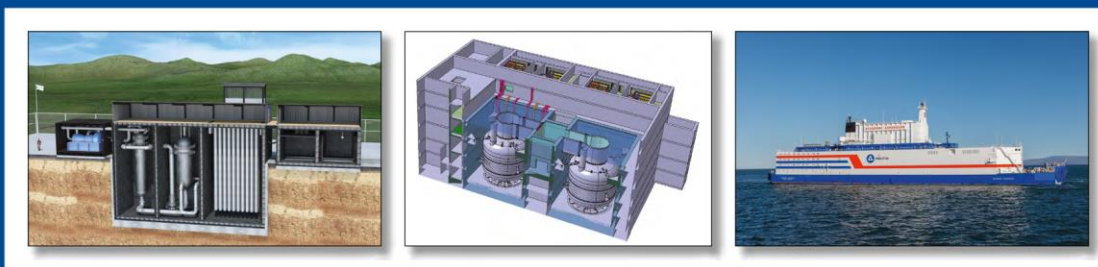


Малые модульные реакторы: проблемы и перспективы



Малые модульные реакторы: проблемы и перспективы

© ОЭСР 2021

АЯЭ № 7560

АГЕНТСТВО ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ
ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО СОТРУДНИЧЕСТВА И РАЗВИТИЯ

ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО СОТРУДНИЧЕСТВА И РАЗВИТИЯ

ОЭСР является уникальным форумом, в рамках которого правительства 37 демократических стран совместно работают над решением экономических, социальных и экологических проблем, возникающих в условиях глобализации. ОЭСР также занимает важнейшее место в деятельности, направленной на оказание поддержки и помощи правительствам в понимании и решении новых проблем и тенденций развития, таких как корпоративное управление, информационная экономика, и вопросов, связанных со старением населения. Организация предоставляет правительствам стран-членов возможности сравнения политического опыта, поиска путей решения общих проблем, определения рекомендуемых норм и проведения работы по координации внутренней и внешней политики.

Странами-членами ОЭСР являются: Австралия, Австрия, Бельгия, Великобритания, Венгрия, Германия, Греция, Дания, Израиль, Ирландия, Исландия, Испания, Италия, Канада, Колумбия, Корея, Латвия, Литва, Люксембург, Мексика, Нидерланды, Новая Зеландия, Норвегия, Польша, Португалия, Словакия, Словения, Соединённые Штаты Америки, Турция, Финляндия, Франция, Чехия, Чили, Швеция, Швейцария, Эстония и Япония. Европейская комиссия также принимает участие в работе ОЭСР.

Издательство ОЭСР широко распространяет собственные результаты сбора статистических данных, экономические, социальные и экологические исследования, а также конвенции, руководства и стандарты, согласованные её членами.

Данная работа публикуется под ответственность Генерального секретаря ОЭСР. Мнения и аргументы, приведённые в настоящем документе, не обязательно отражают официальную позицию правительств стран-членов ОЭСР или Агентства по ядерной энергии.

АГЕНТСТВО ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ

Агентство по ядерной энергии (АЯЭ) при ОЭСР было учреждено 1 февраля 1958 года. В настоящее время членами АЯЭ являются 34 страны: Австралия, Австрия, Аргентина, Бельгия, Болгария, Великобритания, Венгрия, Германия, Греция, Дания, Ирландия, Исландия, Испания, Италия, Канада, Корея, Люксембург, Мексика, Нидерланды, Норвегия, Польша, Португалия, Россия, Румыния, Словакия, Словения, Соединённые Штаты Америки, Турция, Финляндия, Франция, Чехия, Швеция, Швейцария и Япония. Европейская комиссия и Международное агентство по атомной энергии также принимают участие в работе Агентства.

Миссия АЯЭ:

- содействие странам-участницам в поддержании и дальнейшем развитии посредством международного сотрудничества научных, технологических и правовых основ, необходимых для безопасного, экологичного и экономичного использования ядерной энергии в мирных целях;
- обеспечение авторитетной оценки и выработка общего понимания по ключевым вопросам, лежащим в основе правительственных решений в области политики использования ядерной энергии, а также углубление анализа ОЭСР в таких областях, как энергетика и устойчивое развитие низкоуглеродной экономики.

Особыми сферами компетенции АЯЭ являются ядерная безопасность и регулирование деятельности в области использования ядерной энергии, обращение с радиоактивными отходами и вывод из эксплуатации, радиационная защита, ядерная наука, экономический и технический анализ ядерного топливного цикла, ядерное право и ответственность, а также информирование общественности. Банк данных АЯЭ предоставляет странам-участницам данные, касающиеся использования ядерной энергии, и оказывает услуги по обслуживанию компьютерных программ.

Настоящий документ, а также любые содержащиеся в нём (статистические) данные или карты не ущемляют статус или суверенитет в отношении какой-либо территории, определённые международные границы и рубежи, а также наименования каких-либо территорий, городов или областей.

Исправления к публикациям ОЭСР можно найти по адресу: www.oecd.org/publishing/corrigenda.

© ОЭСР 2021

Разрешается копирование, скачивание или распечатка содержания публикаций ОЭСР для собственного пользования, а также допускается включение выдержек из публикаций, баз данных и мультимедийной продукции ОЭСР в документы, презентации, блоги, веб-сайты и учебные материалы при условии наличия соответствующей ссылки на ОЭСР в качестве источника и держателя авторских прав. Все запросы, касающиеся общественного или коммерческого использования и права на перевод, необходимо направлять по адресу neapub@oecd-nea.org. Запросы на получение разрешения на фотокопирование отрывков настоящего документа для общественного или коммерческого использования необходимо направлять непосредственно в Центр по проверке авторских прав США (Copyright Clearance Center) по адресу info@copyright.com или во Французский центр применения права воспроизведения (Centre français d'exploitation du droit de copie — CFC) по адресу contact@cfcopies.com.

Фотографии на обложке: компактный ядерный реактор U-Battery (URENCO); NUWARD™ (© TechnicAtome); российская плавучая АЭС («Росатом»).

Предисловие

В масштабах мира директивные органы, предприятия ядерного сектора и энергоаналитики проявляют растущий интерес к потенциалу малых модульных реакторов (ММР) в качестве конкурентоспособного элемента низкоуглеродных технологий, используемого в интегрированных энергосистемах будущего. ММР воплощают надежды в отношении внутренне присущих свойств безопасности, упрощения и стандартизации, которые могут существенно облегчить и сделать более экономичным внедрение ядерных мощностей, а также являются выражением перспектив весомого прогресса в сфере глобального гибкого применения ядерной энергии для удовлетворения энергетических потребностей в будущем. Значительные успехи достигнуты разработчиками в ходе развёртывания демонстрационных объектов, однако важные вопросы, касающиеся рентабельности ММР, ещё требуют ответа.

В 2011 году Агентство по ядерной энергии (АЯЭ) при ОЭСР опубликовало доклад «Текущее состояние, техническая осуществимость и экономические показатели малых ядерных реакторов» (*Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors*) (АЯЭ, 2011), посвящённый главным образом факторам, воздействующим на экономическую эффективность ММР. За данным отчётом последовала публикация «Малые модульные реакторы: потенциал внедрения на рынке ядерной энергии в краткосрочной перспективе» (*Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-Term Deployment*) (АЯЭ, 2016). В рамках указанного исследования в первый раз была произведена оценка масштабов мирового рынка ММР к 2035 году и сделано заключение о том, что перспективы данного направления значимым образом зависят от таких факторов, как успешное лицензирование и степень зрелости цепи поставок. Подталкиваемые более масштабной политикой декарбонизации рынки электроэнергетики параллельно продолжали своё развитие, в результате которого появились новые возможности для низкоуглеродных технологий, в том числе и для ММР. Кроме того, трудности, возникшие в странах-членах ОЭСР в ходе реализации недавних проектов возведения ядерных реакторов, в основе которых лежат традиционные крупномасштабные конструкции поколения III+, способствовали дальнейшему увеличению спроса на более доступные и простые технологии при сооружении объектов атомной энергетики.

В июне 2017 года Комитетом по ядерному праву АЯЭ (NLC) была проведена тематическая сессия по правовым аспектам, касающимся ММР. В рамках данного заседания особое внимание было уделено некоторым вопросам, которые требуют дальнейшего обсуждения в отношении режимов ответственности за ядерный ущерб, применяемых к плавучим/передвижным ММР (таким, как необходимость однозначного включения таких реакторов в категорию «ядерных установок» и концепция «оператора»). Комитет также одобрил дальнейший анализ правовых аспектов регулирования Рабочей группой по правовым аспектам ядерной безопасности при NLC (WPLANS). Аналогичным образом на тематическом совещании Комитета АЯЭ по проблемам ядерного регулирования (CNRA), состоявшемся в июне 2019 года, было принято решение о рассмотрении инициатив, касающихся ММР, в контексте общего стратегического анализа деятельности CNRA.

В настоящем отчёте представлены новейшие результаты деятельности АЯЭ в указанной области, приведён исчерпывающий обзор технологий ММР для оценки возможностей и, что ещё более важно, выделены основные проблемы, которые предстоит преодолеть для широкомасштабного внедрения и достижения экономической конкурентоспособности данных технологий. В публикации содержится обзор технических, экономических и рыночных аспектов, затронутых в предыдущих исследованиях, а также рассматриваются вопросы, касающиеся лицензирования, нормативно-правового регулирования и цепи поставок. Дальнейшие этапы развития ММР потребуют расширения международного сотрудничества и государственной поддержки во всех указанных взаимосвязанных направлениях для создания устойчивого глобального рынка ММР.

Благодарность

Публикация «Малые модульные реакторы: проблемы и перспективы» основана на информации, подготовленной в рамках «Краткого изложения политики по малым модульным реакторам», представление которого состоялось 25 октября 2019 года в ходе 139-й сессии Руководящего комитета по ядерной энергии АЯЭ. Настоящее исследование было подготовлено на базе вышеуказанных материалов Антонио Вайя Солером и Мишелем Бертелеми, представителями Отдела технологического развития и экономики (NTE) АЯЭ. В составлении отчёта также приняли участие Владислав Созонюк (Канцелярия Генерального директора), Адити Верма (NTE), Эндрю Уайт (Отдел технологий и регулирования ядерной безопасности АЯЭ (SAF)) и Кимберли Секстон Ник (Бюро по правовым вопросам АЯЭ (OLC)). Руководители отделов Сама Бильбао-и-Леон и Глория Квон (NTE), Химена Васкез-Менан (OLC) и Вероник Руйе (SAF) внесли свой вклад и обеспечили управленческий надзор. Всем вышеуказанным лицам выражается искренняя признательность.

Содержание

Аббревиатуры и сокращения	7
Сводная информация	9
1. Введение. ММР в энергетических системах будущего	13
2. Обзор технологий ММР	15
2.1. История и определение.....	15
2.2. Типы разрабатываемых реакторов и текущие проекты	15
3. Техничко-экономические характеристики ММР	19
3.1. Ключевые конструкционные особенности ММР	19
3.2. Аспекты, связанные с топливным циклом	20
3.3. Ключевые экономические драйверы	22
3.4. Ценностное предложение ММР	24
3.5. Рыночные перспективы ММР	25
4. Аспекты лицензирования и регулирования	29
4.1. Соображения безопасности	29
4.2. Возможность усовершенствования режимов лицензирования	29
4.3. Оптимизация лицензирования и регулирования.....	30
5. Нормативно-правовая база	33
5.1. Основные правовые акты международного и регионального значения, распространяющиеся на ММР	33
5.2. Ответственность за ядерный ущерб перед третьей стороной и ММР	36
6. Политические аспекты	39
6.1. Обзор основных недавних инициатив на государственном и международном уровне	39
6.2. Выводы, касающиеся разработки и реализации политических мер, а также международного сотрудничества	41
7. Основные проблемы, связанные с крупномасштабным развёртыванием ММР	43
7.1. Проблема выбора технологии	43
7.2. Пересмотр и гармонизация систем лицензирования, а также другие правовые проблемы...43	43
7.3. Потенциальные преимущества демонстрационных установок ММР, не имеющих аналогов 44	44
7.4. Вопросы, связанные с цепью поставок и с топливным циклом.....	45
7.5. Общественное восприятие и участие	45
8. Выводы и рекомендации. Роль государственной поддержки и международного сотрудничества в развёртывании ММР	47
9. Список литературы	49

Вставки

Вставка 1. Недавние оценки потенциального рынка ММР	26
---	----

Рисунки

Рисунок 1. Выборка конструкций реакторных установок в виде функции выходной мощности, температуры на выходе из активной зоны и конфигурации развёртывания	17
Рисунок 2. Ключевые экономические драйверы ММР, компенсирующие отсутствие экономии за счёт масштабов	22
Рисунок 3. Расчётная мощность ММР по регионам в 2035 году	27
Рисунок 4. Применимость ММР	28

Таблицы

Таблица 1. Репрезентативная выборка разрабатываемых в разных странах мира конструкций ММР	18
Таблица 2. Характеристики топливного цикла некоторых конструкций ММР	21

Аббревиатуры и сокращения

АЯЭ	Агентство по ядерной энергии
ВОУ	Высокообогащённый уран
ГВт _э	Гигаватт электрической мощности
ЗПЗМ	Зона планирования защитных мероприятий
кВт·ч	Киловатт-час
КЯБ	Конвенция о ядерной безопасности
ЛВР	Легководный реактор
МАГАТЭ	Международное агентство по атомной энергии
МВт _э	Мегаватт электрической мощности
ММР	Малый модульный реактор
МОКС-топливо	Смешанное оксидное топливо
МЭА	Международное энергетическое агентство
ОВОС	Оценка воздействия на окружающую среду
ПВИЭ	Переменчивые возобновляемые источники энергии
УГЛ	Уровень готовности к лицензированию
УГТ	Уровень готовности технологии
ЯППУ	Ядерная паропроизводящая установка
CNL	Канадские ядерные лаборатории
CNSC	Комиссия по ядерной безопасности Канады
CORDEL	Рабочая группа по сотрудничеству в области оценки и лицензирования конструкций реакторов при WNA
COTS	Готовый коммерческий продукт
DOE	Министерство энергетики США
FOAK	Не имеющий аналогов
Gen IV	Поколение IV
GIF	Международный форум «Поколение IV»
HALEU	Уран с обогащением выше 5 % и ниже 20 %
HTGR	Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор
INL	Национальная лаборатория Айдахо (США)
LCOE	Полная приведённая стоимость электроэнергии
LOCA	Авария с потерей теплоносителя
LWR	Легководный реактор

MDEP	Многонациональная программа оценки новых проектов АЭС
NLC	Комитет по ядерному праву (АЯЭ)
NNL	Национальная ядерная лаборатория (Великобритания)
NRC	Комиссия по ядерному регулированию (США)
PHWR	Тяжеловодный реактор
SDS	Сценарий устойчивого развития
SMR	Малый модульный реактор
WNA	Всемирная ядерная ассоциация

Сводная информация

Большое количество концепций малых модульных реакторов с разным уровнем зрелости

Малыми модульными реакторами (ММР), как правило, считаются ядерные реакторы с выходной электрической мощностью от 10 МВт_э до 300 МВт_э. ММР обладают несколькими техническими характеристиками, которые улучшают прогнозируемость сооружения и потенциально позволяют сократить издержки на строительство и сроки поставки. Конструкции с выходной электрической мощностью менее 10 МВт_э — часто предназначенные для эксплуатации в полуавтоматическом режиме — называются микромодульными реакторами.

По данным Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), в настоящее время в разработке находится около 70 концепций ММР, что на 40 % больше, чем в 2018 году. Несмотря на то, что используемый в мировом масштабе термин «ММР» включает малые реакторы всех конструкций, между основными типами разрабатываемых ММР существуют значительные различия. Например, в данных конструкциях используется широкий спектр теплоносителей и видов топлива, они также отличаются уровнем готовности технологии (УГТ) и уровнем готовности к лицензированию (УГЛ). Кроме того, при развёртывании ММР может применяться целый ряд конфигураций: от одномодульных и многомодульных установок до мобильных энергоблоков, таких как плавучие (т. е. смонтированные на барже) атомные электростанции. Степень использования модулей также зависит от конструкции.

В предлагаемых поставщиками концепциях ММР, обладающих наивысшим уровнем зрелости, которые представляют собой эволюционные варианты работающих в разных странах мира легководных реакторов Поколения II и Поколения III/III+ (легководные ММР), используется богатый опыт эксплуатации и регулирования, исчисляемый десятилетиями. Данные концепции составляют около 50 % разрабатываемых конструкций ММР. Остальные 50 % являются реакторами Поколения IV (ММР Поколения IV), в конструкциях которых предусматривается использование альтернативных теплоносителей (т. е. жидкого металла, газа или расплавов солей), усовершенствованных видов топлива и инновационных системных решений. Несмотря на отсутствие сравнимого с легководными ММР опыта эксплуатации и регулирования, а также на существующую до сих пор необходимость дополнительных исследований в некоторых областях, в конструкциях на основе реакторов Поколения IV, тем не менее, используются преимущества обширных изысканий и разработок, совершённых в прошлом, на которые могут опираться разработчики и регулирующие органы.

Конкурентоспособность ММР, основанная на модели поставки и ценностном предложении, отличающихся новизной

Благодаря меньшему размеру и модульности ММР в конструкцию и процессы вносятся комплекс новшеств, что может не только сократить сроки сооружения, но и расширить ценностное предложение ядерной энергетики.

Малые габариты ММР означают невозможность использования преимуществ масштаба. Для преодоления данной экономической проблемы «серийное строительство» станет обязательным условием. Таким образом, конструкции ММР должны продемонстрировать кривые ускоренного приобретения опыта благодаря более высокому по сравнению с крупномасштабными ядерными реакторами уровню использования модулей, упрощения и стандартизации. Условия заводского изготовления также позволяют обеспечить улучшенный контроль качества, снизить строительные риски, способствовать приобретению опыта и внедрению новых технологий производства. Некоторые из указанных преимуществ уже были продемонстрированы в других отраслях, но в случае ММР они ещё должны себя показать.

В то же время меньший размер и прогнозируемые более короткие по сравнению с крупномасштабными реакторами сроки поставки ММР могут снизить объём требующихся начальных инвестиций. В результате уменьшается уровень финансового риска потенциальных заказчиков и инвесторов, что может сделать такие объекты более доступными. Другие особенности, повышающие привлекательность заявленных преимуществ ММР, связаны с потенциалом гибкости таких установок (как расширенное использование режима следования за нагрузкой, так и отличные от выработки электроэнергии возможности применения), который может принести выгоду с точки зрения системных издержек и новых рыночных перспектив, что облегчает доступ к ядерной энергии в регионах и секторах, где использование крупномасштабных атомных электростанций ограничено.

