

ВЕСТНИК АТОМПРОМА

№ 7 | сентябрь | 2023

Главная тема

Водородная энергетика

*Россия и мир на пути
к водородной экономике*

В номере

Технологии полупроводников	34
----------------------------	----

АСКРО и АСРК для АЭС «Аккую»	44
------------------------------	----

Вокруг «Фукусимы»	48
-------------------	----

Уважаемые читатели!

Необходимость декарбонизации мировой экономики, которая признается большинством стран и подкрепляется высокими ценами на ископаемое топливо, вызвала очередной виток интереса к водороду как универсальному энергоносителю. По мнению аналитиков, за последние два-три года произошел качественный скачок в понимании будущей роли водорода в мировой экономике. Если ранее основное внимание уделялось технологическим аспектам, преимущественно энергетическим, то теперь на первый план выходят политические и экономические задачи создания глобальной межотраслевой инфраструктуры для широкомасштабного применения водорода. Главная тема номера рассказывает о новых трендах, определяющих становление водородной экономики, и о том, какие шаги наша страна и мир делают на пути к новому технологическому укладу.

Также вы познакомитесь с мнениями экспертов о том, почему широкозонные полупроводники оказались на острие технологий, узнаете, как вводятся в эксплуатацию системы, контролирующие радиационную обстановку на атомных станциях и прилегающих территориях, и вместе с нами разберетесь, стоит ли опасаться последствий начавшегося сброса воды с АЭС «Фукусима».

**ВЕСТНИК
АТОМПРОМА**

№ 7, сентябрь 2023 года

Информационно-
аналитическое издание

Фото на обложке

Unsplash.com / Omar Belattar

Главный редактор

Юлия Долгова

Выпускающий редактор

Ольга Еременко

Дизайн и верстка

Анна Бабич, Валерий Балдин

Корректор

Алина Бомбенкова

Учредитель, издатель

и редакция

Общество с ограниченной ответственностью «НВМ-пресс»

Адрес редакции

129110 Москва,
ул. Гиляровского, д. 57, с. 4

*Отдел распространения
и рекламы*

Татьяна Сазонова
sazonova@strana-rosatom.ru
+7 (495) 626-24-74

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации СМИ
ПИ №ФС77-59582
от 10 октября 2014 года

Тираж 2000 экземпляров.
Цена свободная.
Подписано в печать: 15.09.2023

При перепечатке ссылка на «Вестник Атомпрома» обязательна. Рукописи не рецензируются и не возвращаются

Суждения и выводы авторов материалов, публикуемых в «Вестнике Атомпрома», могут не совпадать с точкой зрения редакции

Журнал отпечатан:
ООО «АртФормат»
115477, г. Москва, ул. Зюбинская,
д. 6, стр. 2.
Тел.: +7 (968) 724-35-91
№ заказа: Аф-007/23.

		Содержание			
Главная тема	КОРОТКО	Эра водорода 4	Наука и технологии	Зона широких возможностей 35	
		Перспективный энергоноситель будущего: что нужно, чтобы создать принципиально новую индустрию		Виктор Федосеев, главный научный сотрудник АО «НИИ НПО «ЛУЧ» — о перспективах производства и применения широкозонных полупроводников	
	ПРЯМАЯ РЕЧЬ	«Водородная энергетика рассматривается как одно из стратегических направлений технологического развития России» 6		40	
		Академик РАН Николай Пономарев-Степной — о становлении водородной экономики и развитии технологий атомно-водородной энергетики		Александр Поляков, канд. техн. наук, проф. кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников Института новых материалов Университета науки и технологий МИСИС: «Чтобы сократить отставание России в современной полупроводниковой технике, потребуется стабильное финансирование и несколько лет упорной работы»	
	СТРАТЕГИЯ	Ставка на технологии 15		42	
		Как изменилась российская государственная политика в области водорода		Николай Каргин, д-р техн. наук, проф., проректор, директор центра радиофотоники и СВЧ-технологий Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»: «Рынок современных широкозонных полупроводников растет на десятки процентов ежегодно»	
	МНЕНИЕ	«В последние годы произошел громадный скачок в развитии зеленой водородной энергетики» 18	КОММЕНТАРИИ	43	
		Профессор Высшей школы бизнеса НИУ ВШЭ Михаил Аким — о тенденциях формирования глобального рынка водорода		Александр Квашнин, д-р физ.-мат. наук, ст. преп. Проектного центра Сколтеха по энергопереходу: «Перспективная область применения широкозонных полупроводников заключается в силовой электронике, которая необходима для связи, телекоммуникации, энергетики»	
	ОБЗОР	Водород шагает по планете 22		44	
		Рассказываем о новых трендах, которые определяют перспективы развития глобального водородного сектора	Атомные профессии	На службе безопасности 44	
	ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА	Н₂ как вечный двигатель прогресса 28		Тонкости профессии: как вводятся в эксплуатацию системы, контролирующие радиационную обстановку на АЭС и прилегающих территориях	
		Водородные мечты человечества: от прошлого к будущему	Разбор	Третий — лишний? 48	
					Сброс воды с «Фукусимы»: как, куда и почему
			ИЦАЭ	География научных впечатлений 50	
				Как прошло лето с ИЦАЭ: интеллектуальный досуг, новые знания и яркие эмоции	
			Особое мнение	Наука убеждать 56	
				Особенности успешных стратегий на примере тысячелетнего опыта Византийской империи	

Эра водорода

Усилия многих стран мира, направленные на увеличение доли низкоуглеродных и возобновляемых источников в энергобалансе, включают шаги по развитию энергетики, основанной на применении водорода и водородных топливных элементов. К настоящему времени сложилось понимание, что благодаря практически неограниченной ресурсной базе, высокой энергонасыщенности, многогранности и гибкости технологий применения, а также экологической чистоте процессов преобразования энергии с участием водорода его можно рассматривать как наиболее перспективный энергоноситель будущего, способный в том числе решить проблемы, связанные с нестабильностью генерации при использовании ВИЭ.

Переход на водородную энергетику предполагает значительные изменения в сложившейся структуре топливно-энергетического комплекса. Сегодня водород в основном производится из ископаемых источников и используется вблизи мест производства. Задача ближайших лет — создание принципиально новой индустрии, основанной на низкоуглеродном

производстве водорода, его накоплении, хранении и транспортировке в любую точку мира, а также организация широкомасштабного использования водорода во многих отраслях экономики, включая энергетику, промышленность, транспорт, коммунальную сферу.

Низкоуглеродное производство пока проигрывает традиционным методам с экономической точки зрения, и потребуется время, политические усилия и значительные инвестиции, чтобы чистый водород стал коммерчески привлекательным. Несмотря на это, мировой интерес к водородной тематике сейчас на подъеме, в том числе у развивающихся стран, которые стремятся занять свое место в формирующейся глобальной водородной экономике.

Главная тема номера рассказывает о новых тенденциях, новых технологиях и новых игроках на мировом рынке водорода, а также о роли Росатома в развитии высокотехнологичного направления «Водородная энергетика».

Текст подготовила Юлия Долгова
Иллюстрации и инфографика: АО «Концерн Росэнергоатом»,
АО «ОКБМ Африкантов», АО «ТВЭЛ», Midjourney

«Водородная энергетика рассматривается как одно из стратегических направлений технологического развития России»

Академик РАН Николай Пономарев-Степной — о становлении водородной экономики и развитии технологий атомно-водородной энергетики



Глобальный рост энергопотребления, а также достигнутый мировым сообществом консенсус в вопросе необходимости декарбонизации экономики дают импульс к становлению нового технологического уклада, подразумевающего широкомасштабное использование водорода в качестве не только компонента промышленных технологий, но и накопителя энергии и энергоносителя. На вопросы «Вестника атомпрома» о сути и динамике перехода

к водородной экономике отвечает научный руководитель приоритетного направления научно-технологического развития «Водородная энергетика» госкорпорации «Росатом», председатель научно-технического комитета инвестиционного проекта АО «Концерн Росэнергоатом», научный консультант генерального директора АО «Концерн Росэнергоатом», академик РАН, доктор технических наук Николай Пономарев-Степной.

Каковы энергетические и технологические возможности водорода? Зачем он нужен человечеству и в каких объемах (сегодня и в перспективе)?

Говоря о перспективах водородной экономики в целом, нужно воспринимать водород не только и не столько в качестве промежуточного энергоносителя (имеющего высокую удельную энергоемкость, но существующего в природе только в связанном виде, в химических соединениях с другими элементами — в виде природного газа, воды и других соединений), но и в качестве неотъемлемого технологического и сырьевого компонента огромного числа производственных процессов.

Фактически водород уже сейчас применяется во многих отраслях — это нефтепереработка и химическая промышленность, производство удобрений, аммиака и метанола, пищевая промышленность, стекольная промышленность, производство микроэлектроники, металлургия, электроэнергетика, а также многие другие.

На сегодняшний день в мире производится более 90 млн тонн водорода в год, из них, по разным оценкам, в России ежегодно производится и потребляется 5–7 млн тонн. Учитывая актуальные тренды, связанные с декарбонизацией промышленности и снижением выбросов парниковых газов в целом, экспертами, правительственными и международными организациями прогнозируется различный темп прироста объемов производства и потребления водорода: диапазон оценок на 2050 год колеблется в разных сценариях от 250 до 600 и более млн тонн водорода ежегодно.

Как можно определить место России в мире с точки зрения создания водородных технологий? Мы среди лидеров или отстающих?

Однозначно можно сказать: мы точно не среди отстающих, хотя и мировыми лидерами в связи с некоторой вынужденной паузой нас назвать сложно.

Водородные технологии получили развитие у нас в стране еще с конца 1960-х годов. Уже в начале 1970-х электрохимические генераторы тока были разработаны для орбитального корабля лунной программы, позднее более мощные источники электрической энергии на водороде были созданы для многоразового космического корабля «Буран».

У нас были разработаны проекты опытно-промышленных установок с высокотемпературными гелиевыми реакторами (ВГР-50, ВГ-400, ВГМ-200, МВГР-ГТ, ВТГР-10) в широком диапазоне мощностей, что послужило основой для инициации проекта по созданию атомной энерготехнологической станции (АЭТС).

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.

В Советском Союзе было серийное производство электролизных установок, промышленно освоенные технологии ожижения водорода, хранения и транспортировки водорода в сжиженном виде.

Начиная с конца 1990-х годов велись разработки и электромобилей на водородном топливе: уже в 2001 году «АвтоВАЗ» в сотрудничестве с Уральским электрохимическим комбинатом и при участии РКК «Энергия» представил на пятом Московском международном автосалоне водородомобиль АНТЭЛ-1 на базе ВАЗ-2131 «Нива» (способный развивать скорость до 90 км/ч), а позднее и водородомобиль АНТЭЛ-2 на базе ВАЗ-2111 (имевший водородовоздушный электрохимический генератор, максимальную скорость 100 км/ч и пробег на одной заправке до 350 км).

В настоящее время на уровне государства водородная энергетика рассматривается как одно из стратегических направлений технологического развития страны. Инициировано большое количество проектов по развитию данного направления.

С учетом накопленного ранее опыта в настоящее время госкорпорация «Росатом» активно ведет работы по созданию отечественных технологий по производству водорода методом электролиза, созданию атомной энерготехнологической станции с химико-технологической частью для крупнотоннажного производства водорода для нужд промышленности, созданию инфраструктуры хранения и транспортировки водорода, а также системные исследования вопросов пожаро- и взрывобезопасности при производстве и потреблении водорода.

Успешная реализация этих и других проектов позволит Российской Федерации занять одну из лидирующих позиций в мире с точки зрения развития водородных технологий.



На фото

Один из элементов электролизной установки, созданной НПО «Центротех» по заказу концерна «Росэнергоатом». Особенность установки — прорывная импорто-независимая технология электролиза на анионообменной матрице

«Водород как энергоноситель может стать своеобразным интегрирующим и балансирующим элементом комплексной энергосистемы страны или локальных изолированных энергосистем, когда энергия, производимая в одном месте, используется для производства водорода, который потом тем или иным способом передается к месту потребления (для обратного процесса)».

Есть ли у России опыт международного сотрудничества в сфере водородных технологий?

Одним из знаковых примеров такого сотрудничества является международный проект модульного высокотемпературного газоохлаждаемого реактора с прямым газотурбинным циклом ГТ-МГР мощностью 600 МВт, который разрабатывался нами с 1998 по 2012 год — совместными усилиями российских институтов и компаний 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, дополнить компетенции по ключевым компонентам, включая расчетные коды. Технические решения ГТ-МГР были использованы при разработке проекта МГР-Т, предназначенного для генерации электроэнергии, тепла и водорода на базе четырех модульных высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов единичной мощностью 600 МВт. Концептуальный проект и его экономическое обоснование завершены в 2004 году.

Термин «водородная энергетика» сейчас используется достаточно широко. Правильно ли называть водород источником энергии или более предпочтительны другие термины? Верно ли утверждение, что использование водорода — это способ наиболее эффективного и экологичного применения имеющихся источников энергии?

Говоря об энергетическом применении водорода, нужно понимать, что водород — промежуточный энергоноситель (на производство которого нужно затратить энергию), который можно и нужно использовать для хранения, передачи и последующего производства энергии. Соответственно, водород как энергоноситель может стать своеобразным интегрирующим и балансирующим элементом комплексной энергосистемы страны или локальных изолированных энергосистем, когда энергия, производимая

в одном месте, например с использованием возобновляемой энергетики или на атомной станции, используется для производства водорода, который потом тем или иным способом передается к месту потребления (для обратного процесса).

Более масштабным этот процесс может быть, когда мы говорим про водород как технологический компонент в промышленных процессах. В этом случае водород, производимый с использованием высокопотенциального тепла атомной энерготехнологической станции, затем используется в промышленности (фактически расширяя долю атомной энергетики в энергетическом балансе в целом).

Можно ли предположить, в каких именно областях водород может быть наиболее востребованным? Или основной смысл развития водородных технологий именно в их комплексном применении?

Безусловно, рассматривать нужно весь спектр технологий производства и потребления водорода, именно поэтому корректнее, на мой взгляд, оперировать термином «водородная экономика», а не ограничивать рассуждения энергетическим применением и говорить о водородной энергетике.

Залогом в расширении использования водорода является развитие промышленных технологий производства низкоуглеродного или безуглеродного водорода (водорода, производство которого не влечет выбросов парниковых газов — это и электролизные технологии, и технологии конверсии метана с обязательным улавливанием и полезным использованием углекислого газа), а также комплексное развитие инфраструктуры водородной экономики (системы хранения и транспортировки, заправочные комплексы для транспорта всех видов и так далее).

Соответственно, расширение использования водорода будет идти постепенно, занимая те области, где водородные технологии эффективнее и могут конкурировать с традиционными источниками энергии и традиционными технологиями — есть масса прогнозов и оценок того, как, помимо увеличения технологического использования водорода в промышленности, поэтапно в следующие 20–30 лет будет наращиваться использование водорода при эксплуатации автомобильного, водного и морского, железнодорожного и авиационного транспорта, возрастать использование водорода в составе систем накопления энергии (в особенности связанных с возобновляемыми источниками), развиваться применение водорода для локального, резервного и аварийного энергоснабжения различных объектов.

Сможет ли водород использоваться для энергоснабжения изолированных территорий?

Мне видится, что взаимосогласованные системы энергоснабжения с источниками различного типа (возобновляемые источники энергии, атомная генерация малой мощности, традиционная энергетика),

в которых водород используется как способ балансировки комплексной энергосистемы (производство водорода при низком потреблении, краткосрочное или сезонное хранение энергии в виде водорода и последующее использование водорода для обратного производства энергии в момент высокого потребления), обязательно должны рассматриваться и оцениваться для изолированных территорий, особенно с учетом территориальных и пространственных особенностей нашей страны! И мы видим, что работы в этом направлении активно ведутся, в том числе подобные оценки делаются и нашими специалистами.

На каких принципах работают (будут работать) водородные системы накопления энергии?

Принцип работы водородных систем накопления энергии заключается в следующем. Избыток энергии, вырабатываемой атомной станцией, традиционным либо возобновляемым источником энергии (к примеру, на базе солнечной или ветровой энергоустановки), направляется на получение водорода методом электролиза воды. Вырабатываемый водород хранится рядом с местом производства в сжатом (компримированном) виде. При необходимости, в случае возникновения дефицита электроэнергии либо для сглаживания пиков нагрузки, сохраненный водород используется для получения электроэнергии с использованием энергоустановок на топливных элементах.

Каковы наиболее предпочтительные способы хранения и транспортировки водорода? Насколько сложна задача создания инфраструктуры для этих целей?

В настоящее время существует два наиболее распространенных и промышленно освоенных способа хранения водорода: в сжатом (компримированном) и сжиженном виде.

Поскольку водород переходит из газообразного состояния в жидкое при очень низких температурах (–253 °С), ожижение водорода, а также хранение и транспортировка его в жидком виде — это технологически сложный и дорогостоящий процесс, используемый при необходимости передачи водорода на большие расстояния.

Для повышения экономической эффективности активно исследуются альтернативные способы хранения водорода, такие как хранение в металлгидридах и в химически связанном виде (жидкие органические носители водорода и аммиак).

Тем не менее пока наиболее распространенным является хранение водорода в компримированном виде — в настоящий момент промышленно освоены технологии производства и использования баллонных систем хранения водорода с давлением до 40 МПа (400 атм), ведутся активные разработки и освоение промышленных технологий по обращению с водородом под давлением до 70 МПа (700 атм).

Подобные разработки есть и у нас — предприятиями госкорпорации «Росатом» ведется промышленное производство водородных баллонов на давление до 400 атм, а также разработка металлокомпозитных баллонов на давление до 700 атм.

На каком временном горизонте водород сможет занять значимое место в мировой энергетике?

Как уже говорилось выше, процесс развития водородной энергетики — это процесс длительный и постепенный. Если тот интерес в мире к водородной энергетике, который есть сейчас, не снизится, то на горизонте до 2050 года водород сможет прочно занять место в мировой энергетике наряду с традиционными источниками энергии.

