

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В РОССИИ

© 2023 г. С. Л. Соловьев<sup>a,\*</sup>, Д. Г. Зарюгин<sup>b,\*\*</sup>, С.Г. Калякин<sup>a,\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>АО “Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций”,  
Москва, Россия

<sup>b</sup>Государственная корпорация по атомной энергии “Росатом”, Москва, Россия

\*E-mail: SLSoloviev@vniiaes.ru

\*\*E-mail: DGZaryugin@rosatom.ru

\*\*\*E-mail: SGKalyakin@vniiaes.ru

Поступила в редакцию 09.11.2022 г.

После доработки 14.12.2022 г.

Принята к публикации 26.12.2022 г.

В статье рассматриваются 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. Представлены перспективы значительного расширения области применения атомных технологий благодаря модульности и возможности обеспечения высоких показателей безопасности. Проанализированы вероятные направления использования АСММ для энергоснабжения удалённых, в том числе арктических, территорий, производства высокопотенциального тепла и водорода для промышленных потребителей и другие применения. Показана необходимость разработки и внедрения новой технологической платформы атомной энергетики на основе АСММ для решения задач глобальной декарбонизации мировой экономики посредством значительного расширения области применения ядерных энерготехнологий в дополнение к разрабатываемой на данный момент технологической платформе замкнутого ядерного топливного цикла с реакторами на быстрых нейтронах и технологической платформе управляемого термоядерного синтеза. Авторы предлагают создать опытный полигон для отработки технологий “кэптивно-го” производства водорода (тепла) для промышленного потребителя, а также других технологий утилитарного применения АСММ на основе опытно-демонстрационной атомной энерготехнологической установки с высокотемпературным (около 1100°C) реактором на быстрых нейтронах с газовым теплоносителем.

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

DOI: 10.31857/S086958732302010X, EDN: FDMCZR



СОЛОВЬЕВ Сергей Леонидович – доктор технических наук, научный руководитель АО “ВНИИАЭС”. ЗАРЮГИН Денис Геннадьевич – кандидат технических наук, руководитель проектов ГК “Росатом”. КАЛЯКИН Сергей Георгиевич – доктор технических наук, руководитель департамента АО “ВНИИАЭС”.

С публикации в 1990 г. первого доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата, в котором акцент делался на опасности выбросов парниковых газов, дипломатические усилия направлялись на поиск международных рамок, в пределах которых такие выбросы могли бы регулироваться. Результатом стали Рамочная конвенция ООН об изменении климата (1992), Киотский протокол (1997) и Парижское соглашение по климату (2015), определявшие цели глобального сокращения выбросов парниковых газов. Возникли понятия низкоуглеродной и декарбонизированной экономики, а также призыв к глобальной декарбонизации [1]. Технические усилия по сокращению выбросов парниковых газов всё это время в основном направлялись на развитие “зелёной” энергетики на основе возобновляемых источников энергии, 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 энергетический кризис 2020–2022 гг. в США и Европе выявил системные проблемы возобновляемой энергетики: сложно одновременно обеспечить и заметное сокращение выбросов парниковых газов, и энергетическую надёжность энергосистем. В связи с этим значительное внимание сейчас уделяется атомной энергетике, которая признаётся “зелёной” уже подавляющим большинством стран.

Очевидно, что существующая атомная энергетика должна внести свой вклад в глобальную декарбонизацию, но он скорее всего будет ограничен, во-первых, из-за проблем с топливообеспечением и обращением с отработавшим ядерным топливом (на их решение направлено создание энерготехнологий замкнутого ядерного топливного цикла с реакторами на быстрых нейтронах), а во-вторых, из-за системной ограниченности применения существующей атомной энергетике больших мощностей только задачами производства электрической энергии. Необходимо принципиально расширить использование атомной энергетике на те области жизнедеятельности человека, которые недоступны атомной электроэнергетике больших мощностей. Речь идёт о распространении применения атомной энергетике в “неэлектрических” областях промышленности, коммунальном хозяйстве, медицине и т.д. Для данных применений востребованы малые энергомощности, обладающие в то же время существенно лучшими показателями безопасности (минимум на два порядка меньшими частотами плавления активной зоны и предельного выброса по сравнению с традиционными АЭС), такими, чтобы их можно было размещать непосредственно возле потребителя.

