

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

**С.Л. Соловьев \*, Д.Г. Зарюгин \*\*, С.Г. Калякин \*, С.Т. Лескин \*\*\***

\* АО «ВНИИАЭС»

109507, Москва, ул. Ферганская, 25

\*\* Госкорпорация «Росатом»

119017, Москва, ул. Большая Ордынка, 24

\*\*\* ИАТЭ НИЯУ МИФИ

249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1



Рассмотрены основные характеристики модульной конструкции атомных станций малой мощности (АСММ), показана возможность снижения стоимости и сроков сооружения установок данного класса за счёт заводского изготовления, эффекта серийности и сокращения избыточных систем безопасности. Показана возможность значительного расширения области применения атомных технологий благодаря модульности и возможности обеспечения высоких показателей безопасности. Проанализированы возможные направления применения АСММ для энергообеспечения удалённых (арктических) территорий, замены (реновации) угольной генерации, производства высокопотенциального тепла и водорода для промышленных потребителей и другие применения. По каждому направлению обоснованы наиболее характерные требования со стороны потребителей, определяющие наибольшую эффективность применения АСММ для данного направления. Показана необходимость разработки и внедрения новой технологической платформы атомной энергетики на основе АСММ для осуществления глобальной декарбонизации мировой экономики благодаря значительному расширению области применения ядерных энерготехнологий в дополнение к разрабатываемым на данный момент технологической платформе ЗЯТЦ с БР (решение задачи топливообеспечения и утилизации отходов) и технологической платформе УТС (решение задачи глобального энергообеспечения в долгосрочный период). Новая платформа должна разрабатываться на базе широкого международного сотрудничества с созданием международных консорциумов. Предложено создание опытного полигона с целью отработки технологий производства водорода (тепла) для отдельного промышленного потребителя («кэптивного» производства) и других технологий утилитарного применения АСММ на основе опытно-демонстрационной атомной энерготехнологической установки.

**Ключевые слова:** Арктика, атомные станции малой мощности, накопители энергии, синтетическое безуглеродное топливо, новая технологическая платформа, водород.

## ВВЕДЕНИЕ

С публикации в 1990 г. первого доклада межправительственной группы экспертов по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), в котором была подчеркнута непосредственная угроза изменения климата от выбросов парниковых газов, дипломатические усилия были направлены на поиск международных рамок, в пределах которых такие выбросы могли бы регулироваться. Данные усилия вылились в Рамочную конвенцию ООН об изменении климата (1992 г.), Киотский протокол (1997 г.) и Парижское соглашение по климату (2015 г.), которые определяли цели глобального сокращения выбросов парниковых газов. Возникли понятия низкоуглеродной и декарбонизированной экономики и призыв к глобальной декарбонизации [1]. Технические усилия по сокращению выбросов всё это время, в основном, были направлены на развитие «зелёной» энергетики на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), а также технологий энергосбережения и энергоэффективности. При этом многие страны декларировали сокращение и даже полный отказ от атомной генерации, которая не считалась «зелёной». Между тем энергетические кризисы 2020 и 2021 гг. в США и Европе показали принципиальную неспособность ВИЭ-энергетики обеспечить одновременно и заметное сокращение выбросов парниковых газов, и энергетическую надёжность энергосистем, в связи с чем значительное внимание сейчас уделяется атомной энергетике, которая подавляющим большинством мирового сообщества признаётся «зелёной». Очевидно, что существующая атомная энергетика должна внести свой вклад в глобальную декарбонизацию, но данный вклад, скорее всего, будет ограничен, во-первых, проблемами с топливообеспечением и захоронением отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), на решение которых сейчас направлено создание энерготехнологий замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) с реакторами на быстрых нейтронах (БР), и во-вторых, системной ограниченностью применения существующей атомной энергетики больших мощностей только задачами производства электрической энергии. Необходимо глобальное расширение внедрения атомной энергетики в те ниши жизнедеятельности человека, которые недоступны энергетике больших мощностей, а именно – географическое расширение области применения атомной энергии и распространение на неэлектрические области применения в промышленности, коммунальном хозяйстве, медицине и т.д. Для таких применений востребованы малые энергоустановки, но обладающие лучшими показателями безопасности, чтобы АСММ возможно было размещать непосредственно вблизи потребителя.

## МОДУЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ АСММ

В мировом сообществе сложилось название данного класса ядерных установок как *атомные станции малой мощности* (АСММ), к которым по классификации МАГАТЭ относят установки электрической эквивалентной мощности менее 300 МВт [2 – 4]. Реакторы такого уровня мощности составляли основу ядерной энергетики на самых ранних этапах её развития, но затем возобладала тенденция к увеличению мощности (для достижения экономических преимуществ, связанных с экономикой масштаба), что привело к появлению проектов атомных электростанций мощностью 1000 – 1600 МВт эл., которые в настоящее время составляют основу современной мировой атомной энергетики.

