

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВАЖНЫХ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К ЭКОНОМИКЕ ПРОЕКТОВ АС МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Смирнова Л.С., Королев С.А. (НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия)

Введение

В настоящее время в мире и в России выполняется широкий спектр работ, относящихся к направлению развития и реализации проектов АС малой мощности, который охватывает и включает исследования разных областей данного направления развития ядерной энергетики. Для экономической (коммерческой) реализации проектов АС малой мощности актуальны и важны как исследования вопросов экономики на проектном уровне для каждого отдельного проекта АСММ, так и экономические исследования, охватывающие более широкий круг аспектов и факторов, относящихся к вопросам системного и (или) внешнего характера реализации проектов АС малой мощности.

Многие российские и иностранные эксперты отмечают, что инновационные проекты АС малой мощности в сравнении с проектами больших мощностей АС обладают как определенным количеством потенциальных преимуществ, так и определенным набором неопределенностей при их реализации, а, следовательно, большим количеством рисков и широким спектром задач, требующих решений. Поэтому важно отметить, что прямое экономическое сравнение проектов АС большой мощности и АСММ может не иметь ни логического, ни системного, ни технического смысла в силу ряда принципиальных отличий их практического назначения и ниш рыночной реализации.

В международных исследованиях экономики проектов малых мощностей АС (в международной терминологии SMR – Small Modular Reactors) делается акцент на большое количество факторов, важных для выполнения экономических оценок и существенную неопределенность в исходной информации для выполнения этих оценок. Это можно объяснить тем, что сами проекты находятся на разных стадиях технической и технологической готовности, подготовки промышленной инфраструктуры, а внешние условия для реализации проектов – оценка площадок для размещения, требования к проектам для лицензирования, механизмы финансирования проектов, модели функционирования установок в энергосистемах с учетом требований к режимам работы и обеспечения потребительских нагрузок, сетевого обеспечения, резервирования мощностей, модульно-функционального подхода по размещению блоков на площадке, коммерческих правил работы энергоустановки в условиях энергетических рынков и другие факторы – обладая высокой степенью неопределенности, могут существенно влиять на экономическую эффективность реализации конкретного проекта АСММ.

В докладе предлагается концепция комплексного расширенного экономического подхода, при котором помимо оценки типовых проектных технико-экономических и стоимостных характеристик, обусловленных техническими характеристиками и параметрами проекта энергоустановки, технологической готовностью проекта, промышленной и нормативно-правовой обеспеченностью, рекомендуется для интегральной экономической оценки любого проекта АС на базе ММР, реализуемого в конкретном сценарии (приложении), включать в рассмотрение ряд дополнительных факторов. Факторы могут отражать требования, которые предъявляют к инновационным проектам АСММ регуляторы, операторы (эксплуатирующие организации), заказчики, инвесторы, потребители. В современном экономическом контексте реализация энергетических проектов требует также учета условий и требований энергосистемной, рыночной и коммерческой среды. Новые факторы могут повлиять как на технико-экономические показатели проекта, так и на итоговые показатели экономической эффективности проекта, на экономическую конкурентоспособность проекта АСММ в

условиях конкретного сценария реализации и, соответственно, на критерии востребованности и приемлемости.

Комплексный набор критериев также должен учитывать фактор временной перспективы реализации проекта – текущей, отдаленной во времени, оцененной для всего жизненного цикла (ЖЦ) проекта. В комплексном экономическом подходе важно учитывать не только прямые, но сопряженные факторы и риски реализации проекта – рыночные, нормативно-правовые, финансовые, топливные, работы по обращению с ОЯТ и РАО.

1. Методики и критерии экономической эффективности проекта.

Поскольку одним из критериев конкурентоспособности энергетического проекта является его экономическая эффективность, то в комплексном подходе к оценке экономической эффективности инновационных проектов АСММ важно определить критерии эффективности.

В английском языке есть два слова, определяющих понятие эффективность – *effective* [*ɪ 'fektɪv*] и *efficient* [*ɪ 'fɪ/(ə)nt*], но употребляются данные понятия в разных контекстах и имеют разное смысловое содержание.

Efficient – эффективный, употребляется в смысле как наиболее экономный, более производительный, менее затратный или требующий меньше времени, энергии, денег, ресурсов.

Effective – эффективный, употребляется в смысле результативности, успешности в достижении обозначенных целей, хороших конечных экономических результатов, экономических, материальных или других эффектов.

Употребляя понятие «экономическая эффективность» в определенном контексте следует уточнять смысловой акцент употребления понятия эффективность, а также методы и методики оценки критериев экономической эффективности. **Методики и критерии оценки той или другой эффективности могут отличаться.**

При оценке затрат (интегральных или удельных на единицу производимой продукции) используются затратные экономические методики оценки определенных показателей. При таком подходе оценивается **efficiency – эффективность затрат проекта**. Примером такой методики может служить оценка международно-признанного обобщающего **показателя LCOE**, который представляет собой критерий оценки удельных приведенных затрат на производство электроэнергии. Данный показатель принято рассматривать в качестве определенного критерия для сравнения с другими проектами или при выборе проекта на тендере по затратам, но остается вопрос, в какой мере этот критерий отражает экономическую эффективность энергетического проекта?