В то время как большинство развитых стран, в первую очередь Европы, под влиянием энергетического кризиса, вызванного неразумной монетарной политикой и антироссийскими санкциями, уже корректируют “зелёную” повестку, возвращая некоторую долю угольной генерации в свои энергетические балансы, проблемы изменения климата только усугубляются. Фактически сейчас Россия – одна из немногих стран, которые ещё способны решать глобальные задачи декарбонизации, причём со значительной выгодой для собственной экономики, благодаря своему лидерству в атомных технологиях и широким возможностям, открываемым широкомасштабным внедрением атомной энергетики малых мощностей. Её экономическая эффективность для России, помимо создания энергетической инфраструктуры освоения удалённых территорий с целью добычи природных ресурсов, обусловлена возможностью замещения природного газа. Высвобождающиеся его объёмы могут использоваться не только для сверхприбыльного в текущих условиях экспорта, но и в технологических процессах производства продуктов с высокой добавленной стоимостью, таких как удобрения, корма, пластмассы и другая высоколиквидная продукция газохимии.

#### ПРЕИМУЩЕСТВА МОДУЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ АСММ

По классификации Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) класс малых ядерных установок объединяет атомные станции малой мощности (АСММ), к ним относят установки электрической эквивалентной мощности менее 300 МВт [2–4]. Такие реакторы составляли основу ядерной энергетики на самых ранних этапах её развития, но затем возобладала тенденция к увеличению единичной мощности (для достижения экономических преимуществ, связанных с ростом масштаба), что привело к появлению проектов атомных электростанций мощностью 1000–1600 МВт. Именно они составляют основу современной мировой атомной энергетики.

В рамках принятого в конце 2000 г. МАГАТЭ международного проекта по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО) проводились исследования правового и институционального обеспечения атомных станций малой мощности [5, 6], было введено определение: “Транспортные атомные энергетические установки – это АСММ, жизненный цикл которых реализуется на единой транспортной платформе, а так же АСММ, монтируемые из транспортно-бальных модулей заводского изготовления на подготовленной площадке и таким же образом удаляемые с этих площадок”. Эта формулировка стала частным случаем предложенной летом 2013 г.

в ходе 6-го диалога-форума ИНПРО. Новое определение — “малые модульные реакторы” (small modular reactors) — используется для обозначения малой энергетики промышленного серийного производства [7, 8]. В целом реализация проекта ИНПРО позволила сформулировать требования к объектам малой атомной энергетики, включая инженерные и организационные решения, а также создать и апробировать методологию оценки соответствия установленным критериям устойчивого развития.

Модульная конструкция определяет следующие преимущества АСММ:

- снижение стоимости и сроков строительства за счёт более высокой степени заводского изготовления, эффекта серийности и сокращения строительных работ на площадке, в том числе благодаря подземному или заглублённому размещению;
- повышенные характеристики безопасности, в том числе естественной, за счёт смещения энергодбаланса между объёмным энерговыделением и поверхностным теплоотводом в сторону лучшего охлаждения при уменьшении размеров реактора (эти преимущества важны в случае проектной и запроектной аварии);
- снижение стоимости и сроков строительства за счёт оптимизации систем безопасности благодаря применению интегральной (блочной) компоновки первого контура, возможности полного отвода остаточных энерговыделений непосредственно от корпуса реактора;
- снижение стоимости и сроков строительства за счёт отказа от инфраструктуры обращения со свежим ядерным топливом, отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами на площадке размещения (если определено в проекте) и транспортировки АСММ для осуществления данных 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 в итоге увеличить топливную кампанию и экономическую эффективность;
- возможность более гибкой встраиваемости в существующие энергосистемы и запросы потребителей;
- более короткий срок начала отдачи инвестиций за счёт поэтапного ввода энергомодулей;
- возможность 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 полной остановки многомодульной станции;

- более низкие затраты (в том числе времени) на вывод из эксплуатации под “зелёную лужайку” благодаря возможности вывоза модулей целиком на завод для утилизации;

- возможность расширения рынка мирного применения атомной энергетики путём вовлечения в него тех сегментов, где ядерно-энергетические технологии пока не используются (в том числе благодаря возможности размещения в непосредственной близости от потребителя при повышенных характеристиках безопасности).

