

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”

АТОМНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

© 2021 г. Н. Н. Пономарёв-Степной

Акционерное общество “Концерн Росэнергоатом”, Москва, Россия

E-mail: niknik-28@mail.ru

Поступила в редакцию 09.02.2021 г.

После доработки 15.02.2021 г.

Принята к публикации 22.02.2021 г.

Статья, подготовленная по материалам доклада на Общем собрании членов РАН 8 декабря 2020 г., базируется на исследованиях, выполнявшихся в нашей стране с 1970-х годов по программе “Водородная энергетика”, которая координировалась Комиссией по водородной энергетике АН СССР. Работы шли в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова в тесной кооперации с исследовательскими, конструкторскими, технологическими и промышленными предприятиями Министерства среднего машиностроения, общего машиностроения, энергетике, химической промышленности, чёрной металлургии, авиационной промышленности и Академии наук СССР. Концепция водородной энергетике с атомным производством водорода получила название “атомно-водородная энергетика”. Актуальность этой проблемы сегодня и имеющийся задел исследований и технологических разработок открывают путь для реализации в нашей стране атомно-водородной энергетике, признанной приоритетным направлением научно-технологического развития Госкорпорации “Росатом”.

Ключевые слова: водород, производство и использование водорода, атомно-водородная энергетика, безопасность водородной энергетике, международное сотрудничество, высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы с гелиевым теплоносителем, атомные энерготехнологические станции с ВТГР.

DOI: 10.31857/S0869587321050194

Рост энергопотребления и тренд на декарбонизацию стимулируют становление нового технологического уклада – водородной энергетике, подразумевающей производство и потребление водорода в качестве энергоносителя, накопителя энергии и компонента промышленных технологий.

Анализ динамики глобального энергопотребления и соотношения удельного потребления

первичной энергии развитых и развивающихся стран показывает существенное изменение этого соотношения за последние полвека [1] (рис. 1). Примерно в середине прошлого столетия удельное потребление первичной энергии в развитых и развивающихся странах отличалось более чем в 20 раз. В 1990-х годах эта разница сократилась до 10 раз. Происходит сближение уровня энергопотребления в разных странах мира, и эта тенденция будет сохраняться. Выравнивание идёт не за счёт перетока энергии из развитых стран, а путём опережающего наращивания энергопотребления развивающимися странами. При сохранении этого тренда с учётом роста населения глобальные потребности в энергии могут вырасти в 2–3 раза к середине века. Наряду с наращиванием использования первичных энергетических ресурсов следует ожидать изменения технологического уклада. Одним из признаков таких изменений станет использование водорода как более приспособленного источника энергии по сравнению с электричеством для энергоснабжения рассредоточенных



ПОНОМАРЁВ-СТЕПНОЙ Николай Николаевич – академик РАН, научный консультант генерального директора АО “Концерн Росэнергоатом”.

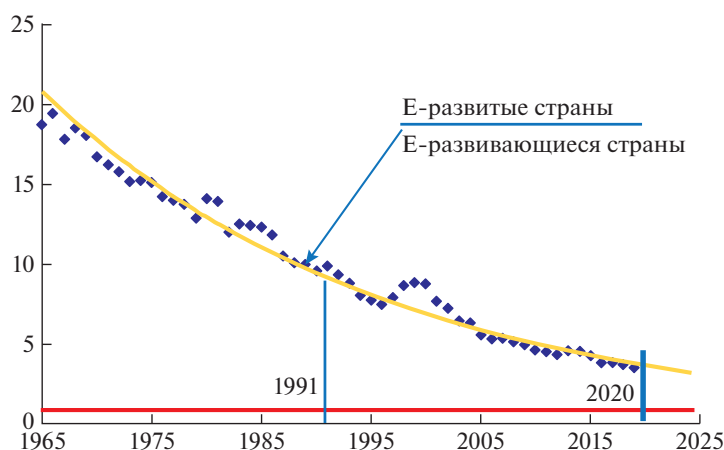


Рис. 1. Отношение удельного потребления энергии в развитых и развивающихся странах

потребителей. Замещение водородом углеродных топлив обеспечит выполнение требований декарбонизации. Наиболее эффективной эта тенденция может оказаться для экономики развивающихся стран.

Масштабное развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ) — солнца, ветра — с учётом характерных для них низких коэффициентов использования установленной мощности (КИУМ) требует сочетания с накопителями энергии. Водород как накопитель энергии — наиболее эффективное средство для выполнения этих задач. Причём интересен он в сочетании с АЭС, требования к регулированию мощности которых будут со временем ужесточаться.

Выполнение требований декарбонизации особенно важно для транспортных систем — автомобилей, автокаров, судов, поездов, авиации и ракет. Здесь водород будет конкурировать с аккумуляторами электроэнергии, и его использование может оказаться предпочтительным. Кроме того, будет возрастать роль водорода как химического элемента в промышленных технологиях — нефтепереработке, нефтехимической и химической промышленности (метанол, этилен, аммиак, удобрения, полимеры), металлургии (прямое восстановление и получение чистых металлов).

Таким образом, водород и его переделы — востребованный товар. При этом ключевой проблемой водородной энергетики остаётся экологически чистое производство водорода с использованием таких же безуглеродных источников энергии. Применение атомной энергии не только для производства электроэнергии и тепла, но и водорода кардинально решает данную проблему.

БАЗА ЗНАНИЙ АТОМНО-ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Основа технологий, необходимых для водородной энергетики, была заложена на первой стадии Атомного проекта. Уже в 1947 г. начался поиск путей применения реакторов для энергетических целей [1]. В 1947–1948 гг. специалисты представили первые предложения по использованию высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) с гелиевым теплоносителем для АЭС, флота и авиации. С 1950 г. начались систематические исследования по созданию атомных самолётов, ядерных ракетных двигателей, а затем и космических ядерных установок [2, 3]. Для атомных самолётов были проработаны прямоточные и турбореактивные двигатели с высокотемпературными реакторами для нагрева воздуха. В середине 1950-х годов специалисты приступили к созданию ядерных ракетных двигателей (ЯРД) с использованием в качестве рабочего тела водорода. Созданы реакторы и стенды для испытаний тепловыделяющих элементов и тепловыделяющих сборок реакторов ЯРД — ИГР и ИВГ-1, а также стендовый вариант реактора ЯРД минимальных размеров — ИРГИТ (рис. 2). При испытаниях на ИГР, ИВГ-1 и ИРГИТе были получены важные результаты: плотность тепловыделения в твэлах достигала 30 кВт/см^3 , температура нагрева водорода — до 3100 К , суммарное время испытаний многих тепловыделяющих сборок составляло 4000 с. Реактор ИРГИТ работал на мощности 90 МВт при температуре водорода 3000 К . США, разработав и испытав более десяти полноразмерных реакторов, не смогли получить таких параметров.

В начале 1960-х годов были развёрнуты работы по прямому преобразованию тепловой энергии ядерного реактора в электричество для космических целей с использованием термоэлектриче-

ских и термоэмиссионных преобразователей. Эти реакторы прошли испытания на стендах и нашли применение в космических аппаратах.

Исследования выполнялись специалистами Института атомной энергии им. И.В. Курчатова (ныне – НИЦ “Курчатовский институт”) в кооперации с исследовательскими, конструкторскими, технологическими и промышленными предприятиями ряда министерств – среднего машиностроения, общего машиностроения, энергетики, химической промышленности, чёрной металлургии, авиационной промышленности и Академии наук СССР. Широко известна фотография “Три К” (И.В. Курчатов, С.П. Королёв, М.В. Келдыш), символизирующая сотрудничество атомной и космической отрасли с Академией наук, уникальные результаты которого могут пригодиться и сегодня при разработке технологий водородной энергетики.