Для оценки **результативности, доходности и других эффектов от реализации проекта** выполняется оценка экономической эффективности проекта – **effectiveness** – комплексная затратно-доходная эффективность для выполнения которой выбирается состав критериев, важных для оценки такой эффективности.

При выполнении оценки системы эффектов от реализации проекта используются смешанные затратно-доходные методики. В зарубежной практике наиболее популярны **методика анализа затрат и выгод проекта (Cost Benefit Analysis – CBA)** и **мультикритериальная методика для принятия решений (Multiple-criteria decision-making – MCDM)** или **многокритериальный анализ принятия решений (multiple-criteria decision analysis – MCDA)**. Поскольку подобные методики требуют учитывать более широкий спектр исходных данных для оценки критериев эффективности и сравнительных преимуществ проекта, то выбранные критерии могут быть более разносторонними и отражать широкий спектр характеристик проекта и особенностей его функционирования.

Для оценки эффективности проектов АС малой мощности, работающих в разных сценарных приложениях и рыночных нишах, с особенными условиями режимов работы и

производства продукции, с определенной системой требований к проектам, необходима разработка и применение **специальных методик с заданием широкого спектра исходных данных и определением системы критериев**. Одного показателя LCOE, основанного на исходных данных о затратах технического проекта (капитальных, эксплуатационных) и на предполагаемом максимально-постоянном ежегодном объеме годовой выработки продукции, недостаточно, чтобы получить приближенные к реальности оценки экономической эффективности проекта. Сами исходные проектные стоимостные данные для расчета показателя LCOE получаются, как правило, по разным методикам, например, капитальные затраты могут быть получены по сводно-сметным оценкам, ресурсным оценкам, оценкам по методике TCM NC (Total Cost Management Nuclear Construction) с учетом неопределенностей.

Поэтому, когда для определения преимуществ проекта, сравнения и выбора проекта из множества используется один интегральный показатель, то к нему возникает много вопросов, поскольку он не включает в себя полный набор особенностей и характеристик проекта, позволяющих оценить его сравнительные преимущества по отношению к другим проектам.

Поскольку направление развития проектов АСММ находится на начальной стадии развертывания, то помимо разработки технических проектов важно разрабатывать методики и расчетные модели оценки разной эффективности проектов. Методики оценки экономической эффективности реализации инновационных проектов АС малой мощности должны содержать критерии обоснования комплексной затратно-доходной эффективности проекта с учетом множества сопряженных факторов.

Потребность в **разработке конкурентоспособной модели комплексной оценки проектов АСММ** обусловлена тем, что в современном экономическом сообществе заказчики стремятся получить не только конкурентоспособный технический продукт, но и комплексный экономический анализ создания и функционирования энергоустановки на всем жизненном цикле (ЖЦ) в конкретном приложении на конкретной площадке с учетом пакета требований к энергоустановке со стороны заинтересованных экономических сторон – заказчика, регуляторов, оператора, потребителей, с анализом возможностей выполнения этих дополнительных требований и оценок проекта в новых обозначенных условиях с выполнением анализа затратно-доходной эффективности проекта. Оценка проекта в рамках комплексной экономической модели создаст более реальные предпосылки для заключения контракта с потенциальным заказчиком, а для владельца и оператора проекта появится реальная возможность оценки компенсации своих инвестиционных и операционных затрат.

Поскольку потоки доходов, генерируемые энергетическими активами при реализации продукции проектов, формируются на определенных рынках при задаваемых условиях работы установки в конкретной энергетической и потребительской системах или в энергопромышленном комплексе, поэтому при выполнении экономических оценок важна характеристика рынка работы конкретной энергетической установки, условия, договора и контракты, включающие как обязательства производителя, так и обязательства по формированию потока доходов от потребителей, окупающего затраты, и (или) компенсации затрат при помощи государственной поддержки.

2. Подходы зарубежных экспертов к анализу затрат в проекты SMR.

В странах с развитой ядерной энергетикой в программах развертывания направления ядерной энергетики по реализации проектов АС малой мощности придается большое значение как общим принципиальным положениям, важным и влияющим на экономические результаты развития всего направления, так и технико-экономическим оценкам отдельных проектов SMR. Экономические и финансовые аспекты характеризуются в аргументации разных экспертов как ключевые наравне с вопросами безопасности и востребованности проектов, поэтому западные исследователи при оценке

затрат в проекты рассматривают множество факторов, которые потенциально смогут снизить затраты и увеличить доходность проектов. Многие специфические факторы, важные для анализа экономики проектов SMR, более глубоко изучены и представлены в зарубежных публикациях [17–28]. В российских публикациях вопросы специфики экономики проектов АСММ мало исследованы, поэтому представленный в данном докладе материал базируется в большей степени на содержании зарубежных публикаций и отчетов международных групп, а также на аналитических исследованиях, выполненных в НИЦ «Курчатовский институт» и относящихся к вопросам специфики экономики проектов АСММ [1, 2, 3].