Получает ли тема энергетического применения водорода поддержку на государственном уровне в нашей стране? Ведь у нас много других энергоресурсов, на данный момент более дешевых. Не возникают ли здесь межотраслевые противоречия?

Развитию водородной энергетики на государственном уровне уделяется огромное внимание. В новой Концепции технологического развития на период до 2030 года, утвержденной правительством в 2023 году, водородная энергетика обозначена как одна из перспективных технологий межотраслевого назначения, которая «обеспечивает создание инновационных продуктов и сервисов и оказывает существенное влияние на развитие экономики, радикально меняя существующие рынки и (или) способствуя формированию новых рынков. Такие технологии определяют перспективный облик экономики и отдельных отраслей в течение ближайших 10–15 лет». Поэтому неудивительно, что тема развития водородной энергетики является актуальной в повестке крупнейших отечественных компаний и корпораций. В настоящее время подписаны соглашения о намерениях между правительством РФ и госкорпорацией «Росатом», а также правительством РФ и ПАО «Газпром» по развитию водородной энергетики и декарбонизации промышленности и транспорта, утверждена сводная дорожная карта развития высокотехнологичного направления «Водородная энергетика» на период до 2030 года. Свои «водородные» проекты активно реализуют ПАО «КАМАЗ», АФК «Система», АО «Трансмашхолдинг» и другие крупные компании.

Что представляет собой концепция атомно-водородной энергетики?

Атомно-водородная энергетика — это концепция, разработанная в нашей стране еще в начале 70-х годов прошлого века и подразумевающая широкое использование производимого с помощью ядерных реакторов водорода как энергоносителя в таких областях, как промышленность, энергетика, транспорт, а также в быту. В настоящее время эта концепция предполагает как крупномасштабное производство водорода путем конверсии или пиролиза



метана на специализированных атомных энерготехнологических станциях (АЭТС) с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами (ВТГР), так и локальное — путем электролиза воды на электролизных установках, питающихся электроэнергией от атомных станций. Помимо производства, концепция атомно-водородной энергетики подразумевает создание инфраструктуры по хранению и транспортировке получаемого водорода.

Если технология ВТГР была создана еще в прошлом веке, что препятствовало ее широкому применению у нас в стране и в мире? Что изменилось сейчас?

В прошлом веке была принята государственная программа «Водородная энергетика», в рамках которой разрабатывались проекты ВТГР для использования в энергоемких технологических процессах. Был разработан технический проект атомной энерготехнологической станции ВГ-400 для снабжения теплом с температурой 950 °С для предприятий по производству аммиачных удобрений. В 1987 году вышло постановление Совета Министров СССР «О создании и внедрении в народное хозяйство атомных энерготехнологических комплексов на базе высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР)». Предусматривалось создание пяти таких энерготехнологических комплексов. Препятствием применению ВТГР явились изменения в отечественной экономике в 90-х годах.

За рубежом первые коммерческие ВТГР — FSV (США) и THTR-300 (ФРГ) — предназначались для выработки

электроэнергии, однако опыт эксплуатации показал, что стоимость производства электроэнергии была выше, чем на действующих АЭС.

Что изменилось к настоящему времени: — во всем мире отмечается рост потребления водорода и продуктов, содержащих водород, являющихся ценным химическим продуктом в нефтепереработке, металлургии, химической промышленности и других отраслях; — на базе ВТГР могут быть созданы АЭТС для крупномасштабного производства водорода без выбросов диоксида углерода; — одним из решений проблемы глобального потепления является снижение выброса парниковых газов в промышленности, ВТГР способствует решению этой задачи.

Чем интересен ВТГР? В чем его технологические и экономические преимущества по сравнению с реакторами других типов? Эта технология лучше подходит для реакторов большой или малой мощности?

Выбор характеристик ВТГР основывался на реализации свойств самозащищенности (не требующих действий персонала) в отношении глушения реактора без срабатывания систем останова, отвода остаточного тепла от заглушенного реактора без требований к обеспечению энергией. В совокупности должно быть исключено расплавление активной зоны, а при авариях возможные выбросы радиоактивности за пределы площадки АЭТС должны исключать необходимость

эвакуации или укрытия населения, а также не должна быть ограничена обычная хозяйственная деятельность. Таким условиям могут соответствовать реакторы ВТГР с шаровыми и блочными твэлами.

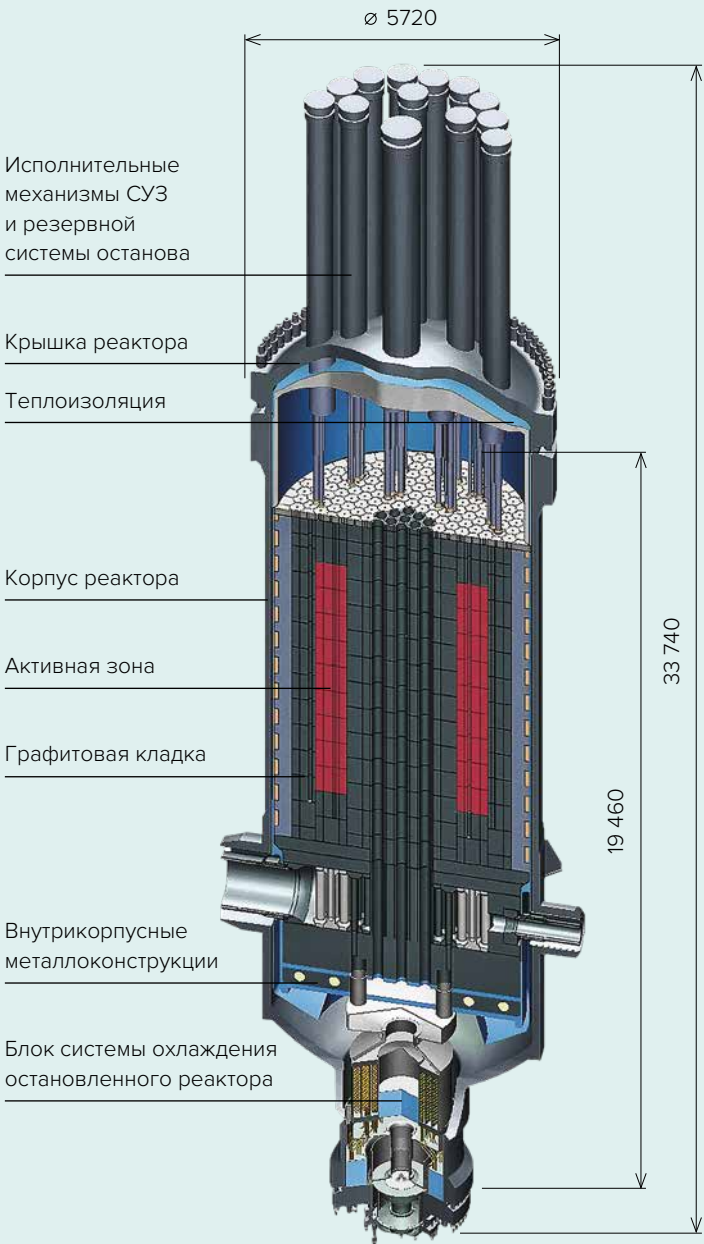
При выборе типа твэла принималась во внимание возможность достижения большей мощности реактора при заданных технологических ограничениях изготовления корпуса реактора в России. Соответственно, была выбрана активная зона из блочных тепловыделяющих сборок. При этом мощность реактора с учетом технологических ограничений составила 200 МВт.

Реакторы ВТГР предназначены для производства водорода и высокотемпературного технологического тепла. Объем потребления первичных энергоресурсов в этой сфере не уступает потреблению для электроэнергетики. Атомная энергетика на основе водяных реакторов и реакторов на быстрых нейтронах производит «чистую» электроэнергию. Таким образом, действующие сейчас на АЭС реакторные технологии и технологии ВТГР предназначены для разных целей и разных областей применения (электроэнергетика и технологическое тепло для различного применения).

Выбор мощности реакторов ВТГР определялся режимами промышленных установок, которые работают практически без останова длительное время. Поэтому выбрана технология модульных реакторов, чтобы при остановке одного из ВТГР выпуск продукции полностью не прекращался.

На действующих сейчас АЭС можно получать водород с помощью электролизеров. Почему технология ВТГР более предпочтительна? Это вопрос стоимости или масштабов производства?

На действующих АЭС водород можно получать электролизом воды, когда есть резерв мощности, связанный с графиком выдачи мощности в сеть (это



Основные характеристики реактора ВТГР

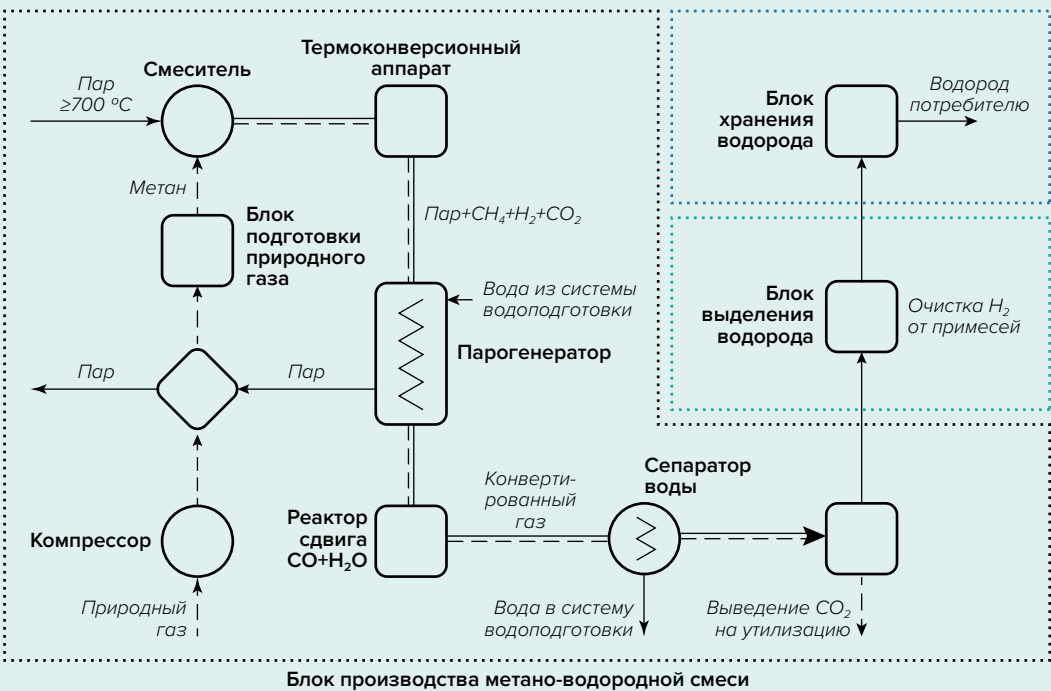
Основные характеристики	Значение
Тепловая мощность, МВт	200
Теплоноситель	гелий
Расход теплоносителя через реактор, кг/с	74,1
Давление гелия на напоре ГЦК (абс.), МПа	4,0
Температура гелия на входе в реактор, °С	330
Температура гелия на выходе в реактор, °С	850
Максимальный флюенс нейтронов с E > 0,1 МэВ на корпус реактора за срок службы, м ⁻²	2,7 × 10 ²²
Максимальная температура корпуса реактора в режиме НЭ, °С	350
Максимальная температура корпуса реактора при ННЭ, °С	450
Материал корпуса	08Х18Н10Т
Масса реактора, т	~ 1000

Блок-схема крупномасштабного чистого производства водорода с адиабатической конверсией метана (АКМ)

Рис. 1

Особенности адиабатической конверсии метана

1. Температуры процесса конверсии не более $\sim 680^\circ\text{C}$, получаемая смесь метана и водорода далее разделяется обычными методами.
2. Процесс АКМ построен на отработанных в крупнотоннажной химии технологических решениях, режимах и катализаторах.
3. Технология может адаптироваться под выпуск различных продуктов (метанол, аммиак и др.).



приоритет). Сегодняшние оценки показывают, что стоимость водорода при крупномасштабном производстве на базе ВТГР ниже, чем методом электролиза.

На каком этапе проработки находится в настоящее время проект будущей АЭТС с ВТГР? Определена ли уже площадка строительства? Некоторое время назад в СМИ прошла информация, что это будет Татарстан. Если информация верна, то почему была выбрана именно эта площадка?

В настоящее время проработки по АЭТС находятся на предпроектной стадии, включая установку производства водорода. В рамках этой стадии разрабатывается технический проект реакторной установки с ВТГР. Проводятся работы по выбору площадки для размещения АЭТС. Относительно Республики Татарстан следует сказать, что периодически главой республики проводятся совещания с приглашением представителей различных предприятий и институтов России для информирования о разработках новых технологий в различных областях науки и техники.

Какие технологические разработки по проекту ВТГР уже пройдены?

С технологической точки зрения рассматривались варианты, обеспечивающие сокращение времени и риска на создание проекта первого блока АЭТС. Были рассмотрены следующие варианты.

1. Использование только российских технологий или использование и зарубежных технологий. С учетом существующих и вероятных ограничений обмена

информацией и технологий (в части водорода и не только) принято решение использовать российские технологии.

2. Выбор способа производства водорода электролизом воды или с использованием углеводородов и воды. Сравнение вариантов показало, что более низкая стоимость водорода обеспечивается вариантом паровой конверсии метана без выброса CO_2 . Этот процесс отработан в промышленном масштабе, для его использования в России имеется необходимое сырье (метан, вода).

3. Рассматривались варианты передачи тепла от реактора в водородную установку через промежуточный контур или без промежуточного контура. Выбран вариант с промежуточным контуром для физического разделения реакторного и технологического контуров с целью безопасности.

Каковы дальнейшие шаги по созданию ВТГР? Можете ли вы озвучить укрупненный план работ, основные этапы, даты?

В 2024 году запланировано завершение доинвестиционной стадии проекта АЭТС, включая технический проект реакторной установки, декларацию о намерениях и др. До 2028 года — стадия разработки и лицензирования проекта АЭТС, далее — строительство первого блока в 2032 году, далее — завершение строительства АЭТС в составе четырех блоков предположительно в 2035 году (данные согласно докладу ОКБМ на заседании совета директоров «Татнефтехиминвест-холдинг» 31.01.2023 г.).

В чем отличия нынешнего проекта от более ранних отечественных версий и от зарубежных, например китайского реактора?

Основное отличие современного проекта АЭТС от ранних проектов в том, что в состав АЭТС включена химико-технологическая установка, которая производит водород, то есть продукт, который можно хранить, транспортировать и продавать. Ранние проекты ВТГР предполагали соединение ВТГР с промышленным производством системой передачи тепла, продуктом в таком случае является тепло, то есть одна АЭТС — один потребитель, а современный проект может обеспечить водородом группу потребителей.

Китайский ВТГР предназначен для выработки электроэнергии в паротурбинном цикле, температуры в этом реакторе недостаточно для производства водорода.

Как в АЭТС с ВТГР будет встроен модуль по производству водорода? Каковы уже известные параметры этого модуля?

В процессе разработки проекта ВТГР рассматривались различные варианты технологических схем интеграции реактора с установкой производства водорода, представленные на рисунках 1 и 2.

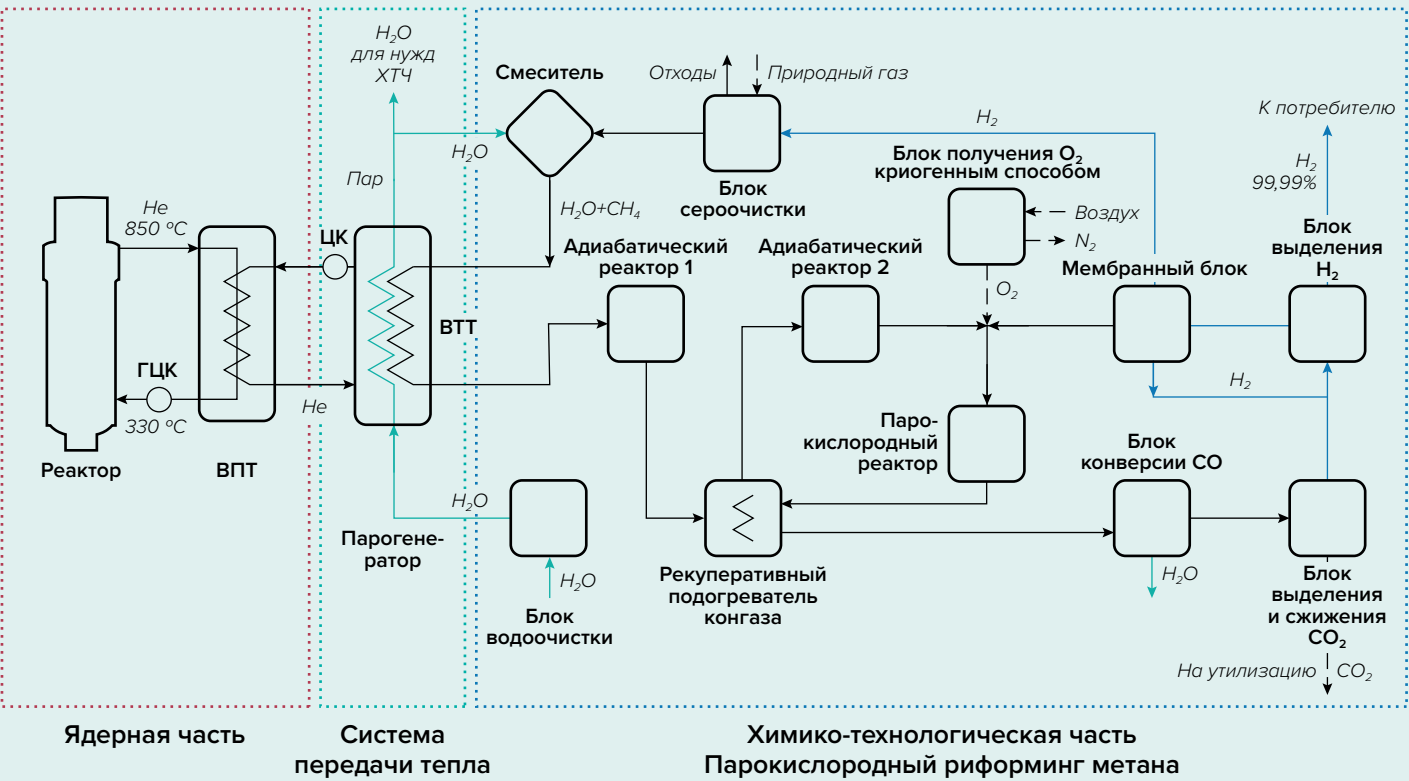
Процесс имеет умеренный уровень температуры пара (менее 700°C), однако характеризуется необходимостью системы возврата оставшейся части метана после выделения водорода. Реализация этой схемы может быть обеспечена по двухконтурной схеме (первый контур/пароводяной контур) при уровне температуры на выходе из реактора 750°C . Недостатком является вероятность проникновения радиоактивности в технологический контур производства водорода. В этой связи были рассмотрены варианты схем с промежуточным контуром и повышенной температурой конверсии метана.

