представлено в качестве отдельных регионов: Бразилия, Китай, Европейский союз², Индия, Россия и США. Регионы сгруппированы следующим образом: Восточная Европа³; Южная и Центральная Азия (за исключением Индии); развитые страны Дальнего Востока (Япония, Корея и Тайвань); Австралия и Новая Зеландия; Латинская Америка и страны Карибского бассейна (за исключением Бразилии и Мексики); страны-члены Совета сотрудничества стран Залива; другие ближневосточные страны; страны Северной Африки; Канада и Мексика; страны Африки к югу от Сахары; страны Юго-Восточной Азии и Тихоокеанского региона (за исключением Австралии и Новой Зеландии). Принятые в сценарии допущения влияют на динамику спроса и предложения (стоимость, эффективность и доступность) для каждого региона. Следствием региональной и технологической дифференциации является крупномасштабная модель оптимизации, в рамках которой подробно представлена энергетическая система каждого региона, начиная от добычи и импорта ресурсов и заканчивая преобразованием, использованием и экспортом энергии. Кроме того, в модели представлены внутренние двусторонние торговые связи между регионами и мировыми рынками.

1. Институт Пауля Шеррера предоставляет основную информацию по использованию методологии и необходимых инструментов, более подробную информацию см. на веб-сайте: www.psi.ch/eem/methods-and-tools

2. Включая Норвегию, Швейцарию и Исландию.

3. Албания, Армения, Белоруссия, Босния и Герцеговина, Грузия, Северная Македония, Молдавия, Сербия, Турция, Украина, Косово и Черногория.

Разбивка по регионам в целях моделирования



Определение энергопотребления, технологий и потенциала энергетических ресурсов

Модель GMM скорректирована с учетом недавно опубликованных статистических данных за 2010 г. Изменения охватывают текущие потребности каждого энергетического подсектора, долю технологий и топливных ресурсов, а также оценочные показатели текущих затрат и эффективности технологий. Основным источником, использованным при внесении корректировок в данные по производству и потреблению топлива, является энергетический баланс Международного энергетического агентства (МЭА 2015a). С целью наилучшего отражения результатов разработок (с 2010 по 2015 гг.) в модели используются дополнительные статистические данные за последние годы, по которым доступны достоверные данные (см. отчет EIA за 2015 г., отчет BGR за 2016 г. и доклад МЭА 2015b; прочие ссылки см. в отчете Ника Туртона и пр. от 2013 г.). Кроме того, при внесении изменений на краткосрочную перспективу (до 2020 г.) учитывались национальные и региональные прогнозы (например, ежегодный доклад EIA-2018 для США, тенденции ЕС-2016 для ЕС31, пятилетний национальный план Китая, пятилетний национальный план Индии и ряд других отчетов).

ТАБЛИЦЫ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

(Источник данных в приведенных ниже таблицах: МИРЭС, Институт Пауля Шерпера, компания Accenture Strategy)

Таблица 1. Экономические показатели при сценарии «Джаз-модерн»

Показатели	2015	2025	2030	2040	2050	2060	% СГТР 2015-2060
Численность населения (млн)	7 372	8 163	8 541	9 200	9 762	10 213	0,7%
ВВП (трлн. долл. США, 2010, рыночный валютный курс)	76	105	124	171	229	300	3,1%
ВВП на душу населения (долл. США, 2010, рыночный валютный курс)	10 263	12 920	14 467	18 555	23 489	29 355	2,4%
Владение автомобилем (автомобилей на 1000 человек)	Н/Д	Н/Д	168	198	238	264	Н/Д
Интенсивность потребления первичной энергии (ТНЭ/млн. долл. США, 2010 рыночный валютный курс)	178	145	128	95	71	54	-2,6%
Интенсивность потребления конечной энергии (ТНЭ/млн. долл. США, 2010 рыночный валютный курс)	129	103	91	68	52	40	-2,6%

Таблица 2. Производство первичной энергии при сценарии «Джаз-модерн», в млн. т. н.э.