## ПРОЕКТЫ ЛИНЕЙКИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

К настоящему времени в России сложилось несколько востребованных направлений развития проектов АСММ в соответствии с их предназначением, спецификой требований заказчиков и потребителей.

**АСММ для тепло- и электроснабжения удалённых территорий**, в том числе изолированных посёлков и объектов в арктической зоне. Например, создание международных кроссполярных авиакоридоров над территорией России может иметь значительную коммерческую перспективу ввиду существенного сокращения пути. Так, протяжённость авиамаршрута Торонто—Гонконг при прохождении над полярными широтами сократится примерно на 20%, а время перелёта от Ванкувера до Дели — примерно на 3.5 ч. Подтверждена коммерческая эффективность трансполярных маршрутов как минимум 40 пар городов. Но в настоящее время пролёт воздушных судов над северными широтами России не имеет должного сопровождения, поэтому практически отсутствует в коммерческих масштабах. Такие полёты возможны при постоянном радиолокационном контроле со стороны наземных служб управления воздушным движением и наличии связи по всему маршруту в дополнение к спутниковой навигации, а для этого нужны надёжные и экономичные источники энергоснабжения соответствующего наземного оборудования. Внедрение АСММ для энергетической инфраструктуры кроссполярных авиакоридоров решает эту задачу. При этом оплата за наземное сопровождение перелётов может составлять не менее 1 долл. за километр.

В этом сегменте значительный потенциал внедрения имеют установки, обеспечивающие снабжение электрической и тепловой энергией удалённых посёлков и объектов, что, помимо создания энергетической инфраструктуры для промышленного освоения удалённых территорий, обеспечивает решение и экологических проблем,

особенно с учётом хрупкости арктической природы.

В числе определяющих требований к таким установкам укажем следующие:

- работа на локальный или местный (районный) сектор энергоснабжения<sup>1</sup> в расширенных режимах маневрирования мощностью;
- максимально возможный интервал между перегрузками топлива от 10 до 20 и более лет;
- когенерация электрической и тепловой энергии;
- экономическая эффективность по сравнению с другими источниками энергии (в основном с дизель-генерацией);
- наличие резервных дублирующих мощностей на случай отказа;
- эксплуатация с минимальным эксплуатационным персоналом или даже при его отсутствии (управление в этом случае осуществляется 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<sup>2</sup>);
- весогабаритные характеристики энергетических модулей, обеспечивающие транспортировку, в том числе на собственной транспортной платформе, на удалённые территории с учётом отсутствия транспортной инфраструктуры.

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

В предлагаемой концепции, вероятно, будет экономически оправданно применение химических (водородных) накопителей энергии для обеспечения экономически эффективных маневренных режимов [9], в первую очередь для установок сверхмалой мощности. При этом из накопленного водорода можно производить синтетическое моторное топливо по безуглеродной технологии, например аммиак из водорода и азота воздуха, или использовать водород непосредственно в транспортных средствах с водородными топливными элементами, что очень важно для удалённых посёлков и объектов, особенно в Арктике, где можно будет отказаться от северного завоза топлива и улучшить экологическую обстановку [10].

<sup>1</sup> Локальный – изолированный от энергосистем и других энергоисточников сектор энергоснабжения, состоящий из одного источника и одного или нескольких (энергоузлы) потребителей. Местный (районный) – централизованный сектор энергоснабжения, изолированный от единой энергосистемы и состоящий из нескольких источников и потребителей.

<sup>2</sup> Установки единичной эквивалентной электрической мощностью менее 10 МВт называют также атомными станциями сверхмалой мощности.

Подобные накопители могут выполнять и функции резервного источника энергии на случай аварии или отказа основного энергоисточника.