На рисунке 2 показана блок-схема комбинированного процесса производства водорода за один проход с использованием блоков паровой и парокислородной конверсии метана. Для повышения эффективности процесса конверсии и компенсации потери температурного потенциала при использовании промежуточного контура температура гелия на выходе из активной зоны была повышена до 850°C . Это позволило увеличить температуру паровой конверсии до 750°C . Такая технология позволит снизить потребление метана, воды, обеспечить степень конверсии метана 99,7% и чистоту водорода 99,99% за один технологический цикл.

Соединение ВТГР с модулем производства водорода обеспечивается через промежуточный гелиевый

Блок-схема производства водорода с нагревом парометановой смеси в теплообменнике промежуточного контура

Рис. 2



ГЦК — главный циркуляционный компрессор, ЦК — циркуляционный компрессор 2-го контура, ВПТ — высокотемпературный промежуточный теплообменник, ВТТ — высокотемпературный технологический теплообменник, ХТЧ — химико-технологическая часть

контур, который передает тепло с высокой температурой парометановой смеси, которая затем направляется в модуль производства водорода.

Расстояние между ВТГР и водородной установкой выбирается из условий исключения недопустимого воздействия на ВТГР при авариях водородной установки. Мощность водородной установки — 110 тыс. тонн водорода в год, АЭС с ВТГР в современном проекте включает четыре ВТГР, таким образом мощность АЭС составляет 440 тыс. тонн водорода в год.

Известно ли, где и для чего будет использоваться произведенный на АЭС водород?

Водород будет использоваться как сырье в тех отраслях промышленности, где он сегодня уже используется или планируется к использованию, а также в автономных источниках электроэнергии. В настоящий момент нами ведется активная работа по взаимодействию с потенциальными потребителями, например, активный интерес уже сейчас проявляют представители отрасли по производству аммиака и минеральных удобрений, нефтеперерабатывающей отрасли.

Предполагается, что на АЭС с ВТГР водород будут получать из природного газа. Разработаны ли технологии получения на ВТГР водорода из воды? Это должны быть технологии, отличные от электролиза? Из каких источников для этого должна поступать вода, должна ли она быть специально подготовленной? Не несет ли это угрозы экологии?

Водород на АЭС с ВТГР будет производиться из природного газа и воды методом паровой конверсии с улавливанием и утилизацией CO_2 . На сегодняшний день перспективным считается производство водорода из воды методом электролиза при температурах до 800 °С, при этом часть энергии для расщепления молекулы воды на водород и кислород обеспечивается от ВТГР, а остальное — электричеством. Разработка этой технологии находится на уровне создания и испытания лабораторных установок. Исследуются на лабораторном уровне термохимические процессы

получения водорода из воды, например серно-йодный процесс. Для этого необходимо иметь температуру теплоносителя около

1000 °С. Работы по достижению такой температуры в ВТГР планируются, и этот процесс не быстрый.

Вода для производства водорода берется из природных источников и обрабатывается для удаления примесей. Отходы, образующиеся при обработке воды, путем последовательных операций перерабатываются в продукт, безвредный для окружающей среды.

Сможет ли водород стать одним из ключевых продуктов Росатома? Какие шаги для этого нужны и сколько времени для этого может потребоваться?

Водородная энергетика уже сейчас является одним из стратегических направлений развития атомной отрасли.

Для решения глобальной задачи по развитию водородной энергетики АО «Концерн Росэнергоатом» реализует группу инвестиционных проектов по теме «Разработка технологий атомно-водородной энергетики для крупномасштабного производства и потребления водорода», в рамках которой ведутся работы по разработке отечественных технологий для систем производства низкоуглеродного водорода с соответствующей инфраструктурой хранения и транспортировки, а именно:

- локального производства водорода методом электролиза с использованием электроэнергии действующих АЭС;
- крупномасштабного производства водорода методом конверсии углеводородов на базе разрабатываемой в концерне атомной энерготехнологической станции с использованием тепла высокотемпературного газоохлаждаемого реактора и обеспечением утилизации нарабатываемого в процессе конверсии углекислого газа;
- системного обеспечения функционирования и безопасности водородной энергетики.

В рамках этих работ создается экспериментальная база, ведутся работы по разработке и экспериментальному подтверждению ключевых технологических и технических решений как по реакторной установке, так и по химико-технологической части, готовится нормативная база по обеспечению безопасности инфраструктуры водородной энергетики.

Уже к настоящему времени готов опытный образец электролизной установки блочно-модульного типа на анионообменной мембране производительностью 50 $\text{Nm}^3/\text{ч}$. В 2025 году планируется ввести в эксплуатацию стендовый испытательный комплекс по производству водорода методом электролиза производительностью 200 $\text{Nm}^3/\text{ч}$ на Кольской АЭС. А к 2035 году планируется ввести в эксплуатацию атомную энерготехнологическую станцию с химико-технологической частью для крупнотоннажного производства водорода методом паровой конверсии метана (ПКМ).

Все это позволит реализовать стратегические планы госкорпорации «Росатом» по расширению линейки продукции и развитию новых направлений бизнеса.



Текст: Ирина Дорохова

Фото: government.ru

Ставка на технологии

Как изменилась российская государственная политика в области водорода



Акценты в понимании того, как должна развиваться водородная экономика в России, за последние полтора года сместились с производства и экспорта водорода на создание технологий и оборудования для его производства, транспортировки, хранения и использования. Российское правительство готово вкладываться в их развитие. Согласно паспорту дорожной карты развития высокотехнологичного направления «Водородная энергетика» до 2030 года, из бюджета на эти цели будет потрачено более 18,5 млрд рублей.

Первый подход

Первый стратегический документ, в котором было обозначено отношение российских властей к водородной энергетике, — Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года (далее — Стратегия), принятая в июне 2020 года. Согласно Стратегии, до 2024 года в России должен появиться высокопроизводительный и экспортно ориентированный сектор, который, как планируется, обеспечит

«развитие производства и потребления водорода, вхождение Российской Федерации в число мировых лидеров по его производству и экспорту». Производство водорода и водородно-метановых смесей было обозначено как перспективное направление диверсификации и повышения эффективности использования природного газа: «Прогнозируется, что водород, используемый сегодня в основном в химической и нефтехимической промышленности, в перспективе способен стать новым энергоносителем, замещающим углеводородные энергоносители, и сформировать «водородную экономику». Российская Федерация обладает значительным потенциалом производства водорода». Правда, собственно водороду в Стратегии отведена всего одна страница. Задачи, обозначенные в водородном разделе, по большей части нацелены на увеличение производства: разработка и реализация мер господдержки (в том числе законодательной), разработка отечественных технологий производства, стимулирование спроса и прочее. «Показателем решения задачи водородной энергетики является экспорт водорода: к 2024 году — 0,2 млн тонн, к 2035 году — 2 млн тонн», — говорится в Стратегии.

Почти параллельно, в октябре 2020 года, правительство РФ приняло план (дорожную карту) «Развитие

На фото

16 января 2023 года в присутствии первого вице-премьера Андрея Белоусова вице-премьер Александр Новак и гендиректор Росатома Алексей Лихачев подписали соглашение о сотрудничестве между правительством РФ и госкорпорацией «Росатом» по развитию водородной энергетики и систем накопления электроэнергии

водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года». Обозначенные в нем мероприятия носят подготовительный характер: «разработка концепции», «подготовка предложений», «разработка форм представления информации», «разработка мер государственной поддержки» и проч.

Экспортный потенциал

Первый детализированный документ госполитики в области водородной экономики в России — Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации (далее — Концепция), которая была принята 5 августа 2021 года. В ней можно выделить два основных посыла. Первый: «Водород может быть использован для накопления, хранения и доставки энергии и рассматривается в качестве перспективного энергоносителя и инструмента для решения задач по развитию низкоуглеродной экономики и снижению антропогенного влияния на климат». Второй: «В мире в настоящее время наблюдается повышение внимания к развитию водородного направления. Многие страны мира приняли специализированные государственные стратегии и дорожные карты по развитию водородной энергетики. Для Российской Федерации развитие отечественной водородной энергетики является естественным ходом развития науки и технологий и продолжением традиционного для нашей страны ресурсосберегающего подхода».

В Концепции, как и в Стратегии, наибольшее внимание уделялось именно водороду как продукту, а не водородным технологиям: объему рынка, в том числе перспективному, классификации с точки зрения углеродного следа и методам производства. Но главное — водород рассматривался как энергоресурс, способный диверсифицировать российский экспорт, сохранить спрос на природный газ и снизить для экспортеров других видов продукции риски, связанные с введением трансграничного углеродного регулирования. Упрощенно это означает, что прокат, произведенный на металлургическом заводе, который получает электроэнергию с угольной ТЭЦ, купят с меньшей вероятностью, чем прокат, произведенный на заводе, работающем на водороде, полученном с улавливанием CO₂.

Стратегическая цель развития водородной энергетики в России, обозначенная в Концепции, — «раскрытие национального потенциала в области производства, экспорта, применения водорода и промышленной продукции для водородной энергетики и вхождение Российской Федерации в число мировых лидеров по их производству и экспорту с обеспечением конкурентоспособности экономики страны в условиях глобального энергетического перехода». Предполагалось, что на первом этапе (до конца 2024 года) объем экспорта водорода составит до 0,2 млн тонн, кроме того, водород будет использоваться в качестве энергоносителя на внутреннем рынке (объемы не уточнялись). На втором этапе (2025–2035 годы) должны были быть запущены первые коммерческие проекты, в результате экспорт составил бы до 2 млн тонн в 2035 году (оптимистичная цель — 12 млн тонн).

На третьем этапе (2036–2050 годы) объемы экспорта водорода оценивались в 15 млн тонн (оптимистичная цель — 50 млн тонн). Одним из ключевых рынков поставки водорода рассматривалась Европа и, прежде всего, Германия как основной инициатор и движущая сила безуглеродных энергетических проектов.

Новые акценты

Однако после введения санкций и официального отказа европейских потребителей сотрудничать с российскими компаниями — поставщиками энергоносителей (природного газа, нефти и нефтепродуктов) стало понятно, что и российский водород Европа не примет. От участия в развитии водородной

Прямая речь

Александр Новак

Заместитель председателя правительства Российской Федерации:

— Современный топливно-энергетический комплекс представляет собой высокотехнологичный сектор и является заказчиком и драйвером отечественной промышленности, науки. Долгое время в мире продолжится использование углеводородов и продуктов их высокого передела. Но все мы понимаем, что будущее в энергетике — за чистыми источниками энергии. Именно поэтому Россия создает задел в области развития водородной энергетики и систем накопления энергии.

Алексей Лихачев

Генеральный директор госкорпорации «Росатом»:

— Значимость водородной энергетики признается на государственном уровне, и, безусловно, как высокотехнологичный лидер, Росатом активно развивает это направление. Убежден, что подписанное нами соглашение [о намерениях в целях развития водородной энергетики] станет дополнительным драйвером для реализации водородных проектов, обеспечения технологического суверенитета и повышения конкурентоспособности отечественных решений.

экономики, в том числе международной, Россия не отказывается, но акценты этого развития изменились. Оценки по экспорту водорода снизились, большее внимание стало уделяться созданию технологий, оборудования и устройств для производства, хранения, транспортировки и использования водорода.

Изменения были зафиксированы в декабре 2022 года в паспорте дорожной карты развития высокотехнологичного направления «Водородная энергетика» на период до 2030 года. Пакет соглашений о сотрудничестве между правительством России и крупными корпорациями был подписан в январе 2023 года. Соглашения о намерениях в целях развития водородной энергетики подписали заместитель председателя правительства РФ Александр Новак, генеральный директор госкорпорации «Росатом» Алексей Лихачев и заместитель председателя правления ПАО «Газпром» Олег Аксютин.

Вторая дорожная карта более предметна и конкретна, чем первая. В ней указаны ответственные лица и организации, ключевые показатели, которых необходимо достигнуть, сроки, а главное — финансирование. Так, до 2030 года подтверждено выделение из бюджета 18,5 млрд рублей. За реализацию дорожной карты отвечают ПАО «Газпром» и госкорпорация «Росатом».

В августе этого года российское правительство и АФК «Система» заключили соглашение о намерениях, касающееся развития водородной энергетики. В комментариях — также акцент на технологии. «Водородная энергетика — это та сфера, где в ближайшие годы возможен реальный технологический рывок. Мы хотим быть в лидерах формирующегося рынка, открывающего большие возможности для наших компаний», — отметил президент АФК «Система» Тагир Ситдеков. О технологическом лидерстве в дополнение к углеродной нейтральности упомянул и вице-премьер Александр Новак. АФК «Система», в частности, будет отвечать за разработку технологий хранения и транспортировку водорода в металлгидридах.

Цель в дорожной карте 2022 года тоже скорректирована: «Целью высокотехнологичного направления является развитие научно-технического потенциала Российской Федерации в области водородной энергетики для разработки, совершенствования и коммерциализации водородных технологий, обеспечения промышленной безопасности их применения, оценки и снижения отрицательного воздействия на окружающую среду, удешевления промышленного производства водорода и базового оборудования. Технологическое развитие призвано обеспечить решение нескольких задач: создание и развитие приоритетных и критически значимых водородных технологий».

Целевые показатели дорожной карты измеряются в том числе в количестве зарегистрированных результатов интеллектуальной деятельности (к концу 2024 года их должно быть 22, к концу 2030 года — 54), объеме выручки (70 млн рублей в 2024 году и 2,13 млрд рублей в 2030 году). Запланированные объемы производства водорода снижены до 550 тыс.

Цифры

550 000 тонн в год

планируемое производство низкоуглеродного водорода в 2030 году

2,13 млрд руб.

планируемый объем выручки, полученной от реализации продукции в рамках развития водородной энергетики в 2030 году

(согласно паспорту дорожной карты развития высокотехнологичного направления «Водородная энергетика»)

тонн в год. Правда, этот показатель относится только к низкоуглеродному водороду. Кроме того, в 2030 году в России должны работать 500 водородных заправочных станций.

Вклад Росатома

Одно из двух поднаправлений дорожной карты 2022 года — «Развитие водородной энергетики и декарбонизации промышленности и транспорта на основе технологий атомной отрасли». В этом поднаправлении госкорпорация «Росатом» обозначена ответственной за разработку технологий и оборудования для низкотемпературного плазменно-каталитического разложения метана и для разложения метана в расплавленных металлах, а также за разработку промышленных образцов отечественных электролизеров на основе анионообменных мембран. Организация, которая будет отвечать за другие разработки в рамках «атомного» поднаправления, «будет уточнена по мере реализации технологий».

Первая выручка, как планируется в дорожной карте, должна появиться в 2025 году. Речь идет об электрохимических установках для получения водорода из воды. Также в документе оговорено, что коммерциализация работ по созданию атомной энерготехнологической станции (АЭТС) с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором с химико-технологической частью планируется после 2030 года. В дорожной карте, в частности, отмечается, что НИОКР по созданию АЭТС будут завершены в марте 2028 года. Пилотный проект по производству низкоуглеродного водорода на основе полностью отечественной технологии пиролиза природного газа, как планируется, будет запущен в декабре 2033 года. А ввод в опытно-промышленную эксплуатацию головной АЭТС — в феврале 2035 года.

Текст: Милена Серкебаева

Фото и иллюстрация: из личного архива Михаила Акима, Midjourney

«В последние годы произошел громадный скачок в развитии зеленой водородной энергетики»

Профессор Высшей школы бизнеса НИУ ВШЭ Михаил Аким — о тенденциях формирования глобального рынка водорода

Развитие технологий производства и транспортировки водорода в последние годы значительно ускорилось благодаря поддержке многими государствами усилий по сокращению выбросов CO₂ и масштабным инвестициям в проекты в области возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в период пандемии, а также из-за текущих геополитических изменений, которые вносят существенный вклад

в формирование глобальной энергетической повестки. При этом развитые страны делают ставку на зеленый водород как способ хранения и передачи энергии, произведенной в различных регионах мира с использованием возобновляемых источников. О последних трендах в мировой и российской индустрии водородной энергетики рассказал профессор Высшей школы бизнеса НИУ ВШЭ Михаил Аким.

— Эксперты международной организации Hydrogen Council (Совет по водороду) несколько лет назад прогнозировали, что к 2050 году доля водорода в глобальном энергобалансе составит 18% и мир будет потреблять 550 млн тонн водорода в год. Как вы считаете, эти оценки реалистичны?

— Если мы говорим про горизонт 2050 года, здесь пока корректнее говорить о трендах, а не о конкретных цифрах, поскольку мы находимся в условиях сложной геополитической ситуации, которая так или иначе влияет на весь мир. Какие-то конкретные цифры для прогнозирования на 25–30 лет достаточно сложно рассчитать.

— Как сейчас в основном используется водород? Меняются ли области его применения?

— Сейчас речь идет в основном об использовании водорода в промышленности (металлургия, производство удобрений). Но в последнее время тенденция такова, что водород из химического элемента, который используется в ряде технологических процессов, постепенно трансформируется в метод хранения зеленой энергии, энергоноситель.