Необходимость преобразования нормативно-правовой базы

Поскольку данные новые технологии не предусматривались при разработке действующих в настоящее время международных ядерных конвенций, последние требуют пересмотра для адаптации в случае необходимости к инновационным концепциям ММР, которые сегодня находятся в стадии оценки или реализации.

Например, существующие системы лицензирования, как правило, основаны на обширном опыте эксплуатации крупномасштабных АЭС с единичными энергоблоками, оборудованными ЛВР, в которых применяется урановое оксидное топливо с обогащением ниже 5 %. Предлагаемые ММР, в основе которых лежит технология ЛВР, характеризуются аналогичными условиями эксплуатации и конфигурацией загрузки топлива, что должно упростить процесс их лицензирования. Однако главная проблема новейших конструкций заключается в ограниченном опыте, затрудняющем демонстрацию и утверждение обоснования безопасности, основу которого составляют более эффективные средства пассивной безопасности, меньшее количество и пониженный уровень тяжести аварийных режимов, а также уменьшенные зоны планирования защитных мероприятий (ЗПЗМ) за пределами площадки. Кроме того, альтернативные решения, касающиеся топлива и/или теплоносителя, выражаются в больших отклонениях от ранее применявшихся в области ядерного регулирования парадигм и могут потребовать от соответствующих полномочных органов более гибких подходов при лицензировании, а также значительного объёма компетенций в новых областях.

Международные конвенции об ответственности за ядерный ущерб в принципе распространяются и на ММР, тем не менее, потребуются углублённый анализ их применения в отношении плавучих/передвижных атомных электростанций.

Накопление опыта разработки ММР странами-членами АЯЭ

Многие страны-члены АЯЭ в настоящее время разными способами поддерживают развитие ММР, содействуя реализации государственной программы и/или сооружению демонстрационных и/или не имеющих аналогов (FOAK) установок. Например, Министерство энергетики США (DOE) оказывает помощь отдельным компаниям, производящим ММР, посредством распределения затрат в рамках государственно-частных партнёрств и путём предоставления доступа к экспериментальным объектам, размещённым в национальных лабораториях. Финансовая поддержка ММР также осуществляется в Великобритании в рамках технологического портфеля, необходимого для достижения углеродной нейтральности к 2050 году.

Со своей стороны, такие страны, как Канада или Финляндия, в настоящее время концентрируют усилия на разработке политических рамок, в том числе режимов лицензирования, которые могут лучшим образом содействовать развёртыванию новых технологий.

Препятствия на пути широкомасштабного развёртывания ММР

При оценке экономического обоснования ММР вопросы рынка оказываются в центре внимания. С одной стороны, массовое производство ММР может быть синонимом значительных экономических преимуществ, как в случае коммерческих самолётов. Однако в таком контексте требуется относительно широкий рынок для единой конструкции, что, соответственно, подчёркивает необходимость глобального рынка, а также указывает на то, что только небольшая часть из множества разрабатываемых конструкций может в конечном счёте создать такой глобальный рынок.

Потребуется поддержание нормативных требований на более высоком уровне гармонизации для содействия развитию глобального рынка, необходимо также сократить количество концепций, предлагаемых поставщиками. Кроме того, в конструкциях ММР применяется ряд непроверенных инновационных решений, которые, в свою очередь, могут быть сопряжены с дополнительными технологическими рисками. Однако по мере достижения зрелости ММР с запуском первых демонстрационных установок уровень некоторых из указанных рисков должен снизиться, что повысит интерес потенциальных заказчиков. Со своей стороны, цепь поставок должна быть готовой к поддержке зарождающегося рынка ММР путём обеспечения своевременного наличия возможностей заводского изготовления, мощностей для производства низкообогащённого урана с высоким содержанием (HALEU) и других средств для выработки инновационных видов топлива, а также необходимых для научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок (НИОКР) компетенций и инфраструктуры.

Наконец, поскольку некоторые конструкции ММР предполагают минимизацию зон, подлежащих эвакуации, и размещение реакторов вблизи крупных населённых пунктов, возможно возникновение дополнительных проблем, связанных с проведением консультаций с общественностью.

Государственная поддержка и международное сотрудничество: ключевые факторы, способствующие развёртыванию ММР

Страны, поддерживающие внедрение ММР, могут считать целесообразным выполнение плана, сосредоточенного на четырёх основных сферах деятельности, в которых государственная поддержка и международное сотрудничество будут играть главную роль:

- **Вовлечение общественности.** В рамках будущих проектов возможно использование преимуществ международного сотрудничества, обмена информацией об извлечённых уроках, а также о трудностях и передовых практиках, выявленных первопроходцами в результате публичных консультаций с участием местного населения.
- **Сооружение демонстрационных установок ММР, не имеющих аналогов, и приобретение опыта.** Государственная поддержка демонстрационных проектов, не имеющих аналогов, может принимать разные формы, начиная от конкретных долгосрочных соглашений о поставке электроэнергии и заканчивая механизмами распределения затрат, которые могут минимизировать строительные риски и привлечь большее число инвесторов. Кроме того, чрезвычайно важна поддержка действий регулирующих органов в области разработки необходимых режимов и возможностей лицензирования. Параллельно следует продолжать усилия по воплощению результатов исследований в эффективное развёртывание путём размещения первых экспериментальных энергоблоков и финансирования необходимой исследовательской инфраструктуры.
- **Гармонизация режимов лицензирования.** Прогресс в области гармонизации может быть достигнут благодаря эффективному использованию существующих механизмов сотрудничества в сфере крупномасштабных реакторов, а также в других строго регулируемых секторах. Несмотря на то, что абсолютная гармонизация недостижима (а в некоторых областях и нежелательна), следует продолжать усилия в тех сферах регулирования, где могут быть выработаны общие позиции по существенно важным вопросам. Особое значение приобретают действия АЯЭ по координации многостороннего лицензирования, двустороннего сотрудничества и совместной оценки безопасности, подобные реализованным в рамках Многонациональной программы оценки новых проектов АЭС (MDEP). Благоприятные для гармонизации условия существуют также на уровне предварительного лицензирования, что может способствовать процессу отбора конструкций ММР.
- **Развитие производственного потенциала.** Принятие правительствами государственной ядерной программы, предусматривающей сооружение нескольких установок ММР, способно увеличить производственный потенциал. Страны, в которых уже осуществляются крупномасштабные ядерные проекты, могут воспользоваться преимуществами синергии в рамках существующих возможностей и процессов поставки. Партнёрства между ключевыми игроками и сотрудничество на промышленном уровне между странами могут быть использованы для распределения потенциальных рисков. Следует предвосхитить проблемы топливного цикла, чтобы надлежащим образом обеспечить поддержку рыночных перспектив. И в заключение, необходимы усилия в области гармонизации норм и стандартов, результатом которой могут стать дополнительные рыночные выгоды.

1. Введение. ММР в энергетических системах будущего

Для обеспечения достижения целей по сокращению выбросов парниковых газов, намеченных Парижским соглашением, ядерная энергетика должна внести значительный и незаменимый вклад в общий энергетический баланс. Согласно Сценарию устойчивого развития (SDS) Международного энергетического агентства (МЭА), для достижения указанных целей потребуются новые ядерные мощности и амбициозные программы по продлению срока службы существующих атомных электростанций. Необходимость усиления роли ядерной энергетике для достижения целей декарбонизации была также подтверждена Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК, 2018).

Однако доля атомной промышленности в мировом производстве электроэнергии далека от необходимого уровня. Фактически для достижения результатов, соответствующих SDS, текущие темпы годового прироста мощности, которые составляют 5 гигаватт (ГВт), должны быть как минимум удвоены в период с 2020 по 2040 год. Кроме того, первоначальный проектный жизненный цикл АЭС, составляющий 30–40 лет, требует продления для снижения напряжения в цепи поставок, задействованной при сооружении ядерных объектов,¹ и для ограничения совокупных затрат на декарбонизацию (МЭА, 2019, 2020).

Множество причин может объяснить отставание от намеченного в сценарии SDS создания дополнительных мощностей при сооружении новых ядерных объектов. Факторы, оказывающие наибольшее влияние, связаны с высоким уровнем издержек, который характеризует новые ядерные проекты, особенно в странах, где атомные электростанции не возводились в последние десятилетия. Проекты сооружения реакторов Поколения III, не имеющих аналогов (FOAK), сопровождалось задержками в ходе строительства и ростом затрат, особенно в странах-членах ОЭСР, что способствовало подрыву уверенности стейкхолдеров и общественности в способности ядерной энергетике реализовывать новые проекты. Помимо всего, ощущение того, что возведение новых атомных электростанций сопряжено с высоким уровнем проектного риска, отпугивает инвесторов и ещё больше ограничивает способность государств мобилизовывать финансирование в рамках будущих проектов (АЯЭ, 2020).

В то же время малые модульные реакторы (ММР) привлекают внимание директивных органов в качестве примера технологии, которая позволяет решить часть проблем, наблюдавшихся в ходе реализации недавних ядерных проектов. Технология, лежащая в основе ММР, также открывает перспективы расширенного использования ядерной энергии как средства декарбонизации в общем энергетическом балансе. Указанное главным образом касается возможностей применения, не связанных с выработкой электроэнергии, в секторах, характеризующихся трудностями в борьбе с выбросами и ограниченным уровнем использования низкоуглеродных технологий. Несмотря на значительный прогресс в области валидации конструкторских решений, многие проблемы остаются неразрешёнными.

Целями настоящего отчёта являются:

- представление концепций ММР и соответствующих стадий разработки на сегодняшний день;
- краткое изложение потенциальных преимуществ и ключевых экономических характеристик ММР;
- определение основных проблем внедрения ММР в промышленном масштабе и потенциальных стратегий, которые могут содействовать их разрешению;
- предложение одного из возможных направлений развития и развёртывания ММР.

1. Для достижения целей SDS, касающихся прироста мощности, если жизненный цикл существующих атомных электростанций не будет продлён и не превысит 40-летний период, необходим ежегодный запуск около 20 ГВт новых мощностей, начиная с 2021 года.

2. Обзор технологий ММР

2.1. История и определение

Несмотря на то, что сегодня ядерные реакторы малых габаритов считаются революционной технологией использования ядерной энергии, в атомном секторе разных стран мира они используются достаточно давно. В действительности первые промышленные реакторы, в основе которых лежит технология легководного реактора (ЛВР), разработанные и внедрённые в конце 1950-х и в 1960-х годах, представляли собой значительно увеличенный в масштабе вариант малых энергоблоков, оснащавших атомоходы. В течение указанного периода под руководством государственных структур также было сконструировано множество малых реакторов в целях обеспечения безопасности и для военного применения. Потенциал коренного изменения атомной энергетики, которым обладают сегодняшние малые реакторы, заключается не только в габаритах, но и в том, что в их конструкции преднамеренно используются преимущества малого размера для реализации новаторских систем обеспечения безопасности, схем поставки и экономических моделей.

Сегодня малыми модульными реакторами (ММР) считаются ядерные установки с выходной электрической мощностью от 10 МВт_э до 300 МВт_э. Конструкция таких реакторов предусматривает более высокий уровень модульного исполнения, стандартизации и возможностей заводского изготовления для максимизации экономии ресурсов благодаря серийному производству (или «эффекту серийности»)¹. Соответственно, модули разного типа могут быть транспортированы и смонтированы на площадке, что позволяет улучшить возможности планирования и сократить сроки сооружения.

2.2. Типы разрабатываемых реакторов и текущие проекты

Концепции ММР можно классифицировать различными способами (АЯЭ, 2011). Разрабатываемые конструкции ММР предусматривают использование множества теплоносителей и видов топлива, а также характеризуются разными уровнями готовности технологии (УГТ) и уровнями готовности к лицензированию (УГЛ) (АЯЭ, 2018). Большинство концепций ММР можно подразделить на пять основных категорий² следующим образом:

- **Одномодульные легководные ММР**, в конструкциях которых используется испытанная технология ЛВР и соответствующие виды топлива для создания автономных установок, пригодных к развёртыванию в рамках концепции распределённой генерации или способных заменить малые энергоблоки, работающие на ископаемом топливе.
- **Многомодульные легководные ММР** также основаны на технологии ЛВР и в зависимости от генерирующей мощности могут эксплуатироваться в качестве источников электроэнергии в рамках концепции распределённой генерации или заменять энергоблоки среднего размера, обеспечивающие базовую нагрузку.
- **Мобильные/передвижные ММР** в настоящее время основаны на технологии ЛВР и предусматривают возможность легко реализуемого перемещения установки с одной площадки на другую. В данную категорию входят реакторы плавучих энергоблоков.

¹ Как неоднократно подчёркивается в настоящем документе, эффект серийности – среди прочих условий – является ключевым фактором, определяющим экономическую конкурентоспособность ММР. Данный эффект выражается в двух областях: (1) в преимуществах серийного изготовления оборудования, позволяющих снизить удельные затраты посредством увеличения количества созданных единиц, и (2) в повышении эффективности и рентабельности за счёт приобретения опыта и его применения. В случае ММР, предусматривающих использование модулей малых габаритов, перспектива заводского производства реакторных установок является важным преимуществом.

² Следует отметить, что один и тот же определённый тип конструкции ММР может входить в одну или в несколько категорий.

- **ММР Поколения IV** основаны на отличающихся от применяемых в ЛВР продвинутых технологиях, многие из которых были изучены в недавнем прошлом в рамках Международного форума «Поколение IV» (GIF).
- **Микромодульные реакторы**, в конструкциях которых предусматривается мощность, не превышающая 10 МВт_э, позволяют, как правило, эксплуатацию в полуавтоматическом режиме, а также по сравнению с более крупными ММР обладают характеристиками, способствующими легко реализуемой транспортировке. В большинстве случаев данные установки основаны на концепциях, отличающихся от применяемых в ЛВР, и предполагают широкий ряд технологических решений, в том числе тех, которые используются в реакторах Поколения IV. Микромодульные реакторы предназначены главным образом для эксплуатации вне сети, на отдалённых территориях, где они могут быть конкурентоспособными по сравнению с преобладающими источниками электроэнергии.

Поскольку каждая конструкция предполагает свои собственные технологические и связанные с лицензированием проблемы, а также потенциальные преимущества, в ходе последующих исследований удобнее рассматривать ММР в рамках пяти вышеуказанных категорий, особенно если речь идёт о процессе утверждения применения таких технологий регулирующими органами.

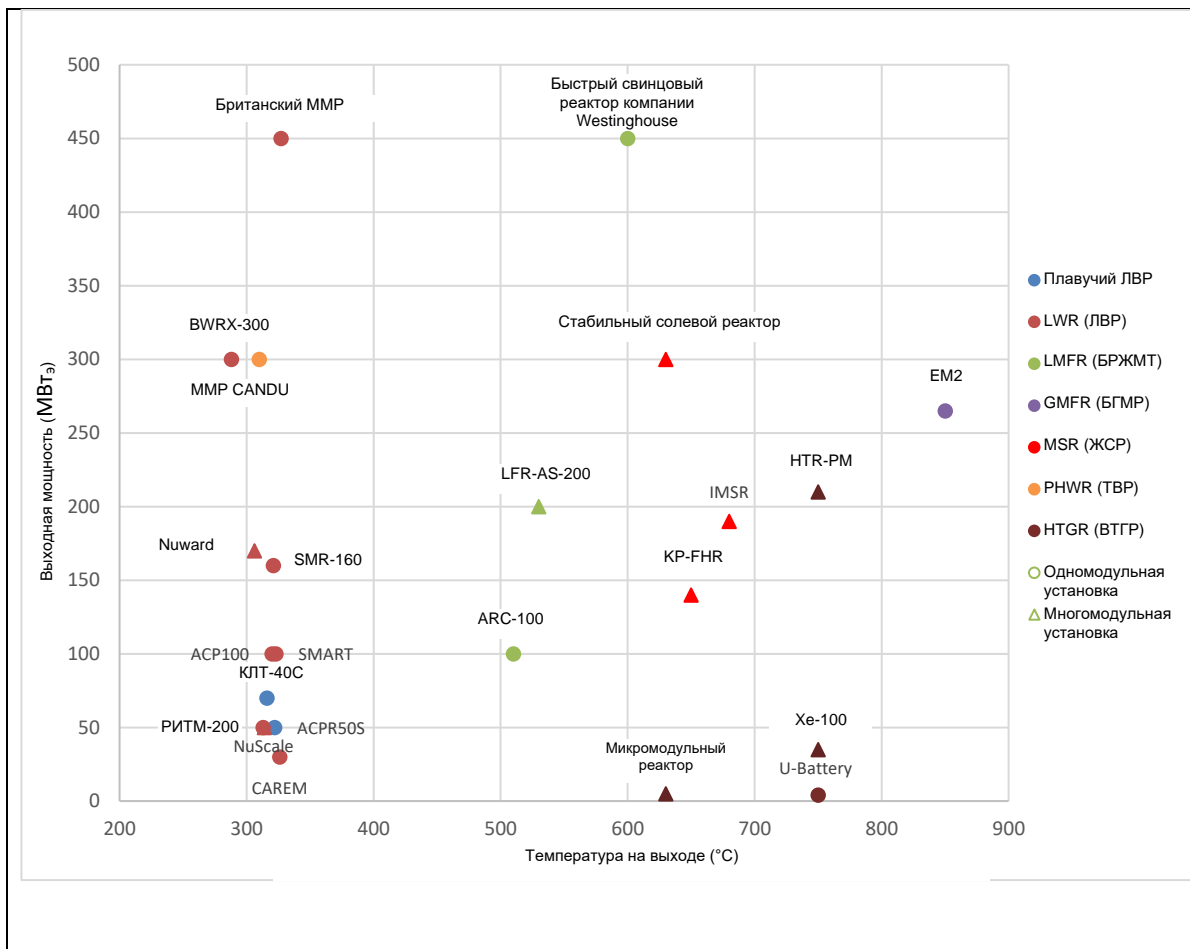
В целом концепции ММР, в основе которых лежит технология ЛВР, являются наиболее зрелыми, обладают самыми высокими УГТ и УГЛ и, по всей вероятности, раньше прочих станут доступными для широкомасштабного развёртывания. Несколько установок находится на этапе сооружения (например, CAREM в Аргентине, ACPRS05S в Китае) или в стадии промышленной эксплуатации (например, КЛТ-40С в России³). Значительный прогресс достигнут в области лицензирования конструкций других типов, первые прототипы которых могут быть построены к 2030 году. Данные технологии представляют собой эволюционные варианты работающих в разных странах мира легководных реакторов Поколения II и Поколения III/III+, в которых используется богатый опыт эксплуатации и регулирования, исчисляемый десятилетиями. Аналогичные выводы могут быть сделаны в отношении технологий тяжеловодных реакторов (PHWR).

