

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИИ

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF SMALL AND MEDIUM-SIZED NUCLEAR POWER PLANTS FOR USE IN THE ARCTIC ZONE OF RUSSIA

**A. Gorbenko
E. Mironov**

Summary. The article provides an overview of current trends in the development of small reactor and modular power plant technologies in the nuclear industry. The features and specifics of the development of isolated electric power systems in the Arctic zone of Russia are investigated. A review and analytical study of the prospects for the development of low-power nuclear power plants in the world is presented. Approaches to estimating the cost of electricity generated by SMRs have been studied. The advantages and disadvantages of using low-power nuclear power plants in hard-to-reach isolated areas of the Arctic zone of Russia are highlighted. It is concluded that there is a need for scientific justification of the use of low-power nuclear power plants in the conditions of use in hard-to-reach isolated areas of the Arctic zone of Russia.

Keywords: nuclear industry, small/medium-sized nuclear power plants, Arctic zone of Russia, sustainable economic development.

Горбенко Анна Владимировна

*К.э.н, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва
gorbenko8691@mail.ru*

Мионов Эдуард Валерьевич

*Аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва
MironovEV@mpei.ru*

Аннотация. В статье приводится обзор современных тенденций развития технологий малых реакторов и модульных электростанций в атомной отрасли. Исследованы особенности и специфика развития изолированных электроэнергетических систем в Арктической зоне России. Представлено обзорно-аналитическое исследование перспектив развития атомных станций малой мощности в мире. Изучены подходы к оценке стоимости вырабатываемой АСММ электроэнергии. Выделены преимущества и недостатки использования атомных станций малой мощности в труднодоступных изолированных районах Арктической зоны России. Сделан вывод о необходимости научного обоснования применения атомных станций малой мощности в условиях использования в труднодоступных изолированных районах Арктической зоны России.

Ключевые слова: атомная отрасль, атомные станции малой/средней мощности, арктическая зона России, устойчивое экономическое развитие.

В последние годы решение задач ядерной энергетики привело к стремительному развитию технологий малых реакторов и модульных электростанций. Ключевыми проблемами таких технологий являются необходимость создания систем транспортировки малых реакторов и топлива для них, исключение физических рисков и обеспечение кибербезопасности для удаленного и полуавтономного применения.

Назначение малых реакторов принципиально отличается от традиционных технологий АЭС большой мощности. Вместо работы в общей сети и обеспечения базисной части графика нагрузки, реакторы небольшой мощности должны обеспечивать все (или большинство) потребностей непосредственных потребителей энергетических услуг локальных или изолированных электроэнергетических систем [1].

В России современные тренды низкоуглеродной энергетики находят своевременное отражение в актах государственного управления — от концептуальных

документов до конкретных поручений «Росатому». Госкорпорации предписано скорейшее развитие атомных станций малой/средней мощности (АС М/С М).

Генерация на значительной части территории России в настоящее время представляет собой изолированные электроэнергетические системы, которые обеспечиваются привозным топливом. Существующая структура потребления топлива и его логистика снижают эффективность развития данных территорий вследствие высоких затрат на «северный завоз» и логистические риски. Развитие Арктической зоны России сдерживается из-за отсутствия надежных автономных энергетических источников средней и малой мощности. Они должны быть независимы от подвоза топлива, не связаны с длительным циклом строительства, обеспечивать энергопотребление промышленности, зданий и транспорта, избегать встраивания в стареющую сетевую инфраструктуру, и отвечать жестким требованиям природоохранного законодательства.

Особый синергетический эффект вызовет интеграция малых атомных станций в инфраструктуру Северного морского пути, территорий Арктики от Кольского полуострова до Камчатского полуострова, ряда депрессивных территорий страны. По данным НИЦ «Курчатовский институт», выявленная в 2011 году в России потенциальная потребность перспективных площадок для АС М/С М составляет 20 ГВт [2].

Так, например, для энергоснабжения Баимского ГОК требуется до 350 МВт новой генерации. На основе предложенных двух схем ПАТЭС («Росатом») утвержден атомный проект, использующий 100 % российских технологий с большим сроком эксплуатации. Еще одним плюсом проекта является низкая стоимость топлива. Стоимость топливной составляющей для угольных и газовых станций в этом регионе достигает 70–80 %, в то время как для АЭС она не превышает 3 %. Еще одним примером использования малых АЭС является замена морально устаревших объектов генерации в поселке Усть-Куйга Усть-Янского района Республики Саха (Якутия). Это позволит в разы снизить тариф на электроэнергию для населения и горнорудной промышленности района.