В рамках учреждённого в конце 2000 г. в МАГАТЭ международного проекта по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам ИНПРО проводились исследования вопросов правового и институционального обеспечения АСММ [5, 6], в рамках которого было введено обозначение «Транспортные атомные энергетические установки (ТАЭУ) – это АСММ, жизненный цикл которых реализуется на единой

транспортной платформе, а также АСММ, монтируемые из транспортабельных модулей заводского изготовления на подготовленной площадке и таким же образом удаляемые с этих площадок». Данное определение является частным случаем предложенного в ходе VI ИНПРО Диалога-форума летом 2013 г. определения «малые модульные реакторы» (SMRs – Small Modular Reactors) для обозначения малой энергетики индустриального серийного производства [7, 8].

Модульная конструкция определяет следующие преимущества АСММ:

- 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;
- повышенные характеристики безопасности (в том числе естественная безопасность) из-за смещения энергобаланса между объёмным энерговыделением и поверхностным теплоотводом в режимах запроектных аварий;
- снижение стоимости и сроков строительства за счёт отказа от избыточных систем безопасности благодаря применению интегральной (блочной) компоновки первого контура, возможности полного отвода остаточных энерговыделений от корпуса реактора и т.д.;
- снижение стоимости и сроков строительства за счёт отказа от инфраструктуры обращения со свежим ядерным топливом (СЯТ), отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО) на площадке размещения (если определено в проекте) и транспортировки АСММ для осуществления таких операций на заводе-изготовителе;
- концепция поставки потребителю АСММ в «неразборном» виде и транспортировка на завод-изготовитель для осуществления операций обращения с топливом позволяет обосновать возможность высвобождения таких установок из-под гарантий МАГАТЭ, лимитирующих обогащение топлива и, таким образом, увеличить топливную кампанию;
- возможность более гибкой встраиваемости в существующие энергосистемы и потребности потребителей;
- более короткий срок начала отдачи инвестиций за счёт поэтапного ввода энергомодулей;
- возможность осуществления государственно-частного партнёрства за счёт меньшего объёма инвестиций в строительство энергоблока и более быстрого срока отдачи;
- повышение надёжности энергоснабжения за счёт более низкого уровня риска полного останова многомодульной станции;
- более низкие затраты на вывод из эксплуатации под «зелёную лужайку» вследствие возможности вывоза модулей целиком на завод для утилизации;
- возможность расширения рынка мирного применения ядерной энергетики путём вовлечения в него тех сегментов, где ядерно-энергетические технологии в настоящий момент не используются, в том числе благодаря возможности размещения в непосредственной близости от потребителя при повышенных характеристиках безопасности.

### **НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ АСММ**

Сегодня в мире сложилось несколько востребованных направлений развития проектов АСММ в соответствии с их предназначением, спецификой заказчиков и требованиями со стороны потребителей.

#### **АСММ для теплоэлектроснабжения удалённых территорий**

Данное направление актуально, в основном, для России, Канады и островных госу-

дарств, для энергоснабжения удалённых (в том числе арктических) изолированных посёлков и объектов. Например, создание международных кросс-полярных авиакоридоров над территорией России, которые имеют значительную коммерческую перспективу ввиду существенного сокращения пути. Так авиамаршрут Торонто – Гонконг может быть сокращён на величину до 20% при прохождении над полярными широтами, для авиамаршрута Ванкувер – Дели сокращение времени по трансполярному маршруту составляет 3,5 часа при экономии 36 тыс. \$. Подтверждена коммерческая эффективность трансполярных маршрутов как минимум для 40 пар городов. Но на данный момент пролёт воздушных судов над северными широтами не имеет должного сопровождения, поэтому практически не осуществляется в коммерческих масштабах. Необходимы постоянный радиолокационный контроль и связь по всему маршруту полёта наземными службами управления воздушным движением дополнительно к спутниковой навигации, а для этого нужны надёжные и экономичные источники энергоснабжения. При этом оплата за наземное сопровождение авиарелётов составляет до 1\$ США за километр.

Основными требованиями к данным установкам являются

- работа на локальный или местный (районный) секторы энергоснабжения в усиленных режимах маневрирования мощностью (здесь *локальный* – это изолированный от энергосистем и других энергоисточников сектор энергоснабжения, состоящий из одного источника и одного или нескольких (энергоузел) потребителей; *местный (районный)* – централизованный сектор энергоснабжения, изолированный от единой энергосистемы и состоящий из нескольких источников и потребителей);
- максимально возможный интервал между перегрузками от 10-ти до 20-ти и более лет;
- когенерация электрической и тепловой энергии;
- экономическая эффективность по сравнению с другими возможными источниками энергии (в основном, с дизель-генерацией), размещаемыми на данной площадке;
- наличие резервных дублирующих мощностей на случай отказа;
- эксплуатация с минимальным эксплуатационным персоналом или без персонала при управлении в режиме удалённого доступа;
- отсутствие инфраструктуры обращения с топливом на площадке размещения и транспортировка на завод-изготовитель для перегрузки, в основном, для установок сверхмалой мощности (установки единичной эквивалентной электрической мощностью менее 10 МВт называют также атомными станциями сверхмалой мощности).