Производство первичной энергии, в млн. т. н.э.	2015	2025	2030	2040	2050	2060	% СГТР 2015-2060
Итого	13 481	15 309	15 771	16 251	16 297	16 160	0,4%
Уголь	3 826	3 796	3 618	2 918	1 730	1 433	-2,2%
Нефть	4 272	4 695	4 666	4 191	3 902	3 433	-0,5%
Газ	2 937	3 798	4 168	5 087	5 660	5 325	1,3%
Атомная энергия	616	788	850	977	1 156	1 241	1,6%
Энергия био-массы	1 310	1 372	1 417	1 597	1 859	2 173	1,1%
Гидроэлектро-энергия	327	404	421	472	523	562	1,2%
Прочие возобновляемые источники энергии	193	458	630	1 010	1 466	1 993	5,3%

Таблица 3. Атомная энергетика в производстве первичной энергии по регионам при сценарии «Джаз-модерн», в млн. т. н.э.

Первичная энергия по регионам, в млн. т. н.э.	2015	2025	2030	2040	2050	2060	% СГТР 2015-2060
Итого	616	788	850	977	1,156	1,241	1,6%
Страны Африки к югу от Сахары	3	3	2	3	3	5	0,8%
Ближний Восток и Северная Африка	1	4	4	4	8	37	9,0%
Страны Латинской Америки и Карибского бассейна	6	8	9	8	7	7	0,6%
Северная Америка	246	226	225	225	224	226	-0,2%
Европа	305	276	273	263	263	254	-0,4%
Центральная Азия	11	35	52	83	116	127	5,5%
Восточная Азия	45	234	282	387	529	577	5,9%
Азиатско-Тихоокеанский регион	-	1	2	4	6	8	Н/Д

Таблица 4. Производство электроэнергии по типу генерации при сценарии «Джаз-модерн», в ТВт-ч

Тип генерации, в ТВт-ч	2015	2025	2030	2040	2050	2060	% СГТР 2015-2060
Итого	24 072	31 898	35 069	44 085	51 493	57 898	2,0%
Уголь	9 341	10 457	10 050	7 741	2 886	2 139	-3,2%
Уголь (с УХУГ)	-	-	-	34	105	264	Н/Д
Нефть	990	897	819	669	597	526	-1,4%
Газ	5 561	8 247	9 849	15 650	20 561	20 257	2,9%
Газ (с УХУГ)	-	-	-	68	296	1 115	Н/Д
Атомная энергия	2 571	3 055	3 294	3 787	4 484	4 811	1,4%
Гидроэлектро-энергия	3 903	4 695	4 900	5 488	6 085	6 540	1,2%
Энергия био-массы	527	833	923	1 401	1 998	2 567	3,6%
Энергия био-массы (с УХУГ)	-	-	-	-	-	-	Н/Д
Ветровая энергия	840	2 187	2 968	4 991	6 964	9 523	5,5%
Солнечная энергия	256	1 345	2 000	3 643	6 195	8 821	8,2%
Геотермальная энергия	80	146	192	307	466	599	4,6%
Прочие виды топлива	2	37	75	306	856	736	14,7%

Таблица 5. Объемы выбросов углекислого газа при сценарии «Джаз-модерн»

Выбросы углекислого газа	2015	2025	2030	2040	2050	2060	% СГТР 2015-2060
Выбросы углекислого газа (Гт углекислого газа/год)	31	35	35	33	28	22	-0,7%
Улавливание углекислого газа (Гт углекислого газа)	0	0	0	0	1	2	Н/Д
Углекислого газа на душу населения (т углекислого газа)	4	4	4	4	3	2	-1,4%
Интенсивность выбросов углекислого газа (кг углекислого газа/долл. США, 2010 г.)	0	0	0	0	0	0	-3,7%

Таблица 6. Установленная мощность АЭС по регионам при сценарии «Джаз-модерн», в ГВт

Мощность АЭС по регионам, в ГВт	2015	2025	2030	2040	2050	2060	% СГТР 2015-2060
Итого	407	436	443	499	580	620	0,9%
Страны Африки к югу от Сахары	2	2	1	1	2	2	0,4%
Ближний Восток и Северная Африка	2	2	2	2	4	19	5,1%
Страны Латинской Америки и Карибского бассейна	4	4	5	4	4	4	-0,1%
Северная Америка	121	115	114	114	113	115	-0,1%
Европа	171	158	147	141	139	134	-0,5%
Центральная Азия	6	18	26	41	57	63	5,2%
Восточная Азия	101	137	147	193	257	280	2,3%
Азиатско-Тихоокеанский регион	0	1	1	2	3	4	Н/Д