Применение технологий АС М/С М для расширения ресурсной базы углеводородного сырья позволит обеспечить освоение трудноизвлекаемых и недоступных ресурсов, экономить 15 % газа, используемого на собственные нужды газопроводов и 30 % — на производство СПГ, повысить экологичность и глубину переработки углеводородного сырья [3].

Пилотные интегрированные проекты представляют собой технологические кластеры под одной крышей с гарантированной пожизненной занятостью населения. Они ориентированы на получение пресной воды, водорода или синтетического топлива, энергоснабжения производств строительных материалов, промышленных агро- и мореферм в районах с неблагоприятными для сельского хозяйства климатическими условиями, комплексов длительного хранения продуктов, переработки мусора и других применений радиационных технологий.

Малые модульные реакторы (MMP, SMR) определяются как ядерные реакторы, как правило, мощностью 300 МВт или менее. Разработки последних лет можно классифицировать по 4-м основным типам реакторов: легководные реакторы, реакторы на быстрых нейтронах, высокотемпературные реакторы с графитовым замедлителем и различные виды жидкосолевых реакторов (MSR). В 2020 году МАГАТЭ опубликовало обзор новейших разработок технологий малых модульных реакторов, где представлены материалы по 72 проектам реакторов для АСММ [4, 5, 6, 7].

Наибольшее количество разрабатываемых проектов MMP принадлежит США и России. На основании отчёта Всемирной ядерной ассоциации (World Nuclear Association, WNA) по состоянию на июль 2023 года [8] в мире уже работает 5 типов реакторов малой мощности. Это разработанные во второй половине XX века китайский CNP-300, индийский IPHWR-220 и российский ЭГП-6, а также современные российские КЛТ-40С (установленные на плавучая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС) проекта 20870 «Академик Ломоносов») и РИТМ-200 (установленные на атомные ледоколы проекта 22220). В стадии строительства находятся 4 проекта реакторов: российский БРЕСТ-ОД-300, аргентинский CAREM-25, китайские HTR-PM и ACP100/Linglong One. В разработке на различных стадиях ещё 38 проектов, в том числе 5 российских.

Основной вызов для АСММ — это затраты на производство 1 МВт-час энергии в сравнении с другими источниками. В Отчете о состоянии мировой атомной промышленности (The World Nuclear Industry Status Report) [9] вместе с описанием текущей ситуации по разработке и строительству АСММ приводятся сравнительные цифры: 105–135 долларов США за 1 МВт-час электроэнергии, выработанной американскими проектами АСММ против 25–32 долларов США за 1 МВт-час электроэнергии, выработанной ветряной генерацией и 32–37 долларов США — солнечной генерацией в США. Австралийское Государственное объединение научных и прикладных исследований оценило генерацию 1 МВт-час посредством АСММ в 92–220 долларов США.

Другой подход в оценке стоимости вырабатываемой АСММ электроэнергии указывает IDTechEx. Используя показатель Нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) были выделены основные составляющие затрат: операционные, капитальные и финансовые. При генерации электроэнергии посредством АЭС значительную составляющую имеют капитальные затраты, операционные и финансовые во много раз меньше. При генерации посредством АСММ составляющая капитальных затрат лишь немногим меньше операционных. Снижение капитальных затрат возможно посредством предварительной сборки реакторных систем перед транспортировкой на заводе, меньшими размерами самой станции и сниженными затратами на обучение обслуживающего персонала. При этом значительно больший срок возведения АЭС и больший объём инвестиций приводит к увеличенным затратам на капитал и сравнительно большим финансовым расходам. По данным аналитиков из IDTechEx весомым аргументом в пользу АСММ можно считать снижение капитальных затрат, доступ к более дешёвым деньгам и больший инвестиционный потенциал.