Чтобы понять, как это происходит, стоит посмотреть на развитие мировых процессов производства энергии из возобновляемых источников. Сегодня различными странами, в особенности Китаем, вводятся громадные количество мощностей ВИЭ. Например, мощность возобновляемых источников энергии Китая достигла 1213 ГВт в 2022 году, что составляет 47,3% от общей генерирующей мощности этой страны. Стоимость производства солнечной и ветровой энергии сейчас крайне незначительна по сравнению с тем, что мы наблюдали 5–10 лет назад: практики строительства оптимизируются, и мощности растут.

Европа, которая одной из первых вступила в гонку по созданию мощностей ВИЭ, прежде всего ветрогенерации, сейчас столкнулась с недостатком и дороговизной площадей для строительства ветростанций. Около 10 лет назад европейские компании уже пытались использовать Африку как место для строительства мощностей ВИЭ, но на тот момент проект оказался слишком дорогостоящим и труднореализуемым,

в частности из-за сложности и стоимости передачи энергии из Африки в Европу.

Развитие водородных технологий способно решить две ключевые проблемы, возникшие в связи с ростом производства энергии из возобновляемых источников. Во-первых, это проблема транспортировки. Наиболее высокая производительность ветрогенерации, как правило, наблюдается недалеко от моря или в море, то есть на определенном расстоянии от потребителя. Есть несколько методов, как в принципе доставлять электроэнергию, полученную с помощью ВИЭ. Традиционный метод — это высоковольтные линии электропередачи переменного тока, но на таких линиях теряется огромное количество энергии. Другой способ — строительство высоковольтных линий электропередачи постоянного тока, что дорого и сложно. Оба метода, в частности, требуют большого количества меди для кабелей. А медь дорожает вместе с ростом спроса, связанного в том числе с развитием альтернативной энергетики. Трансформация энергии в водород (как носитель) может составить конкуренцию двум этим способам.

Вторая проблема связана с хранением энергии, она вызвана несоответствием между предложением и спросом. Очевидно, что энергия генерируется, когда дует сильный ветер и светит солнце, а не именно тогда, когда она вам нужна. Газ вы можете хранить, так как есть газохранилища, у вас в этом нет никаких ограничений — это один из факторов, объясняющих популярность газовой генерации. Но когда у вас есть дневные или сезонные колебания предложения со стороны генерации на основе ВИЭ, вам эти колебания нужно нивелировать. Соответственно, вам нужно создать буфер в виде технологии хранения энергии. В настоящее время в крупнотоннажном объеме единственный такой буфер, который можно представить на ближайшие годы, — это водород или его производные.

— Какие технологии, связанные с водородом как носителем энергии, вы могли бы выделить?

— Проблема в том, что водород опасен и дорогое транспортировать. Прорыв двух последних лет, который позволил резко нарастить объемы проектов по созданию новых водородных мощностей, — это переход от транспортировки водорода к транспортировке аммиака, фактически конвертация водорода в аммиак. При этом энергетическая способность аммиака выше, чем у водорода. Кроме того, по всему миру уже есть устоявшиеся схемы транспортировки аммиака через газопроводы и танкеры — это давно известные и опробованные технологии. Таким образом, именно это звено, которое еще три-четыре года назад являлось одним из основных препятствий для внедрения водородной энергетики, разрешается в обозримом будущем с помощью этой технологии.

— Можно ли говорить, что будущее именно за зеленым водородом, учитывая, что пока доля голубого водорода в мире остается самой высокой?

Подробности

Аммиак получают путем синтеза из водорода и азота. Чтобы транспортировать водород, можно использовать несколько способов: трубопроводным транспортом, с помощью контейнерных перевозок, а также в криогенных цистернах или в носителях, таких как аммиак или гидриды металлов. Например, для перевозки в криогенных цистернах водород необходимо превращать в жидкость и охлаждать до очень низких температур — это дорогостоящий и энергоемкий процесс, для которого в настоящее время нет подходящей инфраструктуры, в отличие от технологий, связанных с аммиаком. После доставки аммиака в страны назначения его можно снова разделить на водород и азот или использовать напрямую.

— Здесь важно отличать, говорим ли мы о том, что имеем сейчас, или о тенденции. Сейчас доля водорода в энергобалансе в целом очень мала. В промышленности действительно преимущественно используется голубой водород. А если мы говорим про тенденцию — для чего вообще водородная энергетика развивается, — да, будущее в первую очередь за зеленым водородом. Довольно много исследований показывали, что углеродный след водорода при производстве его из метана значительно выше, чем след от использования непосредственно метана. Как бы нам ни хотелось рассказывать, что метан — это «наше все» в энергетике, надо понимать, что это не так. В ближайшее время, скорее всего, производство энергии из метана будет оставаться дешевле (в зависимости от региона), но в принципе при продолжающемся уменьшении стоимости строительства мощностей ВИЭ, при сокращении стоимости производства водорода и его дальнейшей конвертации в аммиак водородная энергетика может, по сути, стать могильщиком метана.

— Если сравнить то, как вы оценивали перспективы развития водородной энергетики два-три года назад, с тем, как оцениваете сейчас, то что изменилось? Развитие происходит быстрее или медленнее, чем предполагалось?

— Развитие невероятно ускорилось, и геополитика здесь стала ключевым фактором. Европейский энергетический рынок в прошлом году начал очень сильно трансформироваться. И одним из путей трансформации является переход от использования газа к поиску других источников, а также регионов, которые могут стать производителями энергии из возобновляемых источников и поставщиками этой энергии для Европы. Германия при этом является инженерным центром, сфокусированным на разработке оборудования для водородной энергетики. Соответственно, возникают альянсы между Германией как потенциальным потребителем водорода и одновременно потенциальным производителем оборудования и теми странами, где энергию из возобновляемых источников можно недорого

производить. Если говорить о США, то при текущей геополитической ситуации эта страна самодостаточна в вопросах энергетики, а Китай вводит громадное количество солнечных и ветровых электростанций и является бенефициаром в получении дешевых энергоносителей. У Китая есть, с одной стороны, поставки газа и нефти из России, с другой — возобновленная поставка угля из Австралии, плюс к этому

Цветовые обозначения водорода

В соответствии с методами производства и обусловленной ими экологической чистотой водороду присваивают разные цветовые коды. Важно отметить, что пока они не стандартизированы, поэтому в водородных стратегиях разных стран и в различных публикациях на эту тему встречаются разные обозначения.

Экологически безупречный водород называют зеленым. Он производится методом электролиза воды, при этом электричество должно поступать исключительно из возобновляемых источников. По вопросу отнесения атомной энергии к чистым видам мировое сообщество все еще не достигло консенсуса, поэтому некоторые эксперты называют водород, произведенный методом электролиза на АЭС, также зеленым, другие же выделяют для него отдельный код — желтый, оранжевый или розовый (пурпурный).

Водород, произведенный из природного газа, обычно называют голубым. Здесь также есть нюансы. В последнее время голубым чаще называют водород, произведенный методом паровой конверсии метана с использованием технологий улавливания CO₂, если же такие технологии не используют, то водород, произведенный из ископаемых источников, называют серым, при этом иногда дополнительно выделяют черный водород — произведенный из угля (встречается и расширенная классификация, в которой в зависимости от типа используемого угля в дополнение к черному еще выделяется бурый, или коричневый, водород). Можно встретить бирюзовый код — это водород, произведенный методом пиролиза метана, и изумрудный — произведенный из биометана или природного газа с помощью термоплазменного электролиза.

Белым называют природный водород, огромные запасы которого предположительно скрыты глубоко под землей. Некоторые компании уже ведут поиски таких залежей, чтобы «застолбить» их первыми, как это было на заре нефтяной эры.

идет строительство атомных электростанций, а происходящее в Европе стало дополнительным стимулом для развития ВИЭ.

Не менее важными факторами развития водородных проектов стали инвестиции в ВИЭ в период пандемии и вливания в эту отрасль так называемых «вертолетных денег» (прямая финансовая поддержка граждан и бизнеса за счет средств государства.— *Прим. ред.*), а также общая повестка по декарбонизации с целью стабилизации климатических изменений. Эти факторы обеспечили громадный скачок в направлении развития зеленой водородной энергетики.

— Можно ли говорить, что водородный бум — это потенциал не только для развитых, но и для развивающихся стран, где есть условия для наращивания мощностей ВИЭ?

— Да, безусловно. Очень интересно, как будет в принципе происходить интеграция водородной энергетики в глобальные цепочки. Если посмотреть, например, на Индию, которая является одной из крупнейших быстрорастущих экономик, то эта страна планирует наращивать производство и экспорт водорода. Любой быстрый рост требует энергетических ресурсов, соответственно, возникает некоторый диссонанс: с одной стороны, на развитие экономики Индии нужно очень много энергии, с другой — Индия сама выходит на громадные объемы производства энергии из возобновляемых источников и заявляет о своих амбициях как поставщика водорода. Если следить за этим трендом, то получается, что скорость введения мощностей ВИЭ должна быть выше, чем необходимость потребления электричества растущей промышленностью.

— Какие еще страны на сегодняшний день имеют потенциал для развития водородной энергетики?

— Нужно отметить, что наращивание мощностей по производству водорода — это в целом очень положительный сценарий для стран, где развиты другие низкоуглеродные энергетические отрасли, такие как атомная и гидроэнергетика. В частности, если говорить про гидроэнергетику, то один из крупнейших известных проектов по зеленому водороду намечен в Бразилии. Когда мы анализировали возможности производства конкурентного по цене водорода в России, то мы также пришли к тому, что это именно водород, полученный с использованием мощностей ГЭС.

С развитием технологий появятся новые регионы, которые могут стать крупными производителями энергии из возобновляемых источников для последующего производства водорода. Например, Австралия с ее большим потенциалом для введения мощностей ВИЭ, Чили, имеющая большую береговую линию, которая дает возможности для строительства ветромощностей, Бразилия, про которую я уже говорил, и, наконец, страны Африки.

— Можем ли мы сказать, что глобальный рынок водорода уже сформирован, или он в процессе

формирования? От чего в ближайшие годы будет зависеть возможность появления на нем новых игроков? Это могут быть частные компании, или водородные технологии — это, скорее, история государственного масштаба?

— В каком-то смысле это уже сложившаяся ситуация. Как я ранее упоминал, в период пандемии ведущими развитыми странами были влиты сотни миллиардов долларов на развитие возобновляемой энергетики на государственном уровне.

Европа, которая объективно страдает от недостатка энергетических ресурсов, чтобы отвязать свое потребление от рынка углеводородов, готова и вынуждена вкладываться в развитие технологий и строительство мощностей. Интересен следующий вопрос: что окажется более конкурентоспособным в долгосрочной перспективе — получение зеленой энергии из различных регионов посредством транспортировки водорода (вне зависимости от места его производства или в меньшей зависимости) или собственные европейские мощности ВИЭ?

Любой этап конвертации затратен — и с точки зрения КПД, и с точки зрения стоимости в целом. Если производительность ветровых и солнечных установок станет значительно выше в ближайшее время и позволит сохранить относительно невысокую стоимость, то вполне возможно, что, с учетом совершенствования технологий, через 20–30 лет Европа по мощностям окажется конкурентной с другими регионами, откуда будет привозиться водород. Условно: в Бразилии вы произвели энергию на ГЭС, потом преобразовали ее в водород, затем в аммиак, далее на танкерах повезли в Германию и в конце конвертировали его обратно в энергию. Скажем, если вы можете построить по европейскому берегу достаточное количество эффективных ветроэлектростанций (в достаточном объеме для европейского потребления), вполне возможно, что исключение шагов по трансформации и транспортировке может быть вполне целесообразным при определенном развитии технологий в области возобновляемой энергетики.

— Россия сейчас делает ставку на голубой водород, в том числе произведенный с помощью ядерных реакторов, а широкомасштабное производство зеленого водорода с использованием мощностей АЭС пока не планируется, во всяком случае на горизонте 2030 года. Как вы думаете, изменится ли ситуация в дальнейшем?

— Я думаю, что история с голубым водородом — это во многом инертность системы планирования, потому что в принципе стратегия по развитию водородной энергетики в России создавалась до мирового водородного бума. Когда миропорядок и технологии настолько быстро меняются, стратегия, которая создавалась 10 или даже 5 лет назад, может быть не вполне актуальной.

«Атомный» же водород может быть очень интересным направлением, так как ЕС, скажем, признает атом низкоуглеродным источником энергии. Если мы смотрим в настоящее время с точки зрения загрузки существующих атомных мощностей, то производство водорода — это идеальный способ наиболее эффективного их использования. Водород идеален для того, чтобы максимально использовать, хранить и передавать энергию, произведенную на АЭС в непииковое время. Однако вопрос масштабного развития проектов по зеленому водороду у нас пока не стоит, так как в России ввод мощностей ВИЭ все еще очень незначителен.

— Если сейчас для России в связи с геополитической ситуацией европейские экспортные рынки закрыты, основной фокус должен делаться на внутренний спрос?

— Я думаю, что да. Я бы не рискнул прогнозировать это с точки зрения возможного изменения в геополитике. Понятно, что в настоящее время поставки энергии и энергоносителей из России в Европу крайне ограничены, а водород — тот же самый энергоноситель. Я не вижу причин, почему водород может выбиваться из общего тренда зависимости энергетических поставок от геополитических рисков.

При этом нужно понимать, для чего водород нужен потребителю: как энергоноситель или для промышленного использования. Еще одна развилка, о которой нужно упомянуть, — это транспорт. Например, компания Toyota разработала прорывную технологию автомобиля на водороде и во многом благодаря помощи японского правительства сумела ее коммерциализировать более 10 лет назад. Очевидно, что в тот момент, когда водород станет дешевым, такой транспорт станет конкурентоспособным.



Водород шагает по планете

Рассказываем о новых тенденциях, которые определяют перспективы развития глобального водородного сектора

По мере того как энергетический сектор ищет чистые и устойчивые альтернативы ископаемому топливу, водород становится все более многообещающим решением для декарбонизации различных отраслей экономики. По мнению Hydrogen Council (международного Совета по водороду), 2023 год ознаменовался значительным прогрессом в области водородных решений, продемонстрировав изменения, важные для формирования долгосрочных рыночных перспектив.

Трудности перехода

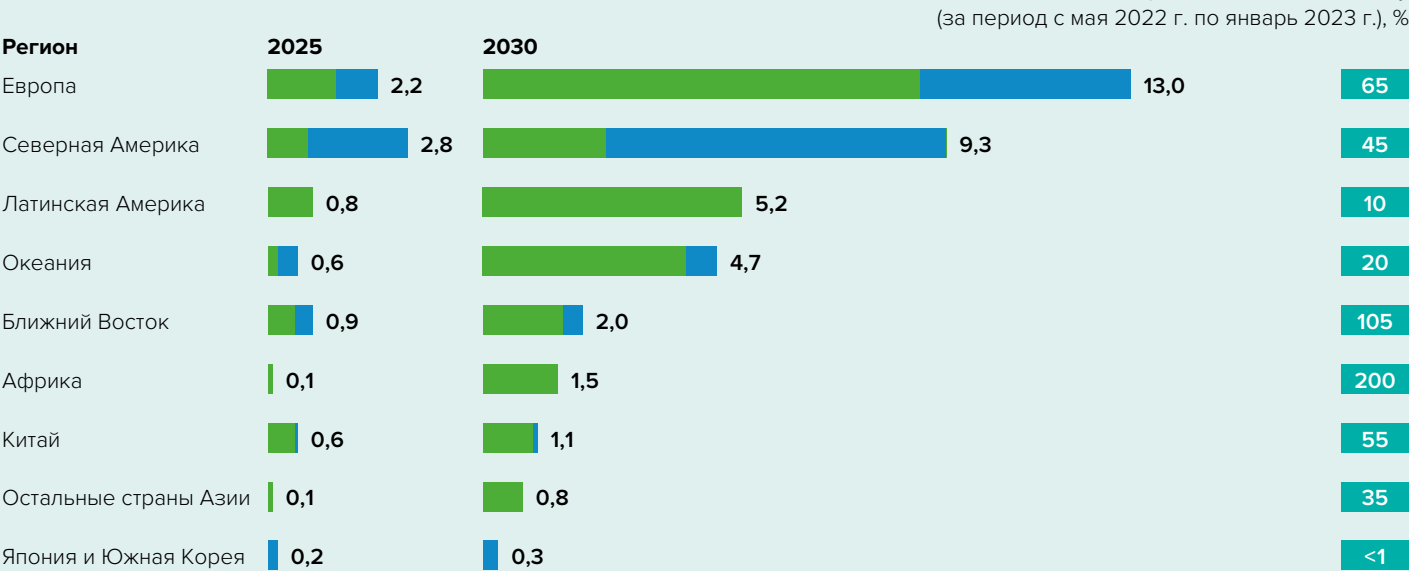
Сегодня во всем мире реализуется более 1000 проектов, связанных с водородом, причем за последний год было объявлено о более чем 350 новых инициативах. В 2022 году в водородные проекты было вложено почти 8 млрд долларов США (в 2020-м — немногим более 2 млрд долларов). К 2030 году инвестиции в этой области могут достигнуть 320 млрд долларов.

Водород — самый распространенный элемент во Вселенной, но на Земле он почти не встречается в свободном состоянии, а связан в основном

с углеродом (в природном газе и других углеводородах) и кислородом (в воде). Извлечение водорода требует энергетических затрат, что, в свою очередь, приводит к выделению CO₂ в случае использования высокоэмиссионных источников энергии. Кроме того, углерод, выделившийся при производстве водорода из ископаемых источников, например метана, необходимо удалять и где-то хранить. Технологии улавливания снижают выбросы CO₂, но не устраняют их полностью. С экологической точки зрения наиболее предпочтительным является расщепление воды на водород и кислород с использованием электричества от ВИЭ или АЭС. Сегодня под чистым подразумевается водород, производство которого сопровождается низким уровнем выбросов (эмиссии) диоксида углерода и других парниковых газов. В эту категорию входит водород, полученный с использованием как возобновляемых, так и низкоэмиссионных источников энергии, а также произведенный из ископаемого топлива с применением технологий CCUS (Carbon Capture, Use and Storage — улавливание, использование и хранение углерода).

