



UNECE

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Фото на титульном листе: Атомная электростанция «Палюэль» во Франции (воспроизведено по лицензии Creative Commons 4.0 <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FC-0019.jpg>)

Выводы, толкования и заключения, изложенные в настоящей публикации, принадлежат ее авторам и не обязательно отражают мнения Организации Объединенных Наций, ее должностных лиц или государств-членов. Употребляемые обозначения и материалы, изображенные на какой-либо карте в настоящем издании, не означают выражения со стороны Организации Объединенных Наций какого бы то ни было мнения относительно правового статуса страны, территории, города или района, или их властей, или относительно делимитации их границ. Упоминание названий фирм, лицензированных процессов или коммерческих продуктов и не означает их одобрения со стороны Организации Объединенных Наций.

Настоящая публикация издана на английском и русском языках.

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Настоящий документ подготовлен в целях содействия в осуществлении проекта «Углубление понимания последствий и возможностей перехода к углеродной нейтральности в энергетике и энергоемких отраслях промышленности в регионе ЕЭК ООН к 2050 году» и отражает выводы семинара, посвященного роли ядерной энергетики в достижении углеродной нейтральности в регионе ЕЭК ООН, состоявшегося 23 ноября 2020 года, и субрегионального семинара по достижению углеродной нейтральности в регионе ЕЭК ООН, состоявшегося 24 ноября 2020 года.

Документ был подготовлен Целевой группой по углеродной нейтральности ЕЭК ООН и специальной группой международных экспертов высокого уровня, которые обеспечивали контроль качества, консультации и подтверждение результатов. Проектная группа хотела бы выразить особую благодарность Мишелю Бертелеми, Крисси Борски, Джулии Бисконти, Ханне Бронвин, Владимиру Будинскому, Филиппу Костесу, Антуану Херцгогу, Дэвиду Хессу, Томасу Гибону, Кирстен Кетилсон, Зузане Крейцириковой, Кингу Ли, Полине Лион, Джеймсу Мерфи, Анри Пайлеру, Йозефу Соболевскому, Вайя Солер и Харикришнану Тулсидасу за экспертный опыт и непрерывную поддержку. Ива Бркич, Олег Дзюбинский и Скотт Фостер (Отдел устойчивой энергетики ЕЭК ООН) внесли свой вклад в подготовку доклада посредством предоставления рекомендаций, комментариев и осуществления контроля.

Проектная группа и авторы также хотели бы поблагодарить Шую Ли и Ричарда Петри за предоставление услуг в области визуальной коммуникации и дизайна в ходе подготовки документа. Екатерина Заяш перевела настоящий доклад на русский язык.

Отказ от ответственности

Выводы, толкования и заключения, изложенные в настоящей публикации, не обязательно отражают мнения Организации Объединенных Наций, ее должностных лиц или государств-членов. В частности, данный технологический обзор не отражает позицию государств-членов ЕЭК ООН, которые предпочитают не развивать ядерную энергетику.

Некоторые экологические аспекты, связанные с атомной энергией, являются предметом работы и решений Сторон Конвенции ЕЭК 1991 г. об оценке воздействия на окружающую среду в трансграничном контексте (Конвенция Эспо) и Протокола по стратегической экологической оценке к ней.

СОДЕРЖАНИЕ

Выражение признательности	ii
Основные выводы	1
1. Введение	3
1.1 Чрезвычайная климатическая ситуация требует применения всех низкоуглеродных технологий	3
1.2 Ядерная энергия как элемент решения проблемы изменения климата.....	6
2. Технологии использования ядерной энергии	6
2.1 Современные реакторные технологии	9
2.2 Усовершенствованные конструкции реакторов	9
2.3 Инновации в топливном цикле	10
3. Сферы применения ядерной энергии	11
3.1 Производство водорода.....	11
3.2 Энергоемкие отрасли.....	11
3.3 Централизованное теплоснабжение.....	11
4. Экономические аспекты ядерной энергетики и стоимость декарбонизации	13
4.1 Полная стоимость энергии	14
4.2 Снижение стоимости ядерной энергии	14
5. Долгосрочная эксплуатация ядерных установок и работа в маневренном режиме	16
6. Воздействие на здоровье человека и окружающую среду	18
6.1 Радиация в контексте	18
Приложения	20
Справочная литература	24

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Атомная энергия представляет собой источник низкоуглеродной электроэнергии и тепла, который может способствовать достижению углеродной нейтральности. Ядерная энергетика играет важную роль в предотвращении выбросов углекислого газа (CO₂). Декарбонизация электроэнергии является серьезной задачей, которая требует использования всех доступных низкоуглеродных технологий. Полученные данные анализа свидетельствуют о том, что глобальные цели в области климата не будут достигнуты в случае исключения атомной энергетика.

Помимо существующих реакторов большой мощности, атомная энергетика развивается за счет передовых технологий, включая малые модульные реакторы (ММР). Эти технологии дополняют имеющийся парк реакторов большой мощности и откроют новые рынки для ядерной энергетика, включая ядерное теплоснабжение, производство технологического тепла и водорода. ММР могут поставлять электроэнергию в небольшие сети или удаленные районы и лучше интегрироваться с возобновляемыми источниками энергии с переменным режимом выработки электроэнергии.

Во многих регионах мира атомные электростанции представляют собой конкурентоспособный с точки зрения затрат вариант производства электроэнергии. В других странах, несмотря на более высокую по сравнению с другими источниками приведенную стоимость электроэнергии, новые АЭС обеспечивают устойчивость генерации наряду с экологическими и социально-экономическими преимуществами, которые оправдывают капиталоемкие проекты и делают энергетическую систему в целом более доступной и устойчивой. Ядерно-энергетическая отрасль координирует усилия, чтобы извлечь уроки из недавних проектов с целью дальнейшего снижения затрат на строительство.

Некоторые страны делают выбор в пользу развития атомной энергетика с расчетом на то, что она сможет играть важную роль в энергетическом балансе как важный

элемент декарбонизации. Ряд стран принял решение не использовать атомную энергию в силу разных причин: одни – ввиду высокой обеспеченности природными ресурсами, другие – из-за опасений, связанных с безопасностью и обращением с отходами.

Органам, отвечающим за формирование и реализацию политики, которые намерены достичь целей в области климата и устойчивого развития с использованием атомной энергии, следует:

Обеспечить равные условия для всех низкоуглеродных технологий

Декарбонизация электроэнергии является серьезной задачей, которая требует внедрения всех доступных низкоуглеродных технологий, включая атомную энергетика.

Формировать позитивные политические сигналы для атомной энергетика на долгосрочную перспективу

Четкие нормативно-правовые рамки и понятные рыночные механизмы будут способствовать инвестициям в новые атомно-энергетические проекты и в развитие стабильных цепей поставок.

Ускорить темпы разработки и внедрения ММР и других передовых технологий

Техническая, финансовая и надзорная поддержка жизненно важны для внедрения и коммерциализации новых ядерных технологий. Также необходима гармонизация процедур лицензирования на международном уровне.

Обеспечить долгосрочную эксплуатацию действующих АЭС

Долгосрочная эксплуатация существующих АЭС позволит сократить выбросы CO₂ и снизить стоимость «энергетического перехода». Продление ресурса атомных станций должно осуществляться с соблюдением требований к безопасности и с учетом экономических параметров..

Оценить выгоды льготного финансирования проектов в области ядерной энергетика

Классификация «зеленого» финансирования должна основываться на научном и технологически нейтральном подходе. Транснациональным банкам и международным финансовым организациям следует учитывать ядерно-энергетические проекты в деятельности по устойчивому кредитованию.

АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Важный источник низкоуглеродной электроэнергии и тепла, которые способствуют достижению углеродной нейтральности



ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ



Атомные электростанции могут стабильно производить электроэнергию 24 часа в сутки, при необходимости - в маневренном режиме.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ТЕПЛО ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ НУЖД



Высокотемпературное тепло от атомных электростанций может иметь преобразующее значение в декарбонизации труднодоступных секторов, таких как промышленность (химическая, сталелитейная, бетонная и цементная).

ВОДОРОД



Ядерную энергию можно использовать для производства низкоуглеродного водорода с помощью нескольких процессов:

- Низкотемпературный электролиз - с использованием ядерной электроэнергии АЭС
- Паровой электролиз - с использованием ядерной тепловой и электрической энергии
- Термохимический процесс - с использованием ядерного тепла при температуре выше 600 °C

ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ



АЭС представляют собой апробированный источник тепла для централизованного теплоснабжения в городах, успешно используемый в ряде стран.



Осведомленность

Признать, что ядерная энергия является источником низкоуглеродной электроэнергии, который может способствовать декарбонизации энергетической системы.



Приемлемость

Разработайте меры политики, которые бы внушали доверие и стимулировали бы более широкое применение ядерных технологий в декарбонизации электричества и энергоемких отраслях.



Разработать меры политики

Которые бы внушали доверие и стимулировали бы привлечение доступных по стоимости государственных и частных инвестиций в поддержку новых проектов в области ядерной энергетики.

1. ВВЕДЕНИЕ

Цель настоящей брошюры – представить обзор технологий атомной энергетики, включая как доступные в настоящее время, так и находящиеся в стадии разработки, которые, как ожидается, станут доступны на коммерческой основе в ближайшем будущем. В ней предоставлена информация о возможной роли инновационных конструкций реакторов, например, малых модульных реакторов (ММР), в качестве дополнения к реакторам большей мощности и в плане открытия новых рынков и сфер применения для атомной энергии, таких как централизованное теплоснабжение, высокотемпературное технологическое тепло и производство водорода. В брошюре также приведена информация по ряду тематических областей, включая стоимость производства электроэнергии на АЭС, социально-экономические последствия, аспекты здравоохранения и окружающей среды, ключевые инновации и стимулирующую политику.

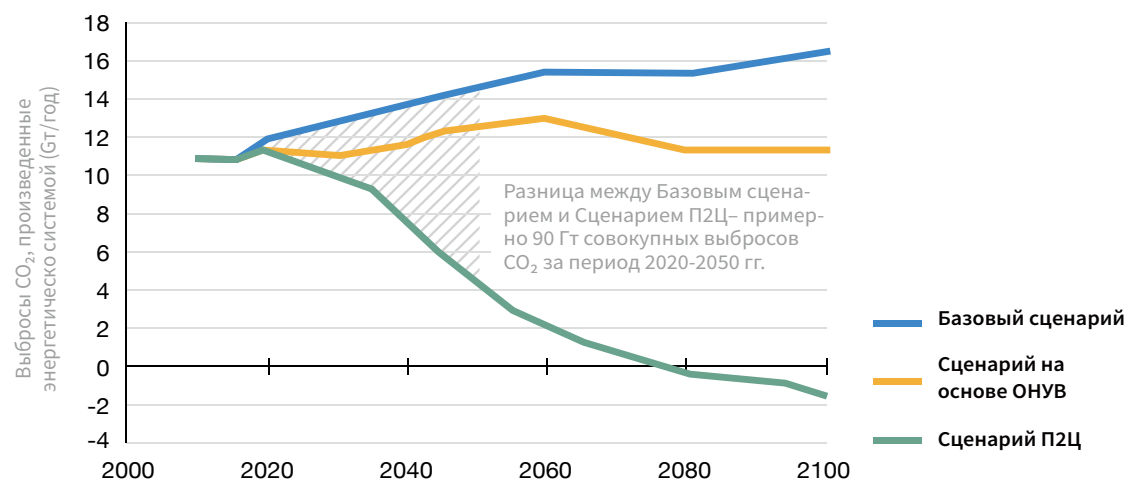
1.1 Чрезвычайная климатическая ситуация требует применения всех низкоуглеродных технологий

Энергия имеет решающее значение для выполнения Повестки в области устойчивого развития на период до 2030 года (Повестка на период до 2030 года). Она представляет собой «золотую нить», которая проходит через все цели в области устойчивого развития (ЦУР) и обеспечивает связь между ними. Достижение более высокого качества жизни во всех странах при одновременном обеспечении защиты природной среды потребует в ближайшие десятилетия как расширения доступа к энергии, так и полного перехода на экологически чистые энергетические технологии.