АСММ могут использоваться:

- для теплоэлектроснабжения удалённых территорий и выработки тепловой энергии для нужд металлургии химической и нефтехимической промышленности
- для замещения (реновации) устаревшей генерации (например, угольной), в том числе на время технологических простоев
- для замещения централизованных блоков большой единичной мощности несколькими модульными энергоблоками малой мощности, в том числе для распределённой генерации (расположение на нескольких площадках в пределах одной энергосистемы)
- для опреснения морской воды, для медицины (терапии раковых заболеваний)

К основным преимуществам АСММ в сравнении с классическими АЭС можно выделить:

- снижение стоимости и сроков строительства за счёт более высокой степени заводского изготовления, эффекта серийности и уменьшения строительных работ на площадке, в том числе за счёт подземного или заглублённого размещения;
- возможное снижение нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) по сравнению с АЭС с реакторами большой единичной мощности за счёт снижения капитальных (как на ввод в эксплуатацию, так и на вывод при концепции доставки модулей на завод-изготовитель для утилизации) и финансовых затрат (снижение срока пользования деньгами до момента выхода на окупаемость);
- более высокая инвестиционная привлекательность АСММ со стороны частных инвесторов (возможность государственно-частного партнёрства) из-за меньшего объёма финансирования, ускоренного процесса выхода на окупаемость, увеличенной вариативности использования АСММ в бизнес-интересах;
- экологически чистое производство энергии без прямого выброса CO₂ характеризует АЭС и АСММ. Однако за счёт объёма используемого топлива и возможность применения технологий замкнутого ядерного топливного цикла больше в АСММ;
- в зависимости от изменения потребности в электроэнергии в конкретном месте расположения, модули АСММ (поставляемые в готовом виде) можно сравнительно быстро подключить в АСММ или вывести из работы;
- АСММ возможно разместить в труднодоступных регионах с децентрализованным энергоснабжением;
- АСММ могут работать на выработку не только электроэнергии, но и тепловой энергии, которая при размещении рядом с потребителями может быть использована с минимальными потерями;

- концепция поставки потребителю АСММ в «не-разборном» виде и доставка на завод-изготовитель для осуществления операций обращения с топливом даёт возможность высвобождения таких установок из-под гарантий МАГАТЭ, лимитирующих обогащение топлива и, таким образом, увеличить экспортный потенциал АСММ в страны, не обладающие ядерным оружием;
- возможность использования АСММ в странах с низким уровнем развития энергосистем и малым опытом использования атомной энергетики;
- более низкие затраты на восстановление территории при выводе АСММ из эксплуатации вследствие возможности вывоза модулей целиком на завод для утилизации;
- большая экономическая эффективность в сравнении с альтернативными источниками энергии на труднодоступных территориях (дизельная генерация);
- возможность управления в режиме удалённого доступа и минимальным количеством эксплуатационного персонала;
- снижение финансовых затрат на передачу электроэнергии и снижение потерь в энергосетях при сооружении АСММ в режиме распределённой генерации.

К факторам, негативно влияющим на развитие АСММ можно отнести:

- При сооружении АСММ в труднодоступных регионах в большинстве случаев они становятся единственными источниками тепла и электроэнергии данного региона, что предъявляет повышенные требования к наработке на отказ каждого модуля АСММ;
- Отсутствие положительного экономического эффекта от экономии масштаба;
- Законодательные ограничения размещения АСММ вблизи потребителей электроэнергии;
- Во многих странах затраты (как минимум по времени работы экспертов) на сертификацию проекта АСММ (лицензию на строительство и эксплуатацию) сопоставимы с таковыми для крупных реакторов.

Малые модульные реакторы (SMR) определяются как ядерные реакторы, как правило, мощностью 300 МВт или менее. Разработки последних лет можно классифицировать по 4-м основным типам реакторов: легководные реакторы, реакторы на быстрых нейтронах, высокотемпературные реакторы с графитовым замедлителем и различные виды жидкосолевых реакторов (MSR). В 2020 году МАГАТЭ опубликовало обзор новейших разработок технологий малых модульных реакторов, где представлены материалы по 72 проектам реакторов для АСММ. Наибольшее количество разрабатываемых проектов ММР принадлежит США и России.

