

Аналитический обзор
Основные положения, современное состояние, особенности
практической реализации проектов модульных АЭС на базе реакторов
малой мощности с акцентами на вопросы экономики.

В.Ф.Демин, Л.С.Смирнова, А.А.Голосная
НИЦ «Курчатовский институт», г.Москва, Россия

Аннотация

В исследовании представлен систематизированный обзор области знаний, относящейся к анализу факторов, важных с точки зрения комплексного подхода к экономике проектов АЭС на базе малых модульных реакторов (ММР). Обзор выполнен на основе анализа международных и российских публикаций. Экономические исследования, относящиеся к инновационным энергетическим проектам на базе ММР, охватывают большой спектр вопросов и уровней анализа, включающих готовность технологических, проектных и промышленных решений для реализации проектов, готовность регулирующих механизмов для проектов АЭС на базе ММР, учитывающих многие дополнительные аспекты общесистемной, энергосистемной и рыночной среды реализации энергетических проектов.

Международные и российские эксперты отмечают, что развитие концепции модульных АЭС позволит улучшить ситуацию в основных проблемных зонах, относящихся к сооружению АЭС, снизить затраты в проекты АЭС за счет ряда нефинансовых и финансовых факторов при определенном масштабе промышленного производства модулей, при формировании новых технологий проектирования и сооружения АЭС, сократить сроки на предпроектных и проектных этапах жизненного цикла АЭС при серийном сооружении АЭС на базе ММР. Инновационные энергетические проекты требуют также развития методов экономического анализа, учитывающих множество факторов, сопутствующих этим проектам и отражающих их специфику.

Ключевые слова.

Малые модульные реакторы, энергосистемы, модуляризация, модульность, транспортабельность, серийность, технологическая и производственная готовность, мульти-модульная АЭС, регулирование АЭС на базе ММР, риски модульных проектов.

Analytical review

Basic provisions, current state, aspects of practical implementation of NPP-projects based on SMR with emphasis on economic issues.

V.F.Demin, L.S.Smirnova, A.A. Golosnaya
NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Abstract

The research provides a systematized overview of the field of knowledge related to the analysis of factors important from the point of view of an integrated approach to the economy of projects of nuclear power plants based on small modular reactors (SMR). The review is based on the analysis of international and Russian publications. Economic research related to innovative energy projects of nuclear power plants based on SMR should cover a wide range of issues and levels of analysis that include the readiness of technological, design and industrial solutions for project implementation, the readiness of regulatory framework for NPP SMR and taking into account many additional aspects of the system-wide, energy system and market environment for the implementation of energy projects.

International and Russian experts note that the development of the concept of modular nuclear power plants will improve the situation in the main problem areas related to the nuclear power plant construction, reduce the costs of nuclear power plant projects due to a number of non-financial and financial factors at a certain scale of industrial production of modules, with the development of new NPP design and construction technologies, reduce the timeframe of the pre-design and design stages of the NPP life cycle during serial construction of NPPs based on SMR. Innovative energy projects also require the development of methods of economic analysis taking into account many factors accompanying these projects and reflecting their specificity.

Keywords

Small modular reactors, power system, modularization, modularity, transportability, seriality, technological and production readiness, multi-modular NPP, regulation NPP SMR, risks of modular projects.

Содержание

1. Введение. Обзор литературы.
 2. Общесистемный контекст исследования.
 3. Основные энергосистемные концепции для потенциальной реализации проектов АЭС на базе малых модульных реакторов.
 - 3.1. Единая энергосистема и объединенные энергосистемы
 - 3.2. Изолированные энергосистемы.
 - 3.3. Локальная (автономная) энергосистема
 4. Концепция мульти-модульных АЭС на базе реакторов малой мощности.
 - 4.1. Общие положения и подходы в обоснование модульной концепции АЭС.
 - 4.1.1. Модульность.
 - 4.1.2. Транспортабельность.
 - 4.1.3. Серийность и промышленная инфраструктура.
 - 4.1.4. Важные категории модульной концепции, сказывающиеся на экономических оценках проектов и на сроках сооружения АЭС.
 - 4.1.5. Положительные эффекты и проблемные зоны для практической реализации проектов АЭС на базе модульного принципа изготовления оборудования и сооружения АЭС.
 - 4.2. Оптимизация регулировочных процессов для реализации проектов АЭС на базе малых модульных реакторов.
 5. Экономические оценки затрат в проекты АЭС на базе ММР, экономическая эффективность и конкурентоспособность проектов.
 6. Вывод.
 7. Заключение.
 8. Список источников.
- Приложение 1 (обязательное). Определения и сокращения.
- Приложение 2 (обязательное). Подход и методика TRL/MRL/CRL.

1 Введение. Обзор литературы

Технические проекты реакторов малой мощности, концепции и компоновки (дизайн) АЭС на базе малых модульных реакторов (ММР) находятся в разных странах на разных стадиях технологической и промышленной готовности (TRL/MRL – Приложение 2), подготовка процессов сертификации и лицензирования проектов АСММ на национальных и международном уровне находится либо на стадии обсуждения и акцентирования внимания на проблемные зоны, либо в стадии анализа и корректировки существующих положений национальных систем регулирования под инновационные проекты на базе ММР.

В связи с этими и другими важными для коммерческой реализации проектов АСММ факторами, говорить о рыночной (коммерческой) готовности (CRL – Приложение 2) проектов и об экономических оценках этих проектов пока рано. К предварительным экономическим оценкам и первичным экономическим показателям, представленным в отдельных публичных источниках в отношении разных проектов следует относиться с учетом того, что выполнены они, **во-первых**, с высокой степенью неопределенности проектно-технологических и экономических данных, а также данных внешней среды - макроэкономической, энергосистемной, промышленной и рыночной, в которой они будут работать, **во-вторых**, традиционный методический экономический аппарат, расчетные инструменты подготовки исходных данных и выполнения экономических оценок для инновационных проектов АЭС малой мощности постоянно совершенствуются. Исходные данные и расчетные инструменты экономического анализа должны быть прозрачны для экспертов, обладать определенной степенью релевантности, т.е. адекватно отражать факторы, аспекты и реалии, важные с точки зрения получения экономических оценок для конкретных целей и задач, включая задачи принятия решений, а полученные итоговые результаты должны быть сопоставимы (сравнимы) с другими проектами с учетом структуры затрат проектов, степени готовности проекта, степени неопределенности исходных данных и предполагаемых энергосистемных сценариев, в которые проекты предполагается встраивать.

В современных международных и национальных публикациях последнего десятилетия, относящихся к вопросам развития направления энергетических проектов атомной энергетики на базе ММР, внимание уделяется не только самим проектам малых модульных реакторов, но и множеству факторов, важных с точки зрения их экономической (коммерческой) реализации, то есть, с точки зрения степени готовности выхода новых технологий на рынки энергопроектов и на рынки производства энергопродукции. В концептуальных экономических исследованиях, экономических подходах и методиках для проектов SMR делаются акценты на те важные ключевые аспекты, проблемные зоны и потенциальные возможности, которые могут сказаться на результирующих экономических

показателях проектов и на их экономической приемлемости для выхода проектов на рынки.

Для выполнения исследований, относящихся к экономике проектов АЭС на базе модульных реакторов малой мощности, **важной частью работы является изучение опубликованных международных и национальных исследований и экспертных оценок**, сделанных теми институтами и авторами, которые выполнили свой анализ в целях и в контексте комплексной концепции развития направления SMR, но в то же время, с акцентами на определенные атрибуты самих проектов SMR и аспекты, важные с точки зрения их экономической (коммерческой) реализации, на основе экспертных мнений, подготовленных референтных или экспертных данных, с использованием специальных методических и расчетных инструментов анализа.

В основе данного исследования, посвященного специфике экономики проектов АЭС на базе ММР, лежит анализ большого спектра открытых публикаций зарубежных и российских авторов и международных организаций, относящихся к **теме экономики атомных станций на базе реакторов малой мощности и их жизненных циклов**. Многие специфические факторы, важные для экономики проектов SMR, более глубоко представлены в зарубежных публикациях, в российских публикациях вопросы специфики экономики проектов SMR мало исследованы, поэтому данная работа базируется в большей степени на анализе зарубежных публикаций и отчетов международных групп, а также на российских публикациях, актуальных с точки зрения вопросов, затронутых в зарубежных публикациях.

Важно сделать акцент, что в отношении инновационных энергетических проектов на базе ММР, экономические исследования должны охватывать большой спектр вопросов и уровней анализа: макроэкономический, системно энергетический и, конкретно, проектный уровень.

Основные проанализированные исследования могут быть сгруппированы в несколько блоков:

- общесистемные прогнозные тенденции в развитии электроэнергетики разных стран, регуляторные, экономические и финансовые механизмы для реализации программ развития;
- современное состояние атомной энергетики в разных странах, тенденции в развитии, место и роль проектов на базе ММР в перспективных планах энергетического развития;
- современная технологическая и рыночная инфраструктура работы АЭС в разных странах, перспективные ниши для АЭС на базе ММР;
- концепция модуляризации для энергетических проектов, основные положения и тенденции в развитии концепции, необходимые основные и сопутствующие задачи, структурно-организационные вопросы и зоны ответственности участников проектов АЭС модульной концепции;

- вопросы регулирования проектов атомной энергетики в национальном и международном пространстве (законы, нормативные акты, сертификация, лицензирование), требования и стандарты для инновационных проектов на базе ММР и промышленной инфраструктуры (производство модулей, другого оборудования и выполнение необходимых видов деятельности для АЭС модульной концепции);
- сценарии реализации проектов АЭС на базе ММР (роль энергоисточника в энергосистеме, проектные возможности слежения за нагрузкой и экономическая целесообразность, потребности в резервировании мощностей в энергосистеме при включении в систему АЭС, когенерация – производство тепла, производство водорода, опреснение воды, опции - аккумулялирование тепла, электроэнергии, совместная работа с энергоисточниками на базе ВИЭ;
- неопределенности для выполнения экономических оценок: степень готовности технологий и проектов – TRL/MRL/CRL, неопределенности внешней среды на длительном сроке реализации инвестиционных проектов – методы учета неопределенностей в экономическом инвестиционном анализе (**метод реальных опционов** в сравнении с методом DCF – дисконтированных денежных потоков);
- этапы жизненного цикла проектов – сравнительные экономические оценки SMR и LR на разных этапах жизненного цикла проектов, адекватность применения **экономики масштаба** для проектов SMR - анализ экономических методик для LR и SMR;
- экономика обучения (серийность, квалифицированность, промышленное изготовление), LEAD-проект, FOAK-NOAK модули и проекты, положительные эффекты экономики серийности при модульном подходе;
- экономические, инвестиционные и финансовые методы и подходы анализа проектов SMR, потенциальные организационные и финансовые механизмы реализации проектов SMR, роль управления проектами (задачи менеджмента) в контексте реализации проектов LR и SMR ;
- расчетные инструменты экономического анализа для SMR, базы исходных данных для выполнения сценарного и проектного анализа, внешние факторы и уровни анализа – проектный, электроэнергетический, макроэнергетический; .
- программы и ключевые направления вложения усилий (международное сообщество, государство, компании, регуляторы, НИОКР) для продвижения к экономической (коммерческой) реализации проектов АЭС на базе ММР, поэтапность и опционность задач; .

Интеграция и анализ того, что уже сделано в данном направлении другими экспертами, позволяет создать платформу для дальнейшего развития исследовательской работы и реализации комплексного подхода в задаче анализа экономики проектов АЭС на базе ММР на всех этапах жизненного цикла проектов. В предлагаемом исследовании изложены важные аспекты и факторы, требующие определенного внимания для развития направления экономического и системного анализа в приложении к

проектам АЭС малой и средней мощности в российской деловой и научной среде.

2. Общесистемный контекст исследования

Выполнение исследования специфики экономики атомных станций малой мощности (АСММ) и их жизненных циклов без учета общесистемных технических, технологических и рыночных аспектов среды потенциального функционирования проектов АЭС на базе малых модульных реакторов (ММР) может иметь конъюнктурную направленность, поэтому в начале данного подраздела исследования сделан акцент и дан краткий обзор двух факторов, важных с точки зрения концептуального обоснования экономических оценок проектов АЭС на базе ММР. Эти факторы связаны с внешней для энергоустановок технологической и рыночной средой, анализ которой позволит более адекватно учесть влияние этих факторов на потенциальную возможность экономической реализации проектов АЭС на базе ММР и на экономику этих проектов.

Первый фактор относится к общим и энергосистемным вопросам (Приложение 1 – Энергосистема) функционирования АЭС. Сетевые и энергосистемные вопросы постоянно обсуждаются на симпозиумах и в материалах МАГАТЭ и OECD как важные вопросы внешних систем (инфраструктуры) работы АЭС [1 - 5, 11].

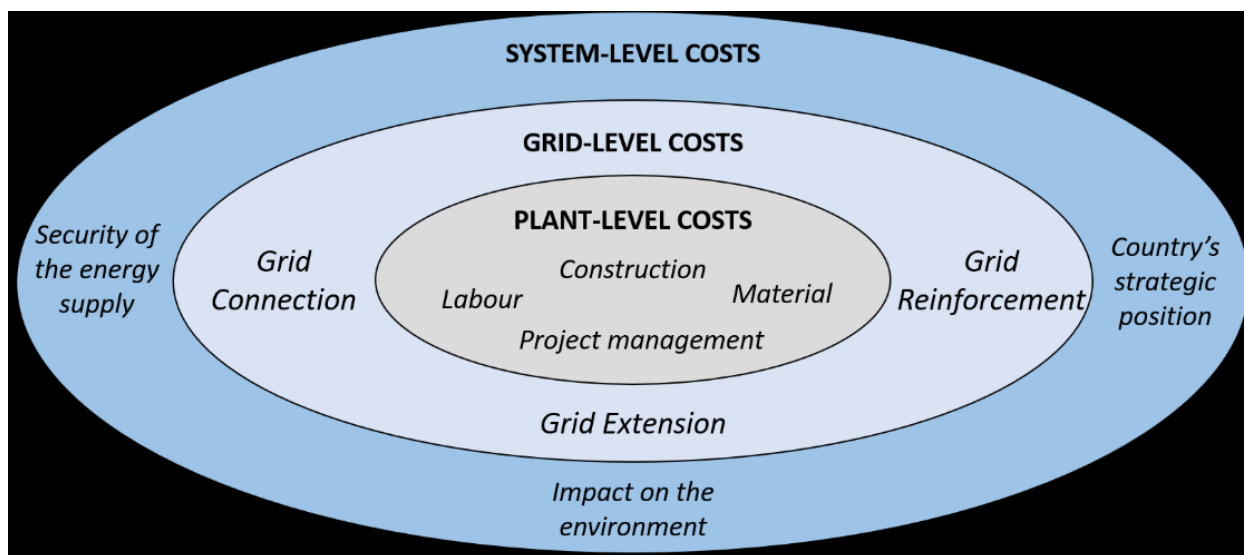


Рис.1 Затраты на производство в привязке к уровню станции, сетевой инфраструктуры и общесистемному уровню (Plant Level - Grid Level - Total System Costs) рисунок адаптирован для исследования на основе [2, 51]

«В оценке стоимости технологий производства электроэнергии принципиально важно учитывать, что ни одна электростанция не существует изолированно и что станции взаимосвязаны с более широкой системой, как с технической, так и с экономической точки зрения» [51].

В материале - обзоре [51] дана краткая характеристика затрат на каждом уровне:

1. **Plant- Level Costs - Затраты на станционном уровне:** непосредственно затраты на строительство, эксплуатацию, вывод из эксплуатации – затраты на всем жизненном цикле (ЖЦ).
2. **Grid-Level –Costs - затраты на сетевом уровне:** затраты, понесенные на изменение транспортной и распределительной сети, затраты на подключение новых мощностей к электросети, для поддержания долгосрочного электроснабжения (например, в условиях перебоев с возобновляемыми источниками энергии, а также затраты на повышение краткосрочной балансировки в энергосистеме и ряд других энергосистемных вопросов).
3. **System-Level-Costs - общие системные затраты:** представляют собой более широкий набор затрат, в том числе эффекты трудно монетизируемые и выходящие за пределы самого энергетического реактора, например, выбросы CO₂, влияние на безопасность энергоснабжения, стратегическое положение страны, определенная энергетическая политика страны, модели рынка страны и др.

МАГАТЭ в своих документах уделяет большое внимание вопросам инфраструктуры работы АЭС в связи с разработкой инновационных проектов АЭС и в связи с проявлением интереса к проектам атомной энергетики стран-новичков. Документ МАГАТЭ [4] подчеркивает важность сетевого аспекта инфраструктуры для новых ядерных проектов следующим образом: «...начальным шагом в рассмотрении вопроса о включении атомного проекта в систему является оценка текущего состояния электросетевого хозяйства, планируемой сетевой мощности и ее надежности». Документ рекомендует на 3 фазе ЖЦ (жизненного цикла) проекта АЭС - «Сооружение и эксплуатация»: оператор энергосистемы совместно с владельцем/оператором АЭС разрабатывает мероприятия по обеспечению координации работы энергосистемы с эксплуатацией АЭС и дальнейшему анализу и повышению надежности работы энергосистемы.

Исторически общесистемным и сетевым вопросам в атомном и общем энергетическом сообществе стали уделять внимание с 1970-х годов XX века в связи с масштабным ростом вводимых мощностей АЭС в разных странах. Этот фактор требовал анализа в целях обеспечения стабильности и надежности работы энергосистем, в которые были включены АЭС. Учеными-энергетиками выполнялись поисковые исследования, а на международных совещаниях уделялось большое внимание обсуждению вопросов включения АЭС в энергосистемы, а также экономическим аспектам, связанным с работой АЭС в разных энергосистемах [5].

Ключевыми темами исследований и докладов были [5]:

- специфические характеристики АЭС, имеющие отношение к работе в энергосистеме, соответствие их регулировочных возможностей требованиям энергосистемы;
- проблемы планирования и эксплуатации энергосистем, включающих АЭС;
- перспективы (в том числе, экономические) включения АЭС в национальные энергосистемы;
- эффекты включения АЭС в региональные энергосистемы и оценка влияния АЭС на экономику энергосистем, а также влияние условий работы АЭС в энергосистеме на экономику АЭС.

В исследованиях внимание уделялось проблемным аспектам связи АЭС с энергосистемой, путям преодоления различных режимных осложнений, проистекающих из-за суточных и сезонных колебаний потребности в энергии, технической неясности решения проблемы покрытия пиковых потребностей в энергии, которая усложняется большим разнообразием специфических условий в каждом регионе, в каждой стране, и порождает множество предложений по способам ее решения в зависимости от ресурсных и технических возможностей. Для включения АЭС в энергосистему важен анализ структуры всех работающих мощностей в системе для гармонизации общих технологических и технических решений, для экономической эффективности работы всей системы. Для развивающихся стран важен анализ внутринациональной энергетической ситуации и их географического расположения, на основе чего выбирается площадка и необходимые единичные мощности блоков АЭС.

Развитие энергосистем разных стран важно с точки зрения подготовки инфраструктуры для обеспечения доставки электроэнергии к потребителю. В качестве примера значимости энергосистемы и ее развития для реализации проектов сооружения АЭС можно привести свежий пример : проект финской компании и ГК «Росатом» Ханхикиви отодвинут по срокам (с 2024 г до 2028 г) из-за того, что *«сдвинулся весь сценарий развития финской энергосистемы»*.

Что подразумевается под развитием энергосистем в современном контексте для генерирующих мощностей, в первую очередь, для АЭС малой и средней мощности? В настоящее время активно развивается направление в электроэнергетике «Распределенная генерация» (англ. Distributed generation), вызванное интересом к генерирующим мощностям ВИЭ, приближенным к непосредственным потребителям электроэнергии. Масштабное сооружение генерирующих установок на базе ВЭУ, солнечных, малых газопоршневых установок приводит к изменениям в архитектуре электросетевых систем, к изменениям системы диспетчеризации и распределения электроэнергии. Поэтому встраивание АЭС малой или средней мощности в энергосистему предполагает анализ всех вопросов, относящихся к стабильности приема электроэнергии от АЭС в планируемых режимах и сценариях работы, с учетом всего состава генерирующего оборудования и графиков нагрузки.

Второй важный фактор контекста связан с альтернативными генерирующими установками малой и средней мощности, позволяющими покрывать потребности в энергоснабжении в разных энергосистемах и потенциально могущими как конкурировать с АЭС на базе ММР, так и находиться в энергосистеме в определенном «*союзе энергоисточников*» [10]. Международное и российское сообщество в настоящее время активно изучает возможности экономической реализации разных инновационных проектов производства энергопродукции в разных энергосистемах, включая так называемую распределенную генерацию (distributed generation) [11] и эффекты от работы этих проектов в разных энергосистемах [6 -12]. Выполняется проектный анализ, а также анализ возможностей и проблем включения конкретной энергоустановки в разные энергосистемы, исследуются условия конкурентоспособности таких проектов для разных рынков и механизмы регулирования, включая государственную поддержку [13-18]. Произошедший за последнее десятилетие масштабный ввод энергоустановок малой и средней мощности на базе ВИЭ (прежде всего, ВЭУ) и на ископаемом топливе вызвал необходимость анализа последствий такого масштабного ввода для энергосистем. Существующий современный накопленный опыт работы энергоустановок малой и средней мощности в энергосистемах позволяет обозначить проблемные зоны, определить требования к работе энергоустановок и оценить потенциальные возможности выполнения требований системы разными генерирующими установками с возможностью их работы в разных нишах, сегментах или секторах энергорынка [6-12]. На данный аспект также делают акцент в своих исследованиях зарубежные эксперты, рассматривая надежность поставок электроэнергии потребителям в энергосистеме, где совместно функционируют генерирующие установки на базе разных энергоносителей.