Внедрение проектов линейки АСММ для тепло- и электроснабжения удалённых территорий целесообразно начинать с арктических объектов специального назначения, поскольку, во-первых, для внедрения в гражданскую энергетику необходима референтность, которая наиболее быстро достижима на специальных объектах; во-вторых, при использовании имеющейся инфраструктуры специальных объектов появляется возможность сокращения затрат на физическую защиту для головного образца; в-третьих, для гражданских проектов АСММ отсутствует необходимая нормативная база, её созданию и внедрению будет способствовать успешный опыт эксплуатации АСММ на специальных объектах (головные образцы могут создаваться по соответствующим регистрам).

Тем не менее разработку проектов АСММ для энергоснабжения специальных объектов целесообразно сразу вести с учётом требований гражданской энергетики, в том числе экспорта. Кроме того, сервисная организация, обеспечивающая энергоснабжение специальных объектов, вероятно, не будет выступать эксплуатирующей организацией АСММ, на площадке спецобъекта возможна только покупка электрической и тепловой энергии по утверждённым тарифам. Такие АСММ станут по сути гражданскими объектами, их эксплуатацию будут осуществлять специалисты гражданской эксплуатирующей организации. Например, в США для энергообеспечения военной базы ВВС “Эйельсон” на Аляске планируется создание АСММ электрической мощностью 1–5 МВт. При этом атомная станция сверхмалой мощности будет находиться в коммерческой собственности, эксплуатироваться обученным персоналом владельца и лицензироваться Комиссией по ядерному регулированию (NRC). Таким образом, для обеспечения использования АСММ специальных и гражданских объектов на удалённых территориях (в Арктике) целесообразно создать самостоятельную эксплуатирующую организацию, так как принцип эксплуатации АСММ в режиме удалённого доступа отличается от регламентов, принятых на крупных энергетических объектах концерна “Росэнергоатом”.

**Атомные энерготехнологические станции малой мощности (АЭТСММ) для производства высокопотенциального тепла и “кэптивного” водорода для промышленных потребителей.** Металлургия, химическая, нефтехимическая промышленности и ряд других отраслей потребляют большие количества высокопотенциальной тепловой энергии (с температурой свыше 700°C), используемой в тех-

нологических процессах. Например, прямое восстановление железа синтезгазом на основе водорода происходит при температуре свыше 700°C, а с использованием наиболее распространённой в мире технологии Midrex (США) – при температуре около 1100°C. В настоящее время тепловая энергия для этих нужд производится в основном за счёт сжигания ископаемых углеводородных видов топлива (уголь, газ, мазут и т.д.), что сопровождается значительным загрязнением окружающей среды как парниковыми газами, так и другими продуктами сгорания топлива.

Кроме того, многие предприятия металлургической (получение сверхчистых металлов, бездоменная технология получения стали методом прямого восстановления из руды водородом и др.), химической, нефтехимической (очистка и крекинг нефти), фармацевтической и других отраслей промышленности потребляют значительное количество водорода в технологическом цикле. Сегодня этот газ производится преимущественно непосредственно на площадке крупного промышленного потребителя методом паровой конверсии метана, при этом до 50% метана сжигается для обеспечения необходимых температур, что сопровождается выбросом парниковых газов [11, 12].

В основном мощность подобного captive<sup>3</sup> производства водорода на площадке промышленного потребителя составляет от 10 до 150 тыс. т/год, что вполне может быть получено на АЭТСММ. Так, Омский нефтеперерабатывающий завод АО «Газпром нефть» производит 12.3 тыс. т/год водорода, ПАО «Акционерная нефтяная компания «Башнефть» – 153 тыс. т/год, Оскольский электрометаллургический комбинат им. А.А. Угарова («Металлоинвест») – 250 тыс. т/год.

Применение АЭТСММ для снабжения крупных промышленных потребителей высокопотенциальным теплом и водородом может быть экономически оправдано по следующим причинам:

1) отсутствие выбросов в окружающую среду как на глобальном (парниковые газы, выброс которых может быть в скором времени жёстко квотирован международным законодательством), так и на местном уровне (загрязнение 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);

2) отсутствие сильной волатильности мировой цены на ядерное топливо приводит к стабильности, предсказуемости и лучшей планируемости

<sup>3</sup> Кaptiveный водород (от англ. captive – пленник) производится предприятиями для собственного потребления.