В последние годы необходимость принятия срочных мер по борьбе с изменением климата становится объектом все более пристального внимания международного сообщества. Организация Объединенных Наций признала, что сейчас мир находится в «чрезвычайной климатической ситуации». Учитывая, что производство и использование энергии являются источником около 75% глобальных антропогенных выбросов CO₂ и других парниковых газов, для успешного достижения этой цели потребуются радикальное преобразование мировой энергетической системы.

Результаты более раннего проекта ЕЭК ООН под названием «Укрепление потенциала государств-членов ЕЭК, необходимого для достижения целей устойчивого развития, относящихся к энергетике – Пути перехода к устойчивой энергетике» (проект «Пути перехода») показывают, что странам региона ЕЭК необходимо обеспечить предотвращение или улавливание выбросов в объеме не менее 90 Гт CO₂ к 2050 году, чтобы придерживаться курса, позволяющего достичь целевого показателя по удержанию прироста глобальной средней температуры ниже 2 °С (Рисунок 1). Необходимо внедрение всех доступных низкоуглеродных технологий, чтобы ликвидировать разрыв между принятыми обязательствами и требуемым уровнем. Ни одну из низкоуглеродных технологий нельзя снимать с повестки дня.

Рисунок 1 Выбросы CO₂ в регионе ЕЭК ООН в разбивке по сценариям политики



Синяя линия отражает уровень выбросов, ожидаемый в том случае, если страны ЕЭК продолжат проводить политику в области климата, основанную на инерционном подходе. Зеленая линия, или сценарий P2C, показывает, что должно произойти, чтобы выбросы в регионе оставались в пределах 90 Гт, а чистые выбросы стали отрицательными после 2080 года. Оранжевая линия показывает, в какой степени сокращение выбросов в настоящее время учитывается в определяемых на национальном уровне вкладах, заявленных странами ЕЭК в рамках Парижского соглашения.

Источник: Проект ЕЭК ООН «Пути перехода»

1.2 Атомная энергия как элемент решения проблемы изменения климата

Атомная энергия – это низкоуглеродный источник энергии, играющий важную роль в предотвращении выбросов CO₂. За последние 50 лет использование атомной энергии позволило сократить глобальные выбросы CO₂ примерно на 74 Гт, что эквивалентно суммарному объему глобальных выбросов, связанных с энергетикой, почти за два года, как показано на Рисунке II. Только гидроэнергетика сыграла более значительную роль в сокращении выбросов в прошлые периоды.

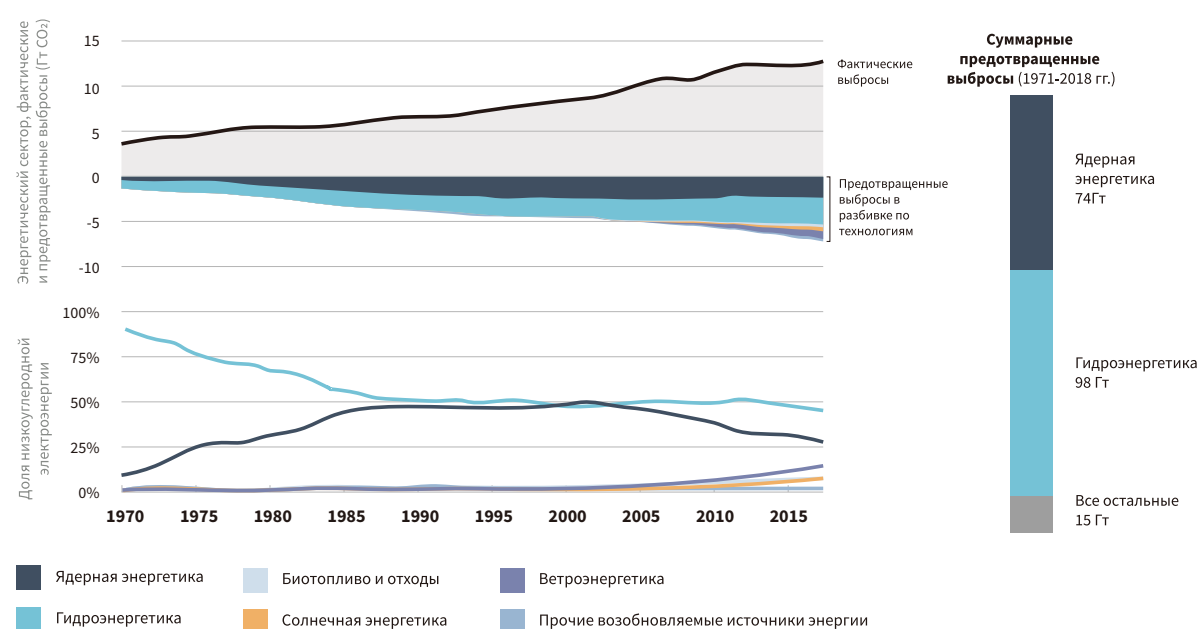
Сегодня на долю ядерной энергетики приходится 20% электроэнергии, производимой в регионе ЕЭК ООН, (Рисунок III) и 43% производства низкоуглеродной электроэнергии. Однако ископаемые виды топлива по-прежнему занимают доминирующее положение в энерго-снабжении и обеспечивают более 50% электроэнергии в регионе. Атомная энергия является крупнейшим источником низкоуглеродной генерации во многих странах ЕЭК, включая Бельгию, Болгарию, Хорватию, Чехию, Финляндию, Францию, Венгрию, Словакию, Словению, Испанию, Швецию, Украину и США. 20 государств-членов ЕЭК в настоящее время эксплуатируют атомные электростанции, а 15 стран строят либо активно планируют построить новые реакторы. Кроме того, 7 государств-членов ЕЭК впервые разрабатывают ядерно-энергетические программы. Ряд стран ЕЭК, как, например, Канада, Чехия, Финляндия, Франция, Венгрия, Польша, Румыния, Словакия, Словения, Россия, Украина, Великобритания и США, четко заявляет, что в будущем ядерная энергетика будет играть важную роль в сокращении их национальных выбросов. Вклад ядерной энергетики в странах ЕЭК представлен на Рисунке 3 и более подробно рассмотрен в Приложении I.

За пределами региона ЕЭК использование атомной энергии расширяется в Азии, на Ближнем Востоке, в Южной Америке и в Африке. Большой интерес к ядерной энергетике также проявляют развивающиеся страны, изучающие пути выполнения обязательства в области устойчивого развития.

В докладе МГЭИК о глобальном потеплении на 1,5 °С, опубликованном в конце 2018 года, представлено 89 сценариев смягчения воздействия на климат, которые предполагают, что к 2050 году производство электроэнергии на АЭС увеличится в среднем в 2,5 раза по сравнению с сегодняшним уровнем. Кроме того, согласно «промежуточному» иллюстративному сценарию, который предполагает, что социальные, экономические и технологические тенденции будут соответствовать текущим моделям, и не произойдет серьезных изменений в рационе питания и тенденциях мобильности, ожидается,

что к 2050 году спрос на ядерную генерацию вырастет в шесть раз и эта технология будет обеспечивать 25% мировой электроэнергии. Ядерная энергетика является хорошо зарекомендовавшим себя источником электроэнергии и критически важным инструментом, помогающим мировому сообществу успешно смягчать последствия изменения климата. Странам, которые сделали выбор в пользу развития ядерной энергетике, необходимо будет резко ускорить темпы внедрения реакторов в предстоящие годы, чтобы предотвратить повышение температуры более чем на 2°С.

Рисунок 2 Совокупные общемировые выбросы CO₂, предотвращенные за счет использования низкоуглеродных источников энергии



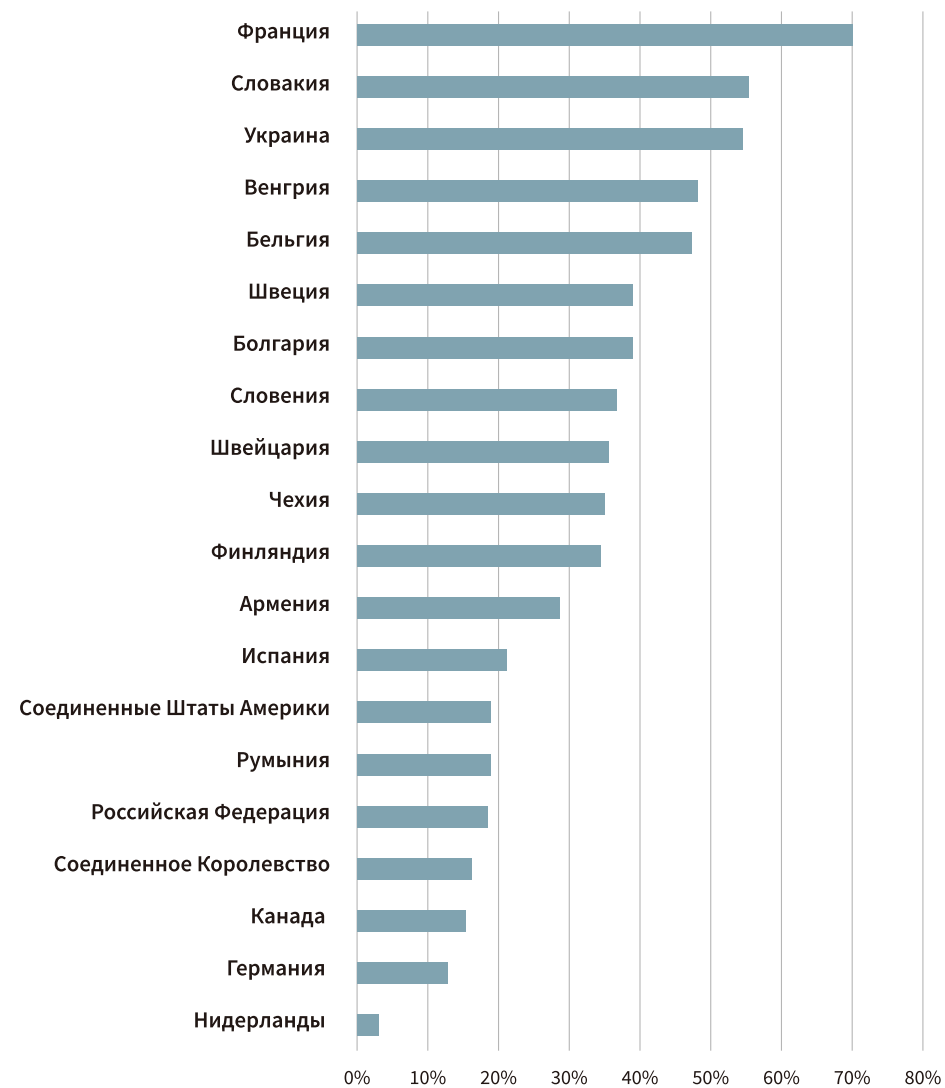
Источник: на основе материалов публикации МАГАТЭ Climate Change and Nuclear Power 2020 (Изменение климата и ядерная энергетика в 2020 году)

Рисунок 3 Производство электроэнергии по источникам в регионе ЕЭК ООН на 2019 год



Источник: Евростат, EU Electricity Generation Statistics 2020, и Информационная служба МЭА Electricity Information 2020

Рисунок 4 Доля ядерной энергетики в производстве электроэнергии в странах ЕЭК ООН



Источник: Евростат, EU Electricity Generation Statistics 2020, и Информационная служба МЭА Electricity Information 2020

2. ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Ядерная энергетика продолжает развиваться за счет новых разрабатываемых технологий, которые позволяют расширить сферу применения атомной энергии и углубить ее интеграцию с другими низкоуглеродными источниками энергии, такими как возобновляемые источники с переменным режимом генерации и ископаемые виды топлива в сочетании с технологиями улавливания и хранения углерода (УХУ), в декарбонизированном энергетическом балансе будущего.