Наиболее востребована линейка единичных энергоустановок от 200 кВт до 100 МВт эквивалентной электрической мощности.

В данной концепции возможно будет экономически оправданно применение химических (водородных) накопителей энергии для обеспечения экономически эффективных маневренных режимов [9] для установок сверхмалой мощности. При этом из накопленного водорода возможно производство безуглеродного синтетического моторного топлива для транспорта (например, аммиака из водорода и азота воздуха) либо прямое использование водорода на транспорте с водородными топливными элементами, что имеет огромное значение для удалённых посёлков и объектов, особенно в Арктике, где данная функция позволяет полностью исключить северный завоз топлива и улучшить экологическую обстановку [10]. Подобные накопители также могут выполнять функции резервного источника энергии в случае аварии или отказа.

#### **АСММ для замещения (реновации) угольной генерации**

Данное направление наиболее актуально для России (стран СНГ), Европы, Китая, Индии и др. для замещения имеющихся угольных тепловых электростанций (ТЭС).

Возможны две концепции данного применения:

- реакторной установкой замещается только угольный котёл при сохранении в работе остального основного оборудования (турбины, системы регенерации тепла, электрогенераторы, сетевое хозяйство и т.д.), что значительно снижает капитальные затраты;

- полная замена основного оборудования, включая турбинный остров с использованием созданной инфраструктуры площадки (дороги, железнодорожные пути и т.д.) и вспомогательного оборудования (системы выдачи мощности, здания и сооружения и т.д.).

Основными требованиями являются

- возможность выработки перегретого пара или пара СКД (в зависимости от типа ТЭС);
- работа в маневренных режимах в составе единой централизованной сети энергоснабжения;

- повышенные показатели безопасности для возможности размещения в непосредственной близости от потребителей (как правило, в черте крупных городов) и полное исключение защитных мер за пределами площадки размещения;

- снижение нормированной стоимости электроэнергии (LCOE – Levelised Cost of Energy) до уровня, обеспечивающего экономическую эффективность;

- вывод из эксплуатации под «зелёную лужайку» в сжатые сроки.

Наиболее востребованы единичные мощности в диапазоне 100 – 200 МВт эл.

**АСММ 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)**

Данное направление актуально, в первую очередь, для развивающихся стран, имеющих дефицит энерго мощностей и неразвитые сети электропередач. К дополнительным экономическим преимуществам данного направления относятся снижение затрат на прокладку энергосетей и снижение потерь в энергосетях (при распределённой генерации) [11, 12], увеличенный коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) и улучшенные показатели безопасности. Основные требования к данным установкам соответствуют требованиям к атомным станциям большой мощности при условии снижения LCOE до уровня, сопоставимого с действующими АЭС большой мощности [13]. При определении LCOE необходимо учитывать затраты на вывод из эксплуатации, что для АСММ модульного дизайна гораздо ниже при концепции доставки модулей на завод-производитель для дальнейшей утилизации. Также необходимо учитывать тот факт, что для случая малой генерации размер страховой премии за нанесение ядерного ущерба в случае аварии способен полностью покрыть причинённый ущерб, в то время как для станций большой мощности данный ущерб частично придётся компенсировать государству, на территории которого размещена АЭС [14].

Данное направление развивается компанией Rolls-Royce совместно с BNF Resources UK и Exelon Generation, которая планирует строительство на территории Англии 16-ти SMR для замещения АЭС большой мощности с 2030 по 2050 гг. Также предполагается, что данные установки будут оборудованы химическими (водород) накопителями энергии, а накопленный водород будет также использоваться для производства синтетического моторного топлива.

Наиболее востребованы единичные мощности в диапазоне 100 – 300 МВт эл.

**Атомные энерготехнологические станции малой мощности (АЭТСММ) для производства высокопотенциального тепла и «кэптивного» водорода для промышленных потребителей**

Промышленность потребляет большие количества высокопотенциальной тепловой энергии (свыше 700°C) в технологических процессах – в основном, это металлургия,