На основании отчёта Всемирной ядерной ассоциации (World Nuclear Association, WNA) по состоянию на июль 2023 года в мире уже работает 5 типов реакторов малой мощности. Это разработанные во второй половине XX века китайский CNP-300, индийский IPHWR-220 и российский ЭГП-6, а также современные российские КЛТ-40С (установленные на плавучая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС) проекта 20870 «Академик Ломоносов») и РИТМ-200 (установленные на атомные ледоколы проекта 22220). В стадии строительства находятся 4 проекта реакторов: российский БРЕСТ-ОД-300, аргентинский CAREM-25, китайские HTR-PM и ACP100/Linglong One. В разработке на различных стадиях ещё 38 проектов, в том числе 5 российских.

Основной вызов для АСММ — это затраты на производство 1 МВт-час энергии в сравнении с другими источниками. В Отчете о состоянии мировой атомной промышленности (The World Nuclear Industry Status Report) вместе с описанием текущей ситуации по разработке и строительству АСММ приводятся сравнительные цифры: 105–135 долларов США за 1 МВт-час электроэнергии, выработанной американскими проектами АСММ против 25–32 долларов США за 1 МВт-час электроэнергии, выработанной ветряной генерацией и 32–37 долларов США — солнечной генерацией в США. Австралийское Государственное объединение научных и прикладных исследований оценило генерацию 1 МВт-час посредством АСММ в 92–220 долларов США.

Другой подход в оценке стоимости вырабатываемой АСММ электроэнергии указывает IDTechEx [10, 11]. Используя показатель Нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) были выделены основные составляющие затрат: операционные, капитальные и финансовые. При генерации электроэнергии посредством АЭС значительную составляющую имеют капитальные затраты, операционные и финансовые во много раз меньше. При генерации посредством АСММ составляющая капитальных затрат лишь немногим меньше операционных. Снижение капитальных затрат возможно посредством предварительной сборки реакторных систем перед транспортировкой на заводе, меньшими размерами самой станции и сниженными затратами на обучение обслуживающего станцию персонала. При этом значительно больший срок возведения АЭС и больший объём инвестиций приводит к увеличенным затратам на капитал и сравнительно большим финансовым расходам. По данным аналитиков из IDTechEx весомым аргументом в пользу АСММ можно считать снижение капитальных затрат, доступ к более дешёвым деньгам и больший инвестиционный потенциал.

Данные факторы обеспечивают широкий спектр применения атомных станций малой мощности, которые могут использоваться: для теплоэлектроснабжения уда-

лённых территорий и выработки тепловой энергии для нужд металлургии химической и нефтехимической промышленности; для замещения (реновации) устаревшей генерации (например угольной), в том числе на время технологических простоев; для замещения централизованных блоков большой единичной мощности несколькими модульными энергоблоками малой мощности, в том числе для распределённой генерации (расположение на нескольких площадках в пределах одной энергосистемы); для опреснения морской воды, для медицины (терапии раковых заболеваний).

Таким образом, в числе основных преимуществ АСММ в сравнении с классическими АЭС можно выделить:

- снижение стоимости и сроков строительства за счёт более высокой степени заводского изготовления, эффекта серийности и уменьшения строительных работ на площадке, в том числе за счёт подземного или заглублённого размещения;
- возможное снижение нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) по сравнению с АЭС с реакторами большой единичной мощности за счёт снижения капитальных (как на ввод в эксплуатацию, так и на вывод при концепции доставки модулей на завод-изготовитель для утилизации) и финансовых затрат (снижение срока пользования деньгами до момента выхода на окупаемость);
- более высокую инвестиционную привлекательность АСММ со стороны частных инвесторов (возможность государственно-частного партнёрства) из-за меньшего объёма финансирования, ускоренного процесса выхода на окупаемость, увеличенной вариативности использования АСММ в бизнес-интересах;
- экологически чистое производство энергии без прямого выброса CO₂ характеризует АЭС и АСММ. Однако за счёт объёма используемого топлива и возможность применения технологий замкнутого ядерного топливного цикла больше в АСММ;
- Скорость подключения и вывода модулей АСММ в зависимости от изменения потребности в электроэнергии в конкретном месте расположения;
- возможность размещения в труднодоступных регионах с децентрализованным энергоснабжением;
- возможность выработки не только электроэнергии, но и тепловой энергии, которая при размещении рядом с потребителями может быть использована с минимальными потерями;
- концепция поставки потребителю АСММ в «разборном» виде и доставка на завод-изготовитель для осуществления операций обращения с топливом даёт возможность высвобождения таких установок из-под гарантий МАГАТЭ, лимит-