Современные АЭС представляют собой тепловые электростанции, где нагретая вода преобразуется в пар, вращающий турбогенератор. Топливо атомной электростанции состоит из переработанного урана, плутония и (потенциально) тория, а не углеводородов, а тепло производится в результате ядерного деления внутри реактора, а не сжигания углеводородов. Процесс ядерного деления обладает невероятным энергетическим потенциалом и высвобождает примерно в миллион раз больше энергии, чем образуется при сгорании.

Существуют три основных класса реакторных технологий: реакторы большой мощности (гигаваттного класса), малые модульные реакторы (ММР) и микрореакторы. Реакторы большой мощности представляют собой хорошо отработанные технологии, которые в настоящее время доступны на рынке. ММР и микрореакторы находятся в стадии разработки, причем некоторые конструкции стремительно приближаются к стадии коммерческого внедрения. Сводная информация об уровнях технологической готовности различных реакторных технологий представлена в Приложении II.

Реакторы большой мощности

На протяжении большей части истории развития ядерных технологий размеры реакторов увеличивались, чтобы использовать преимущества экономии за счет масштаба. В настоящее время на рынке представлен ряд отработанных

типовых конструкций реакторных/ядерных установок мощностью от 750 до 1800 МВт. Все эти конструкции основаны на апробированных технологиях и предлагаются хорошо зарекомендовавшими себя поставщиками. Современные реакторы большой мощности могут иметь коэффициент использования установленной мощности свыше 90% и рассчитаны на срок эксплуатации не менее 60 лет. Большинство установок эксплуатируется в режиме базовой нагрузки, чтобы использовать преимущества низких затрат на топливо и эксплуатационных издержек, однако при необходимости они могут работать в маневренном режиме и могут быть адаптированы для целей централизованного теплоснабжения и производства водорода методом электролиза.

ММР

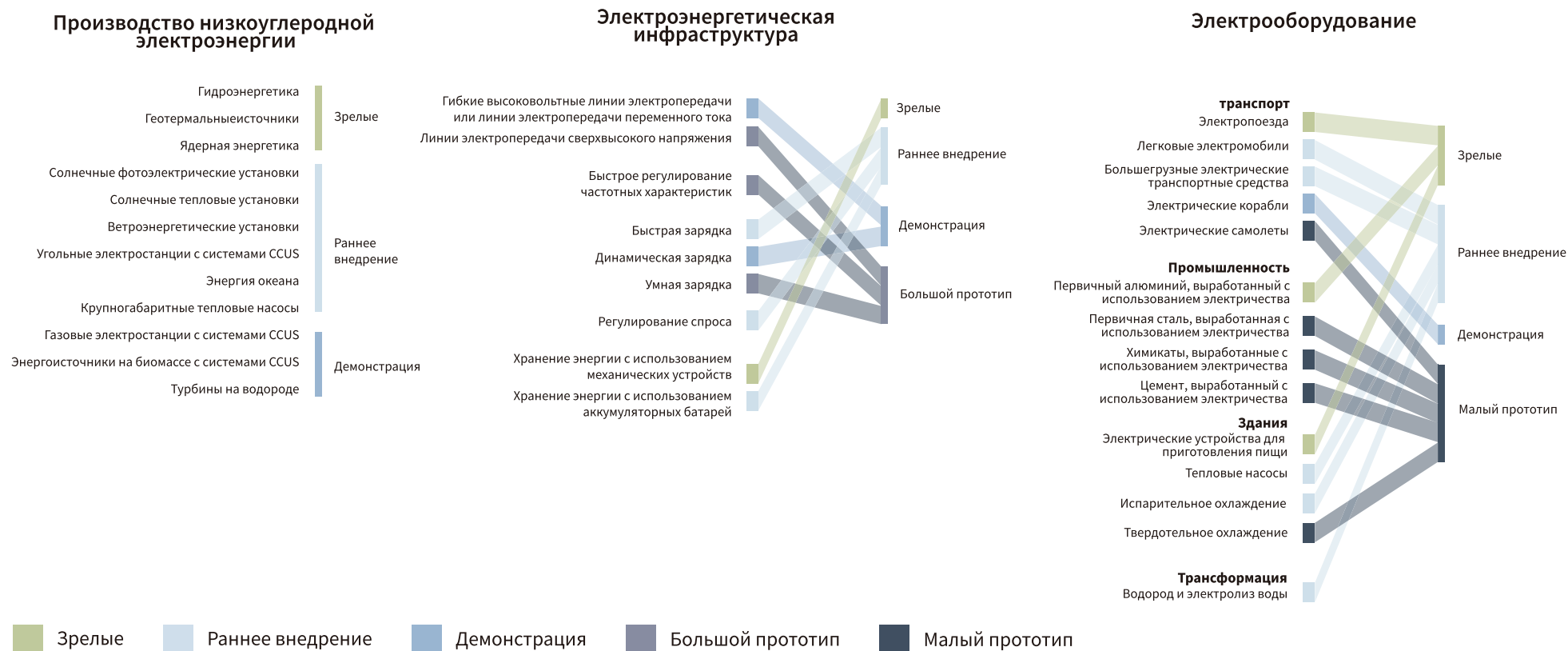
Современные ММР проектируются с электрической мощностью до 300 МВт. Нужно отметить, что самые первые ядерные энергетические реакторы имели малую мощность, и сегодня реакторы малой мощности эксплуатируются на подводных лодках и морских судах. Отличие современных ММР заключается в подходе к проектированию и производству, который использует преимущества, связанные с их небольшим размером, для интеграции инновационных систем безопасности, применения новых производственных технологий (увеличение объемов заводской сборки и стандартизация) и освоения новых бизнес-моделей. Многие ММР разрабатываются с перспективой использования на рынках, для которых большие реакторы были бы просто слишком велики ввиду недостаточного спроса на электроэнергию либо параметров сети. ММР могут обеспечить гибкое производство электроэнергии для широкого круга потребителей и сфер применения, включая модернизацию электростанций, работающих на ископаемом топливе, с заменой основного оборудования; когенерацию, небольшие электроэнергетические системы, а также удаленные или неэлектрифицированные районы.

В настоящее время разрабатывается более 70 конструкций ММР различного назначения. Проекты на базе ММР находятся на разном уровне технологической готовности. Некоторые технологии, например реакторы с водяным охлаждением, можно считать глубоко проработанными: одна такая установка уже построена и работает на Севере России, обеспечивая комбинированное производство тепла и электроэнергии для удаленных населенных пунктов (см. Рисунок 7), а еще один проект сертифицирован регулирующим органом США. В настоящее время в Китае ведется строительство демонстрационной высокотемпературной газоохлаждаемой реакторной установки HTR-PM, которая, как ожидается, будет пущена в конце 2021 года. Многие разработчики ММР ожидают, что эксплуатация их первых установок начнется в 2020-х годах, и что эти проектные решения будут готовы для более широкого внедрения в 2030-х годах. Конструкции, основанные на инновационных технологиях, в большинстве случаев достигнут этапа коммерциализации в более отдаленной перспективе.

Микрореакторы

Микрореакторы являются подгруппой ММР. Их тепловая мощность составляет до 20 МВт (электрическая – около 10 МВт), они проектируются для транспортировки в виде полностью смонтированной тепловой или электроэнергетической установки к потенциальному месту размещения и обратно. Ранние разработки адаптируются для внесетевого применения. Некоторые проектные решения могут стать доступными в странах-поставщиках в течение пяти лет, поскольку они могут быть коммерчески жизнеспособными без проведения каких-либо реформ на целевых нишевых рынках (где они в основном конкурируют с дизельными генераторами), особенно если проектировщики и регулирующие органы будут придерживаться упрощенных подходов к лицензированию.

Рисунок 5 Уровень технологической готовности низкоуглеродных технологий



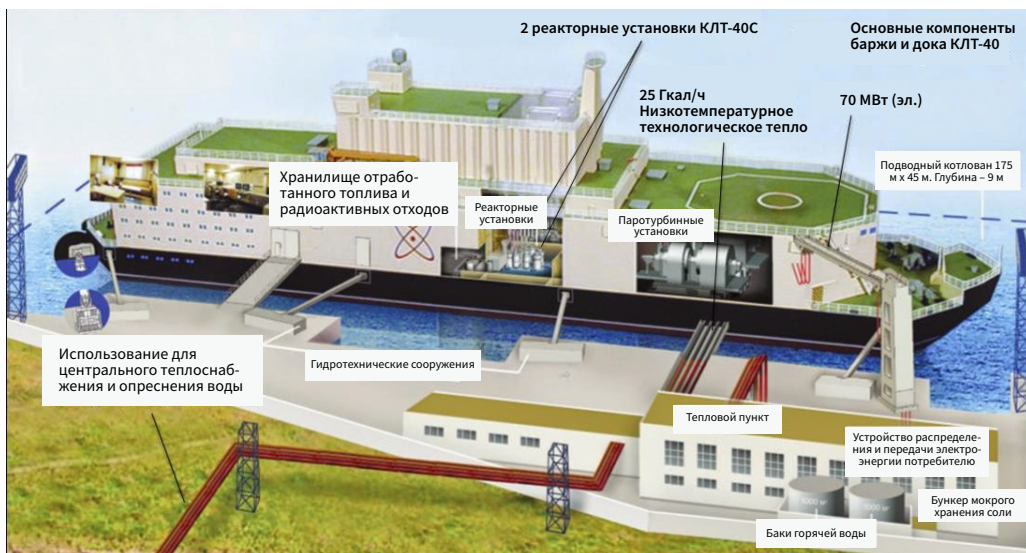
Источник: адаптировано из Руководства по технологиям чистой энергии IEA ETP

Рисунок 6 Пример реактора большей мощности: двухблочная АЭС «Диабло-Каньон»



Источник: Трейси Адамс, опубликовано по лицензии Creative Commons

Рисунок 7 Пример ММР. Схема российской плавучей атомной электростанции



Источник: Росатом

Рисунок 8 Пример микрореактора



Источник: Ultrasafe Nuclear Corporation

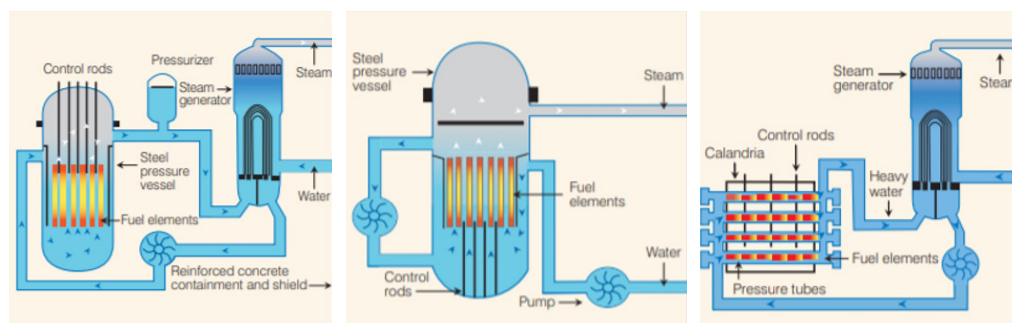
2.1 Современные реакторные технологии

В настоящее время существуют три основные технологии энергетических реакторов: **реакторы с водой под давлением (PWR)**, **реакторы с кипящей водой (BWR)** и **реакторы с тяжелой водой под давлением (PHWR)**, как показано на Рисунке 9. PWR является самой распространенной в мире технологией ядерных энергетических реакторов. Она предусматривает два внутренних контура охлаждения. Тепло извлекается из ядерного топлива в активной зоне реактора. Оттуда вода под давлением поступает в парогенератор, где тепло передается воде во втором контуре. Во втором контуре вода доводится до кипения и расширяется, а давление пара используется для вращения турбин, которые вырабатывают электроэнергию. После этого пар снова преобразуется в воду в конденсаторе, а вода перекачивается обратно в парогенератор. BWR – вторая по степени распространенности технология ядерных энергетических реакторов. Она предусматривает один внутренний контур охлаждения, в котором объединены функции, обеспечиваемые первым и вторым контурами в PWR. Вода нагревается топливом и закипает в верхней части корпуса реактора. В реакторе типа PHWR тепловыделяющие сборки расположены в напорных трубках, каждая из которых имеет независимое охлаждение. Напорные трубки расположены внутри большого резервуара, называемого «каландром», в котором содержится тяжелая вода.