Все это требует немалых затрат, но сегодня водородные проекты получают большую политическую и, соответственно, финансовую поддержку, прежде всего в экономически развитых странах, где общество

Объявленные объемы производства чистого водорода, млн тонн в год



Источник: Hydrogen Council, Project & Investment tracker, as of Jan 31, 2023

серьезно озабочено климатическими проблемами. При этом, в отличие от первой волны водородного бума, которая началась около 20 лет назад и была связана с большими планами по переходу на автомобили, работающие на водороде, сегодня повышенное внимание уделяется отраслям с интенсивными выбросами (таким, как производство цемента или дальнемагистральный транспорт), которые трудно или невозможно декарбонизировать только за счет электрификации.

Новые драйверы

Аналитики отмечают, что за последние два-три года многие водородные проекты получили ускоренное развитие, а интерес инвесторов к этой сфере значительно повысился. Правительства многих стран определили роль водорода в своих энергетических стратегиях, это помогло бизнесу оценить потенциальные рыночные перспективы и разработать планы по включению водорода в портфели проектов.

Кроме того, продолжающийся глобальный энергетический кризис высветил необходимость согласования потребностей в области энергетической безопасности с достижением климатических целей. Использование водорода отвечает этим задачам, так как может способствовать энергобезопасности стран — импортеров энергии за счет снижения зависимости от ископаемого топлива: развитие международного рынка водорода может увеличить количество потенциальных поставщиков энергии и обеспечить диверсификацию структуры энергопотребления.

По данным Международного энергетического агентства (МЭА), если все заявленные к настоящему времени проекты будут реализованы, к 2030 году использование водорода может помочь снизить потребление природного газа на 14 млрд м³ в год, угля — на 20 млн тонн в год и нефти — на 360 тыс. баррелей в сутки, что эквивалентно, например, всем известным на сегодня запасам ископаемого топлива в Колумбии. Самые большие возможности для сокращения использования ископаемого топлива и выбросов имеют тяжелая промышленность, грузовой автотранспорт и судоходство.

Отмечается, что при сегодняшних ценах на ископаемое топливо водород, произведенный с помощью возобновляемых источников, уже может конкурировать с водородом из ископаемого топлива во многих регионах, особенно в тех, где имеются хорошие ресурсы ВИЭ и которые нуждаются в импорте ископаемого топлива для удовлетворения спроса на производство водорода. Для производства водорода из воды необходимы электролизеры, но чистым такой водород будет считаться только при использовании электроэнергии из источников с низким уровнем выбросов. По состоянию на январь текущего года в мире объявлено о планах по вводу в эксплуатацию к 2030 году электролизеров общей мощностью 230 ГВт (причем ввод 60 ГВт из них анонсирован начиная с мая 2022-го). Это означает рост мощностей более чем в 300 раз по сравнению с действующими в настоящий момент.

Цифры

> 1000

объявленные во всем мире крупномасштабные (более 1 МВт) предложения по водородным проектам, 795 из них предполагают полное или частичное развертывание к 2030 году

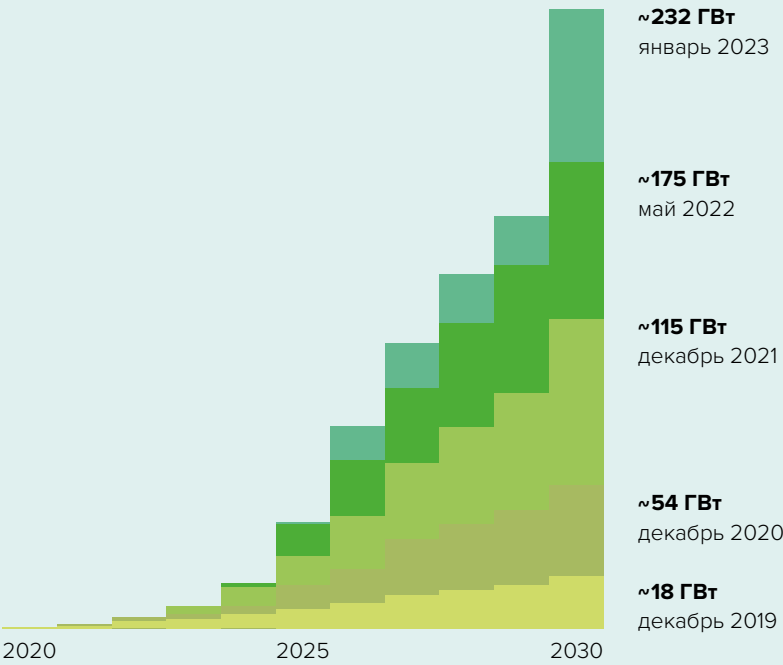
\$320 млрд

объявленные прямые инвестиции в водородные проекты до 2030 года, из них \$29 млрд прошли стадию ОИР (окончательное инвестиционное решение)

38 млн тонн в год

объявленные поставки чистого водорода в мире к 2030 году (производство менее 1 млн тонн в год развернуто сегодня)

Суммарная заявленная мощность электролизеров*, ГВт (с учетом всех стадий реализации проектов)



* для проектов без известных сроков развертывания добавление мощностей интерполировалось между известными этапами

Источник: Hydrogen Council, Project & Investment tracker, as of Jan 31, 2023

Водородная энергетика	Обзор	На фото
		Планируется, что в рамках проекта HYBRIT будет производиться около 1,2 млн тонн безуглеродной стали в год (25% от общего объема производства стали в Швеции)



Инфраструктура: от СПГ к водороду

Перепрофилирование газопроводов для передачи водорода может сократить затраты на 50–80% по сравнению с прокладкой новых трубопроводов. Также несколькими странами, особенно в Европе, рассматривается возможность перепрофилирования терминалов СПГ, но эти перспективы зависят от решения, будут терминалы принимать водород или аммиак. По данным Международного энергетического агентства, первоначальный анализ показывает, что перепрофилирование терминала СПГ для приема аммиака возможно при дополнительных 11–20% инвестиционных затрат. Перепрофилирование терминалов СПГ под водород сталкивается с более серьезными техническими проблемами из-за гораздо более низкой температуры сжиженного водорода, чем аммиака, что ограничивает использование существующего оборудования. Стоимость резервуара составляет около половины стоимости терминала СПГ, а новый резервуар для хранения сжиженного водорода может быть на 50% дороже, чем резервуар для СПГ. Существующая неопределенность в отношении масштабов будущего спроса на водород и его производные пока ограничивает как перепрофилирование существующих, так и строительство новых терминалов, которые могут быть готовы к работе с водородом или аммиаком.

Согласно анализу МЭА, если все объявленные проекты по вводу электролизеров в эксплуатацию будут реализованы и произойдет запланированное увеличение производственных мощностей, то к 2030 году затраты на электролизеры могут снизиться примерно на 70% по сравнению с сегодняшним днем. В сочетании с ожидаемым снижением стоимости энергии из возобновляемых источников это может снизить стоимость водорода на основе ВИЭ до диапазона 1,3–4,5 долларов за кг H₂, что эквивалентно 39–135 долларам за МВт·ч (нижняя граница этого диапазона приходится на регионы с хорошим доступом к ВИЭ).

Новый водород на практике

Хотя глобальный рынок водорода все еще находится в зачаточном состоянии, многие новые технологии применения водорода уже готовы к масштабированию.

В Швеции запущен проект HYBRIT (Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology — водородная прорывная технология производства железа) по изготовлению стали без использования угля и углерода, вместо которых в технологическом процессе применяется зеленый водород. Первая партия безуглеродной стали поставлена заказчику (автомобильной компании Volvo) в 2021 году. Коммерческое производство экологически чистой стали планируется начать в 2026-м. О старте аналогичных проектов в металлургической отрасли объявили Германия, Франция, Бельгия и Италия.

Первая в мире отгрузка сжиженного водорода из Австралии в Японию состоялась в феврале 2022 года, став важной вехой в развитии международного рынка водорода. HESC (Hydrogen Energy Supply Chain — цепочка

Справка

Hydrogen Council (Совет по водороду) — это глобальная инициатива, которая объединяет ведущие компании с единым видением долгосрочных целей в отношении водорода как инструмента, способствующего ускорению перехода к экологически чистой энергии. Совет считает, что водород играет ключевую роль в достижении глобальных целей декарбонизации, помогая диверсифицировать источники энергии и стимулировать новые бизнес-решения и технологические инновации как движущие силы долгосрочного экономического роста.

Инициатива была запущена в январе 2017 года на Всемирном экономическом форуме в Давосе. Первоначально в состав Совета входили главы

13 компаний, относящихся к энергетическому, транспортному и производственному секторам экономики (Air Liquide, Alstom, Anglo American, BMW Group, Daimler, Engie, Honda, Hyundai, Kawasaki, Shell, Linde, Total и Toyota). Сегодня Совет объединяет около 150 компаний, представляющих всю цепочку создания стоимости водорода, из более чем 20 стран мира.

Совет выступает за развитие сотрудничества между правительствами, промышленностью и инвесторами и предоставляет рекомендации по ускорению развертывания водородных решений по всему миру. Также Совет служит ресурсом для создания правовых норм и стандартов безопасности в области водородных технологий.

поставок водородной энергии) — совместный японско-австралийский проект. Япония с его помощью может сделать водород таким же широко применяемым энергоносителем, как нефть и природный газ. Танкер был специально разработан для перевозки сжиженного водорода с температурой –253 °С. За один рейс водородовоз может перевезти 75 тонн сжиженного водорода, объем которого составляет 1/800 от первоначального объема газа. Водород для этого проекта произведен с использованием бурого угля, предполагается, что впоследствии, при масштабировании проекта, углекислый газ, выделяющийся в процессе производства, будет закачиваться под морское дно у побережья австралийского штата Виктория.

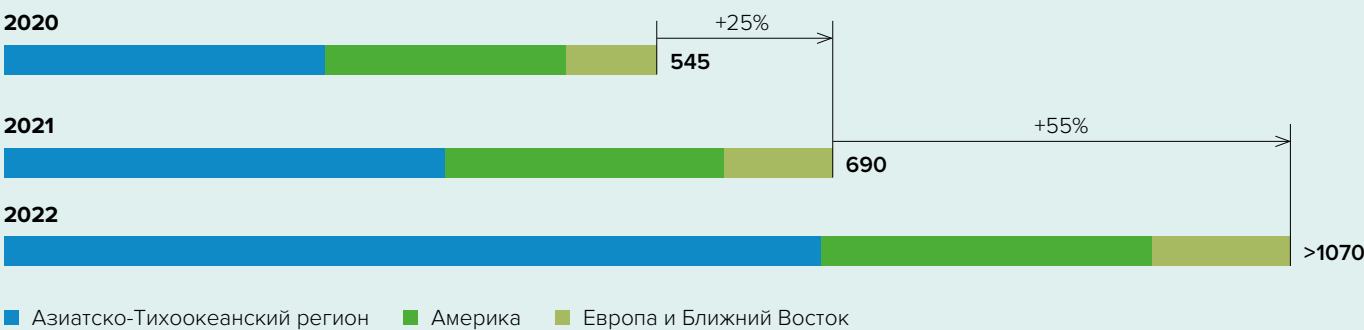
МЭА, исходя из анализа разрабатываемых экспортно ориентированных водородных проектов, считает, что к концу текущего десятилетия будет экспортироваться примерно 12 млн тонн водорода в год (к 2026-му — 2,6 млн тонн). О большинстве таких проектов было объявлено в последние два года, это связано с тем, что в качестве предпочтительного варианта водородного носителя многими компаниями был выбран аммиак. Например, о старте подобного проекта недавно объявила Korea Zinc Co., южнокорейская компания по производству цветных металлов, которая начнет коммерческое производство зеленого водорода

в Австралии — на солнечной электростанции мощностью 124 МВт. Водород будет преобразовываться в аммиак и транспортироваться потребителю.

В Германии в августе 2022 года начали курсировать первые пять из 14 поездов на водородном топливе. Они могут работать на одной заправке целый день, преодолевая расстояние до 1 тыс. км со скоростью до 140 км/ч, при этом такие поезда выбрасывают только пар и воду. Германия планирует увеличивать количество водородных поездов, Франция и Италия также объявили о планах по их закупке. В июне 2023 года первый водородный поезд приступил к перевозкам пассажиров в Канаде — пока в рамках демонстрационного проекта. В отличие от транспорта на электрических аккумуляторах, которым требуется время на зарядку, водородным топливом транспорт можно заправлять так же быстро, как газовым или дизельным. По данным Statista, транспорт производит около 20% глобальных выбросов парниковых газов, занимая по этому показателю второе место — после энергетического сектора, поэтому увеличение доли водородного транспорта может сыграть большую роль в достижении климатических целей.

Среди особенностей 2023 года Hydrogen Council выделяет несколько основных тенденций, которые

Водородная заправочная инфраструктура



Источник: Hydrogen Council



На фото

С 2022 года водородные поезда Coradia iLint осуществляют регулярные рейсы в Германии

определяют возрастающую роль водорода в глобальном энергопереходе. Подводя итоги первого полугодия, организация, объединяющая ведущих отраслевых игроков, полагает, что текущий год стал поворотным для развития водородных рынков, в том числе благодаря усилению политической поддержки со стороны государств, увеличению инвестиций и технологическим инновациям — прогресс в этих трех ключевых областях закладывает основу для ускоренного роста водородного сектора. По мнению Hydrogen Council, сотрудничество правительств, компаний — лидеров отрасли и исследователей, которое направлено на решение существующих проблем и раскрытие полного потенциала применения водорода, показывает, что водород может играть решающую роль в достижении глобальных климатических целей и перехода к более экологичной и устойчивой энергетической системе.

Принять решение: политика для бизнеса

Как подчеркивает Hydrogen Council, многие правительства во всем мире признают безотлагательность перехода к низкоуглеродной экономике и принимают политические решения, позволяющие ускорить продвижение водородных проектов. Объем объявленных инвестиций за 2022 год вырос с 240 до 320 млрд долларов США, но пока почти половина из анонсированных проектов находится на предварительных или ранних стадиях. Однако в течение первого полугодия 2023 года несколько стран изменили нормативно-правовую базу, внедрили финансовые стимулы и заявили о политической поддержке

инвестиций в водородные проекты и расширении международного сотрудничества в этой сфере. Устранение нормативных барьеров, а также повышение ясности и определенности в отношении перспектив развития рынка побуждают инвесторов принимать участие в водородных проектах и облегчают принятие окончательных инвестиционных решений (ОИР, FID — Final Investment Decision): общий объем инвестиций, достигших стадии ОИР, увеличился на 30% с мая 2022 года. Ускорение принятия ОИР позволит расширить всю цепочку создания стоимости водорода в глобальном масштабе.

Накопить энергию: системы хранения

По данным Hydrogen Council, в 2023 году наблюдается рост исследований и разработок в области инновационных систем хранения энергии на основе водорода. Водород имеет наибольшую энергоемкость на единицу массы по сравнению с любым другим топливом, но его низкая плотность при температуре окружающей среды приводит к низкой энергоемкости на единицу объема. Поэтому разработка современных решений в области хранения, имеющих потенциал для повышения энергетической плотности, становится ключом для дальнейшего развития водородных технологий, в том числе связанных с топливными ячейками. Предполагается, что такие системы ускорят развертывание водородных технологий и откроют новые варианты их использования — от обеспечения резервного питания в центрах обработки данных до автономного электроснабжения на строительных площадках. Разрабатываемые решения дают возможность длительного хранения энергии, а также обеспечивают масштабируемость и совместимость с существующей инфраструктурой, поэтому их применение поможет решать проблемы стабильности и устойчивости энергоснабжения.

Использовать преимущества: водородные хабы

Среди стран, которые демонстрируют самую высокую активность на пути к тому, чтобы стать крупными игроками на рынке водорода, Hydrogen Council в июле 2023 года выделяет Индию, ряд стран Африки и США.

Правительство Индии, стремясь обеспечить энергетическую независимость страны к 2047 году и добиться нулевого нетто-уровня выбросов углерода к 2070 году, признает потенциал водорода в решении этих задач и берет на себя обязательство развивать водородный сектор. В начале 2023 года кабинет министров одобрил Национальную миссию по зеленому водороду с целью сделать Индию ведущим производителем и поставщиком чистого водорода. Стратегия предполагает всеобъемлющий подход к созданию водородной экосистемы, в которой развертывание водородных хабов является приоритетом, так как позволяет смягчить инфраструктурные проблемы и снизить затраты. Правительство выделило 2,1 млрд долларов США

Цифры

Главная тема

в 15 раз

зеленый водород сегодня дороже, чем произведенный из природного газа без улавливания CO₂

на 50%

снизится стоимость зеленого водорода к 2030 году, согласно анализу PWC

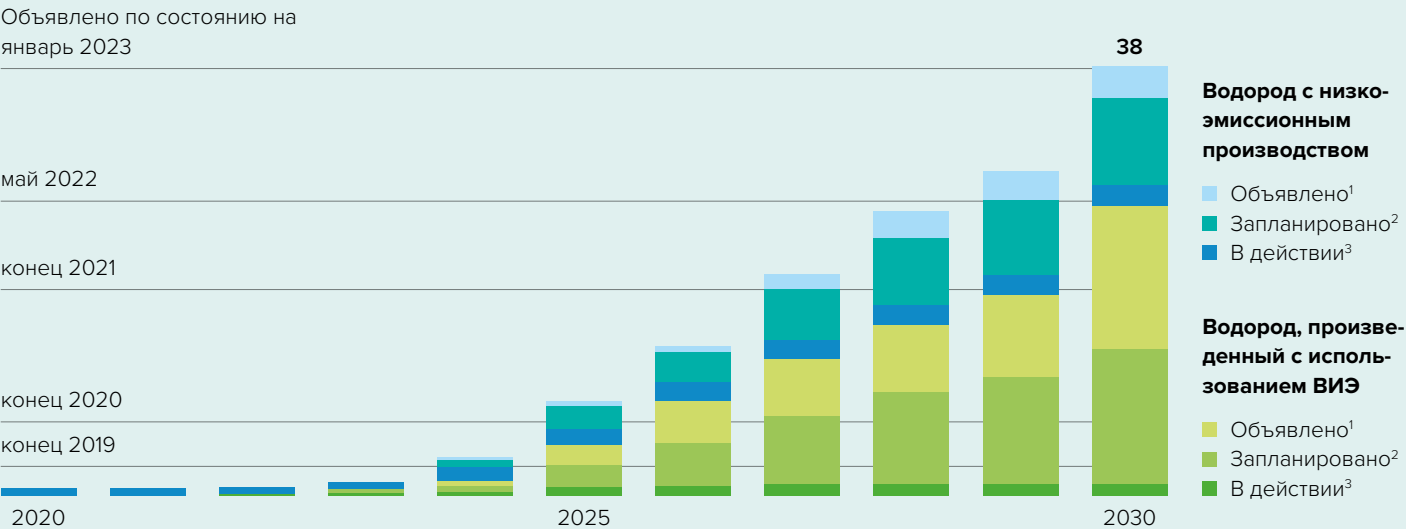
на стимулирование предложения для производства электролизеров и чистого водорода, помогая увеличить и ускорить внутренние и международные инвестиции в водородные проекты.