тирующих обогащение топлива и, таким образом, увеличить экспортный потенциал АСММ в страны, не обладающие ядерным оружием;

- возможность использования АСММ в странах с низким уровнем развития энергосистем и малым опытом использования атомной энергетики;
- более низкие затраты на восстановление территории при выводе АСММ из эксплуатации вследствие возможности вывоза модулей целиком на завод для утилизации;
- большая экономическая эффективность в сравнении с альтернативными источниками энергии на труднодоступных территориях (дизельная генерация);
- возможность управления в режиме удалённого доступа и минимальным количеством эксплуатационного персонала;
- снижение финансовых затрат на передачу электроэнергии и снижение потерь в энергосетях при сооружении АСММ в режиме распределённой генерации;
- логистика АЭС за рубежом связана с поставкой комплектующих из разных стран на место возве-

дения АЭС, доставка в место установки в собранном виде.

К факторам, негативно влияющим на развитие АСММ можно отнести: повышенные требования к наработке на отказ каждого модуля АСММ в труднодоступных регионах; отсутствие положительного экономического эффекта от экономии масштаба; законодательные ограничения размещения АСММ вблизи потребителей электроэнергии; затраты на сертификацию проекта сопоставимы с таковыми для крупных реакторов.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости научного обоснования использования атомных станций малой мощности в труднодоступных изолированных районах Арктической зоны России, что требует формирования современного методологического аппарата, учитывающего широкий спектр системных факторов, и позволяющего провести сравнительный анализ и оценку эффективности передовых технологий для обеспечения устойчивого экономического регионального развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гагаринский, А.Ю. Ядерные реакторы малой мощности — большие ожидания / А.Ю. Гагаринский // Вестник Национального политехнического университета Армении. Электротехника, энергетика. — 2018. — № 2. — С. 9–20. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36795162> (дата обращения 10.09.23).
2. Щепетина Т.Д., Алексеев П.Н., Субботин С.А., Стукалов В.А. Система атомных станций малой мощности как стратегическое направление достижения состояния защищенности жизненно-важных интересов общества // Атомная энергия. Вып. 5 (111), ноябрь 2011. — С. 250–255.
3. Семенов В., Щепетина Т., Попов С. Развитие малых атомных станций: задачи и перспективы // Энергетическая политика. № 10 (164). 2021. С. 48–63.
4. С.Л. Соловьев, Д.Г. Зарюгин, С.Г. Калякин, С.Т. Лескин Определение основных направлений развития атомных станций малой мощности // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. — 2022. — № 1. — С. 22–34. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48680817> (дата обращения: 15.10.2023).
5. А.М. Нургалева, А.В. Карпова // Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации: Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, Москва, 11 марта 2022 года / Редколлегия: Бабаева З.Ш. [и др.]. — Москва: ИП Овчинников Михаил Артурович (Типография Алеф), 2022. — С. 77–81. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48221046> (дата обращения: 15.10.2023).
6. В.В. Кузнецов Обзор существующих и перспективных атомных станций малой мощности в Российской Федерации и за рубежом // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / под ред. акад. РАН А.А. Саркисова; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. — М.: Наука, 2011. — с.59.
7. Достижения в области малых модульных реакторов. Технологические разработки. Advances in Small Modular Reactor. Technology Developments. 2020 edition. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf (дата обращения 10.09.23).
8. Отчет Всемирной ядерной ассоциации (World Nuclear Association, WNA) Small Nuclear Power Reactors (Updated July 2023). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx> (дата обращения 10.09.23).
9. Отчет о состоянии мировой атомной промышленности (The World Nuclear Industry Status Report 2022). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2022-v3-lr.pdf> (дата обращения 10.09.23).
10. Nuclear Small Modular Reactors (SMRs) 2023–2043 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.idtechex.com/en/research-report/nuclear-small-modular-reactors-smrs-2023-2043/934> (дата обращения 10.09.23).
11. Small but Mighty: The Growth Potential of Nuclear Small Modular Reactors [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.idtechex.com/en/research-report/nuclear-small-modular-reactors-smrs-2023-2043/934> (дата обращения 10.09.23).

© Горбенко Анна Владимировна (gorbenko8691@mail.ru); Миронов Эдуард Валерьевич (MironovEV@mpei.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»