2.2 Усовершенствованные конструкции реакторов

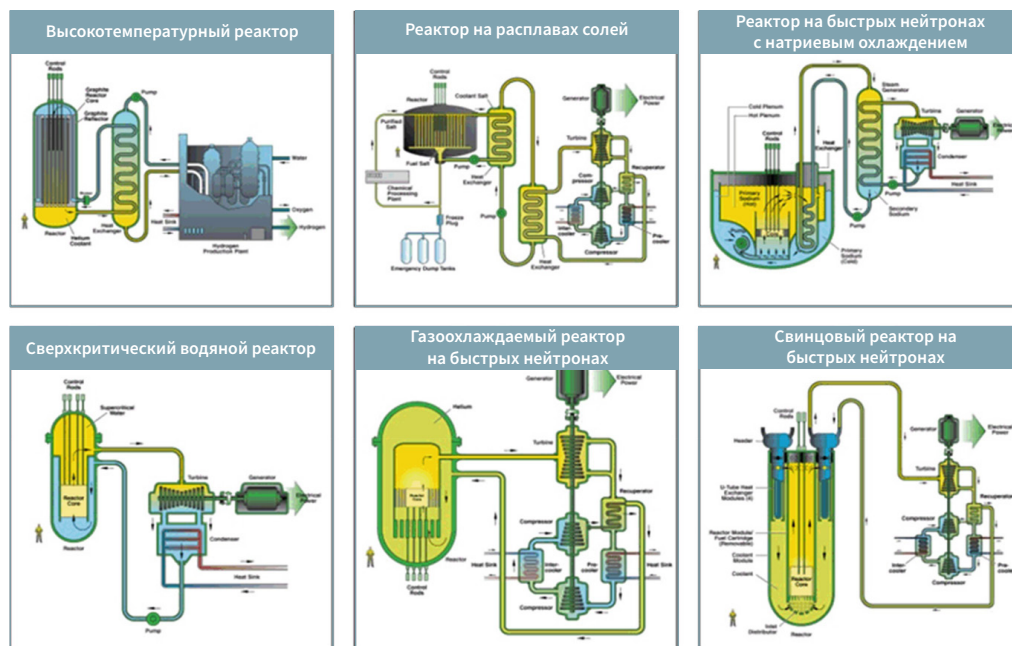
В настоящее время технологии реакторов с водяным охлаждением занимают доминирующее положение на мировом рынке в результате раннего выхода на уровень технической готовности и усилий по коммерциализации, которые начались в 1950-х годах. Однако существует множество возможных конструктивных вариантов реакторов, основанных на использовании различных видов ядерного топлива, конструкционных материалов и теплоносителей. Некоторые из них обладают явными преимуществами с точки зрения устойчивости и эксплуатационных характеристик. В рамках международной инициативы было выделено шесть так называемых ядерных энергетических систем Поколения IV в качестве приоритетных для дальнейших исследований: газоохлаждаемый реактор на быстрых нейтронах (GFR), реактор на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем (LFR), реактор на расплавах солей (MSR), сверхкритический водяной реактор (SCWR), реактор на расплавах солей (MSR), сверхкритический водяной реактор (SCWR), реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (SFR) и сверхвысокотемпературный реактор (VHTR), как показано на Рисунке 10. Несмотря на то, что усовершенствованные конструкции реакторов исследуются на протяжении десятилетий и было построено несколько прототипов, НИОКР традиционно проводились на базе национальных лабораторий. Однако за последние десять лет сформировалась передовая ядерная индустрия, особенно в Европе и Северной Америке, которая стремится к установлению крайне сжатых временных рамок для коммерциализации. Многие частные компании, в том числе стартапы, вступают в партнерские отношения с лабораториями и привлекают венчурный капитал для финансирования их проектов, чтобы вывести эти инновационные разработки из лабораторий на рынок.

Рисунок 9 Вид в разрезе существующих на сегодняшний день технологий ядерных реакторов: PWR, BWR и PHWR



Источник: Всемирная ядерная ассоциация

Рисунок 10 Реакторные системы Поколения IV



Источник: Международный форум «Поколение IV»

2.3 Инновации в топливном цикле

Уникальной особенностью ядерной энергии является возможность переработки использованного топлива для извлечения ценных материалов и обеспечения топливом действующих и будущих атомных электростанций. В регионе ЕЭК производственные мощности для переработки отработавшего ядерного топлива имеются во Франции и России, которые предлагают услуги по переработке на международном уровне. Великобритания обладает потенциалом в области переработки, поскольку в этой стране подобные объекты эксплуатировались несколько десятилетий. В настоящее время возможно лишь частичное повторное использование топлива в промышленных масштабах, что позволяет извлечь из первоначально добытого урана примерно на 25% больше энергии.

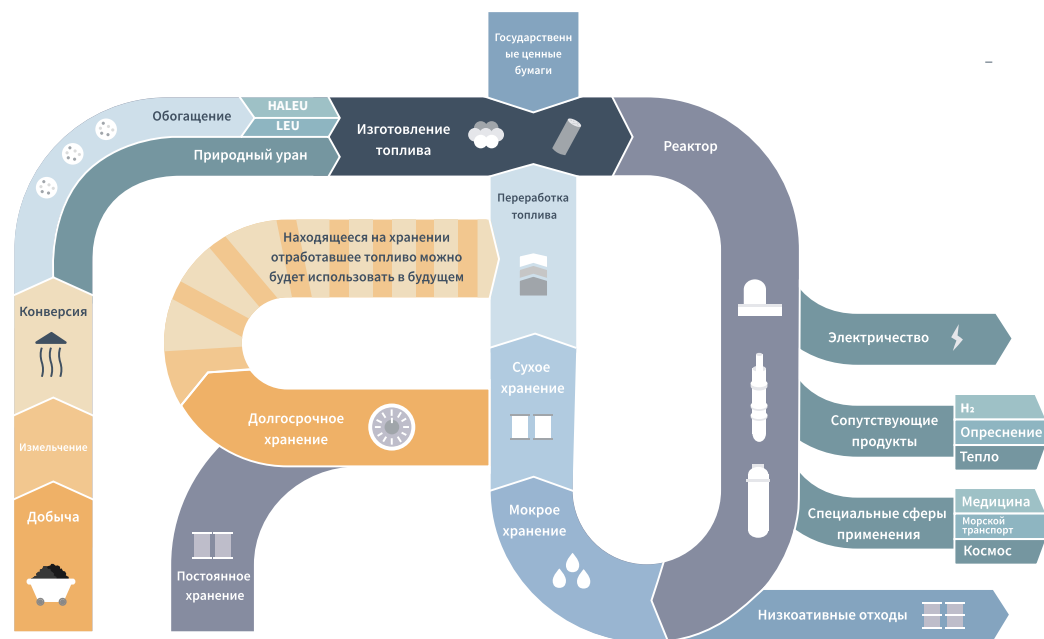
Реакторы на быстрых нейтронах могут увеличить количество энергии, получаемой из добытого на рудниках урана, в пределах до 6000%, повысив коэффициент кратности запасов до уровня свыше 4000 лет. Коммерциализация и потенциально широкая доступность реакторов на быстрых нейтронах существенно отразятся как на потребностях в добыче урана, так и на обращении с радиоактивными отходами. В настоящее время реакторы на быстрых нейтронах разрабатываются в нескольких странах региона ЕЭК. В России имеются два действующих реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, а также планируется разработать реактор с натриевым теплоносителем мощностью 1200 МВт (БН-1200) наряду с проектом реактора со свинцовым теплоносителем мощностью 300 МВт (БРЕСТ-300). Возобновляется разработка реакторов на быстрых нейтронах в США, где недавно было объявлено о государственном финансировании быстрого реактора Sodium с натриевым теплоносителем, который будет разработан компаниями TerraPower и GE Hitachi. Другие страны в прошлом также строили и эксплуатировали реакторы на быстрых нейтронах.

Ядерные энергетические реакторы могут использоваться для производства полезных радиоизотопов для гражданских прикладных целей. Это можно осуществить путем переработки отработавшего топлива для извлечения полезных материалов, например америция-241, который

используется в качестве радиоизотопного источника энергии для космических полетов. Кроме того, полезные радиоизотопы можно получить путем облучения материалов, помещенных в активную зону реактора. Для этой цели особенно хорошо подходят реакторы типа PHWR. Так, реакторы CANDU в Канаде используются для производства кобальта-60 и молибдена-99 для медицинских целей.

Много инновационных решений можно найти в рамках расширенного ядерного топливного цикла. Например, при фабрикации ядерного топлива, поскольку новые конструкции тепловыделяющих сборок можно коммерциализировать быстрее, чем новые конструкции реакторов. Последние достижения в области проектирования ядерного топлива обеспечивают повышенную безопасность и улучшенные экономические характеристики реакторов. Усовершенствованные конструкции реакторов также связаны с новыми технологиями в сфере ЯТЦ. Для многих усовершенствованных реакторов требуются более высокие уровни обогащения (концентрация изотопа урана-235), чем для традиционным реакторов. Топливо HALEU может быть обогащено до 20% по сравнению с более распространенной степенью обогащения 3-5%.

Рисунок 11 Усовершенствованный ядерный топливный цикл



Источник: Альянс ядерных инноваций

Усовершенствованный ядерный топливный цикл используется для производства полезных радиоизотопов, а рециклирование позволяет создать потенциально большой топливный ресурс в будущем.

3. СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

На атомных электростанциях осуществляется низкоуглеродное производство электроэнергии и тепла, что открывает возможности для декарбонизации секторов (помимо электрогенерации), в которых сложно достичь сокращения углеродных выбросов. Потенциальные неэнергетические сферы применения атомной энергии включают в себя производство водорода, технологическое тепло для промышленных нужд, теплоснабжение, опреснение морской воды, производство синтетического топлива и химических веществ, охлаждение и холодильную технику, и когенерацию. Действующие реакторы продемонстрировали возможность использования для производства водорода, опреснения и централизованного теплоснабжения, однако они предназначены главным образом для масштабного обеспечения недорогой электроэнергией. Ожидается, что будущие ММР и реакторы усовершенствованной конструкции обеспечат необходимые эксплуатационные характеристики (например, высокие температуры) и гибкость (например, размещение на одной площадке с промышленными объектами), которые позволят по-настоящему открыть эти рынки, как показано на Рисунке XI..

3.1 Производство водорода

Водород может использоваться в качестве экологически чистого и универсального энергоносителя, способствующего декарбонизации секторов, в которых сложно достичь сокращения углеродных выбросов, таких как промышленность и транспорт, а также для обеспечения долгосрочного сезонного хранения энергии. Ядерная энергия может быть использована для производства водорода посредством нескольких низкоуглеродных процессов:

- Низкотемпературный электролиз воды
- Высокотемпературный паровой электролиз с использованием тепловой и электрической энергии, вырабатываемой ядерными реакторами (при 600 °C)

- Высокотемпературное термохимическое производство с использованием ядерного тепла (800 - 1000 °C)

Современные технологии ядерных реакторов и действующие АЭС могут быть использованы для низкотемпературного электролиза и обладают несколькими потенциальными преимуществами, включая высокие коэффициенты использования электролизера, низкие эксплуатационные затраты и возможность использования водорода для производственных операций на станции. В Японии эксплуатируется высокотемпературный испытательный реактор (HTTR) с максимальной выходной температурой 950 °C, который используется для исследования возможностей когенерации водорода. В 2019 году на нем был выработан водород с использованием йодно-серных термохимических процессов в течение 150 часов непрерывной работы. США, Великобритания и Франция планируют создать демонстрационные ядерные электролизные установки по производству водорода.