С 1960-х годов в Курчатовском институте на основе анализа путей развития энергетики, структуры глобальной энергетики, топливных балансов и ресурсов топлива формулировалась стратегия долгосрочного развития атомной энергетики, её место в энергетике страны и мира и структура крупномасштабной атомной энергетики будущего. Была обоснована многокомпонентная структура атомной энергетики, включающая замкнутый топливный цикл с расширенным воспроизводством топлива в реакторах-бридерах (их ещё называют реакторами-размножителями), использование избыточного топлива, нарабатываемого бридерами в тепловых реакторах, расширение областей использования ядерной энергии помимо электричества.

В середине 1970-х годов по инициативе президента Академии наук СССР директора Института атомной энергии им. И.В. Курчатова академика А.П. Александрова совместно с рядом министерств и ведомств была разработана и принята программа научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по широкому внедрению водородной энергетики в народное хозяйство [4–6]. Концепция водородной энергетики с атомным производством водорода получила название “атомно-водородная энергетика” [7]. Она предусматривала расширение использования ядерной энергетики для энергоёмких отраслей химической, металлургической, строительной, топливной промышленности, теплоснабжение распределённых потребителей с хемотермической передачей энергии и, конечно, крупномасштабное производство пресной воды.

Основываясь на опыте начальных этапов разработки высокотемпературных реакторов для специальных назначений и энергетики, были подготовлены проекты опытно-промышленных установок с высокотемпературными гелиевыми



Рис. 2. Реактор ИРГИТ

реакторами (ВГР-50, ВГ-400, ВГМ-200, МВГР-ГТ, ВТГР-10) в широком диапазоне мощностей, модульные и блочные конструкции, рассмотрены конструкции реакторов в металлическом и железобетонном корпусах. Проектно-конструкторские работы сопровождались экспериментально-стендовой отработкой технических решений и основного оборудования. С этой целью в институтах и конструкторских бюро была создана лабораторная и стендовая база. Особое внимание уде-

лялось исследованиям, разработке и испытаниям тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ) на основе микротоплива, размещаемого в графитовой матрице. На опытно-промышленном производстве было изготовлено около 100 тыс. шаровых ТВЭЛОВ.

Для решения проблемы расширенного воспроизводства топлива рассматривались гелиевые бридеры с минимальным временем удвоения ядерного топлива. Выполнены проекты реакторов модульной и блочной концепции [8].

Разработки, связанные с созданием атомной энерготехнологической станции (АЭТС) с ВТГР, выполненные Курчатовским институтом, институтами и КБ Минсредмаша (ОКБМ, ПНИТИ, НИКИЭТ, ВНИПИЭТ и др.), Министерства химической промышленности СССР и Министерства чёрной металлургии СССР, послужили основой для принятия Постановления Совета министров СССР № 794-191 от 16 июля 1987 г. “О создании и внедрении в народное хозяйство атомных энерготехнологических комплексов на базе ВТГР” (Димитровград, Кирово-Чепецк, Котлас, Новополюцк и Нижнекамск). База данных суммирована Курчатовским институтом в публикациях серии “Атомно-водородная энергетика и технология” [9] и в монографиях серии “Физико-технические проблемы ядерной энергетика”.

Наряду с созданием технологий атомного производства водорода, шли работы по различным направлениям его использования. Так, в рамках программы по водородной энергетике, КБ Туполева совместно с рядом НИИ и КБ авиационной промышленности создало Ту-155 – летающую лабораторию, использующую в качестве топлива жидкий водород. На Ту-155 был установлен экспериментальный турбореактивный двухконтурный двигатель НК-88, созданный под руководством академика Н.Д. Кузнецова. Топливный бак, вмещавший 17,5 м³ сжиженного газа, находился в хвостовой части фюзеляжа в постоянно продуваемом отсеке. Бак, трубопроводы и агрегаты топливного комплекса имели экранно-вакуумную изоляцию, обеспечивавшую заданные теплопритоки. Для обслуживания самолёта был разработан авиационный криогенный наземный комплекс, позволяющий проводить различные виды испытаний с использованием большого количества криогенной жидкости. Начиная с 1988 г. выполнено более 100 полётов, из них пять – на жидком водороде.

В 1973 г. в Тульском филиале ЦНИИчермета им. И.П. Бардина были созданы лаборатория по использованию атомной энергии в чёрной металлургии и лаборатория прямого получения железа в твёрдой фазе.

В 2001 г. АвтоВАЗ в сотрудничестве с Уральским электрохимическим комбинатом при уча-

стии РКК “Энергия” разработал водородомобиль “Антэл-1” на базе ВАЗ-2131 “Нива”.

В декабре 2003 г. стартовала Комплексная программа поисковых, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по водородной энергетике и топливным элементам, разработанная Российской академией наук и компанией “Норильский никель”, которая предусматривала кооперацию более чем 50 научно-исследовательских институтов РАН, Курчатовского института, Ракетно-космической корпорации “Энергия” им. С.П. Королёва, Исследовательского центра им. М.В. Келдыша, МГУ им. М.В. Ломоносова и других учреждений для производства конкурентоспособных энергетических установок с использованием водородных технологий.

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В ОБЛАСТИ ВТГР

В ходе разработки проектов высокотемпературных газовых реакторов большое внимание уделялось международному сотрудничеству с МАГАТЭ и взаимодействию с ведущими научными центрами и фирмами разных стран. Российские специалисты активно участвовали в мероприятиях Технической рабочей группы по газоохлаждаемым реакторам (ТРГ-ГР), которая была создана МАГАТЭ в 1978 г. для содействия обмену технической информацией, координации исследований и международного сотрудничества в области газоохлаждаемых реакторов.

Международный форум “Поколение IV” (МФП) – инициатива, которая объединяет 13 стран, ориентирующихся на развитие ядерно-энергетических технологий следующего поколения, – включает проект по базовым НИОКР ВТГР: топливо и топливный цикл; материалы; компьютерные методы, валидация и бенчмаркинг; производство водорода. Актуальность присоединения России к МФП в сфере высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов обуславливается решениями Госкорпорации “Росатом” о развитии нового стратегического направления “Водородная энергетика”, ключевым компонентом которого является крупномасштабное производство водорода на основе ВТГР для России и на экспорт. Обмен такой информацией будет способствовать расширению базы знаний по ВТГР, а также снижению технического риска и сроков при разработке водородных технологий в нашей стране.

Приведу несколько примеров успешного взаимодействия с ведущими научными центрами и энергетическими компаниями различных стран по вопросам ВТГР.

Одна из целевых задач проекта реактора HTR-Modul, реализуемого с 1988 г. в сотрудничестве с

Siemens-KWU/Interatom (Германия), – сократить объём активных систем защиты, используя присущие ВТГР свойства безопасности, в частности, устойчивость к авариям типа RIA (Reactivity Initiated Accident), при которых происходит неконтролируемое введение избыточной реактивности в активную зону из-за неисправности системы регулирования или других причин, и LOCA (Loss of Coolant Accident), когда происходит потеря теплоносителя при мгновенном разрыве трубопровода первого контура ядерной энергетической установки. HTR-Modul мощностью 200 МВт(т) предназначен для производства технологического тепла различных промышленных систем. Результаты этого сотрудничества нашли практическое применение при разработке технического проекта реакторной установки ВГМ мощностью 200 МВт(т), выполненного в 1992 г. с экспериментальной отработкой основного оборудования на гелиевых стендах.

К одним из наиболее продвинутых относится международный проект модульного высокотемпературного газоохлаждаемого реактора с прямым газотурбинным циклом ГТ-МГР мощностью 600 МВт, который разрабатывался с 1998 по 2012 г. совместными усилиями российских институтов и компании “General Atomics” (США) с участием “Framatome” (Франция) и “Fuji Electric” (Япония). В рамках международного сотрудничества удалось усовершенствовать ряд отечественных проектов ВТГР, восстановить кооперацию российских предприятий, восполнить компетенции по ключевым компонентам, включая расчётные коды. Технические решения ГТ-МГР были использованы при разработке проекта МГР-Т, предназначенного для генерации электроэнергии, тепла и водорода на базе четырёх модульных высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов единичной мощностью 600 МВт. Концептуальный проект и его экономическое обоснование завершены в 2004 г.