С точки зрения эффективной экономической реализации программ масштабного развертывания инновационных проектов АС малой мощности, иностранными экспертами отмечаются **важные ключевые аспекты, требующие анализа и подготовительной работы**. В качестве примера можно взять положения из документа США [4], в котором эксперты отмечают:

1. Важность анализа приемлемых зон и ниш рынка для реализации проектов SMR – формирование парка проектов с разным назначением и оптимальной мощностью для выбранных зон и сценариев реализации.

2. Необходимость серийного промышленного масштабного производства модулей для проектов SMR, а для этого – развитие модульного проектирования, подготовку производственных мощностей для изготовления модулей, промышленной стандартизации, технологий логистики и транспортировки оборудования и модулей, новых технологий сооружения модульных объектов.

3. Важность формирования требований к проектам АС малой мощности при высоком уровне зрелости проектов конкретной технологии, подготовки эффективных моделей сертификации модулей и лицензирования проектов АСММ в национальных системах регулирования в согласовании с международными требованиями и стандартами.

Предварительные исследования в данных направлениях были также выполнены Канадскими рабочими группами [5–9]:

- Промышленно-технологическая рабочая группа [6];
- Рабочая группа по экономике и финансированию [7];
- Рабочая группа по взаимодействию с коренными народами и общественностью [8].
- Рабочая группа по нормативной готовности [9].

В течение 2020–2022 гг. в НИЦ «Курчатовский институт» были выполнены аналитические обзорные исследования, в определенном объеме затрагивающие вопросы пунктов 1, 2 и 3 [1, 2, 3]. В работах представлен обзор материалов экспертов, оценивающих влияние разнообразных факторов на экономические оценки проектов АС малой мощности. Интеграция и анализ того, что уже сделано в данном направлении другими авторами, позволяет учитывать и развивать комплексный подход к задаче исследования экономики проектов АСММ российского дизайна.

В обзорных исследованиях отражены важные аспекты и факторы, на которые делают акценты зарубежные исследователи в целях анализа степени влияния этих факторов на экономические оценки новых проектов SMR, прежде всего, влияние на снижение капитальных затрат проекта, поскольку капитальная составляющая затрат проектов АС всегда была острой проблемой как с точки зрения привлечения инвестиций в проект, так и с точки зрения окупаемости капитальных затрат.

Помимо проектных экономических оценок эксперты выделяют определенные внешние факторы, требующие внимания с точки зрения работы проектов АСММ в разных энергетических системах и рыночных нишах, вопросы регуляторного характера и вопросы финансово-экономических инструментов реализации проектов. Предполагается, что комплексная экономическая оценка должна включать не только количественный стоимостной анализ непосредственно проекта, но и рассмотрение качественных факторов,

в том числе таких, как целесообразность, обоснованность, востребованность, приемлемость.

Кратко можно обозначить следующие актуальные направления исследований, которые рассматриваются зарубежными исследователями в целях комплексного экономического подхода к развитию направления проектов SMR:

- 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 АС 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 АС модульной концепции);
- сценарии реализации проектов АС 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 – аккумулирование тепла, электроэнергии, совместная работа с энергоисточниками на базе ВИЭ;
- степень готовности технологий и проектов – TRL/MRL/CRL
- экономика серийности: LEAD-проект, FOAK-NOAK модули и проекты, положительные эффекты экономики серийности при модульном подходе;
- этапы жизненного цикла проектов – анализ эксплуатационных затрат и доходов, вопросы топливного цикла – СЯТ, ОЯТ, РАО, вывод из эксплуатации,
- инвестиционные и финансовые методы реализации проектов SMR, потенциальные организационные и финансовые механизмы, государственная или бизнес-поддержка.
- множественность уровней экономического анализа – проектный, энергосистемный, макроэкономический.

2.1. Энергосистемные вопросы.

Энергосистемные вопросы функционирования АС постоянно обсуждаются на симпозиумах, отражаются в материалах МАГАТЭ и OECD [10–14]. МАГАТЭ в своих документах уделяет большое внимание вопросам инфраструктуры работы АС в связи с разработкой инновационных проектов АС и в связи с проявлением интереса к проектам атомной энергетики стран-новичков. Документ МАГАТЭ [13] подчеркивает важность сетевого аспекта.