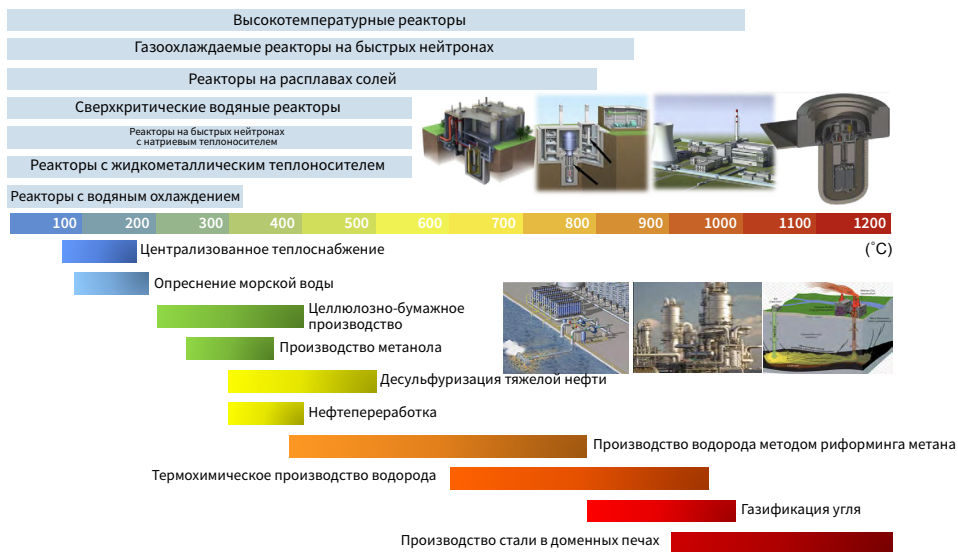
3.2 Энергоемкие отрасли

Технологическое тепло, производимое ядерными реакторами, может оказаться действенным средством для декарбонизации энергоемких отраслей, таких как химическая промышленность, целлюлозно-бумажное производство и производство стали. Высокотемпературная низкоуглеродная технология имеет важное значение для декарбонизации технологического теплоснабжения. Это связано с тем, что электрификация тепла в большинстве случаев имеет низкий тепловой КПД. Если тепловая электростанция используется для производства электроэнергии, то от половины до двух третей производимой энергии теряется при преобразовании, дополнительные потери происходят на этапах передачи и распределении. Даже если цены на ветровую и солнечную энергию будут сопоставимы с ценами на ископаемые источники электроэнергии, они и в этом случае должны быть вдвое дешевле, чтобы конкурировать с тепловыми источниками.

3.3 Централизованное теплоснабжение

Избыточное тепло ядерных реакторов также может быть ценным ресурсом. В России, нескольких странах Восточной Европы, Швейцарии и Швеции существуют системы централизованного теплоснабжения, работающие на ядерном топливе. Совсем недавно, в 2020 году, Китай приступил к испытанию своего первого коммерческого проекта ядерного теплоснабжения. Он обеспечивает теплом 700 000 квадратных метров жилья. Некоторые страны внедряют технологии ММР, которые будут использоваться в первую очередь для централизованного теплоснабжения. Китайские исследователи также разработали несколько собственных конструкций реакторов для теплоснабжения, финские исследователи проводят оценку различных концепций развития своих тепловых сетей.

Рисунок 12 Потенциальное использование тепла, вырабатываемого ядерными реакторами, для промышленных нужд



Источник: МАГАТЭ, 2020 г., Advances in Small Modular Reactor Technology Developments (Достижения в разработке технологий малых модульных реакторов)

Рисунок 13 Визуализация микрореактора. Реактор «Аврора»



Микрореакторы применимы для внесетевого использования и удаленных населенных пунктов, как источники тепло-, электро-снабжения и др.

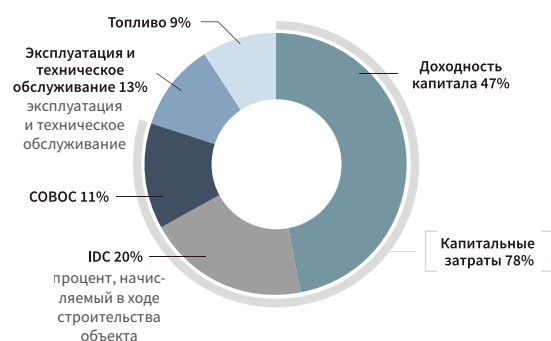
Источник: Oklo

4. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И СТОИМОСТЬ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ

Существует ряд методов для расчета и сравнения стоимости энергетических проектов, однако наиболее широко используется нормированная стоимость энергии (НСЭ). Самый существенный фактор, влияющий на НСЭ ядерной энергетики, – это капитальные затраты на строительство атомной электростанции, как показано на Рисунке 14. Затраты на топливо, эксплуатацию и техническое обслуживание и ремонт обычно ниже, чем у электростанций на ископаемом топливе, что в действительности является ключевым экономическим преимуществом ядерной энергетики. Атомные станции характеризуются высокими первоначальными капитальными затратами (требуемый объем инвестиций составляет от 5 до 10 миллиардов долларов США на энергоблок) однако АЭС обеспечивают стабильное производство недорогой электроэнергии на протяжении многих десятилетий. В отличие от других энергоисточников эксплуатирующие организации ядерных установок должны аккумулировать средства для выполнения обязательств по обращению с отходами и выводу из эксплуатации в течение всего срока службы атомной электростанции. Обычно эти затраты добавляются к стоимости ядерного топливного цикла.

Капитальные затраты в ядерной энергетике можно разделить на затраты на строительство и финансирование. Затраты на строительство зависят от локальных факторов, таких как доступность ресурсов и затраты на оплату труда. Также имеет значение, является ли объект первой установкой данного типа или частью программы по строительству парка энергоблоков, предусматриваются ли какие-либо конструктивные изменения по сравнению с референтным проектом АЭС. Отрасль может оказать влияние на многие из этих факторов и обладает наилучшими возможностями для снижения технических рисков, связанных с проектом. Затраты на финансирование (зачастую представленные в виде ставок дисконтирования или стоимости капитала) зависят от процентных ставок, распределения рисков во время строительства, наличия каких-либо гарантий, темпов роста экономики, базовой структуры рынка, наличия какого-либо соглашения о закупке электроэнергии и других факторов. Эти факторы находятся в основном в сфере влияния государства. Высокая стоимость финансирования ведёт к значительному увеличению НСЭ ядерной генерации.

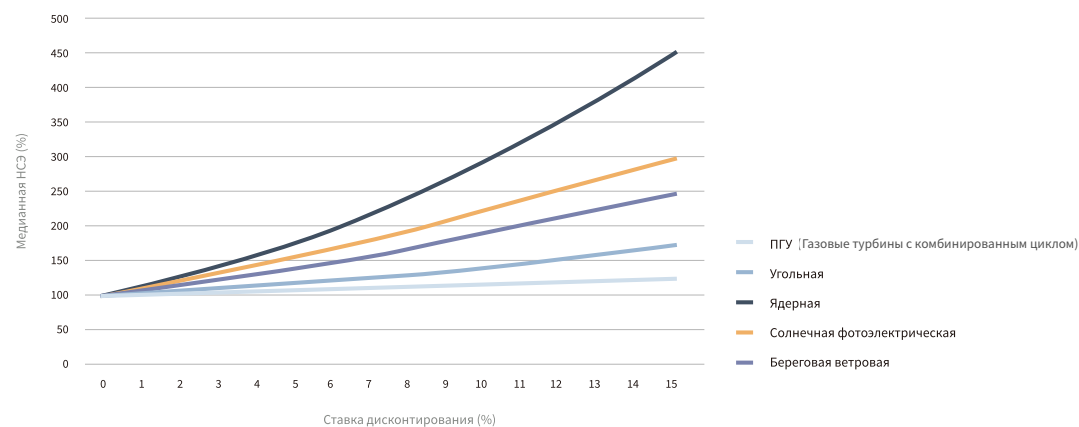
Рисунок 14 Разбивка НСЭ ядерной энергии



Расчеты основаны на стоимости одноmomentного возведения объекта строительства (COBOS) в размере 4500 долларов США за киловатт электрической мощности, коэффициенте нагрузки 85%, сроке эксплуатации 60 лет и сроке строительства 7 лет при реальной ставке дисконтирования 7%.

Источник: АЯЭ ОЭСР, 2020 г., *Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders* (Подходы к снижению затрат на сооружение объектов ядерной энергетики. Практическое руководство для стейкхолдеров).

Рисунок 15 Чувствительность НСЭ к стоимости финансирования для ряда технологий



Источник: Всемирная ядерная ассоциация

Таким образом, доступ к недорогому финансированию имеет ключевое значение для жизнеспособности проекта (Рисунок 15).

Во многих регионах мира атомная энергия является одним из наиболее конкурентоспособных с точки зрения затрат вариантов производства электроэнергии. Как и в случае с другими технологиями генерации, стоимость производства на АЭС зависит от ряда факторов, включая предполагаемый срок службы, коэффициент использования установленной мощности, капитальные затраты, затраты на топливо, эксплуатационные издержки и т. д.

НСЭ атомных проектов значительно варьируется в зависимости от региона, конкурентоспособность АЭС с точки зрения затрат зависит от национальных и местных условий. Международное энергетическое агентство (МЭА) и Агентство по ядерной энергии (АЯЭ) ОЭСР спрогнозировали затраты на производство электроэнергии для ряда технологий, исходя из предположения, что эти установки будут введены в эксплуатацию в 2025 году, как показано на Рисунке 16.

4.1 Полная стоимость энергии

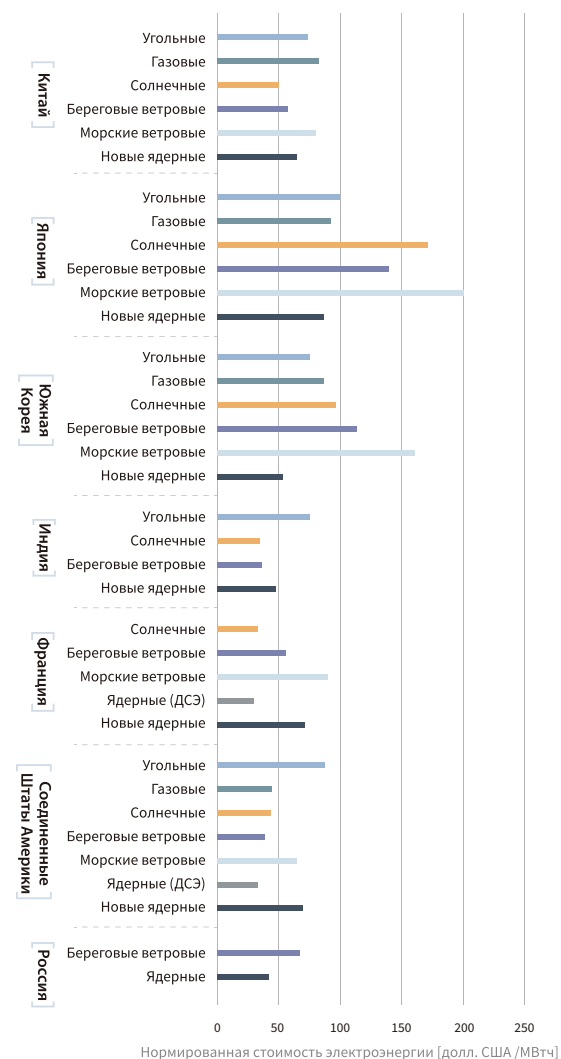
НСЭ позволяет сравнить все затраты на уровне установки, но не учитывает величину издержек или косвенные затраты для всей системы и не подходит для сравнения технологий с разными режимами эксплуатации (например, переменные возобновляемые источники энергии и технологии, обеспечивающие возможность диспетчерского управления)). Несмотря на то, что стоимость переменных возобновляемых источников энергии (ПВИЭ) быстро снижается, эти технологии также сопряжены с дополнительными системными издержками, которые начинают значительно увеличиваться при более высоком уровне проникновения. Эти дополнительные системные издержки увеличивают общую стоимость электроэнергии, как показано на Рисунке 17. Добавление к энергетической системе объектов генерации с гарантированной мощностью и низким уровнем выбросов углерода, обеспечивающих возможность диспетчерского управления, таких как атомные электростанции и электростанции на ископаемом топливе с системами

УХУ, снижает общие затраты на декарбонизацию, одновременно увеличивая шансы на успешный «энергетический переход». Для многих стран ясно, что атомная энергия станет частью оптимизированного наиболее быстрого варианта декарбонизации с наименьшими затратами и минимальным уровнем риска.