Таблица 7. Экономические показатели при сценарии «Неоконченная симфония»

Показатели	2015	2025	2030	2040	2050	2060	% СГТР 2015-2060
Численность населения (млн.)	7 372	8 163	8 541	9 200	9 762	10 213	0,7%
ВВП (трлн. долл. США, 2010, рыночный валютный курс)	76	101	116	153	198	249	2,7%
ВВП на душу населения (долл. США, 2010, рыночный валютный курс)	10 263	12 376	13 533	16 624	20 240	24 407	1,9%
Владение автомобилем (автомобилей на 1000 человек)	Н/Д	Н/Д	160	188	225	272	Н/Д
Интенсивность потребления первичной энергии (ТНЭ/млн. долл. США, 2010 рыночный валютный курс)	178	147	129	98	77	61	-2,3%
Интенсивность потребления конечной энергии (ТНЭ/млн. долл. США, 2010 рыночный валютный курс)	129	104	92	71	55	43	-2,4%

Таблица 8. Производство первичной энергии при сценарии «Неоконченная симфония», в млн. т. н.э.

Производство первичной энергии, в млн. т. н.э.	2015	2025	2030	2040	2050	2060	% СГТР 2015-2060
Итого	13 481	14 863	14 916	15 009	15 116	15 284	0,3%
Уголь	3 826	3 425	3 023	2 114	1 083	785	-3,5%
Нефть	4 272	4 480	4 237	3 430	2 859	2 382	-1,3%
Газ	2 937	3 611	3 780	4 390	4 820	4 498	1,0%
Атомная энергия	616	955	1 147	1 471	1 754	2 016	2,7%
Энергия био-массы	1 310	1 467	1 570	1 832	2 196	2 623	1,6%
Гидроэнергия	327	431	463	527	615	658	1,6%
Прочие возобновляемые источники энергии	193	493	696	1 245	1 789	2 320	5,7%

Таблица 9. Атомная энергетика в производстве первичной энергии по регионам при сценарии «Неоконченная симфония», в млн. т. н.э.

Первичная энергия по регионам, в млн. т. н.э.	2015	2025	2030	2040	2050	2060	% СГТР 2015-2060
Итого	616	955	1,147	1,471	1,754	2,016	2,7%
Страны Африки к югу от Сахары	3	5	6	10	17	28	4,9%
Ближний Восток и Северная Африка	1	13	17	31	58	76	10,8%
Страны Латинской Америки и Карибского бассейна	6	9	11	13	18	21	3,0%
Северная Америка	246	229	229	237	247	265	0,2%
Европа	305	295	284	312	309	366	0,4%
Центральная Азия	11	54	83	177	274	313	7,7%
Восточная Азия	45	346	510	678	812	921	7,0%
Азиатско-Тихоокеанский регион	-	3	6	13	19	26	Н/Д

Таблица 10. Производство электроэнергии по типу генерации при сценарии «Неоконченная симфония», в ТВт-ч

Тип генерации, в ТВт-ч	2015	2025	2030	2040	2050	2060	% СГТР 2015-2060
Итого	24 072	31 817	34 930	45 519	52 698	59 082	2,0%
Уголь	9 341	9 468	8 326	5 167	579	166	-8,6%
Уголь (с УХУГ)	-	35	71	371	1 045	1 053	Н/Д
Нефть	990	771	493	264	162	92	-5,1%
Газ	5 561	7 727	8 953	13 611	10 728	3 956	-0,8%
Газ (с УХУГ)	-	38	77	547	5 437	10 793	Н/Д
Атомная энергия	2 571	3 701	4 448	5 704	6 802	7 818	2,5%
Гидроэлектро-энергия	3 903	5 019	5 388	6 131	7 153	7 660	1,5%
Энергия био-массы	527	848	1 004	1 438	2 099	2 700	3,7%
Энергия био-массы (с УХУГ)	-	-	-	24	74	172	Н/Д
Ветровая энергия	840	2 335	3 236	5 602	8 275	10 786	5,8%
Солнечная энергия	256	1 700	2 684	6 038	8 970	11 773	8,9%
Геотермальная энергия	80	138	180	330	559	859	5,4%
Прочие виды топлива	2	35	70	290	815	1 253	16,1%