В 1998 г. южноафриканская энергетическая компания “Escom” выразила заинтересованность в кооперации с российскими специалистами по проекту модульного высокотемпературного реактора с шаровыми твэлами РВМР. В рамках двустороннего сотрудничества российской стороной были выполнены работы по концепции топлива ВТГР, технологиям изготовления и реакторным испытаниям шаровых твэлов. В НИЦ “Курчатовский институт” на критическом стенде “Астра” прошли экспериментальные исследования нейтронно-физических характеристик высокотемпературного газоохлаждаемого реактора с кольцевой активной зоной.

С 2002 г. совместно с научными центрами Комиссариата по атомной энергии Франции (СЕА) идут системные исследования быстрых реакторов

с гелиевым теплоносителем и областей неэлектрического применения газоохлаждаемых реакторов, в частности, изучены различные способы производства водорода и эффективность технологий атомно-водородной энергетики; рассмотрены технологии передачи тепла от реактора к комплексу по производству водорода; проанализированы вопросы безопасности, связанные с взаимным влиянием реактора и технологического производства.

Во исполнение решений Российско-Китайской подкомиссии по ядерным вопросам проходят регулярные встречи специалистов пекинского Института ядерно-энергетических технологий (INET) и российских организаций по сотрудничеству в сфере ВТГР. Стороны обмениваются мнениями и определяют приоритетные направления исследований в этой области.

МИРОВОЕ РАЗВИТИЕ ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Государства – признанные технологические лидеры в разработке и внедрении технологий водородной энергетики, базируясь на обнадёживающих результатах фундаментальных и поисковых исследований, первых демонстрационных проектах, в 1990-е–начале 2000-х годов запустили в своих странах полномасштабные долгосрочные программы развития водородной энергетики. Такие национальные программы и/или зафиксированные меры поддержки этого направления сегодня имеют более 30 стран [10–14].

В 2020 г. Еврокомиссия разработала и представила на утверждение Европарламенту важнейший документ “Водородная стратегия для климатически нейтральной Европы” [15]. Согласно стратегии, на первом этапе (до 2024 г.) планируется установить в ЕС как минимум 6 ГВт генерирующих установок (электролизёров) с использованием ВИЭ. С 2025 по 2030 г. производство водорода планируется повысить до 10 млн т. Водород, по мнению Еврокомиссии, должен стать неотъемлемой частью интегрированной энергосистемы и применяться в отраслях, где электрификация на основе ВИЭ невозможна, дороже или менее эффективна, в частности, на транспорте и в промышленности.

Германия, весьма успешно разрабатывающая и экспортирующая технологии по производству водорода и технологии Power-to-X, при которых электрическая энергия используется для производства иных энергоносителей, например водорода, ставит перед собой задачу стать мировым лидером в данной области. Федеральное правительство этой страны оценивает потребность в водороде в 90–110 ТВт · ч к 2030 г. Для достижения таких показателей необходимо построить до

2030 г. генерирующие установки общей мощностью 5 ГВт, добавив к 2035–2040 гг. ещё 5 ГВт мощности.

В рамках так называемого “пакета будущего”, принятого коалиционным комитетом, инвестиции в водородную индустрию составят 9 млрд евро, из которых 2 млрд евро предусмотрены на проекты, реализуемые в рамках международного партнёрства.

К мерам стимулирования производства водорода относят также освобождение от пошлин электроэнергии, генерируемой солнечными и ветровыми электростанциями, и введение платы за выделяемый углекислый газ при использовании традиционных источников энергии. Немецкие компании начинают осуществлять масштабные инвестиции в создание водородных технологий, что привлекает к проблеме ещё больше внимания. В силу ограниченных возможностей использования электроэнергии из возобновляемых источников в среднесрочной и долгосрочной перспективе Германии придётся импортировать большие объёмы водорода. Здесь открываются многочисленные пути для сотрудничества со странами, обладающими богатым ресурсным потенциалом, к которым, несомненно, относится Россия. Некоторые международные проекты, например, построение транснациональной цепочки создания добавленной стоимости применительно к водороду, уже реализуются.

Координация программ по водородной энергетике осуществляется на межгосударственном уровне. Регулярно проводятся министерские встречи по водороду, на которых принимаются решения о содействии сотрудничеству в области водородных технологий. В итоговых документах подчёркивается, что водород, будучи важным компонентом широкого, безопасного, устойчивого и эффективного энергетического портфеля, может стать ключевым фактором энергетического развития и способствовать переходу к экологически чистой энергетике. Так, 28–29 июня 2019 г. на Саммите G-20 в Осаке (Япония) в совместном коммюнике подчёркнута важность использования водорода в качестве топлива, а также создания систем улавливания и хранения углерода [16].

В 2003 г. ведущие страны мира, включая Россию, образовали Международное партнёрство по водородной экономике (МПВЭ) для координации усилий и совместного решения проблем водородной энергетике. В программах стран – участниц МПВЭ, как правило, присутствуют три основных направления: производство водорода, обращение с водородом (транспортировка, хранение, безопасность, техническое регулирование) и конечное его использование (автомобили, локальное энергоснабжение, накопители энергии).

В январе 2017 г. на Всемирном экономическом форуме в Давосе был создан Совет по водородным технологиям (Hydrogen Council) – крупнейшее объединение нескольких десятков ведущих энергетических, транспортных, промышленных и инвестиционных компаний с единым и долгосрочным видением развития водородной экономики [17]. Его основная цель заключается в ускоренных инвестициях в систему водородной экономики, включая транспорт, промышленность, использование водорода, его производство и распределение. Суммарная рыночная капитализация этих компаний – более чем 1.15 трлн долл.

На Международной научной конференции “Атомэкспо” в мае 2019 г. в итоговых документах отмечено, что водородная энергетика может стать новым глобальным рынком для атомной отрасли. Работы в этой области необходимо вести комплексно, делая основную ставку на крупномасштабное производство водорода, создание инфраструктуры по его хранению, транспортировке и использованию, а также обеспечение водородной безопасности.

ВОДОРОД И ЕГО ПЕРЕДЕЛЫ – ВОСТРЕБОВАННЫЙ ТОВАР

Исключительные свойства водорода как энергоносителя и компонента различных технологических процессов раскрывают перспективу его применения в различных областях энергетике, на транспорте и в промышленности. Если раньше потребителей энергии привлекали в основном его энергоёмкость, способность к хранению и распределению, то сейчас и на перспективу ключевым фактором становится его экологическая чистота и возможность декарбонизировать транспорт, химическую, нефтехимическую, металлургическую промышленность и коммунальный сектор. Водород сегодня рассматривается различными государствами и фирмами как ключевой энергоноситель будущего, перспективный товар. Сегодня потребление водорода в мире составляет около 70 млн т/год. Крупнейшие потребители (до 90% общего объёма) – химическая и нефтеперерабатывающая отрасли промышленности. Но это в основном “самодельный” водород, производимый с выбросами в атмосферу CO₂. В ближайшие десятилетия ожидается резкий рост потребления водорода в связи с переходом базовых отраслей промышленности на новые безуглеродные технологии и развитием экологически чистого транспорта с учётом требований сокращения углеродных загрязнений атмосферы. Наибольший вклад в рост мирового спроса на водород следует ожидать от транспорта и систем рассредоточенного энергоснабжения при использовании водородных топливных элементов. При масштабном освоении технологий производства, транспор-

тировки и хранения водород может быть использован и для решения проблем энергетики: распределение энергии по секторам, регионам и как буфер-накопитель. Например, это аккумулялирование энергии в энергосистемах с неравномерным графиком нагрузок, особенно для АЭС, буфер-накопитель энергии в сочетании с ВИЭ, энергоснабжение локальных потребителей и дальнейшее теплоснабжение.