химическая, нефтехимическая промышленность и т.п. В настоящее время данная тепловая энергия получается, как правило, за счёт сжигания ископаемых углеводородных видов топлива (уголь, газ, мазут и т.д.), что приводит к значительному загрязнению окружающей среды как парниковыми газами, так и другими продуктами сгорания ископаемого топлива. Большое количество промышленных потребителей в металлургии (к примеру, получение сверхчистых металлов, бездоменная технология получения стали методом прямого восстановления из руды водородом), химии и нефтехимии (очистка нефти), фармацевтике и т.д. используют значительное количество водорода в технологических циклах. В настоящее время производство необходимого водорода осуществляется преимущественно на площадке крупного промышленного потребителя методом паровой конверсии метана при сжигании его до 50% с целью обеспечения необходимых температур, что сопровождается выбросом значительного количества парниковых газов [15, 16]. Мощности подобного «кэптивно-го» (т.е. для собственного потребления) производства водорода на площадке промышленного потребителя составляют от 10-ти до 150-ти тыс. т/г., что вполне может быть заменено на АЭСММ:

2017 г. – ООО «Газпром нефтехим Салават» 17,7 тыс. т/г.;

2018 г. – Омский ПНЗ «Газпром нефть» 12,3 тыс. т/г.;

2014 – 2017 гг. – г. Уфа, нефтяная компания «Башнефть» 153 тыс. т/г.

Применение АЭСММ для снабжения крупных промышленных потребителей высокопотенциальным теплом и водородом экономически оправданно по следующим причинам.

– Отсутствие выбросов в окружающую среду как на глобальном уровне (парниковые газы, выброс которых может быть в скором времени жёстко квотирован международным законодательством), так и на местном уровне (загрязнения близлежащего населённого пункта, а это, в основном, крупные промышленные города, и окружающей территории ядовитыми продуктами сгорания ископаемого топлива и зольными отвалами, которые лимитируются федеральным и региональным законодательством).

– Отсутствие колебаний мировых цен на ядерное топливо приводит к стабильности, предсказуемости и лучшей планируемости промышленной деятельности как с технологической, так и с экономической точек зрения. Данное направление актуально для России, Китая, Индии, и др. промышленных стран.

– При централизованном производстве водорода наибольшую долю в конечной цене водорода для потребителя составят операции по хранению и транспортировке водорода вследствие его физических свойств (низкая плотность, низкая температура сжижения и т.д.), поэтому наиболее эффективным будет исключение этих операций из технологической схемы и осуществление производства водорода непосредственно вблизи потребителя.

С экономической точки зрения ядерный источник высокопотенциальной тепловой энергии и производство водорода должны быть размещены непосредственно на площадке промышленного потребителя (опасный объект), который сам, в основном, размещён в непосредственной близости преимущественно крупных промышленных мегаполисов. Такое размещение, как и размещение потенциально опасного производства рядом с АЭС, сегодня запрещено как международными стандартами безопасности в области атомной энергии, так и внутрироссийскими нормами и правилами. Следовательно, чтобы ядерный энергоисточник высокопотенциальной тепловой энергии был допущен к размещению в непосредственной близости от промышленного потребителя, он должен обладать лучшими показателями безопасности, чем существующие энергоблоки.

Кроме указанных основных направлений развития АСММ существуют другие направления со своими требованиями к установкам, например, АСММ для опреснения морской воды [17], для энергоснабжения буровых платформ (актуально для Китая) [18], для замещения угольных котельных, АСММ медицинского назначения для проведения нейтронозахватной и нейтроносоударной терапии раковых заболеваний непосредственно в лечебном учреждении [19], АСММ для дожигания минорных актинидов и т.д.

На сегодня в мире на различной стадии рассматриваются около 50-ти различных проектов АСММ, которые технологически можно разделить на два направления [20, 21].

- Эволюционное развитие водо-водяных (в том числе кипящих) ядерных энерготехнологий поколения III+, не полно отвечающих требованиям потребителей, но имеющих референтные мощности и возможности более быстрого выхода на рынок.
- Разработка на основе энерготехнологий IV поколения (в том числе газовых, жидкосольевых, жидкометаллических и т.д.) технологий, по свойствам более отвечающих требованиям потребителей, особенно в части повышенных требований по безопасности с возможностью функционирования в ЗЯТЦ, но не имеющих достаточной референтности и отличающихся более длительным сроком появления коммерческого продукта.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Развитие всей необходимой линейки АСММ является очень разносторонней, сложной и достаточно затратной задачей, которую невозможно решить силами одной Госкорпорации «Росатом». Подобные стратегические программы необходимо осуществлять на базе широкого международного сотрудничества с созданием международных консорциумов, как предложено академиком Е.П. Велиховым ещё в 2008 г. в МАГАТЭ [22].