По сравнению с ЛВР в технологиях Поколения IV предусматриваются альтернативные теплоносители (т. е. жидкий металл, расплавы солей или газ) и отличающиеся системные решения. Несмотря на отсутствие сравнимого с легководными ММР опыта эксплуатации и регулирования, а также на существующую до сих пор необходимость дополнительных исследований в некоторых областях⁴, в конструкциях на основе реакторов Поколения IV, тем не менее, используются преимущества обширных изысканий и разработок, совершённых в прошлом, на которые могут опираться разработчики и регулирующие органы. Наиболее зрелые решения, предусмотренные в установках Поколения IV, представляют собой металлоохлаждаемые и газоохлаждаемые системы, некоторые из которых находятся в стадии эксплуатации или на этапе сооружения.⁵ Такие конструкции также предоставляют определённые возможности применения в сферах, не связанных с выработкой электроэнергии, благодаря более высоким выходным температурам (см. Рис. 1), а также усовершенствованным ядерным топливным циклам.

На сегодняшний день на разных этапах разработки находится по меньшей мере 72 концепции ММР (МАГАТЭ, 2020), что на 40 % больше, чем в 2018 году (МАГАТЭ, 2018). Репрезентативная выборка разрабатываемых в разных странах мира ММР приводится в табл. 1, где около половины конструкций основаны на технологии ЛВР, а вторая половина — на концепции реакторов Поколения IV. Несмотря на то, что используемый в мировом масштабе термин «ММР» включает малые реакторы всех конструкций, между основными типами ММР существуют значительные различия, особенно в степени применения модулей.

3. Не имеющая аналогов плавучая атомная электростанция «Академик Ломоносов», оснащённая двумя реакторами КЛТ-40С, была подключена к сети 19 декабря 2019 года в Певеке на Чукотском полуострове (Росатом, 2019). Её эксплуатация в полном промышленном режиме, предусматривающая выработку электроэнергии для населения и местных предприятий восточного арктического региона России, была начата 22 мая 2020 года (Росатом, 2020).
4. Определение эксплуатационных характеристик, а также квалификация топливных и конструкционных материалов, моделирование и т. п.
5. В настоящее время в России эксплуатируются реакторы БН-600 и БН-800, а в Китае сооружается реактор на быстрых нейтронах CFR-600. Кроме того, в Китае эксплуатируются высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (HTGR), такие как HTR-10, к тому же в настоящее время ведётся строительство улучшенного варианта — HTR-PM мощностью 210 МВт_э.

Рисунок 1. Выборка конструкций реакторных установок в виде функции выходной мощности, температуры на выходе из активной зоны и конфигурации развёртывания



Примечание. БРЖМТ = быстрый реактор с жидкометаллическим теплоносителем; БГМР = быстрый газоохлаждаемый модульный реактор; ВТГР = высокотемпературный газоохлаждаемый реактор.

Источник: МАГАТЭ (2020).

Таблица 1. Репрезентативная выборка разрабатываемых в разных странах мира конструкций ММР

Конструкция	Полезная мощность каждого реакторного модуля (МВт _т)	Количество реакторных модулей (если применимо)	Тип	Проектировщик	Страна	Статус
Одномодульные легководные ММР						
CAREM	30	1	PWR	CNEA	Аргентина	В стадии сооружения
SMART	100	1	PWR	KAERI	Корея	Конструкция сертифицирована
ACP100	125	1	PWR	CNNC	Китай	Сооружение начато в 2019 году.
SMR-160	160	1	PWR	Holtec International	США	Концептуальное проектирование
BWRX-300	300	1	BWR	GE Hitachi	США – Япония	В рамках процедуры лицензирования в NRC (Комиссия по ядерному регулированию США) и в CNSC (Комиссия по ядерной безопасности Канады) поданы первые тематические отчёты.
MMP CANDU	300	1	PHWR	SNC-Lavalin	Канада	Концептуальное проектирование
Британский ММР	450	1	PWR	Rolls Royce	Великобритания	Концептуальное проектирование
Многомодульные легководные ММР						
NuScale	50	12	PWR	NuScale Power	США	Конструкция сертифицирована. В августе 2020 года конструкция была утверждена NRC.
РИТМ-200	50	2	ЛВП	«ОКБМ Африкантов»	Россия	Наземная АЭС — Концептуальное проектирование
Nuward	170	2–4	PWR	CEA/EDF/Naval Group/TechnicAtom	Франция	Концептуальное проектирование
Мобильные ММР						
ACPR50S	60	1	Плавающий PWR	CGN	Китай	В стадии сооружения
КЛТ-40С	35	2	Плавающий ЛВП	«ОКБМ Африкантов»	Россия	Промышленная эксплуатация
ММР Поколения IV						
Xe-100	80	1–4	HTGR	X-energy LLC	США	Концептуальное проектирование
ARC-100	100	1	LMFR	Advanced Reactor Concepts LLC	Канада	Концептуальное проектирование
KP-FHR	140	1	MSR	Kairos Power	США	Предварительное концептуальное проектирование
IMSR	190	1	MSR	Terrestrial Energy	Канада	Базовое проектирование
HTR-PM	210	2	HTGR	China Huaneng/ CNEC/ Университет Цинхуа	Китай	В стадии сооружения
EM2	265	1	GMFR	General Atomics	США	Концептуальное проектирование
Стабильный солевой реактор	300	1	MSR	Moltex Energy	Великобритания	Предварительное концептуальное проектирование
Sodium	345	1	SFR	Terrapower/GE	США	Концептуальное проектирование
Быстрый свинцовый реактор компании Westinghouse	450	1	LMFR	Westinghouse	США	Концептуальное проектирование
Микромодульные реакторы						
eVinci	0,2–5	1	Реактор с тепловыми трубками	Westinghouse	США	Базовое проектирование
Aurora	2	1	LMFR	Oklo	США	Заявление на получение лицензии подано в NRC.
U-Battery	4	1	HTGR	Urenco & partners	Великобритания	Базовое проектирование
Микромодульный реактор	5–10	1	HTGR	USNC	США	Базовое проектирование

Источник: АЯЭ, МАГАТЭ (2020).

Примечание. BWR = кипящий водяной реактор; CEA = Комиссариат по атомной энергии и альтернативным источникам энергии, Франция; CGN = компания China General Nuclear; CNEA = Национальная комиссия по атомной энергии Аргентины; CNEC = фирма China Nuclear Engineering Corporation; CNNC = компания China National Nuclear Corporation; KAERI = Корейский научно-исследовательский институт атомной энергии; PWR = Реактор с водой под давлением. Если не указано иное, все реакторы являются наземными. Установками «РИТМ-200» уже оснащены атомные ледоколы «Арктика», «Сибирь» и «Урал».

3. Техничко-экономические характеристики ММР

3.1. Ключевые конструкционные особенности ММР

Несмотря на снижение термического КПД в случае некоторых конструкций легководных малых модульных реакторов (легководных ММР) (см. табл. 2), меньшие по сравнению с традиционными крупномасштабными ядерными реакторами габариты ММР дают несколько преимуществ, которыми характеризуется большинство установок, перечисленных в табл. 1:

- **Интегральные конструкции.** Уменьшенные размеры активной зоны позволяют применять интегральные конструкции. Данный тип конструкций предполагает размещение всех элементов ядерной паропроизводящей установки (ЯППУ) в одном корпусе. Такая компоновка, при которой общий объём теплоносителя первого контура, содержащийся в корпусе реактора, является значительно бóльшим, чем в случае традиционной установки с наружными петлями, заметно увеличивает теплоёмкость и тепловую инерцию системы. Благодаря данной конфигурации обеспечивается надёжность внутренне присущих свойств безопасности, а также упрощаются системы, эксплуатация и техническое обслуживание.
- **Внутренне присущая безопасность.** Пониженная выходная мощность и повышенное соотношение поверхности к объёму благодаря меньшим габаритам активных зон увеличивают эффективность систем пассивной безопасности как в нормальных, так и в ненормальных условиях эксплуатации. Например, во многих конструкциях, основанных на технологии ЛВР, предусматриваются очень большие запасы воды для пассивного охлаждения систем реактора даже при чрезвычайных (таких, как потеря внешних источников энергоснабжения) обстоятельствах. Бóльшая степень использования систем пассивного охлаждения обеспечивает возможность разработки упрощённых конструкций, а также оптимизации эксплуатации и технического обслуживания.
- **Уменьшенная суммарная радиоактивность активной зоны.** Уменьшенная суммарная радиоактивность активной зоны имеет свои преимущества как на площадке, так и за её пределами. На площадке требуется меньшее количество средств экранирования, а также снижается воздействие радиации на работников. За пределами площадки более ограниченный уровень радиоактивности, пониженная вероятность аварий и меньший риск радиоактивных выбросов, сопряжённых с высоким уровнем мощности, могут лимитировать необходимость в зонах планирования защитных мероприятий (ЗПЗМ). Такие преимущества означают, что ММР можно размещать в местах, приближённых к потребителям энергии.
- **Лучшие возможности в области модульного исполнения и технологичности изготовления.** Вес и габариты непосредственно определяют, насколько легко могут осуществляться производство, транспортировка, погрузочно-разгрузочные операции и монтаж различных компонентов. Уменьшенные размеры конструкций ММР дают возможность реализации более амбициозных схем модульного исполнения, а также применения новых технологий производства (АЯЭ, 2020).
- **Повышенная гибкость.** Посредством эффективного использования манёвренности, которой обладают реакторы Поколения II (АЯЭ, 2012), в случае ММР возможна бóльшая степень применения режимов следования за нагрузкой благодаря внутренне присущим особенностям конструкции, а также путём оптимизации эксплуатации многомодульных установок (Ингесол и др. (Ingersoll et al.), 2015). В более широком плане под гибкостью ММР также понимаются возможности развёртывания (например, меньшее число ограничений при выборе площадки) и разнообразии предложения (комбинированное производство тепла и электроэнергии).

Указанные ключевые конструкционные особенности могут иметь важное значение в рамках обеспечения безопасности ММР (см. гл. 4) и в то же время усиливать действие нескольких экономических драйверов, которые в конечном счёте будут определять глобальную конкурентоспособность данной технологии.

3.2. Аспекты, связанные с топливным циклом

Разрабатываемые ММР должны предусматривать управление ядерным топливным циклом, что означает либо использование имеющейся инфраструктуры, либо, в некоторых случаях, инвестиции в специальные новые промышленные мощности. Ввиду множества рассматриваемых концепций ММР и общего уровня их технологической зрелости исследуется несколько вариантов топливного цикла. На сегодняшний день лишь немногие разработчики ММР уже полностью определили или заявили о своей стратегии в данной области, в частности, в отношении завершающей стадии топливного цикла (МАГАТЭ, 2020).

Стратегии топливного цикла легководных ММР

Ожидается, что начальная стадия топливного цикла легководных ММР будет совместима с существующими промышленными возможностями, в частности, с точки зрения уровня обогащения (ниже 5 %) или видов топлива и сборки. Разнообразие процессов выгорания и технологий производства топлива также означает, что на первоначальных этапах развития ММР в странах, которые утвердили стратегии по замыканию топливного цикла, отработавшее топливо данных реакторов должно быть совместимо с существующими решениями в области переработки. Исключением является плавучий ММР, разработанный в России, конструкция которого предусматривает уровень обогащения, приближающийся к 20 %. Большинство разработчиков не исключает возможность использования в ММР смешанного оксидного топлива (МОКС-топлива), но обсуждение данного вопроса как приоритетного в отношении таких реакторов происходит редко (МАГАТЭ, 2020).

Пониженный термический КПД, наблюдаемый в конструкциях легководных ММР, подразумевает повышенный расход урана на киловатт-час (кВт-ч) вырабатываемой энергии, что непосредственно повлияет на стоимость топливного цикла. Кроме того, следует учесть предполагаемую более длительную, чем в случае существующих ЛВР, топливную кампанию.¹

Стратегии топливного цикла в случае ММР Поколения IV и микрореакторов

Несмотря на то, что большинство конструкций ММР Поколения IV и микрореакторов предусматривает использование уранового топлива, тем не менее, потребуется разработка новых установок топливного цикла. Ключевая особенность, которую разделяют некоторые реакторы таких концепций, заключается в обеспечении значительно более длительных топливных кампаний. Микрореакторы с тепловыми трубками являются отличным примером: в таких установках интервал между перегрузками топлива длится до 20 лет. При эксплуатации ММР Поколения IV, в которых применяются топливные частицы с трёхслойной оболочкой из изотропных материалов (топливо TRISO) или расплавы солей, могут использоваться преимущества перегрузки топлива без прекращения генерации.

В некоторых конструкциях предусматривается использование в качестве топлива низкообогащённого урана с высоким содержанием (HALEU). Уровень обогащения такого топлива составляет от 5 % до 19,75 %. На сегодняшний день оно производится небольшими партиями для исследовательских реакторов и для изготовления радиоизотопов, применяемых в медицинских целях. В настоящее время топливо HALEU не производится в промышленных масштабах в странах-членах АЯЭ, поскольку существующий промышленный ядерный топливный цикл ограничен 6-процентным уровнем обогащения. Соответственно, используемый сегодня топливный материал HALEU представляет собой продукт обеднения запасов высокообогащённого урана (VOU), имеющихся в США и в России (Агентство по снабжению Евратома (ESA), 2019). Однако, как уже сообщалось Министерством энергетики США (DOE), запасы VOU могут полностью истощиться к 2030–2040 годам.

Без развития мощностей для производства урана HALEU прогресс передовых технологий ММР может быть существенно ограничен. Несмотря на то, что указанный тип урана может также потребоваться для производства некоторых видов толерантного ядерного топлива (ATF), применяемого в ЛВР, данная проблема должна в меньшей степени затрагивать легководные ММР.

Для гарантии надёжности поставок топлива HALEU в будущем необходима модернизация существующей инфраструктуры ядерного топливного цикла с целью обеспечения соответствия потенциальным пределам безопасности по критичности, а именно — создание или усовершенствование мощностей для обогащения, деконверсии и производства. Кроме того, понадобятся новые решения, касающиеся процесса упаковки и транспортировки, особенно в случае перевозок большого количества урана HALEU, которое может быть затребовано в рамках внедрения усовершенствованных ММР в масштабах мира. Проектирование и сертификация новых транспортных контейнеров — сложный

¹ Тем не менее, принимая во внимание прогресс в разработке усовершенствованных видов топлива, данный разрыв может быть преодолен в ближайшие годы, особенно в США.

и дорогостоящий процесс, который требует соответствия нормам Международной организации по стандартизации/Американского национального института стандартов (ISO/ANSI) и утверждения со стороны компетентных органов транспортного управления.

Влияние топлива HALEU на завершающую стадию топливного цикла может потребовать дополнительного анализа. В рамках долгосрочного обращения с отработавшим ядерным топливом и с высокоактивными отходами, образующимися при использовании такого топлива, могут быть необходимы изменения существующих технологий, в том числе модернизация установок по переработке и создание контейнеров новых конструкций для промежуточного хранения ОЯТ.

С другой стороны, в настоящее время использование топлива на основе плутония предусматривается лишь в немногих ММР на быстрых нейтронах Поколения IV. Одним из редких исключений является стабильный солевой реактор компании Moltex, концепция которого разрабатывается частично для того, чтобы предложить решение странам, сталкивающимся со специфическими проблемами обращения с плутонием.

Таблица 2. Характеристики топливного цикла некоторых конструкций ММР

Конструкция	Вид топлива/сборки	Уровень обогащения топлива (%)	Термический КПД (%)	Удельное выгорание (ГВтд/т)	Топливная кампания (в месяцах)
Наземные легководные ММР					
NuScale	Таблетки диоксида урана (UO ₂)/сборка 17x17	<5 %	30 %	>30	24
SMART	Таблетки UO ₂ /сборка 17x17		30 %	<54	30
SMR-160	Таблетки UO ₂ /квадратная сборка		30 %	45	24
Nuward	UO ₂ /сборка 17x17		31 %	-	24
BWRX-300	UO ₂ /сборка 10x10		32 %	49,5	12–24
Британский ММР	UO ₂ /сборка 17x17		35 %	55–60	18–24
Мобильные ММР					
КЛТ-40С	Таблетки UO ₂ в силициновой матрице	18,6 %	23 %	45,4	30–36
РИТМ-200	Таблетки UO ₂ /шестигранная сборка	<20 %	29 %	-	72–84
ММР Поколения IV и микромодульные реакторы					
Auroga	Переработанное топливо HALEU (произведенное первоначально для EBR-II)	-	38 %	-	240
eVinci	Топливо HALEU	5–19,75 %	29 %	-	>36
Natrium	Топливо HALEU	-	-	-	-
ARC-100	Сплав U-Zr	13,1 %	35 %	77	20
Energy Multiplier Module (EM ²)	Карбид урана/шестигранная сборка	~14,5 %	53 %	130	360
Быстрый свинцовый реактор компании Westinghouse	Диоксид урана до перехода на нитриды урана	≤19,7 %	47 %	≥100	≥24
Интегральный жидкосолевой реактор (IMSR)	Циркулирующее топливо в виде расплавленной смеси из фторидов солей и фторида урана	<5%	44 %		84
Стабильный солевой реактор	Статическое топливо в виде солевого расплава (хлориды) с плутонием	Плутоний ядерного класса	40 %	120–200	Перегрузка топлива без прекращения генерации
KP-FHR	Топливо TRISO	19,75 %	44 %		
U-Battery	Топливо TRISO	<20 %	40 %	80	

Источник: АЯЭ, МАГАТЭ (2020).

Примечание. Если не указано иное, все реакторы являются наземными.

3.3. Ключевые экономические драйверы

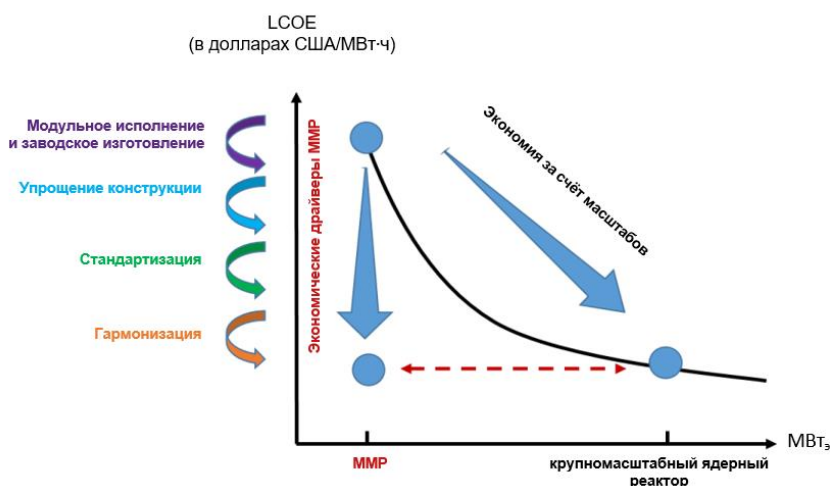
Конструкторы реакторов традиционно увеличивали размеры установок в целях использования преимуществ эффекта масштаба (АЯЭ, 2011). Для нейтрализации обратного эффекта и для повышения конкурентоспособности бизнес-модель ММР, предусматривающая экономию за счёт серийного производства, опирается на четыре ключевых фактора, определяющих величину затрат: упрощение конструкции, стандартизация и модульное исполнение при максимальной степени заводского изготовления и минимизации строительных операций на площадке.