Таблица 11. Объемы выбросов углекислого газа при сценарии «Неоконченная симфония»

Выбросы углекислого газа	2015	2025	2030	2040	2050	2060	% СГТР 2015-2060
Выбросы углекислого газа (Гт углекислого газа/год)	31	33	31	25	17	11	-2,3%
Улавливание углекислого газа (Гт углекислого газа)	0	0	0	1	4	7	Н/Д
Углекислого газа на душу населения (т углекислого газа)	4	4	4	3	2	1	-3,0%
Интенсивность выбросов углекислого газа (кг углекислого газа/долл. США, 2010 г.)	0	0	0	0	0	0	-4,8%

Таблица 12. Установленная мощность АЭС по регионам при сценарии «Неоконченная симфония», в ГВт

Мощность АЭС по регионам, в ГВт	2015	2025	2030	2040	2050	2060	% СГТР 2015-2060
Итого	407	511	581	739	875	1003	2,0%
Страны Африки к югу от Сахары	2	3	3	5	9	14	4,4%
Ближний Восток и Северная Африка	2	7	9	16	30	39	6,8%
Страны Латинской Америки и Карибского бассейна	4	5	6	7	9	11	2,2%
Северная Америка	121	116	116	120	125	134	0,2%
Европа	171	161	153	167	163	191	0,3%
Центральная Азия	6	27	41	88	135	154	7,3%
Восточная Азия	101	192	248	330	394	447	3,4%
Азиатско-Тихоокеанский регион	0	2	3	6	10	13	Н/Д

Таблица 13. Экономические показатели при сценарии «Хард-рок»

Показатели	2015	2025	2030	2040	2050	2060	% СГТР 2015-2060
Численность населения (млн.)	7 372	8 163	8 541	9 200	9 762	10 213	0,7%
ВВП (трлн. долл. США, 2010, рыночный валютный курс)	76	98	110	138	168	200	2,2%
ВВП на душу населения (долл. США, 2010, рыночный валютный курс)	10 263	12 005	12 911	14 970	17 191	19 591	1,4%
Владение автомобилем (автомобилей на 1000 человек)	Н/Д	Н/Д	183	213	248	284	Н/Д
Интенсивность потребления первичной энергии (ТНЭ/млн. долл. США, 2010 рыночный валютный курс)	178	160	149	126	107	92	-1,4%
Интенсивность потребления конечной энергии (ТНЭ/млн. долл. США, 2010 рыночный валютный курс)	129	115	108	94	81	71	-1,3%

Таблица 14. Производство первичной энергии при сценарии «Хард-рок», в млн. т. н.э.

Производство первичной энергии, в млн. т. н.э.	2015	2025	2030	2040	2050	2060	% СГТР 2015-2060
Итого	13 481	15 704	16 390	17 411	17 880	18 485	0,7%
Уголь	3 826	4 009	3 926	3 917	3 267	2 905	-0,6%
Нефть	4 272	5 007	5 214	5 350	5 381	5 300	0,5%
Газ	2 937	3 547	3 791	4 123	4 516	4 770	1,1%
Атомная энергия	616	862	982	1 124	1 266	1 391	1,8%
Энергия биомассы	1 310	1 485	1 558	1 681	1 891	2 193	1,2%
Гидроэлектро-энергия	327	398	403	454	521	583	1,3%
Прочие возобновляемые источники энергии	193	396	517	762	1 038	1 342	4,4%

Таблица 15. Атомная энергетика в производстве первичной энергии по регионам при сценарии «Хард-рок», в млн. т. н.э.

Первичная энергия по регионам, в млн. т. н.э.	2015	2025	2030	2040	2050	2060	% СГТР 2015-2060
Итого	616	862	982	1,124	1,266	1,391	1,8%
Страны Африки к югу от Сахары	3	3	2	2	2	3	-0,4%
Ближний Восток и Северная Африка	1	6	8	11	15	33	8,7%
Страны Латинской Америки и Карибского бассейна	6	9	10	10	9	14	2,0%
Северная Америка	246	225	224	227	228	236	-0,1%
Европа	305	288	273	266	276	309	0,0%
Центральная Азия	11	33	47	83	121	174	6,3%
Восточная Азия	45	298	416	519	608	612	6,0%
Азиатско-Тихоокеанский регион	-	1	2	4	7	10	Н/Д