В контексте современного развития направления АЭС на базе малых модульных реакторов и возможностей экономической реализации проектов таких АЭС становятся актуальными поисковые исследования и анализ включения таких АЭС в энергосистемы разного масштаба и географии расположения. Такие исследования необходимы для актуализации требований от энергосистем к проектам АЭС на базе ММР, для разработки нормативных и регулирующих требований к проектам [11,12] с учетом их технических, конструктивных и технико-экономических особенностей, для определения условий и требований к конкретной площадке размещения, а также выполнение экономического анализа включения АЭС на базе ММР в энергосистемы с точки зрения приемлемости (ресурсной, технической, экономической) таких проектов для потребителей и конкретной энергосистемы. В связи с энергосистемным контекстом исследования возникает ряд вопросов:

- в какой мере о проектах АЭС на базе ММР можно говорить как о проектах, относящихся к распределенной (локальной) генерации или это

проекты для разных энергосистем в зависимости от мощности и других характеристик проекта?

- существуют ли у таких проектов коммерческие преимущества по сравнению с проектами на базе других энергоисточников на органическом топливе или на ВИЭ?

- необходимы ли государственные механизмы регулирования для компенсации всех инвестиционных затрат в эти проекты по аналогии с поддержкой проектов ВИЭ?

Развитие направления атомных станций на базе ММР при определенных темпах и масштабах роста должно предполагать оценку масштабных эффектов (в том числе, экономических) от влияния развития этого направления на промышленную инфраструктуру, на энергетические системы, на экономические показатели самих проектов, на ценовые параметры энергетического рынка и другие макроэкономические и системные эффекты.

Такие экономические эффекты могут возникать как в контексте решения проблемных зон энергорынка, так и в контексте экономического развития регионов и развития промышленности в регионах.

3 Основные энергосистемные концепции для потенциальной реализации проектов АЭС на базе ММР

«Необходимо обязательно проводить анализы тенденций, чтобы определять слабые места до того, как проявятся серьёзные проблемы»
(адмирал Хайман Риквер)

Концепция мульти-модульной АЭС на базе ММР предполагает анализ встраивания такой АЭС определенной мощности в конкретную энергосистему. Поскольку любые решения в области инфраструктуры энергообеспечения населения и промышленности страны принимаются с учетом поддержки на государственном уровне (стратегическая энергетическая безопасность), то проекты АЭС не являются исключением с точки зрения экономико-географической привязки таких проектов к разным площадкам и потребностям региона размещения.

В настоящее время в международном и российском энергетическом сообществе рассматриваются, как минимум, **три энергосистемные концепции** реализации проектов АЭС на базе ММР в привязке к конкретному территориальному расположению, экономическим задачам и потребительским нуждам. Эти концепции основаны на встраивании АЭС в конкретные энергетические системы, организованные и функционирующие с учетом ресурсно-географических, экономических и экологических факторов в целях производства энергопродукции для потребителей конкретной энергосистемы.

3.1 Единая энергосистема и объединенные энергосистемы

Единая энергосистема (ЕЭС) это крупная энергосистема, включающая в себя, как правило, несколько объединенных энергосистем (ОЭС) для централизованного электроснабжения потребителей в масштабах одного государства (ЕЭС РФ включает семь ОЭС) или нескольких государств (энергосистемы Европы и США – смотри справку далее по тексту).

Объединенные энергосистемы – это системы, объединяющие энергосистемы нескольких районов. В объединенных энергосистемах, связанных между собой сетевой и распределительной инфраструктурой и образующих единую энергосистему (ЕЭС), осуществляется единое диспетчирование всех технологических процессов с учетом сетевых мощностей, возможных перетоков мощностей и электроэнергии из одной энергосистемы в другую. Системный оператор (СО) ЕЭС осуществляет балансирование производства, потребления и перетоков электроэнергии в реальном времени, формируются системные требования по надежности и стабильности работы ЕЭС, единое резервирование мощностей, определенные требования и нормативы к генерирующим установкам ЕЭС, работающим в разных режимах, секторах и зонах. Объединение отдельных энергоснабжающих систем в единую энергосистему связано, в том числе, с комплексностью, взаимозаменяемостью и гармонизацией работы различных

видов технологий производства энергии, работающих на базе разных энергоресурсов.

Справка 1.

Европа.

В настоящее время все европейские энергосистемы, за исключением энергосистем стран севера Европы, функционируют в рамках системы Европейского союза по координации передачи электроэнергии (UCTE - Union for the Coordination of Transmission of Electricity). Энергосистемы Великобритании связаны с UCTE подводным кабелем, проходящим под Ла-Маншем. С сентября 2010 года энергосистема Турции (по запросу в UCTE) синхронизирована с европейской энергосистемой.

Энергосистемы Северной Европы и Финляндии работают в границах энергообъединения NORDEL – северная синхронная зона - энергообъединение стран Северной Европы (Швеции, Норвегии, Дании, Финляндии и Исландии). При этом западная (континентальная) часть энергосистемы Дании работает параллельно с UCTE, а восточная – с NORDEL, энергосистема Исландии – автономна.

Энергосистемы прибалтийских государств в настоящее время функционируют синхронно с энергосистемой России, но к 2025 году планируется отключить энергосистемы от ЕЭС РФ и синхронизировать работу энергосистем прибалтийских государств с европейской энергосистемой.

Функционирование всех энергосистем Европы с июля 2009 г. происходит под технологическим управлением и координацией единого системного регулятора ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) — Европейской ассоциации системных операторов в области электроэнергетики, объединившей все электрические сети энергообъединений Европы. Задача синхронизации состоит не только в синхронизации фаз и частоты электрического тока, но также и балансировку потребностей и производства электроэнергии через системы дистанционного управления электростанциями.

США.

В настоящее время 2/3 населения США обслуживаются на рынках электроэнергии, на которых системное управление энергетическими системами осуществляют независимые системные операторы ISO/RTO:

- PJM (функционирует на большей части территории штатов Пенсильвания, Нью-Джерси, Мэриленд, Делавэр, федеральный округ Колумбия, Виргиния, Западная Виргиния и Огайо, а также частично территорию штатов Иллинойс, Мичиган, Индиана, Кентукки, Южная Каролина и Теннесси);*
- New England ISO, ISO NE (функционирует на территории штатов Коннектикут, Мэн, Массачусетс, Нью-Гэмпшир, Род-Айленд, Вермонт);*

- *New York ISO, NYISO (Нью-Йорк);*
- *Electric Reliability Council of Texas, ERCOT (Совет по электроэнергетической надежности Техаса);*
- *CAISO (Калифорния);*
- *Southwest Power Pool, SPP (функционирует на территории 14 штатов - Канзас, Оклахома, Небраска, Нью-Мексико, Техас, Луизиана, Монтана, Миннесота, Миссури, Миссисипи, Арканзас, Айова, Северная Дакота, Вайоминг);*
- *Midcontinental Independent System Operator, MISO (Организация по надежности Среднего Запада, функционирует на территории Северная Дакота, Южная Дакота, Небраска, Миннесота, Айова, Висконсин, Иллинойс, Индиана, Мичиган, а также частично территорию штатов Монтана, Миссури, Кентукки и Огайо).*

Работа технологических процессов в единых энергосистемах сопровождается и экономически обеспечивается определенными **коммерческими механизмами**. В энергосистемах разных стран действуют в зависимости от моделей энергорынка каждой конкретной страны или региона определенные **коммерческие правила** для генерирующих компаний, для оптовых покупателей и поставщиков, для компаний сетевой и распределительной инфраструктуры, для системных инфраструктурных институтов рынка и для розничного рынка энергопродукции. **Коммерческие правила рынка** в каждой конкретной стране наравне с технологическими процессами в энергосистемах могут определять экономическую эффективность работы поставщиков и потребителей энергопродукции на рынке, а в зависимости от технико-экономических параметров генерирующих мощностей и коммерческих результатов их работы может быть обоснована и оценена экономическая эффективность и конкурентоспособность работы энергопроектов.

Системы и механизмы оптовых энергорынков (в некоторых странах и розничных), как правило, включают как механизмы государственного регулирования, так и конкурентные правила. Особенно это важно на современных либерализованных электроэнергетических рынках, поскольку энергетика относится к инфраструктурным отраслям экономики, обеспечивающая электроэнергией как рыночные экономические структуры, так и социальные структуры и социальных розничных субъектов.

В единой энергосистеме (ЕЭС) может работать множество электрогенерирующих установок разной мощности, расположенных в разных географических районах, но охваченных единой энергосистемой. К установкам малой и средней мощности, работающим в таких системах, предъявляются определенные технические и технологические требования, если предполагается, что данная генерация имеет технологическую связь с ЕЭС и может выдавать продукцию в систему.

Концепция мульти-модульной АЭС на базе ММР, получившая свою поддержку в развитых странах (США, Европа), потенциально предполагает встраивание такой АЭС (*по сумме модулей - средней или большой мощности*) в объединенную энергосистему региона или единую энергосистему.

3.2 Изолированные энергосистемы

Изолированная энергосистема (англ. *Insulated energetical system*) - энергосистема, не имеющая электрических связей для параллельной работы с другими **энергосистемами** (ГОСТ- Р - 53905 2010).

Поскольку в территориально изолированных энергосистемах отсутствует (или ограничена) технологическая связь (прежде всего, сетевая, а также диспетчерская) с инфраструктурой единой энергосистемы (ЕЭС) или с отдельными энергосистемами, связанными с ЕЭС, то процессы управления всеми технологическими процессами, связанными с балансировкой потребительской нагрузки и производства электроэнергии, с управлением этими графиками, с гарантиями надежности поставок электроэнергии и мощности в разных режимах работы системы, с резервированием мощностей для периодов пиковых нагрузок, плановых ремонтов, неплановых остановов, с регулированием частоты в сети (ОПРЧ, НПРЧ), с оптимальной нагрузкой мощности разных генераторов обеспечиваются **самостоятельными регулирующими структурами (региональный системный оператор)** для конкретной изолированной энергосистемы.

Потребности в необходимых объемах электроэнергии и тепла в территориально изолированной энергосистеме обеспечиваются, как правило, энергоустановками средней и малой мощности (региональными энергоустановками). В таких системах, как правило, действуют определенные технические и технологические требования к параметрам и режимам работы энергоустановок, позволяющие в границах диспетчирования данной изолированной системы обеспечивать режимы общей синхронизации работы энергоустановок, а сетевые распределительные системы выстраиваются с учетом расположения конечных потребителей и возможностями выдачи электроэнергии в распределительную сеть разными производителями.

Коммерческие правила работы энергоустановок в изолированных энергосистемах могут отличаться от коммерческих правил единой энергосистемы в связи с тем, что территориальная замкнутость не позволяет создать в таких системах условий для конкуренции, а цены на конечную продукцию являются регулируемыми (например, в России). В связи с этим, экономическая эффективность работы отдельной энергоустановки в такой системе определяется множеством дополнительных факторов (включая, субсидии, дотации или другую гос.поддержку) по сравнению с рыночными конкурентными моделями.

Концепция проекта АСММ с 1-2-3-4 модулями - реакторами малой мощности актуальна и востребована для районов, относящихся к изолированным энергосистемам. Работа энергоблоков большой мощности АЭС (свыше 700 МВт (э)) в изолированных энергосистемах может быть технологически затруднена и экономически неэффективна. К тому же, в изолированных энергосистемах электрические сети могут быть с ограниченной пропускной способностью. Поскольку сеть не должна подвергаться колебаниям мощности, превышающим 10% от общей мощности сети, то энергоустановка мощностью 1000 МВт не может быть подключена к сети мощностью менее 10 ГВт [39.].

Реализация конкретного проекта АЭС на базе небольшого количества модулей малой мощности для конкретной площадки в контексте изолированной энергосистемы требует отдельного общесистемного анализа, анализа требований к такому проекту, а также комплексной оценки экономики такого проекта АЭС.

3.3 Локальная (автономная) энергосистема

Концепция локальной (автономной) энергосистемы подразумевает сооружение (установку) источников электрической и (или) тепловой энергии компактных размеров, небольшой мощности или мобильной конструкции, как правило, для собственных нужд потребителя.

Понятия «малая энергетика», «распределенная энергетика» широко вошли в оборот в последнее десятилетие в связи с масштабным развитием энергоисточников малой мощности (до 25 МВт - эл.) на базе ВИЭ и на органическом топливе [19].

В современном понимании практической реализации таких проектов **распределенная, децентрализованная, локальная, автономная генерация** - это генерация, производящая электроэнергию в определенном районе из множества небольших источников энергии или установка, производящая энергию для задач конкретного потребителя. При необходимости и при возможности излишки продукции такой установки могут выдаваться в общую электрическую или тепловую сеть для других потребителей, при этом происходит подключение энергоустановки к местным распределительным электрическим и (или) тепловым сетям.

Эксперты отмечают [9, 10], что локальные энергосистемы – это комплектные энергосистемы, подразумевающие «**союз энергоисточников**». При этом доля каждого из энергоисточников в системе определяется требованиями надежности и стабильности снабжения потребителей. Практика последнего времени сооружения ветропарков продемонстрировала необходимость ограничений доли ВЭУ в изолированных и локальных энергосистемах – при доле ВЭУ 30% и более теряется стабильность энергоснабжения. Это объясняется тем, что ВИЭ (на базе солнца, ветра, др.) не являются системными энергоисточниками, то есть не могут покрывать самостоятельно потребительскую нагрузку во всех режимах графика

потребительской нагрузки. Для этого требуются надежные системные энергоисточники [9, 10], стабильно обеспечивающие базовую зону графика нагрузки и, в случае необходимости, пиковую зону.

Концепция «Распределенной Генерации» - это подход, при котором количество энергии, теряемой при передаче электроэнергии, уменьшается, уменьшается количество линий электропередач и распределительных устройств, которые должны быть построены, потому что электричество вырабатывается очень близко от того места, где оно используется, возможно, даже в том же здании.

Цена производства единицы энергопродукции от таких источников может быть намного выше, чем от генерирующих больших мощностей централизованных энергосистем, но для конечного потребителя цена электроэнергии при определенных условиях (включая, регулирование и поддержку) может быть ниже, чем цена покупки электроэнергии от поставок из региональных или единых энергосистем, поскольку в конечную цену электроэнергии от централизованных энергосистем включены значительные составляющие на сетевые и системные услуги (~ 50-60%) [13].

В энергетическом сообществе России под категорию «малые» энергоустановки принято относить электростанции мощностью до 25 МВт (эл) с агрегатами единичной мощностью до 10 МВт [10, 11, 19].

Если исходить из предположения о потенциальной возможности работы коммерческих генерирующих установок малой мощности АЭС (определенный мощностной ряд) в локальных энергосистемах в целях надежного обеспечения потребностей локальных (автономных) энергопотребителей, то принципиальным моментом сооружения блоков АЭС в локальных энергосистемах является необходимость **относительной близости расположения энергоустановок к потребителям** в целях выдачи электроэнергии (и тепла) для сокращения, тем самым, расстояния по передаче электроэнергии и тепла. Границы площадки АЭС и расстояние до потребителей должны быть обоснованы только при соблюдении нормативных требований по безопасности для АСММ и при анализе проектных особенностей, относящихся к вопросам безопасности.

Комментарий.

В современных электроэнергетических рынках разных стран существуют непростые связи **двух систем: (1) системы технологических, производственных процессов**, относящиеся к производству и транспортировке электроэнергии, к диспетчированию и распределению потоков электроэнергии с **(2) коммерческой системой** механизмов платежей за услуги и продукцию.

Во многих странах существуют определенные механизмы государственной поддержки развития распределенной генерации, расположенной в большей близости к регионам – потребителям. Это важно, по мнению экспертов, для оптимизации затрат и снижения тарифов для

потребителей, поскольку, в таком случае, многие проблемы снабжения потребителей электроэнергии и тепла решаются не за счет механизмов Единой энергосистемы и Оптового Рынка Электроэнергии и Мощности (ОРЭМ), а за счет изменения технологических архитектур энергосистем и сооружения энергомощностей, работающих в региональных системах на базе разных энергоисточников и за счет механизмов тарифного регулирования.

Например, в российской системе ОРЭМ существует проблема перекрестного субсидирования одних потребителей за счет других, как правило, крупные промышленные потребители оплачивают своими тарифами розничных потребителей, иногда расположенных удаленно от энергоисточников и для которых транспортировка электроэнергии стоит дорого. Объемы такого субсидирования в российской энергосистеме выливаются ежегодно в миллиарды рублей. Как отмечают эксперты [16, 17, 18], потенциальная возможность нивелирования перекрестного субсидирования может быть реализована через строительство в регионах собственных энергетических мощностей средней и малой мощности [13, 16-18].

4 Концепция мульти-модульных АЭС на базе реакторов малой мощности

4.1 Общие положения и подходы в обоснование модульной концепции АЭС

Практика реализации проектов сооружения АЭС большой мощностей показывает, что ключевыми проблемами, **повышающими итоговую стоимость проекта и увеличивающими сроки реализации проекта**, являются,

- **во-первых**, регулировочные процессы и относящиеся к ним вопросы и сроки, связанные с этапами и механизмами сертификации проектов и получения лицензий,

- во-вторых**, вопросы оптимального управления всеми работами проекта на стадии сооружения станции (технологии строительства, поставки оборудования и менеджмент управления проектом),

- в-третьих**, вопросы финансового характера, относящиеся к значительным инвестициям в сооружение больших блоков АЭС и к множеству финансовых рисков инвесторов в условиях неопределенностей и рисков экономического и энергетического развития.

Именно эти факторы в настоящее время сдерживают и ограничивают возможности реализации проектов АЭС большой мощности в разных странах.

Как отмечают международные и российские эксперты [21, 26, 28-32], развитие концепции мульти-модульных АЭС на базе малых модульных реакторов (ММР), позволит улучшить ситуацию в основных проблемных зонах, снизить затраты в проекты АЭС при определенном масштабе промышленного производства модулей, при формировании новых технологий проектирования и сооружения АЭС, за счет других нефинансовых и финансовых факторов, сократить сроки на предпроектных и проектных этапах жизненного цикла АЭС при серийном сооружении АЭС на базе ММР.

В настоящее время концепция мульти-модульных АЭС получила свое широкое концептуальное и проектное развитие в США и ряде стран Европы, прежде всего, в Великобритании [22, 23, 24, 25, 31, 32, 43, 53]. Помимо проектных разработок, находящихся на разных стадиях технологической готовности модулей реакторов (методика TRL – Приложение 2), ведутся поисково-аналитические исследования по всем практическим вопросам, относящимся к реализации данной концепции на всех этапах жизненного цикла проекта. Концепция предполагает сооружение мульти-модульных АЭС на базе нескольких реакторов малой мощности на одной площадке.

Справка 2.

[\[https://www.tva.gov/Energy/Technology-Innovation/Small-Modular-Reactors\]](https://www.tva.gov/Energy/Technology-Innovation/Small-Modular-Reactors)

В декабре 2019 года американская компания TVA (госкорпорация территориального развития) стала первой компанией в стране, успешно получившей раннее разрешение на строительство (ESP) от NRC. 20-летнее разрешение подтверждает размещение ядерного объекта площадью 935 акров клинч-Ривер недалеко от ОК-Риджа, штат Теннесси, для потенциального строительства и эксплуатации небольших модульных ядерных реакторов до 800 мегаватт суммарной мощности (от двух и более модулей). Выбор проектов малых модульных реакторов, количество модулей и решение о строительстве будет основываться на энергетических потребностях и экономических оценках проектов.

Основаниями для развития мульти-модульной промышленной концепции сооружения АЭС, помимо общих тенденций развития инновационных подходов модульного изготовления оборудования и сооружения промышленных объектов, включая объекты атомной энергетики, могли послужить следующие обстоятельства:

- в США и Европе существует большая потребность в масштабной замене к 2050 году выводимых из эксплуатации больших мощностей АЭС.

Справка 3.

США.

*По оценкам EIA (Агентство энергетической информации при министерстве энергетики США), до 25% атомных мощностей США могут быть закрыты в период до 2050 года. Принятые в базовом прогнозе данные по выводу блоков более чем в три раза перекрывают прирост суммарной мощности. Согласно прогнозу, до 2050 года будет выведено **29,9 ГВт(э) атомных блоков**. [21].*

Европа. *«С учетом предполагаемого продления сроков эксплуатации АЭС, половина ядерных мощностей в ЕС будет выведена из эксплуатации в период до 2040 года [22]; Евросоюз оценил необходимые объемы генерирующих мощностей АЭС к 2050 году на уровне от 95 до 105 ГВт, при этом к 2050 году из эксплуатации могут быть выведены **90 % действующей атомной генерации (от 121 ГВт в 2015 году)**, замена генерирующих мощностей потребует от 350 до 450 млрд евро в течение ближайших 35 лет[23].*

Великобритания. *«В настоящее время 18% производимой электроэнергии Великобритании обеспечивается за счет атомной энергетики, вырабатываемой 15 реакторами на 8 объектах, построенных между 1967 и 1995 гг. Ожидается, что семь из восьми объектов(85%) будут закрыты к 2030 году» [22, 32].*

- в развитых ядерных странах существует созданная электроэнергетическая инфраструктура (сетевая, диспетчерская), в том числе, с учетом ныне работающих АЭС большой мощности, встроенных в энергосистемы, что не требует (а, наоборот, сохраняет) дополнительных капитальных затрат в энергосистемах на сетевые мощности при замене мощностей на подобные мощности;

- энергоактивы больших мощностей являются крупными экономическими активами энергокомпаний, поэтому сохранение таких активов через обновление мощностей позволит энергокомпаниям сохранить себя и развить свой бизнес при условии доходности инновационных проектов мульти-модульных АЭС;

- энергетическая система любой страны является стратегически важной инфраструктурой экономики, поэтому обновление и развитие энергетических мощностей происходит, как правило, на основании государственных решений и при поддержке государства (в Европе и в США прогнозный энергетический анализ показал необходимость сохранения атомной генерации в структуре электроэнергетического баланса – [23, 25, 34];

- в некоторых развитых странах (США, страны Европы) собственниками и операторами действующих АЭС являются частные или смешанные частно-государственные компании, в связи с чем, крупные капитальные вложения в новые блоки большой мощности могут быть финансовой проблемой для таких компаний. Государственное участие и частичное финансирование в рамках механизмов государственно-частного партнерства может быть более приемлемым вариантом для реализации проектов мульти-модульных АЭС, как для частных компаний, так и для государства. В рамках такого партнерства частные проектные компании ждут от государства поддержки и участия как в создании промышленной инфраструктуры для производства модулей реакторов малой мощности и других стационарных модулей, так и для других бизнесов, относящихся к проектам атомной энергетики.