Преимущества серийного строительства были документально подтверждены в других отраслях промышленности, таких как судостроение и авиастроение, где серийное производство характеризуется темпами приобретения опыта, составляющими 10–20 % (NNL, 2014). В случае первых установок ММР серийное производство может также содействовать амортизации единовременных издержек, таких как затраты на научно-исследовательские, опытно-конструкторские работы и на сертификацию конструкции.

Для обеспечения серийного производства в заводских условиях рынок для единой конструкции должен быть достаточно широким, что подчёркивает потенциальные преимущества развития такого глобального рынка и в то же время указывает на то, что только небольшая часть из множества разрабатываемых конструкций может создать такой рынок.

Сотрудничество между органами регулирования ядерной безопасности с целью повышения уровня гармонизации режимов лицензирования должно сыграть главную роль в создании условий для возникновения такого глобального рынка (см. раздел 4.3). Экономические драйверы, определяющие конкурентоспособность ММР, кратко представлены на рис. 2 ниже.

Рисунок 2. Ключевые экономические драйверы ММР, компенсирующие отсутствие экономии за счёт масштабов



Источник: АЯЭ (2020).

Примечание. КВт_э = киловатт электрической мощности.

Упрощение конструкции

Уникальные физические характеристики активных зон меньшего размера с точки зрения усовершенствованных механизмов пассивной безопасности и более высокой степени интегральности конструкции открывают новые возможности упрощения установок ММР. В ММР новых конструкций может исчезнуть потребность в некоторых компонентах активной системы безопасности, например, в насосах охлаждения реактора и в связанных с ними вспомогательных системах,² что представляет собой важное преимущество по сравнению с существующими конструкциями крупномасштабных ЛВР.

2. Например, при эксплуатации ММР конструкций NuScale и BWRX-300 предусматривается естественная циркуляция.

Тепло, выделяемое в активной зоне крупномасштабных ЛВР, обычно отводится элементами активной системы охлаждения, которые являются энергозависимыми. Необходимость обеспечения надёжности охлаждения в различных условиях привела к существованию многоуровневых резервных и вспомогательных систем обеспечения безопасности, что, помимо прочих факторов, способствовало росту затрат, наблюдаемому в случае крупномасштабных ЛВР (Ингесол, 2009). Упрощение систем обеспечения безопасности в конструкциях ММР может положительным образом выражаться в пониженной сложности электростанции и, соответственно, в более низком уровне совокупных капитальных издержек.

Другие возможности упрощения ММР могут быть найдены на уровне общей архитектуры электростанции, начиная от компонентов реактора и заканчивая традиционными строительными конструкциями, а также в области повышения технологичности и применения готовых к использованию компонентов, имеющих в продаже (COTS-компонентов). Некоторые разработчики многомодульных ММР также рассматривают возможности дальнейшего упрощения посредством создания общей инфраструктуры электростанции, например, общего турбинного цеха и диспетчерского зала, в котором располагается щит управления.

Указанные различные методы упрощения могут способствовать снижению затрат на сооружение ММР как непосредственно за счёт уменьшения количества и габаритов компонентов и систем, так и косвенно благодаря использованию преимуществ, появляющихся в области управления проектом. Например, упрощение конструкции может привести к снижению уровня рисков, связанных с доработками, а также к сокращению задержек в ходе строительства, значительное влияние которых наблюдалось в рамках недавних проектов возведения объектов атомной энергетики Поколения III, не имеющих аналогов (FOAK) (АЯЭ, 2020).

Стандартизация

Конструкции ММР отличаются повышенным уровнем стандартизации. Унификация конструкции и её последующее воспроизведение доказали свою эффективность в снижении издержек на крупномасштабные реакторы, поскольку они способствовали накоплению получаемого в процессе реализации проектов опыта и мобилизации цепи поставок в рамках долгосрочных программ сооружения новых объектов (Лаверинг и др. (Lovering et al.), 2016). Указанные преимущества не ограничиваются конструкцией реактора, поскольку они применимы к соответствующим процессам поставки.

На практике, как подчеркнула Всемирная ядерная ассоциация (WNA), выражая результаты деятельности своей Рабочей группы по сотрудничеству в области оценки и лицензирования конструкций реакторов (CORDEL): *«Концепция реакторов стандартизированных конструкций не требует полной идентичности установок. Речь идёт о том, что все энергоблоки, в которых используется унифицированная конструкция, должны по крайней мере иметь одинаковую глобальную архитектуру и изготавливаться в соответствии с идентичными техническими требованиями, касающимися конструкции и компонентов ядерной паропроизводящей установки, а также соответствующих систем обеспечения безопасности»* (WNA, 2015).

Предполагается, что в случае ММР интегральных конструкций реакторные модули и основные системы обеспечения безопасности будут соответствовать данному определению. Дополнительные технические решения могут способствовать стандартизации архитектуры реакторов. Например, возможность подземного размещения ММР и применение систем сейсмической изоляции снизит необходимость адаптации конструкций к местным сейсмическим условиям. Кроме того, более высокая степень унификации может быть достигнута посредством максимального применения COTS-компонентов в конструкциях ММР.

Принимая во внимание переход ММР к этапам демонстрации и развёртывания, раннее вовлечение участников ядерной цепи поставок будет играть главную роль в поддержке процесса стандартизации конструкции.

Модульное исполнение и заводское изготовление

Модульное исполнение представляет собой способ упрощения сооружения посредством разделения составляющих электростанции на комплекты (модули), которые могут быть изготовлены в заводских условиях, транспортированы, а затем смонтированы на площадке. Несмотря на то, что принцип модульности учитывался в рамках сооружения крупномасштабных атомных электростанций,³ преимущества данного метода в случае ММР могут быть ещё большими. В частности, сокращение затрат в результате использования модулей может произойти благодаря изготовлению и/или предварительной сборке модулей за пределами строительной площадки на специализированном предприятии с потенциально высоким уровнем производительности труда и контроля качества и низким уровнем риска в сфере управления проектом. Степень применения модулей может быть разной. Например, конструкции, находящиеся на ранних стадиях разработки, могут отличаться большим потенциалом в отношении модульного исполнения.

3. В числе наиболее актуальных примеров — конструкции AP1000, APR-1400 и ABWR Поколения III (АЯЭ, 2020).

В то же время габариты крупной технологической системы играют определяющую роль в возможности её перевозки. В некоторых отраслях, несмотря на высокий уровень модульного исполнения, по-прежнему существуют транспортные проблемы. Несколько разработчиков ММР объявили, что весь модуль ядерной паропроизводящей установки (ЯППУ) будет доставляться непосредственно на обычных грузовых автомобилях, судах или по железной дороге.

Преимущества модульного исполнения были документально подтверждены в других отраслях промышленности, таких как судостроение и авиастроение, где использование данного метода в заводских условиях способствовало снижению издержек. При общем анализе применения модульных элементов в энергетике наблюдается сокращение сроков поставки на 40 %, а затрат на 20 % (Ллойд (Lloyd), 2019). В рамках сооружения ядерных реакторов модульное исполнение и заводское изготовление уже применимы в объёме, составляющем примерно 30 %, данный уровень может увеличиться до 60–80 % благодаря уменьшенным размерам компонентов в случае принятия более амбициозных стратегий (АЯЭ, 2020). Рост производительности труда, вероятно, связан с повторяемостью операций и с улучшенными возможностями накопления неявных знаний, которые часто утрачиваются на строительных площадках, характеризующихся высоким уровнем текучести персонала.

Изготовление в заводских условиях также может обеспечить дополнительные преимущества, в частности, в области применения новаторских технологий производства, внедрение которых на площадке представляет сложности. Передовые методы производства, такие как лазерная сварка или аддитивные технологии, позволяют снизить издержки и сократить сроки поставки благодаря уменьшению количества сварных швов и отсутствию необходимости в дорогостоящих профилактических осмотрах в процессе эксплуатации. Возможности, открывающиеся за счёт перехода на цифровые технологии и благодаря более тесному взаимодействию технологических линий в рамках так называемой «Индустрии 4.0», также могут способствовать дополнительной экономии времени и средств.

В заключение, использование принципа модульности при сооружении может также принести косвенную выгоду в той степени, в которой сроки строительного процесса будут сокращены и станут более предсказуемыми, что в итоге уменьшит размер премии за риск, ожидаемой некоторыми инвесторами. Кроме того, применение данного подхода означает потенциально укороченный срок выхода на рынок, что может положительным образом отразиться на перспективах рынка ММР (см. раздел 3.5).

Тем не менее, использование модулей при сооружении может сопровождаться определёнными недостатками. Необходимо проведение дополнительных предварительных опытно-конструкторских проработок для определения и надлежащего проектирования различных модулей для снижения строительных рисков в процессе монтажа. Компоненты и материалы для изготовления разных модулей также должны быть закуплены до начала строительства, что увеличивает необходимые начальные инвестиции и, соответственно, в определённой степени нейтрализует некоторые финансовые преимущества (см. раздел 3.4).

3.4. Ценностное предложение ММР

Конструкции ММР способны изменить экономическую модель ядерной энергетики благодаря соответствующему ценностному предложению.

Преимущества в области финансирования

По сравнению с крупномасштабными ЛВР с финансовой точки зрения ММР могут представлять собой привлекательный вариант капиталовложений, особенно в случае либерализованных рынков электроэнергии:

- **Доступность.** Более низкий уровень совокупных капитальных затрат подразумевает меньший объём капитала под риском для частных инвесторов, что может сделать ММР более доступными. В свою очередь, данный более низкий уровень капитала под риском может привлечь новые источники финансирования (например, частный инвестиционный капитал, пенсионные фонды), снизить стоимость капитала, а в итоге и уровень полной приведённой стоимости электроэнергии (LCOE), генерируемой ММР.
- **Сокращённый период окупаемости.** Укороченные сроки сооружения, заявленные разработчиками ММР, будут способствовать дальнейшему уменьшению стоимости финансирования.
- **Адаптивность.** В случае многомодульных ММР возможность добавления модулей и начала выработки электроэнергии постепенно снижает как уровень начальных инвестиций, так и величину капитала под риском, что отражается в уменьшенных финансовых затратах.

- **Стратегия управления инвестиционным портфелем.** В случае многомодульных ММР возможность постепенного добавления реакторных модулей также может позволить инвесторам адаптироваться к изменениям спроса на электроэнергию и денежных потоков/доступности финансирования и, соответственно, улучшить управление финансовыми рисками.

Модель поставки и срок выхода на рынок

Серийное изготовление стандартизированных модулей ММР характеризуется не только преимуществами с точки зрения полной приведённой стоимости, но и означает смену модели поставки. По достижении рынком достаточного уровня зрелости данный метод может способствовать сокращению срока выхода на рынок (т. е. необходимого времени от разработки проекта до ввода реактора в эксплуатацию).

Данное преимущество может быть особенно ценным с учётом срока выхода на рынок ММР по сравнению с другими альтернативными вариантами выработки электроэнергии, обеспечивающими возможность диспетчерского управления, особенно в развивающихся странах с рыночной экономикой, перед которыми стоит проблема удовлетворения быстро растущего спроса на электроэнергию.

Преимущества с точки зрения системных издержек

Потенциал гибкости ММР (как расширенное использование режима следования за нагрузкой, так и возможности применения, не связанные с выработкой электроэнергии), а также способность предоставлять технологические услуги для сети (регулирование частоты, обеспечение инерции, управление реактивной мощностью и т. д.) могут обеспечить некоторые преимущества в области оптимизации системных издержек⁴. Такие преимущества проявляются на системном уровне в той степени, в которой возможности ММР снижают потребность в альтернативных и потенциально более дорогостоящих (например, аккумуляторы, управление спросом), а также характеризующихся высоким уровнем углеродосодержащих выбросов (например, угольные, мазутные и газовые электростанции) источниках гибкости и технологических услугах. Уровень заинтересованности частных инвесторов в указанных преимуществах будет зависеть от ценности (и, следовательно, от цены), которую будущие рынки электроэнергии придадут данным характеристикам.

3.5. Рыночные перспективы ММР

На данном этапе рыночные перспективы ММР по-прежнему характеризуются значительным уровнем неопределённости как в плане разработки технологий, так и в отношении готовности к лицензированию (см. вставку 2). Стоимостная конкурентоспособность ММР неразрывно связана с масштабом и устойчивостью глобального рынка, а также с уровнем нормативной и политической поддержки, необходимой для обслуживания данного развивающегося рынка.

ММР разрабатываются отчасти для расширения рынка применения ядерной энергии, выходящего за пределы традиционных схем обеспечения базовой нагрузки в централизованной системе электроснабжения. На стратегическом уровне использование данной технологии отражается в трёх пересекающихся рыночных возможностях (см. рис. 4):

- декарбонизация энергетических систем;
- сопровождение использования переменчивых возобновляемых источников энергии (ПВИЭ);
- облегчение доступа к ядерной энергии в новых секторах и/или во вновь осваиваемых регионах.

Декарбонизация энергетических систем

Политика декарбонизации может содействовать увеличению числа ММР. Например, в электроэнергетическом секторе ММР можно рассматривать как удобный, с учётом габаритов реактора, вариант замены ряда выводимых из эксплуатации угольных электростанций. Около 60 гигаватт электрической мощности (ГВт_э) производится энергоблоками, построенными в США до 1976 года, которые представляют собой установки, рассчитанные на 50–300 мегаватт электрической мощности (МВт_э), что практически соответствует уровням, предлагаемым в случае ММР (АЯЭ, 2016).

4. Под системными издержками понимаются совокупные затраты, отличные от издержек на уровне электростанции, которые возникают при поставке электроэнергии в рамках заданной нагрузки и заданного уровня надёжности электроснабжения. Системные эффекты являются результатом влияния, которое интеграция определённого источника выработки электроэнергии оказывает на всю энергосистему (АЯЭ, 2019b).

ММР также могут способствовать декарбонизации других секторов энергетики, таких как централизованное теплоснабжение районного масштаба, для обеспечения которого температура на выходе должна находиться в пределах 80–200°C, что легко достижимо благодаря использованию легководных ММР. Например, в Финляндии недавно было предложено использовать ММР для централизованного теплоснабжения районного масштаба в качестве реальной альтернативы, в рамках которой ММР приближены к центрам спроса и позволяют полную декарбонизацию сектора теплоснабжения (Партанен (Partanen), 2019). Аналогичным образом Институт энергетических технологий Великобритании (Energies Technology Institute, 2015) предполагает, что ММР, предусматривающие когенерацию, могут иметь важное значение в энергетической системе Великобритании 2030 года, обеспечивая низкоуглеродное теплоснабжение жилого сектора и в то же время улучшая экономические показатели ММР.

Более высокий уровень температур (т. е. 450–850°C), обеспечиваемый некоторыми ММР Поколения IV, может открыть новые перспективы в области декарбонизации промышленных секторов, характеризующихся трудностями в борьбе с выбросами, посредством использования низкоуглеродного высококачественного тепла, вырабатываемого в рамках технологических процессов. Сферы потенциального применения ММР включают нефтепереработку, паровой риформинг природного газа и термохимическое производство водорода.

В последние годы Саудовская Аравия также заявляла о своём интересе к ММР для удовлетворения потребностей в опреснении воды. В марте 2015 года Корейский научно-исследовательский институт атомной энергии (KAERI) подписал меморандум о взаимопонимании с Центром атомной и возобновляемой энергетики имени короля Абдаллы (K.A.CARE) для оценки возможностей сооружения двух реакторов SMART в Саудовской Аравии.

Сопровождение использования переменчивых возобновляемых источников энергии (ПВИЭ)

Присущие ММР характеристики следования за нагрузкой делают их пригодными к гибкой эксплуатации в энергосистемах с переменной остаточной нагрузкой, например, в регионах, стремящихся к высокому уровню использования ПВИЭ (ветровой и фотоэлектрической солнечной энергии (PV)). Поддержка развёртывания ПВИЭ также может рассматриваться в рамках интегрированных «гибридных» энергетических систем, что подразумевает совмещённую эксплуатацию ММР в областях применения, не связанной с выработкой электроэнергии (производство водорода, синтетического топлива и опреснение), в качестве средства содействия интеграции источников ветровой и фотоэлектрической солнечной энергии (Гарсия и др. (Garcia et al), 2016; Чен и др. (Chen et al), 2016). Такие интегрированные системы могут повысить общий уровень надёжности и устойчивости энергосистемы, что делает их экономически привлекательными.

Вставка 1. Недавние оценки потенциального рынка ММР

В 2016 году АЯЭ проводило исследования, касающиеся потенциального рынка ММР в ближайшей (2035 год) перспективе (АЯЭ, 2016), и разработало два сценария, в которых отражается неопределённость в плане развития рынка:

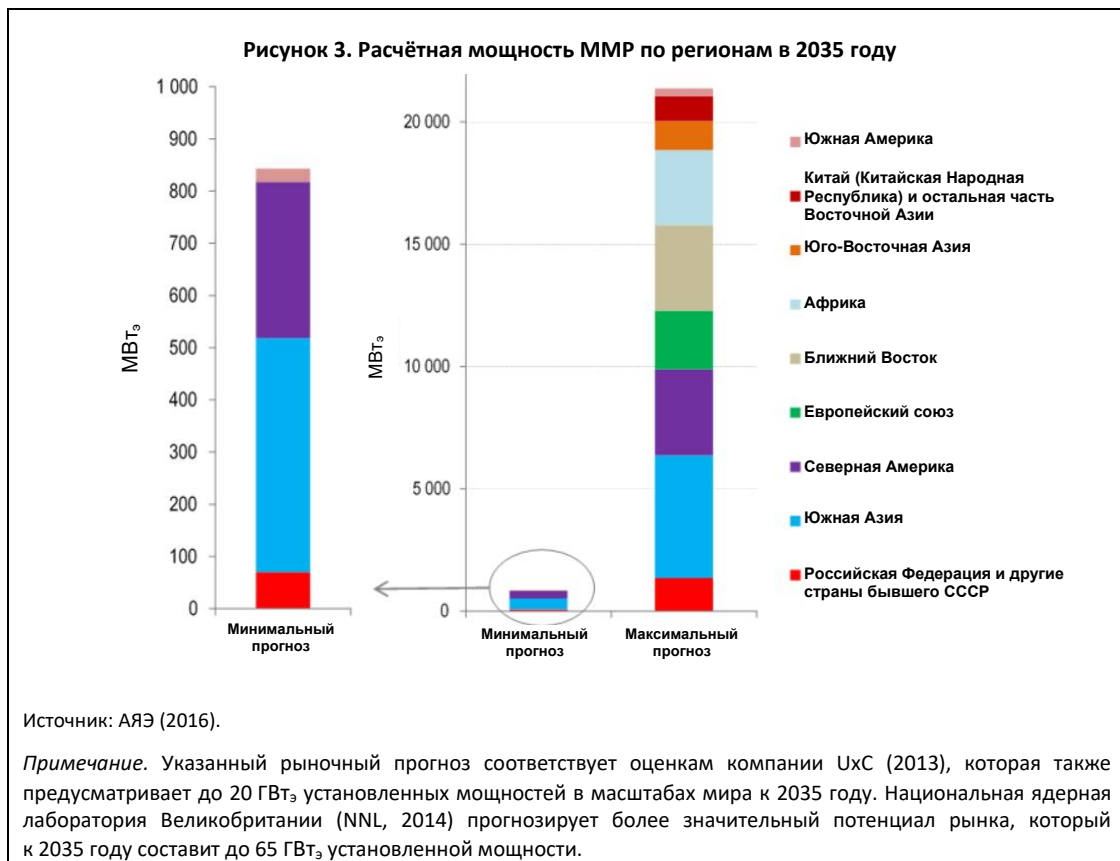
Оптимистический сценарий, предусматривающий высокий уровень развёртывания, который предполагает успешное лицензирование ММР и обеспечение производства в заводских условиях с соответствующей цепью поставок, что приведёт к достижению стоимостной конкурентоспособности.