промышленной деятельности как с технологической, так и с экономической точек зрения;

3) снижение зависимости поставок критически важных для технологических процессов материалов от сторонних поставщиков и внешней конъюнктуры.

Возможно либо централизованное производство водорода на крупной атомной энерготехнологической станции с промежуточным хранением и транспортировкой промышленным и иным потребителям, либо captiveное – на АЭТСММ непосредственно на площадке крупного потребителя. При централизованном производстве наибольшую долю в конечной цене водорода для потребителя (до 70%) составляют операции по его хранению и транспортировке, что объясняется физическими свойствами газа (низкая плотность, низкая температура сжижения, высокая энергия взрыва и т.д.), соответственно экономически эффективно исключить эти операции из технологической схемы и производить водород непосредственно возле потребителя. Кроме того, при хранении и транспортировке по трубопроводам, в ёмкостях под давлением либо другими известными на сегодня способами существует значительная вероятность утечки водорода в окружающую среду из-за его высокой текучести, и этот фактор обязательно нужно учитывать, особенно при больших объёмах его производства, поскольку водород относится к парниковым газам.

Таким образом, ввиду отсутствия экономически и технологически приемлемых технологий хранения и транспортировки водорода более эффективно размещать ядерный источник для его производства на площадке промышленного потребителя (опасный объект), который, в свою очередь, сам очень часто располагается в непосредственной близости от крупных промышленных городов. Очевидно, что при использовании ядерного источника с целью производства высокопотенциального тепла для нужд промышленности возможно его размещение только на площадке потребителя. Это, как и размещение потенциально опасного производства рядом с АЭС, в настоящее время запрещено международными стандартами безопасности в области использования атомной энергии, а также внутрисоюзскими нормами и правилами. Следовательно, чтобы ядерный энергоисточник высокопотенциальной тепловой энергии был допущен к размещению в непосредственной близости от промышленного потребителя, он должен обладать на порядки лучшими показателями безопасности, чем существующие энергоблоки (минимум на два порядка меньшими частотами плавления активной зоны и предельного выброса по сравнению с традиционными АЭС).

Кроме указанных основных направлений развития АСММ, существуют и другие, со своими требованиями к этим установкам [13]: АСММ для замещения угольной генерации; 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 [14]; для энергоснабжения буровых платформ [15]; АСММ медицинского назначения для проведения нейтрон-захватной и нейтрон-соударной терапии раковых заболеваний непосредственно в лечебном учреждении [16]; АСММ для дожигания минорных актинидов и т.д.

В настоящее время в мире реализуются около 70 проектов АСММ, которые технологически можно разделить на два направления [17, 18].

Первое. Эволюционное развитие водо-водяных, в том числе кипящих, ядерных энерготехнологий поколения 3+, недостаточно полно отвечающих требованиям потребителей, но имеющих практический опыт эксплуатации (референтность) и возможность более быстрого выхода на рынок (CAREM, NuScale, ACP-100, IRIS и др.).

Второе. Разработка на основе энерготехнологий 4-го поколения, в том числе газовых, жидко-солевых, жидкометаллических и др., по своим свойствам более полно отвечающих потребностям потребителей, особенно в части повышенных требований по безопасности с возможностью функционирования в замкнутом ядерном топливном цикле, но не имеющих достаточной референции и отличающихся более длительным сроком появления коммерческого продукта (4S, HTR-PM, IMSR400, Rolls-Royce SMR, S-ПРИЗМА и др.).

В основном зарубежные проекты нацелены на замещение угольной генерации и создание распределённой генерации электроэнергии.

## ПУТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛАГАЕМОЙ КОНЦЕПЦИИ

Для реализации предложенных подходов представляется целесообразным разработать установки на базе энерготехнологий поколения 4, включая *создание опытно-демонстрационного полигона на основе исследовательской атомной энерготехнологической установки (ИАЭТУ)* для отработки технологий производства промышленного тепла и кэптивного водорода для промышленных потребителей. На опытном полигоне необходимо отработать следующие технологии:

- АСММ для производства безуглеродного кэптивного водорода (тепла) и электричества, включая нормативную базу и обоснование конструктивных материалов;

- 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 отработанных скважин.