Оценки масштаба мировой потребности в водороде как на ближнем горизонте, так и на дальнюю перспективу весьма неоднозначны. Ориентируясь на детализированный анализ использования водорода для широкого круга пользователей, приведённый в работах [7, 16, 17] в качестве целевых ориентиров, можно утверждать, что к середине XXI в. мир будет потреблять 500 млн т водорода в год, что означает приблизительно восьмикратное увеличение потребностей в нём. Это составит около 20% доли в энергетическом балансе и обеспечит 25%-ный вклад в снижение выбросов CO₂. К 2030 г. основные потребители должны подтвердить на рынке масштаб спроса на водород. По нынешним оценкам, он будет составлять около 100 млн т водорода в год. Реализация такой программы внесёт весьма значительный вклад в снижение загрязняющих атмосферу выбросов. Одновременно это огромные привлекательные финансовые потоки и создание новых рабочих мест. Неслучайно водород воспринимается как весьма востребованный продукт будущего.

ПРОИЗВОДСТВО ВОДОРОДА – КЛЮЧЕВАЯ ПРОБЛЕМА ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Сырьевые ресурсы водорода практически исчерпаемы – вода и углеводороды. Но для выделения водорода из этих соединений необходимо затратить энергию. Экологическая чистота водорода определяется как технологией его выделения из воды и углеводородов, так и чистотой потребляемой энергии. Использование для этого атомной энергии и ВИЭ обеспечит экологическую чистоту и необходимые масштабы производства водорода из воды и углеводородов. В ближайшем будущем вклад в масштабное производство водорода с использованием углеводородного сырья будет основным. Однако экологические ограничения процесса паровой конверсии метана с выбросом продуктов сгорания в атмосферу стимулируют разработку и применение промышленных процессов с использованием воды и экологически чистых источников энергии – атомных реакторов и ВИЭ.

Разложение воды. Среди способов получения водорода из воды наибольший интерес в контексте атомно-водородной энергетики представляют электролиз и термохимические циклы.

Технология электролиза хорошо освоена. На всех российских АЭС применяются щелочные проточные электролизные установки СУЭ-20, HySTAT-A-1000D/30/10, СУЭ-20/G32, производящие водород для собственных нужд. В связи с ростом суточных и сезонных диспетчерских ограничений мощности рассматривается возможность повышения КИУМ за счёт электролизного производства водорода. Основной недостаток – низкая эффективность использования первичной энергии и высокая стоимость электролизного водорода, которая в несколько раз выше стоимости водорода, производимого традиционными промышленными методами паровой конверсии метана. В мире и в нашей стране проводятся исследования и разрабатываются технологии, нацеленные на повышение выхода водорода на кВт·ч затраченного электричества, снижение удельной стоимости электролизёров, и, что существенно, прорабатываются пути снижения цены потребляемой ими электроэнергии.

В Научно-производственном объединении “Центротех” (г. Новоуральск Свердловской обл.) разрабатывается матричный щелочной электролизёр без циркуляции электролита и драгметаллов на отечественных материалах и комплектующих [18]. Состав электролизного элемента аналогичен составу топливного элемента, что позволяет использовать единую производственную базу. Его показатели: энергопотребление – менее 4,5 кВт·ч/нм³, давление – до 250 бар, КПД – более 70%, ресурс – 60000 ч, диапазон изменения мощности – от 0 до 150%. Конструкция батареи электролизного элемента аналогична батарее электрохимического генератора. Электролизная установка производительностью до 1000 нм³/ч состоит из 5 модулей по 200 нм³/ч.

Высокотемпературный электролиз – это процесс электролиза, при котором часть энергии, необходимой для расщепления воды, вкладывается в виде высокотемпературного тепла в нагрев пара, делая процесс более эффективным. Проработана концепция стыковки высокотемпературного электролизёра с ВТГР, дающая суммарный КПД производства водорода из воды до 50%. Высокотемпературная часть тепла от реактора передаётся через высокотемпературный теплообменник к пару, перегревая его до 800°C. Часть тепла реактора с более низкой температурой преобразуется в электрическую энергию в газотурбинном или паротурбинном цикле. Для перегрева пара до 800°C гелий на выходе из реактора должен иметь температуру не ниже 900°C. Эффективность высокотемпературного электролиза зависит от цены электроэнергии и температуры потребляемого тепла.

В термохимическом процессе получения водорода используется цикл реакций с химически ак-

тивными соединениями, например, брома или йода в сернокислотном цикле. В 1990-е и нулевые годы в ведущих странах мира этому процессу уделялось внимание как технологии производства водорода из воды с использованием тепла ВТГР. Выбор оптимального процесса определяется рядом критериев, важнейшие среди них – термодинамическая эффективность цикла, кинетические характеристики отдельных реакций, доступность и стоимость реагентов, совместимость реагентов и конструкционных материалов, безопасность процесса, экологические соображения и, в конечном счёте, экономическая эффективность. Исследования показали, что получение высокой термодинамической эффективности (КПД = 50%) в производстве водорода требует работы основных агрегатов термохимического цикла при температуре около 900–1000°C и соответствующей температуры тепла на выходе из реактора. Надёжных решений к настоящему времени не предложено.

Разложение метана. Затраты энергии в реакции разложения метана составляют 37.4 кДж/моль, что в 6.5 раза меньше, чем при электролизе воды (242.8 кДж/моль). Это стимулирует поиск и разработку технологий производства водорода путём разложения метана.

Наиболее очевидный путь – *термическое разложение метана*. Исследования нацелены на создание экологически чистой, без выбросов CO₂, технологии каталитического пиролиза углеводородного газового сырья с получением водородсодержащего газа или чистого водорода и углеродного наноматериала в сочетании с атомным источником энергии. Если будут разработаны каталитические композиции, обеспечивающие эффективность процесса получения водородсодержащего газа в режиме низкотемпературного пиролиза метана при температурах 600–800°C, то можно использовать высокотемпературное тепло ВТГР, и эта технология переходит в разряд экологически чистых. Образующийся при пиролизе метана углерод рассматривается как ценный вторичный продукт.

Кинетические ограничения пиролиза метана становятся несущественными при температурах выше 1700 К, однако в этом случае для нагрева газа, при котором используют дуговой, искровой или микроволновый разряд, требуется электроэнергия, что увеличивает затраты первичной энергии в 2–3 раза.

В Исследовательском центре им. М.В. Келдыша на основе опыта создания и использования многоканальных плазменных конверторов проводятся работы по высокотемпературному плазменному термическому пиролизу метана, при котором наряду с водородом образуется ценный продукт – ацетилен. В многоканальном плазмен-

но-дуговом конверторе производится нагрев исходных продуктов до 1600–1900 К и затем вывод прореагировавших продуктов из зоны реакции. Отработанный ключевой элемент такого конвертора – трёхфазный электродуговой плазмотрон мощностью 1–2 МВт, продолжительность его работы – сотни часов.

Энергетическая цена получения водорода по ацетиленовому маршруту пиролиза достаточно велика, и экономические показатели производства водорода в этом случае улучшаются, если учесть производство другого ценного продукта – ацетилена.