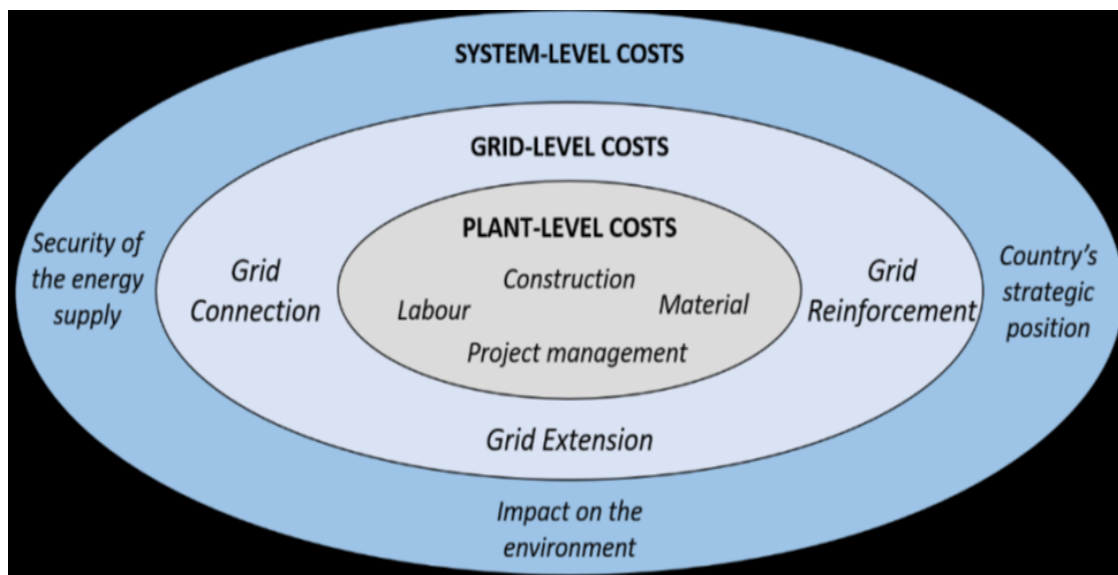


Рис.1. Затраты на производство в привязке к уровню станции, к сетевой инфраструктуре и общесистемному уровню (Plant Level – Grid Level – Total System Costs). Рисунок адаптирован из [11, 18].

Plant- Level Costs - Затраты на станционном уровне: непосредственно затраты на строительство, эксплуатацию, вывод из эксплуатации – затраты на всем жизненном цикле (ЖЦ).

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).

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 региона, определенная энергетическая политика страны, модели рынка страны и др.

Специфика работы малых и средних мощностей любых энерготехнологий определяется **техническими требованиями к проектам по интеграции объекта генерации в конкретную энергосистему:**

- в единую энергосистему с налаженными сетевыми связями между генерирующими мощностями и диспетчеризацией работы всей системы;
- в региональную (изолированную) или в локальную энергосистему - в концепции распределенной генерации (англ. distributed generation), т.е. генерации, приближенной к потребителю.

2.1.1. Требование приближенности генерирующих установок к потребителю.

Формирует определенные требования к ядерным энергоустановкам малой мощности с точки зрения безопасности и надежности применения таких проектов в определенных прикладных приложениях. То есть, критерий приемлемости может потребовать дополнительных проектных затрат с точки зрения обоснования безопасности проекта и его территориальной близости к потребителю. Границы площадки АС и расстояние до потребителей должны быть обоснованы при соблюдении нормативных требований по безопасности для АСММ и при анализе проектных особенностей, относящихся к вопросам безопасности. **С экономической точки зрения** расстояние и

транспортировка электроэнергии и тепла от ядерной энергоустановки к потребителям – важная составляющая в оценке экономических затрат и конечной стоимости продукции для потребителя.

2.1.2. Требование к режимам работы.

Включает возможность работы АСММ в маневренных режимах с отслеживанием графика потребительской нагрузки (суточной, недельной, сезонной). Поскольку маневренные режимы различают на *предварительно заданное слежение за нагрузкой* и *динамическое слежение за нагрузкой*, то требования к работе проектов АС на базе SMR в локальных или изолированных энергосистемах должны быть четко обозначены [15, 16]. Зарубежные эксперты отмечают, что возможность работы в маневренных режимах проектов АСММ с технической точки зрения важна и необходима, а с экономической точки зрения – не всегда эффективна из-за недоиспользования дорогой мощности и снижения доходов от продажи продукции. Поэтому **в экономическом анализе** иностранные эксперты рассматривают варианты работы энергоустановки с любой когенерацией, включая аккумулятирование электроэнергии или тепла, чтобы улучшить показатели экономической затратно-доходной эффективности проекта АСММ.

2.1.3. Величина мощности

Работа энергоустановок малой мощности рассматривается, как правило, для небольших энергосистем – изолированных или частично изолированных. В таких системах, как правило, действуют определенные технические и технологические требования к параметрам и режимам работы энергоустановок, позволяющие в границах 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. Размер конкретной энергосистемы, сетевые связи в энергосистеме, спектр мощностей, работающих в разных зонах графика потребительской нагрузки, сами потребительские нагрузки, резервы мощностей - все это может определять требования к размеру мощности встраиваемой в систему энергоустановки. В целях обеспечения надежности работы энергосистемы согласно экспертным мнениям [17], в изолированных энергосистемах электрические сети не должны подвергаться колебаниям мощности, превышающим 10 % от общей мощности сети, поэтому мощность энергоустановки не должна превышать 10%-ной границы мощности сети.

2.2. Концепция модуляризации.

В контексте развития направления АС на базе реакторов малой мощности, в части практической реализации проектов АС, 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 модульной концепции реализации проектов АС.

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 [18, 19].