ИАЭТУ должна быть тепловой мощности не менее 60 МВт, с температурой теплоносителя на выходе из активной зоны около 1100°C, обладать повышенными характеристиками безопасности и экономичностью. Для этих целей больше других подходит высокотемпературный газоохлаждаемый реактор на быстрых нейтронах (в качестве прототипа – ядерная энергодвигательная установка мегаваттного класса, разработанная АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежала»), с гелий-ксеноновой смесью в качестве теплоносителя и молибденовым сплавом ТСМ-7 в качестве конструкционного материала [19, 20]. Опытное производство карбонитридного уранового топлива для ядерной энергодвигательной установки создано совместно АО «НИИ НПО «Луч» и АО «ГНЦ РФ Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского» и может быть использовано в целях получения топлива для ИАЭТУ.

В настоящее время концерном «Росэнергоатом» разрабатывается высокотемпературная газовая технология на тепловых нейтронах (с температурой газового теплоносителя 750°C) для широкомасштабного коммерческого производства водорода на атомных энерготехнологических станциях методом паровой конверсии метана. По сравнению с ней высокотемпературная быстрая газовая технология имеет ряд преимуществ: более высокий уровень температуры теплоносителя на выходе из активной зоны (1100°C), позволяющий реализовывать экономически и экологически эффективные технологии высокотемпературного электролиза воды и высокотемпературных термохимических циклов её разложения, а также обеспечивать промышленных потребителей высокопотенциальным теплом; более компактная активная зона; более высокая степень ядерной безопасности и отсутствие загрязнения углеродом-13; возможность работы в замкнутом ядерном топливном цикле.

Необходимо определиться с площадкой размещения опытного полигона для отработки технологий кэптивного производства водорода,

высокопотенциального тепла и других промышленных применений на основе исследовательской атомной энерготехнологической установки. С точки зрения предназначения установки возможные площадки её размещения – “Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика А.И. Забабахина”, где предполагается создать сертификационный центр водородных технологий мирового уровня и сформировать научный коллектив по водородным технологиям, либо упоминавшийся Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, обладающий необходимой площадкой, исследовательской инфраструктурой, квалифицированным эксплуатационным персоналом, высвобождающимся при выводе из эксплуатации исследовательских реакторов АМ и БР-5 (10), а также научным персоналом, способным обеспечить успешную отработку вышеперечисленных и других технологий.

Создание *жидкосолевого реакторной установки с естественной циркуляцией топливной соли на основе FLiBe с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую мощностью до 500 кВт* на основе предложений НИЦ “Курчатовский институт” [21, 22] целесообразно рассмотреть в рамках задачи формирования энергетической инфраструктуры освоения удалённых территорий, включая Северный морской путь и трансарктические перелёты. Эта установка имеет ряд преимуществ, отвечающих требованиям к АСММ для тепло- и электроснабжения удалённых территорий:

- возможность работы без перегрузки топлива не менее 20–30 лет;
- высокая (до 700°C) температура топливной соли позволяет получить КПД преобразования тепловой энергии в электрическую до 10% с использованием каскадных сегментированных термоэлектрических преобразователей;
- отсутствие механически движущихся частей позволяет эксплуатировать установку дистанционно без персонала;
- отсутствие персонала позволяет применять шахтное размещение установки, изолированное от проникновения извне, с заменой постоянной охраны на спутниковое наблюдение;
- возможность использования установки в сочетании с двигателем Стирлинга<sup>4</sup>;
- масса единичного модуля не более 20 т (грузоподъёмность транспортного вертолёта) позволяет расширить географию размещения с достав-

<sup>4</sup> Двигатель Стирлинга – тепловая машина, в которой рабочее тело в виде газа или жидкости движется в замкнутом объёме, разновидность двигателя внешнего сгорания.

кой на завод-изготовитель для замены топлива и вывода из эксплуатации.