Справка 4 [24]. *Американский консорциум по малым модульным реакторам "SMR Start", в который входят следующие компании AREVA, Bechtel, BWXT, Dominion, Duke Energy, Energy Northwest, Fluor, Holtec International, NuScale Power, Ontario Power Generation, PSEG, TVA и Utah Associated Municipal Power Systems, предложил развивать программу государственно-частного партнёрства, аналогичную той, которая существует в других секторах энергетики для успешной коммерциализации новых технологий. В эту программу предлагается включить государственную поддержку разработки двух или более конструкций ММР, создание четырех или более коммерческих энергоблоков с малыми реакторами в США и развитие национальной сети производства оборудования и услуг, включая экспортное направление.*

В контексте развития направления АЭС на базе реакторов малой мощности, в части практической реализации проектов АЭС, ключевые акценты делаются на категории: **модульность, транспортабельность, серийность и необходимость промышленной инфраструктуры для определенного объема производства и транспортировки модулей.** На основе этих главных категорий делаются предположения и выводы о потенциальных положительных **экономических преимуществах** мульти-модульной концепции реализации проектов АЭС.

Для однозначного понимания концепции мульти-модульных АЭС необходимо сделать акцент на ключевую категорию «модульность» и на приставку МУЛЬТИ.

Приставка МУЛЬТИ в рассматриваемой концепции указывает на множественность или многократность, а также на потенциальное единообразие, унифицированность и стандартизацию определенных производственных, регулировочных, строительных и прочих процессов, относящихся как к главному элементу блока АЭС (модуль реактора), так и к другим крупным блокам-модулям, необходимым для всего комплексного атомного производственного объекта, которым является АЭС или отдельный блок АЭС.

По сумме мощностей модулей установленная мощность всей АЭС (в зависимости от мощности единичного модуля и их количества) может составлять как небольшую мощность менее 300 МВт(э), так и мощность, равноценную блоку большой мощности. Поскольку понятие АЭС малой мощности (АСММ) подразумевает не интегральную установленную электрическую мощность АЭС на одной площадке, а мощность одного модуля реактора, не превышающего 300 МВт(э), то подходы по включению мульти-модульной АЭС в конкретную энергосистему и принципы работы такой АЭС требуют определенных дополнительных исследований, относящихся непосредственно к конкретному проекту всей АЭС на базе ММР, включенной в конкретную энергосистему.

Справка 5.

*Согласно определению Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ)[IAEA 2016], «**Малые модульные реакторы (SMR – small modular reactors)** - реакторы нового поколения, предназначенные для выработки электроэнергии мощностью до 300 МВт(э), чьи компоненты и системы могут быть изготовлены на заводе, а затем транспортированы в виде модулей на места установки по мере возникновения спроса.»*

4.1.1 Модульность

В современной практике сооружения АЭС большой мощности автономной производственной единицей промышленного объекта является блок АЭС. Блок АЭС конкретной установленной мощности производит конечную продукцию (электроэнергию) для потребителя, то есть, в комплекс

производственных процессов блока включены все технологические процессы внутри блока вплоть до выдачи электроэнергии в сеть. Такое определение подразумевает, что в состав работ и оборудования по сооружению блока включен полный перечень работ, оборудования, систем, коммуникаций, материалов, трудовых затрат и прочих категорий ресурсов и затрат, необходимых для подготовки и обеспечения автономной работы блока в составе АЭС. Ядерный реактор является главным элементом блока.

В составе АЭС на одной площадке может располагаться несколько производственно независимых единиц (в современном подходе для больших мощностей - несколько блоков АЭС), производящих конечную продукцию, но объединенных некоторой единой площадочной и управленческой инфраструктурой (общестанционные и вспомогательные сооружения и службы).

Принцип мульти-модульности АЭС на одной площадке может говорить как о нескольких блоках на площадке, так и об определенном количестве модулей реакторов, конструктивно связанных в единый блок и объединенных единой технологической компоновкой.

Понятие «модульность», согласно материалам российских, иностранных и международных организаций (Приложение 1, 33]), относящихся к атомной отрасли, актуально в отношении инновационных подходов по изготовлению оборудования и сооружению объектов атомной энергетики, не только атомных станций, но и других объектов, например, относящихся к жизненному циклу ядерного топлива [33].

Модульность для проектов реакторов малой мощности означает промышленное изготовление крупных комплектов оборудования, систем и подсистем блока и их доставку на площадку, при этом сборка и установка модулей происходит на площадке. В отношении модулей реакторов принцип модульности относится к промышленному изготовлению реактора с основными системами безопасности и доставки полного модуля на площадку [35].

В модульном подходе реализуется подход обязательной сертификации проекта модуля реактора перед промышленным изготовлением, при промышленном производстве изготавливаются стандартизированные модули. Сертификация блок-модуля реактора (*смотри раздел 4.2 данного исследования*) необходима для многократного изготовления модуля реактора в концепции мульти-модульной АЭС и при многократном сооружении АЭС на базе сертифицированного модуля реактора. Данный подход позволяет исключить большой объем работ, относящийся к сооружению АЭС и перенести его в условия промышленной инфраструктуры (*смотри подразделы 4.1.3., 4.1.4., Приложение 1. Определения*).

Для реализации модульного подхода потребуется создание определенной инновационной промышленной инфраструктуры, проектно-конструкторских разработок для дальнейшего промышленного изготовления

модулей оборудования и систем АЭС, их транспортировки, сборки и установки на площадке.

При переходе на модульный принцип сооружения АЭС меняются подходы и методы выполнения многих работ на разных этапах реализации проекта. Прежде всего, концепция модульности изначально закладывается в систему проектирования АЭС и в саму модульную архитектуру блока АЭС, оптимизируется интерфейс между модулями в целях дальнейшей стандартизации и унификации при изготовлении на заводе, обосновываются методы сборки, монтажа и строительства, обосновывается безопасность всех проектно-конструкторских и компоновочных решений при выполнении работ на этапах жизненного цикла проекта.

Концепция мульти-модульной АЭС на базе ММР с размещением на одной площадке нескольких блоков-модулей малой мощности предполагает не только новый промышленный подход изготовления модулей для АЭС, но и большой комплекс новых подходов:

- новый модульный принцип при проектировании всей АЭС, для которой получается лицензия на площадку, при этом может быть несколько сценариев модуляризации в зависимости от степени охвата модульным принципом отдельных станционных и блочных систем;

- новые принципы проектирования и конструирования оборудования и крупных модулей для АЭС при заводском изготовлении с учетом интерфейсов модулей;

- новые подходы в сооружении АЭС, с учетом оптимизации компоновки и размещения модулей реакторов, всей общестанционной и прочей инфраструктуры АЭС, необходимой для всех модулей реакторов,

- новые технологии, средства и механизмы для транспортировки, сборки и установки модулей на площадке;

- новые подходы в определении требований по безопасности для мульти-модульной АЭС при изготовлении модулей, монтаже на площадке, сооружении АЭС и при эксплуатации,

- новые подходы в лицензировании и сертификации на национальном и международном уровне для практической реализации проектов мульти-модульных АЭС,

- требования к модульным блокам при эксплуатации, техобслуживании, ремонтах и замене модулей и систем оборудования;

- новые подходы в отношении всех стадий топливного цикла для АЭС на базе ММР;

- требования и подходы работы блоков-модулей мульти-модульной АЭС в энергосистеме.

- новые формы организационно-функциональной структуры Проекта сооружения АЭС при модульном принципе реализации проекта с изменением в разделении объемов работ и зон ответственности между крупными подрядчиками: проектировщиком, поставщиком оборудования и строительно-монтажной компанией,

- новую квалификацию и профессиональные навыки персонала, которые, как правило, нарабатываются при серийном производстве модулей и компонентов оборудования для АЭС на заводах и при многократной практике сооружения типовой АЭС на базе ММР;
- необходимые требования по унификации и стандартизации технологий и оборудования в модульном исполнении;
- возможны другие требования для практической реализации проектов по модульному принципу.

Все эти вопросы, как важные и неизбежные для их решения при реализации концепции мульти-модульной АЭС на базе ММР, обозначены в материалах [29-32, 35, 38,43,53].

4.1.2 Транспортабельность

Вопросы транспортировки для концепции мульти-модульных АЭС, как констатируют эксперты [35], являются не менее важными, чем промышленное изготовление модулей, поскольку при масштабном росте промышленного производства модулей потребуются создание промышленной транспортировочной инфраструктуры для производства механизмов погрузки-выгрузки крупных тяжелых модулей, транспортных платформ, контейнеров и сопутствующих систем для конкретных путей транспортировки (автодорожный, водный, железнодорожный). Будут необходимы специально сертифицированные транспортные компании, осуществляющие безопасно работы на данном этапе ЖЦ проекта мульти-модульной АЭС. На текущем этапе экспертами изучается существующий рынок погрузочных механизмов и транспортных средств для анализа возможности их применения к модульным системам SMR.

Примеры размеров транспортируемых малых модульных реакторов приводятся в таблице 2, в источниках отсутствует вес модулей, (из дополнительного источника - вес модуля NusScale --700 т)

Таблица 2. Технические характеристики ММР (данные из 27 и 35)

	Westinghouse-SMR (>225 MWe)	NuScale (50 MWe)	SMR-160 (160 MWe)
RPV height	28 m	17,8 m	15,0 m
RPV diameter	3,7 m	3,0 m	3,0 m



Фото 1 - Проект MMP NuScale для АЭС на базе 12 модулей MMP для площадки в Национальной лаборатории Айдахо

В качестве примера развития модульного подхода в проектировании, сооружении и задач транспортировки можно привести проект реактора UK SMR компании «Rolls-Royce», формально относящийся к проектам реакторов средней мощности, поскольку его электрическая мощность составляет 443 МВт(э) при тепловой мощности 1276 МВт(т). Проект разработан и оптимизирован по принципу блок-модульного подхода при строительстве. Транспортировка блок-модулей возможна любыми путями — автодороги, железные дороги, водные пути. В частности, из-за этого условия **диаметр корпуса реактора UK SMR был ограничен 4,5 метрами**, чтобы иметь возможность перевозить его по британским железным дорогам.



Фото 2. Rolls-Royce (<https://hightech.plus/2020/01/27/yadernie-minireaktori-rolls-royce-mozhno-perevozit-na-gruzovikah>)

Транспортировка к месту установки модулей для АЭС потребует решения множества вопросов, связанных с получением специальных разрешений транспортными компаниями, с качеством и безопасностью услуг, со страхованием транспортных услуг.

С транспортировкой на площадку модулей для АЭС связаны вопросы управления и координации работ на площадке и логистики при доставке модулей к месту сооружения АЭС, особенно, если производство модульного оборудования находится не в стране-заказчике и требует определенного времени на доставку. Эти задачи важны с точки зрения выполнения сроков реализации проекта, то есть той задачи, которая является ключевой при сооружении крупных промышленных объектов, требующих больших инвестиций.

Если промышленное производство модулей, как констатируют эксперты [35], создает экономические преимущества модульной концепции, то транспортировка крупных модулей может привести к удорожанию цены модуля за счет транспортной составляющей, включающей погрузку-выгрузку, транспортировку крупных элементов блоков-модулей к месту установки, гарантии безопасной доставки. Все это при учете масштаба - общего количества транспортируемых модулей - для проекта (*«...до 80% установки SMR может быть модулировано и транспортировано автомобильным или другим транспортом по сравнению с 20% для больших реакторов – [53]»*) и с долей транспортных затрат (*«стоимость транспортировки составляет 1-2% от стоимости модуля, но для транспортировки крупных модулей, когда необходимы большие краны, транспортировка с погрузкой-выгрузкой может составлять до 10% от стоимости продукта [30]»*).

То есть, с точки зрения экономических аспектов, транспортировка от места локализации изготовления крупного модуля к месту установки – операция затратная, включающая как затраты на создание и содержание необходимой транспортной инфраструктуры, машин и механизмов погрузки – выгрузки, формирования технических систем безопасной доставки на большие расстояния крупных модульных компонентов АЭС, так и формирование регулирующей системы для получения разрешений на безопасное выполнение работ по транспортировке крупных модулей, прежде всего, модулей реакторов.

4.1.3 Серийность и промышленная инфраструктура

В настоящее время в российской практике важным требованием при обосновании и продвижении технологии и инновационной продукции в промышленное производство и на рынки является определение стадии технологической и промышленной готовности инновационных разработок (Приложение 2). Согласно документу *«Методические рекомендации по сопоставлению уровня технологического развития»* Минэкономразвития РФ [44], определение стадии технологической и промышленной готовности

инновационных разработок касается акционерных обществ с государственным участием, государственных корпораций, государственных компаний и федеральных государственных унитарных предприятий. Они касаются инновационных разработок в энергетике, о чем сказано в документе «Методические рекомендации...» [44]. Следовательно, данный подход актуален для инновационных проектов АЭС на базе ММР.

Документ МЭР РФ разработан с учетом современных международных подходов к стадиям развития технологии и анализу степени ее готовности. Международные подходы становятся определенными стандартами-требованиями, адаптированными в российской научно-практической и производственной среде, актуальными и важными при выходе российской инновационной продукции на международные рынки.

Справка 6.

«В американской практике оценки уровней готовности конструкторских технологий (TRL – Technology Readiness Level) используются, начиная с 1970-х гг.. Наряду с TRL в 2005 г. введены уровни готовности производства MRL – Manufacturing Readiness Level»[45].

«Разработанная Национальным аэрокосмическим агентством (NASA) США шкала уровней готовности технологии (TRL) взята за основу для градации этапов разработки новых технологий многими ведомствами и организациями, как в США, так и в ряде других стран. Используемая классификация отражает состояние исследовательских программ в зависимости от текущего уровня TRL, что упрощает разработчикам и заказчикам контроль над ходом исследовательских работ и выбор максимально готовых к промышленному внедрению технологий.»[46].

«Стремительное развитие и смена технологий в мире требуют актуализации существующих ГОСТов на НИОКР и сближения с международными стандартами с целью повышения качества разрабатываемых технологий.... В настоящее время TRL широко используется в таких американских ведомствах, организациях и компаниях США, как Министерство Обороны, Агентство передовых оборонных исследовательских проектов (DARPA), BBC, Федеральное Управление Гражданской Авиации, Министерство Энергетики, NASA, The Air Force Research Laboratory, Ford, Boeing, Northrop Grumman, Lockheed Martin, GE, Kodak и мн. др. Не стала исключением и Европа, где указанная шкала уровней готовности технологий используется такими компаниями, ведомствами и организациями, как Европейское космическое агентство, Министерство обороны Великобритании, Nokia, Airbus, Rolls-Royce, BMW, FIAT, французские энергетические компании и др. Система TRL апробирована в Японии и Канаде, в компаниях TOYOTA, Bombardier и др». [47]

Универсальное использование подхода TRL было предложено для политики Европейского Союза в докладе Группы экспертов высокого уровня по ключевым технологиям, и было утверждено в последующей рамочной программе ЕС под названием H2020, которая работает с 2013 годом до 2020 года. Программа относится не только к оружейным или космическим технологиям, но и к другим технологиям – к нанотехнологиям, информатике, коммуникационным технологиям. Детальное описание метода **TRL** и его обсуждение опубликовано Европейской ассоциацией научно-исследовательских и технологических организаций [50]. В 2013 году методика TRL была принята и утверждена в качестве стандарта ISO - ISO 16290:2013 «Space systems — Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment».

В 2018 году согласно Приказу ГК «Росатом» в Госкорпорации утвержден методический подход с определением перечня уровней готовности технологий и производства для инновационных научно-исследовательских и технологических разработок.

В подходах оценки развития технологии стадия технологического развития **TRL9 - Внедрение технологии в производство** является завершающей стадией уровня технологической готовности, а стадии промышленной готовности - **MRL9 - Мелкосерийное производство** и стадия **MRL10 - Полносерийное производство** соответствуют стадии **TRL 9**.

Для анализа и учета при экономическом обосновании **эффектов серийности** при реализации проектов АЭС на базе ММР, важна оценка готовности технологии и готовности промышленной инфраструктуры для производства модулей реакторов и необходимого оборудования в масштабе мелкосерийного или полносерийного производства.

Важна координация и соответствие процессов развития и степени готовности технологии со степенью готовности промышленного изготовления оборудования и систем, необходимых для полной готовности коммерческого выхода на рынок технологии в виде конечного производственного объекта, производящего потребительскую продукцию.

До стадии серийного производства - на стадиях **TRL 6 - Демонстрация прототипа (LEAD-plant)** в условиях, приближенных к реальным и стадии **TRL7 - Демонстрация прототипа** в эксплуатационных условиях и соответствующих им производственным стадиям **MRL6 - Производство прототипов систем и подсистем при наличии готовых элементов основного производства** и **MRL7 - Производство систем, подсистем или их компонентов в условиях, приближенных к реальным**) - можно говорить о **затратах в проект установки SMR как о затратах в LEAD project** (смотри Приложение 1. Определения и подраздел 4.1.4) - единичном прототипе установки в контексте единичного изготовления на заводе-изготовителе.

К самому заводу-изготовителю так же применяется подход оценки производственной готовности в целях серийного изготовления модулей, оборудования и компонентов оборудования.

Справка 7.

Тип производства - серийное производство, единичное производство.

Тип производства — это комплексная характеристика технических, организационных и экономических особенностей машиностроительного производства, обусловленная его специализацией, типом и постоянством номенклатуры изделий, а также формой движения изделий по рабочим местам. Под **серийным производством** принято подразумевать определенный **тип производства**, который характеризуется выпуском однородной продукции партиями определенного размера с соблюдением определенных временных периодов выпуска. Серийное производство принято делить на три основных вида: **мелкосерийное производство, среднесерийное производство, крупносерийное производство.**

Специфические условия серийного производства способствуют эффективному использованию оборудования предприятия и рабочих мест, каждое из которых приспособляется под выполнение нескольких технологических операций. Оборудование размещается в цехах и на участках часто не по ходу технологического процесса, а по признакам технологической и конструкторской однородности.

Выпуск изделий в относительно больших количествах позволяет проводить значительную **стандартизацию и унификацию выпускаемых изделий и технологических процессов**, изготавливать стандартные или нормализованные детали определенными партиями, что уменьшает их себестоимость.

Организация труда в серийном производстве отличается **высокой специализацией**. За каждым рабочим местом закрепляется выполнение нескольких определенных детали-операций. Это дает рабочему хорошо освоить инструмент, приспособления и весь процесс обработки, приобрести навыки и усовершенствовать приемы обработки. Особенности серийного производства обуславливают экономическую целесообразность выпуска продукции по циклически повторяющемуся графику. Средняя квалификация рабочих в серийном производстве выше, чем в массовом производстве, но ниже, чем в единичном.

Единичное производство - представляет собой форму организации производства, при которой конкретная продукция изготавливается в одном или нескольких экземплярах. Каждая единица конечной продукции уникальна по конструкции, выполняемым задачам и другим важным признакам. Себестоимость производства такой продукции может быть выше в несколько раз по сравнению с продукцией серийного производства.

Организационно-технические особенности типа заводского производства влияют на экономические показатели предприятия, на эффективность его деятельности, на себестоимость выпускаемой продукции.

Требования к заводам - изготовителям серийного модульного оборудования.

Блочно–модульный подход заключается в разбиении всего заводского технологического процесса изготовления модулей на несколько крупных, как правило, функциональных процессов по изготовлению блок-модулей, в определении состава более мелких элементов и компонентов, включенных в состав этих блок-модулей, максимально полное изготовление и сборка на заводе блоков-модулей.

Прежде всего, любая интегральная система, состоящая из модулей, должна быть спроектирована согласно принципам модульного проектирования и дальнейшего заводского изготовления, при проектировании учитывается совместимость подсистем по функционально-иерархическим признакам. Для полной стыковки модулей монтажные операции предварительно моделируются в компьютерных 3D-программах с оптимизацией основных координатных процедур.

Параллельно с проектированием происходит конструкторская подготовка производства, включающая обязательную стандартизацию процессов, технологий и унификацию изделий. Конструкторская унификация обеспечивает устранение необоснованного многообразия изделий одного назначения, разнотипности их составляющих и деталей, приведение к возможному единообразию способов их изготовления, сборки и испытания. Подготовка завода к серийному изготовлению модулей оборудования (включая, конструкторскую, технологическую, производственную, организационную, квалификационную подготовку) является важным требованием к организации работы завода по модульному типу производства.

Конструкторско-технологическая подготовка производства включает в себя определенную компоновку технологических процессов, оборудования, гибких производственных систем и **разработку конструкторско-технологической заводской документации** для серийного изготовления модулей. То есть, заводские технологические процессы должны быть организованы с учетом оптимизации всех работ, что позволит повысить качество изделий, уменьшить трудоемкость производства и снизить себестоимость изделий.

Сборка систем в блочно-модульном исполнении происходит непосредственно на заводе изготовителя. Проведение полного цикла заводских испытаний уменьшает риск возникновения ошибок. После сборки модули в заводских условиях поступают на проверочные стенды, где проверяется работоспособность оборудования. На заводах проверяется также полная совместимость и работоспособность нескольких модулей. Такие проверки предназначены для гарантирования качества изготовленных модулей при сборке и монтаже модулей на площадке.