Африка с ее обширными возможностями в сфере возобновляемых источников энергии также готова стать мировым водородным центром. В 2023 году на африканском континенте было создано несколько партнерств и инициатив в области производства чистого водорода. Так, в ЮАР планируется создать три водородных хаба, реализация этих проектов, имеющих значительный экономический потенциал, превратит страну в важный центр производства водорода. В Марокко началось строительство завода с планируемой годовой производительностью 320 000 тонн чистого водорода. В мае текущего года правительство Египта одобрило законопроект, который предоставляет ряд стимулов для проектов в области ВИЭ, поощряя в том числе инвестиции в водородные инициативы. Предполагается, что осуществление этих планов не только даст Африке возможность удовлетворять собственные энергетические потребности, но и сделает континент основным поставщиком чистого водорода на мировой рынок, помогая стимулировать экономический рост, создавать рабочие места и способствовать устойчивому развитию всего континента.

В США Закон о снижении инфляции изменил правила игры для участников водородных проектов. Закон направлен в том числе на содействие экономическому росту за счет стимулирования инвестиций в чистую энергетику (в частности, разрабатываются критерии для выплат производителям до 3 долларов

за килограмм чистого водорода). Закон возродил интерес к водороду и стал катализатором целенаправленных инвестиций в исследования, разработки и коммерческое внедрение водородных технологий по всей Северной Америке, в результате были активизированы усилия по расширению проектов в области производства, хранения и распределения водорода. Ожидается, что всплеск инвестиций ускорит развертывание водородной инфраструктуры и будет способствовать росту устойчивой водородной экономики. В сочетании со значительными ресурсами возобновляемых источников энергии и дешевого природного газа это означает, что США также может стать центром производства и экспорта низкоуглеродного водорода. Несколько других стран с аналогичными конкурентными преимуществами, от Австралии и Норвегии до Чили и Саудовской Аравии, также уделяют большое внимание развитию водородной отрасли.

Объявленные совокупные мощности по производству водорода, млн тонн в год



- Предварительные исследования или выпуск пресс-релизов.
- Технико-экономическое обоснование, предварительное проектирование или проектирование.
- Окончательное инвестиционное решение принято, идет строительство, введено в эксплуатацию, эксплуатируется.

Источник: Hydrogen Council, Project & Investment tracker, as of Jan 31, 2023

Текст: Елена Андреева

Фото и иллюстрация: ТАСС, РИА «Новости» / Владимир Родионов, Центр фотографии Монтевидео, Архив РИА «Новости» / Владимир Грановский, wikipedia.org

Н₂ как вечный двигатель прогресса

Водородные мечты человечества: от прошлого к будущему

Водород в наши дни нередко называют универсальной основой энерготехнологий будущего, однако первой реализованной идее использовать водород в качестве топлива уже больше двух столетий, а в XX веке транспортные средства на водороде передвигались и по земле, и по воде, и по воздуху, и даже в безвоздушном пространстве. Рассказываем, как появлялись и развивались водородные технологии и почему человечество до сих пор не научилось использовать все их возможности.

Отцы технологий

В 1807 году франко-швейцарский изобретатель Франсуа Исаак де Риваз, которого называют отцом первого поршневого двигателя внутреннего сгорания, изобрел четырехколесное транспортное средство, которое приводилось в движение благодаря водороду и кислороду. А «родителем» водородной энергетики считается англичанин Уильям Сесил. В 1820 году он представил Кембриджскому философскому обществу работу, в которой описал свой водородный двигатель. Согласно объяснению Сесила, движение вызывалось давлением атмосферы на вакуум, который образуется в результате взрывов при взаимодействии водорода и атмосферного воздуха. Водород был в основе и прототипа топливного элемента, концепцию которого в 1842 году предложил англичанин Уильям Гроув, который был судьей и одновременно ученым.

Еще в начале XIX века британские ученые Уильям Николсон и Энтони Карлайл предложили использовать электричество, чтобы превращать воду в водород и кислород. Впоследствии Гроув решил повернуть этот процесс в обратную сторону. Погрузив электроды из платиновой фольги в стеклянные трубки с водородом и кислородом, находящиеся в ванночке с серной кислотой,

он собрал несколько таких ячеек и получил газовую гальваническую батарею.

И хотя концепция топливного элемента была описана немцем Кристианом Фридрихом Шёнбейном еще в 1839 году, свое название (fuel cell) он получил лишь в 1889 году. Тогда работавший в Великобритании химик немецкого происхождения Людвиг Монд и его ассистент Карл Лангер разработали устройство, которое давало гораздо больше электричества, чем изобретение Гроува, и служило дольше. Качественно улучшить характеристики топливного элемента удалось благодаря использованию электродов из тонкой перфорированной платины и полутвердых электролитов.

Предсказание Жюль Верна

Главным же «пиарщиком» водородной энергетики можно назвать Жюль Верна, который в своем романе «Таинственный остров» устами главного героя провозгласил, что в будущем вода станет топливом. «Придет день, когда котлы паровозов, пароходов и тендеры локомотивов будут вместо угля нагружены сжатыми газами, и они станут гореть в топках с огромной энергией. <...> Пока на Земле живут люди, они будут обеспечены всем, и им не придется терпеть недостатка в свете, тепле и продуктах животного, растительного или минерального царства. Повторяю, я думаю, что, когда истощатся залежи каменного угля, человечество будет отапливаться и греться водой. Вода — уголь будущего», — уверял выдуманный писателем-фантастом инженер Сайрес Смит. Уголь пока не удалось заменить водой, но до сих пор рассуждения о водородной энергетике связывают с надеждами на лучшее, во всяком случае с экологической точки зрения, будущее.

«Лошадиное» авто

В 1860 году бельгийский изобретатель Жан Жозеф Этьен Лемуар запатентовал собственный двигатель внутреннего сгорания и разработал трехколесный автомобиль, который приводился в движение таким двигателем — одноцилиндровым, мощностью в полторы лошадиные силы. Двигатель работал на водороде, полученном из воды с помощью электролиза.

Поскольку машина постоянно нуждалась в воде, ее по аналогии с лошадью называли гиппомобилем. В 1862 году гиппомобиль был подвергнут тест-драйву, он проехал 18 км от Парижа до Жуанвиля почти

Дирижабль LZ 127 «Граф Цеппелин» в небе над Монтевидео, 1934 год



за три часа, что по тем меркам было довольно хорошим результатом. В XX веке Лемуара называли человеком, опередившим свое время на сто лет.

Ниагара как источник вдохновения

Новый всплеск интереса к водороду как источнику энергии пришелся на начало 1900-х. В Канаде пионером в развитии водородных технологий стал Александр Томас Стюарт, выпускник Университета Торонто, специализировавшийся в химии и минералогии. Еще во время практики в университете он работал на электрохимическом заводе на водопаде Ниагара. Стюарт догадался, что, используя излишки электричества, можно осуществлять электролиз воды и производить водород и кислород.

В 1913 году он разработал систему электролиза, которая впоследствии больше века использовалась как одна из основных и получила название «электролизер Стюарта». В 1920-е годы ученый продолжал вести свои исследования, на основе которых была создана Stuart Oxugen Company. Кстати, ее подразделение в Сан-Франциско в 1930-е годы участвовало в получении экспериментальных объемов тяжелой воды для Манхэттенского проекта.

Мне бы в небо

В начале прошлого века водородные технологии пошли в небо — благодаря настойчивости и упорству

немецкого графа Фердинанда фон Цеппелина, который во время поездки в Америку увидел аэростаты, поднялся на одном из них в небо и... навсегда полюбил летать. Всю оставшуюся жизнь он посвятил созданию дирижаблей.

Справедливости ради надо напомнить, что идея запустить в воздух шар, наполненный водородом, впервые появилась у французского профессора физики Жака Александра Сезара Шарля (в его честь такой шар был назван шарльером). Чтобы оболочка шара могла удерживать водород, ее пропитали каучуком. Первое успешное испытание прошло 27 августа 1783 года в Париже на Марсовом поле.

Фон Цеппелин же в начале XX века не стал мелочиться и сразу приступил к созданию гигантских дирижаблей, которые получили его имя. Летом 1900 года цеппелин длиной 127 м впервые поднялся в небо. Это было над Боденским озером, посмотреть на запуск пришли толпы людей. Дирижабль оправдал их ожидания, продержавшись в воздухе 18 минут.

После этого была создана компания по производству цеппелинов и первая в мире пассажирская транспортная компания «Германские дирижабли». Похожий на огромный кабачок дирижабль состоял из отсеков, где находился водород, необходимый для подъема. Внутри обтянутого тканью корпуса или под ним была расположена гондола, где размещался экипаж с пассажирами.

1913

Канадец Александр Томас Стюарт разработал систему электролиза для получения водорода, которая широко использовалась в мире на протяжении столетия

1940-е

В блокадном Ленинграде водород использовался не только для наполнения аэростатов заграждения, но и в двигателях лебедок, поднимающих и опускающих аэростаты

В 1928 году был построен самый совершенный на тот момент дирижабль «Граф Цеппелин». Его длина составляла уже почти 237 м, а мощность силовой установки, состоящей из пяти двигателей «Майбах», достигала 2650 лошадиных сил. На следующий год он совершил кругосветное путешествие из Лейк-херста (США) за 21 день и произвел настоящий фурор во Фридрихсхафене, Токио и Лос-Анджелесе, где он приземлялся. За девять лет службы «Граф Цеппелин» совершил 590 рейсов общей протяженностью почти 1,7 млн км.

Осенью 1930 года «Граф Цеппелин» побывал в Москве. А летом 1931 года провел аэрофотосъемку советской Арктики. По случайному совпадению именно там, где пролетал цеппелин, во время Великой Отечественной войны немцами была проведена секретная операция — развернута полярная станция на одном из островов архипелага Земля Франца-Иосифа.

К весне 1936 года был построен дирижабль «Гинденбург», длина которого достигала 245 м. Чуть более года спустя, в мае 1937-го, при приземлении в Лейк-херсте на борту «Гинденбурга» начался пожар и произошел взрыв водорода, который привел к гибели 36 человек (с учетом одного погибшего на земле). Это стало громким концом эпохи дирижаблей.

Тем не менее концом эпохи водорода эта трагедия не обернулась. В 1939 году немецкий инженер Рудольф Эррен получил в США патент на двигатель внутреннего сгорания, в котором в качестве топлива использовался водород. С 1920-х годов он работал над тем, чтобы перевести ДВС автобусов, грузовиков и подлодок на водород. Именно он впервые применил в ДВС, использующих водород, внутреннее смешение, что снижало риск обратной вспышки, то есть взрывоопасность при работе двигателя. Сохранение системы подачи основного вида топлива

позволяло использовать двигатель в комбинированном режиме.

На военной службе

Применение водорода бывало и вынужденной мерой. Так, осенью 1941 года в блокадном Ленинграде изобретатель, а на время войны автотехник 3-го полка аэростатов заграждения второго корпуса ПВО Борис Шелищ придумал, как в условиях отсутствия бензина заставить работать двигатели грузовых автомобилей ГАЗ-АА на водороде после его использования в аэростатах. По воспоминаниям Шелища, на эту мысль его натолкнул Жюль Верн. Установленные на ГАЗ-АА лебедки были задействованы в подъеме и спуске аэростатов, которые служили помехой для немецких самолетов и использовались для воздушной разведки. Предложение Шелища нашло поддержку, после испытания все городские лебедки было решено перевести на водород. В конце 1941 года Шелища наградили орденом Красной Звезды, а в 1942 году отправили в Москву передавать опыт. Всего в СССР в годы войны на водород были переведены более 400 автомобильных двигателей.

Также во время Второй мировой войны водород был востребован как топливо для подводных лодок и торпед. В Австралии, оказавшейся из-за военных действий в Европе без нефти, была запущена программа крупномасштабного производства водорода для использования в качестве моторного топлива.

Медленно, но верно

С окончанием войны и снижением цен на нефть водородная тематика перестала быть востребованной. Однако к 1970-м годам, когда после создания ОПЕК цены на нефть снова стали расти, про водород как источник энергии вновь вспомнили во многих странах мира. Кроме того, уже тогда одной из существенных проблем для больших городов стало загрязнение воздуха выхлопами от транспорта.

Австрийский химик и изобретатель Карл Кордеш, переехавший в США, в 1970 году установил на своем четырехместном автомобиле Austin A40 водородокислородный щелочной топливный элемент мощностью 6 кВт, запас хода которого превышал 280 км. Впоследствии предложенная Кордешем конструкция была использована в электромобиле General Motors. Единичные версии автомобилей, работающих полностью или частично на водороде, неизменно привлекали большое внимание. В 1972 году в Мичигане был представлен модифицированный Volkswagen Beetle — Brigham Young Superbeetle. В 1979 году был выпущен работающий на водороде или бензине BMW 520h. В 1984 году Mercedes представил десятиместный минивэн TN 310 с ДВС, работающим на сжиженном водороде.

В 1974 году была создана Международная ассоциация водородной энергетики, которая объединила ученых, конструкторов и управленцев, занимающихся развитием водородных технологий. Членом ассоциации

На фото

Экспериментальный самолет Ту-155, разработанный специалистами конструкторского бюро Андрея Туполева (ныне Конструкторское бюро «Туполев») для исследований двигателей с использованием криогенного топлива



стал и Советский Союз, где основные работы в этой области осуществлялись под эгидой Комиссии Академии наук СССР по водородной энергетике и при непосредственном участии Института атомной энергии им. И. В. Курчатова.

В том же году в Японии началась реализации проекта по альтернативной энергетике Sunshine, пятую долю финансирования в котором — 3,6 млрд долларов из 15 млрд — занимала водородная энергетика. Программа была рассчитана до 2000 года.

А в США в конце 1980-х в силу достаточно быстрого разочарования (из-за отсутствия мгновенных результатов) бюджет программ по исследованию возобновляемых источников энергии, включая водород, был сокращен на 80% администрацией президента Рональда Рейгана. Но это не повлияло на разработки для космоса: для выведения Space Shuttle на орбиту использовался водород и кислород.

«Волга» на водороде

В СССР в 1970-е годы активно исследовали возможности внедрения водородного топлива в таких областях, как автотранспорт, энергетика, авиация, ракетостроение.

В исследовательских целях на водород переводили разные модели, которые выпускал советский автопром, — «Волгу», «Москвич», «Жигули», ЗИЛ-130, а также микроавтобусы РАФ и УАЗ. Совместная разработка НПО «Квант» и Рижской автобусной фабрики — микроавтобус «Квант-РАФ» с топливным водородо-воздушным элементом мощностью 2 кВт и никель-цинковым аккумулятором — была представлена в 1982 году на Международной выставке «Электро-82» в Москве.

С 1980 года в Харькове проходили опытную эксплуатацию бензоводородные «Волги». Выяснилось, что при содержании водорода в топливной смеси на уровне 5% расход бензина снижается на 35–40%, сокращая токсичность выбросов. В 1986 году Минавтопром принял решение о создании 200 экспериментальных РАФов на бензоводородных смесях для опытной эксплуатации в качестве городского транспорта. Однако в силу известных исторических событий этим планам было не суждено сбыться.

Тем не менее в нашей стране, как и за рубежом, был заложен фундамент технологий по использованию водорода. В ракетно-космической промышленности был создан масштабный проект «Буран — Энергия» с первой советской ракетой-носителем, использующей криогенное горючее (водород) на маршевой ступени.

С 1980 года в СССР развивали проект водородного самолета. Один из трех двигателей летающей лаборатории — самолета Ту-155, совершившего первый полет



На фото

Легковой автомобиль «Волга» ГАЗ-24, работающий на водороде, 1988 год

1970

Австралийский химик Джон О'Мэлли Бокрис предложил использовать термин «водородная экономика» для систем, в которых водород используется для транспортировки энергии из возобновляемых источников на большие расстояния

2021

Представлен российский водородный автомобиль Aurus Senat, разработанный ФГУП «НАМИ»

в 1988 году, — мог работать на сжиженном водороде. Но затем его перевели на сжиженный природный газ.

В чем сила?

Преимущества водорода позволяют ему вот уже два века держаться в шорт-листе перспективных технологий. Первый и главный плюс — распространенность этого химического элемента.

Водород химически активен, при этом выбросы при его использовании в качестве топлива абсолютно безвредны. Водород считается идеальным источником энергии для топливных элементов: он легко подводится, а продукт реакции (вода) легко отводится из топливного элемента. Кроме того, он обладает высокой энергоэффективностью и почти в три раза большей энергоемкостью, чем традиционное топливо из ископаемых источников.

А создание баллонов высокого давления, в том числе композитных, решило давнюю проблему хранения водорода — в таких резервуарах его можно хранить в виде сжатого газа, экономя объем.

Непростым путем

В конце 1990-х — начале 2000-х водород вновь вошел в моду. Многие мировые автомобильные гиганты представили свои модели на водороде: Renault Fever, BMW 728hL и 750hL, Ford P2000 FC и различные модификации Honda FCX. В России в результате сотрудничества «АвтоВАЗа» и Уральского электрохимического комбината были созданы два концепт-кара с электрохимическими генераторами вместо двигателя внутреннего сгорания. В 2001 году на базе удлиненного автомобиля «Нива» сделали водородный АНТЭЛ-1, а спустя два года — АНТЭЛ-2 на базе ВАЗ-2111.