При этом реальное внедрение АСММ в современных рыночных условиях может произойти только на реальных и масштабных проектах, в которых АСММ будут не самоцелью, а инструментом эффективного решения глобальных инфраструктурных задач. Представляется целесообразным создание опытного полигона для отработки технологий «кэптивного» производства водорода (тепла) для промышленного потребителя на основе опытно-демонстрационной атомной энерготехнологической установки с высокотемпературным газовым реактором тепловой мощности 50 – 100 МВт, температурой теплоносителя 950 – 1000°C и активной зоной насыпного типа. На данном опытном полигоне можно провести отработку следующих технологий:

- высокотемпературного газового реактора для одновременного производства безуглеродного водорода (тепла) и электричества для промышленности;
- производства водорода методами высокотемпературного электролиза воды и термохимическими циклами разложения воды;
- бездоменного получения железа методом прямого восстановления из руды водородом и технологии получения чистых металлов и сплавов;
- радиационно-термического крекинга, водородного крекинга и водородной очистки нефти;
- безуглеродных технологий производства синтетического моторного топлива из водорода (аммиак, метанол и др.);
- подъёма тяжёлой нефти и реновации отработавших скважин и т.д.

Для задачи централизованного безуглеродного коммерческого производства водорода целесообразно рассмотреть на долгосрочную перспективу применение высокотемпературного натриевого реактора с температурой натрия на выходе из ак-

тивной зоны от 950 до 1000°C для производства водорода методом высокотемпературного электролиза воды либо методом высокотемпературного термохимического цикла разложения воды.

Отметим преимущества высокотемпературной натриевой технологии по сравнению с высокотемпературной газовой технологией.

- Более высокая энергонапряжённость активной зоны, до 400 МВт(т)/м<sup>3</sup> (высокотемпературный газовый реактор – до 9 МВт(т)/м<sup>3</sup>), соответственно гораздо более высокая производительность и низкая себестоимость производства водорода (эффект масштаба).

- Значительно меньшие габариты реакторного блока (меньшие капитальные затраты).

- Низкое давление в контуре теплоносителя (более низкая материалоемкость).

- Надёжный способ съёма остаточного тепла.

- Более высокая степень ядерной безопасности и отсутствие загрязнения углеродом-13.

- Возможность работы в замкнутом ядерном топливном цикле.

Таким образом, задача полномасштабного внедрения линейки АСММ в различных сферах жизнедеятельности человека для замещения технологий, основанных на использовании органического сырья для глобальной декарбонизации мировой экономики и существенного снижения выбросов парниковых газов, представляет собой отдельную новую технологическую платформу атомной энергетики. Эта платформа является дополнением к разрабатываемой на данный момент технологической платформе ЗЯТЦ с БР для решения задач топливообеспечения и утилизации отходов и к технологической платформе УТС для решения задачи глобального энергообеспечения в долгосрочный период. Для реализации задачи создания новой технологической платформы на основе линейки АСММ необходима разработка и принятие Стратегической программы Госкорпорации «Росатом» по данному направлению.

### Литература

1. Clark Michael A., Domingo Nina G.G., Colgan Kimberly, Thakrar Sumil K., Tilman David. Global Food System Emissions Could Preclude Achieving the 1.5° and 2°C Climate Change Targets. // Science. – 2020. – Vol. 370. – Iss. 6517. – PP. 705-708. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aba7357>.

2. Status of Innovative Small and Medium Sized Reactor Designs 2005: Reactors with Conventional Refueling Schemes (IAEA-TECDOC-1485) – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006. – 712 p. Электронный ресурс: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_1485\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1485_web.pdf) (дата доступа 30.11.2021).

3. Status of Small Reactor Designs without On-site Refueling (IAEA-TECDOC-1536) – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2007. – 870 p. Электронный ресурс: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te\\_1536\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1536_web.pdf) (дата доступа 30.11.2021).

4. Small Reactors without On-site Refueling: General Vision, Neutronic Characteristics, Emergency Planning Considerations, and Deployment Scenarios: Final Report of IAEA Coordinated Research Project on Small Reactors without On-site Refueling (IAEA-TECDOC-1652) – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. – 105 p. Электронный ресурс: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te\\_1652\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1652_web.pdf) (дата доступа 30.11.2021).

5. Кузнецов В.П., Опанасюк Ю.Р. Сборник материалов и результатов исследования вопросов правового и институционального обеспечения транспортабельной атомной энергетики. – Москва: НИЦ «Курчатовский институт», 2013. – 219 с. ISBN 978-5-904437-74-9

6. Кузнецов В.П. Задача «Правовое и институциональное обеспечение атомной энер-

гетики на основе транспортабельных атомных энергетических установок»: Международный проект ИНПРО – Москва: НИЦ «Курчатовский институт», 2009. – 24 с.

7. *Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment.* – Paris: OECD-NEA, 2016. – 75 p. Электронный ресурс: <https://oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/7213-smrs.pdf> (дата доступа 30.11.2021).

8. *Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities.* – Paris: OECD-NEA, 2021. – 56 p. Электронный ресурс: [https://oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2021-03/7560\\_smr\\_report.pdf](https://oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2021-03/7560_smr_report.pdf) (дата доступа 30.11.2021).