Консервативный сценарий, предусматривающий низкий уровень развёртывания, в рамках которого ММР будут считаться дорогостоящими с точки зрения сооружения и эксплуатации и, соответственно, будет реализовано лишь ограниченное число проектов, включая прототипы и электростанции, расположенные в труднодоступных/изолированных регионах.

В двух указанных сценариях учитывается ряд определяющих рыночных факторов, таких как развитие сети, ожидаемый уровень применения эпизодической генерации, сооружение новых ядерных объектов в рамках сценариев Международного энергетического агентства (МЭА), а также государственная политика в области использования ядерной энергии.

Согласно сценарию, предусматривающему высокий уровень развёртывания, к 2035 году будет внедрено до 21 ГВт_т ММР в нескольких регионах мира, что составит около 3 % совокупных установленных ядерных мощностей в глобальном масштабе (см. рис. 3). Таким образом, доля ММР в общем объёме сооружаемых новых ядерных объектов в 2020–2035 годах может приблизиться к 9 %. Со своей стороны, сценарий, предусматривающий низкий уровень развёртывания, предполагает внедрение ограниченного количества мощностей в пределах 1 ГВт_т, представленных главным образом прототипами в странах, где реализуются государственные программы, касающиеся ММР.

Можно ожидать, что по завершении 2035 года дальнейшее развитие рынка ММР будет происходить в соответствии с целями декарбонизации, которые будут стимулировать потребность в низкоуглеродных источниках электроэнергии, обеспечивающих возможность диспетчерского управления. Таким образом, понимание различных рыночных возможностей ММР важно для оценки их долгосрочного потенциала в данной области.



Облегчение доступа к ядерной энергии в новых секторах и/или во вновь осваиваемых регионах

На сегодняшний день крупномасштабные атомные электростанции главным образом участвуют в производстве электроэнергии в режиме базовой нагрузки в рамках централизованных и взаимосвязанных энергосистем. Однако развитие низкоуглеродной ядерной энергетики имеет определённые пределы в регионах, где экономические, географические и/или связанные с сетью ограничения затрудняют сооружение крупномасштабных атомных электростанций.

ММР могут быть развёрнуты в отдалённых областях, которые не подключены к сети, в регионах, располагающих небольшими электрическими сетями, или в зонах, где число площадок, подходящих для возведения крупномасштабных атомных электростанций, ограничено. Например, в дорожной карте развития канадских ММР 2018 года (Правительство Канады, 2018) определён ряд труднодоступных населённых пунктов и горнодобывающих предприятий, где ММР — и в частности, микромодульные реакторы — могут быть экономически конкурентоспособными в качестве замены дизельных генераторов. Модульность, гибкость и низкий уровень требований, предъявляемых к ММР сетью, повышают их привлекательность. Однако такие узконаправленные рынки редко встречаются в странах с развитой ядерной энергетикой (Канада, Россия и США являются редким исключением).

В более общем плане в расширенный таким образом ядерный рынок могут войти страны, в которых ядерная энергия не используется в настоящее время. В частности, ММР могут представлять особые преимущества с точки зрения доступности и сроков выхода на рынок в случае государств, которые уже располагают хорошо развитой ядерной инфраструктурой, созданной в результате научно-исследовательской деятельности в данном направлении.

Рисунок 4. Применимость ММР



4. Аспекты лицензирования и регулирования

4.1. Соображения безопасности

Конструкционные особенности активных зон малых реакторов, описанные в разделе 3.1, также предполагают наличие внутренне присущих свойств безопасности, благодаря которым малые модульные реакторы (ММР) имеют более совершенную модель глобального обеспечения безопасности:

- **Эффективность систем пассивной безопасности.** Благодаря более широкому использованию механизмов пассивной безопасности уменьшается необходимость в активных системах, что в перспективе упрощает оценку безопасности и сокращает число аварийных режимов. Кроме того, повышенное соотношение поверхности к объёму активных зон малых реакторов позволяет улучшить режимы расхолаживания реактора, например, посредством естественной циркуляции, что содействует увеличению времени, предусмотренного для аварийного реагирования.¹
- **Меньшее количество и пониженный уровень тяжести аварийных режимов.** Сочетание повышенных уровней упрощения и интегральности конструкции выражается в меньшем числе аварийных режимов. Например, меньшее количество случаев нарушения целостности корпуса реактора снижает число возможных точек утечки и, таким образом, конструкция становится более устойчивой к авариям с потерей теплоносителя (ЛОСА). Интеграция регулирующих стержней в корпус реактора также уменьшает риск аварий с их выбросом. Кроме того, повышенная тепловая инерция и пониженная плотность энерговыделения, которыми характеризуются интегральные конструкции, проявляются в замедленном срабатывании при температурных переходах, что, соответственно, увеличивает запас безопасности.
- **Уменьшенные зоны планирования защитных мероприятий (ЗПЗМ) за пределами площадки.** Пониженная суммарная радиоактивность активной зоны в сочетании с очень высоким уровнем надёжности систем пассивной безопасности выражается в меньшей потребности в средствах экранирования и в меньшей площади зон планирования защитных мероприятий (ЗПЗМ). С учётом достижения зрелости некоторыми конструкциями ММР могут появиться возможности дальнейшего уменьшения ЗПЗМ.

Особенности ММР также делают возможным подземное размещение, обеспечивая больший уровень защищённости от опасностей природного (например, сейсмические явления или крепкий ветер, в зависимости от местонахождения площадки) или техногенного (например, падение воздушного судна) характера.

Все описанные выше свойства безопасности предусматриваются как в конструкциях легководных ММР, так и в случае ММР Поколения IV. Тем не менее, в конструкциях последних могут использоваться усовершенствованные средства обеспечения безопасности.

4.2. Возможность усовершенствования режимов лицензирования

Действующие системы лицензирования, как правило, основаны на обширном опыте эксплуатации крупномасштабных АЭС с единичными энергоблоками, оборудованными ЛВР, в которых применяется урановое оксидное топливо с обогащением ниже 5 %. Разрабатываемые ММР, в основе которых лежит технология ЛВР, характеризуются аналогичными условиями эксплуатации и конфигурацией загрузки топлива, что должно облегчить процесс их лицензирования. Упрощение конструкции и технических решений в рамках указанных концепций должно снизить количество аварийных режимов, требующих учёта, а также сделать менее сложным процесс определения последствий. Однако ввиду ограниченного опыта эксплуатации новых конструкций данного типа возникают проблемы, касающиеся демонстрации

¹ Аварийное реагирование — это время между началом аварии и моментом, требующим вмешательства оператора во избежание серьёзных последствий.

и утверждения обоснования безопасности. Для эффективного развёртывания ММР необходим учёт особенностей в области регулирования; например, использование всех внутренне присущих свойств безопасности и внедрение многомодульных конфигураций подразумевают определённые аварийные режимы и последствия, которые являются относительно новыми для регулирующих органов и требуют тщательного анализа.

Кроме того, альтернативные решения, касающиеся топлива и/или теплоносителя, выражаются в больших отклонениях от ранее применявшихся в области ядерного регулирования парадигм и могут потребовать от соответствующих полномочных органов более гибких подходов при лицензировании, а также значительного объёма компетенций в новых областях. В то же время проектировщики должны доказать, что надлежащим образом все возможные аварийные режимы были проработаны и их последствия смягчены. Регулирование, в основе которого лежит подход, учитывающий эффективность, является более предпочтительным при анализе разработок ММР, поскольку он оказался более гибким в случае реакторов новых конструкций (Сайнати и др. (Sainati et al.), 2015). Привлекательность Канады для поставщиков ММР можно частично объяснить принятыми в этой стране гибкими принципами регулирования, позволяющими проектировщикам показать, каким образом их концепции обеспечивают соответствие каждому функциональному критерию. Если требование доказательств внутренней присущей безопасности, которой обладают конструкции ММР, можно разумно считать выполнимым, проектировщики должны быть способны продемонстрировать, что уменьшение площади ЗПЗМ и/или числа аттестованных сотрудников на площадке не повлияет на соответствие императивам обеспечения безопасности и на доверие общественности.

В случае некоторых характеристик ММР могут возникнуть трудности в области соблюдения общих требований обеспечения безопасности. Модульное исполнение и производство в заводских условиях крупных частей реактора (в том числе активной зоны) могут, например, привести к появлению проблем, касающихся существующей системы национальных и международных перевозок ядерных материалов. Степень вовлечения регулирующих органов в производственный процесс вместе с вопросом международного лицензирования реакторных модулей и отдельных компонентов также представляют собой новые сложности. Многомодульные конструкции ММР могут потребовать особого внимания в сфере обеспечения ядерной безопасности ввиду использования общих систем, а также перемещения производства и сооружения площадок на заводы. Указанные отличия в сравнении с традиционными атомными электростанциями могут повлиять на метод и место проведения предварительных испытаний электростанций. Данные различия могут обуславливать предполагаемые этапы лицензирования ММР и быть проблематичными с точки зрения традиционной процедуры лицензирования (МАГАТЭ, 2019).

Международное сотрудничество может содействовать решению данных проблем, возникающих в рамках государственного и транснационального нормативно-правового регулирования, например, путём создания международного форума, объединяющего страны, в которых активно реализуется политика развития ММР, для координации разработки специфических методов лицензирования ММР разных классов.

4.3. Оптимизация лицензирования и регулирования

Системы нормативного регулирования могут значительно отличаться в разных странах в отношении уровня категоричности предписания установленных руководств. Каждое государство обеспечивает соответствие требований безопасности национальным интересам и текущей практике нормативного регулирования, одновременно поддерживая доверие общественности к решениям регулирующего органа. Тем не менее, регулирующие организации могут сотрудничать в сфере лицензирования определённой конструкции. Многообещающим примером является степень сближения разных стран, которая была достигнута в ряде областей в рамках Многонациональной программы оценки новых проектов АЭС (MDEP).

Существуют возможности достижения более высокой степени гармонизации в сфере регулирования, особенно на трёх следующих уровнях (АЯЭ, 2020):

- **нормативно-правовая база** (органы государственного управления);
- **руководства по лицензированию и регулированию** (органы ядерного регулирования);
- **нормы и общепринятая практика** (промышленность).

На каждом уровне возникает несколько проблем и даже если достижение абсолютной гармонизации маловероятно (особенно на уровне органов государственного управления), существует возможность определения специфических областей, позволяющих оптимизацию. В данном контексте международное сотрудничество является необходимым.

С практической точки зрения следующим этапом может стать рассмотрение возможностей гармонизации применительно к конкретной конструкции ММР или к категории конструкций со стороны группы заинтересованных стран, разделяющих схожие позиции. Одним из примеров является заключение, сделанное участниками Форума регулирующих органов, организованного Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ), согласно которому концепция глубокошелонированной защиты (ГЭЗ) применима в случае ММР и должна рассматриваться в качестве фундаментального требования при проектировании и демонстрации безопасности ММР. Кроме того, существующие стандарты безопасности МАГАТЭ уже предусматривают ЗПЗМ, а также ГЭЗ и распространяются на реакторы новых конструкций (включая ММР). Тем не менее, группа также пришла к выводу о том, что развёртывание ММР может потребовать гибкой нормативной базы для решения специфических проблем безопасности, связанных с новшествами, которыми характеризуются предлагаемые конструкции, такими как использование систем пассивной безопасности; многомодульное, многоблочное исполнение или запроектные условия; практическое устранение ситуаций, которые могут привести к массивным радиоактивным выбросам (МАГАТЭ, 2020).

В случае легководных ММР гармонизация лицензионных требований и процессов может облегчить развёртывание таких реакторов в разных странах без необходимости существенной адаптации к государственным нормам. Конструкционные изменения будут прежде всего продиктованы характеристиками конкретных площадок. Кроме того, закупка различных компонентов на местных рынках будет упрощена, что в свою очередь позволит создать глобальные рынки и глобальные цепи поставок. Таким образом, гармонизации отводится главная роль в обеспечении экономии от серийного производства, являющейся необходимым условием конкурентоспособности и рентабельности данной технологии.

5. Нормативно-правовая база

Существует несколько правовых вопросов, связанных с внедрением технологий малых модульных реакторов (ММР), однако ни один из них не является непреодолимым препятствием. Проблемы такого плана в большей степени касаются типа выбранной технологии ММР, особенно в случае микромодульных реакторов, поскольку по своей природе они отличаются от электростанций, оборудованных многомодульными ММР. Соответственно, данные аспекты представлены ниже только в общих чертах.

5.1. Основные правовые акты международного и регионального значения, распространяющиеся на ММР

Безопасность

На «ядерные установки» распространяется как Конвенция о ядерной безопасности (КЯБ)¹, так и Директива обеспечения безопасности Евратома 2009 года² с поправками 2014 года³. Согласно КЯБ, под «ядерной установкой» понимается «любая наземная атомная электростанция, предназначенная для гражданских целей, [находящаяся] в юрисдикции [Договаривающейся стороны]» (статья 2(i)). При определении применения КЯБ к ММР возникают вопросы интерпретации терминов «наземная» и «атомная электростанция». Следовательно, первым возникает вопрос о типе технологии ММР, выносимой на обсуждение. Поскольку вышеприведённое определение ограничивается «наземными» АЭС, можно предположить, что плавучие ММР останутся за рамками действия КЯБ, тем не менее, вопрос распространения конвенции на другие типы мобильных ММР остаётся без ответа. В то время как несоответствие микромодульных реакторов определению атомной электростанции согласно КЯБ⁴ может быть предметом споров, вопрос о том, что является, а что не является атомной электростанцией, остаётся открытым. Распространение КЯБ на будущие ММР не должно представлять чрезмерные трудности,

1. Конвенция о ядерной безопасности (КЯБ) (1994), док. МАГАТЭ INFCIRC/449, 1963 UNTS 293, вступила в силу 24 октября 1996 года. КЯБ — конвенция стимулирующего характера, подписанная 89 сторонами (в том числе Евратомом), целью которой, в частности, является достижение и поддержание высокого уровня ядерной безопасности в масштабах мира путём усиления мер, принимаемых в национальном контексте, и посредством расширения международного сотрудничества, в том числе, если применимо, в области технических аспектов обеспечения безопасности.
2. Директива Совета ЕС 2009/71/Евратом от 25 июня 2009 года (Директива обеспечения безопасности 2009 года), устанавливающая рамки по обеспечению безопасности ядерных установок в масштабах Европейского сообщества, Официальный вестник Европейского союза (ОJ) L 172 (от 2 июля 2009 года). Указанная директива обязательна для государств-членов Европейского союза (ЕС) и нацелена на поддержание и постоянное усовершенствование средств ядерной безопасности, а также на обеспечение странами-членами ЕС соответствующих условий в национальном контексте для гарантии высокого уровня ядерной безопасности, направленной на защиту персонала и населения от опасностей, которые возникают вследствие ионизирующего излучения ядерных установок. Многие положения воспроизводят предписания КЯБ, однако в рамках данной директивы существует дополнительное требование проведения экспертных оценок каждые десять лет.
3. Директива совета ЕС 2014/87/Евратом от 8 июля 2014 года (Директива обеспечения безопасности 2014 года с поправками), вносящая поправки в Директиву 2009/71/Евратом и устанавливающая рамки в области обеспечения безопасности ядерных установок в масштабах Европейского сообщества, ОJ L 219 (от 25 июля 2014 года). В 2014 году в Директиву обеспечения безопасности 2009 года с учётом уроков, извлечённых после аварии на атомной электростанции "Фукусима-1", были внесены изменения и дополнительные требования, касающиеся полномочий и независимости государственных органов ядерного регулирования, более частого проведения экспертных оценок по специфическим вопросам безопасности, большей прозрачности и продвижения действенной культуры ядерной безопасности.
4. Определение ядерной установки согласно КЯБ не распространяется на исследовательские реакторы. МАГАТЭ (2006), Кодекс поведения по обеспечению безопасности исследовательских реакторов, док. МАГАТЭ IAEA/CODEOC/RR/2006, стр. 1.

поскольку страны, использующие ядерную энергию, уже работают в рамках данной конвенции. Однако страны, в которых ещё не используется ядерная энергия, могут столкнуться с проблемами создания правовых, нормативных, организационных и технических основ, требующихся в рамках КЯБ до внедрения ММР. Например, к некоторым из указанных обязательств относятся: создание и поддержание нормативно-правовой базы для управления безопасностью ядерных установок (статья 7), создание регулирующего органа и обеспечение его «надлежащими полномочиями, компетенциями, финансовыми и человеческими ресурсами для выполнения возложенных на него обязанностей» (статья 8), а также предоставление адекватных финансовых средств (статья 11(1)) и необходимого квалифицированного персонала (статья 11(2)).

В рамках ЕС аналогичный вопрос распространения определения касается Директивы обеспечения безопасности, в которой под «ядерной установкой» понимается, в частности, «атомная электростанция» (статья 3(1)(а)). Несмотря на то, что АЭС, которые не относятся к категории наземных, не исключаются, остаются вопросы, касающиеся типов ММР, на которые распространяется данное определение. Можно привести аргумент, основанный на том, что Директива обеспечения безопасности действует в отношении всех ММР, поскольку «ядерные установки» по определению включают «исследовательские ядерные реакторы», следовательно, можно сделать обоснованный вывод о том, что ММР представляют собой промежуточную между традиционными крупномасштабными атомными электростанциями и исследовательскими реакторами категорию и, таким образом, соответствуют данному определению. Серия обсуждений уже была проведена по одному типу ММР — по легководным ММР — на которые распространяется действие Директивы обеспечения безопасности.⁵ Всё будет зависеть от масштабов её применения, тем не менее, европейским странам, которые впервые начинают осуществлять ядерно-энергетическую программу, предусматривающую использование ММР, понадобится значительное время для соблюдения положений Директивы обеспечения безопасности.