В 1999 году в Гамбурге открылась первая в Европе общедоступная водородная заправка. В 2013 году был выпущен водородный гибридный автомобиль на топливных элементах Toyota Mirai, который тут же окрестили автомобилем будущего.

Из последних разработок в этой области в России можно назвать водородный автомобиль Aurus Senat, представленный в октябре 2021 года ФГУП «НАМИ». Его пробег от заправки до заправки составляет около 700 км. Однако развитие водородного автотранспорта в нашей стране сдерживается в том числе отсутствием инфраструктуры: по состоянию на 2022 год в России работали всего три водородных заправки — одна в Москве и две в Подмосковье. В Казанском государственном энергетическом университете пока только проектируется первая российская водородная заправочная станция из отечественных комплектующих. В мире ситуация лучше, но количество водородных заправок все еще несопоставимо меньше по сравнению с бензиновыми и электрическими.

Но не водородомобилями едиными: о развитии железнодорожного водородного транспорта в последние годы заговорили в Японии, Франции, Италии, Китае, Индии, России. В Германии первая в мире железнодорожная линия с водородными поездами работает с 2022 года. Летом текущего года первый поезд на водороде был запущен в Канаде. 1 кг водородного топлива, используемого поездом, заменяет 4,5 кг дизельного топлива. Однако, как обратили внимание журналисты, для транспортировки водорода к месту заправки поезда пока используется грузовик с дизельным двигателем.

Затишье перед бумом?

Планы по развитию водородных технологий за последние годы почти стали синонимом ответственного отношения к будущим поколениям. Однако стало понятно, что ответственность должна распространяться на все стадии топливного цикла и, в случае с водородом, на способы его производства. Процесс получения водорода требует большого количества энергии, а наиболее экономически эффективные и наиболее распространенные на сегодняшний день технологии производства водорода используют ископаемое топливо, что не соответствует зеленым целям.

Как несложно догадаться, зеленый водород получают с применением возобновляемых источников энергии методом электролиза, однако пока его доля в общем объеме производства составляет лишь несколько процентов, так как остается нерешенной проблема высокой стоимости водорода, вырабатываемого с использованием ВИЭ.

Складывается ощущение, что в последнее время бурные и порой спекулятивные рассуждения на тему перспектив водородной энергетики несколько поутихли. Однако это затишье лишь в медиа, а в кабинетах ученых и конструкторов кипит работа, которая обязательно приведет к прорыву. И тогда водород не просто займет место угля, как в романе Жюль Верна, а станет большой и важной частью надежной мировой энергосистемы.

Взгляд в будущее

От поиска природных источников до новых способов производства, от грузовых автомобилей и спецтехники до самолетов: рассказываем, над какими проектами, связанными с чистыми водородными технологиями, геологи, инженеры, ученые в разных странах мира работают прямо сейчас.

Белым-бело

46 млн тонн — таковы предполагаемые запасы природного, или белого, водорода в Лотарингии (Франция), что эквивалентно половине нынешнего мирового производства. Это «месторождение» было обнаружено в мае 2023 года при проверке заброшенных шахт.

Природный водород естественным образом присутствует в земной коре и мантии, наша планета постоянно производит его посредством химических реакций, в основном связанных с окислением минералов двухвалентного железа. Его извлечение не требует больших затрат энергии и воды, и он даже может стать возобновляемым ресурсом, если скорость добычи будет соотнесена со скоростью его образования. Все эти преимущества делают природный водород гораздо более дешевым ресурсом, чем водород, получаемый методом электролиза.

Водородную скважину с 2014 года эксплуатирует Мали, буровые работы сейчас ведутся в Небраске (США), интерес к этой сфере проявляют Намибия, Бразилия, Канада. Предполагается, что такие ресурсы существуют и во многих странах Европы, в том числе в России.

Чисто и приятно

630 км смог проехать на одной заправке грузовой автомобиль на водородных топливных элементах. Демонстрационные грузовики британской компании First Hydrogen прошли успешные испытания. Водители отметили, что новый автомобиль тихий, плавный и приятный в управлении, а загрузка машины не влияла заметно на скорость, запас хода и работу топливных элементов. Производитель ждет зимних испытаний: ожидается, что использование водорода при низких температурах будет иметь

преимущества перед другими технологиями с нулевым уровнем выбросов.

Для владельцев легковых машин выгоды топливных ячеек по сравнению с электроаккумуляторами пока не очевидны, но производители грузового транспорта уделяют водороду все больше внимания. Корейский Hyundai также вышел на этот рынок, выпустив грузовик Xcient Hydrogen в мае 2023 года. Toyota заявляет, что к 2026 году выпустит топливные элементы следующего поколения, которые будут на 50% дешевле нынешних, но при этом обеспечат увеличение запаса хода на 20%. Также японская компания планирует производить в Таиланде зеленый водород на электролизном оборудовании собственной разработки, используя биогаз, получаемый из куриного помета и пищевых отходов.

Экскаваторам и погрузчикам не нужно развивать большую скорость на дороге, но им требуется огромное количество энергии — для добычи камня в карьерах или выемки грунта на строительных площадках. Для таких задач электроаккумуляторы не всегда подходят: обычно спецтехника работает 24 часа в сутки, и быстро подзарядить гигантскую батарею 20-тонного экскаватора глубоко в карьере невозможно, а прерываться на много часов — нецелесообразно. Предсерийные машины британского производителя JCB, оснащенные водородными двигателями внутреннего сгорания, заправляются всего за несколько минут, при этом обеспечиваются точно такие же мощности, крутящий момент и производительность, что у дизельного двигателя, но без выбросов углерода.

Крылатый водород

4 часа потребует, чтобы долететь из Америки в Австралию, вместо 17 часов сегодня. Швейцарский стартап Destinus разрабатывает гиперзвуковой пассажирский реактивный самолет с водородным двигателем. В конце 2022 года компания объявила об успешных испытательных полетах первого прототипа Eiger. Второй прототип с новой силовой водородной установкой должен быть готов к концу текущего года. По заявлениям компании, первые коммерческие межконтинентальные рейсы самолета с грузоподъемностью в 1 тонну запланированы на 2025 год, а к 2029-му самолеты будут иметь полезную нагрузку 100 тонн. Есть

и другие компании, занимающиеся водородным авиастроением. Например, стартап Universal Hydrogen из Лос-Анджелеса успешно завершил 15-минутный испытательный полет своего самолета с водородным двигателем в марте 2023 года.

Научиться у природы

90% — так оценили исследователи эффективность нового процесса получения водорода. Ученые из Тель-Авивского университета (Израиль) воспользовались свойствами некоторых микроорганизмов, чьи ферменты умеют производить водород, получая энергию в процессе фотосинтеза. Гель на водной основе (причем использоваться может морская вода) в эксперименте использовался для прикрепления фермента к биокатализатору и электроду, который давал энергию вместо солнца. Высокая стоимость зеленого водорода обусловлена в том числе применением в конструкции электролизеров редких и драгоценных металлов, например платины, а также необходимостью использовать дистиллированную воду. Если метод, предложенный израильскими учеными, окажется успешным в промышленном масштабе, он даст возможность существенно снизить стоимость экологически чистого водорода.

Самый дешевый

73% стоимости производства зеленого водорода составляет сегодня стоимость электроэнергии. Но компания NewHydrogen, сотрудничающая с Калифорнийским университетом, анонсировала разработку технологии производства самого дешевого в мире чистого водорода — с использованием промышленного тепла (менее 1000 °C) вместо электричества. Технология основывается на применении каталитической жидкости, которую можно восстанавливать в одной камере, окислять в другой камере, постоянно перерабатывать и использовать повторно. Требуемые ресурсы — только тепло и вода. Компания заявляет, что разрабатываемая технология ThermoLoop потенциально может изменить всю водородную промышленность, резко снизив стоимость зеленого водорода за счет использования дешевого или бесплатного тепла, в том числе образующегося при осуществлении таких промышленных процессов, как производство стали, стекла, керамики и многих других, а также при работе АЭС.



Фото: Pacific Northwest National Laboratory

Полупроводниковые квантовые точки сульфида кадмия

Новый фаворит: широкозонные полупроводники

Нобелевский лауреат по физике Жорес Алферов называл три направления, открытия в которых в значительной степени изменили ход истории и во многом определили дальнейшее научно-техническое развитие человечества, — это деление ядер урана, полупроводники и лазеры. Если говорить о полупроводниках, то создание транзисторов и последовавшее становление микроэлектроники стало основой для появления множества технологий, без которых мы сегодня не мыслим свою жизнь, — от вычислительной техники и гаджетов до оптоволоконной связи и светодиодов.

Сегодня много говорят о третьем поколении полупроводниковых материалов — широкозонных

полупроводниках, чьи физические свойства позволяют использовать их при гораздо более высоких температурах, напряжениях и частотах, чем кремний и другие полупроводники предыдущих поколений. В последнее время эти возможности находят все более широкое практическое применение.

Эксперты рассказали «Вестнику атомпрома» о том, какие материалы являются широкозонными полупроводниками, каковы их основные особенности и преимущества перед материалами предыдущих поколений, в каких областях они используются сейчас и какие перспективы открывают для применения в будущем.



Текст: Виктор Федосеев, главный научный сотрудник АО «НИИ НПО «ЛУЧ», кандидат технических наук
Инфографика: АО «НИИ НПО «ЛУЧ»

Зона широких возможностей

Перспективы производства и применения широкозонных полупроводников

Относительно новое и очень многообещающее направление в электронике — применение широкозонных полупроводников, отличающихся особым сочетанием электрофизических свойств, что ведет к качественному улучшению характеристик приборов на их основе. Рассказываем об особенностях и возможностях этих материалов, а также о технологиях, необходимых для их производства.

Сферы применения различных материалов микроэлектроники проиллюстрированы на рисунке 1 (стр. 36). Традиционные дискретные приборы на основе кремния работают при умеренных частотах и мощностях. Напряжение пробоя для них обычно не превышает 650 В. Карбид кремния применяют в мощных электронных преобразователях, в частности при напряжениях 1700 В и выше.

Приборы из нитрида галлия предназначены главным образом для высокочастотных устройств, например для работы в сетях мобильной связи 5G. Согласно

Три поколения материалов

Электроника — это крупнейшая отрасль мировой экономики, объем которой в 2022 году составил 1,5 трлн долларов США. В основе современной электроники лежат полупроводниковые материалы, первыми из которых были германий и кремний. Затем появились составные полупроводники из двух-трех элементов: арсенид индия-галлия, антимонид индия, теллурид кадмия и др. К третьему поколению материалов относятся так называемые широкозонные полупроводники с шириной запрещенной зоны более 3 эВ, например карбид кремния, нитрид галлия, оксид олова, сульфид или оксид цинка. Однако в настоящее время промышленным потенциалом обладают только первые два материала из этого списка.

Горизонты возможностей

Из полупроводников изготавливаются дискретные диоды и транзисторы, создаются интегральные микросхемы и собираются силовые модули. Ни одно предприятие госкорпорации «Росатом» не обходится без применения электроники, а некоторые из них выступают на отечественном рынке как крупные разработчики. Среди новых направлений разработок в области силовой электроники в госкорпорации следует отметить электротранспорт (в частности, участие в создании электромобиля «Атом»), электрозарядные станции, ветро- и солнечную энергетику, где применение широкозонных полупроводников является весьма перспективным.

Справка

Типы полупроводниковых приборов

Дискретные приборы:

диоды
транзисторы
тиристоры

Оптические приборы:

светодиоды
лазерные диоды
приемники-передатчики
фотодетекторы

Силовые модули

Сенсоры

Интегральные схемы:

микропроцессоры
память
логические схемы
аналоговые схемы

журналу Compound Semiconductor (2022. Vol. 28, iss. 4. Р. 43), нитрид галлия на подложке из карбида кремния является практически единственным вариантом создания мощной электроники на частотах свыше 6 ГГц. Транзисторы из кремния LDMOS, арсенида галлия, сплава кремний-германий и нитрида галлия на кремниевой подложке существенно уступают нитриду галлия на подложке из карбида кремния по мощности и (или) по частоте (рис. 2).

Ширина запрещенной зоны определяет способность полупроводника работать при высоких напряжениях, токах, частотах и температурах. Среди других особенностей карбида кремния — значительная величина электрического поля пробоя и высокая теплопроводность. В конечном счете эти свойства позволяют сделать электронные приборы более компактными и легкими, снизить потери, обеспечить работу при более высоких токах, напряжениях, мощностях, частотах, температурах и в неблагоприятных внешних условиях, а также упростить систему охлаждения. Например, применение карбида кремния (SiC) в электромобилях Tesla Model 3 позволило увеличить длину пробега от батареи на 10%, а при использовании блоков питания на основе нитрида галлия (GaN) фирмы Navitas вдвое — объем зарядного устройства.

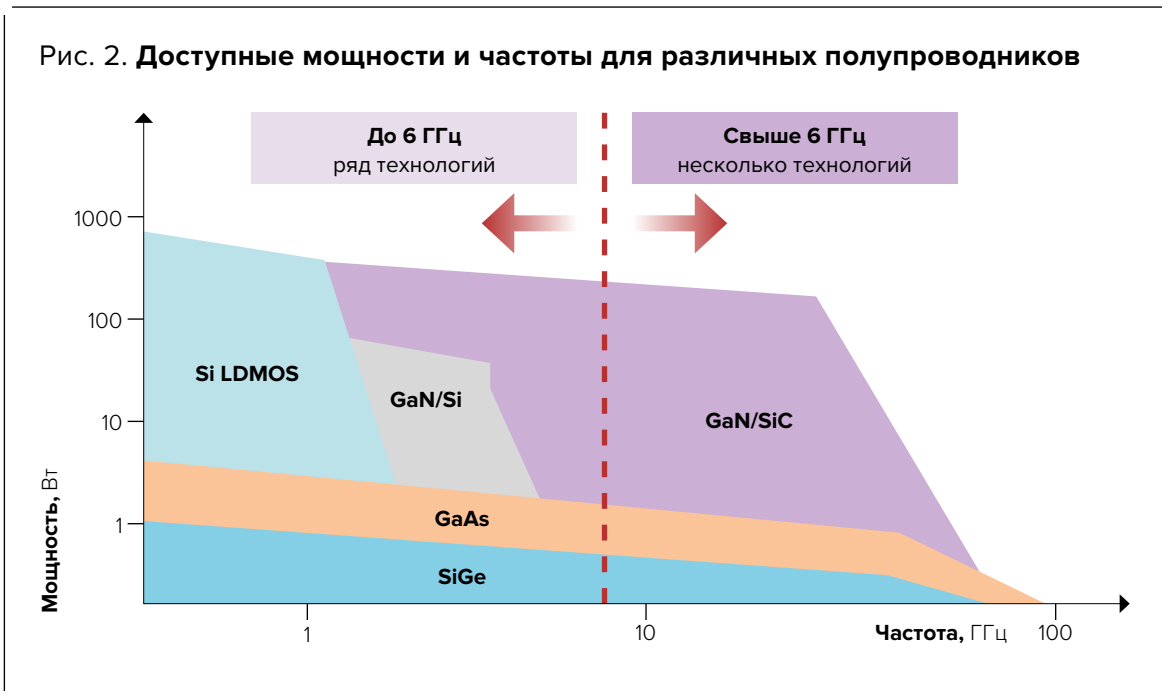
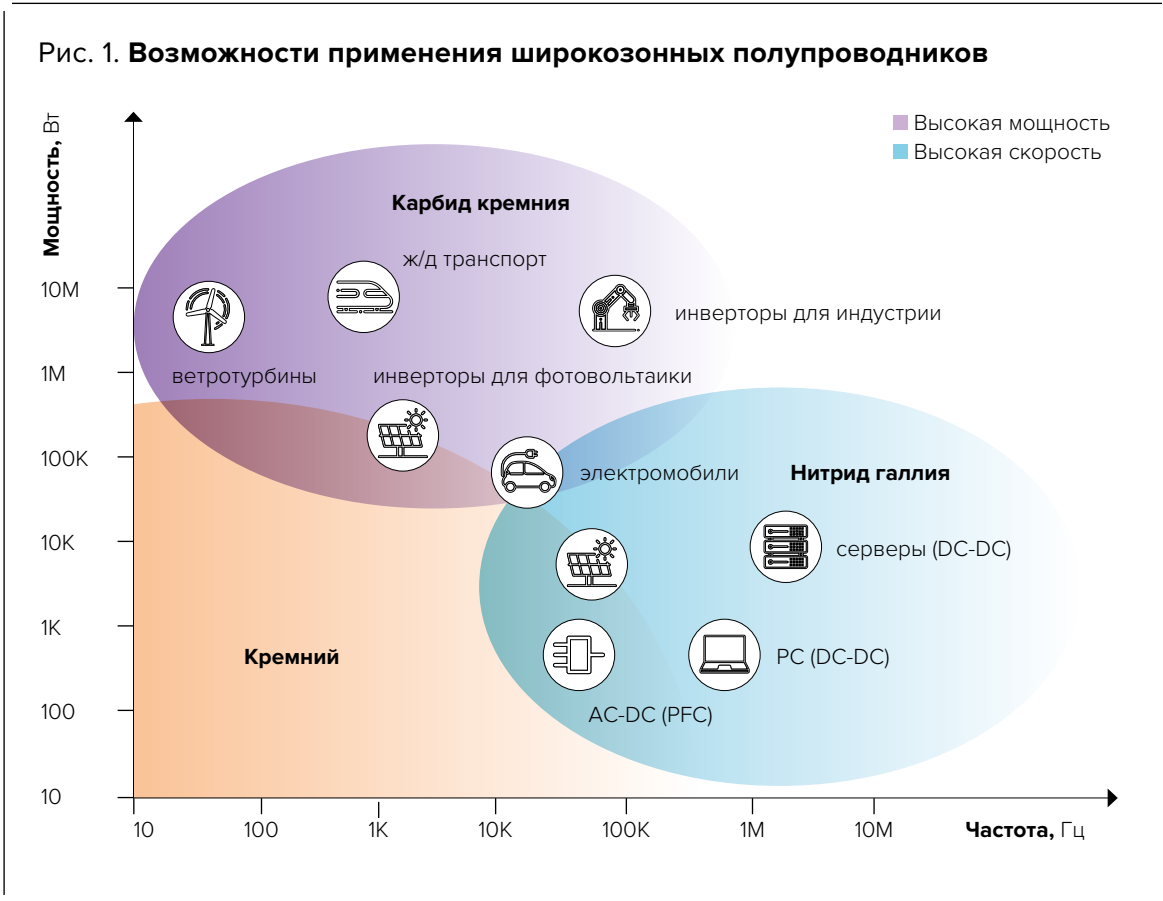
Таким образом, уже сейчас силовая электроника нового поколения применяется в легковых

электромобилях. Далее возможно применение в таких областях, как грузовой электротранспорт, оборудование для возобновляемой энергетики, линии электропередач, приводы электромоторов с переменной частотой вращения, информационно-коммуникационная техника, центры обработки данных, железнодорожный транспорт. В чуть более отдаленной перспективе появятся полностью электрические самолеты и морские суда. Согласно прогнозу Power SiC 2022 Report компании Yole Developpement, мировой рынок силовой электроники в период 2021–2027 годов будет расти с темпом 34% ежегодно (рис. 3).