На современных заводах, изготавливающих оборудование по модульному принципу создаются производственные структуры (сервис-

модульные центры), задачей которых является обслуживание, ремонт и замена компонентов и элементов модулей как при заводских испытаниях, так и при эксплуатации промышленного объекта. Ответственность, которую несет завод, изготавливающий модули, **включает техобслуживание и ремонт изделий**, что служит для обеспечения гарантии качества и снижения затрат при эксплуатации объекта.

При заводском изготовлении модулей оборудования требуется высокая квалификация персонала, при этом самая высокая квалификация требуется при единичном производстве промышленного изделия. При серийном производстве квалификация персонала должна соответствовать определенным заводским требованиям и стандартам по выпуску конкретной продукции.

4.1.4 Важные категории модульной концепции, влияющие на экономические оценки проектов и на сроки сооружения мульти-модульных АЭС

Понятийный аппарат, относящийся к оценке стоимости (затрат) заводского первичного и серийного изготовления оборудования для атомных станций, а также сооружения самих станций (первой, второй или N-ой) на базе модульного принципа, важен в контексте выполнения экономических оценок проектов АЭС на базе ММР, а также влияния категории «**серийность**» на итоговую экономическую оценку проекта при заводском изготовлении модулей и многократности сооружения генерирующих установок в мульти-модульной концепции АЭС.

Понятия - **модульность, стандартизация, унификация, модуль оборудования, строительный модуль, заводские (производственные) затраты первого рода (FOAK), начальные затраты коммерческой станции, затраты на первую в своем роде станцию (FOAK станции), затраты в N-ую станцию** - тесно взаимосвязаны друг с другом в концепции мульти-модульного подхода при сооружении АЭС на базе ММР. Определения данным понятиям даны в Приложении 1.

Первая опытная станция - прототип (**LEAD plant**), как правило, строится по индивидуальному заказу, но на основе проекта модуля реактора, который в дальнейшем может производиться на заводе с выпуском серии модулей. Цель строительства установки-прототипа в том, чтобы показать, что конструкция является коммерчески жизнеспособной, обосновать необходимость строительства (модернизации) завода-изготовителя, предназначенного для производства модулей SMR, а также продемонстрировать важность обучающих элементов деятельности при изготовлении модулей и сооружении станции в целях дальнейшей коммерциализации SMR и снижения затрат при серийном производстве модулей и сооружении АЭС [34].

FOAK станция SMR – это первая станция с заводским изготовлением модулей, в стоимость которой **помимо** всех инженерных работ, затрат на

оборудование, строительство, испытания, оснастку, затрат на управление проектом и других повторяющихся для каждой станции расходов, **включены** такие затраты, как **затраты** на проектирование и сертификацию конструкции (дизайна), а также первичные заводские затраты, относящиеся к подготовке заводской документации и конструкторско-технологической подготовке производства, лежащие на плечи первых модулей (по мнению экспертов – до 8).

В затраты серийной **NOAK – станции** не включены затраты на проектирование и сертификацию проекта и другие первоначальные затраты, в том числе затраты на организацию заводского серийного производства, что снижает стоимость заводской серийной станции и предполагает полную амортизацию (окупаемость) затрат в эту станцию.

Разные эксперты дают оценки соотношения затрат в FOAK станцию и в NOAK станцию – предполагается, что затраты в FOAK станцию будут на 30-40% больше затрат в NOAK [30, 31, 53].

Данные оценки дают представление о том, во сколько могут оцениваться расходы на НИОКР, затраты на проектирование и сертификацию проекта SMR, затраты на подготовку серийного производства, затраты на выполнение общей проектной оценки безопасности - в сумме эти затраты составляют + 30-40 % к стоимости будущих затрат в сооружение NOAK станции и ложатся «на плечи» первых FOAK –модулей и станций.

Оценки самих FOAK и NOAK станции зависят от технологии, дизайна проекта, мощности проекта и степени готовности промышленного изготовления.

Оценки соотношения единовременных капитальных затрат (Overnight Costs) станции – прототипа (**LEAD SMR**) будут, как ожидается, значительно выше, чем NOAK станции. Предполагается, что единовременные капитальные затраты в LEAD -станцию SMR составят от 7000 до 11 500 долл. / кВт (э), что значительно превышает предполагаемые единовременные капитальные затраты в станцию NOAK SMR (в среднем) в размере ~ 4600-4700 долл. /кВт. (оценки 2011 года) [34, 40].

Важно отметить, что под NOAK станцией понимается определенная по счету станция в серии: для больших блоков АЭС – это одно значение, для SMR - возможно, другое. Стоимость станции NOAK отражает полезный опыт затрат предыдущих станций, рост квалификации и эффект обучения. В настоящее время станция NOAK для больших блоков АЭС определяется как следующая после того, как было построено 8,0 ГВт мощности. [39]. Однако, некоторые ядерные аналитики предполагают, что установка NOAK LR может быть достигнута и раньше (например, ближе к четырем электростанциям).

Определение номера NOAK станции SMR связано с кривой **Learning-фактора**. Предполагается [38], что кривая обучения достигает плоской тенденции после первых 8-10 единиц блоков при сооружении объектов одной и той же компанией (командой). С одной стороны, эта цифра связана с тем, что отсутствует предыдущий практический опыт реализации инновационных

проектов станций SMR. С другой, учитывая, что на одной площадке может быть развернуто несколько блоков-модулей SMR по сравнению с LR для достижения общей выходной мощности, то накопление обучения имеет более высокий уровень для SMR, чем для LR.

Что касается заводского изготовления блока – модуля реактора, который может считаться NOAK, то номер предварительно может быть определен исходя из практики изготовления модулей и сооружения крупных промышленных объектов в других отраслях по модульному принципу, эксперты дают предварительные оценки: следующий после первых 5-7 единиц модулей можно отнести к NOAK.[30, 32, 53].

Экономия масштаба (мощности), тесно связанная с блоками большой мощности, теряется для проектов малой и средней мощности, что является важным для капиталоемкого бизнеса и приводит к увеличению удельной стоимости строительства объекта. Например, для отдельного объекта SMR мощностью 335 МВт (э) удельная стоимость строительства (на единицу мощности) увеличивается на + **69%** в сравнении с проектом LWR 1340MWe при условии строительства на отдельно стоящих площадках [40, 41].

Поэтому, чтобы АЭС на базе MMP стала конкурентоспособной с блоками большой мощности, важно оценить специфические факторы, характерные для проектов SMR и могущие иметь определенное положительное влияние для улучшения показателя капитальных затрат в проект. Эксперты отмечают несколько таких факторов. В работах [40, 41.] выполнены оценки влияния некоторых экономических и финансовых факторов, могущих изменить **экономику единовременных капитальных затрат** (Overnight costs) в зависимости от масштаба мощности АЭС при размещении на площадке нескольких модулей SMR. Суммарная мощность АЭС на базе MMP, равная 1000 МВт (э), позволяет привести в равенство затраты в АЭС SMR с затратами в блок большой мощности.

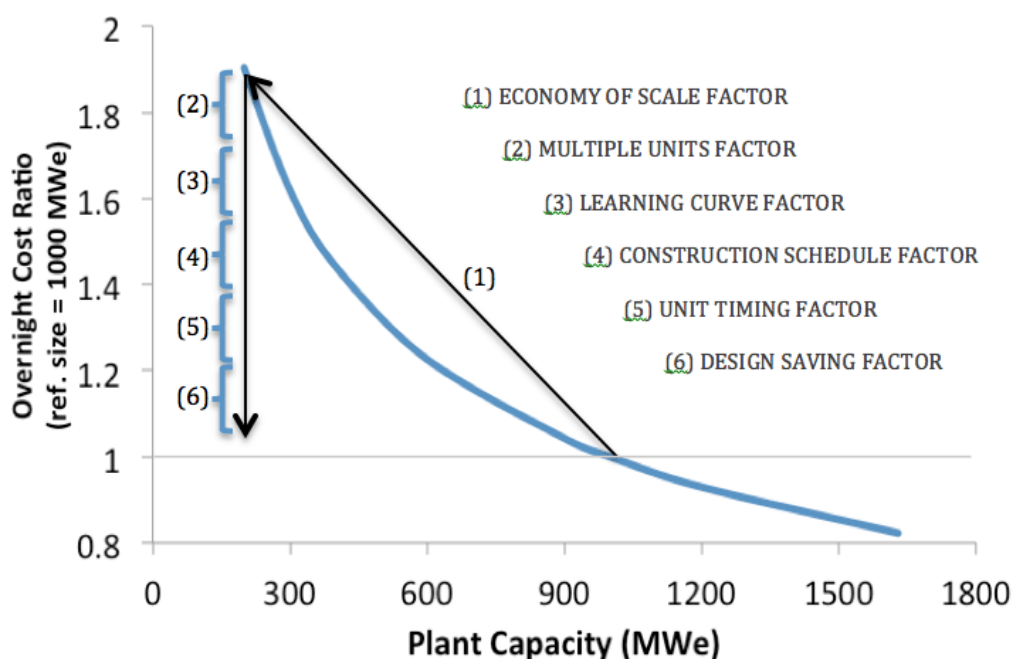


Рис. 2. Влияние разных факторов на снижение капитальных затрат в SMR (рисунок адаптирован для данного исследования из [40, 41])

Влияние разных факторов для достижения итогового эффекта оценено в процентах:

1. Economy of scale factor – Интегральная экономия (100%) от фактора масштаба, состоящая из факторов 2-6.
2. Multiple units factor – мульти-фактор размещения нескольких модулей на площадке - ~ 20%.
3. Learning curve factor – фактор обучения (накопление знаний, опыта и повышения квалификации) - ~20%.
4. Construction schedule factor – фактор графика строительства (сокращение сроков строительства) – ~20%.
5. Unit timing factor (Modularization) – фактор снижения времени на изготовление единичного модуля – ~20%.
6. Design saving factor - Коэффициент конструктивной экономии - ~20%.

Мульти-фактор размещения нескольких модулей на площадке означает, что если на одном и том же участке строится несколько объектов, то существуют экономические преимущества с точки зрения совместного использования станционной инфраструктуры, более эффективного использования материалов и людских ресурсов, а общие постоянные затраты на строительство дорог и инфраструктуры для станции, затраты по лицензированию, расходы по планированию зоны эвакуации (зоны аварийного планирования) и затраты по оптимизации дизайна станции могут быть разделены между блоками. Эксперты отмечают [40, 41], что **мульти-фактор** приводит к более заметным положительным эффектам для размещения на площадке определенного количества блоков SMR суммарной мощностью равной мощности той же технологии реакторов большой мощности (LR).

Модульность и фактор снижения времени на изготовление единичного модуля напрямую связаны с **коэффициентом экономии конструкции**. Строительство и развертывание большого числа стандартизированных блоков сокращает (снижает) потребность в более дорогих, а также трудоемких работах на площадке строительства, позволяет производить заводские компоненты на более высоком уровне, в более короткие сроки, таким образом, формируя выгоду от экономии на серийном производстве.

В работах [40, 41] отмечается, что **коэффициент конструктивной экономии** определяется выбором проекта, который оказывает важное влияние на стоимость станции. Помимо прямой экономии на количестве используемых материалов (сталь, бетон, топливо) за счет меньшего размера, дизайн и компоновка подразумевают другой тип и меньшее количество компонентов (например, насосы не нужны в реакторах, основанных на естественной циркуляции). При этом, для каждой технологии и дизайна

реактора, коэффициент конструктивной экономии может быть разным, что можно оценить только на определенной стадии зрелости проекта реактора и всей АЭС.

В международных исследованиях [40, 41] одним из факторов, который оценивается как существенный при выполнении экономических оценок проектов АЭС на базе ММР в условиях серийного производства модулей и оборудования для сооружения мульти-модульных АЭС, является эффект обучения (англ. **Learning effect, Learning factor**). Эффект обучения подразумевает как рост квалификации персонала, приобретение знаний на практике, так и стандартизацию и унификацию производственных, технологических и строительных процессов при многократном (серийном) производстве продукции и выполнении производственных операций персоналом согласно стандартизированным процедурам. Эффект обучения затрагивает как производственные процессы заводского изготовления модулей, так и квалификацию и навыки при сборке модулей, строительно-монтажных работах при сооружении АЭС на базе ММР на площадке, что будет иметь определенное отношение к экономии затрат при строительстве.

Важной характеристикой **Learning- фактора** является зависимость от времени и количественного опыта, что означает, что если опыт не будет накапливаться и передаваться, то этого эффекта не будет.

Сроки строительства SMR.

Помимо стоимости проекта важным **критическим параметром** при строительстве АЭС являются сроки строительства. Экспертами проводился расчетный сравнительный анализ сооружения одного крупного блока АЭС в сравнении с 4 блоками модульной конструкции суммарной мощностью, равной большому блоку [40], рассматривались разные сценарии сооружения нескольких блоков SMR на одной площадке. При этом важным фактором при выполнении оценок был фактор задержек при строительстве. Задержки - это самое большое неблагоприятное событие, которое может произойти на этапе строительства из-за возникновения дополнительных работ и затрат, из-за недоработки самого проекта, некачественного процесса управления проектом и по другим причинам [40]. Из-за задержек значительно увеличивается итоговая стоимость капитальных затрат в проект сооружения АЭС в соответствии с заключенными контрактами и в связи с финансово-экономическими факторами – эскалация затрат, дополнительные финансовые платежи по займам, неустойки по закупкам-поставкам и др. Такие неблагоприятные события возникают на крупных, ГВт-масштабных проектах сооружения АЭС.

Справка 8.

«Большое влияние на общие издержки сооружения АЭС оказывает продолжительность строительства. Так, для моноблочной АЭС с реактором PWR мощностью 1300 МВт в 1984 г. в США прямые затраты составляли лишь треть общих, остальное - выплаты по займам,

составляющая эскалации затрат и ряд других. По контракту 2005 г. стоимость АЭС «Олкилуото-3» в Финляндии составляла 3 млрд евро, или 1880 евро/кВт (около 2600 долл./кВт). К 2009 г. бюджет проекта вырос до 5 млрд евро (около 4400 долл./кВт) в значительной мере из-за задержек в строительстве, увеличения сроков.» [42.]

«Запуск проекта АЭС Олкилуото-3, который должны реализовать консорциум французской Areva и немецкой Siemens, сдвинут более чем на десять лет. Из-за серии задержек в реализации проекта Areva по решению суда теперь должна выплатить финской стороне **€554 млн.**» (<https://www.rbc.ru/business/24/04/2019/5cc0539e9a79474591f5a857>)

«Парламент страны (Финляндия) поддержал строительство АЭС, стоимость которой оценивается в €6,5–7 млрд. Глава «Росатома» Алексей Лихачев сказал, что перенос срока ввода энергоблока АЭС «Ханхикиви» в Финляндии с 2024 года на 2027–2028 годы вызван экономической выгодой для финской стороны. Это связано с тем, что **сдвинулся весь сценарий развития финской энергосистемы.** У «Росатома» есть договор с Fennovoima, предусматривающий ответственность российской компании за просрочку обязательств перед заказчиком, максимальный объем неустоек в нем **€900млн.**» (<https://www.rbc.ru/business/24/04/2019/5cc0539e9a79474591f5a857>)

Что касается SMR, то они еще не доказали на местах свою способность строить вовремя и в соответствии с бюджетом. Тем не менее, считается, что они имеют более короткие сроки выполнения заказа (3-4 года для блока), а некоторые особенности проектов способны снизить некоторые строительные риски. Внутренние проектные события задержек для инновационных SMR могут быть смягчены компактным проектным дизайном с более упрощенной компоновкой и более стандартизированными вариантами лицензирования, цепочкой поставок на площадку модулей и другого оборудования, другими стандартизированными процессами.

Отмечается, что строительством крупного блока управлять сложнее, производительность труда ниже и более строгий контроль со стороны регулирующих органов. А основной экономический эффект сооружения АЭС большой мощности, связанный с **экономикой масштаба**, для блоков SMR может быть компенсирован - реализован и разнесен во времени благодаря модульности, что означает: в зависимости от потребностей в электроэнергии на рынке или в регионе размещения развертывание SMRs может быть последовательным (ступенчатая конструкция) или концентрированным (параллельная конструкция).

Приращение мощности на площадке может идти **в зависимости от конструкции АЭС.** При ступенчатой конструкции ввода SMR снижается единовременная потребность в привлекаемых инвестициях, она может быть разнесена во времени. Сроки реализации каждого блока SMR более короткие (3-4 года в сравнении с LR - 7-8 лет), штрафы в случае задержек – ниже,

поскольку зависят от стоимости работ (стоимости контракта), которые меньше по сравнению с LR. Общий эффект сокращения сроков сооружения достигается, в том числе, за счет стандартизации процессов и модульной конструкции проекта.

Учитывая в сравнительных оценках сооружения LR и SMRs задержки при строительстве на разные сроки от 1 до 4 лет, экспертами получены экономические оценки в пользу мульти-модульных проектов SMRs в части стоимости сооружения и потребности в финансировании проектов при достижении равноценной мощности на одной площадке, но к разным временным моментам [40].

4.1.5 Положительные эффекты и проблемные зоны для практической реализации проектов АЭС на базе модульного принципа изготовления оборудования и сооружения АЭС

В настоящее время существует много исследований и публикаций, относящихся к преимуществам и недостаткам (или проблемам) модульных проектов в сфере разных отраслей, в первую очередь, нефтегазовой и жилищно-строительной [30, 31]. Для проектов SMR, которые в самом определении содержат ключевое слово **MODULAR**, выполняются исследования в целях доказательства эффективности модульной концепции сооружения АЭС. Поскольку не построено ни одной АЭС на базе ММР, то все данные и оценки переносятся на атомные проекты на основе практического опыта реализации модульных проектов в других отраслях.

Главные положительные эффекты при модульном подходе, как отмечают эксперты, [30, 32] могут относиться, прежде всего, к таким проблемным экономическим зонам при сооружении больших АЭС, связанным с выполнением работ проекта действующим типовым способом, как стоимость и сроки. Негативные последствия для экономики, возникающие при уменьшении мощности (масштабный эффект), разработчики SMR планируют устранить за счёт оптимизации проектов блока SMR, модульного проектирования, внедрения модульных принципов изготовления оборудования и строительства. Эксперты предполагают следующие положительные эффекты, связанные с заводским изготовлением оборудования и работами на площадке АЭС:

- сокращение объема и стоимости площадочных работ, сокращение сроков реализации проекта;
- снижение стоимости проекта АЭС за счет разных факторов (при определенном положительном балансе изменения структуры и объема затрат);
- повышение качества за счет переноса ряда работ в заводские условия.

В международной практике положительные эффекты оценены зарубежными экспертами и компаниями с учетом практики реализации

модульного подхода в других отраслях и крупных проектах разных стран. На примере строительной индустрии [31] модульное строительство может:

1. Сократить временной график строительства на 20-50 процентов за счет ускорения сборки при сооружении.

2. Позволит сократить затраты на строительство на 20 процентов.

Все практические оценки эффектов сроков и стоимости строительства должны основываться на разных подходах изготовления конкретных строительных модулей – 2D, 3D модули или смешанный подход при изготовлении модулей. Транспортировка более крупных 3D модулей увеличивает стоимость транспортных работ, таким образом, происходит перераспределение структуры затрат в стоимости модулей в сторону увеличения доли транспортировки и логистики (планирование и управление процессами снабжения - закупка, перевозка и хранение). В модульном исполнении в проекте увеличивается значимость транспортных работ, доставки модулей заводского изготовления и логистики, поскольку это важные моменты для достижения главных целей - ускорения строительства объекта и снижения его стоимости. Оценки показывают, что экономия от переноса деятельности на завод перевешивает увеличение затрат на транспортировку и логистику.

Проектирование

В настоящее время в модульных проектах тратится больше времени на проектирование, чем в традиционных подходах реализации проектов, поскольку проектировщики учатся проектировать по модульному принципу и параллельно изучают производственные процессы заводского изготовления модулей. Проектные решения должны приниматься заранее на стадии проектирования, а изменения в дальнейшем процессе являются как более дорогостоящими, так и более трудными.

Проектные компании стремятся **разработать библиотеки модулей** для дальнейшего производственного процесса их промышленного изготовления, что потенциально ускоряет и упрощает процесс автоматизированного проектирования и позволяет сократить в перспективе срок проектирования. Есть компании, которые определили экономию времени проектирования за счет использования модульных библиотек порядка **15 процентов**.