При *плазменно-каталитическом пиролизе метана* необходимость снижения затрат энергии стимулирует исследования, связанные с влиянием плазменных образований при низких температурах нагрева газа вплоть до величин, достижимых в ВТГР при сохранении высокой удельной производительности и селективности. В конце 1990-х – начале 2000-х годов в Курчатовском институте были выполнены работы по разложению метана, стимулированному неравновесной плазмой в гомогенных и гетерогенных системах. Специалисты экспериментально подтвердили, что ускорение процесса термического разложения метана можно эффективно осуществить в плазме микроволновых разрядов при температурах 700–900 К. Было установлено, что разложение метана идёт почти целиком за счёт тепловой энергии нагретого газа или подводимой к газу в ходе процесса. Расход плазменной энергии при этом оказался относительно невелик. Плазма в данном случае выступала в роли, сходной с ролью традиционного катализатора, – эффект плазменного катализа. В этих экспериментах метан, подогретый до 500–600°C, обрабатывали плазмой импульсно-периодического микроволнового разряда. На выходе плазменного реактора основным компонентом в остаточном метане служил водород [29, 20]. Из анализа экспериментальных зависимостей следует, что конверсия происходит в основном за счёт тепловой энергии нагретого метана. Наиболее вероятный механизм, который объясняет результаты экспериментов, связан с образованием в газе под воздействием плазмы заряженных углеродных кластерных ионов, служащих активными центрами для осуществления процессов пиролиза. Эффект плазменного катализа был продемонстрирован и исследован не только для пиролиза метана, но и для паровой, а также парокислородной конверсии углеводородов [21].

Более 70% мирового промышленного крупнотоннажного производства водорода осуществляется путём *паровой конверсии метана* (ПКМ). Для сокращения выбросов CO₂ и экономии природного газа в технологии ПКМ предлагается использовать энергию высокотемпературных реакто-

ров. Для интеграции ВТГР и химико-технологической части проводятся исследования паровой и парокислородной адиабатической конверсии метана с температурой используемого тепла на начальном этапе 750°C и его повышением в перспективе до 850–900°C. При этом решаются проблемы утилизации CO₂, повышения ресурса оборудования и использования отечественных катализаторов, адсорбентов и абсорбентов [22].

Химико-технологическая часть паровой конверсии включает систему очистки природного газа, смеситель очищенного природного газа и водяного пара, аппараты риформинга метана, системы рекуперации тепла, выделения CO₂, обращения с отходами и др. При разработке головной АЭС рассматривается совмещение технологии паровой и парокислородной конверсии метана с относительно небольшим добавлением кислорода в паро-метановую смесь, что позволяет увеличить уровень температуры конверсионной смеси за счёт экзотермической реакции метана с кислородом и степень его конверсии. Очистка от CO₂ производится путём хемосорбционной очистки газа водным раствором метилдиэтанол-амина и последующей регенерации раствора. Далее конвертированный газ попадает в блок короткоциклового адсорбции для финальной очистки от примесей, откуда водород высокой чистоты (~99.99%) направляется в промежуточное хранилище или к потребителю, а сдвучный газ (метан и водород со следовыми примесями) — для смешения с природным газом перед блоком сероочистки.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ГЕЛИЕВЫЕ РЕАКТОРЫ – ПУТЬ К АТОМНО-ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Высокотемпературные реакторы с гелиевым теплоносителем — принципиально новый экологически чистый универсальный источник атомной энергии, уникальные свойства которого — генерация тепла с температурой до 1000°C и высокий уровень безопасности — определяют широкие возможности его использования для производства электроэнергии с высоким КПД и водорода, снабжения высокотемпературным теплом и электричеством, для технологических процессов в химической, нефтеперерабатывающей, металлургической и других отраслях промышленности, а также для опреснения воды. ВТГР — один из лидеров среди инновационных реакторов будущей ядерной энергетики [23].

В ВТГР в качестве замедлителя и отражателя выступает графит, а топливом служат микротвэлы — сердечники-микросферы из керамических композиций урана, плутония или тория, заключённые в контейнер многослойных керамических

покрытий. Сочетание в активной зоне теплоносителя гелия, графита и керамического топлива создаёт наиболее благоприятные условия для получения высоких температур, повышения безопасности и эффективности использования топлива. Микротвэлы обеспечивают достижение уникальных параметров реактора: высокие температуры нагрева теплоносителя, локализацию продуктов деления и ультравысокие выгорания, в 10 раз превышающие общепринятые в действующих установках. Дробление массы топливного сердечника на множество микрочастиц повышает надёжность и безопасность топлива. Высокая коррозионная стойкость многослойных керамических покрытий служит основанием для долговременного захоронения ОЯТ с топливом такого типа в геологических формациях без переработки. Увеличение числа защитных барьеров, дробление топлива и инертность теплоносителя — гелия — обеспечивают высокую радиационную безопасность.

Возможность получения в реакторах с гелиевым теплоносителем высокой температуры делает этот тип реактора наиболее перспективным для комплексного производства электроэнергии и технологического тепла [24].

Модульная компоновка ВТГР эффективна для малых и средних атомных станций с высоким уровнем внутренней безопасности и маневренностью, что важно при сооружении их в труднодоступных районах, странах с энергетикой небольшого масштаба и применении реакторов для технологий. Производство электроэнергии при использовании прямого газотурбинного цикла с КПД ~50% сокращает тепловое воздействие на окружающую среду и делает возможным создание сухих градирен.

Благодаря значительной теплоёмкости активной зоны, большому запасу до температуры разрушения и отрицательной обратной связи по температуре и мощности эти реакторы сохраняют устойчивость при авариях реактивностного типа. Они также не подвержены разрушению при авариях с потерей теплоносителя, что обеспечивается, наряду с запасом до температуры разрушения, специальной кольцевой конфигурацией активной зоны. Всё это гарантирует пассивный отвод остаточного тепла в окружающую среду без превышения элементами зоны допустимых температур при авариях с потерей теплоносителя.

В 1960-х годах были созданы первые экспериментальные установки с ВТГР: “Драгон” (Великобритания), “Пич-Боттом” (США) и “AVR” (ФРГ). В 1970-е годы построены и введены в эксплуатацию демонстрационные АЭС “FSV” (США) и ТНТР-300 (ФРГ). На стыке столетий введены в эксплуатацию опытные реакторы

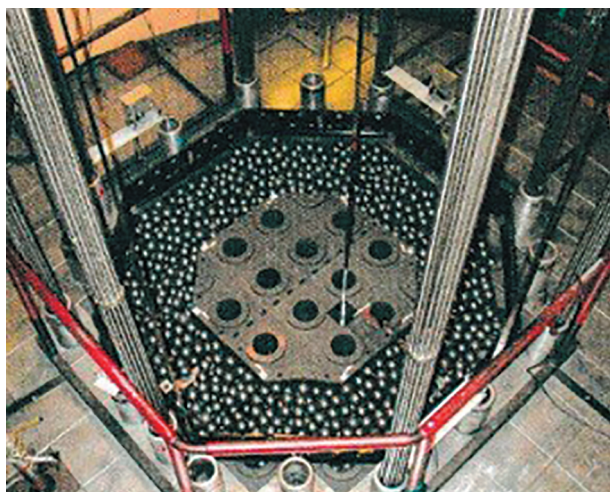


Рис. 3. Стенд “Астра”

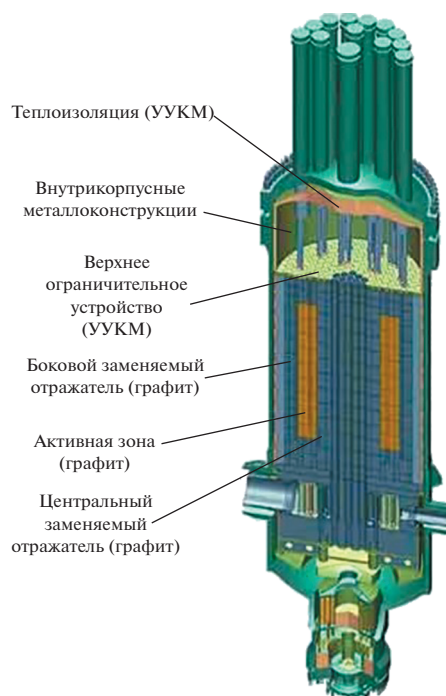


Рис. 4. ВТГР-модуль

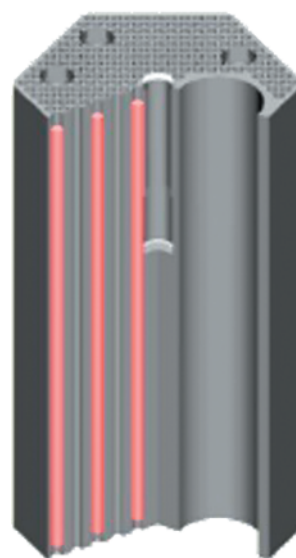


Рис. 5. Активная зона ВТГР

ВТГР в Японии и Китае. В Китае завершено строительство и ведутся пусковые работы демонстрационного двухреакторного энергоблока НТР-РМ с единым турбогенератором мощностью 200 МВт.