Охрана окружающей среды и участие общественности

Как и в случае КЯБ, потребуются дополнительные процессуальные действия в отношении интерпретации определения видов деятельности в рамках Конвенции об оценке воздействия на окружающую среду в трансграничном контексте (Конвенция Эспо)⁶ и Конвенции о доступе к информации, участии общественности в процессе принятия решений и доступе к правосудию по вопросам, касающимся окружающей среды (Орхусская конвенция),⁷ в обоих документах договаривающимися сторонами являются главным образом европейские страны. Кроме того, как и в случае обеспечения безопасности, дополнительные требования распространяются на государства-члены ЕС согласно положениям Директивы ЕС по оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС)⁸, а также в соответствии с многочисленными директивами⁹ и нормами, связанными с Орхусской конвенцией.

В числе различных мер, предусмотренных в рамках Конвенции Эспо, от договаривающихся сторон требуется выполнение процедуры по оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС), которая подразумевает участие представителей общественности как от стороны происхождения, так и от затрагиваемых сторон,¹⁰ а также подготовку ОВОС (статья 2(2)) в отношении планируемых видов деятельности, перечисленных в тексте конвенции как «способных оказать значительное негативное

5. См. рабочую программу Евратома 2018 года, «NFRP-2018-3: исследования по безопасности легководных малых модульных реакторов» (*NFRP-2018-3: Research on the safety of Light Water Small Modular Reactors*), стр. 9.
6. Конвенция об оценке воздействия на окружающую среду в трансграничном контексте (Конвенция Эспо) (1991), 1989 UNTS 310, вступила в силу 10 сентября 1997 года.
7. Конвенция о доступе к информации, участии общественности в процессе принятия решений и доступе к правосудию по вопросам, касающимся окружающей среды (Орхусская конвенция) (1998), 2161 UNTS 450, вступила в силу 30 октября 2001 года.
8. Директива Европейского парламента и совета 2014/52/ЕС от 16 апреля 2014 года, вносящая поправки в Директиву 2011/92/ЕС об оценке воздействия определённых государственных и частных проектов на окружающую среду, Официальный вестник Европейского союза (ОJ) L 124 (от 25 апреля 2014 года).
9. Директива Европейского парламента и совета 2003/4/ЕС от 28 января 2003 года о свободном доступе к информации об окружающей среде, аннулирующая Директиву совета ЕС 90/313/ЕЭС, ОJ L 41, стр. 26–32 (от 14 февраля 2003 года); Директива Европейского парламента и совета 2003/35/ЕС от 26 мая 2003 года, предусматривающая участие общественности в разработке определённых планов и программ, касающихся окружающей среды, и вносящая изменения относительно участия общественности и доступа к правосудию в Директивы Совета ЕС 85/337/ЕЭС и 96/61/ЕС, ОJ L 156, стр. 17–25 (от 26 июня 2003 года).
10. В статье 1(iii) Конвенции Эспо «стороной происхождения» считается(ются) «Договаривающаяся(иеся) сторона(ы) [настоящей] Конвенции, под юрисдикцией которой(ых) намечается осуществлять планируемую деятельность», а «затрагиваемой стороной» — «Договаривающаяся(иеся) сторона(ы) [настоящей] Конвенции, которая(ые) может(могут) быть затронута(ы) трансграничным воздействием планируемой деятельности».

трансграничное воздействие». Пункт 2 Добавления I к Конвенции Эспо в первоначальной редакции предусматривает перечень предметных видов деятельности, включающий: «атомные электростанции и другие ядерные реакторы (кроме исследовательских установок для производства и переработки делящихся и воспроизводящих материалов, мощность которых не превышает 1 киловатт постоянной тепловой нагрузки)». Данное определение было несколько расширено в соответствии со второй поправкой к Конвенции Эспо (но касается только тех договаривающихся сторон, которыми данная поправка ратифицирована, утверждена или принята) с учётом «демонтажа и вывода из эксплуатации таких электростанций или реакторов» с оговоркой, что «для целей настоящей Конвенции атомные электростанции и другие ядерные реакторы утрачивают статус такой установки после полного удаления с площадки на постоянной основе ядерного топлива и других элементов, загрязнённых радиоактивными веществами». Определения, содержащиеся в Конвенции Эспо, несколько отличаются от определений, приведённых в КЯБ и в Директиве обеспечения безопасности, поскольку определения Конвенции Эспо распространяются на «другие ядерные реакторы».

Даже если положения Добавления I к Конвенции Эспо являются действующими в отношении ММП, вторым этапом процесса проверки является определение возможности оказания такими установками существенного негативного трансграничного воздействия. Можно утверждать, что улучшенные характеристики обеспечения безопасности конструкций ММП гарантируют отсутствие такового, особенно если энергоблоки расположены достаточно далеко от границы. Тем не менее, существование данной возможности должно оцениваться в каждом конкретном случае. Неуверенность, связанная с указанной проблемой, может привести к возникновению вопросов, подаваемых на рассмотрение в Комитет по выполнению Конвенции Эспо, который проверяет выполнение сторонами своих обязательств в рамках конвенции, или к процедуре разбирательства, осуществляемой комиссией по запросу в рамках Конвенции Эспо (статья 3(7) и Добавление IV).

Орхусская конвенция предусматривает три основных принципа: 1) доступ к информации, 2) участие общественности в процессе принятия решений и 3) доступ к правосудию. Каждый принцип обеспечивает определённые права и применяется к разным видам деятельности. Необходимо отметить, что терминам «общественность» и «заинтересованная общественность», которой предоставляются права, в тексте Орхусской конвенции даётся очень широкое толкование и, как изложено в статье 3(9), «в рамках соответствующих положений настоящей Конвенции общественность обладает доступом к информации, располагает возможностью участвовать в процессе принятия решений и имеет доступ к правосудию по вопросам, касающимся окружающей среды, без дискриминации по признаку гражданства, национальности или местожительства, а в случае юридического лица без дискриминации по признаку зарегистрированного местонахождения или фактического центра деятельности».

Первый основной принцип, предусматривающий предоставление по запросу информации об окружающей среде, а также её проактивный сбор и распространение, применяется независимо от вида рассматриваемой деятельности. В случае второго основного принципа, как и в отношении второй поправки к Конвенции Эспо, в Добавлении I «атомные электростанции и другие ядерные реакторы» цитируются в перечне предусмотренных видов деятельности с идентичной оговоркой. Однако в данном документе не предусматривается второй этап проверки возможности оказания в ходе осуществления соответствующей деятельности значительного негативного трансграничного воздействия. Если указанное определение распространяется на все или на некоторые технологии ММП, заинтересованной общественности должна быть предоставлена информация о планируемом виде деятельности, а также обеспечена возможность подачи замечаний. Кроме того, результаты общественного участия должны учитываться в ходе принятия окончательного решения (статья 6). Если представители общественности считают, что их права в рамках первого и второго принципов были нарушены, право доступа к правосудию гарантируется третьим основным принципом, который предусматривает процедуры осуществления общественностью собственных прав в соответствии с Орхусской конвенцией.

5.2. Ответственность за ядерный ущерб перед третьей стороной и ММР

Международные конвенции, определяющие ответственность за ядерный ущерб перед третьей стороной:

- Парижская конвенция об ответственности перед третьей стороной в области ядерной энергии («Парижская конвенция» или ПК),¹¹ изменения к которой начнут действовать в ближайшем будущем в рамках ещё не вступившего в силу протокола 2004 года («пересмотренная Парижская конвенция» или ППК);¹²
- Венская конвенция о гражданской ответственности за ядерный ущерб («Венская конвенция» или ВК);¹³
- Венская конвенция с поправками, содержащимися в Протоколе 1997 года («пересмотренная Венская конвенция» или ПВК);¹⁴
- Конвенция о дополнительной компенсации за ядерный ущерб (КДК).¹⁵

Содержащееся в конвенциях определение «ядерных установок», которое распространяется на «прочие реакторы, не являющиеся частью какого-либо транспортного средства», охватывает ММР.¹⁶ С учётом особенностей рассматриваемой ядерной установки и связанных с ней вероятных последствий ядерного инцидента конвенции (за исключением Венской) дают возможность государствам предусматривать пониженный уровень ответственности, касающейся такой установки, при условии, что ни при каких обстоятельствах уровень ответственности, установленной указанным образом, не будет меньшим, чем уровень, предусмотренный конвенцией в отношении энергоблоков, характеризующихся низким уровнем риска.¹⁷ Цель данного подхода — не обременять операторов АЭС необоснованными затратами на страхование или на обеспечение финансовой безопасности.¹⁸ Соответственно, ММР могут рассматриваться как установки, характеризующихся низким уровнем риска, если конвенции и национальное законодательство, которые распространяются на такие энергоблоки, предусматривают данный случай.

11. Конвенция об ответственности перед третьей стороной в области ядерной энергии от 29 июля 1960 года с учётом поправок, содержащихся в Дополнительном протоколе от 28 января 1964 и в Протоколе от 16 ноября 1982 года (1960), опубликованная на сайте: www.oecd-nea.org/law/paris-convention.html.
12. Протокол о внесении поправок в Конвенцию об ответственности перед третьей стороной в области ядерной энергии от 29 июля 1960 года с учётом изменений, содержащихся в Дополнительном протоколе от 28 января 1964 года и в Протоколе от 16 ноября 1982 года (2004) (ещё не вступившем в силу), опубликованный на сайте: www.oecd-nea.org/law/paris-convention-protocol.html.
13. Венская конвенция о гражданской ответственности за ядерный ущерб (1963), док. МАГАТЭ INFCIRC/500, 1063 UNTS 266.
14. Протокол о внесении поправок в Венскую конвенцию о гражданской ответственности за ядерный ущерб 1963 года (1997), док. МАГАТЭ INFCIRC/566, 2241 UNTS 302.
15. Конвенция о дополнительной компенсации за ядерный ущерб (1997), док. МАГАТЭ INFCIRC/567, 36 ILM 1473.
16. Выдержка из определения «ядерная установка» Парижской конвенции, которое аналогично определению, содержащемуся в других конвенциях об ответственности за ядерный ущерб перед третьей стороной. В пересмотренных пояснительных записках к Венской конвенции и к Конвенции о дополнительной компенсации за ядерный ущерб (КДК) ранее указывалось, что Венская конвенция распространяется исключительно на наземные ядерные установки, однако данное положение в редакции 2020 года было предметом корректировки (МАГАТЭ, международное право, серия № 3 (ред. 2)).
17. Дополнительная информация об установках, характеризующихся низким уровнем риска, в отношении которых действуют положения конвенций об ответственности за ядерный ущерб, содержится в п. 43 Обоснования Парижской конвенции, в п.п. 68 и 69 Обоснования пересмотренной Парижской конвенции (NEA/NLC/DOC(2020)1/FINAL) и на стр. 43 и 46 пояснительных записок к пересмотренной Венской конвенции и к КДК (МАГАТЭ, международное право, серия № 3 (ред. 2)).
18. АЯЭ подготовило общедоступную таблицу с целью сбора имеющихся данных о суммах, предусмотренных для компенсации потенциальных потерпевших в результате ядерного инцидента на рынках и в странах, где существуют АЭС и/или ратифицирована как минимум одна из международных конвенций об ответственности за ядерный ущерб перед третьей стороной. Таблица доступна по ссылке: www.oecd-nea.org/law/table-liability-coverage-limits.pdf www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-11/2020.10_operators_liability_amount_table_general_final_clean_v2_2020-11-10_09-01-46_808.pdf.

Однако если окажется, что ущерб в результате ядерного инцидента превышает указанный «уменьшенный» уровень, страна, в компетенции которой находится установка, должна обеспечить наличие предоставляемых государственных фондов минимального уровня, предусмотренного в общем плане применимой конвенцией в отношении ядерных установок.

Тем не менее, положения конвенций не распространяются на реакторы, используемые в качестве энергетического источника на судне, независимо от того, применяется ли он в качестве двигателя, обеспечивающего движение, или для любой другой цели, связанной с эксплуатацией судна.¹⁹ В то же время большинство экспертов разделяет мнение о том, что положения конвенций распространяются на ММР, расположенные на судах, которые стоят на якоре или иным образом зафиксированы в определённом месте и используются для производства энергии для внешнего потребления, при условии, что данные реакторы не предназначены для обеспечения движения платформы, а эксплуатируются только когда судно стоит на якоре в прибрежной зоне и обездвижено. В таком случае судно рассматривается как плавучая платформа с расположенным на ней реактором, а не в качестве атомохода, на который не распространяются положения конвенций.

Как бы то ни было, сторонам международных конвенций об ответственности целесообразно разъяснить вышеуказанный аспект, а также концепцию «оператора» во избежание различных толкований судами разных стран. Согласно конвенциям, «оператор» ядерной установки — это «лицо, назначенное или признанное оператором такой установки компетентным государственным органом». Важно обеспечить общее понимание того, кто является «компетентным государственным органом» в случае плавучей АЭС.

Несмотря на то, что большинство экспертов сходится во мнении о том, что плавучая АЭС, обездвиженная и стоящая на якоре в прибрежной зоне, должна рассматриваться как ядерная установка, на которую распространяются положения международных конвенций об ответственности за ядерный ущерб перед третьей стороной, вопрос действия таких конвенций при передвижении плавучей АЭС и при её потенциальном перемещении в пространстве разных морских зон и в международных водах остаётся открытым. В настоящее время конвенции касаются только перевозки ядерных веществ, например, ядерного топлива (отличного от природного урана и от обеднённого урана), а также радиоактивных продуктов и отходов. Режимы ответственности, применимые при перевозке, требуют обсуждения; особенно для облегчения страхования таких установок и для защиты потенциальных потерпевших в случае ядерного инцидента во время рейса.

Подводя итог, следует отметить, что для серийного производства и развёртывания ММР необходимо урегулировать несколько правовых аспектов, касающихся толкования и применимости международных и региональных конвенций об обеспечении безопасности и об ответственности в отношении таких конструкций. Несмотря на то, что ни одна из затронутых проблем не является непреодолимым препятствием, они, тем не менее, требуют решения до запуска какой-либо программы масштабного развёртывания. Необходимость закрытия данных вопросов приобретает важнейшее значение с учётом значительного прогресса, достигнутого в направлении масштабного внедрения новых технологий ММР.

19. В рамках Венской конвенции, пересмотренной Венской конвенции и КДК из определения «ядерная установка» специально исключается «любой ядерный реактор [...], которым оснащено морское или воздушное транспортное средство, используемый в качестве источника энергии, независимо от того, применяется ли он в качестве двигателя, обеспечивающего движение, или для любой другой цели». Аналогичный подход предусмотрен положениями Парижской конвенции и пересмотренной Парижской конвенции, поскольку они включают «прочие реакторы, которые не являются частью какого-либо транспортного средства». На атомоходы будут распространяться положения Брюссельской конвенции об ответственности операторов ядерных судов 1962 года с момента её вступления в силу.

6. Политические аспекты

6.1. Обзор основных недавних инициатив на государственном и международном уровне

Канада

В 2018 году Канада приняла решение о содействии развитию малых модульных реакторов (ММР) в рамках специальной дорожной карты, предусматривающей активное взаимодействие со стейкхолдерами на местном, государственном и международном уровне.

Дорожная карта направлена на стимулирование инноваций и на утверждение перспективного видения атомной энергетики, а также на оценку характеристик ММР разных конструкций и их соответствия приоритетам и требованиям, действующим в Канаде. Цель дорожной карты заключается в организации общественной дискуссии о потребностях и приоритетах страны, в результате которой появится понимание потенциальной ценности ММР, будут выявлены основные проблемы, а также возможные риски и сложности их применения и определены политические аспекты, которые могут повлиять на осуществимость развёртывания ММР.

Кроме того, в 2016 году Комиссией по ядерной безопасности Канады (CNSC) была запущена новая система факультативного предварительного лицензирования для стимулирования взаимодействия с разработчиками инновационных ММР, в том числе с создателями реакторов усовершенствованных конструкций. Благодаря данной системе в настоящее время десять поставщиков ММР, а также один поставщик усовершенствованных ММР (компания Global First Power,¹ реализующая концепцию высокотемпературного газоохлаждаемого микромодульного реактора (HTGR MMR), рассчитанного на 5 мегаватт электрической мощности (МВт_э)) участвуют в процессе предварительного лицензирования в рамках процедуры получения лицензии на строительство, право владения и эксплуатацию первой демонстрационной установки на площадке Канадских ядерных лабораторий (CNL) в Чок-Ривер к 2026 году.

Более того, в июле 2019 года Канадскими ядерными лабораториями была запущена Инициатива ядерных исследований в Канаде (CNRI) — программа, предусматривающая поддержку совместных научных изысканий в области развития ММР в Канаде с участием сторонних стейкхолдеров. Цель проекта заключается в ускорении развёртывания ММР посредством проведения научных исследований и разработок, а также путём объединения усилий поставщиков технологий ММР мирового масштаба благодаря предоставлению доступа к оборудованию и использованию опыта Канадских национальных ядерных лабораторий. Калифорнийская фирма Kairos Power, компании Moltex Canada, Terrestrial Energy Inc. (отделения которых расположены в Онтарио, Нью-Йорке и в Великобритании), а также подразделения фирмы USNC, находящиеся в Сизтле и в Вашингтоне, были выбраны в ноябре 2019 года в качестве предприятий, впервые получивших поддержку в рамках Инициативы ядерных исследований в Канаде. Размер вклада указанных компаний в денежном или неденежном выражении должен быть равен уровню поддержки, полученной от CNL.

Китайская Народная Республика

Параллельно с государственной программой развития крупномасштабных атомных электростанций Китай проводит политику диверсификации портфеля технологий посредством разработки ряда конструкций легководных и усовершенствованных ММР. Легководные ММР представлены установкой АСР50S (60 МВт_э) компании China General Nuclear (CGN), предназначенной для оснащения плавучих АЭС, и конструкцией АСР100 (125 МВт_э) фирмы China National Nuclear Corporation (CNNC), предусмотренной главным образом для наземного использования. Кроме того, разрабатываются легководные ММР других концепций, которые предполагается использовать для обеспечения теплоснабжения районного масштаба в северной части Китая. Помимо перечисленного, с 2012 года под руководством CNNC осуществляется сооружение демонстрационной установки НТР-PM, реактора НТGR мощностью 210 МВт_э, предназначенного как для электроснабжения, так и для теплоснабжения промышленного комплекса.

1. Совместное предприятие, созданное компаниями Ultra Safe Nuclear Corporation (USNC)-Power (канадский филиал фирмы USNC) и Ontario Power Group.