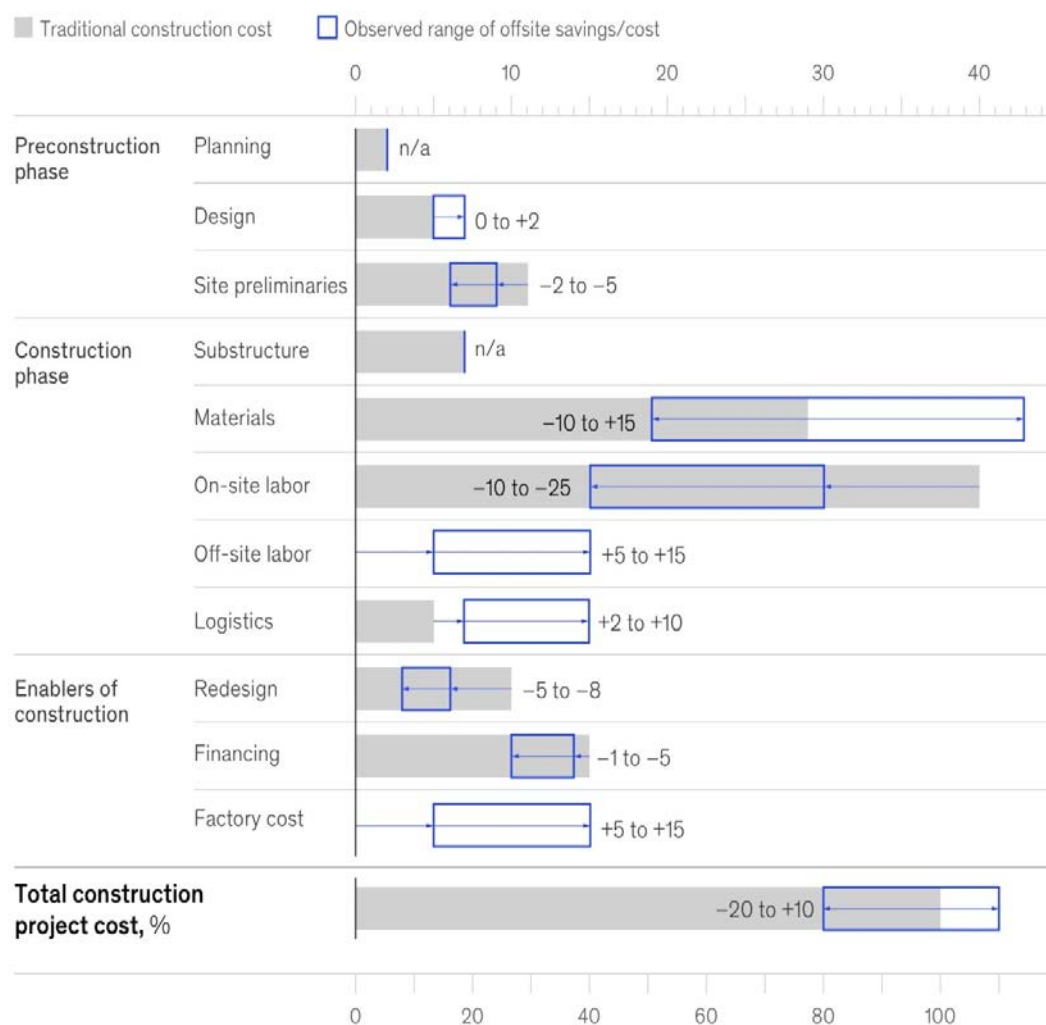
Основание объекта

Как в типовых, так и в модульных проектах работы, необходимые для создания основы промышленного объекта (подвалы и фундаменты) не подвержены влиянию перехода на модульные подходы, но поскольку модули спроектированы так, чтобы быть компактными и легкими для транспортировки, это может уменьшить размер и сложность фундаментов и дать некоторую экономию как в стоимости, так и во времени.

Внешнее производство

Качественный процесс производства вне объекта намного быстрее, чем аналогичный процесс строительства на месте. Это происходит из-за закрытой и контролируемой заводской среды, возможности координации и повторения действий, а также повышение уровня автоматизации. На заводскую производительность также влияет пропускная способность производственных линий и количество смен - обычно используются две восьмичасовые смены, но если найти подходящую рабочую силу, теоретически возможны три смены. Изготовление модулей может происходить параллельно с фундаментными работами.

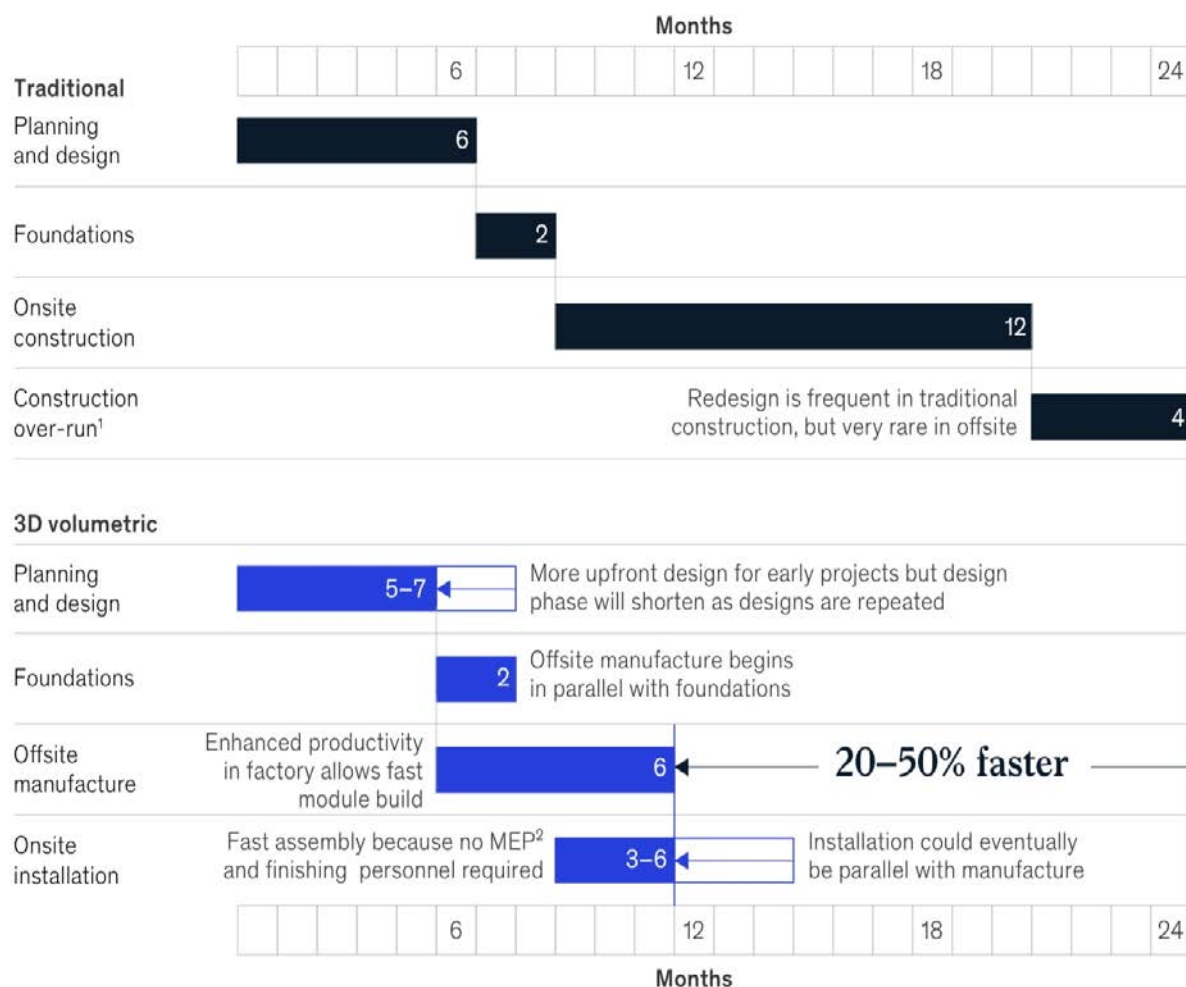
Traditional construction cost,¹ % of total, and potential offsite savings/cost, percentage point shift



¹Indicative breakdown; varies by project.
Source: US Federal Highway Administration; McKinsey Capital Projects & Infrastructure

Рис. 3. Пример сроков строительства многоквартирного дома, традиционный против модульного 3D объемного, мес. (рисунок адаптирован к исследованию из [31])

Example apartment project construction duration, traditional vs offsite 3D volumetric, months



¹Over-runs of 25–50% of projected construction duration are common.

²Mechanical, electrical, plumbing.

Source: Case studies; interviews; McKinsey Capital Projects & Infrastructure

Рис 4. Сравнение структуры затрат проекта при разных подходах в сооружении объекта (рисунок адаптирован к исследованию из [31])

Качество

Контроль качества оборудования, модулей, систем гораздо проще и лучше осуществляется в заводских условиях, чем на строительной площадке, где происходит больше доработок. Сокращение или устранение переделок значительно улучшает графики строительства, потенциально до нескольких месяцев. В типовом исполнении часто существует риск того, что дефекты не выявляются на месте быстро – иногда проходит несколько месяцев, такие дефекты будет гораздо труднее и дороже исправить.

В результате более короткий график проекта позволяет инвесторам начать раньше получать доход, улучшить денежный поток и снизить рыночные риски.

Стоимость строительства

Экономия затрат на строительство происходит в нескольких различных областях. **Во-первых**, интегрированные процессы, связанные с модульным строительством, устраняют необходимость в некоторых субподрядчиках и их работах. Существенным является то, что основные эффекты заключаются в экономии средств на работы на площадке, но существуют потенциально более высокие затраты на закупку модулей, а также увеличение управленческих и логистических издержек.

Модульные проекты имеют более высокие первоначальные затраты на проектирование (особенно, первых проектов-прототипов), но более низкие затраты и риски в случае перепроектирования и переработки, а также более низкие затраты на проектирование серийных проектов.

Наибольшая вероятность обеспечения большей экономии затрат в модульный проект будет характерна для проектов, которые в типовом исполнении имеют наибольшую долю трудоемких видов деятельности и наибольший уровень повторяемости работ.

В принципе при выполнении всех условий модульного проекта есть возможность для 20-процентной экономии затрат на строительство, но при риске увеличения затрат на логистику, на материалы или оборудование, экономия труда может перевешиваться этими затратами.

Модульная конструкция в строительной индустрии уже имеет доказанные практические эффекты сокращения проектных графиков, что, в свою очередь, снижает стоимость накладных расходов таких, например, как затраты на безопасность, управление вопросами, связанными с погодными условиями, и управлением строительством. Что касается сокращения материальных затрат, то общие сокращения порядка 5-10 процентов оцениваются как достижимые.

Российская практика

Исходя из анализа существующего российского опыта (нефтегазовый сектор), эксперты [54] делают вывод, что традиционный подход сооружения крупного объекта требует больше времени и больше затрат, чем при строительстве объекта на основе блочно-модульного оборудования. Кроме того, перенос большей части работ из поля на завод ведет к безусловному улучшению качества выполняемых работ. Отмечаются основные положительные эффекты:

Сокращение сроков проекта

- Некоторые разделы проекта не выполняются проектной организацией, они переданы на заводы-изготовители модулей;
- Имеется принципиальная возможность проводить проектирование параллельно с размещением заказа на изготовление оборудования;
- Существенное сокращение сроков строительно-монтажных работ (СМР) за счет сокращения объема фундаментов, сварочных работ, прокладки труб и кабелей и пр.

- Снижение рисков задержки СМР, связанных с неблагоприятными погодными условиями.

Снижение стоимости проекта

- Сокращение объема проектирования (из-за переноса части работ в заводские условия);
- Сокращения объема строительно-монтажных работ на площадке.

Повышение качества

- Некоторые разделы проектирования перекладываются на компанию – производителя оборудования, которая имеет более узкую специализацию (высокий уровень квалификации);
- автоматизация технологических производственных заводских процессов изготовления оборудования.

Как проблемный аспект, отмечается, что модульная конструкция требует обеспечить логистические программы оперативной транспортировки модулей с завода-изготовителя к площадке, а также, при эксплуатации и ремонте – обеспечить своевременную поставку компонентов оборудования к началу ремонта. Поскольку меняется график проектных работ с учетом возможности выполнения параллельно работ разными участниками работ, то возрастает роль управления проектом – менеджмент, требующий высокой квалификации в вопросах координации во времени работ, логистики поставок, управления рисками задержек и качества.

Справка 9.

Наглядным российским практическим примером эффективности модульной концепции реализации проекта является проект «Ямал СПГ». Иностранные эксперты отмечают положительные параметры проекта валифицированное управление проектом обеспечивает график проекта без задержек, введены в эксплуатацию объекты 1-ой очереди, 2-ю очередь проекта планировалось ввести на 3 месяца раньше срока, 3-ю – на 6-9 месяцев раньше срока (по данным конца 2017 года) Скорость реализации проекта связана с потребностью в продукции СПГ и большим количеством заключенных контрактов. Ориентировочная стоимость проекта Ямал СПГ оценивается в 26,9 млрд долл США.(Источник : Neftegaz.ru)

Справка 10.

<https://mks-group.ru/a/modulnye-elektrostantsii>).

В качестве практической реализации в РФ модульного подхода в энергетике можно отметить газопоршневые проекты малой мощности. В России в 2019 году (в рамках программы развития децентрализованной энергетики) был выполнен запуск в эксплуатацию первой в стране модульной электростанции на базе газопоршневых крупногабаритных двигателей MWM 4,5 МВт. Объект суммарной мощностью 18 МВт (э), расположенный в Челябинской области, был полностью реализован силами российской инжиниринговой компании – Группы компаний «МКС». Специалисты

компания специально для этого проекта разработали и изготовили инновационные двухэтажные блок-модули мощностью 4,5 МВт (э).

В типовой состав блок-модуля ГПЭС (газопоршневая электростанция) входят:

- Модули охлаждения
- Модуль дымоудаления
- Модуль газоснабжения и пневматики
- Электротехнический модуль
- Тепломеханические модули
- Блок фильтрации
- Блок приточной вентиляции
- Вытяжной модуль
- Глушитель с каркасом

Высота каждой конструкции блок-модуля достигает 8,73 метра, длина – 16,99, ширина – 12,08 метра.

Двигатель MWM использует энергетические ресурсы более эффективно, чем позволяют традиционные технологии производства электроэнергии. За счет возможностей когенерации и тригенерации, КПД двигателей увеличивается до 95%.

Количественные данные и аналитические выводы по модульным проектам на основе оценок экспертов

В большинстве исследований, относящихся к модульному исполнению проектов SMR, делаются акценты в основном на общие положительные качественные стороны или ключевые изменения, но мало публикаций с количественными оценками положительных или негативных эффектов для проектов АЭС.

Задача исследования модульности в применении к проектам АЭС состоит в анализе, за счет каких видов работ или ключевых изменений в модульных проектах возникают положительные эффекты, а за счет каких - негативные или затратные эффекты, а также в анализе количественных оценок этих эффектов в целях «определения областей проектирования и производства SMR, которые могут быть критическими и нуждаются в дополнительном дизайнерском внимании из-за своей сложной логистики (принцип модульности), графика сооружения (критический путь) и стоимости (высокие затраты и/или низкая выгода)»[53]. Сбор и анализ практических данных по модульным проектам в разных отраслях выполнен в работах [30, 31, 32, 53].

Главной для всех модульных проектов SMR является задача: через оптимизацию проекта, заводское производство модулей и новых подходов сооружения АЭС сделать SMR экономически конкурентоспособной по сравнению с АЭС большой мощности и с другими безуглеродными энергетическими технологиями без потери других важных качеств проектов – безопасности, компактности и др. По мнению зарубежных экспертов,

конкурентоспособность по экономическим критериям для SMR означает достижение определенного значения удельных капитальных затрат (~ **4400 \$/КВт**) и стоимости производимой электроэнергии на энергоустановке (~ **80 \$/МВт·час**). Традиционный метод сооружения АЭС большой мощности не может стать основой для реализации проектов SMR, поскольку не будет достигнута конкурентоспособность SMR. Поэтому для достижения целевых экономических критериев SMR придется провести большую проектную работу для реализации модульного подхода, на который возлагаются большие надежды с точки зрения перспективы развития проектов атомных генерирующих мощностей.

Дизайны разных проектов SMR обладают разной степенью потенциальной возможности переноса объема работ и оборудования с площадки в заводские условия для модульного изготовления систем, оборудования, строительных структур (Приложение 1 – Степень модуляризации). Поэтому **основные требования**, которые предъявляются к компактным модульным проектам SMR, это, прежде всего, **безопасность**, а во-вторых, обеспечение определенных **экономических параметров проектов**, позволяющих в перспективе обеспечить их конкурентоспособность на рынке. Эксперты отмечают, что конкурентные параметры могут быть достигнуты только за счет проектирования блоков по модульному принципу. Поэтому регулирующие органы некоторых стран, например, Великобритании, предполагают рассматривать проекты SMR для прохождения процедуры GDA («Общая оценка проектного дизайна» - процедура регулирования в отношении безопасности, защиты и охраны окружающей среды при реализации проекта) только после оптимизации дизайна проекта АЭС SMR на базе модульного подхода [32], при этом модульная концепция дизайна должна быть максимально реализована для всей АЭС. Эксперты отмечают, что максимально возможная модуляризация проекта АЭС SMR - ~80 %, средняя реальная - 60%. Самыми сложными для модуляризации являются структурные элементы конструкций, поскольку их типично большие размеры и/или вес требуют дополнительных проектных усилий и учета транспортных ограничений. Современное заводское изготовление оборудования и систем для строительства проектов больших мощностей оценивается в ~20-30%.

Выполненные зарубежными специалистами [30, 32, 53] оценки количественных экономических эффектов от модуляризации АЭС должны, таким образом, простимулировать проектные организации для выполнения большого объема сложной проектной работы.

Согласно международным стандартам систем управления Проектами (например, PMBOK - Приложение 1) для Проекта устанавливаются количественные и качественные **целевые параметры** – как правило, это **объем, график, стоимость и качество**, которые обязательно согласовываются контрактами и договорами. Невыполнение этих параметров приводит к дополнительным трудовым и финансовым затратам, к

возрастанию стоимости Проекта, к привлечению дополнительных финансовых ресурсов.

На современной стадии развития проектов SMR зарубежные эксперты [30, 32, 53] анализируют основные атрибуты модульных проектов SMR и их влияние на ключевые целевые параметры Проекта. В связи с разной степенью готовности проектов SMR, неготовности промышленной инфраструктуры, разработки требований регулирующих органов, **неопределенности и риски**, связанные с модульным подходом и могущие возникнуть при реализации первых и последующих проектов SMR, требуют отдельной экспертизы, поскольку влияют на главные целевые параметры проекта.

Исследуя и анализируя практики модульных проектов в других отраслях, эксперты ядерной отрасли формируют определенные рекомендации для обращения внимания на те неопределенности и риски, которые находятся в зоне несистемных отраслевых рисков и которые могут быть снижены или нивелированы на предпроектной или проектной стадии выполнением конструкторско-проектных, организационно-управленческих, подготовительных и, возможно, других работ, что приведет к достижению целевых параметров Проекта.

Проект Олкилуото. Согласно заключению финского Регулятора *«...график строительства ядерного острова отстает примерно на 4 года от первоначального плана. **Причина** – ненадлежащее завершение проектных и инженерных работ до начала строительства и отсутствие опыта управления крупным строительством»* [30].

Модульный принцип реализации проекта АЭС на базе малых модульных реакторов приведет к **изменению организационно-функциональной структуры Проекта**, произойдут изменения в разделении объемов работ и зон ответственности между крупными подрядчиками: проектировщиком, поставщиком оборудования и строительно-монтажной компанией,

В анализе практик модульных проектов других отраслей экспертами рассматриваются изменения, отражающиеся на **трех ключевых параметрах Проекта: сроки - график, стоимость - затраты и проектные риски**.

Сроки, влияние модульной специфики на график проекта

Основным доказанным на практике положительным экономическим эффектом модульных проектов разных отраслей является существенное сокращение сроков реализации проекта. Оценки сокращения непосредственно сроков строительства на площадке с учетом специфики проектов имеют диапазон от 20% до 50 %, модульные электростанции (малой мощности) в зарубежной практике демонстрируют сокращение графика, приближающееся к 40%.

Сокращение сроков реализации модульного проекта достигается за счет:

- переноса определенного объема строительной деятельности за пределы строительной площадки в заводские условия;
- важным фактором является выполнение параллельно отдельных видов работ проекта,
- при серийном изготовлении модулей и сооружении объектов отмечаются высокие темпы обучения и рост производительности труда, как на заводе, так и на площадке, приводящие к сокращению сроков выполнения работ.

Проблемные зоны

В связи с более сжатыми намеченными сроками выполнения работ в модульных проектах возникают риски, связанные с координацией и взаимодействием разных видов деятельности проекта, прежде всего, с плохим планированием и управлением проектом и с возможным плохим детальным проектированием до начала Проекта. Все вопросы, связанные с модуляризацией проекта должны определиться на стадиях pre-FEED и FEED (Приложение 1) проектирования, то есть ранние фазы проектирования являются решающей стадией, которая определяет дальнейшие временные задержки на стадии реализации, связанные с переработкой и доделкой проекта, с заменой элементов.

Исследование практики модульных проектов показало, риски переделки влияют на сроки и стоимость из-за отсутствия вовлечения на ранних стадиях всех участников Проекта, подготовки планов и интерфейсов участников [30]. Определение всех участников проекта на ранних стадиях в модульных проектах – важное условие для координации и управления работами в Проекте и успешной реализации Проекта.

В модульных проектах усложняются работы, связанные с закупками и поставками на площадку оборудования заводского изготовления. Большой объем модульных элементов требует высокого уровня логистики поставок. Практические данные показывают, что жесткие ограничения, связанные с транспортировкой к сроку, план подъема и установки больших модулей имеют решающее значение для выполнения графика работ. Задержки из-за погодных условий могут быть критическими для установки «topside» модулей, так как требуют специальных больших подъемных средств, иногда такие средства и другое крупное строительное оборудование берется в лизинг на определенные сроки.

Сложность управления командами проекта, коммуникация и координация работ с последующим контролем их выполнения, требует больше времени и более высокой квалификации управленческого персонала.

Сжатые сроки Проекта приводят к общим требованиям более высокой производительности всех работ, к более высокой квалификации всех команд и всего персонала Проекта.

В итоге любые временные задержки и изменения в графике работ, приводят к изменениям срока Проекта, что, в свою очередь, приводит к

увеличению затрат и росту стоимости Проекта, а также к увеличению косвенных затрат - увеличению доли накладных расходов и процентов в период строительства (overheads and interest during construction).

Для проектов SMR экспертами заявлены сроки строительства 3-4 года для блоков NOAK [30, 32, 53], то есть для серийных блоков после ввода LEAD-станции, FOAK – блока с заводским изготовлением модулей и последующей серии из 5-7 блоков. Заявленные сроки строительства могут быть достигнуты, начиная с NOAK – блока благодаря эффектам обучения (Learning-эффект) и улучшенной определенности продолжительности графика работ по сравнению с крупными реакторами.