Россия имеет 45-летний опыт разработки ВТГР малой и средней мощности для производства электроэнергии и энерготехнологического применения. Для обоснования этих проектов создана экспериментальная и технологическая база, на которой проведён большой комплекс работ по исследованию нейтронной физики, теплогидравлики, термомеханики, массопереносу, технологии гелиевого теплоносителя, поведения топлива, в том числе под облучением, графита, конструкционных материалов, элементов конструкции и опытных образцов оборудования. Разработаны основы технологии топлива ВТГР, физики реакторов (рис. 3), конструкция модульного реактора (рис. 4, 5), высокотемпературные парогенераторы и теплообменники, циркуляторы с гелиевым теплоносителем, технология гелиевого теплоносителя, системы пассивной безопасности, расхолаживания, преобразования энергии, модели и коды.

Уровень готовности технологий позволяет в короткие сроки реализовать проект АЭС с ВТГР в России [25].

ВОДОРОД В СТРАТЕГИИ “РОСАТОМА”

Внедрение атомной энергии в электроэнергетику — наиболее очевидный шаг. В генерации электричества атомная энергия будет и далее наращивать свою долю, конкурируя с традиционным углеродным топливом и ВИЭ. Более трудная задача — использование атомной энергии в энергоёмких промышленных технологиях, производстве водорода как энергоносителя и

безуглеродного топлива, а также как восстановителя и компонента для различных технологических процессов. Актуальность этой задачи обусловлена необходимостью замены углеродов в этой сфере деятельности в объёмах, значительно превышающих их потребление в электроэнергетике. Потенциальный масштаб неэлектрического использования атомной энергии превосходит атомную электроэнергетику. Если ориентироваться на 10% потенциального рынка водорода,

то к середине века потребуется ввести АЭС с установленной тепловой мощностью ~50 ГВт. Это важно не только из-за ограниченности ресурсов углеводородов, но и вследствие требований декарбонизации. Необходимо отметить, что развитие атомно-водородной концепции будет также способствовать снижению риска ядерного распространения благодаря возможности поставок в развивающиеся страны энергоресурсов в виде водорода и его производных вместо ядерных реакторов и ядерных материалов.

Актуальность проблемы и имеющийся задел исследований и технологических разработок открывают путь для реализации в нашей стране атомно-водородной энергетики, признанной приоритетным направлением научно-технологического развития ГК «Росатом». В связи с этим Госкорпорация инициировала программу НИОКР «Разработка технологий атомно-водородной энергетики для крупномасштабного производства и потребления водорода», которая предусматривает:

- крупномасштабное централизованное производство водорода на атомных энерготехнологических станциях с ВТГР и конверсией природного газа, локальное распределённое производство, включая электролиз на АЭС;
- развитие инфраструктуры (хранение, транспортировка и потребление водорода);
- обоснование безопасности водородной энергетики на всех этапах жизненного цикла, включая производство, распределение и потребление водорода;
- интеграцию атомно-водородной энергетики в экономику страны и на международные рынки.

В результате НИОКР на внутреннем и зарубежном рынках должен появиться новый ключевой высокотехнологичный конкурентоспособный продукт с высокой добавленной стоимостью: водород, его переделы и технологии. Коммерциализация и экспорт этой продукции будет способствовать повышению устойчивости России на внешнем рынке. Потребуется кратный рост масштаба атомной энергетики, её доли в энергобалансе и создание новых рабочих мест в сфере высоких технологий. Использование водорода в энергетике, промышленности, коммунальном секторе и на транспорте сократит вредные углеводные выбросы.

Россия, располагая практически неограниченными сырьевыми ресурсами водорода и ядерного топлива и базой знаний по атомным и водородным технологиям, способна и должна занять лидирующие позиции в глобальном безуглеродном производстве водорода с ориентиром на 10% мирового рынка водорода.

Для крупномасштабного экологически чистого производства водорода — нового ключевого

продукта атомной отрасли — предлагается создать атомные энерготехнологические станции на основе модульных ВТГР и технологий конверсии природного газа (рис. 6). Каждая из них имеет промышленные и опытно-промышленные аналоги. Объединение этих разнородных технологий в едином атомном химико-технологическом комплексе потребует оптимальных схемных решений и компромисса при выборе физических, термодинамических, тепло-гидравлических, термомеханических параметров. При этом необходимо обеспечить экономическую конкурентоспособность производимого водорода, готовность головного блока АЭС к 2030 г. и гарантировать ядерную, радиационную и водородную безопасность.

На данной стадии проводятся проработки различных вариантов АЭС. В состав энерготехнологической станции входят четыре блока, в каждом — реакторная и химико-технологическая часть (см. рис. 6). Реакторная установка, расположенная в герметичной оболочке (контейнменте), состоит из модульного высокотемпературного реактора, гелиевого контура и теплообменника. Тепло из реакторной части передаётся через второй контур для нагрева сред технологической части водородного производства. В варианте паровой конверсии природного газа химико-технологическая часть включает систему подготовки природного газа, смеситель природного газа и водяного пара, аппараты риформинга метана, системы рекуперации тепла, выделения водорода, CO_2 , обращения с отходами и др. Тепловая мощность АЭС — 4×200 МВт; температура гелия на выходе из реактора — 850°C ; отпуск H_2 — 440 млн кг/год; энергозатраты — менее $2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ на 1 кг H_2 ; потребление метана — 1700 млн нм^3 /год; утилизация CO_2 — 3.5 млн т/год.

Схема и параметры, в частности уровень температуры, весьма консервативны и это обусловлено намерением создать головной блок в нынешнем десятилетии. С целью повышения эффективности производства водорода предусмотрены НИОКР по улучшению параметров ВТГР (увеличение единичной мощности до 600 МВт, температуры — до 950°C) и химико-технологической части (паровая конверсия метана с повышенными температурами и варианты пиролиза метана).

Для локального малотоннажного производства водорода из воды наиболее подготовлена технология электролиза. Необходимую для этого электроэнергию можно получить на атомных электростанциях с возможным снижением тарифа при диспетчерском регулировании мощности. Электролизный водород, при производстве которого используется электроэнергия АЭС, экологически чист. Для атомной станции наличие

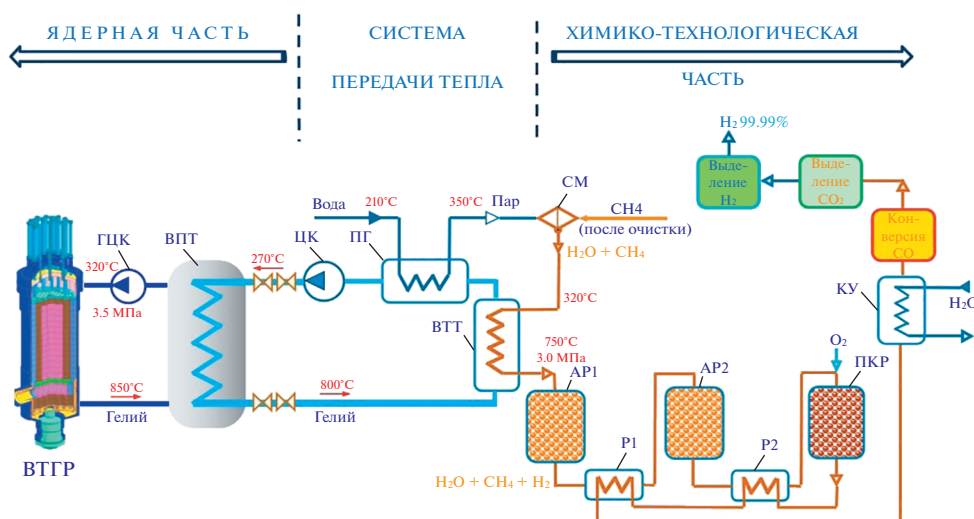


Рис. 6. Блок-схема химико-технологического комплекса АЭС с ВТГР

присоединённой нагрузки в виде электролизного производства водорода представляет интерес, так как при этом обеспечивается возможность её работы на постоянном уровне мощности, что важно при усиливающихся требованиях в маневренных режимах. Один из примеров: Кольская АЭС длительное время недоиспользует несколько сотен мегаватт своей мощности.