Франция

С 2019 года правительство Франции оказывает поддержку промышленному консорциуму, производящему базовое проектирование ММР Nuward. Внедрение данной установки мощностью 300–400 МВт_э, состоящей из двух идентичных ММР интегральной конструкции, в первую очередь преследует цель удовлетворения рыночных потребностей на международном уровне, при этом во Франции планируется сооружение демонстрационного/не имеющего аналогов объекта. В рамках программы также осуществляется активное содействие международному сотрудничеству, в том числе партнёрским отношениям с компанией Westinghouse. Совсем недавно, согласно Плану восстановления экономики (Plan de Relance), правительство Франции выделило 50 миллионов евро в рамках содействия базовому проектированию установки Nuward.

Российская Федерация

После начала промышленной эксплуатации первой в своём роде плавучей атомной электростанции «Академик Ломоносов» Росатом планирует сооружение других плавучих ММР на Балтийском заводе в Санкт-Петербурге. В то же время данная государственная корпорация работает над развитием следующего поколения ММР — реактора РИТМ-200, предназначенного как для плавучих АЭС, так и для наземного использования. Серийное производство может начаться к 2030 году, первые установки планируется разместить на участках разработки крупнейших месторождений полезных ископаемых в России.

Соединённые Штаты Америки

С 2012 года в рамках Программы технической поддержки лицензирования ММР, осуществляемой Министерством энергетики США (DOE), компании NuScale Power было выделено 217 миллионов долларов США в виде государственного субсидирования на паритетной основе. В 2015 году указанная компания получила дополнительную государственную помощь в размере 16,6 миллионов долларов США, предусмотренных для подготовки заявления на получение совмещённой лицензии на строительство и эксплуатацию (COLA) в рамках партнёрских отношений с первым потенциальным клиентом — фирмой Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS). Министерство энергетики также содействует сооружению первой демонстрационной установки NuScale, которая может быть размещена на площадке Национальной лаборатории Айдахо (INL), принадлежащей федеральному правительству. В августе 2020 года концепция NuScale стала первой конструкцией ММР, утверждённой Комиссией по ядерному регулированию США (NRC). В контексте постоянной государственной поддержки Министерство энергетики выделило компании NuScale Power дополнительные 1,4 миллиарда долларов США в рамках субсидирования на паритетной основе на строительство первого демонстрационного объекта. 16 октября федеральное учреждение US International Development Finance Corporation (DFC) объявило о подписании заявления о намерении содействовать развитию фирмы NuScale Power в качестве независимой ядерной генерирующей компании, обеспечивающей 2 500 МВт_э в ЮАР.

В то же время Министерство энергетики оказывает поддержку в отношении ММР новаторских концепций, разрабатываемых частными поставщиками, в том числе стартапами. В 2015 году была запущена инициатива по ускоренному внедрению инноваций в ядерной отрасли GAIN (Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear) в целях облегчения доступа поставщиков ММР к инфраструктуре НИОКР государственных лабораторий США. Данная грантовая программа, как и аналогичные инициативы, зависит от частного финансирования, соответствующего средствам, выделяемым Министерством энергетики.

В 2019 году Министерство энергетики объявило о запуске Национального центра реакторных инноваций (NRIC) при INL в рамках новой инициативы по содействию частному сектору в развитии передовых ядерных технологий путём поддержки разработчиков в области проведения испытаний и демонстрации концепций созданных ими реакторов, а также оценки характеристик данных установок. За указанной инициативой в 2020 году последовала Программа демонстрации усовершенствованных реакторов (ARDP). Последняя открыта как для разработчиков ММР, так и для компаний, сооружающих крупномасштабные реакторы, и направлена на содействие в демонстрации усовершенствованных конструкций, разработка которых близка к завершению, а внедрение должно быть полностью закончено в течение семи лет с момента присуждения гранта, а также конструкций, находящихся на более ранних этапах разработки, готовность к полномасштабному развёртыванию которых планируется к 2030 году и в последующий период. Общий объём бюджетных ассигнований в рамках данной программы составляет 230 миллионов долларов США. Первыми отобранными конструкциями стали Xe-100 и Sodium, разработчики которых получили по 80 миллионов долларов США в октябре 2020 года.

Министерство энергетики также обеспечивает поддержку ММР более усовершенствованных концепций в рамках Агентства передовых исследований в области энергетики (ARPA-E). Данная программа посвящена главным образом микромодульным реакторам.

Кроме того, правительство США содействует развитию ММР в рамках реформы законодательной базы. Например, Закон об инновациях и модернизации в области ядерной энергетики 2018 года (NEIMA) расширяет доступ к государственной инфраструктуре НИОКР и поддерживает Комиссию по ядерному регулированию США (NRC) в контексте адаптации процесса сертификации к специфике конструкций ММР.

Помимо всего, Комиссия по ядерному регулированию США опубликовала проект белой книги о стратегии рассмотрения заявлений на лицензирование передовых технологий, отличных от легководных реакторов (NRC, 2019). К середине 2019 года шестью компаниями, разрабатывающими конструкции реакторов, в NRC были поданы уведомления о намерении подачи заявлений на утверждение конструкции. Речь идёт о трёх жидкосолевых реакторах (MSR), об одной установке HTR, об одном быстром натриевом реакторе (SFR) и о реакторе с тепловыми трубками eVinci компании Westinghouse. В декабре 2019 года Комиссией по ядерной безопасности Канады (CNSC) и Комиссией по ядерному регулированию США интегральный жидкосолевой реактор (IMSR) компании Terrestrial Energy был выбран в качестве предмета первого совместного технического анализа усовершенствованного ядерного реактора, отличного от легководных.

Великобритания

В 2015 году в Великобритании были начаты первые этапы государственной программы по поддержке ММР и реакторов усовершенствованных конструкций посредством открытого конкурса, в рамках которого поставщики могли представить предложения по удовлетворению энергетических потребностей и по развитию промышленного потенциала страны. Одно из предложений, продвигаемых правительством Великобритании, касается вопросов топливного цикла (т. е. использования запасов выделенного плутония в качестве энергетического сырья). В июле 2019 года правительство Великобритании выделило 18 миллионов фунтов стерлингов в рамках Фонда стратегических промышленных задач на поддержку разрабатываемого в Великобритании ММР, созданного консорциумом во главе с компанией Rolls-Royce. В опубликованном в ноябре 2020 года Плане содействия зелёной промышленной революции, состоящем из десяти пунктов, правительство Великобритании объявило о выделении дополнительных 215 миллионов фунтов стерлингов на разработку конструкции данного отечественного ММР (S&P Global Platts, 2020).

Министерство бизнеса, энергетики и промышленной стратегии Великобритании (BEIS) также рассмотрело до 44 миллионов фунтов стерлингов в рамках Проекта оценки технической осуществимости и развития усовершенствованных модульных реакторов. Первый этап оценки технической осуществимости восьми ММР Поколения IV уже завершён. Для проведения второго этапа было отобрано три конструкции, разработчикам каждой из которых будет дополнительно выделено до 10 миллионов фунтов стерлингов. Потенциально регулирующие органы могут также получить 5 миллионов фунтов стерлингов в рамках поддержки данной инициативы. В контексте недавно принятой Государственной стратегии развития инфраструктуры в бюджет указанной программы поступит 170 миллионов фунтов стерлингов (S&P Global Platts, 2020).

6.2. Выводы, касающиеся разработки и реализации политических мер, а также международного сотрудничества

Глобальные политические тенденции, представленные выше, свидетельствуют о том, что в настоящее время государственная поддержка развёртывания ММР осуществляется в четырёх ключевых направлениях:

- Предоставление **долгосрочной политической поддержки**, которая способствует проведению обсуждений и мобилизации соответствующих стейкхолдеров на правительственном, частном и общественном уровнях.
- **Содействие реализации отечественных программ** на этапах проектирования и разработки (от базового до детального проектирования). В рамках данных программ может обеспечиваться доступ к государственной инфраструктуре НИОКР и к другим механизмам, поддерживающим усилия в области развития.
- **Пересмотр систем лицензирования** с учётом ММР.
- **Финансовая поддержка сооружения** демонстрационных и/или не имеющих аналогов установок.

Реализация данных инициатив может происходить в рамках существующих или специально созданных законодательных баз для интеграции усилий по развитию ММР в контексте государственной энергетической политики.

Необходимость координированных подходов в сфере международного сотрудничества, выходящих за рамки действий, предпринимаемых в настоящее время на государственном уровне, объясняется транснациональным характером рынка ММР. Разработка и начальные стадии развёртывания таких реакторов требуют согласованных усилий органов государственного управления и промышленных предприятий. В странах, принявших программы внедрения ММР, органы государственного управления должны быть вовлечены в ходе реализации двух указанных этапов и оказывать политическую поддержку

как на национальном уровне, так и в рамках координированных транснациональных инициатив, особенно в области разработки международных систем лицензирования ММР.

В качестве примера можно привести мероприятия, проводимые в настоящее время на нормативном и промышленном уровнях:

- **Двустороннее сотрудничество.** В августе 2019 года регулирующие органы США и Канады (NRC и CNSC) объявили о планах сотрудничества, целью которых является повышение эффективности в области регулирования посредством проведения технической экспертизы технологий усовершенствованных и малых модульных реакторов. В сентябре 2019 года французская энергетическая компания EDF и фирма Westinghouse, американский поставщик, объявили о продолжающихся переговорах по вопросам совместной разработки технологии ММР.
- **Многостороннее сотрудничество.** АЯЭ продолжает изучение возможностей координации в области лицензирования конструкций определённого типа, а также потенциального повышения уровня гармонизации промышленных норм и стандартов. В свою очередь, Форум сотрудничества регулирующих органов МАГАТЭ продолжает работы, в рамках которых страны и соответствующие стейкхолдеры обсуждают общие вопросы регулирования ММР.

7. Основные проблемы, связанные с крупномасштабным развёртыванием ММР

Конкурентоспособность ММР с экономической точки зрения будет в значительной степени зависеть от наличия достаточно большого рынка для поддержки эффекта серийности, который необходим для нейтрализации отсутствия экономии за счёт масштабов. В настоящей главе описываются проблемы, требующие решения для того, чтобы сделать развёртывание ММР возможным.

7.1. Проблема выбора технологии

Большое разнообразие конструкций ММР, разрабатываемых в настоящее время в странах-членах АЯЭ (см. табл. 1 и рис. 1), подразумевает не только возможности, но и проблемы. Несмотря на очевидное существование консенсуса, согласно которому только некоторые из длинного перечня технологий будут в конечном счёте внедрены в промышленном масштабе, позиции расходятся в отношении того, когда, каким образом и кем должны приниматься решения о выборе технологий, подлежащих развитию в будущем или запуску в серийное производство.

В результате политических дискуссий, имеющих место в некоторых странах-членах АЯЭ, по всей видимости, предлагается по крайней мере на ранних этапах остановить выбор на нескольких технологиях, т. е. продолжать их одновременную разработку на стадиях проектирования, сооружения и эксплуатации демонстрационных установок до тех пор, пока одна из технологий не будет признана более совершенной по сравнению с остальными по завершении длительного соревновательного процесса. Однако, судя по всему, базовый объём средств, выделяемых на исследования и разработки на государственном уровне, не соответствует указанным целям. Значительная часть ассигнований иногда направляется на создание дополнительных технологических альтернатив, а не демонстрационных объектов, которые в конечном счёте могут способствовать принятию решения о выборе технологии с учётом рыночных условий. Кроме того, органы ядерного регулирования не располагают ресурсами для оценки большого количества конструкций; отсутствие ясности в отношении того, какие концепции будут отобраны в итоге, может повлиять на перспективы всех конструкций ММР.

Данные решения о выборе технологий важны, поскольку инвестиции в крупномасштабные производственные мощности требуют наличия широких и действительно глобальных рынков. Вполне вероятно, что до тех пор, пока будет существовать несколько конкурирующих конструкций ММР, ни одна из них или ни один из поставщиков не сможет захватить большую долю рынка.

7.2. Пересмотр и гармонизация систем лицензирования, а также другие правовые проблемы

Гармонизация различных подходов в области лицензирования, вероятно, станет основным определяющим фактором развёртывания технологий ММР. Однако, как показано в табл. 1, технологические усовершенствования ММР могут не соответствовать требованиям существующих режимов лицензирования. Ограниченный опыт органов ядерного регулирования в работе с новыми конструкциями является серьёзной проблемой в отношении рассмотрения и утверждения обоснования безопасности.

Кроме того, с правовой точки зрения, ответ на вопрос, позволяют ли действующие системы лицензирования обеспечивать поддержку развёртывания ММР, будет зависеть от того, насколько уровень гибкости таких систем даёт возможность в достаточной степени адаптироваться к ММР без существенных модификаций конструкций. Странам, в которых режим лицензирования нейтрален в технологическом отношении, системы регулирования основаны на эффективности и где широко используется поэтапный подход, вероятно, будет легче приспособиться к ММР в отличие от государств, в которых системы лицензирования основаны на определённой технологии или существует предписательный принцип регулирования.

Как подчёркивалось Консультативной группой в рамках инициативы АЯЭ «Инновации в атомной энергетике до 2050 года» (NI2050), анализ «пригодности к лицензированию» и экономических аспектов на ранних этапах процесса разработки инновационных конструкций увеличивает вероятность ускоренного достижения высоких уровней готовности технологии (УГТ), а также снижает затраты. Такие УГТ также достижимы благодаря различным формам международного партнёрства. Сотрудничество на высоких УГТ, тем не менее, сопровождается сложностями ввиду потенциального возникновения вопросов, связанных с интеллектуальной собственностью. Концентрация совместных усилий на квалификации технологии, особенно по достижению высоких УГТ, как правило, сопровождается меньшим количеством возможных препятствий. Указанное также может способствовать достижению более высокой степени гармонизации и улучшению шансов успешного развёртывания в промышленных масштабах (АЯЭ, 2018).

В соответствии с выводами, сделанными в рамках инициативы NI2050, ММР можно рассматривать как возможность заблаговременной разработки методов международного сотрудничества, направленных на гармонизацию систем лицензирования, а также норм и стандартов. Данные темы уже широко обсуждались в отношении крупномасштабных реакторов и накопленный опыт может быть применён к ММР. В сфере гармонизации промышленных норм и стандартов, например, Рабочая группа по сотрудничеству в области оценки и лицензирования конструкций реакторов (CORDEL) при Всемирной ядерной ассоциации (WNA) добились значительного прогресса, вдохновившись примером авиационной промышленности.

В отношении международного партнёрства в контексте регулирования результаты Многонациональной программы оценки новых проектов АЭС (MDEP) являются наглядным подтверждением возможности сотрудничества в области лицензирования конструкций в рамках разных режимов регулирования с одновременным обеспечением достаточного уровня независимости государственных регулирующих органов. Можно развить успех MDEP и добиться лучших результатов в сфере международного сотрудничества по вопросам лицензирования. Одним из примеров является специальный процесс лицензирования модулей ММР, распространяющийся на разные площадки, утверждение которых осуществляется в разных странах в рамках взаимных соглашений. Такой подход может способствовать использованию преимуществ стандартизации как с точки зрения приобретения опыта на практике, так и в области сокращения постоянных (единовременных) издержек, связанных с лицензированием.

7.3. Потенциальные преимущества демонстрационных установок ММР, не имеющих аналогов

Даже при существовании благоприятных условий, гарантирующих достижение финальных этапов в процессе разработки только наилучшими технологиями, может сохраниться некоторый уровень неопределённости в техническом плане. Вследствие своего инновационного характера ММР могут предполагать дополнительные технологические риски, которые необязательно наблюдаются в случае существующих конструкций крупномасштабных ЛВР. Например, конструкции легководных ММР включают нетрадиционные компоненты, такие как парогенераторы со спиральными трубами, внутренние приводные механизмы управляющих стрелней (CRDM) или новые внутрикорпусные контрольно-измерительные приборы, опыт эксплуатации которых ограничен. В ММР Поколения IV будут предусмотрены функции, которые ранее никогда не испытывались. Опытно-демонстрационные объекты могут содействовать наглядному представлению данных функций и внедрению новых технологий на рынке, что является логическим продолжением приобретённого в прошлом опыта.

Реализация демонстрационной установки также поможет привлечь дополнительное финансирование, необходимое для расширения производственных мощностей. С точки зрения инвесторов, осуществление вложений значительного уровня в сооружение промышленного объекта по производству модулей до получения доказательства их работоспособности является маловероятным. Согласно Институту энергетической политики в Чикаго (Рознер (Rosner), Голдберг (Goldberg), 2011), демонстрационные энергоблоки представляют собой часть стратегического плана организационно-экономической деятельности в области развития ММР, целью которого является промышленное производство, и данные установки будут предшествовать созданию завода по изготовлению модулей ММР.

Соответственно, в случае ММР, не имеющего аналогов, обеспечение системы закупок, изготовления и поставки, оптимизированной для производства в срок и в рамках бюджета, представляет сложности. Тем не менее, первые демонстрационные установки должны заложить основы оптимизации цепи поставок и в некоторой степени воспользоваться ожидаемыми преимуществами модульного исполнения. Например, сооружение первого в своём роде ММР может сопровождаться меньшими задержками по сравнению с наблюдавшимися в ходе недавней реализации крупномасштабных ЛВР, предусматривающей традиционные методы строительства.

Наконец, важно использовать опыт, приобретённый при осуществлении недавних проектов сооружения новых ядерных объектов. В рамках будущих проектов ММР детальное проектирование должно быть завершено до начала строительства, а также требуется обеспечение заблаговременного вовлечения как регулирующих органов, так и участников цепи поставок. Кроме того, важное значение имеет практика заключения контрактов о сотрудничестве для согласования планов стейкхолдеров (АЯЭ, 2020).

7.4. Вопросы, связанные с цепью поставок и с топливным циклом

Как и в случае крупномасштабных ЛВР, цепь поставок останется основным определяющим фактором конкурентоспособности ММП. Перерыв в сооружении ядерных установок в странах-членах АЯЭ в 1980-х и 1990-х годах значительно пошатнул производственные возможности атомной энергетики. Несмотря на то, что недавние проекты возведения новых объектов способствовали в некоторой степени восстановлению потенциала цепи поставок в масштабах мира, в данном направлении требуются дополнительные усилия.

Таким образом, стратегические партнёрские отношения по ключевым компонентам будут иметь важнейшее значение для распределения рисков, существующих в рамках проектов сооружения первых ММП, и для ускорения их развёртывания.

После поставки нескольких модулей цепь поставок ММП может развиваться в направлении большей консолидации (т. е. уменьшения количества поставщиков) для использования преимуществ экономии за счёт масштаба, аналогично авиационному сектору. Однако реализация данных прогнозов будет зависеть от развития рыночных перспектив и от тенденций гармонизации, стимулирующих конкуренцию. В будущем стратегии управления цепью поставок также могут быть направлены на повышение эффективности благодаря более высокой степени интеграции.