Высокие темпы обучения предполагают надежную программу производства с постепенным увеличением объемов, стандартизацией проектирования, модульностью и согласованной цепочкой поставок. Важной необходимостью для достижения заявленных сроков строительства являются также определенные темпы и масштаб серийного ввода мощностей SMR, что, в свою очередь, определяется потребностями рынка. В исследовании [32] отмечается, что, производя 10 единиц продукции в год, SMRs смогут достичь паритета экономической конкурентоспособности с крупными реакторами при общем разворачивании 5 ГВт (э), паритет же определяется основными экономическими стоимостными показателями, которые находятся в прямой зависимости от сроков реализации проекта.

Затраты – стоимость [30].

Зарубежные исследования показали, что модульные (не атомные) электростанции могут демонстрировать экономию капитальных затрат ~20% и более [30].

Влияние модульности на затраты проекта важно оценивать с учетом изменения структуры затрат проекта по видам деятельности и с учетом изменения объемов работ по направлениям работ. Практика модульных проектов показывает, что модульность формирует в каких-то областях снижение затрат, а в каких-то - увеличение затрат, но результирующий баланс итоговых капитальных затрат модульных проектов положительный: отмечена максимальная экономия в размере 20%, минимальная – 7%, в среднем – 15 %.

Эксперты отмечают, что на строительной площадке происходит сокращение рабочей силы ~ на 25%, происходит снижение трудозатрат и материальных затрат. Площадь рабочего участка уменьшается от 10% до 50% в зависимости от специфики проекта.

В связи с увеличением объема работ по изготовлению модулей общие затраты проекта перераспределяются в сторону увеличения затрат заводского производства модулей, при этом отмечается, что стоимость инструмента, надзора, обучения в производственной среде ниже, чем на площадке, т.е. удельные затраты на выполнение определенных работ на заводе ниже, чем на строительной площадке. При общем росте объемов заводских работ (перераспределение объемов работ в направлении изготовления модулей до

60%) затраты на изготовление увеличиваются в среднем на 15-17% и на 13% увеличиваются затраты на транспортировку к месту модулей, оборудования, материалов.

До 20% увеличиваются затраты на выбор поставщиков, закупочную деятельность и управление контрактами с поставщиками.

Отмечается такая особенность модульных проектов как: более короткий срок исполнения работ увеличивает затраты (стоимость работ) со стороны подрядчиков, субподрядчиков и поставщиков, которые сосредоточены на своевременной поставке продукции, при этом вырастает производительность труда поставщиков, а она стоит дороже.

На стоимость проекта влияют параметры самих изготавливаемых модулей – вес, размеры, производственная мощность. Чем крупнее и тяжелее модуль, тем выше его стоимость и стоимость его транспортировки, включая стоимость погрузки-выгрузки, массивных подъемных кранов и других механизмов. Поэтому оптимизация размеров модулей в сторону оптимального уменьшения приводит иногда не только к снижению затрат, но и может сократить количество возможных замен и затрат на переделку.

Эксперты отмечают важные изменения работ **в конструкторско-проектной деятельности модульного проектирования**. В связи с требованием детальной проработки модульности проекта на ранних этапах проектирования (pre-FEED и FEED), происходит увеличение как сроков на проектные работы, так и затрат. Увеличение стоимости проектирования происходит, в том числе, за счет необходимых дополнительных человеко-часов и оценивается ~ в 10%. У проектировщиков возникают дополнительные задачи, связанные с изучением производственных процессов заводского изготовления модулей, с требованиями по обеспечению параметров и качества модулей, важных как для сооружения АЭС, так и при последующей эксплуатации.

Для LEAD и FOAK проектов SMR может потребоваться больше времени на проектирование станции по модульному принципу, время на сертификацию модуля реактора, на лицензирование каждого отдельного блока-модуля при мультимодульной компоновки АЭС. То есть, все вопросы предпроектного этапа могут занять больше времени и определенных затрат.

Одной из основных задач для модульных проектов SMR является достижение экономического паритета затрат в проект в сравнении с реакторами большой мощности. Поскольку на данном этапе даются разные оценки капитальных затрат в проекты SMR, но все они превышают (на 50% и более) удельные капитальные затраты на кВт установленной электрической мощности больших блоков, то снижение капитальных затрат SMR за счет разных факторов является ключевой задачей.

Эксперты предполагают, что для SMR снижение единовременных капитальных затрат может быть достигнуто за счет фактора модульности на 20%. Сценарий полной модуляризации ~ 80 % [53] позволяет перенести

порядка 50% капитальной стоимости за пределы непосредственно места сооружения АЭС и достичь заявленного снижения капитальных затрат.

Если учесть другие факторы, такие как «Learning-эффект», размещение нескольких модулей реакторов на одной площадке, коэффициент конструктивной экономии проекта, сокращение сроков строительства и другие, то со временем можно будет обеспечить экономическую конкурентоспособность проектов SMR. При этом экономию затрат и стоимости следует рассматривать не для FOAK-станции, а для серийного NOAK-блока.

В дополнение к стратегии снижения капитальных затрат существует ряд возможностей для достижения экономии при эксплуатации реактора. Эксплуатационное обслуживание модульных систем производится заводскими сервисными службами, что может быть предусмотрено договором на изготовление и обслуживание оборудования. При таком варианте сокращается количество станционного ремонтного персонала, т.е. сокращаются эксплуатационные затраты АЭС. Модульный подход при эксплуатации может позволить сократить сроки ремонтов и замены многих компонентов, что сказывается на эффективности использования установленной мощности и сокращении затрат на эксплуатацию. Вопросы ремонта и замены компонентов модулей, а также эксплуатационные требования к модулям и компонентам должны быть проработаны на этапе проектирования.

Риски [30]

Главный риск реализации проектов АЭС SMR на современном этапе – это отсутствие эмпирических данных, так как не было произведено ни одного малого модульного реактора и не построено ни одной АЭС на базе MMP.

Можно говорить только о потенциальных рисках проектов SMR на основе практик модульных проектов других отраслей. Эксперты перечисляют следующие риски модульных проектов [30]:

- наиболее критичен риск плохого детального проектирования, с недоработками проектирования или с плохим планированием, увеличивается риск неучета взаимозависимости интерфейсов между областями проекта, а также пересечение инженерных и строительных работ, приводящих к увеличению требований по созданию интерфейсов;

- на практике отмечено, что начало строительства до полного завершения проектно-инженерных работ вызывает риск повторных работ;

- существует риск, связанный с параметрами модулей, могущий привести к трудностям транспортировки, установки на месте и интерфейсом с другими модулями. Поэтому важна оптимизация параметров модулей. В то же время, модульность с заводским изготовлением в некоторых случаях снижает риски переделок.

- график проекта связан со многими рисками и, прежде всего, с необходимостью проведения постоянных экспертиз в связи с

взаимозависимостью нескольких видов деятельности, поэтому в модульных проектах возникла идея разработки интерфейсного управления для лучшего контроля рисков взаимозависимости работ;

- существующие риски переделок связаны с интерфейсами модулей и другого оборудования, поэтому предварительное моделирование в 3D модели позволит проверить, подходит ли фактическое оборудование на 100 % по своим размерам друг другу и соответствует ли оборудование чертежам.

- эмпирические результаты показали риски невыполнения требований по весу и грузоподъемности модулей;

- значительным считается риск отсутствия высококвалифицированных специалистов в области управления модульными проектами. При модульном подходе возрастает роль снабжения - транспортировки, доставки и логистики, это требует определенной квалификации управленческого персонала и качественных систем менеджмента, что может сформироваться только со временем и с определенным количеством реализованных проектов (Learning-effect).

- в ядерном секторе количество квалифицированных подрядчиков для выполнения определенных задач ограничено, что также приводит к определенным отраслевым рискам. Более сжатые сроки работ в проектах SMR предъявляют требования к высокой квалификации подрядчиков, субподрядчиков и поставщиков, которые должны обеспечить своевременное выполнение работ, при этом повышается производительность труда поставщиков, а она стоит дороже.

В то же время, эксперты отмечают характерную особенность модуляризации, которая приводит к снижению риска безопасности Проекта, обусловленную высоким качеством заводского изготовления.

Главный вывод экспертов по модульным проектам

Модульность формирует определенные положительные эффекты для проектов в сроках и стоимости, но ключевым недостатком модульных проектов является высокий риск их реализации.

Развитие преимуществ модуляризации и снижение проектных рисков поможет привлечь инвестиции и государственную поддержку в программы развития проектов SMR.

4.2. Оптимизация регулировочных процессов для реализации концепции АЭС на базе малых модульных реакторов (сокращения – Приложение 1)

«Ни цена, ни сроки не имеют права служить обоснованием для принятия небезопасных или некорректных технических решений»

(адмирал Хайман Риквер)

Как отмечалось в подразделе 4.1. важными основами для реализации проектов сооружения АЭС являются сертификационные и лицензионные

процессы и процедуры. В связи с развитием концепции АЭС на базе ММР, эти вопросы в системах национального и международного регулирования являются ключевыми, а степень их готовности может определить потенциальные преимущества проектов, их реализуемость, сроки выхода на рынок сертифицированных проектов SMR и, что важно с экономической точки зрения, повлиять на долю рынка сооружения АЭС за счет сооружения инновационных проектов SMR сертифицированного дизайна. Поскольку объем рынка для проектов АЭС SMR не является безграничным, а многими странами (разработчиками проектов) выполнены маркетинговые оценки такого рынка [31, 32, 43], постольку готовность систем регулирования, прежде всего национальных, к задачам регулирования проектов SMR может определить конкурентоспособность проектов на рынке.

*«Общая нормативная позиция заключается в том, что существуют договоренности для регулирования деятельности, связанной с крупными атомными электростанциями, поэтому должны существовать также подходящие механизмы для регулирования деятельности, связанной с SMR с некоторыми корректировками и балансировкой для учета новых подходов к развертыванию в рамках бизнес-модели SMR. Термин **РЕГУЛИРОВАНИЕ SMR** относится к регулированию безопасного ведения деятельности, связанной с проектами SMR, включая проектирование, производство (изготовление), строительство и эксплуатацию.» [38].*

Поскольку мульти-модульная концепция АЭС развивается активно в европейских странах и в США [31, 40], то, на примере США, все аспекты и вопросы, которые необходимо решить для полного лицензионного обеспечения возможности реализации проектов мульти-модульных АЭС в США активно рассматриваются, координируются и решаются NRC [37], а лицензионные вопросы реализации таких проектов в международной практике рассматриваются международными организациями, например, WNA [36], SMR Regulators Forum [38].

Действующие в США национальные лицензионные процедуры установлены в главном нормативном документе NRC, требования которого обязательны для исполнения - Своде положений по федеральному регулированию (CFR).

В 1989 году NRC была принята усовершенствованная процедура лицензирования. Эта процедура предусматривает выдачу одной, комбинированной лицензии (COL), разрешающей строительство и эксплуатацию атомной электростанции, состоящей из одного блока или нескольких блоков.

Для подачи заявки в NRC и выдачи комбинированной лицензии (COL) требуется определенный пакет проектной документации и пакет ранее полученных лицензий и сертификаций.

Лицензионные процедуры предусматривают возможность более раннего предварительного получения некоторых документов:

- может быть выбрана площадка для будущего строительства атомной электростанции в отрыве от самого строительства и на нее получено раннее разрешение - **ESP**. Лицензия на площадку размещения АЭС получается, как правило, с учетом мощности АЭС или количества блоков, предполагаемых к размещению на площадке.

- независимо от строительства и конкретной площадки NRC может быть рассмотрен и сертифицирован стандартный проект станции, состоящий из 1 или нескольких блоков.

Сертификация стандартного проекта станции осуществляется по правилам, которые вносятся в качестве приложения в CFR. На сертифицированный проект разрабатывается специальная документация, так называемый, документ для контроля проекта (DCD- Design Certification Document)), содержащий информацию о двух уровнях:

- один уровень сертифицируется и не должен в дальнейшем изменяться, хотя такие изменения возможны по определенной процедуре.

- второй - не сертифицируется и может корректироваться в процессе последующего строительства.

В сертифицируемой части проектной документации АЭС для каждой системы, важной для безопасности, устанавливается определенный набор инспекций, испытаний, анализов и приемочных критериев.

И площадка, на которую получено раннее разрешение, и сертифицированный проект станции могут быть в дальнейшем использованы для получения **комбинированной лицензии на сооружение и эксплуатацию (COL)**.

В заявке на лицензию на эксплуатацию, получаемую в комбинированной лицензии, помимо проектной информации, должна быть включена информация финансовая, рыночная - антимонопольная, а также **оценка потребности электрической мощности в регионе сооружения** (10 CFR Part 50).

Для мульти-модульной АЭС на базе MMR действующие в США лицензионные процедуры анализируются для их возможного применения и необходимой доработки. Развертывание мульти-модульной атомной станции формирует некоторые вопросы, связанные с применением действующего порядка получения лицензии, ее структуры и сроков действия.

Например, структура лицензии предполагает, что одна заявка на COL с несколькими идентичными модулями реакторов может пройти одну экспертизу NRC, один отчет об оценке безопасности и слушания в NRC.

Принцип модульного конструирования и изготовления систем и оборудования для АЭС на базе малых модульных реакторов предполагает определенную стандартизацию проекта модуля реактора с основными системами безопасности с дальнейшей сертификацией данного модуля реактора [36] и получением документа MDC – **Module Certification Document**. Сертификация проекта модуля является частью всего процесса

лицензирования. При таком подходе **модуль реактора с основными системами безопасности сертифицируется один раз.**

Но проект всей станции, скорее всего, потребует, самостоятельного процесса сертификации, поскольку проект мульти-модульной АЭС определенной компоновки включает в себя общие и резервные системы и оборудование, совместно используемое двумя или более модульными реакторами. Разные системы АЭС также должны иметь лицензии на определенный срок. Некоторые конструкции малых модульных реакторов могут требовать существенную долю вторичного оборудования и других систем, поэтому для определения типа конструкции модульного реактора в нормативный документ было добавлено определение **модульного конструирования.**

Существуют конструкции MMP, в которых два или более реактора совместно используют такое оборудование, как системы преобразования энергии - несколько реакторов, подающих пар в один турбогенератор. Некоторые из конструкций MMP разделяют между реакторами вторичные системы и другое оборудование (например, системы преобразования энергии). В некоторых случаях реакторы могут начать работать в разное время.

Поскольку конструкции блоков АЭС могут быть разными, то именно конструкционные и компоновочные решения могут определять дополнительные лицензионные требования к общему оборудованию и системам блока в составе единого блока-модуля АЭС. Конструктивные особенности и компоновка АЭС, а также требования конкретной площадки предполагают обоснование комплексной безопасности работы блоков и всей АЭС.

Срок лицензии для каждого модуля в составе АЭС определяется отдельно с момента его готовности к загрузке топлива. Приложение COL предполагает запрашивать отдельную лицензию на каждый реакторный модуль для многомодульной установки.

Рассматриваются вопросы работы АЭС с MMP в совместных системных режимах с ветряными станциями, в такой комбинации могут быть выставлены требования по безопасности работы АЭС с MMP в определенных эксплуатационных режимах.

Вопросы, относящиеся к лицензированию при реализации мульти-модульных проектов АЭС в международной практике, рассмотрены в документе WNA [36] и постоянно обсуждаются в специальной рабочей группе Форума регуляторов MMP (Manufacturing (and Construction), Commissioning and Operations Working Group (MCCO-WG) SMR Regulators' Forum). Отмечаемые проблемы и пути их решения требуют отдельного рассмотрения и анализа.

Справка 11.

(<https://www.atomic-energy.ru/news/2019/12/17/100106>)

В декабре 2019 года проект модульного реактора NuScale прошёл очередной этап сертификации в NRC. Комиссия США по ядерному регулированию (NRC) завершила четвертый этап рассмотрения заявки на сертификацию проекта малого модульного реактора разработки NuScale. После двух оставшихся заключительных этапов сертификации это будет означать возможность практической реализации этого проекта. Проект NuScale представляет собой легководный реактор с водой под давлением. Один реакторный модуль имеет мощность 60 МВт(э), а в целом на одной площадке АЭС могут располагаться до 12 модулей, объединённых общей инфраструктурой. Из всех многочисленных предлагаемых проектов малых модульных реакторов NuScale – это первый и пока единственный проект, проходящий процедуру сертификации в NRC. **Завершившийся ныне 4-й этап сертификации** представляет собой расширенный анализ безопасности проекта реактора и является ключевым во всей процедуре. Всего процедура сертификации, по правилам NRC, состоит из шести этапов: предстоящий 5-й этап будет представлять дополнительную оценку проекта независимыми экспертами, а на 6-м этапе будет выпущен формальный отчёт по итогам 4-го и 5-го этапов. Предполагается, что все эти процедуры будут завершены в сентябре 2020 года. Сертификация проекта будет действительна в течение 15 лет, но может быть продлена еще на 10-15 лет.

Параллельно с выдачей лицензии на площадку для мульти-модульной АЭС (площадка АЭС «Клинч-Ривер» - **компания TVA**) и сертификацией проекта NuScale для реализации проекта АЭС в компоновочном исполнении на площадке АЭС до 12 модулей, объединённых общей инфраструктурой (площадка Национальной лаборатории Айдахо), NRC в декабре 2019 года вынесло на общественное обсуждение предложение - проект плана аварийного реагирования для ядерных реакторов малой мощности. Для ныне действующих энергоблоков АЭС в США в случае аварийной ситуации установлена зона эвакуации радиусом 10 миль (16 км) от реактора и зона проведения противоаварийных мероприятий радиусом 50 миль. Как отмечается в пояснительной записке NRC, ввод в эксплуатацию реакторов малой мощности должен сделать «более гибкими» эти цифры, адаптировав их под масштабы реакторов.

В документе **“Restoring America’s Competitive Nuclear Energy Advantage. A strategy to assure U.S. National Security, 2020»** [25] сформулированы стратегические цели и задачи для восстановления и развития атомной энергетики в США, среди которых есть следующая:

«Расширить программы международного сотрудничества по гражданской ядерной энергетике, включая технический обмен между регулирующими организациями и помощь иностранным государствам в создании систем ядерного регулирования с целью ускорения лицензирования имеющих лицензию NRC американских ядерных технологий (например,

малых реакторов) за рубежом».

Как отмечают эксперты [28], процесс лицензирования (LP - licensing process) является ключевым вопросом для развертывания SMR.

Существующий процесс лицензирования был сформирован для сооружения АЭС с реакторами большой мощности, который характеризуется длительными сроками строительства. Сооружение АЭС большой мощности предполагает множество различных оценок, которые требуют времени и часто выполняются параллельно со строительством АЭС, особенно на ранней фазе проекта. АЭС на базе ММР предполагают более концентрированные конструкции и проектные решения, более высокую степень безопасности проектов, одноразовую (для серии) сертификацию проекта реактора и стандартизированные процессы при сооружении. Следовательно, время лицензионного процесса может превышать время графика строительства SMR, целью которого является обеспечение более короткого срока сооружения.

В то же время, эксперты [28] утверждают, что лицензионный процесс для SMR по времени может быть дольше, чем время строительства SMR, потому что «новизна технологии проектирования, выпуск (издание) новых различных принципов безопасности в отношении атомных электростанций, отсутствие опытной и конкретной нормативной базы, множество вовлеченных учреждений, различные бюрократические процедуры», а также многие нормативные требования конкретной страны могут привести к задержкам выхода на рынки проектов АЭС на базе ММР.

Гармонизация всего нормативного регулирования в каждой конкретной стране – необходимое условие для развертывания проектов SMR. Поскольку ядерные правила являются специфичными для конкретной страны, поэтому поставщики реакторов не смогут производить стандартную установку по своим правилам и отправлять или строить одинаковые блоки по всему миру. Сертификация стандартных единиц блоков более чем в одной стране - это **гармонизация права и процессов лицензирования**. Эксперты отмечают, что добиться прогресса в этом направлении крайне сложно в краткосрочной и среднесрочной перспективе из-за неоднородности правовых систем, институциональных систем; а также структуры и основополагающих принципов процесса лицензирования.

В некоторых странах (например, в США) комиссией по ядерному регулированию США была введена лицензия на производство для сертификации процессов критически важных ядерных поставщиков, то есть завод по производству оборудования должен быть сертифицирован отдельно. Лицензия на производство не заменяет процесса лицензирования SMR, но ускоряет процесс лицензирования, потому что производители известны и сертифицированы регулирующим органом. Таким образом, производитель модуля реактора будет нести полную ответственность перед ядерным оператором за ядерную безопасность.

В настоящее время подготовка лицензионных процессов для SMR

развивается в разных странах, заинтересованных в развитии проектов АЭС на базе ММР. В Великобритании процедура GDA (Generic Design Assessment - Общая оценка дизайна проекта) - это процесс, предназначенный для анализа проектов новых атомных блоков. Он призван устранить в проектах все недочёты, причём сделать это нужно своевременно, ещё до начала строительства. Регуляторы и проектанты должны работать вместе уже на ранних стадиях реализации проектов, причём работа должна быть открытой и транспарентной. Поскольку опыт сооружения АЭС большой мощности показывает, что фундаментальные причины роста сроков и сметы на сооружаемых блоках связаны со слабыми местами проекта (в том числе, относящиеся к проектированию), вскрывшимися только на стадии строительства, то совместная работа регуляторов и проектировщиков при формировании регулирующей нормативной среды для SMR поможет для сокращения в дальнейшем как сроков лицензирования проектов, так и сроков и стоимости сооружения.