Предлагается создать электролизное производство водорода мегаваттного уровня в районе расположения Кольской АЭС в виде Центра компетенций по атомно-водородной энергетике. Его цели и задачи:

- отработка технологий повышения эффективности использования установленной мощности АЭС путём электролизного производства водорода и его применения в присоединённых высокотехнологичных производствах и для коммерческих поставок;
- демонстрация использования водорода в качестве накопителя и преобразователя энергии;
- наработка компетенций по электролизному производству водорода, безопасному обращению с ним, его хранению и доставке потребителю;
- тестирование электролизёров ведущих производителей;
- проработка предложений по использованию водорода в различных секторах экономики, например, в перспективной технологии прямого восстановления железа водородом в составе электрометаллургического комплекса по производству феррохрома нержавеющей стали на базе месторождения хромсодержащей руды “Сопчеозерское” (Мурманская обл., Кольский регион).

В структуру Центра наряду с электролизным комплексом войдут блоки обращения с водородом

(компримирование, ожижение, ёмкости хранения, газопроводная сеть), потребители.

АТОМНО-ВОДОРОДНЫЕ КЛАСТЕРЫ

Интеграцию водородной энергетики в экономику и энергетику страны ещё предстоит проанализировать. Но предварительные оценки показывают, что водородная энергетика, как и электроэнергетика или газовая промышленность, будет сочетать централизованное крупномасштабное производство и структуру магистрального распределения с локальным малотоннажным производством и доставкой водорода индивидуальным потребителям. Централизованное производство, наряду с обеспечением внутреннего рынка, будет нацелено на экспортные поставки водорода.

При определении площадок для размещения АЭС необходимо учитывать расположение относительно магистрального газопровода, возможности создания вблизи площадки энерготехнологических станций крупномасштабных подземных хранилищ водорода или метано-водородных смесей, возможности утилизации CO₂ и привязки к одной из действующей АЭС. С этой точки зрения рассматриваются западный и восточный атомно-водородные кластеры.

Для западного атомно-водородного кластера перспективны площадки Ленинградской и Смоленской АЭС. ЛАЭС расположена близко к северному магистральному газопроводу, рассчитанному на транспортировку 55 млрд м³ газа в год, при работе на проектной мощности он может ежегодно поставлять до 1 млн т водорода при его 20%-ном содержании в метано-водородной смеси. Для производства такого количества водорода установленная мощность АЭС должна

составлять ~2000 МВт(т). Вблизи Смоленской АЭС проходит газопровод “Ямал–Европа” производительностью 34.7 млрд м³ в год. В этом регионе расположены соляные бассейны, которые могут использоваться для сооружения подземных хранилищ природного газа, метано-водородной смеси и водорода, а также для утилизации CO₂. Транспортировку метано-водородной смеси можно осуществлять по газопроводу без существенного изменения его технической структуры. Для производства водорода в этом кластере потребуется построить АЭС мощностью ~1600 МВт(т).

На начальном этапе развития проекта до 2030 г. производство водорода объёмом до 0.1 млн т можно обеспечить электролизом воды с использованием мощностей действующих и строящихся энергоблоков на площадках Ленинградской и Смоленской АЭС.

Рост экономик стран Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР) требует адекватного энергетического обеспечения этих стран. Удовлетворение растущего спроса с использованием традиционных углеродных ресурсов уже сейчас сталкивается с негативным влиянием на климат. Ведущие страны региона рассматривают развитие атомной энергетики как значимый элемент обеспечения энергетической и экологической безопасности. Россия может предложить своё участие в решении этой задачи путём создания на территории Дальнего Востока международного атомного энерготехнологического кластера, миссией которого будет промышленная демонстрация технологической возможности использования крупномасштабной ядерной энергетики, не имеющей топливных ресурсных ограничений, для долгосрочного обеспечения стран АТР экологически чистой электроэнергией и водородом.

В состав кластера войдёт атомная энерготехнологическая станция для экологически чистого производства водорода из воды и природного газа. Водород и его переделы будут поставляться на зарубежный рынок по трубопроводам или танкерами. Проект крупномасштабного экологически чистого производства водорода из природного газа представляет интерес для зарубежных партнёров и может разрабатываться как совместная инициатива. Сооружение на Дальнем Востоке атомных энерготехнологических комплексов, основанных на новейших российских технологиях, создаст условия для развития энергоёмкой промышленности, будет стимулировать приток высококвалифицированных специалистов, привлечёт внешних и внутренних инвесторов, откроет новые возможности для зарубежного бизнеса.

Работы по созданию атомно-водородных кластеров должны включать несколько сопутствующих пилотных проектов: обоснование транс-

портировки метано-водородных смесей по существующим магистральным и региональным газопроводам, разработка мембранных технологий и установок для выделения из смеси водорода для локальных потребителей, разработка модулей хранения смеси и водорода в соляных подземных хранилищах, утилизация и хранение CO₂. Эти проекты, помимо коммерческой составляющей поставок водорода с высокой добавленной стоимостью, обеспечат технологическое лидерство нашей страны на глобальном рынке экологически чистого водорода и технологий водородной энергетики.

БЕЗОПАСНОСТЬ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Многолетнее использование водорода в энергетике и промышленности показало степень его опасности, поэтому были разработаны правила обращения с водородом и требования, которые нужно соблюдать, чтобы избежать аварийных ситуаций. В программе по разработке технологий атомно-водородной энергетики системный анализ её функционирования и безопасности рассматривается как ключевой раздел, в котором предусмотрено проведение следующих работ:

- анализ, разработка и адаптация физико-математических моделей для задач безопасности водородной энергетики;
- численное моделирование и экспериментальное исследование поведения газообразных водородно-воздушных смесей в системах производства и потребления водорода;
- разработка концепции и инженерных методик для риск-информированного управления стойкостью и безопасностью водородной энергетики;
- анализ и совершенствование действующей нормативной документации для безопасности АЭС и инфраструктуры водородной энергетики.

В программе особое внимание уделено обоснованию безопасности атомно-водородных комплексов для производства водорода, в которых сочетаются ядерно-опасные объекты с водородными агрегатами.

Для иллюстрации развивающихся исследований по водородной безопасности на рисунке 7 показан ряд стендов, созданных во Всероссийском НИИ технической физики им. академика Е.А. Забабахина, результаты экспериментальных исследований и численного моделирования поведения водородно-воздушных смесей в системах производства и потребления водорода, выполненных совместно с НИЦ “Курчатовский институт”, Институтом проблем безопасного развития атомной энергетики РАН и ООО “Кинтех Лаб”.



Рис. 7. Установки, созданные во Всероссийском НИИ технической физики им. академика Е.А. Забабахина, для исследований по водородной безопасности

ИНТЕГРАЦИЯ В ЭКОНОМИКУ СТРАНЫ И НА МЕЖДУНАРОДНЫЕ РЫНКИ

Развитие атомно-водородной энергетики возможно лишь при качественной её интеграции в экономику страны. Технологии атомно-водородной энергетики, водород и его переделы должны войти в различные области традиционных секторов энергетики, промышленности, транспорта, коммунального хозяйства и экономики в целом. Эта работа требует кооперации, партнёрства с различными структурами как в нашей стране, так и за рубежом. Необходим диалог и сотрудничество с такими корпорациями, как “Газпром”, “Роснефть”, компаниями химической промышленности и металлургии. И, безусловно, нужны государственная поддержка этого направления, стимулирование различными льготами, подготовка кадров.