4.2 Снижение стоимости ядерной генерации

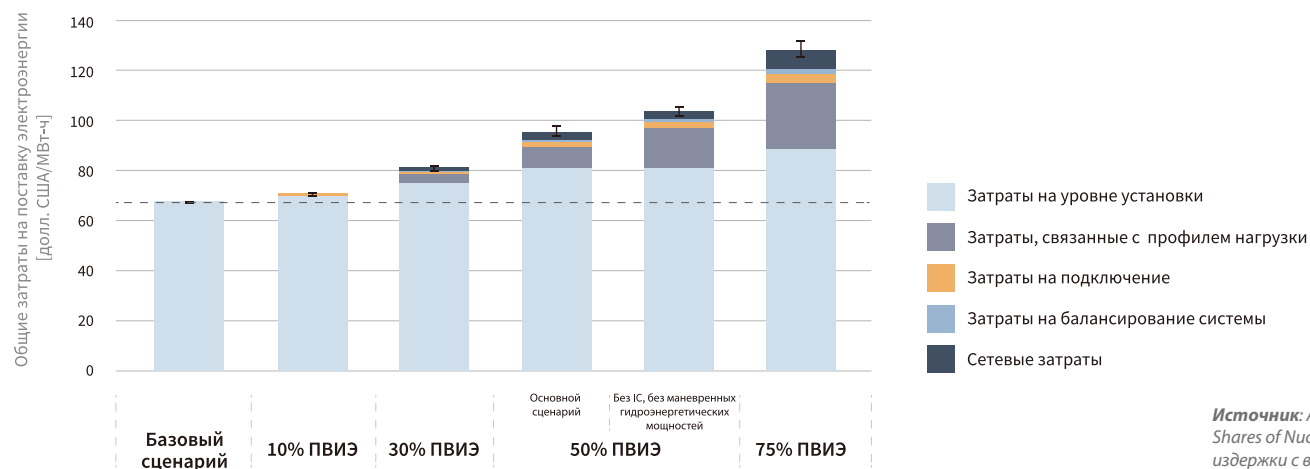
В некоторых странах ЕЭК – главным образом в Западной Европе и США – отмечались документально подтвержденные проблемы со строительством первых в своем роде (FOAK) и первых в поколении АЭС, однако отрасль укрепляет свой потенциал и в настоящее время находится в процессе перехода на другой этап. Страны, которые осуществляли последовательные программы строительства объектов ядерной энергетики, такие как Китай, Япония, Южная Корея и Российская Федерация, сумели снизить затраты на строительство новых ядерных объектов. (Показатели строительства объектов ядерной энергетики в рамках расширяющейся китайской программы показаны в Приложении IV.) Следовательно, и в других странах существует значительный потенциал для сокращения затрат на строительство АЭС в ближайшем будущем, как показано на Рисунке 18. Используя уроки, полученные в ходе недавних строительных проектов в разных странах мира, уделяя приоритетное внимание степени проработки проекта и стабильности нормативно-правовой базы, реализуя стандартизированную программу строительства реакторов и следуя другим рекомендациям по передовой практике, страны могут рассчитывать на значительное снижение стоимости проектов строительства АЭС в течение следующего десятилетия. В сочетании с доступом к дешевому финансированию это позволит значительно снизить НСЭ ядерной энергии, что, в свою очередь, будет способствовать сокращению общих затрат на декарбонизацию и «энергетический переход».

Рисунок 16 Нормированная стоимость электроэнергии в разных странах



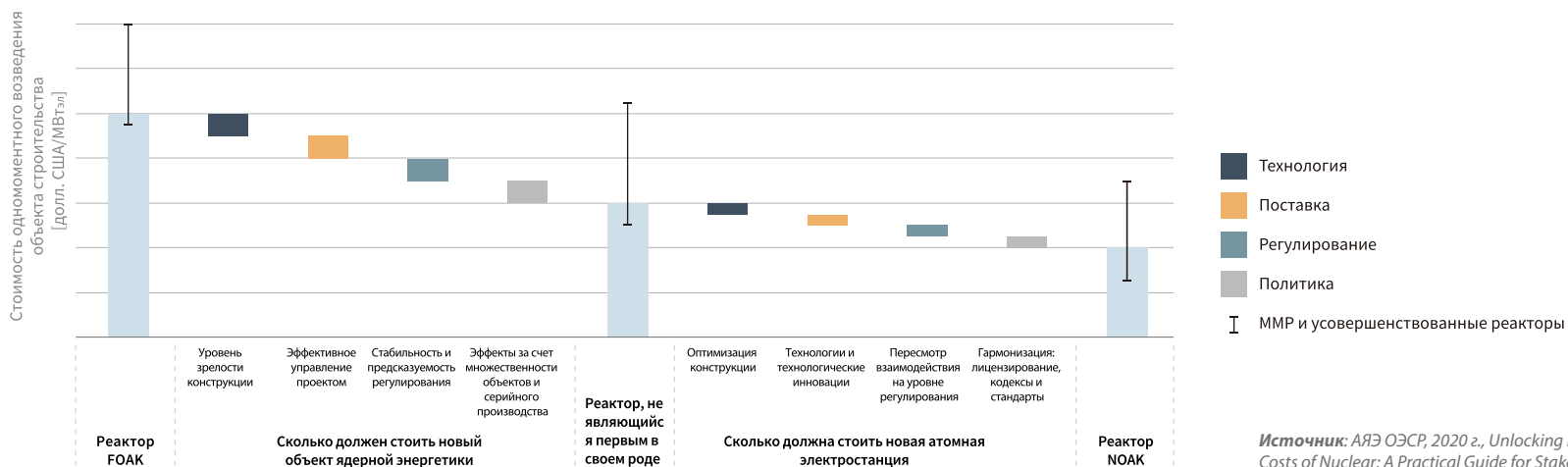
Источник: МЭА и АЯЭ ОЭСР, 2020 г., Projected Costs of Generating Electricity 2020 edition (Прогнозные затраты на производство электроэнергии, издание 2020 г.) Electricity 2020 edition

Рисунок 17 Показатели роста системных издержек при высокой доле ПВИЭ



Источник: АЯЭ ОЭСР, 2019 г., *The Costs of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables* (Затраты на декарбонизацию: системные издержки с высокой долей ядерных и возобновляемых источников энергии)

Рисунок 18 Факторы, способствующие снижению издержек и рисков в ядерной энергетике



Источник: АЯЭ ОЭСР, 2020 г., *Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders* (Подходы к снижению затрат на сооружение объектов ядерной энергетике. Практическое руководство для стейкхолдеров).

5. ДОЛГОСРОЧНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК И РАБОТА В МАНЕВРЕННОМ РЕЖИМЕ

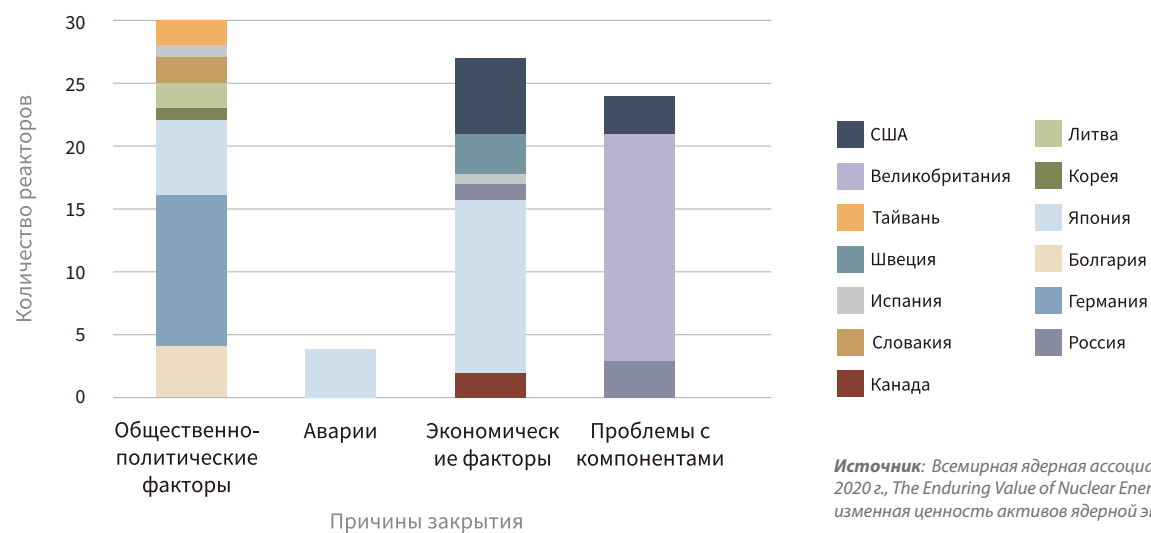
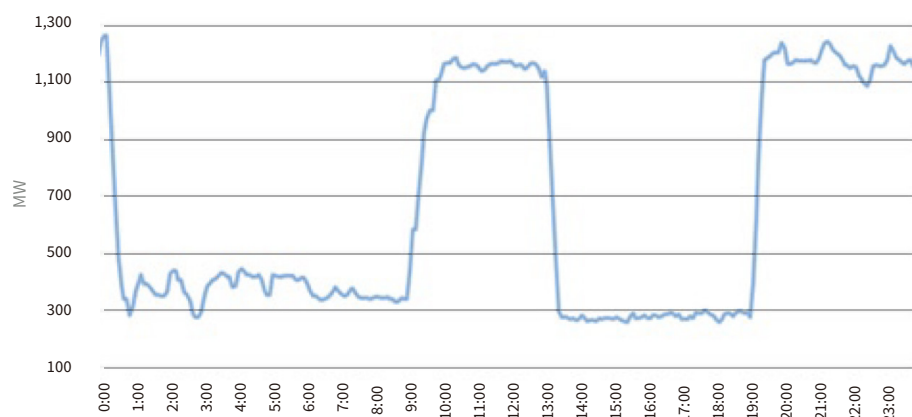
Первоначально лицензии на эксплуатацию атомных станций выдавались на срок от 30 до 40 лет, но в техническом плане предельного срока эксплуатации АЭС не установлено. Эксплуатация ядерных установок после истечения срока действия их первоначальной лицензии, известная как долгосрочная эксплуатация (ДСЭ), теперь стала обычным явлением во многих странах, поскольку программы управления производственным циклом реакторной установки позволяют определять все факторы, необходимые для поддержания высокого уровня безопасности и оптимизации эксплуатационных показателей установки в долгосрочной перспективе. На принятие странами решений влияют многие факторы, в том числе национальные интересы, финансовые факторы, ядерная безопасность, климатические соображения, касающиеся здоровья человека, окружающей среды и экологичности. Лицензии большинства энергоблоков АЭС в США (как с реакторами PWR, так и BWR) уже продлены на 20 лет, что позволит осуществлять эксплуатацию в общей сложности 60 лет. Многие компании уже подали заявки на повторное продление, что обеспечит эксплуатацию энергоблоков в общей сложности в течение 80 лет, причем заявки по ряду блоков уже одобрены. Проводимая в Канаде модернизация реакторов типа PHWR в середине срока эксплуатации означает, что они будут эксплуатироваться не менее 60 лет. По данным МЭА, долгосрочная эксплуатация действующих объектов ядерной энергетики будет одним из наиболее экономичных вариантов выработки электроэнергии, доступных для многих стран ЕЭК.