В модульном подходе реализуется подход обязательной сертификации проекта модуля реактора перед промышленным изготовлением, при промышленном производстве изготавливаются стандартизированные модули. Сертификация блок-модуля реактора позволяет выполнять многократное изготовление модулей реактора в промышленных условиях для серийного производства, тем самым уменьшая определенный объем работ из-за отсутствия повторной сертификации блок-модуля, сокращая время и ресурсы для выполнения работ на этапе лицензирования.

Для реализации модульного подхода потребуется создание определенной инновационной промышленной инфраструктуры, проектно-конструкторских разработок для дальнейшего промышленного изготовления модулей оборудования и систем АС, их транспортировки, сборки и установки на площадке.

При переходе на модульный принцип сооружения АС меняются подходы и методы выполнения многих работ на разных этапах реализации проекта. 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. Поскольку концепция модульности изначально закладывается в систему проектирования АС и в саму модульную архитектуру блока АС, то важны работы по оптимизации интерфейсов между модулями в целях дальнейшей стандартизации и унификации при изготовлении на заводе, работы по обоснованию методов сборки, монтажа и строительства, по обоснованию безопасности всех проектно-конструкторских и компоновочных решений в модульном исполнении.

Вопросы транспортировки для концепции модульных АС, как констатируют эксперты [19], являются не менее важными, чем промышленное изготовление модулей, поскольку при масштабном росте промышленного производства модулей потребуется 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).

С транспортировкой на площадку модулей для АС связаны вопросы управления и координации работ на площадке и логистики при доставке модулей к месту сооружения АС, особенно, если производство модульного оборудования находится не в стране-заказчике и требует определенного времени на доставку.

Если промышленное производство модулей, как констатируют эксперты [19], 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. То есть, с точки зрения экономических аспектов, транспортировка от места локализации изготовления крупного модуля к месту установки – операция затратная.

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

Чтобы АС на базе SMR стала конкурентоспособной в стоимостных оценках с блоками большой мощности, западные эксперты оценивают специфические факторы, характерные для проектов SMR и могущие иметь определенное положительное влияние для улучшения показателя капитальных затрат в проект. Эксперты отмечают несколько таких факторов. Но при этом важно сказать, что оценки зависят от того, какой по счету блок оценивается: прототип – **LEAD** – станция, первая в промышленной серии – **FOAK** – станция, N-я в промышленной серии – **NOAK** – станция.

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 [20, 21, 22, 23], поскольку в затраты FOAK станции **включены** 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.

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 11500 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) [24, 25].

Определение номера NOAK станции SMR связывают с Learning – фактором (фактором обучения). Предполагается [26], что кривая обучения достигает плоской тенденции после первых 8–10 единиц блоков при сооружении объектов одной и той же компанией (командой).

В работах [25, 27] выполнены оценки влияния некоторых экономических и финансовых факторов, могущих изменить экономику единовременных капитальных затрат (Overnight costs) в зависимости от масштаба мощности АС при размещении на площадке нескольких модулей SMR. Суммарная мощность АС на базе SMR, равная 1000 МВт(э), позволяет привести в равенство затраты в АС SMR с затратами в блок большой мощности.

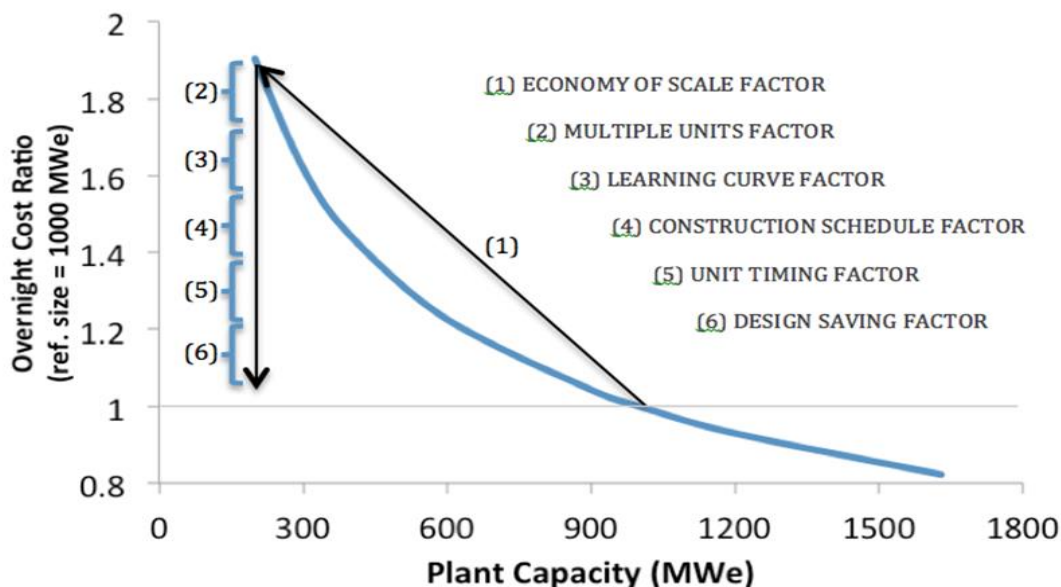


Рис. 2. Влияние разных факторов на снижение капитальных затрат в SMR (рисунок адаптирован для данного исследования из [25,27])

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%.