В ближайшую пятилетку (2020–2024 гг.) необходимо обеспечить проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по производству водорода, созданию инфраструктуры безопасного обращения с ним на всех этапах жизненного цикла и во всех сферах его производства, а также хранения, транспортировки и потребления. Нужно разработать проектную документацию с испытанием опытно-промышленных модулей основных компонентов производства и потребления водорода. На этом этапе будут реализовываться пилотные проекты. Среди них – уже упоминавшийся Центр компетенций по атомно-водородной энергетике на Кольской АЭС, который нацелен на отработку технологий повышения эффективности использования установленной мощности АЭС в маневренных режимах путём электролизного производства водорода, его использования в присоеди-

нённых высокотехнологичных производствах и для коммерческих поставок. Как одно из направлений, связанных с применением водорода в различных секторах экономики, рассматривается предложение по технологии прямого восстановления железа водородом.

В 2023 г. на Сахалине планируется запустить поезд на водородных элементах. Не ограничиваясь производством водорода для заправки поезда, прорабатывается последующее применение водорода в других сферах (автомобильный транспорт, бункеровка судов, сфера ЖКХ), а также его поставка на экспорт. Для этого пилотного проекта выбран Сахалин как обладающий ресурсами модельного построения водородной экономики в региональном масштабе и находящийся в выгодном географическом положении по отношению к странам Азиатско-Тихоокеанского региона – потенциальным мощным потребителям нового ресурса.

Следующий этап с ориентиром на 2030 г. – сооружение головного блока атомной энерготехнологической станции для крупномасштабного производства экологически чистого водорода, сопровождаемое работами по созданию ключевых элементов инфраструктуры: утилизация CO₂, хранение и транспорт водорода.

Перспектива после 2030 г. – крупномасштабная атомно-водородная энергетика: создание серийной АЭС для централизованного крупномасштабного производства водорода в сочетании с локальными центрами электролизного и электрохимического производства водорода, в том числе на АЭС, с соответствующей инфраструктурой поставки водорода на внутренний и внешний рынок. В начале этого этапа основными драйверами внедрения атомно-водородной энергетики станут западный и восточный атомные энерго-

технологические кластеры, нацеленные на крупномасштабный экологически чистый передел природного газа в водород с использованием энергии высокотемпературных гелиевых реакторов. Поставки водорода в Европу могут быть реализованы с учётом действующей газопроводной структуры, а в страны Азиатско-Тихоокеанского региона — танкерами в криогенном или химически связанном виде.

При интеграции водорода в экономику страны и мира учитывается постулат: сколько бы ни было произведено экономически приемлемого водорода, он будет востребован и использован.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Цибульский В.Ф., Пономарёв-Степной Н.Н.* Проблемы мировой энергетики начала века. М.: Энергоатомиздат, 2008.
2. *Кухаркин Н.Е., Пономарёв-Степной Н.Н., Усов В.А.* Космическая ядерная энергетика (ядерные реакторы с термоэлектрическим и термоэмиссионным преобразованием — “Ромашка” и “Енисей”). М.: ИздАт, 2012.
3. *Ponomarev-Stepnoi N., Talyzin V., Usov V.* Russian Space Nuclear Power Systems and Nuclear Thermal Propulsion Units // *Nuclear News*. December 2000. P. 33–46.
4. *Александров А.П.* Перспективы развития атомной энергетики // *Атомно-водородная энергетика и технология*. Вып. 1. М.: Атомиздат, 1978. С. 5–7.
5. *Александров А.П., Леасов В.А., Сидоренко В.А. и др.* Структура атомной энергетики с учётом производства энергии помимо электричества // *Атомная энергия*. 1977. Вып. 6. С. 427–431.
6. *Александров А.П., Пономарёв-Степной Н.Н.* Атомная энергетика и технический прогресс // *Атомной энергетике 20 лет*. М.: Атомиздат, 1974. С. 3–23.
7. *Пономарёв-Степной Н.Н., Столяревский А.Я., Пахомов В.П.* Атомно-водородная энергетика. М.: Энергоатомиздат, 2008.
8. *Алексеев П.Н., Алексеев С.В., Андрианова Е.А. и др.* Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле / Под ред. Н.Н. Пономарёва-Степного. М.: Техносфера, 2016.
9. *Атомно-водородная энергетика и технология*. Вып. 1–8. М.: Энергоатомиздат, 1979–1988.
10. *Australia's National Hydrogen Strategy*. COAG Energy Council Hydrogen Working Group. Commonwealth of Australia. November 2019. <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-11/australias-national-hydrogen-strategy.pdf>
11. *Korea Hydrogen Economy Roadmap 2040*. IEA/IRENA Renewables Policies Database. <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2019/03/Hydrogen-economy-plan-in-Korea.pdf>
12. *Stratégie Nationale Bas-Carbone, Suivre le ministère de la Transition écologique*. France. <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>
13. *The U.S. Department of Energy Hydrogen Program Plan*. DOE/EE-2188. November 2020.
14. *Unlocking our energy productivity and renewable potential*. New Zealand energy efficiency and conservation strategy 2017–2022. <https://www.mbie.govt.nz/assets/346278aab2/nzeecs-2017-2022.pdf> www.hydrogen.energy.gov
15. *A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe*. 8 July 2020, Brussels https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/FS_20_1296
16. *The Future of Hydrogen (Seizing today's opportunities)* Report prepared by the IEA for the G20. Japan, Typeset in France by IEA. June 2019. <https://www.enerjiportali.com/wp-content/uploads/2019/07/The-Future-of-Hydrogen.pdf>
17. *Hydrogen scaling up (A sustainable pathway for the global energy transition)* Hydrogen Council. November 2017. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>
18. *Большаков К.Г., Кондратьев Д.Г., Матренин В.И. и др.* Срок службы щелочных матричных топливных элементов // *Электрохимическая энергетика*. 2015. № 4. С. 175–179.
19. *Животов В.К., Потанин Б.В., Русанов В.Д.* Плазменный катализ — явление и приложения // *Энциклопедия низкотемпературной плазмы*. Серия Б. Химия низкотемпературной плазмы. М.: Янус-К, 2005. С. 4–36.
20. *Русанов В.Д., Этеван К., Бабарицкий А.И. и др.* Эффект плазменного катализа на примере диссоциации метана на водород и углерод // *Доклады РАН*. 1997. № 2. С. 1–3.
21. *Потехин С.В., Потанин Б.В., Деминский М.А. и др.* Эффект плазменного катализа при разложении метана // *Химия высоких энергий*. 1999. № 1. С. 59–66.
22. *Гребенник В.Н., Кухаркин Н.Е., Пономарёв-Степной Н.Н.* ВТГР — инновационное направление развития атомной энергетики. М.: Энергоатомиздат, 2008.
23. *Петрунин В.В., Кодочигов Н.Г., Дмитриев С.М. и др.* Ядерные энергетические установки с высокотемпературными модульными газоохлаждаемыми реакторами. В 2-х томах / Под общей ред. Н.Н. Пономарёва-Степного. Нижний Новгород: Нижегородский гос. тех. ун-т им. Р.Е. Алексеева, ОАО “ОКБМ Африкантов”, 2018.
24. *Глушков Е.С., Компаниец Г.В., Пономарёв-Степной Н.Н., Фомиченко П.А.* Физика высокотемпературных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 2008.
25. *Пономарёв-Степной Н.Н., Алексеев С.В., Петрунин В.В. и др.* Атомный энерготехнологический комплекс с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами для масштабного экологически чистого производства водорода из воды и природного газа // *Газовая промышленность*. 2018. № 11. С. 94–102.