9. *Тарасенко А. Б., Школьников Е. И.* Водородный цикл и другие способы буферного аккумулирования электроэнергии для энергоустановок на солнечных батареях: сравнительный технико-экономический анализ. // Тезисы докладов II Международной конференции «Технологии хранения водорода». Москва, 28-29 октября 2009 г. – М.: Научтехлитиздат, 2009. – С. 43-44.

10. *Климентьев А. Ю., Климентьева А. А.* Аммиак – перспективное моторное топливо для безуглеродной экономики. // Транспорт на альтернативном топливе. – 2017. – № 3 (57). – С. 17-25.

11. *Зайченко В. М., Цой А. Д., Штеренберг В. Я.* Распределенное производство энергии. – М.: БуКос, 2008. – 207 с.

12. *Майков И. Л., Директор Л. Б.* Решение задач оптимизации и управления гибридными энергетическими комплексами в структуре распределенной генерации. // Управление большими системами. Сборник трудов. Вып. 35. – М.: ИПУ РАН, 2011. – С. 250-264. ISSN 1819-2440

13. *Projected Costs of Generating Electricity 2020.* – Paris: OECD-NEA, 2020. – 223 p. Электронный ресурс: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ae17da3d-e8a5-4163-a3ec-2e6fb0b5677d/Projected-Costs-of-Generating-Electricity-2020.pdf> (дата доступа 30.11.2021).

14. *Амелина М. Е., Кутумов А. М.* Вопросы гражданской ответственности при строительстве и эксплуатации атомных станций малой мощности. // Сборник «Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики России». Том 2. Под ред. А. А. Саркисова. – М.: ИБРАЭ РАН, 2011. – С. 315-322.

15. *Ball M., Wietschel M.* The Hydrogen Economy. Opportunities and Challenges. – Cambridge University Publ., 2009. – 672 p. ISBN-13 978-0-521-88216-3

16. *Журавлёв И. Б., Залужный А. А., Птицын П. Б.* Технико-экономические исследования (ТЭИ) по теме приоритетного направления развития научно-технического развития «Водородная энергетика» – М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2021. – 150 с. ISBN 978-5-498-00807-3.

17. *Rouillard J., Rouyer J.* Technical and Economic Evaluation of Potable Water Production through Desalination of Sea Water by Using Nuclear Energy and Other Means (IAEA-TECDOC-666) – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1992. – 148 p. Электронный ресурс: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/24/007/24007848.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/24/007/24007848.pdf) (дата доступа 30.11.2021).

18. Сборник работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа. – М.: Министерство энергетики РФ, ООО «Технологии развития», 2015. – 136 с. ISBN 978-5-7688-1051-1. Электронный ресурс: <https://in.minenergo.gov.ru/upload/tek/analitika/Arctica-2015-web.pdf> (дата доступа 30.11.2021).

19. *Левченко В. А., Белугин В. А., Казанский Ю. А. и др.* Основные характеристики америциевого реактора для нейтронной терапии. Реактор «Марс». // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2003. – № 3. – С. 72-82. Электронный ресурс: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2003/03.pdf> (дата доступа 30.11.2021).

20. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments.* – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2018. Электронный ресурс: <https://aris.iaea.org/>

Publications/SMR\_Book\_2018.pdf (дата доступа 30.11.2021).

21. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2020. Электронный ресурс: [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf) (дата доступа 30.11.2021).

22. *Reinforcing the Global Nuclear Order for Peace and Prosperity: The Role of the IAEA to 2020 and Beyond*. Report prepared by an independent Commission at the request of the Director General of the International Atomic Energy Agency. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2008. – 42 p. Электронный ресурс: [https://ucsg.yale.edu/sites/default/files/files/IAEA\\_2020\\_report.pdf](https://ucsg.yale.edu/sites/default/files/files/IAEA_2020_report.pdf) (дата доступа 30.11.2021).

Поступила в редакцию 02.12.2021 г.

#### Авторы

Соловьёв Сергей Леонидович, научный руководитель, д-р техн. наук  
E-mail: SLSoloviev@vniiaes.ru

Зарюгин Денис Геннадьевич, руководитель проекта, канд. техн. наук  
E-mail: DGZaryugin@rosatom.ru

Калякин Сергей Георгиевич, директор департамента, д-р техн. наук  
E-mail: SGKalyakin@vniiaes.ru

Лескин Сергей Терентьевич, заведующий кафедрой, д-р техн. наук, профессор  
E-mail: STLeskin@mephi.ru

UDC 621.039.4

## IDENTIFYING THE KEY DEVELOPMENT AREAS FOR SMALL MODULAR REACTORS

Soloviev S.L.\* , Zaryugin D.G.\*\* , Kalyakin S.G.\* , Leskin S.T.\*\*\*

\* All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation JSC  
25 Ferganskaya Str., 109507 Moscow, Russia

\*\* State Atomic Energy Corporation Rosatom

24 Bolshaya Ordynka Str. 119017 Moscow, Russia

\*\*\* Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU MEPhI

1 Stugorodok, 249040 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

#### ABSTRACT

In paper considered Small Modular Reactors (SMR) main advantages of design such as:

– possibility of significant enhance of nuclear power application by introducing in the fields where nuclear technologies are still not used, which is also possible thanks to ability of relocation in close proximity to consumer;

– diminish of cost and construction time due to high degree of industrial production and reducing construction works;

– diminish of cost and construction time due to abandonment of redundant safety systems, integral design application and possibility of decay heat removal directly from the vessel;

– diminish of cost and construction time due to abandonment of site management infrastructure of spent fuel and radioactive waste;

– possibility to meet consumer requirements and grid capacity more flexibly.