В работах [25, 27] 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. 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 АС.

Одним из факторов, который оценивается как существенный при выполнении экономических оценок проектов АС на базе SMR в условиях серийного производства модулей и оборудования для сооружения мульти-модульных АС, 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.

Важным критическим параметром при строительстве АС являются сроки строительства. 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.

2.2.2. Положительные эффекты и проблемные зоны для практической реализации проектов АС на базе модульного принципа изготовления оборудования и сооружения АС

Существует множество исследований и публикаций, относящихся к преимуществам и недостаткам (или проблемам) модульных проектов в сфере разных отраслей. Поскольку не построено ни одной АС на базе SMR, 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 [20, 22], могут относиться, прежде всего, к таким проблемным экономическим зонам при сооружении больших АС, 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 счет оптимизации проектов блока SMR модульного проектирования, внедрения модульных принципов изготовления оборудования и строительства

Потенциально 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.

Задача исследования модульности в применении к проектам АС 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.

Среди проблемных зон и рисков модульной концепции АС на базе SMR эксперты отмечают в качестве главного на современном этапе – это отсутствие эмпирических данных, так как не было произведено ни одного малого модульного реактора и не построено ни одной АС на базе SMR [20]. В принципе, в настоящее время можно говорить только о потенциальных рисках проектов SMR на основе практик модульных проектов других отраслей. Перечисляются следующие риски модульных проектов [20]:

- 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 опасности проекта, обусловленную высоким качеством заводского изготовления.

2.3. Ядерные отходы от малых модульных реакторов

Иностранные исследователи отмечают [28], что наряду с рядом положительных сторон проектов SMR, а именно, предполагаемых преимуществ в стоимости и безопасности по сравнению с существующими легководными реакторами большой мощности, существуют вопросы, которые замалчиваются, но требуют серьезного анализа – это вопросы, относящиеся к конечному этапу ядерного топливного цикла и возможному увеличению объемов отходов от проектов малой мощности. Эксперты отмечают, что разработчики проектов обещают, что технологии и проекты SMR позволят снизить

защищенность и бремя отходов в сравнении с более крупными атомными электростанциями, то есть современные реакторы будут генерировать меньше отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и высокоактивных отходов (ВАО). Иностранные исследователи проанализировали только три из десятков предложенных конструкций SMR: проект с легководной технологией NuScale, проекты с технологиями охлаждения натрием и расплавленной солью. В методологию анализа заложены основные принципы физики реактора, относящиеся к оценке воздействия проектов SMR на объемы, состав отходов и другие показатели обращения с ядерными отходами и их утилизации.

Анализ трех различных конструкций SMR показал, что по сравнению с PWR гигаваттного масштаба анализируемые реакторы увеличат **эквивалентные по выработанной энергии объемы ОЯТ, долгоживущих LILW (low and intermediate level waste) и короткоживущих LILW в 5,5, 30 и 35 раз**, соответственно. Эти выводы контрастируют с преимуществами сокращения отходов, о которых заявляют сторонники передовых ядерных технологий.

Выводы исследователей заключаются в том, что учитывая, что SMR могут быть несовместимы с существующими технологиями и концепциями удаления ядерных отходов, большинство конструкций SMR влекут за собой значительный объем работ по удалению ядерных отходов. Большие объемы отходов SMR должны быть обработаны, кондиционированы и надлежащим образом упакованы перед геологической утилизацией. Эти процессы приведут к значительным затратам.

3. Оптимизация регулировочных процессов для реализации концепции АС на базе малых модульных реакторов.

С программами внедрения новых технологий и с формированием мер по их реализации тесно связана подготовка схем развертывания конкретных технологий (*англ. the deployment scheme*). Акценты в иностранных материалах на **схемы развертывания направления SMR** затрагивают множество вопросов, включающих, в том числе, ключевые требования к проектам или **требования высокого уровня** (*англ. high-level requirements – HLRs*), которые, в свою очередь, имеют разный характер. Как правило, это общие требования, в том числе технические, которые могут указывать на конкретные функции или функциональные возможности объекта, требования по безопасности и общественной приемлемости, степени экологической чистоты технологии, требования по экономической целесообразности, другие требования.

Одним из таких требований высокого уровня к инновационным проектам ЯЭ является **существование в национальной системе регулирования оптимизированной модели лицензирования проектов АС на базе SMR**. Данное требование должно быть реализовано как в стране разработчика проекта, так и в стране заказчика проекта. Требования высокого уровня предполагают дальнейшую более детальную конкретизацию и техническую реализацию мероприятий по их выполнению.

Для инновационных проектов ядерной энергетики отсутствие подготовленной нормативно-правовой и регулирующей базы может стать серьезной проблемой для их экономической реализации как в стране – разработчике проекта, так и в стране – заказчике проекта.