5 Экономические оценки затрат в проекты АЭС на базе ММР, экономическая эффективность и конкурентоспособность проектов

Многие современные исследования в области анализа перспектив практической реализации проектов SMR направлены на анализ их экономической эффективности и коммерческой привлекательности. Поскольку прогнозируются разные потенциальные ниши для размещения АЭС SMR, то, прежде всего, SMR сравнивают по экономическим показателям с проектами больших мощностей. Выполняются оценки, как SMR может уравновесить снижение экономии от масштаба с экономикой мульти-модульности, анализируют специфические факторы, такие как характеристики электросети, сроки строительства, модульность, обучение, потенциальные сценарии и режимы работы, финансовые условия и модели и т.д., которые отличают SMR от LR при оценке капитальных затрат, а также затрат на этапе эксплуатации и этапе вывода из эксплуатации. Делаются выводы, что, как только влияние этих, так называемых нефинансовых факторов, будет принято во внимание, прежде всего, капитальные затраты будут сопоставимы между этими двумя технологиями, а цена производства продукции станет приемлемой для рынка.

Такие факторы, как сетевая инфраструктура для SMR, общественное признание, риски, связанные с проектом, лицензирование, очень важны во время оценки наилучшего размера реактора для инвестиций в ядерный сектор.

Основными требованиями и условиями при выполнении экономического анализа проектов является:

- определение задач и границ анализа (технико-экономический, - инвестиционный, сценарный, сравнительно-сопоставительный, другие),

- подготовка исходных данных для определенного типа анализа,
- выбор экономических методик, подготовка формульного аппарата;
- разработка расчетного инструмента анализа.

Как правило, задачей **технико-экономического анализа** энергопроектов является получение первичных экономических оценок для разных опций (технических, конструкционных, производственных) реализации проекта и, в зависимости от этого, для разных комбинаций технико-экономических и экономических параметров проекта с учетом степени технологической и промышленной готовности. Итоговыми экономическими показателями могут быть оценки затрат на стадиях (предпроектная, проектная) и этапах ЖЦ проекта. Для проектной стадии определяются затраты: капитальные, эксплуатационные, топливные, затраты завершающего этапа проекта, спектр и объемы производства продукции.

Задачей более полного экономического анализа проектов является выполнение оценок в границах затрат-доходности проектов с более широким спектром исходных данных, критериев оценки и уровней анализа, например :

- метод баланса затрат-доходов - Cost-Benefit Analysis (CBA);
- мультикритериальный метод, базирующийся на анализе влияния разных факторов или всего множества факторов на сбалансированный набор показателей эффективности проекта - Multicriteria decision-making method (MCDA) [41].

В более интегральных методах экономического анализа сбалансированный набор итоговых экономических показателей служит для определения экономической эффективности проектов, их конкурентоспособности на рынках, приемлемости проекта для компаний и инвесторов, потребителей продукции. При таком полном экономическом анализе проектов важен учет обратной связи с рынками - капиталов (инвестиций), рынком потребностей в мощностях и энергетической продукции, с промышленно-производственным рынком, рынком потребителей продукции, которые влияют через определенную систему исходных данных на границы доходности проекта. Без учета механизмов и условий возврата крупных инвестиций, правил и условий рынка (для коммерческих проектов) и (или) объемов государственной поддержки, интересы разработчиков проектов, заказчиков и инвесторов могут быть не учтены и может быть проблематична практическая реализация технического проекта.

Во многих международных исследованиях в отношении проектов SMR, прежде всего, выполняется сравнительный экономический анализ этих проектов с проектами АЭС большой мощности, определяется их сопоставительная конкурентоспособность и экономическая приемлемость. При этом делается акцент, что для инновационных проектов SMR, помимо общепринятой методики экономического масштабирования затрат-доходов в проекты и расчета по данному методу экономических показателей, существенным для учета в анализе является ряд дополнительных факторов,

свойственных исключительно проектам SMR, а без их учета сравнение проектов SMR с проектами LR будет некорректно.

В контексте выполненного исследования можно констатировать, что дальнейшими задачами для исследования экономики проектов АЭС на базе ММР должны быть следующие:

- Специфика этапов жизненного цикла АЭС на базе ММР, оценка затрат и доходов на этапах [28, 51, 55]. Этап эксплуатации АЭС на базе ММР в модульном исполнении требует исследования как проектно-технических требований к эксплуатации, затрат на этапе, так и механизмов получения доходов в целях компенсации всех затрат.
- Экономика сценарного анализа. Сценарии работы АЭС малой и средней мощности (SMR) в энергетических системах и в комплексных производственных системах. Потенциальные сценарии:
 - режимы слежения за нагрузкой (LOAD – following)[56, 57];
 - когенерация – электроэнергия+тепло, охлаждение;
 - электроэнергия для опреснения воды;
 - работа в режимах слежения за нагрузкой +аккумулирование тепла, электроэнергии
 - комбинация работы АЭС с ВИЭ.
- Разработка расчетного инструмента экономического анализа инновационных проектов АЭС с учетом нефинансовых и финансовых факторов при оценке проектов SMR [40, 41].
- Учет при анализе новых методов экономической оценки инновационных проектов АЭС на базе малых модульных реакторов - метод DCF и метод реальных опционов [56, 58, 59, 60, 61].
- Финансовые инструменты и бизнес-модели. Варианты государственной поддержки [43].
- Экономические оценки зарубежных государственных программ в направлении деятельности для реализации проектов SMR.

Все эти области экономического анализа тесно сопряжены с задачей развития направления малых модульных проектов АЭС, требуют времени, трудозатрат, сбора данных и подготовки расчетных инструментов. Развитие этих направлений экономического анализа требует тесного сотрудничества со специалистами технического и управленческого профиля.

6 Выводы

По результатам выполненного исследования специфики экономики АЭС на базе реакторов малой мощности можно сделать вывод, что на конечные экономические результаты работы АСММ в разном исполнении - расположение на площадке единичного блока-модуля или сооружение мульти-модульной АЭС - влияет множество факторов и аспектов. Помимо технико-экономических оценок проектов реакторов и блоков АЭС существует ряд факторов, могущих дополнительно влиять на реальную экономику проекта, а именно:

- привязка проекта к площадке для размещения с учетом запросов потребителей или заказчиков,
- требования к проектам по сертификации, лицензированию,
- модели реализации проектов в разных энергосистемах,
- учет всех стадий жизненного цикла проекта,
- создание промышленной инфраструктуры в целях серийного производства модулей и оборудования для проектов малой мощности, развитие модульных подходов проектирования АЭС;
- правила и условия энергетических рынков, включая механизмы возврата затрат в реализацию проекта,
- конкретные бизнес-модели финансирования и экономической реализации проектов,
- механизмы государственной поддержки;
- и многие другие факторы.

Эти дополнительные факторы определяют как реальную экономику конкретного проекта, так и формируют требования к техническому проекту со стороны заказчиков, регуляторов и энергосистем.

При рассмотрении потенциальной возможности работы **единичных генерирующих установок малой мощности АЭС** (определенный мощностью ряд) в локальных или изолированных энергосистемах в целях надежного обеспечения потребностей автономных энергопотребителей или зон (ниш) покрытия потребностей изолированных энергосистем, принципиальным моментом сооружения блоков АЭС малой мощности является необходимость относительной близости расположения энергоустановок к потребителям в целях выдачи электроэнергии (и тепла) для сокращения, тем самым, расстояния по передаче электроэнергии и тепла и затрат на сетевую и прочую инфраструктуру. При этом экономическая доступность таких проектов обеспечивается как внешними системно-инфраструктурными факторами, так и снижением несистемных отраслевых рисков за счет оптимизации затрат в проекты. Ключевыми факторами, могущими снизить капитальную стоимость проектов АСММ являются: модульность, транспортабельность, серийность и необходимость промышленной инфраструктуры для определенного объема производства и транспортировки модулей. На основе этих главных категорий экспертами делаются предположения и выводы о потенциальных положительных

экономических преимуществах модульной концепции реализации проектов АЭС малой мощности в любом исполнении.

7. Заключение

Вопросы экономики любого проекта, особенно проектов инновационных АЭС на базе ММР, не могут рассматриваться упрощенно на базе устоявшихся методов и практик. Развитие новых технологий требует развития новых методов экономического анализа с учетом множества факторов, сопутствующих этим проектам и отражающих их специфику. При такой постановке важна полнота информации о всех аспектах, влияющих на оценки SMR, поэтому необходима тесная рабочая взаимосвязь специалистов разного профиля при выполнении экономических исследований, относящихся к проектам АЭС на базе ММР. Подобные подходы в экономическом анализе развиваются, согласно проанализированным публичным зарубежным материалам, в странах, активно заинтересованных в конечном результате.

Для инновационных энергетических проектов АЭС на базе ММР требуется развитие системы государственной поддержки и нормативно-правовой базы, требуется внимание и практические шаги для создания благоприятной среды реализации таких проектов подобной той, которая была создана для реализации дорогих и затратных (в начале пути развития) проектов на базе ВИЭ.

**Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт»
(приказ от 14.08.2019 № 1808)**

8. Список источников

1. Electric Grid Reliability and Interface with Nuclear Power Plants, Technical Reports, Nuclear Energy Series, No. NG-T-3.8, IAEA, VIENNA, 2012
2. Nuclear Energy and Renewables: System Effects in Low-carbon Electricity Systems. OECD, 2012.
3. Technical Meeting on Electric Grid Reliability and Resilience in relation to Nuclear Power Plants, IAEA , 15–17 October 2019.
4. Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power (IAEA Nuclear Energy Series No. NG-G-3.1, Rev.1), VIENNA, 2015.
5. Симпозиум по экономическим аспектам включения АЭС в энергосистемы. Журнал «Атомная энергия», Т. 30 Вып.4, апрель 1971, стр.404-405.
6. А.М. Синельников, Распределенная генерация знает себе цену, журнал «Энергетика и промышленность России», № 22(330), ноябрь, 2017 год.
7. И.Б.Артемов, А.М.Синельников, ОАО «НТЦ ЕЭС». Выбор генерирующего оборудования для объектов распределенной генерации, журнал «Турбины и дизели», март-апрель 2015 год.
8. А.М. Синельников. Отдельные аспекты технико-экономического обоснования проектов собственной генерации, журнал «Энергоэксперт», №3, 2016 год.
9. Станислав Безгин. Влияние ВИЭ на стабильность энергосистем. Аналитический журнал «Геоэнергетика.ru», 12.04.2018, <http://geoenergetics.ru/2018/04/12/vliyaniye-vie-na-stabilnost-energositsem/>.
10. «Локальные энергосистемы», интервью А.Солоницына, Научно-производственный центр «Локальная энергетика» Дальневосточного федерального университета журналу «Энергетика и промышленность России», январь 2013 год, <https://www.eprussia.ru/epr/213/14646.htm>
11. ГОСТ Р 58491-2019 Электроэнергетика. Распределенная генерация. Технические требования к объектам генерации на базе ветроэнергетических установок, дата введения 01.01.2020.
12. Об утверждении Правил технологического функционирования электроэнергетических систем и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации, Постановление Правительства РФ от 13 августа 2018 г. № 937, Москва.
13. Степанов А.В., Кеткин Л.А. Тарифный парадокс: технологическое присоединение к объектам ФСК ЕЭС не всегда гарантирует минимальную стоимость услуг по передаче электрической энергии. Журнал «Промышленная энергетика», № 3, 2019 год.
14. Feed-in tariffs (FITs) in Europe. <https://www.pv-magazine.com/features/archive/solar-incentives-and-fits/feed-in-tariffs-in-europe/>
15. What is a feed-in tariff? <https://news.energysage.com/feed-in-tariffs-a-primer-on-feed-in-tariffs-for-solar>

16. Золотова И.Ю. Перекрестное субсидирование в электроэнергетике: эмпирический анализ, оценка эффективности собственной генерации. Москва, НИУ Высшая школа экономики // Эффективное антикризисное управление. 2017. № 3. С. 70–77.
17. Золотова И.Ю., Долматов И.А., Минкова В.С. Перекрестное субсидирование в электроэнергетике: эмпирический анализ // Энергетическая политика. 2017. № 2. С. 51–59.
18. Темная О.В., Шеваль Ю.В. Оценка объемов перекрестного субсидирования между видами деятельности «технологическое присоединение» и «передача электрической энергии» // Вестник Евразийской науки, 2019, №5, Том 11, изд-во «Мир науки».
19. Успешные отраслевые решения задач автономного энергоснабжения. БПЦ «Энергетические системы: <http://www.bpcgroup.ru/industry/energy/>.2011.
20. А.С. Вертешев, В.П.Зибров Развитие распределенных энергетических систем в регионе Труды ППИ. 2011. No15.3. С. 300 -305
21. Строительство новых АЭС в США пока не заменяет выводимые блоки - <https://www.atomic-energy.ru/news/2017/05/16/75785>
22. Перспективы развития ядерной генерации в Европе <https://www.atomic-energy.ru/articles/2015/05/22/57088>
23. European Commission (2016). COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT Accompanying the document, Nuclear Illustrative Programme of the Commission (PINC), {COM(2016) 177 final}, Brussels, 4.4.2016
24. Американские разработчики малых модульных реакторов обращаются за государственной поддержкой <https://www.atomic-energy.ru/news/2017/02/27/73045>
25. Restoring America's Competitive Nuclear Energy Advantage. A strategy to assure U.S. National Security, 2020 https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/04/f74/RestoringAmericasCompetitiveNuclearAdvantage_1.pdf.
26. Geoffrey Black, Steven Peterson. Modelling Employment in the American Nuclear Power Sector with Input-Output Analysis. Energy Policy Institute, Center for Advanced Energy Studies Idaho National Laboratory. Presentation to OECD/NEA Expert Workshop on Modeling Employment in the Nuclear Power Sector, February 13 – 14, 2014
27. Deployment Indicators for Small Modular Reactors/ Methodology, Analysis of Key Factors and Case Studies, IAEA-TECDOC-1854, 2018.
28. Giorgio Locatelli, Benito Mignacca, Chapter 8: Small Modular Nuclear Reactors, University of Leeds, School of Civil Engineering, January 2019, <https://www.researchgate.net/publication/330523723>
29. А.А. Просвирнов, ОАО «ВНИИАЭС», О модульности, как новой философии создания АЭС. 17.01.2012 <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=3512>

30. Benito Mignacca , Mahmoud Alaassar, Giorgio Locatelli , Diletta Colette Invernizzi (University of Leeds, School of Civil Engineering Leeds, United Kingdom). We never built small modular reactors (SMRs), but what do we know about modularization in construction? Proceedings of the 2018 26th International Conference on Nuclear Engineering ICONE26 July 22-26, 2018, London, England.
31. Nick Bertram, Steffen Fuchs, Jan Mischke, Robert Palter, Gernot Strube, and Jonathan Woetzel. Modular construction: From projects to products. McKinsey&Company, Capital Projects & Infrastructure, June 2019.
32. Chris Lewis, Ray MacSweeney, Miranda Kirschel, Giorgio Licatelli. Small modular reactors - Can building nuclear power become more cost-effective? Technical Report, Ernst & Young Global Limited, Department of Energy and Climate Change (DECC), March 2016.
33. Dixon, B. W.; Ganda, F. ; Williams, K. A. ; Hoffman, E. ; Hanson, J. K. Advanced Fuel Cycle Cost Basis – 2017 Edition Technical Report. Idaho National Lab. (INL), 2017.
34. Robert Rosner, Stephen Goldberg. Small Modular Reactors – Key to Future Nuclear Power Generation in the U.S. Energy Policy Institute at Chicago, Technical Paper, Revision 1, November, 2011
35. Benito Mignacca, Ahmad Hasan Alawneh, Dr Giorgio Locatelli (University of Leeds, School of Civil Engineering Leeds, United Kingdom), Transportation of small modular reactor modules: what do the experts say? Proceedings of ICONE-27 27th International Conference on Nuclear Engineering May 19-24, 2019, Ibaraki, Japan
36. Facilitating International Licensing of Small Modular Reactors, WNA Report, CORDEL (Cooperation in Reactor Design Evaluation and Licensing) Working Group, published: August 2015, Report No. 2015/004.
37. License structure for multi-module small modular reactor facilities, Position paper, NEI, December 2010.
38. Report on manufacturability, supply chain management and commissioning of Small Modular Reactors, Interim report, Small Modular Reactors Regulators' Forum, IAEA, December 2019.
39. David Shropshire, Economic viability of small to medium-sized reactors deployed in future European energy markets, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy, Journal «Progress in Nuclear Energy» 53 (2011) 299-307.
40. Sara Boarin, Marco E. Ricotti, Construction delays ad extra-costs on large and small nuclear projects. International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems, May 26-30, 2013, Madrid, Spain
41. Silvia Barengi, Sara Boarin, Marco E. Ricotti. Investment in different sized SMRs: economic evaluation of stochastic scenarios by INCAS code. Proceedings of ICAPP '12 Chicago, USA, June 24-28, 2012.

42. Пергаменщик Б.К., Теличенко В.И., Темишев Р.Р. Возведение специальных защитных конструкций АЭС. Москва, Издательский дом МЭИ, 2011 год.

43 Market framework for financing small nuclear. A report to Her Majesty's Government by the Expert Finance Working Group (EFWG) on Small Nuclear Reactors, 2018.

44. Приложение № 2 к протоколу № 2 от 19 сентября 2017 г. МЭР РФ «Методические рекомендации по сопоставлению уровня технологического развития» - economy.gov.ru/material/file/.../metodic_ta_mrg.pdf.

45. В.М.Пашин, Рост стоимости и проблемы управления созданием военной техники, 23.07.2013г, <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=4677>.

46. Э.В. Попов, В.С. Савинич, Я.А. Сосунов, А.Г. Шведов (ОАО «Туполев») Оценка готовности технологии, 30.06.2014. <https://aviaglobus.ru/2014/06/30/8346/>.

47. А.М. Хаматханова. Готовность к промышленному внедрению как индикатор выбора приоритетных технологических направлений. Журнал «Экономика науки» 2016, Т. 2, № 1.

48. А.В. Филимонов. TRL\MRL\CRL Вопросы календарного и финансового планирования, АБИТ (Ассоциация Брокеров Инноваций и Технологий), ГК «Росатом», сентябрь, 2018.

www.innov-rosatom.ru/.../medialibrary...4_TRL_Филимонов.pdf

49. ГОСТ Р 58048-2017 Национальный стандарт РФ. Трансфер технологий. Методические указания по оценке уровня зрелости технологий, дата введения 2018-06-01.

50. The TRL Scale as a Research & Innovation Policy Tool, EARTO Recommendations, 30 April 2014, https://www.earto.eu/wp-content/uploads/The_TRL_Scale_as_a_R_I_Policy_Tool_EARTO_Recommendations_-_Final.pdf (дата обращения 20.05.2020)

51. Amritpal Singh Agar, Giorgio Locatelli, Chapter 4. Economics of Nuclear Power Plants, Preprint, 01 April 2020.

52. S. Dardour, F. Reitsma, H. Subki, D. Subbotnitskiy Economic Appraisal of Small Modular Reactor (SMR) Projects: Methodologies and Applications. Coordinated Research Project (CRP), the Project of IAEA. <https://www.iaea.org/services/coordinated-research-activities/how-to-participate>.

53. Clara Anne Lloyd. Modular Manufacture and Construction of Small Nuclear Power Generation Systems. Department of Engineering University of Cambridge. May 2019. <https://www.researchgate.net/publication/337937287> Modular Manufacture and Construction of Small Nuclear Power Generation Systems.

54. Преимущества блочно-модульного оборудования в газопереработке. <http://gazsurf.com/ru/gazopererabotka/stati/item/preimushchestva-blochno-modulnogo-oborudovaniya-v-gazopererabotke>.

55. Giorgio Locatelli, Mauro Mancini (Politecnico di Milano). Competitiveness of Small-Medium, New Generation Reactors: A Comparative Study on Decommissioning. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, October 2010, Vol. 132 .

56.. Locatelli, G, Boarin, S, Pellegrino, F et al. (1 more author). Load following with Small Modular Reactors (SMR): A real options analysis. Energy vol 80 (2015): pp. 41-54. <http://eprints.whiterose.ac.uk/91139/>.

57. A. Lokhov Load-following with nuclear power plants NEA updates, NEA News 2011 – No. 29.2.

58.Giorgio Locatelli, Marco Pecoraro, Mauro Mancini, Appraisal of small modular nuclear reactors with ‘real options’ valuation, Journal Energy»,170(2):51-66 April 2017.

59. Giorgio Locatelli, Marco Armando Pecoraro, Giovanni Meroni, Mauro Mancini. Using Real Options to value two key merits of Small Modular Reactors, May 2020.

https://www.researchgate.net/publication/341343519_Using_Real_Options_to_value_two_key_merits_of_Small_Modular_Reactors/.

60. Илья Кутейников. Что такое реальный опцион: виды, методы оценки стоимости реальных опционов, январь 2020. <https://greedisgood.one/metody-otsenki-realnyh-optsiionov/>.

61. А. В. Бухвалов. Реальные опционы в менеджменте. Введение в проблему. (Факультет менеджмента СПбГУ), Российский журнал менеджмента, №1, 2004. С. 3–32.

Приложение 1. *Понятийный аппарат (сокращения и определения).*

Сокращения

АСММ – атомная станция малой мощности

SMR – Small Modular Reactor – малый модульный реактор

SMR – Small and Medium Reactors – реакторы малой и средней мощности.

MMP – малый модульный реактор

LR – Large Reactor – реактор большой мощности

Multi-module small module reactor facilities – мульти-модульные установки на базе малых модульных реакторов

NPP - nuclear power plant – атомная электростанция

BOP - Balance Of Plant - неядерное оборудование станций

Low-capacity NPP – атомная станция малой мощности

Distributed generation - распределенная генерация (локальная, децентрализованная, автономная)

ВИЭ – возобновляемые источники энергии

ВЭС – ветряная электростанция

IAEA (International Atomic Energy Agency) - МАГАТЭ – международное агентство по атомной энергии

NRC - Nuclear Regulatory Commission - Комиссия по ядерному регулированию (США)

CFR – Code of Federal Regulations - главный нормативный документ NRC – свод положений по федеральному регулированию

ESP - Early Site Permit - раннее разрешение на площадку для строительства объекта (США)

DCD - Design Certification Document – документ о Сертификации Конструкции (США)

MDC – Module Certification Document – документ о сертификации модуля.