гие АЭС были остановлены либо в результате политических решений, связанных с инцидентами или авариями, либо в силу экономических условий, ухудшившихся вследствие базовой неэффективности рыночного механизма (Рисунок 19). Закрытие реакторов имело место в Европе – Германия инициировала поэтапный отказ от атомной энергетики в 2011 году, а некоторые страны Восточной

Европы вывели свои реакторы из эксплуатации в качестве условия вступления в Европейский Союз. В большинстве случаев эти установки (по крайней мере, частично) были замещены станциями на ископаемом топливе, что стало шагом назад в контексте усилий по смягчению воздействия на климат. В последние годы прекращение эксплуатации АЭС по экономическим причинам имело место в США, где добыча сланцевого газа привела к резкому снижению оптовых цен на газ и, как следствие, к снижению цен на электроэнергию. Свою роль также сыграли базовая структура рынков и аукционы по отбору мощности. В некоторых европейских странах недавнее закрытие реакторов частично связано с определенными государственными налогами на ядерные установки. Как МАГАТЭ, так и МЭА рассматривают предотвращение досрочного закрытия других АЭС в качестве первоочередной неотложной задачи в решении проблемы изменения климата.

На сегодняшний день большинство АЭС во всем мире работают в базовом режиме несения нагрузки. Низкие переменные издержки ядерной энергетики в сочетании с рыночными структурами, которые платят только за каждую единицу произведенной электроэнергии, побуждают эксплуатирующие компании увеличивать объемы производства до максимума. На наиболее эффективных АЭС среднегодовой коэффициент использования установленной мощности регулярно превышает 90%, что является самым высоким показателем среди всех форм электрогенерации. Однако некоторые ядерные установки могут изменять мощность и при необходимости работать в маневренном режиме, большинство других можно модифицировать для работы в таком режиме. Существенных технических факторов, которые препятствовали бы эксплуатации АЭС в маневренном режиме, не имеется, но энергетические рынки должны предоставлять компенсацию установкам, обеспечивающим маневренность, на

конкурентной и технологически нейтральной основе. Потенциал ядерных установок в плане работы в маневренном режиме показан на Рисунке 20. Поскольку количество ПВИЭ продолжает увеличиваться и устанавливаются ограничения на объекты генерации, являющиеся источниками CO₂, существующие атомные станции можно рассматривать как ценный источник маневренности системы наряду с аккумулярованием энергии, управлением спросом и сокращением генерации ПВИЭ.

Рисунок 19 Глобальный вывод реакторов из эксплуатации с 2000 по 2020 год в разбивке по основным причинам**Рисунок 20** Пример изменения мощности в течение 1 дня, блок No2 АЭС «Гольфеш»

Источник: Будущее «чистой» энергии в ядерных инновациях, сентябрь 2020 г., Гибкая ядерная энергия для чистых энергетических систем

6. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА И ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Все формы производства энергии сопряжены с рисками и оказывают воздействие на окружающую среду и здоровье человека, поэтому эта производственная деятельность подлежит мониторингу и регулированию, чтобы гарантировать управление воздействиями со снижением их до приемлемых уровней. Атомная энергетика связана с только ей присущими рисками, такими как радиологические аварии и обращение с радиоактивными отходами, однако комплексные оценки жизненного цикла показывают, что при оценке по широкому спектру экологических показателей воздействие атомной энергетики является одним из наименьших по степени влияния среди всех источников энергии. Виды воздействия в целом аналогичны возобновляемым источникам энергии, как показано на Рисунке 21, и на много порядков ниже, чем у ископаемых видов топлива. Исследование Объединенного исследовательского центра Евросоюза по вопросу возможности включения ядерной энергетики в Таксономию «зеленого» финансирования ЕС «не выявило никаких научных доказательств того, что ядерная энергетика наносит больший вред здоровью человека или окружающей среде, чем другие технологии производства электроэнергии».

Качество воздуха – одна из важнейших проблем, стоящих перед мировым сообществом в области здравоохранения и охраны окружающей среды. Всемирная организация здравоохранения сообщает, что загрязнение атмосферного воздуха каждый год приводит к смерти 4,2 миллиона человек во всем мире, причем большая часть этого загрязнения связана с производством и использованием энергии. Бытовое загрязнение в виде воздействия дыма во время приготовления пищи является причиной смерти 3,8 миллиона человек в год. АЭС не способствуют загрязнению воздуха, и считается, что использование этой технологии на протяжении многих лет помогло спасти более миллиона жизней. АЭС также однозначно помогают сократить выбросы CO₂ и других парниковых газов. МГЭИК признает, что выбросы парниковых газов от производства на атомных станциях на протяжении всего жизненного цикла АЭС находятся на одном уровне с возобновляемыми источниками энергии.

В случае АЭС на одной компактной площадке производятся несколько миллиардов киловатт-часов электроэнергии. Что касается конструкционных материалов, то ядерный энергоблок состоит в основном из стали и бетона, но, по данным Министерства энергетики США, их требуется примерно в десять раз меньше, чем для таких возобновляемых источников, как ветро- и гидроэнергетика. Для сравнения: в отчете Всемирного банка отмечается, что «производство солнечных панелей, ветровых турбин и аккумуляторных батарей будет определять спрос и предложение на критически важные минералы в обозримом будущем». Атомным станциям также необходима вода для охлаждения, процесс нужно контролировать, чтобы предотвратить воздействие на водные экосистемы. Это обуславливает необходимость тщательного выбора места размещения объекта и проведения оценки воздействия на окружающую среду. Сравнительный анализ потребностей в площади для различных источников энергии представлен на Рисунке 22.

6.1 Радиация в контексте

Атомные технологии потенциально связаны с радиационным воздействием на здоровье населения и персонала ядерных объектов. Однако радиация образуется естественным образом из природных источников. «Искусственное» радиоактивное излучение по своему воздействию на человека не отличается от естественного. Ядерные установки спроектированы с множеством барьеров безопасности для защиты людей и окружающей среды от выброса радиоактивных материалов. По расчетам, приведенным в материалах надзорного органа Великобритании, годовая доза облучения от предложенной к строительству АЭС для любого члена британского общества будет примерно такой же, как при авиаперелете из Великобритании в Нью-Йорк и обратно. На атомную энергетику приходится менее 0,1% радиоактивного излучения, которому большинство людей подвергается в своей повседневной жизни.

Двумя наиболее серьезными ядерными авариями были аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году и на АЭС «Фукусима-1» в 2011 году. Они вызвали серьезную обеспокоен-

ность среди общественности и привели к долгосрочным эвакуациям населения и стали основой для политических решений о закрытии установок, как отмечалось выше. Однако фактическое радиологическое воздействие этих инцидентов на здоровье человека оказалось намного ниже, чем предполагалось. Уроки, извлеченные из этих аварий и других инцидентов, произошедших в ходе эксплуатации ядерных объектов, доводятся до сведения всех стран мира, учитываются при проектировании новых реакторов и в практике эксплуатации.

При производстве электроэнергии на АЭС образуются радиоактивные материалы. Они требуют устойчивых методов обращения, обеспечивающих защиту персонала и окружающей среды, а также последующей утилизации на специально спроектированных объектах. Радиоактивные отходы классифицируются по уровням радиоактивности, а также по продолжительности времени, в течение которого они остаются радиоактивными, причем последнее определяется периодом полураспада содержащихся в них радионуклидов. Очень низкоактивные отходы (ОНАО) и низкоактивные отходы (НАО) – это отходы, которые пригодны для размещения в пунктах приповерхностного захоронения. Среднеактивные (САО) и высокоактивные (ВАО) отходы, включая отработанное ядерное топливо, требуют захоронения в глубоких геологических хранилищах. САО и ВАО содержат долгоживущие радионуклиды, которые требуют глубины захоронения от 10 до 100 метров. Около 97% радиоактивных отходов, образующихся в ядерной индустрии, по своим радиохимическим характеристикам классифицируются как НАО или ОНАО. ВАО составляют наименьшую долю по объему (менее 0,1%), но на их долю приходится около 95% от общей радиоактивности. ВАО в основном состоят из отработанного ядерного топлива или материалов переработки ОЯТ. В мире пока нет хранилища для окончательного захоронения ВАО ядерной энергетики, в настоящее время строительство такого объекта ведется в Финляндии. С вводом в промышленную эксплуатацию в 2023 году он станет первым в мире окончательным геологическим хранилищем ВАО.

«Руководство по применению Конвенции к продлению срока службы атомных электростанций» 2020 года об оценке воздействия на окружающую среду в трансграничном контексте (Конвенция Эспо), принятое Сторонами Конвенции ЕЭК ООН, содержит руководство по правилам и процедурам для внутренних и международных действий. Сотрудничество для предотвращения, снижения и контроля значительного вредного трансграничного воздействия на окружающую среду от планируемой деятельности, в том числе в области ядерной энергетики.

Большинство материалов, используемых при производстве на АЭС, могут быть переработаны и использованы повторно при условии, что они не будут чрезмерно загряз-

нены. Даже отработавшее ядерное топливо не должно автоматически классифицироваться как отходы, поскольку существует возможность его переработки. То есть, термин «радиоактивные отходы» применяется только к радиоактивным материалам, повторное использование или переработка которых считаются нецелесообразными и

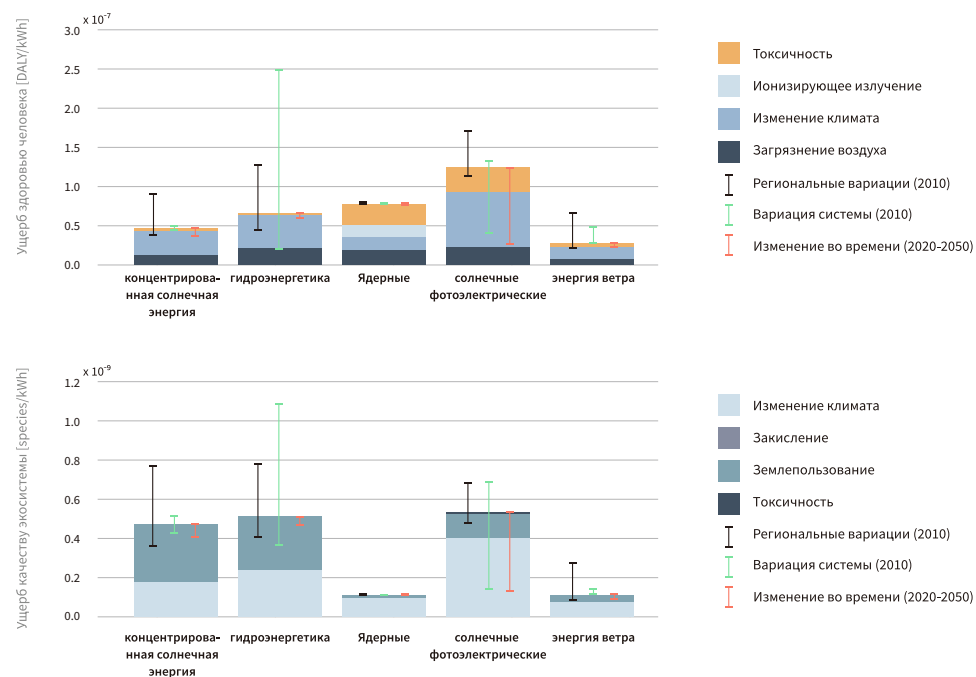
которые предназначены для захоронения. Таким образом, ядерная энергия полностью соответствует принципам экономики замкнутого цикла.