Наиболее важной особенностью проектов SMR с точки зрения лицензирования, на которой делают акцент западные эксперты, является модульность конструкции. Модульность позволяет формировать проекты многомодульной конструкции SMR, что создает новые проблемы при обосновании безопасности таких проектов на стадиях проектирования, сооружения и эксплуатации, а также определенные сложности в процессах лицензирования.

Задача по формированию эффективного процесса лицензирования проектов АС на базе SMR важна для ядерно-энергетической отрасли, поскольку **лицензирование относится к одному из основных финансовых рисков для проектов строительства**

новых АС и к важному фактору конкурентоспособности и готовности проекта к экономической реализации.

Как отмечают эксперты [18], процесс лицензирования (LP – licensing process) является ключевым вопросом для развертывания SMR, поскольку одной из целей достижения экономической эффективности проектов SMR является обеспечение более короткого срока сооружения. Если не оптимизировать процесс лицензирования проектов АС с SMR, то, как утверждают эксперты [18], время лицензионного процесса может превышать время графика строительства SMR, потому что «новизна технологии проектирования, новые требования по безопасности в отношении АС малой мощности, отсутствие опытной и, возможно, конкретной нормативной базы, множество вовлеченных учреждений, различные бюрократические процедуры, а также многие нормативные требования конкретной страны, могут привести к задержкам выхода на рынки проектов АС на базе SMR».

Для формирования оптимизированной системы лицензирования на национальном уровне регуляторы, проектанты и операторы (эксплуатирующие организации) должны работать вместе уже на ранних стадиях реализации проектов, причем работа должна быть открытой и информационно прозрачной. Совместная работа при формировании регулирующей нормативной среды для SMR поможет для сокращения в дальнейшем как сроков лицензирования проектов, так и сроков сооружения.

Эксперты отмечают, что предварительный анализ систем национального лицензирования демонстрирует наилучшую готовность и, возможно, наименьшую корректировку отдельных зон систем лицензирования **для проектов легководной реакторной технологии**, что позволяет сосредоточиться, **в первую очередь, на развертывании проектов SMR легководной технологии**. С учетом прохождения этапа развертывания легководных SMR и подготовкой эффективной системы лицензирования для них, полученный опыт и практика помогут для развертывания проектов SMR других ядерных технологий.

4. Сценарный анализ.

Прикладной характер развития и реализации проектов АС малой мощности предполагает рассмотрение потенциальных сценариев и рыночных ниш работы энергоустановок АС малой мощности в разных системах – энергетических или энергопромышленных, как на территории РФ, так и на территории иностранных государств. Анализ внешних систем, где проекты АС на базе SMR могут быть потенциально востребованы и работать с потенциальной экономической эффективностью должен учитывать не только технические системы, но и географические, страновые, коммерческие системы, а также экологические и общие энерготехнологические тренды.

Развитие зарубежных проектов АС на базе SMR идет в направлении от исследования рынка потребностей, наличия производственных мощностей и оценки технологической готовности проектов к выбору и принятию решений в отношении **требуемых параметров и характеристик энергоустановок**, потенциально могущих работать на «нишевых» энергетических рынках [29, 30]. Исследование рыночных ниш и потенциальных потребностей предопределяет эффективное использование мощности и экономическую целесообразность реализации проекта АС на базе SMR на конкретной площадке с конкретными целями. Отдельным срезом для рыночного исследования является анализ **мощностного спектра разных установок** с точки зрения востребованности конкретной мощности на площадке при работе в конкретной рыночной и территориальной нише.

Анализ всего спектра возможных сценариев-приложений для разных проектов АС на базе SMR во внешних электрических и неэлектрических энергосистемах или в энергопромышленных комплексах – важная и объемная **прогнозно-стратегическая задача**, включающая анализ экономического развития региона или страны. **Оценка**

экономических эффектов от реализации потенциальных проектов АС на базе SMR требует полного объема данных в отношении параметров и характеристик проектов АС и в отношении территориальных и сценарных условий работы энергоустановок.

Заключение

Зарубежные исследователи заинтересованы в развитии нового направления ЯЭ, связанного с реализацией проектов АС на базе SMR, поэтому исследователями анализируются все факторы – технические, технологические, системные, регулирующие, финансовые, оцениваются риски, связанные с проектом, анализируется наилучшая мощность реактора и другие факторы, которые могут повлиять на экономику проектов, привлечение инвестиций и коммерческую реализацию.

Вопросы экономики любого проекта, особенно проектов инновационных АС на базе SMR, не могут рассматриваться упрощенно на базе упрощенных методов и практик. Развитие новых технологий требует развития новых методов экономического анализа с учетом множества факторов, сопутствующих этим проектам и отражающих их специфику. Дополнительные факторы важны как с точки зрения реальной экономики конкретного проекта, так и с точки зрения формирования требований к техническому проекту со стороны заказчиков, регуляторов и энергосистем.

Задачей более полного экономического анализа проектов является выполнение оценок в границах затратно-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) [29].