– possibility of easing IAEA nonproliferation guaranties demands due to procurement to consumer in «unassembled» form and transport to manufacturer for refueling;

- shorter term for the start of investment return due to phased introduction of energy modules, as well as reduced insurance payments;
- possibility to state-private partnership in construction due to lower investment amount;
- improving the reliability of power supply due to a lower risk of a complete shutdown of a multinodular power plant;
- lower decommissioning costs due to the possibility of taking the modules entirely to the manufacturer for final disposal.

In paper considered possible areas of SMR application, including consumer demands, which are as follows: power supply of remote (Arctic) territories, replacement (renovation) of old coal generation, production of high-potential heat and hydrogen for industrial consumers and other applications.

The necessity of development and implementation of a new technological platform for nuclear energy based on SMRs is shown in order to implement the global decarbonization of the world economy by means of significant expansion of nuclear energy technologies application. This technological platform should be developed in addition to the currently developing one based on the closed nuclear fuel cycle with fast reactors (solving the problem of fuel supply and waste disposal) and also developing technological platform of controlled thermonuclear fusion (solving the problem of global energy supply in the long term). The new technological platform should be created on the bases of broad international cooperation with creation of international consortiums. An experimental testing facility (research reactor) is proposed to be created for the development of captive hydrogen (heat) production technologies for industrial consumers as well as other technologies for the application of small modular reactors.

**Key words:** Arctic, small modular reactor, energy storage devices, synthetic carbon-free fuel, new technological platform, hydrogen, experimental facility.

#### REFERENCES

1. Clark Michael A., Domingo Nina G.G., Colgan Kimberly, Thakrar Sumil K., Tilman David. Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2° C climate change targets. *Science*. 2020, v. 370, iss. 6517, pp. 705-708. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aba7357>.
2. *Status of Innovative Small and Medium Sized Reactor Designs 2005: Reactors with Conventional Refueling Schemes (IAEA-TECDOC-1485)*. Vienna. International Atomic Energy Agency Publ., 2006, 712 p. Available at: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_1485\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1485_web.pdf) (accessed Nov. 30, 2021).
3. *Status of Small Reactor Designs without On-site Refueling (IAEA-TECDOC-1536)*. Vienna: International Atomic Energy Agency Publ., 2007, 870 p. Available at: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te\\_1536\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1536_web.pdf) (accessed Nov. 30, 2021).
4. *Small Reactors without On-site Refueling: General Vision, Neutronic Characteristics, Emergency Planning Considerations, and Deployment Scenarios: Final Report of IAEA Coordinated Research Project on Small Reactors without On-site Refueling (IAEA-TECDOC-1652)*. Vienna: International Atomic Energy Agency Publ., 2010, 105 p. Available at: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te\\_1652\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1652_web.pdf) (accessed Nov. 30, 2021).
5. Kuznetsov V.P. Opanasyuk Yu.R. *Collection of Materials and Research Results on Legal and Institutional Support for Transportable Nuclear Power*. Moscow. Kurchatov Institute NRC Publ., 2013, 219 p. ISBN 978-5-904437-74-9 (in Russian).
6. Kuznetsov V.P. *Task «Legal and Institutional Support of Nuclear Energy on the Basis of Transportable Nuclear Power Plants»: INPRO International Project*. Moscow. Kurchatov Institute NRC Publ., 2009, 24 p. (in Russian).
7. *Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment*.