Таблица 16. Производство электроэнергии по типу генерации при сценарии «Хард-рок», в ТВт-ч

Тип генерации, в ТВт-ч	2015	2025	2030	2040	2050	2060	% СГТР 2015-2060
Итого	24 072	29 927	31 536	35 722	39 593	43 012	1,3%
Уголь	9 341	10 708	10 465	10 548	8 704	8 137	-0,3%
Уголь (с УХУГ)	-	-	-	-	-	-	Н/Д
Нефть	990	1 046	912	741	646	594	-1,1%
Газ	5 561	6 635	7 245	8 376	10 605	11 070	1,5%
Газ (с УХУГ)	-	-	-	-	-	-	Н/Д
Атомная энергия	2 571	3 342	3 808	4 357	4 910	5 394	1,7%
Гидроэлектро-энергия	3 903	4 627	4 686	5 286	6 063	6 786	1,2%
Энергия био-массы	527	793	912	1 136	1 610	2 017	3,0%
Энергия био-массы (с УХУГ)	-	-	-	-	-	-	Н/Д
Ветровая энергия	840	1 592	1 897	2 720	3 480	4 443	3,8%
Солнечная энергия	256	1 076	1 477	2 328	3 150	3 943	6,3%
Геотермальная энергия	80	100	119	169	272	365	3,4%
Прочие виды топлива	2	7	14	60	153	265	12,2%

Таблица 17. Объемы выбросов углекислого газа при сценарии «Хард-рок»

Выбросы углекислого газа	2015	2025	2030	2040	2050	2060	% СГТР 2015-2060
Выбросы углекислого газа (Гт углекислого газа/год)	31	36	37	38	36	34	0,2%
Улавливание углекислого газа (Гт углекислого газа)	0	0	0	0	0	0	Н/Д
Углекислого газа на душу населения (т углекислого газа)	4	4	4	4	4	3	-0,5%
Интенсивность выбросов углекислого газа (кг углекислого газа/долл. США, 2010)	0	0	0	0	0	0	-1,9%

Таблица 18. Установленная мощность АЭС по регионам при сценарии «Хард-рок», в ГВт

Мощность АЭС по регионам, в ГВт	2015	2025	2030	2040	2050	2060	% СГТР 2015-2060
Итого	407	466	498	565	634	696	1,2%
Страны Африки к югу от Сахары	2	1	1	1	1	1	-0,8%
Ближний Восток и Северная Африка	2	3	4	6	8	17	4,9%
Страны Латинской Америки и Карибского бассейна	4	5	5	5	5	7	1,3%
Северная Америка	121	114	114	115	115	120	0,0%
Европа	171	157	148	143	146	163	-0,1%
Центральная Азия	6	17	23	41	60	86	5,9%
Восточная Азия	101	168	202	252	295	297	2,4%
Азиатско-Тихоокеанский регион	0	1	1	2	4	5	Н/Д

БЛАГОДАРНОСТИ

Команда проекта хотела бы поблагодарить лиц, которые способствовали развитию методики проекта, предоставляли информацию, делились идеями и участвовали в подготовке документации. Их поддержка и знания внесли значительный вклад в подготовку настоящего доклада.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТОМ

Кристоф Фрай (генеральный секретарь, Мировой энергетический совет), Гед Дэвис (исполнительный председатель направления Разработки сценариев, Мировой энергетический совет), Анджела Уилкинсон (старший директор направления разработки сценариев и бизнес решений, Мировой энергетический совет), Ханс-Вильгельм Шиффер (Мировой энергетический совет).

ВСЕМИРНАЯ ЯДЕРНАЯ АССОЦИАЦИЯ

Кирилл Комаров (председатель, Всемирная ядерная ассоциация), Агнета Ризинг (генеральный директор, Всемирная ядерная ассоциация).

КОМАНДА ПРОЕКТА

Анастасия Белостоцкая (старший менеджер направления Разработки сценариев, Мировой энергетический совет), Кинг Ли (директор по программе гармонизации, Всемирная ядерная ассоциация), Филипп Костес (старший советник, Всемирная ядерная ассоциация), Иан Эмсли (Всемирная ядерная ассоциация), Джереми Гордон (Всемирная ядерная ассоциация), Алексей Калинин (Институт исследований развивающихся рынков, московская школа управления СКОЛКОВО).