В более комплексных методах экономического анализа **сбалансированный набор итоговых технических и экономических показателей** послужит 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 инвестиций, рынком потребностей в мощностях и энергетической продукции, с промышленно-производственным рынком, рынком потребителей продукции. Без учета механизмов и условий возврата крупных инвестиций, правил и условий рынка (для коммерческих проектов) и (или) объемов государственной поддержки, интересы заказчиков и инвесторов проектов могут быть не учтены.

Разработка расчетного инструмента экономического анализа инновационных проектов АС, включающего множество дополнительных факторов, а не только технико-экономические оценки проектов реакторов и блоков АС, позволит дополнить анализ эффективности проекта при работе в разных сценарных условиях, на разных площадках и оценить степень влияния этих факторов на реальную экономику проекта.

Акценты на проблемы и информационная прозрачность во взаимодействиях участников работ по развитию направления АСММ позволит на предварительных проектных стадиях снизить несистемные отраслевые управляемые риски и улучшить экономическую эффективность и конкурентоспособность проектов АСММ.

Список литературы

1. Демин В. Ф., Смирнова Л. С., Голосная А. А. НИЦ «Курчатовский институт». Основные положения, современное состояние, особенности практической реализации проектов модульных АЭС на базе реакторов малой мощности с акцентами на вопросы экономики. 2020 год PREPRINTS.RU. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112107>
2. Смирнова Л. С., Королев С. А. НИЦ «Курчатовский институт». Систематизация и характерные особенности потенциальных сценариев работы проектов АС малой и средней

мощности в региональных энергетических системах и в комплексных производственных системах с акцентами на вопросы экономического анализа сценариев работы энергоустановок. 2022 год. PREPRINTS.RU. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112401>.

3. Смирнова Л. С. 2023. Важность исследования требований к инновационным проектам АС на базе малых модульных реакторов в контексте формирования мировых энергетических стратегий и национальных программ энергетического развития. PREPRINTS.RU. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112761>

4. Richard L. Black. Licensing of small modular reactors (SMRs). Handbook of Small Modular Nuclear Reactors (Second Edition), 2021

<https://www.sciencedirect.com/book/9780128239162/handbook-of-small-modular-reactors>.

5. A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors. Ottawa, Ontario, Canada. Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee. November 2018. https://smrroadmap.ca/wp-content/uploads/2018/11/SMRroadmap_EN_nov6_Web-1.pdf?x64773.

6. Technology Working Group Report. Canadian SMR Roadmap. October 26, 2018.

7. Economic and Finance Working Group Report. Canadian SMR Roadmap. 2018.

8. Indigenous and Public Engagement Working Group – Revised Recommendations August 17, 2018.

9. Canadian SMR Roadmap. Regulatory Readiness Working Group. Final Report. August 1, 2018.

10. Electric Grid Reliability and Interface with Nuclear Power Plants, Technical Reports, Nuclear Energy Series, No. NG-T-3.8, IAEA, VIENNA, 2012.

11. Nuclear Energy and Renewables: System Effects in Low-carbon Electricity Systems. OECD, 2012.

12. Technical Meeting on Electric Grid Reliability and Resilience in relation to Nuclear Power Plants, IAEA, 15–17 October 2019.

13. Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power (IAEA Nuclear Energy Series No. NG-G-3.1, Rev.1), VIENNA, 2015.

14. Симпозиум по экономическим аспектам включения АЭС в энергосистемы. Журнал «Атомная энергия», Т. 30 Вып.4, апрель 1971, стр.404–405.

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

16. Load following by cogeneration: options for small modular reactors, GEN IV reactors and traditional large plants. Giorgio Locatelli, Sara Boarin, Andrea Fiordaliso, Marco Ricotti. Proceedings of the 2017 25th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE25), July 2–6, 2017, Shanghai, China, ICONE25-67180.

17. 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.

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

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. Sara Boarin, Marco E. Ricotti, Construction delays and extra-costs on large and small nuclear projects. International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems, May 26-30, 2013, Madrid, Spain.

26. Report on manufacturability, supply chain management and commissioning of Small Modular Reactors, Interim report, Small Modular Reactors Regulators' Forum, IAEA, December 2019.

27. 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.

28. Lindsay M. Kralla, Allison M. Macfarlane, Rodney C. Ewing. University of Pennsylvania, Philadelphia, Nuclear waste from small modular reactors. PNAS 2022 Vol. 119 No. 23. <https://doi.org/10.1073/pnas.2111833119>.

29. Carlsson, Johan & Shropshire, David E. & van Heek, Alike & Fütterer, Michael A., 2012. Economic viability of small nuclear reactors in future European cogeneration markets. [Energy Policy](#), Elsevier, vol. 43(C), pages 396-406. Handle: RePEc:eee:enepol:v:43:y:2012:i:c:p:396-406 DOI: 10.1016/j.enpol.2012.01.020

30. The development of small modular reactors: Which markets for which applications? Michel Berthelemy, Martin Leurent, CEA/DAS/Itésé UPSaclay, Giorgio Locatelli, Université de LEEDS. Automne 2016 Numéro 29 La lettre de l'Itésé.