- Paris. OECD-NEA Publ., 2016, 75 p. Available at: <https://oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/7213-smrs.pdf> (accessed Nov. 30, 2021).
8. *Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities*. Paris. OECD-NEA Publ., 2021, 56 p. Available at: [https://oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2021-03/7560\\_smr\\_report.pdf](https://oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2021-03/7560_smr_report.pdf) (accessed Nov. 30, 2021).
9. Tarasenkov A.B., Shkolnikov E.I. Hydrogen Cycle and Other Methods of Buffer Accumulation of Electricity for Solar-Powered Power Plants: Comparative Technical and Economic Analysis. *Proc. of the II International Conference «Hydrogen Storage Technologies», Moscow, Oct. 28-29, 2009*. Moscow. Nauchtehlitizdat Publ., 2009, pp. 43-44 (in Russian).
10. Kliment'ev A.Yu., Kliment'eva A.A. Ammonia is a Promising Motor Fuel for a Carbon-Free Economy. *Transport na Alternativnom Toplivo*. 2017, no. 3 (57), pp. 17-25 (in Russian).
11. Zajchenko V.M., Tsoj A.D., Shterenberg V.Ya. *Distributed Energy Production*. Moscow. BuKos Publ. 2008, 207 p. (in Russian).
12. Majkov I.L., Director L.B. Solving Problems of Optimization and Management of Hybrid Energy Complexes in the Structure of Distributed Generation. The Management of Large Systems. *Collection of Works IPU RAN. Issue 35*. Moscow. IPU RAN Publ., 2011, pp. 250-264, ISSN 1819-2440 (in Russian).
13. *Projected Costs of Generating Electricity 2020*. Paris. OECD-NEA Publ. 2020, 223 p. Available at: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ae17da3d-e8a5-4163-a3ec-2e6fb0b5677d/Projected-Costs-of-Generating-Electricity-2020.pdf> (accessed Nov. 30, 2021).
14. Amelina M.E., Kutumov A.M. Civil Liability Issues in the Construction and Operation of Low Power Nuclear Plants. *In the Collection «Low-power Nuclear Plants: a New Direction in the Development of Russian Energy»*. Edited by A.A. Sarkisov. Volume 2. Moscow. IBRAE RAN Publ., 2011, pp. 315-322 (in Russian).
15. Ball M., Wietschel M. *The Hydrogen Economy. Opportunities and Challenges*. Cambridge University Publ., 2009, 672 p. ISBN-13 978-0-521-88216-3.
16. Zhuravlyov I.B., Zaluzhnyj A.A., Ptitsyn P.B. *Technical and Economic Research (TER) on the Topic of the Priority Direction of Scientific and Technical Development «Hydrogen Energy»*. Moscow. CAIR, Science and Innovation Private Institution Publ., 2021, 150 p. ISBN 978-5-498-00807-3 (in Russian).
17. Rouillard J., Rouyer J. *Technical and Economic Evaluation of Potable Water Production through Desalination of Sea Water by Using Nuclear Energy and Other Means (IAEA-TECDOC-666)*. Vienna. International Atomic Energy Agency Publ., 1992, 148 p. Available at: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/24/007/24007848.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/24/007/24007848.pdf) (accessed Nov. 30, 2021).
18. *Collection of Works of the Laureates of the International Competition of Scientific, Scientific-Technical and Innovative Developments Aimed at the Development and Development of the Arctic and the Continental Shelf*. Moscow. Energy Ministry of the Russian Federation, Technologies of Development LLC Publ., 2015, 136 p. Available at: <https://in.minenergo.gov.ru/upload/tek/analitika/Arctica-2015-web.pdf> (accessed Nov. 30, 2021) (in Russian).
19. Levchenko V.A., Belugin V.A., Kazanskiy Yu.A., Matusevich E.S., Ronen I., Yur'ev Yu.S., Balakin I.P., Dorohovich S.L., Kurachenko Yu.A., Levchenko A.V., Uvarov A.A. The Main Characteristics of the Americium Reactor for Neutron Therapy. Reactor «Mars». *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2003, no. 3, pp. 72-82. Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2003/03.pdf> (accessed Nov. 30, 2021) (in Russian).
20. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. Vienna. International Atomic Energy Agency Publ., 2018. Available at: [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2018.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2018.pdf) (accessed Nov. 30, 2021).
21. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. Vienna. International

Atomic Energy Agency Publ., 2020. Available at: [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf) (accessed Nov. 30, 2021).

22. *Reinforcing the Global Nuclear Order for Peace and Prosperity: The Role of the IAEA to 2020 and Beyond. Report Prepared by an Independent Commission at the Request of the Director General of the International Atomic Energy Agency.* Vienna. International Atomic Energy Agency Publ., 2008, 42 p. Available at: [https://ycsg.yale.edu/sites/default/files/files/IAEA\\_2020\\_report.pdf](https://ycsg.yale.edu/sites/default/files/files/IAEA_2020_report.pdf) (accessed Nov. 30, 2021).

#### **Authors**

Soloviev Sergey Leonidovich, Scientific Supervisor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: [LSoloviev@vniiaes.ru](mailto:LSoloviev@vniiaes.ru)

Zaryugin Denis Gennadievich, Project Leader, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: [DGZaryugin@rosatom.ru](mailto:DGZaryugin@rosatom.ru)

Kalyakin Sergey Georgievich, Director of Department, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: [SGKalyakin@vniiaes.ru](mailto:SGKalyakin@vniiaes.ru)

Leskin Sergey Terentievich, Head of Department, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: [STLeskin@mephi.ru](mailto:STLeskin@mephi.ru)