Сотрудничество в целях повышения уровня гармонизации норм и стандартов может улучшить возможности локализации, а также расширить круг поставщиков и способствовать созданию более конкурентоспособной цепи поставок, что снизит издержки. Внедрение в конструкции ММП готовых к использованию компонентов, имеющихся в продаже, может дать цепи поставок аналогичные преимущества.

ММП также могут потребовать адаптации топливного цикла или новых разработок в данной области. Например, некоторые поставщики ММП предусматривают использование в своих конструкциях низкообогащённого урана с высоким содержанием (HALEU). Уровень обогащения такого материала составляет 5–19%. Может потребоваться углублённый анализ влияния использования урана HALEU на глобальную цепь поставок ядерного топлива и на весь топливный цикл. Аналогичным образом в странах, где создан замкнутый ядерный топливный цикл, возможность использования смешанного оксидного топлива (МОКС-топлива) также может являться важной характеристикой некоторых конструкций ММП.

В свою очередь, сотрудничество в области НИОКР будет иметь ключевое значение. Благодаря заключению соглашений с исследовательскими организациями и с ВУЗами цепь поставок ММП обеспечит наличие квалифицированных кадров и инфраструктуры НИОКР. Кроме того, совместная деятельность в данном направлении поможет ускорить развёртывание новых многообещающих технологий, таких как усовершенствованное и аддитивное производство, а также различные цифровые приложения.

Наконец, интенсивное международное сотрудничество и достижение консенсуса благоприятно скажутся на рассмотренных ранее аспектах регулирования, связанных с развёртыванием ММП. Для ускорения масштабного внедрения таких реакторов важное значение также имеет обеспечение обмена опытом, накопленным на сегодняшний день некоторыми странами-членами АЯЭ.

7.5. Общественное восприятие и участие

В прошлом противодействие ядерной энергетике происходило из-за возможного причинения ущерба в результате ядерной аварии, несмотря на низкий уровень вероятности таких аварий. В ходе некоторых самых ранних исследований общественного восприятия риска было выявлено, что общественность склонна рассматривать непреднамеренные действия как сопряжённые со значительно более высоким уровнем риска, чем преднамеренные. В более поздних работах данное явление описывается подробнее: люди в большей степени обращают внимание на последствия, а на вероятность — в меньшей, пренебрегая ею (Санстейн (Sunstein), 2001). В данных публикациях предлагается два альтернативных варианта возможной реакции на общественное восприятие риска:

- информировать общественность о потенциальных преимуществах деятельности, сопряжённой с риском;
- реагировать на опасения общественности посредством снижения уровня риска деятельности или технологии (Старр (Starr), 1969).

Внутренне присущие свойства безопасности, представленные проектировщиками ММП, можно рассматривать как возможность реализации такого подхода — проектирования технологии с учётом озабоченности общественности.

Для достижения желаемого результата при размещении электростанций, оборудованных ММР, потребуется обратить особое внимание на предпочтения местного населения. Обеспечение возможности создания рабочих мест на локальном и региональном уровне с целью сделать ММР столь же привлекательными для местного населения, как и крупномасштабные реакторы, также будет иметь первостепенную важность.

В целом существует вероятность того, что вопрос применения ММР будет сопряжён с рядом несколько иных проблем, касающихся участия общественности, чем те, которые возникают в случае традиционных крупномасштабных ЛВР. Как следствие, капитальное значение имеет определение органами государственного управления, рассматривающими возможность развёртывания ММР, отличия усилий по вовлечению общественности в вопросе применения ММР по сравнению с теми, которые были сделаны в случае крупномасштабных реакторов. В той мере, в какой указанные действия совершаются заблаговременно, они могут быть полезны в качестве возможности установления двустороннего диалога, в рамках которого разработка физической и институциональной инфраструктуры, необходимой в случае будущих ММР, осуществляется при сотрудничестве с общественностью.

8. Выводы и рекомендации. Роль государственной поддержки и международного сотрудничества в развёртывании ММР

В области развития малых модульных реакторов (ММР) достигнут значительный прогресс, необходимый для их превращения к началу 2030-х годов в коммерчески перспективный продукт, предлагаемый ядерной энергетикой. Присущие таким реакторам технико-экономические характеристики (некоторые из которых уже были проверены в других промышленных секторах) могут не только содействовать преодолению проблем, касающихся поставки, которыми сопровождалась реализация крупных ядерных проектов в недавнем прошлом, но и расширить ценностное предложение ядерных технологий, обеспечивающее гибкую, предусматривающую возможность диспетчерского управления выработку электроэнергии и тепла в рамках нескольких секторов.

При оценке экономического обоснования ММР вопрос рынка по-прежнему находится в центре внимания. С одной стороны, при массовом производстве таких реакторов, как в случае коммерческих самолётов, экономические преимущества могут быть значительными. Однако в данном контексте требуется относительно широкий рынок для единой конструкции, что, соответственно, подчёркивает необходимость глобального рынка, а также указывает на то, что только небольшая часть из множества разрабатываемых конструкций может в конечном счёте создать такой глобальный рынок. В любом случае для его существования необходимы более высокие уровни консолидации рынка и гармонизации в области регулирования.

С другой стороны, большинство конструкций ММР ещё не достигло высокого уровня зрелости и присущие им характеристики по-прежнему требуют проверки и подтверждения. В процессе достижения коммерческой жизнеспособности легководные ММР находятся на более продвинутой стадии по сравнению с системами Поколения IV, в случае которых необходимы дополнительные исследования и разработки. Соответственно, наблюдается некоторая степень неопределённости, которая оказывает непосредственное влияние на восприятие риска и, следовательно, способствует ограничению масштабов потенциального рынка. По мере достижения зрелости ММР с вводом в эксплуатацию первых демонстрационных установок, предусмотренного в конце 2020-х годов, уровень некоторых из указанных рисков должен со временем уменьшиться, что повысит интерес потенциальных заказчиков. В свою очередь, такой повышенный интерес будет способствовать созданию надёжной цепи поставок и приобретению солидных практических знаний и опыта реализации строительных работ, что снизит капитальные издержки.

Таким образом, вопрос потенциального рынка ММР не ограничивается экономическими соображениями и требует согласованных усилий органов государственного управления, регулирующих организаций, поставщиков, подрядчиков и будущих владельцев для одновременного решения различных проблем, описанных в главе 7. В частности, страны, поддерживающие развитие ММР, могут считать целесообразным выполнение плана, сосредоточенного на четырёх основных сферах деятельности, в которых государственная поддержка и международное сотрудничество будут играть ключевую роль:

- **Вовлечение общественности.** В рамках будущих проектов возможно использование преимуществ международного сотрудничества, обмена информацией об извлечённых уроках, а также о трудностях и передовых практиках, выявленных первопроходцами в результате публичных консультаций с участием местного населения.
- **Сооружение демонстрационных установок ММР, не имеющих аналогов, и приобретение опыта.** Государственная поддержка демонстрационных проектов, не имеющих аналогов, может принимать разные формы, начиная от конкретных долгосрочных соглашений о поставке электроэнергии и заканчивая механизмами распределения затрат, которые могут минимизировать строительные риски и привлечь большее число инвесторов. Кроме того, чрезвычайно важна поддержка действий регулирующих органов в области разработки необходимых режимов и возможностей лицензирования. Параллельно следует продолжать усилия по воплощению результатов исследований в эффективное развёртывание путём размещения первых экспериментальных энергоблоков и финансирования необходимой исследовательской инфраструктуры.

- **Гармонизация режимов лицензирования.** Прогресс в области гармонизации может быть достигнут благодаря эффективному использованию существующих механизмов сотрудничества в сфере крупномасштабных реакторов, а также в других строго регулируемых секторах. Несмотря на то, что абсолютная гармонизация недостижима (а в некоторых областях и нежелательна), следует продолжать усилия в тех сферах регулирования, где могут быть выработаны общие позиции по существенно важным вопросам. Особое значение приобретают действия АЯЭ по координации многостороннего лицензирования, двустороннего сотрудничества и совместной оценки безопасности, подобные реализованным в рамках MDEP. Благоприятные для гармонизации условия существуют также на уровне предварительного лицензирования, что может способствовать процессу отбора конструкций ММР.
- **Развитие производственного потенциала.** Принятие правительствами государственной ядерной программы, предусматривающей сооружение нескольких установок ММР, может увеличить производственный потенциал. Страны, в которых уже осуществляются крупномасштабные ядерные проекты, могут воспользоваться преимуществами синергии в рамках существующих возможностей и процессов поставки. Партнёрства между ключевыми игроками и сотрудничество на промышленном уровне между странами могут быть использованы для распределения потенциальных рисков. Следует предвосхитить проблемы топливного цикла, чтобы надлежащим образом обеспечить поддержку рыночных перспектив. И в заключение, необходимы усилия в области гармонизации норм и стандартов, результатом которой могут стать дополнительные рыночные выгоды.

9. Список литературы

- АЯЭ (2020), «Подходы к снижению затрат на сооружение объектов атомной энергетики. Практическое руководство для стейкхолдеров» https://www.rosatom.ru/upload/docs/Unlocking_reductions_in_Construction_Costs_of_Nuclear.pdf (*Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders*), OECD Publishing, Paris, www.oecd-nea.org/jcms/pl_30653.
- АЯЭ (2019a), *Nuclear Law Bulletin No. 103*, Volume 2019/2, OECD Publishing, Paris www.oecd-nea.org/jcms/pl_24785/nuclear-law-bulletin-no-103-volume-2019/2.
- АЯЭ (2019b), «Стоимость декарбонизации: издержки в энергосистемах с большими долями ядерной и возобновляемой энергии» <https://www.rosatom.ru/upload/docs/Decarbonisation.pdf> (*The Cost of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables*), OECD Publishing, Paris, www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2019/7299-system-costs.pdf.
- АЯЭ (2018), *Nuclear Innovation 2050: An NEA initiative to accelerate R&D and market deployment of innovative nuclear fission technologies to contribute to a sustainable energy future*, OECD Publishing, Paris, www.oecd-nea.org/ndd/ni2050/ni2050_%20brochure.pdf.
- АЯЭ (2016), *Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment*, OECD Publishing, Paris, www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7213-smrs.pdf.
- АЯЭ (2012), *Nuclear Energy and Renewables – System Effects in Low-carbon Electricity Systems*, OECD Publishing, Paris, www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2012/7056-system-effects.
- АЯЭ (2011), *Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors*, OECD Publishing, Paris, www.oecd-nea.org/ndd/reports/2011/current-status-small-reactors.pdf.
- МАГАТЭ (2020), *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A supplement to: IAEA Advances Reactors Information System (ARIS)*, 2020 Edition, IAEA, Vienna https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf.
- МАГАТЭ (2019), *Interim Report on Multi-unit/Multi-module Aspects Specific to SMRs*, IAEA, Vienna, www.iaea.org/sites/default/files/19/12/smr_rf_dsa_interim_report.pdf.
- МАГАТЭ (2018), *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A supplement to: IAEA Advances Reactors Information System (ARIS)*, 2018 Edition, IAEA, Vienna, https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book_2018.pdf.
- МЭА (2020), *Tracking Clean Energy Progress: Nuclear Power*, OECD Publishing, Paris, www.iea.org/reports/nuclear-power.
- МЭА (2019), *Nuclear Power in a Clean Energy System*, OECD Publishing, Paris, <https://webstore.iea.org/nuclear-power-in-a-clean-energy-system>.
- Росатом (2020), *World's only floating nuclear power plant enters full commercial exploitation*, Rosatom, Moscow, <https://rosatom-europe.com/press-centre/news/rosatom-world-s-only-floating-nuclear-power-plant-enters-full-commercial-exploitation>.
- Росатом (2019), *Rosatom's First-of-a-Kind Floating Power Unit Connects to Isolated Electricity Grid in Pevek, Russia's Far East*, Rosatom, Moscow, www.rusatom-overseas.com/media/news/rosatom-s-first-of-a-kind-floating-power-unit-connects-to-isolated.
- Chen, J., et al. (2016). "Operations optimization of nuclear hybrid energy systems", *Nuclear Technology*, No. 195(2), pp. 143-156.

- Euratom Supply Agency (2019), *Securing the European Supply of 19.75% enriched Uranium Fuel – A Revised Assessment*, European Commission, Brussels, https://ec.europa.eu/euratom/docs/ESA_HALEU_report_2019.pdf.
- Energy Technologies Institute (2015), *The Role for Nuclear within a Low Carbon Energy System*, ETI, Loughborough, <https://d2umxnkyjne36n.cloudfront.net/insightReports/Nuclear-Insights-%E2%80%93-Midres AW.pdf?mtime=20160908152349>.
- ETI (2018), *The ETI Nuclear Cost Drivers Project: Summary Report*, ETI, Loughborough, https://d2umxnkyjne36n.cloudfront.net/documents/D7.3-ETI-Nuclear-Cost-Drivers-Report_April-20.pdf?mtime=20180426151016.
- Financial Times (2020), *Downing St Considers £2bn Support for Mini Nuclear Reactor*, FT, London, www.ft.com/content/d7016b80-e0c4-4444-a059-2daf32b9a4ab.
- Garcia, H.E., et al. (2016), “Dynamic performance analysis of two regional nuclear hybrid energy systems”, *Energy*, Vol. 107, pp. 234-258.
- Government of Canada (2018), *Canadian Small Modular Reactor: SMR Roadmap*, Canadian Nuclear Association, Ottawa, <https://smrroadmap.ca>.
- Ingersoll, D.T. (2009), “Deliberately small reactors and the second nuclear era”, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 51, Issues 4-5, pp. 589-603.
- Ingersoll, D.T., et al. (2015), “Can Nuclear Power and Renewables be Friends?”, *Proceedings of ICAPP 2015*, Nice.
- IPCC (2018), *Special Report: Global Warming of 1.5°C*, October 2018, IPCC, Geneva, www.ipcc.ch/sr15.
- Lloyd, C.A. (2019), “Modular Manufacture and Construction of Small Nuclear Power Generation Systems,” PhD thesis, University of Cambridge, Cambridge.
- Loving, J.R., A. Yip and T. Nordhaus (2016), “Historical construction costs of global nuclear power reactors”, *Energy Policy*, No. 91, pp. 371-382.
- NNL (2014), *Small Modular Reactors (SMR) – Feasibility Study*, NNL report, <https://namrc.co.uk/wp-content/uploads/2015/01/smr-feasibility-study-december-2014.pdf>.
- Partanen, R. (2019), *Nuclear District Heating in Finland: The Demand, Supply and Emissions Reduction Potential of Heating Finland with Small Nuclear Reactors*, ThinkAtom, <https://thinkatomnet.files.wordpress.com/2020/03/rauli-partanen-think-atom-nuclear-district-heating-in-finland.pdf>
- Sainati, T., G. Locatelli and N. Brookes (2015), “Small Modular Reactors: Licensing constraints and the way forward”, *Energy*, Vol. 82, pp. 1092-1095.
- S&P Global Platts (2020), “UK funding for nuclear plant construction focused on smaller units”, *Nucleonics Week*, Vol. 61, No. 48.
- Starr, C. (1969), “Social Benefit versus Technological Risk”, *Science*, Vol. 165, Issue 3899, pp. 1232-1238.
- Sunstein, C.R. (2001). “Probability Neglect: Emotions, Worst Cases, and Law”, The Law School, The University of Chicago, Chicago, https://chicagounbound.uchicago.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.co.uk/&httpsredir=1&article=1384&context=law_and_economics.
- Rosner, R., and S. Goldberg (2011), “Small Modular Reactors – Key to Future Nuclear Power Generation in the U.S.”, Energy Policy Institute at Chicago, University of Chicago, Chicago, www.energy.gov/sites/prod/files/2015/12/f27/ECON-SMRKeytoNuclearPowerDec2011.pdf.
- NRC (2019), “*Non-Light Water Review Strategy*, Staff White paper”, NRC, Rockville, www.nrc.gov/docs/ML1927/ML19275F299.pdf.

UxC (2013), "SMR market outlook and deployment prospects", presentation by Jonathan Hinze, *4th Annual Platts SMR Conference*, 29 May 2013, UxC, <https://docplayer.net/45881733-Smr-market-outlook-and-deployment-prospects.html>.

WNA (2015), *Facilitating International Licensing for Small Modular Reactors (SMRs)*, CORDEL SMR Group, WNA, London, http://world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Working_Group_Reports/REPORT_Facilitating_Intl_Licensing_of_SMRs.pdf.

ПУБЛИКАЦИИ И ИНФОРМАЦИЯ АЯЭ

Полный каталог публикаций доступен в режиме онлайн на сайте www.oecd-nea.org/pub.

Помимо основной информации об агентстве и его рабочей программе на сайте АЯЭ можно найти сотни технических и стратегических докладов, доступных для бесплатного скачивания. Профессиональный вестник агентства NEA News, в котором публикуются статьи о самых актуальных вопросах ядерной энергетики, доступен в режиме онлайн на сайте www.oecd-nea.org/nea-news.

Рассылка ежемесячного электронного бюллетеня АЯЭ осуществляется бесплатно для зарегистрированных пользователей. В бюллетене содержатся результаты новейших исследований, а также информация о недавних событиях и публикациях. Зарегистрируйтесь на сайте www.oecd-nea.org/bulletin.

Читайте наши сообщения на Facebook: www.facebook.com/OECDNuclearEnergyAgency или в Twitter @OECD_NEA.



Малые модульные реакторы: проблемы и перспективы

Малые модульные реакторы (ММР) как многообещающая ядерная технология завоёвывают признание среди политиков и отраслевых игроков. ММР можно считать ядерные реакторы с выходной электрической мощностью от 10 МВт_э до 300 МВт_э, в конструкциях которых предусматривается повышенный уровень модульного исполнения, стандартизации и заводского изготовления, что обеспечивает большую предсказуемость моделей поставки, основанных на экономии от серийного производства. Сегодня в разработке находится более 50 концепций, охватывающих широкий спектр технологических решений и уровней зрелости. Ценностное предложение технологии ММР также подразумевает преимущества потенциального финансирования и интегральности систем. Однако достижение экономической перспективности установок, обладающих данными привлекательными характеристиками, зависит от экономического обоснования, которое требует развития глобального рынка ММР. Широкомасштабное развёртывание ММР сталкивается с рядом технических, экономических, нормативных и связанных с цепью поставок проблем и для его реализации в следующем десятилетии потребуются значительные усилия на государственном уровне и эффективные механизмы международного сотрудничества.

Агентство по ядерной энергии (АЯЭ)

46, quai Alphonse Le Gallo
92100 Boulogne-Billancourt, France
Тел.: +33 (0)1 73 21 28 19
nea@oecd-nea.org www.oecd-nea.org

АЯЭ № 7560