Важно, что сейчас имеются рассчитанные на длительный ресурс конструкционные материалы на основе никеля для жидкосолевых реакторов с температурой топливной соли до 700°C. Это разработанные в США модифицированный сплав Хастеллой-Н и его российские аналоги ХН80МТЮ, ХН80МТЮБ, НМ20В3-ВИ и НМ20Ч3-ВИ, также хорошие результаты показали молибденовые сплавы МР47У-ВД и МВ10У-ВД.

На более долгосрочную перспективу, при появлении эффективных технологий хранения и транспортировки водорода, а также новых конструкционных материалов, целесообразно рассмотреть создание *высокотемпературного натриевого реактора большой мощности с температурой натрия на выходе из активной зоны 950°C* для централизованного безуглеродного коммерческого производства водорода методом высокотемпературного электролиза воды либо методом высокотемпературного термохимического цикла разложения воды [23].

Преимущества высокотемпературной натриевой технологии по сравнению с упоминавшейся высокотемпературной газовой технологией на тепловых нейтронах, разрабатываемой концерном “Росэнергоатом”, состоят в следующем: 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); более высокая температура теплоносителя, позволяющая реализовывать экономически и экологически эффективные технологии высокотемпературного электролиза воды и высокотемпературных термохимических циклов разложения воды; более высокая степень ядерной безопасности и отсутствие загрязнения углеродом-13; возможность работы в замкнутом ядерном топливном цикле. Главное достоинство натриевой технологии – возможность обеспечить естественную безопасность при минимизации систем безопасности, за счёт высокоэффективного отвода тепла конвекцией и теплопроводностью от ТВЭЛов к стенке корпуса и далее радиационно-конвективным теплообменом к атмосферному воздуху при оптимальном соотношении интенсивности объёмного энерговыделения к поверхностному теплоотводу. Выполненные расчёты показывают, что для АСММ надёжный теплоотвод осуществляется уже при температуре натрия не более 550°C.

Реализация предложенных проектов должна осуществляться на цифровой платформе с привлечением технологии цифрового двойника. Для этой задачи наиболее эффективно использовать цифровую платформу ЛОГОС, разработанную «Российским федеральным ядерным центром — Всероссийским научно-исследовательским институтом ядерной физики», как наиболее продвинутую в данной области и отвечающую современным требованиям.

\* \* \*

Развитие всей востребованной линейки атомных станций малой мощности — разносторонняя и достаточно затратная задача, её решение невозможно обеспечить силами одной госкорпорации «Росатом». Необходимо также принять во внимание разнообразие реакторных технологий, удовлетворяющих требованиям для разных применений АСММ. Решение задачи подобного масштаба возможно только в рамках стратегической программы госкорпорации «Росатом» на базе широкой внутрироссийской кооперации с «Ростехом», «Газпромом», «Роснефтью», металлургическими корпорациями и др., создания международных консорциумов с дружественными странами, как предложено академиком РАН Е.П. Велиховым в МАГАТЭ в 2008 г. [24].

Как было показано выше, для задачи кэптивного производства водорода и высокопотенциального тепла для промышленности предпочтительна высокотемпературная газовая установка на быстрых нейтронах, благодаря которой можно достичь требуемых технологических параметров и параметров безопасности. Однако сегодня как российскими, так и международными нормативами не допускается строительство объектов, использующих атомную энергию, непосредственно на территории опасных производств. Отсутствует нормативная база, требования к размещению, критериям и показателям безопасности и т.д. Отсутствуют также сертифицированные для применения на АЭС материалы, способные выдержать такого уровня температуры в присутствии агрессивных сред под действием излучения (кандидатные материалы существуют). Следовательно, реализацию нового направления следует начинать с создания опытно-демонстрационного полигона с исследовательской атомной энерготехнологической установкой, на которой можно обеспечить решение сложных вопросов. Для широкомасштабного централизованного коммерческого производства водорода по безуглеродной технологии более других подходит высокотемпературный натриевый реактор, а для инфраструктурных задач развития удалённых территорий — жидко-солевой реактор.

Таким образом, полномасштабное внедрение линейки АСММ в различных сферах жизнедеятельности человека для замещения технологий, использующих органическое сырьё, с целью глобальной декарбонизации мировой экономики и существенного снижения выбросов парниковых газов, представляет собой самостоятельную новую технологическую платформу атомной энергетики в дополнение к разрабатываемым на данный момент двум технологическим платформам — замкнутого ядерного топливного цикла с реакторами на быстрых нейтронах и управляемого термоядерного синтеза.