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМИТЕТ МИРОВОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СОВЕТА

Жан-Мари Дожер, председатель совета директоров (Франция), Анжела Уилкинсон, секретарь (Великобритания), Хервиг Клима (Австрия), Уильям Д'Азелер (Бельгия), Лауро Валдир де Соуза (Бразилия), Грэхем Кэмпбелл (Канада), Канг Янбинг (Китай), Эдуард Соваж (Франция), Франсуа Дасса (Франция), Ханс-Вильгельм Шиффер (Германия), Жанна Нг (Гонконг), Атул Собти (Индия), Гаутам Вивек (Индия), Мехди Садеги (Иран), Настаран Рахими (Иран), Алессандро Коста (Италия), Юджи Мацуо (Япония), Ацуши Нода (Япония), Джозеф Аль Асад (Ливан), Артуро Вака (Мексика), Лоуренс Эземоне (Нигерия), Кристиан Ковалевски (Польша), Ян Антончик (Польша), Дэн Иоан Георгиу (Румыния), Дейв Райт (Южная Африка), Клаус Хаммес (Швеция), Барыш Санлы (Турция), Джим Доулл (США), Мамаду Диарра (Мали).

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СЦЕНАРИЕВ – ИНСТИТУТ ПАУЛЯ ШЕРРЕРА

Том Кобер (заведующий кафедрой экономики энергетики), Евангелос Панос (научный сотрудник кафедры экономики энергетики), Мартин Денсин (научный сотрудник кафедры экономики энергетики).

ОСОБАЯ БЛАГОДАРНОСТЬ

Кроме того, команда проекта хотела бы выразить особую благодарность следующим экспертам за их неоценимый вклад в разработку данного отчета, в частности посредством участия в глубинных интервью, участии в семинарах, и работы с материалами отчета.

(Примечание: имена представлены в алфавитном порядке)

Александр Власов, Александр Крюков, Алексей Лохов, Алексей Пасынков, Ангелина Тимофеева-Дубовская, Андрей Гойча, Анес Даллаги, Антон Москвин, Антон Порядин, Барри Леннокс, Вадим Титов, Дайан Камерон, Даниэль Вестлен, Денис Ковалев, Джон Стюарт, Джордж Боровас, Егор Мухортов, Ён Ву Юн., Жан Эду Монкомбл, Игорь Ермаков, Илья Сесютченков, Ирина Скворцова, Казухико Шибя, Карл Уиттл, Кирсти Гоган, Кристин Новицки, Кэнон Брайан, Луис Плоуден-Уордлоу, Майк Кирст, Марат Султанов, Марина Софина, Матти Каттейнен, Милко Ковачев, Нил Херст, Пекка Лундмарк, Питер Хаслам, Пол Дорфман, Пол Невитт, Полина Лион, Раули Партанен, Роберт Дэвис, Сама Бильбао и Леон, Сара Леннон, Сильвен Вите, Скотт Фостер, Стеффан Квист, Стив Трелфолл, Такаюки Гото, Такуя Хаттори, Тереза Луис Руис, Тиина Рицкий, Тим Йео, Тим Стоун, Филипп Мерсель, Фиона Рэймент, Хиромичи Накахара, Чжэ Хун Чой, Шон Хуан, Якопо Буонджорно, Ян Прашил.

Кроме того, мы хотели бы поблагодарить Кейт Дориан за проделанную редакторскую работу (английская версия) по настоящему отчету и команду Good Impressions за верстку и дизайн, а также группу Росатом за перевод на русский.

ПОПЕЧИТЕЛИ

ЙОНГХУН ДЭВИД КИМ

Председатель

ЖАН-МАРИ ДОЖЕР

Сопредседатель; председатель - Исследовательский комитет

КЛЯУС ДИТЕР БАРБКНЕХТ

Заместитель председателя: Финансовый отдел

ЛЕОНХАРД БИРНБАУМ

Избранный председатель: Исследовательский комитет

ОЛЕГ БУДАРГИН

Заместитель председателя – Ответственный за региональное развитие

ХОСЕ ДА КОСТА КАРВАЛЬО НЕТО

Председатель – Комитет по программе

КЛАУДИЯ КРОНЕНБОЛД

Заместитель председателя – Страны Латинской Америки и Карибского бассейна

РОБЕРТ ХАНФ

Заместитель председателя – Северная Америка

(ВАКАНТНАЯ ДОЛЖНОСТЬ)