Общественная приемлемость является ключевым фактором для будущего ядерной энергетики; многие страны решили продолжить ее развитие в будущем, в то время

как некоторые другие предпочли этого не делать. Отношение общественности во многом зависит как от восприятия преимуществ и рисков, связанных с ядерной энергетикой,

так и от преимуществ и рисков неядерных альтернатив. Обеспокоенность в связи с рисками несчастных случаев и обращением с отходами может негативно повлиять на общественную приемлемость. С другой стороны, государства, добившиеся заметного прогресса в создании и вводе в эксплуатацию хранилищ ВАО, относятся к числу стран с наивысшим уровнем общественной приемлемости ядерной энергетики.

Рисунок 21 Результаты оценки воздействия энергоисточников с низким уровнем выбросов углерода на протяжении всего жизненного цикла



Источник: Gibon et al., 16 марта 2017, Health benefits, ecological threats of low-carbon electricity, Environmental Research Letters, 12, 3

Рисунок 22 Потребности в земельных площадях для различных энергоисточников



Источник: Strata, июнь 2017 г., The Footprint of Energy: Land Use of U.S. Electricity Production

ПРИЛОЖЕНИЕ I Планы по развитию ядерной энергетики в странах-членах ЕЭК ООН (по состоянию на май 2021 года)

Страны ЕЭК с действующими энергетическими реакторами	Количество действующих энергетических реакторов	Установленная мощность объектов ядерной энергетики (МВт)	Процент вырабатываемого электричества (2019)	Строящиеся реакторы	Текущие планы по развитию ядерной энергетики
Армения	1	375	28	0	Предлагается построить 1 новый реактор. Долгосрочная эксплуатация действующего реактора
Бельгия	7	5930	48	0	Вывод из эксплуатации к 2025 г.
Болгария	2	2006	38	0	Планируется построить, как минимум, 1 новый реактор. Изучается целесообразность строительства реакторов типа ММР
Канада	19	13554	15	0	Активно выдаются лицензии на несколько реакторов типа ММР
Чехия	6	3932	35	0	Планируется построить, как минимум, 1 новый реактор большой мощности. Изучается целесообразность строительства реакторов типа ММР
Финляндия	4	2794	35	1	Планируется построить 1 новый реактор большой мощности. Активно изучается целесообразность строительства реакторов типа ММР
Франция	56	61370	71	1	Предлагается построить 6 новых реакторов. Правительство намерено сократить долю ядерной энергии в энергобалансе до 50%
Германия	6	8113	12	0	Вывод из эксплуатации к 2023 г.
Венгрия	4	1902	49	0	Планируется построить 2 новых реактора большой мощности
Нидерланды	1	482	3	0	В настоящее время проводятся консультации по вопросам строительства новых реакторов
Румыния	2	1300	19	0	Планируется построить 2 новых реактора большой мощности. Изучается целесообразность строительства реакторов типа ММР
Россия	38	28578	20	2	Планируется построить 25 новых реакторов. Предлагается построить еще 21 (реакторы типа ММР и реакторы большой мощности)
Словакия	4	1814	54	2	Предлагается построить как минимум 1 дополнительный реактор большой мощности
Словения	1	688	37	0	Предлагается построить 1 новый реактор большой мощности

Испания	7	7121	21	0	Строительство новых реакторов не планируется
Швеция	6	6859	34	0	Строительство новых реакторов не планируется
Швейцария	4	2960	24	0	Строительство любых новых ядерных объектов в настоящее время запрещено
Украина	15	13107	54	2	Предлагается построить как минимум 2 новых реактора
Великобритания	15	8923	16	2	Планируется построить, как минимум, 4 новых реактора большой мощности. Финансируется разработка проектов ММР
США	93	95523	20	2	Выданы разрешения на реализацию проектов по строительству 10 новых реакторов большой мощности. Разрабатываются несколько проектов реакторов типа ММР. Выдана лицензия на одну конструкцию реактора типа ММР
Новые страны в регионе ЕЭК	Количество действующих энергетических реакторов	Установленная мощность объектов ядерной энергетики (МВт)	Процент вырабатываемого электричества (2019)	Строящиеся реактора	Текущие планы по развитию ядерной энергетики
Беларусь	1	1110	0	1	Строится 1 новый реактор большой мощности. Первый реактор пущен в промышленную эксплуатацию
Эстония	0	0	0	0	Активно изучается целесообразность внедрения реакторов типа ММР
Казахстан	0	0	0	0	Предлагается построить, как минимум, 1 реактор большой мощности. Изучается целесообразность строительства реакторов типа ММР
Литва	0	0	0	0	Предлагается построить 2 новых реактора большой мощности (приостановлено)
Польша	0	0	0	0	Планируется построить 6 новых реакторов к 2040 г.
Канада	0	0	0	3	Предлагается построить 8 дополнительных реакторов большой мощности
Узбекистан	0	0	0	0	Планируется построить 2-4 новых реактора большой мощности. Изучается целесообразность строительства реакторов типа ММР

ПРИЛОЖЕНИЕ II Уровень готовности различных технологий ядерных реакторов

Класс и мощность реактора	Вероятные условия использования	Сфера применения	Технологии	Уровень готовности*
Реакторы средней и большой мощности (>300 МВт(э))	Внесетевое	Производство электроэнергии Производство водорода Опреснение воды Централизованное теплоснабжение	Типы реакторов: PWR, BWR, PHWR, реактор на быстрых нейтронах (FNR) Конверсия: цикл Ренкина	Уровень технологической готовности PWR, BWR, PHWR: 11 Уровень технологической готовности SFR: 8-9
Реакторы типа MMP (До 300 МВт(э))	Сетевое или внесетевое Большие развитые энергосети Небольшие или слабо развитые сети Промышленная переработка Внесетевое электроснабжение сельского хозяйства	Производство электроэнергии Производство водорода Опреснение воды Централизованное теплоснабжение Технологическое тепло для промышленного применения	Типы реакторов: PWR, BWR, реактор на расплавах солей (MSR), высокотемпературный реактор (HTR), газоохлаждаемый реактор на быстрых нейтронах (GFR), реактор на быстрых нейтронах (FNR) Конверсия: цикл Ренкина, цикл Брайтона	Уровень технологической готовности PWR MMP: 6-9 Уровень технологической готовности других конструкций MMP: 2-8
Микрореакторы (Приблизительно до 20 МВт(т))	Внесетевое Промышленные объекты Горное производство Удаленные населенные пункты Нефтегазовые платформы Внесетевое электроснабжение сельского хозяйства	Производство электроэнергии Опреснение воды Транспорт Централизованное теплоснабжение Технологическое тепло для промышленного применения	Типы реакторов: реактор на быстрых нейтронах, высокотемпературный газоохлаждаемый реактор Конверсия: цикл Ренкина, цикл Брайтона, сверхкритический паровой цикл, тепловые трубы, двигатели Стирлинга	Уровень технологической готовности: 2-6

* На основе категорий, приведенных в Перспективах энергетических технологий МЭА

ПРИЛОЖЕНИЕ III Продолжительность строительства АЭС в Китае с 2010 г

Реактор	Модель	Начало строительства	Подключение к энергосети	Продолжительности строительства (месяцев)	Продолжительности строительства (лет)
Чанцзян - 1	CNP-600	25/04/2010	07/11/2015	66	5,5
Чанцзян - 2	CNP-600	21/11/2010	20/06/2016	66	5,5
Фанчэнган - 1	CPR-1000	30/07/2010	25/10/2015	62	5,2
Фанчэнган - 2	CPR-1000	23/12/2010	15/07/2016	66	5,5
Фуцин - 3	CPR-1000	31/12/2010	07/09/2016	68	5,7
Фуцин - 4	CPR-1000	17/11/2012	29/07/2017	56	4,7
Фуцин - 5	Hualong One	07/05/2015	27/11/2020	66	5,5
Хайян - 2	AP-1000	20/06/2010	13/10/2018	99	8,3
Ниндэ - 3	CPR-1000	08/01/2010	21/03/2015	62	5,2
Ниндэ - 4	CPR-1000	29/09/2010	29/03/2016	66	5,5
Тайшань - 2	EPR-1750	15/04/2010	23/06/2019	110	9,2
Тяньвань - 3	VVER V-428M	27/12/2012	30/12/2017	60	5,0
Тяньвань - 4	VVER V-428M	27/09/2013	27/10/2018	61	5,1
Тяньвань - 5	ACPR-1000	27/12/2015	08/08/2020	55	4,6
Тяньвань - 6	ACPR-1000	07/09/2016	11/05/2021	56	4,7
Янцзян - 3	CPR-1000	15/11/2010	18/10/2015	59	4,9
Янцзян - 4	CPR-1000	17/11/2012	08/01/2017	49	4,1
Янцзян - 5	ACPR-1000	18/09/2013	23/05/2018	56	4,7
Янцзян - 6	ACPR-1000	23/12/2013	29/06/2019	66	5,5

СПРАВОЧНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Canadian Small Modular Reactor (SMR) Roadmap Steering Committee, November 2018, A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors

European Commission Joint Research Centre, 2021, Technical assessment of nuclear energy with respect to the 'do no significant harm' criteria of Regulation (EU) 2020/852 ('Taxonomy Regulation')

Eurostat, EU Electricity Generation Statistics

FORATOM, 25 April 2019), Economic and Social Impact Report

Gibon et al., 16 March 2017, Health benefits, ecological threats of low-carbon electricity, Environmental Research Letters, 12, 3

International Atomic Energy Agency, 2020, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), 2020 Edition

IAEA, 2020 Climate Change and Nuclear Power 2020

IAEA, 2018, Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management

International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2020, Clean Energy Technologies

IEA, May 2019, Nuclear Power in a Clean Energy System

IEA and OECD-Nuclear Energy Agency, 2020, Projected Costs of Generating Electricity 2020 edition

Kirsten Hund et al., 2020, Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition, World Bank Group

MIT Energy Initiative, 2018, The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World

Nuclear Innovation Alliance, 2021, U.S. Advanced Nuclear Energy Strategy for Domestic Prosperity, Climate Protection, National Security, and Global Leadership

Nuclear Innovation Clean Energy Future, September 2020, Flexible Nuclear Energy for Clean Energy Systems

Pushker Kharecha and James Hansen, 15 March 2013, Prevented Mortality and Greenhouse Gas Emissions from Historical and Projected Nuclear Power, Environmental Science & Technology, 47, 9, p4889-4895

OECD-NEA, June 2020, Building low-carbon resilient electricity infrastructures with nuclear energy in the post-COVID-19 era, NEA Policy Brief

OECD-NEA, 2019, The Costs of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables

OECD-NEA, 2020, Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders

Oxford Economics, April 2019, Nuclear Power Pays

Sepulveda et al., 21 November 2018, The Role of Firm Low-Carbon Electricity Resources in Deep Decarbonization of Power Generation, *Joule*, 2, 11, p2403-2420

Strata, June 2017, The Footprint of Energy: Land Use of U.S. Electricity Production

UNECE, 2020, Guidance on the applicability of the Convention to the lifetime extension of nuclear power plants. Convention on Environmental Impact Assessment in a Transboundary Context (Espoo Convention)

UNSCEAR, 2018, Evaluation of Data on Thyroid Cancer in Regions Affected by the Chernobyl Accident

UNSCEAR, 2020, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Scientific Annex B

World Health Organization, Air Pollution

World Nuclear Association, Financing Nuclear Energy

World Nuclear Association, June 2020, The Enduring Value of Nuclear Energy Assets



**Информационная служба
Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных Наций**

Palais des Nations
CH - 1211 Geneva 10, Switzerland
Telephone: +41(0)22 917 12 34
Fax: +41(0)22 917 05 05
E-mail: unece_info@un.org
Website: <http://www.unece.org>