COL - Combined Construction and Operating License – комбинированная лицензия на строительство и эксплуатацию (США)

GDA - Generic Design Assessment – «Общая оценка проектного дизайна»-процедура регулирования в отношении безопасности, защиты и охраны окружающей среды при реализации проекта (Великобритания).

LP - licensing process – процесс лицензирования.

WNA (World nuclear association) - Всемирная ядерная ассоциация - международная организация по продвижению атомной энергии и поддержки компаний отрасли. Членами ассоциации являются ведущие компании атомной отрасли: компании ядерно-топливного цикла, производители реакторов, строительные компании, компании по обращению с РАО и ОЯТ, а также генерирующие компании.

FOAK - First-of-a-Kind – затраты в первый в своем роде коммерческий проект станции (завода).

NOAK - Nth-of-a-kind – стоимость N-ой установки (станции) с идентичным с FOAK дизайном.

The LEAD plant – прототип станции FOAK.

DoM - Degree of Modularisation - Степень модуляризации.

BIM - Building Information Modelling - информационное моделирование строительства (в т.ч. модульного).

TRL - Technology readiness levels- уровни технологической готовности

MRL – Manufacturing readiness level – уровень производственной (промышленной) готовности

CRL – Commercialization Readiness Level - уровень готовности к коммерциализации (рыночной готовности).

EARTO - European Association of. Research & Technology Organisations. - Европейская ассоциация научно - исследовательских и технологических организаций.

PMBOK - Project Management Body Of Knowledge – Свод профессиональных знаний по управлению Проектами.

FEED- Front End Engineering Design – стадия предварительного проектирования (зарубежный подход).

Overnight Costs - единовременные капитальные затраты

DCF - Discounted Cash Flow metod – метод дисконтированных денежных потоков.

LCOE – Levelised Cost of Electricity – приведенные удельные затраты на производство электроэнергии.

CBA - Cost-Benefit Analysis – метод экономического анализа затрат-доходов проекта (программы).

MCDA - Multicriteria decision-making method – мультикритериальный метод принятия решений.

RO method – Real Options metod – метод реальных опционов.

Определения

Энергетическая система (энергосистема) — совокупность электростанций, электрических и тепловых сетей, соединённых между собой и связанных общностью режимов в непрерывном процессе производства, преобразования, передачи и распределения электрической и тепловой энергии при общем управлении этим режимом. Важнейший признак энергетической системы, отличающий ее от других крупных промышленных и производственных объединений - одновременность процессов производства, распределения и потребления электрической энергии, обусловленная невозможностью складирования готовой продукции и необходимостью баланса между суммарными мощностями, генерируемыми электростанциями, и потребляемыми в энергетической системе. Появление небаланса, как правило, сопровождается изменением режимных параметров энергетической системы напряжений, токов, частоты сети и других, отклонение которых лимитированы (<https://ru.wikipedia.org/wiki>).

Объединение отдельных энергоснабжающих систем в единую энергосистему связано, в том числе, с взаимозаменяемостью различных видов энергии и энергоресурсов <https://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/154122/Энергосистема>

Модульный принцип — принцип построения технических систем, согласно которому функционально связанные части группируются в законченные узлы — модули (блоки). Модульный принцип требует новой концепции проектирования технической системы и новой конструкторско-технологической подготовки производства, изготавливающего оборудование на основе модульного принципа.

Модуляризация (англ. **modularization**) — Процесс проектирования, основанный на модульном подходе, при котором целевая система (объект) разбивается на большое число независимых, но логически взаимосвязанных блоков-модулей, в дальнейшем при сборке соединяемых определенными интерфейсами. В концепции модуляризации ключевое внимание будет уделяться компонентам модулей и унификации их комплектующих.

«Модуляризация - это процесс преобразования конструкции (проекта) станции и процесса строительства из монолитного или комплектно-блочного в целях заводского серийного изготовления стандартных модулей с дальнейшей комплексной отгрузкой, сборкой и установкой в площадочных условиях.» (GIF/EMWG, “Cost estimating guidelines for generation IV nuclear energy systems - revision 4.2,” 2007.)

Модульность (англ. **modularity**) — это свойство системы, связанное с возможностью её декомпозиции на ряд внутренне связанных между собой модулей (<https://ru.wikipedia.org/wiki/модульность>). Система конечного продукта считается «модульной», когда она может быть разложена на ряд компонентов, которые могут быть автономно изготовлены и собраны в различных конфигурациях. Модульность приводит к структуре, в которой модули должны быть интегрированы для решения взаимосвязанных задач. С понятием «модульность» тесно связаны понятия «унификация» и «стандартизация».

Сертификация — форма подтверждения соответствия объекта требованиям технических регламентов, положениям стандартов, сводов правил или условиям договоров. Под **сертификацией** подразумевается также процедура получения сертификата - документа, заверяющего соответствие продукта (услуги, системы) установленным требованиям.

Унификация — под **унификацией**, как правило, считают «приведение к единообразию технических характеристик изделий, документации и средств общения (терминов, обозначений и др.)». **Унификации** изделий может предшествовать их **типизация** — выделение типовых изделий и типовых проектов. Унификация — это распространённый и эффективный метод устранения излишнего многообразия посредством сокращения перечня допустимых элементов и решений, приведения их к однотипности. Унификация является разновидностью систематизации, которая преследует цель распределения предметов в определённом порядке и

последовательности, образующей чёткую систему, удобную для пользования. Унификация в процессе **конструирования** изделия — это многократное применение в конструкции одних и тех же деталей, узлов, форм поверхностей. Унификация в технологическом процессе — это сокращение номенклатуры используемого при изготовлении изделия инструмента и оборудования. **Унификация** позволяет повысить **серийность** операций и выпуска изделий и, как следствие, удешевить производство, сократить время на его подготовку. С другой стороны, у унификации есть отрицательные моменты, связанные с не всегда оптимальными значениями используемых параметров и изделий.

Стандартизация

<https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/standardization>) - деятельность по установлению правил и характеристик в целях их добровольного многократного использования, направленная на достижение упорядоченности в сферах производства и обращения продукции и повышение конкурентоспособности продукции, работ или услуг. Работы по стандартизации в России осуществляются на основе принятых Федеральных законов: «О техническом регулировании» от 27 декабря 2002 года № 184-ФЗ и «О стандартизации в Российской Федерации» от 29 июня 2015 года № 162-ФЗ.

Модуль оборудования - [33, раздел «Nomenclature»] - расфасованный и доставленный на место (собранный на заводе, установленный на платформу, полозья) комплект оборудования, который включает (но не ограничивается этим), трубопроводы, контрольно-измерительные приборы, органы управления, конструктивные элементы и электрические изделия. Типы модулей включают в себя коробочные модули, модули оборудования, структурные модули, соединительные модули, электрические модули, модули систем управления и модули разъединенной аппаратуры. Эти модули предназначены как к основному производству, так и к неядерному (англ. balance –of –plant- BOP), оборудованию АЭС, включая оборудование для вспомогательных зданий.

Строительный модуль [33, раздел «Nomenclature»] - это свободно стоящая, транспортабельная предварительная сборка основной части установки, системы или подсистемы блока. Строительный модуль может представлять собой предварительную сборку одной системы или ее части, или может содержать элементы всех систем, которые существуют в конкретном месте установки. Строительный модуль может содержать части строительной конструкции. Строительный модуль может быть собран на заводе, отправлен на стационарную площадку, и устанавливается на стационарной площадке (возможно, после незначительной сборки и / или соединения). В прямые затраты на изготовление модулей включаются производственные заводские затраты, в том числе, расходы на эксплуатацию завода, где они производятся.

Степень модуляризации – степень, которая отражает модульную долю в составе работ и оборудования для всего объекта, в ядерном секторе применяется ко всей АЭС. Определяется объемом работ и оборудования, перенесенным в модульное изготовление за пределы площадки (оценки полного модулирования АЭС – до 80% установки). Возможные сценарии модуляризации определяются дизайном конкретной АЭС, эксперты отмечают 4 сценария модуляризации с учетом всех систем и конструкции АЭС. Ограничениями при модуляризации служат как весовые и размерные параметры, важные для транспортировки, так и конструкционные ограничения конкретной установки [53].

Заводские (производственные) затраты первого рода (FOAK) [33, раздел «Nomenclature»] – это первые начальные затраты, лежащие на плечи первого проекта завода по производству модулей, включают разработку производственных спецификаций, заводское оборудование, аппаратуру, запуск, оснастку и настройку заводов, которые будут работать для изготовления специального стационарного (модульного) оборудования. Эти затраты могут быть меньше, если для производства модулей заводского изготовления используются уже существующие заводские мощности. В этих затратах не должны учитываться затраты для производства на заводе модулей для других отраслей промышленности.

Для нового модульного объекта (станции) новый завод по изготовлению модулей оборудования может рассматриваться как стоимость FOAK и входить в стоимость модуля. Если эти затраты должны быть распределены по производственному циклу (или на общее количество модулей (серия), тогда стоимость должна быть оценена на основе выпуска серии производственных объектов. Определяется количество производимых модулей (оборудования) или другой продукции, необходимых для возмещения заводских затрат. Цена производимого модуля определяется себестоимостью единицы продукции завода, в которую включена амортизационная составляющая заводских затрат, распределенная на заданное количество модульных объектов, произведенных в течение прогнозируемого срока производства модулей. В сумме затраты завода, включенные в себестоимость производства модулей, должны амортизировать капитальные затраты завода плюс текущие годовые эксплуатационные затраты завода. Для уже существующего завода предполагается, что в цену производимых модулей включается меньшая доля капитальных затрат (возможна модернизация производственных линий) и справедливая доля других заводских затрат (включая накладные расходы).

Начальные (первые) затраты коммерческой станции [33, раздел «Nomenclature»]. Первая коммерческая станция (модуль) – это первая (типовая) станция (модуль) определенного типа, которая создается с целью коммерческого производства продукции (электроэнергии, тепла,...).

Затраты на создание (изготовление) первой коммерческой станции включают в себя все инженерные работы, оборудование, строительство,

испытания, оснастку и затраты на управление проектом, а также любые другие затраты, повторяющиеся по своей природе. Любые затраты, уникальные для первой коммерческой станции (завода, модуля), которые не будут понесены для последующих станций (заводов, модулей) одинаковой (типовой) конструкции, должны быть определены и выделены как затраты FOAK. Процессы «обучения» для первой станции (завода, модуля) будут отражать первый коммерческий статус и не будут средним значением по серийному числу более поздних станций (заводов, модулей)..

Затраты на первую в своем роде станцию (FOAK станции) [33, раздел «Nomenclature»] – это те затраты, которые необходимы для запуска первой коммерческой станции (изготовления первого заводского модуля) и которые не будут понесены для последующих станций. Примером таких затрат являются затраты на проектирование и сертификацию конструкции (дизайна).

Затраты в N-ую станцию (завод) [33, раздел «Nomenclature»] - стоимость коммерческой N-ой станции (завода) или равнозначной коммерческой станции с идентичным с FOAK дизайном. Стоимость станции NOAK включает в себя все инженерные работы, оборудование, строительство, испытания, оснастку и затраты на управление проектом, а также любые другие расходы, которые носят повторяющийся характер, так же как и те затраты, которые были бы понесены, если бы была построена идентичная станция. Стоимость станции NOAK отражает полезный опыт затрат предыдущих станций (заводов). В настоящее время станция NOAK определяется как следующая после того, как было построено 8,0 ГВт мощности [39]. Однако некоторые американские ядерные аналитики предполагают, что установка NOAK может быть достигнута и раньше (например, ближе к четырем электростанциям).

Overnight Costs - единовременные капитальные затраты - суммарные затраты в проект, включающие статьи затрат, относящиеся непосредственно к работам по изготовлению оборудования для АЭС, транспортировке, строительно-монтажным работам, прочим площадочным работам и накладным расходам в сооружение АЭС, в некоторых странах включена первая топливная загрузка - при этом суммирование затрат выполнено из предположения, что они сделаны единовременно (одномоментно в конкретный год). При оценке полных капитальных затрат (Total capital costs) к затратам Overnight Costs прибавляются затраты, относящиеся к стоимости капитала в период строительства (IDC - interest during construction costs) и эскалация затрат в ходе строительства (escalation costs).

проект – (технический) - выработка окончательных проектных решений по изделию в целом и его составным частям с учётом предъявленных требований и результатов предыдущих стадий проектирования. В более узком смысле под *техническим проектом* понимается совокупность технических документов, которые содержат

окончательные проектные решения по изделию (системе) (ГОСТ 2.103-68 ЕСКД. Стадии разработки. п. 6.).

Проект - «комплекс взаимосвязанных мероприятий, предназначенных для достижения в течение заданного периода времени и при установленном бюджете, поставленных задач с четко определенными целями...»(Мировой банк, "Оперативное руководство" No.2.20).

Приложение 2. Уровни технологической и производственной готовности (TRL / MRL). Уровни рыночной готовности (CRL)

Методические рекомендации по сопоставлению уровня технологического развития - Минэкономразвития 19.09.2017 [44] ([economy.gov.ru>material/file/.../metodic_ta_mrg.pdf](http://economy.gov.ru/material/file/.../metodic_ta_mrg.pdf))

Уровни технологической готовности, TRL (Technology readiness levels)		Уровни производственной готовности, MRL (Manufacturing readiness level)	
TRL1	Исследование базовых концептов Проведение фундаментальных исследований. Начат переход к прикладным исследованиям и разработкам	MRL1	Формирование базовых вводных производства На теоретическом уровне определены базовые производственные концепции. Произведена оценка возможностей в соответствии с требованиями продукта
TRL2	Формулирование концепции технологии Сформулирована технологическая концепция, возможности ее практического применения	MRL2	Определение производственной концепции Определена производственная концепция в соответствии со сферой применения. Проектирование производственной линии.
TRL3	Аналитическая апробация концепции Начаты разработки, включающие аналитические исследования, лабораторные исследования, направленные на физические подтверждения аналитических гипотез по отдельным элементам технологии.	MRL3	Верификация производственной концепции Разработаны экспериментальные производственные процессы. Произведены лабораторные исследования для верификации проектных изысканий (paper studies).
TRL4	Апробация макета в лабораторных условиях Основные технологические компоненты интегрированы с целью проверки, что отдельные составляющие могут работать совместно.	MRL4	Производственный процесс в лабораторных условиях Достигнута возможность изготовления технических средств (демонстрационных образцов) в лабораторных условиях. Определены

			требования к цепочке поставок
TRL5	Апробация компонентов технологии в условиях, приближенных к реальным Основные технологические компоненты интегрированы с подходящими другими («поддерживающими») элементами, и технология может быть испытана в моделируемых условиях.	MRL5	Элементы производственного процесса в естественных условиях Закончена идентификация критически важных компонентов и технологий. Материалы, инструменты, испытательное оборудование, а также компетенции персонала были верифицированы. Стоимостная модель (<i>cost model</i>) была идентифицирована в соответствии с потоком создания стоимости (<i>value stream mapping</i>).
TRL6	. Демонстрация прототипа в условиях, приближенных к реальным Репрезентативная модель или прототип системы, более продвинутые по сравнению с макетами.	MRL6	Производство прототипов систем и подсистем при наличии готовых элементов основного производства Достигнута возможность изготовления прототипа системы при наличии готовых элементов основного производства. Идентифицированы долгосрочные элементы цепочки поставок
TRL7	Демонстрация прототипа в эксплуатационных условиях Прототип отражает планируемую штатную систему или близок к ней	MRL7	Производство систем, подсистем или их компонентов в условиях, приближенным к реальным Достигнута возможность изготовления систем, подсистем или их компонентов в условиях, близких к реальным. Оценена цепочка поставщиков.
TRL8	Верификация технологии Технология проверена на работоспособность в своей конечной форме и в ожидаемых условиях эксплуатации.	MRL8	Испытана пилотная производственная линия Качество производственных процессов доказано. Цепочка поставок создана и является стабильной. Достигнута готовность к началу полносериального производства.
TRL9	Внедрение технологии в производство Фактическое использование технологии в ее конечной форме и в условиях выполнения задачи.	MRL9	Мелкосерийное производство Успешно продемонстрирована возможность мелкосерийного производства, подготовлена база для полномасштабного производства. Обоснована стоимостная модель полносериального производства

		MRL10	Полносерийное производство Налажено полномасштабное производство с участием субподрядчиков. Использование бережливого производства и систем менеджмента качества (СМК).
--	--	--------------	--

Шкалы (описания уровней) TRL/MRL могут быть скорректированы с учетом отраслевой специфики (только при условии, что в сфере деятельности компании общеприняты иные шкалы).

Для каждого уровня должна быть разработана пошаговая инструкция верификации, а также перечень документов, подтверждающих соответствие уровню (как минимум, при определении уровней в компании с государственным участием).

Для технологий, в отношении которых компании не являются разработчиками и не участвуют в процессе разработки, а потребляют их в виде (в составе) готовой продукции (сервисов), возможно использовать упрощенную шкалу для экспертной оценки стадии (уровня) освоения (применения), исходя из фактов приобретения продукции, сервисов, дающих доступ к данным технологиям, в первую очередь применимо для компаний-потребителей инноваций (добыча, электроэнергетика, инфраструктура, логистика и перевозки):

0 - технология не применяется в компании (соответствующая продукция, сервисы не покупаются);

1 - технология находится в стадии пилотного внедрения и апробации (куплены и апробируются пробные партии продукции, сервисы применяются в первый раз, на пилотном объекте);

2 - технология применяется в компании (соответствующая продукция, сервисы закупаются систематически).

Уровни рыночной готовности - уровень готовности к коммерциализации - CRL (Commercialization Readiness Level) [48].

CRL и канва бизнес-модели (business model canvas)

CRL 1

Определено наличие потребности рынка по литературным источникам: тренды, обзоры, конференции, динамика патентования.

Описание

Определен потенциальный заказчик/ наличие потребности рынка: тренды, обзоры, конференции, динамика патентования. Определены основные показатели качества. Проведено рецензирование внешними экспертами. **PAM (Potential Available Market)** –потенциальный объём рынка.

CRL 2

Определены и оценены целевые потребительские сегменты.

Описание

Исходя из проблем заказчика, определены **целевые потребительские сегменты**, в том числе междисциплинарные, и оценен их объем. Определены ключевые компетенции, определяющие ключевые преимущества. Проведено сравнение по критическим параметрам и экономическим оценкам с конкурентами с учетом динамики рынка.

Проведен анализ обзоров рынка, итогов конференций. Получена обратная связь от потенциальных потребителей, в том числе комфортные письма.

Определена целесообразность выполнения проекта.

Оценен **TAM (Total Addressable Market)** –общий объем целевого рынка.

CRL 3

Проведены конкурентный анализ, анализ поставщиков, уточнены характеристики продукта, способы монетизации

Описание

Проведены конкурентный анализ, анализ поставщиков, уточнены характеристики продукта, способы монетизации. Разработана продуктовая стратегия.

Заказчик далее рецензирует предложенное решение. Количественные экономические преимущества для потребителя.

Определен облик конкурента.

Проведены мероприятия по customerdevelopment. Уточнена ниша продукта и уточнена доля рынка по сегментам, включая глобальный рынок.

Рассмотрены варианты и определены "за" и "против".

Определено наличие на рынке компонентов и материалов.

Сделана оценка стоимости владения. Подготовлены материалы в формате представления инвестору.

CRL 4

Уточнены конкуренты, поставщики, модели ценообразования.

Описание

Уточнены конкуренты по секторам, Оценен **SAM (Served/ServiceableAvailableMarket)** –доступный объем рынка;

Уточнены соответственно характеристики продукта, проведена адаптация модели ценообразования. Продуктовая стратегия защищена на уровне компании.

Определены инвесторы и их области инвестирования для контакта на следующем уровне TRL. Определены поставщики критических компонентов, с которыми нужно заключить эксклюзивные соглашения.

CRL 5

Уточнена ценовая политика, выбраны канал продаж, приоритетные поставщики.

Описание

По результатам тестирования экспериментального образца обновлена модель цены и **уточнена ценовая политика. Выбраны канал продаж, приоритетные поставщики**, диверсифицированы каналы поставок компонентов/материалов.

Подготовлены ресурсы для работы с идентифицированными инвесторами.

CRL 6

Уточненные спецификации продукта по каждому целевому сегменту, уточненная бизнес-модель.

Описание

По итогам TRL 5 уточнены спецификации продукта по каждому целевому сегменту, уточнена бизнес-модель.

Разработаны спецификации для каждого потребительского сегмента.

Подготовлены ресурсы для работы с ключевыми лицами

CRL 7

Предварительный вывод на рынок.

Описание

Уточнены конкурирующие продукты на международном рынке и уточнены критические преимущества ПО. Определены бизнес схемы и основные условия сотрудничества. Разработана ценовая политика.

Подготовлен финансовый план, включая финансовые показатели проекта.

Оценен SOM (Serviceable & Obtainable Market)–реально достижимый объём рынка. Осуществлен предварительный вывод на рынок. Проведено тестирование и подтверждение гипотезы о каналах продаж. Выпущены прайс-листы. Подготовлен плана маркетинга. Получены письменные подтверждения заинтересованности от партнера/потенциальных потребителей.

CRL 8

Отработка замечаний заказчиков.

Описание

Проведены пробные продажи в соответствии с маркетинговой стратегией. Отработаны замечания заказчиков по результатам предварительных продаж. Получена обратная связь от пользователей по конкурентным преимуществам. Зафиксированы бизнес-модели продаж. Организована система продаж и сервиса.

CRL 9

Вывод на рынок

Описание

Вывод продукции на рынок. Совершенствование маркетинговой стратегии. Подготовка требований к новой версии продукта. Внедрена система управления качеством (например, ISO 9000).