Заместитель председателя – Европа

ЭЛЬХАМ МАХМУД ИБРАХИМ

Заместитель председателя – Африка

СИГЕРУ МУРАКИ

Заместитель председателя – Азиатско-Тихоокеанский регион/Южная Азия

ИБРАХИМ АЛЬ-МУХАННА

Заместитель председателя – Страны Персидского залива/ Ближнего востока

МАТАР АЛЬ-НЕЯДИ

Заместитель председателя – Всемирный энергетический конгресс 2019 в Абу-Даби

ХОСЕ АНТониО ВАРГАС ЛЛЕРАС

Председатель – Комитет по связям и стратегии

КРИСТОФ ФРАЙ

Генеральный секретарь

ПОСТОЯННЫЕ ПАТРОНЫ МИРОВОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СОВЕТА

Accenture Strategy

Electricité de France

ENGIE

GE Power

Hydro-Québec

Marsh & McLennan Companies

Оливер Вайман

Госкорпорация «Росатом»

ПАО «Россети»

Siemens AG

Swiss Re Corporate Solutions

Tokyo Electric Power Co

ПАРТНЕРЫ ПО ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МИРОВОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СОВЕТА

California ISO

EY

PriceWaterhouseCoopers

МИРОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СОВЕТ

[Австрия](#)

[Алжир](#)

[Аргентина](#)

[Армения](#)

[Бахрейн](#)

[Бельгия](#)

[Болгария](#)

[Боливия](#)

[Босния и Герцеговина](#)

[Ботсвана](#)

[Бразилия](#)

[Венгрия](#)

[Гана](#)

[Германия](#)

[Гонконг, Китай](#)

[Греция](#)

[Доминиканская Республика](#)

[ДР Конго](#)

[Египет](#)

[Израиль](#)

[Индия](#)

[Индонезия](#)

[Иордан](#)

[Иран](#)

[Ирландия](#)

[Исландия](#)

[Испания](#)

[Италия](#)

[Казахстан](#)

[Камерун](#)

[Канада](#)

[Кения](#)

[Кипр](#)

[Китай](#)

[Колумбия](#)

[Королевство Эсватини](#)

[Кот-д'Ивуар](#)

[Латвия](#)

[Ливан](#)

[Ливия](#)

[Литва](#)

[Малайзия](#)

[Мальта](#)

[Марокко](#)

[Мексика](#)

[Монако](#)

[Монголия](#)

[Намибия](#)

[Непал](#)

[Нигер](#)

[Нигерия](#)

[Нидерланды](#)

[Новая Зеландия](#)

[Объединенные Арабские Эмираты](#)

[Пакистан](#)

[Панама](#)

[Парагвай](#)

[Перу](#)

[Польша](#)

[Португалия](#)

[Российская Федерация](#)

[Румыния](#)

[Саудовская Аравия](#)

[Сенегал](#)

[Сербия](#)

[Сингапур](#)

[Сирийская Арабская Республика](#)

[Словакия](#)

[Словения](#)

[Соединенные Штаты Америки](#)

[Таиланд](#)

[Танзания](#)

[Тринидад и Тобаго](#)

[Тунис](#)

[Турция](#)

[Украина](#)

[Уругвай](#)

[Финляндия](#)

[Франция](#)

[Хорватия](#)

[Чад](#)

[Чили](#)

[Швейцария](#)

[Швеция](#)

[Шри-Ланка](#)

[Эквадор](#)

[Эстония](#)

[Эфиопия](#)

[Южная Африка](#)

[Южная Корея](#)

[Япония](#)

Опубликовано Мировым энергетическим советом
в 2019 г.

Авторское право © 2019 г., Мировой энергетический совет. Все права защищены. Разрешается распространение или воспроизведение всей публикации или ее части при условии наличия в каждом экземпляре или при передаче данных следующей цитаты: «Используется с разрешения Мирового энергетического совета»

www.worldenergy.org | @WECouncil

Мировой энергетический совет (МИРЭС)

Зарегистрирован в Англии и Уэльсе
№ 4184478

Идентификационный номер НДС: GB 123 3802 48

Юридический адрес

62–64 Cornhill
London EC3V 3NH
United Kingdom