Создание новой технологической платформы на основе линейки АСММ потребует разработки и принятия стратегической программы госкорпорации «Росатом» по данному направлению.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Clark M.A., Domingo N.G.G., Colgan K. et al. Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets // Science. 2020. V. 370. Iss. 6517. P. 705–708.
2. Status of Innovative Small and Medium Sized Reactor Designs 2005: Reactors with Conventional Refuelling Schemes / Intern. Atomic Energy Agency. Vienna, 2006 (IAEA-TECDOC-1485).
3. Status of Small Reactor Designs without On-site Refueling / Intern. Atomic Energy Agency. Vienna, 2007. (IAEA-TECDOC-1536).
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 / Intern. Atomic Energy Agency. Vienna, 2010 (IAEA-TECDOC-1652).
5. Сборник материалов и результатов исследования вопросов правового и институционального обеспечения транспортабельной атомной энергетики / Госкорпорация «Росатом», НИЦ «Курчатовский институт». М.: НИЦ «Курчат. ин-т», 2013.
6. Кузнецов В.П. Жизненный цикл транспортабельных атомных энергетических установок и отдельные вопросы его правового и институционального обеспечения // Отчёт международного проекта ИНПРО. Вып. 3 / РИЦ КИ. М., 2009.
7. Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment. OECD-NEA.org. 2016.
8. Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities. OECD-NEA.org. 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 Второй Международной конференции «Технологии хранения водорода» (Москва, 28–29 октября 2009 г.). 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. 32–44.
11. *The Hydrogen Economy. Opportunities and Challenges.* Cambridge University Press, 2009.
12. *Журавлёв И.Б., Залужный А.А., Птицын П.Б.* Техничко-экономические исследования (ТЭИ) по теме приоритетного направления научно-технического развития “Водородная энергетика” // М.: ЦАИР, частное учреждение “Наука и инновации”, 2021.
13. *Соловьев С.Л., Зарюгин Д.Г., Калякин С.Г., Лескин С.Т.* Определение основных направлений развития атомных станций малой мощности // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2022. № 1. С. 22–31.
14. *Rouillard J., Rouyer J.* Technical and Economic Evaluation of Potable Water Production Through Desalination of Sea Water by Using Nuclear Energy and Other Means // Intern. Atomic Energy Agency. Vienna, 1992. (IAEA-TECDOC-666).
15. Сборник работ лауреатов международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа. М.: Министерство энергетики Российской Федерации, ООО “Технологии развития”, 2014.
16. *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.
17. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments.* 2018 Edition. IAEA. [https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book\\_2018.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book_2018.pdf)
18. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A supplement to: IAEA Advances Reactors Information System (ARIS), 2020 Edition, IAEA, Vienna.* [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf)
19. *Драгунов Ю.Г.* Быстрый газоохлаждаемый реактор для космической ЯЭДУ мегаваттного класса // Конф. “Инновации в атомной энергетике – 2014”. М.: НИКИЭТ, 2014.
20. *Ловцов А.С., Селиванов М.Ю., Томилин Д.А. и др.* Основные результаты разработок Центра Келдыша в области ЭРДУ // Известия РАН. Энергетика. 2020. № 2. С. 3–15.
21. *Ковальчук М.В., Чайванов Б.Б., Абалин С.С., Фейнберг О.С.* Ядерный источник на жидких солях для Арктики // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2018. Вып. 1. С. 61–69.
22. *Ковальчук М.В., Чайванов Б.Б., Абалин С.С. и др.* К вопросу выбора ядерного энергоисточника для Арктики // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2020. Вып. 3. С. 4–12.
23. *Сорокин А.П., Калякин С.Г., Козлов Ф.А. и др.* Высокотемпературная ядерная энерготехнология на основе быстрых реакторов с натриевым теплоносителем для производства водорода // Атомная энергия. 2014. Т. 116. Вып. 4. С. 194–203.
24. *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. May 2008.