Что же мешает массовому внедрению широкозонных полупроводников? Прежде всего, это сложности технологии производства и, соответственно, высокая цена материалов. Безусловный мировой лидер в использовании карбида кремния и нитрида галлия для силовой электроники — США. Китай энергично пытается наверстать упущенное. Другие страны — Япония, Германия, Южная Корея — не обладают всем спектром технологий в этой области. Можно сказать, что наличие разработок в области широкозонных полупроводников является одним из показателей уровня научно-технологического развития страны.

Как это делается: от порошка до пластин

Рассмотрим цепочку производства электронных пластин из карбида кремния диаметром 150 мм.

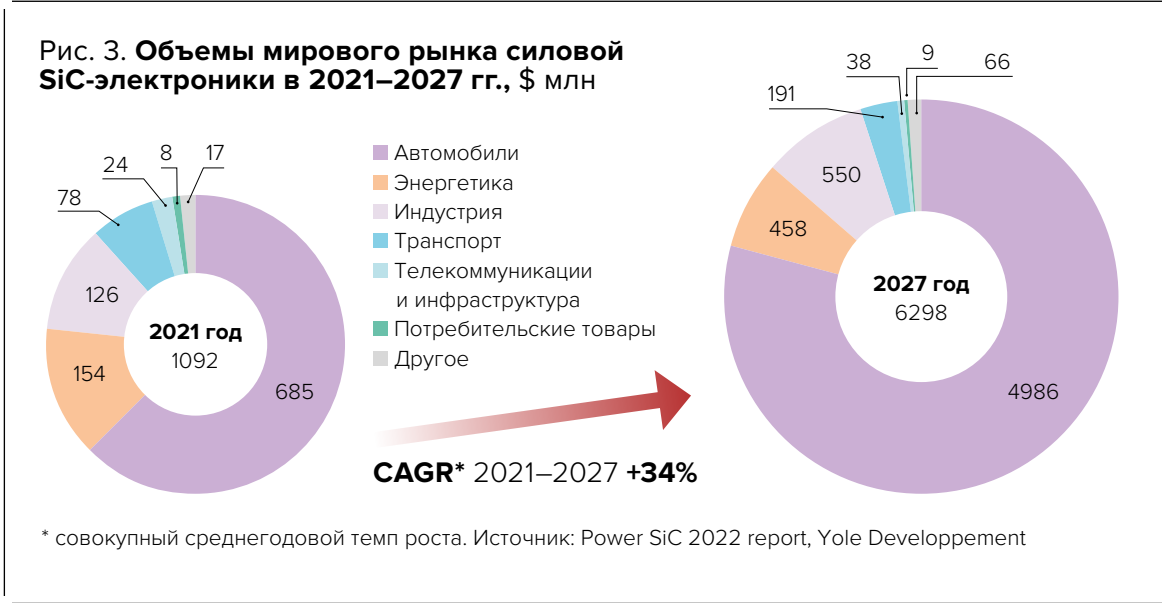


Дальнейшие пределы, связанные с формированием электронных транзисторов и микросхем, — нанесение фоторезиста, литография, имплантация примесей, нанесение тонких пленок, пассивация, металлизация, нарезка чипов, корпусирование, сборка силовых модулей, инспекция и метрология — во многом аналогичны уже имеющимся для кремниевых фабрик. Более того, рассматриваются варианты модернизации устаревших фабрик для кремниевых пластин диаметром 150 мм с целью перехода на пластины из карбида кремния.

Этап 1: исключительно чисто
Начинается все с производства ультрачистого порошка карбида кремния. Его чистота должна быть

на уровне ~ 6N (то есть шесть девяток — 99,9999%). Соответственно, содержание примесей не должно превышать 1 ppm, или одну миллионную часть по весу. Гранулярный состав порошка должен быть субмиллиметрового диапазона.

Для получения абразивного карбида кремния с конца XIX века используется процесс Ачесона. При этом в большие печи засыпают смесь кварцевого песка, нефтяного кокса, древесных опилок, соли и нагревают с помощью графитового нагревателя до температуры примерно 2500 °С. По окончании процесса длительностью несколько суток кладку разбирают. Ближе к графитовому нагревателю получают более



чистый (зеленый) карбид кремния. Примерно таким образом работает единственное в России предприятие по производству карбида кремния — Волжский абразивный завод.

Однако чистота такого продукта далека от электронного качества. Даже если использовать чистые кварц и порошок углерода, предел метода Ачесона по чистоте — 5N. Производства карбида кремния требуемой чистоты в России нет, и его нужно создавать. В лабораторных масштабах это относительно просто, но в промышленных, когда речь идет о тоннах продукции, — это непростая задача, к решению которой могло бы приступить АО «НИИ НПО «ЛУЧ».

Следует заметить, что попутно можно производить порошок карбида кремния для технической керамики с чистотой до 4N. Контроль порошка осуществляют по чистоте, содержанию примесей отдельных элементов, гранулярному составу и форме частиц порошка, а также фазовому составу.

Этап 2: вырастить правильный кристалл
Следующий этап — выращивание монокристаллов карбида кремния. Это возможно несколькими способами, но основным промышленным методом, ставшим мировым стандартом де-факто, является физический транспорт паров PVT (Physical Vapor Transport). Проблема в том, что при относительно невысоких температурах и давлениях карбид кремния не плавится. Поэтому методы роста кристалла из расплава типа метода Степанова здесь неприменимы. Выход был найден в 1978 году советскими учеными Ю. М. Таировым и В. Ф. Цветковым из Ленинградского электротехнического института (ЛЭТИ), которые, собственно, и разработали метод роста PVT на пластине-затравке. В этом процессе происходит сублимация порошка карбида кремния в виде паров Si₂C, SiC₂ и их конденсация-кристаллизация на затравке при температуре 2200–2400 °С в среде чистого аргона. Порошок засыпается в графитовый тигель, окруженный графитовой изоляцией. Вакуумная камера выполняется в виде кварцевой или металлической трубы. Нагрев производят с помощью индуктора или графитового нагревателя.

Появляется еще одна проблема — получение чистого (желательно изостатического) графита с зольностью

Градация порошков карбида кремния по качеству

- абразивы
- огнеупоры
- металлургического качества
- техническая керамика
- электронного качества

на уровне 5 ppm, а также производство изделий из него — тиглей, нагревателей, войлочных изоляторов. Однако в госкорпорации «Росатом» есть специализированные организации, которым по силам эта задача. В целом в России разработаны и изготавливаются установки для роста кристаллов карбида кремния по методу PVT диаметром до 150 мм. Длина выращенной були (в западной литературе часто используется термин rusk — «шайба») относительно небольшая — 15–50 мм.

Карбид кремния имеет свыше 200 полиморфных или кристаллических форм: с кубической, гексагональной, ромбической кристаллическими решетками. Для электроники наиболее подходящим полиморфом является 4H-SiC. Выращивание требуемого полиморфа достигается подбором поля температур и давления аргона применительно к конкретному порошку. После завершения роста требуется проведение контроля (характеристики) для определения уровня дефектов в кристаллической решетке.

Этап 3: обработать без потерь
Выращенная буля определенным образом ориентируется относительно кристаллографических осей и обрабатывается с получением цилиндрического слитка. С учетом исключительной твердости карбида кремния шлифовка осуществляется суспензией на основе алмазных порошков. При разделке слитка на подложки толщиной около 0,4 мм важно обеспечить минимальные потери материала. Поэтому

разделка (slicing) ведется на многопроволочных станках. Применяется алмазированная проволока диаметром около 0,2 мм. Весь слиток разделяется на подложки за один раз, но процесс резки может занимать от 10 часов до нескольких суток. В России пока нет своих станков для многопроволочной резки. Однако Минпромторг РФ разработал техническое задание на такой станок, и есть надежда на появление соответствующей техники.

После разделки подложки шлифуются и полируются методами CMP (Chemical Mechanical Polishing — химико-механическая полировка) для получения пластин с заданными геометрическими размерами и шероховатостью. Помимо контроля геометрии осуществляется контроль количества дислокаций, микропор, макродефектов и полиморфной однородности. Методы контроля, например рентгеноструктурный анализ, весьма непросты и представляют собой сложную методическую и метрологическую задачу.

Этап 4: с микронной точностью
Последней из рассматриваемых операций является эпитаксия, под которой подразумевается выращивание тонкой кристаллической пленки поверх пластины из кристалла карбида кремния. Толщина пленки — от нескольких микрон до нескольких десятков микрон. В данном случае возможна гомоэпитаксия с нанесением карбида кремния или гетероэпитаксия с нанесением нитрида алюминия-галлия. Эпитаксия дает возможность нанести слой (слои) с требуемым типом проводимости или концентрацией носителей заряда, а также снизить число дефектов по сравнению с пластиной.

Основным методом для гомоэпитаксии в данном случае является высокотемпературное химическое осаждение из газовой фазы HTCVD (High Temperature Chemical Vapor Deposition), а для гетероэпитаксии — МОС-гидридная эпитаксия МОСVD (Metal Organic

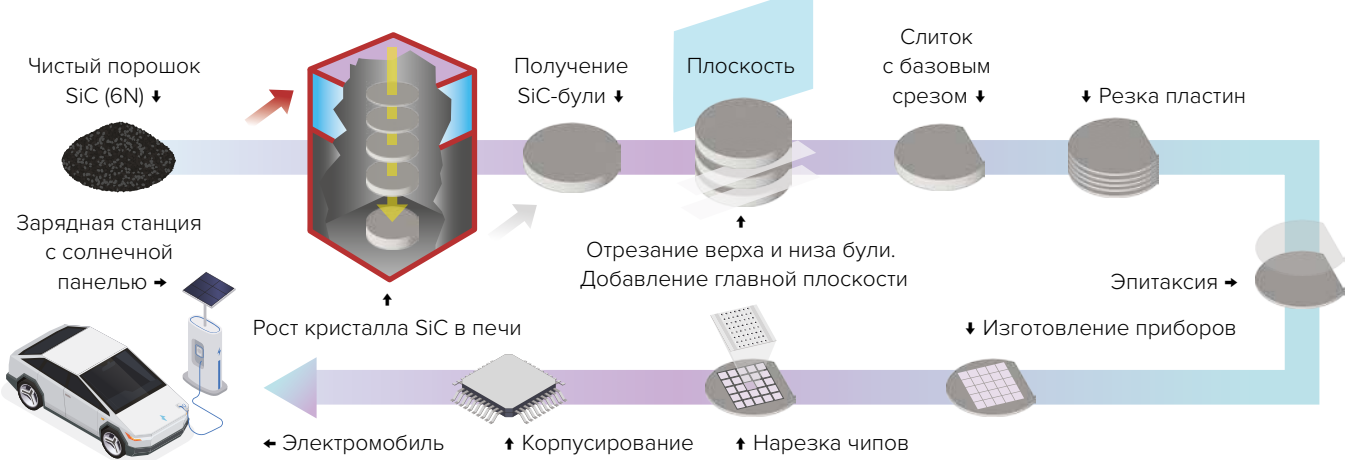
Chemical Vapor Deposition). В этих процессах применяются чистые газовые прекурсоры, например трихлорсилан SiHCl₃ и пропан C₃H₈, легирующие газы и газы-носители — водород, аргон. Пластины размещаются на графитовом подложкодержателе с CVD-покрытием из карбида тантала или карбида кремния. Отечественных эпитаксиальных установок пока нет, но в нескольких организациях в Зеленограде накоплен определенный опыт эксплуатации западной техники. Имеются предпосылки к тому, что отечественные эпитаксиальные установки все-таки появятся.

К технологической независимости

Согласно отчету американского министерства энергетики Critical Materials Assessment за 2023 год, доля кремния и карбида кремния в электронике в 2022 году составила 96% и 3% соответственно. Прогнозируемые цифры на 2028 год (80% и 17%) означают шестикратный рост доли карбида кремния.

На предприятиях госкорпорации «Росатом» за долгие годы заложен достаточно прочный фундамент по многим технологиям, необходимым для развития силовой электроники на основе карбида кремния в России. В частности, участие научного блока Росатома в таком проекте дало бы, помимо прямого эффекта в виде создания продуктовой линейки диодов, транзисторов, силовых модулей и других электронных изделий, качественный технологический скачок для отечественных продуктов более высокого передела. К примеру, это относится к чистым и высокотемпературным материалам, технологиям роста кристаллов и эпитаксии, метрологии и измерениям, к получению и очистке электронных газов, созданию изостатического графита, формированию CVD-покрытий и расчетным методам термодинамики (кинетики) реакции для сублимационного роста кристаллов, а также к компьютерному моделированию полупроводниковых гетероструктур класса TCAD (Technology Computer-Aided Design).

Рис. 4. Цикл производства продукции от порошка карбида кремния до эпитаксиальных пластин



Источник: The Information Network (2022)



Александр Поляков

Кандидат технических наук, профессор кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников Института новых материалов Университета науки и технологий МИСИС

«Чтобы сократить отставание России в современной полупроводниковой технике, потребуется стабильное финансирование и несколько лет упорной работы»

— Спектр различных материалов, которые люди шире всего применяют в силовых полупроводниковых приборах, можно условно разложить на три поколения. Первое — кремний, это классика полупроводниковой техники. Второе — арсенид галлия и фосфид индия. Третье поколение начиналось с карбида кремния, за ним последовал нитрид галлия. Сейчас к ним добавились инновационные материалы на основе твердого раствора алюминия — галлия и их оксидов, которые условно можно отнести к поколению «3+».

Чем хороши полупроводники третьего поколения? Любой полупроводник с точки зрения теоретической электроники в определенном смысле представляет собой квантовый объект: в одном состоянии электроны в нем статичны (эти состояния относят к так называемой валентной зоне), в другом — подвижны (эта зона состояний называется зоной проводимости). Кроме того, возможно передвижение заряда по незаполненным состояниям в валентной зоне. Эти состояния называют дырками, в электрическом токе они ведут себя как положительные заряды.

Чтобы перевести электроны из первого состояния во второе, им нужно сообщить некоторую энергию, которая обозначается как ширина запрещенной зоны. Помимо прочих характеристик, ее значение напрямую влияет на такие важнейшие параметры, как допустимая рабочая температура прибора и пороговое напряжение, которое еще не приводит к электрическому пробоям. Ведь чем шире запрещенная зона, тем большую энергию нужно сообщить электрону для перехода между состояниями. Более того, все известные в настоящий момент полупроводниковые материалы устроены таким образом, что и энергия связи частиц в атоме возрастает монотонно с увеличением ширины запрещенной зоны. А это значит, что при прочих равных через полупроводники из материалов с широкой запрещенной зоной вы можете позволить

себе гонять большие токи и прикладывать к контактам большие напряжения без опасения сжечь прибор. Кроме того, одновременно вы получаете возможность еще и разместить эти контакты ближе друг к другу без риска пробоя, уменьшая при этом сопротивление прибора во включенном состоянии (а значит, сокращая потери энергии на нагрев прибора). А чем меньше масса, тем меньше необходимость отводить лишнее тепло; да и просто сам по себе небольшой размер прибора в электронике имеет колоссальную важность! Условно говоря, там, где на одну задачу вам требовалось десять одинаковых полупроводниковых устройств на основе кремния, с той же задачей справится один прибор такого же размера из оксида галлия.

Именно поэтому человечество возлагает огромные надежды на новые полупроводниковые приборы в силовой электронике, которая имеет дело с большими напряжениями, например в электроприводах электропоездов, электромобилей, самолетов, а также в схемах, служащих для конвертации передаваемого по проводам высокого напряжения в напряжение потребительской сети. Весьма перспективно их использование, кроме того, в конверторах, помогающих преобразовывать энергию с солнечных батарей в передаваемый по проводам ток.

Но эта область современной техники очень консервативна. Любое устройство здесь выдает сравнительно большую мощность, а значит, необходимо разумным образом перестраховываться, чтобы снизить риск ущерба. Это, в свою очередь, порождает пустившиеся корни стереотипы: сведущие в полупроводниковых устройствах специалисты за многие десятилетия привыкли к определенным методикам, алгоритмам, программным кодам. И чтобы внедриться в их среду с новыми идеями, надо их привычки перенять и под них подстроиться.

Во многом из-за двух названных причин новые полупроводниковые материалы завоевывают место под солнцем крайне медленно. Практически работоспособность полупроводниковых устройств на основе карбида кремния была доказана в 1980-х годах, но в приборы широкого применения он начинает внедряться только сейчас. До сих пор сложно и трудоемко растить кристаллы этого материала необходимого размера без дефектов, поэтому роскошь использовать их в промышленных масштабах до недавнего времени могли позволить себе только компании, которые сами их нарабатывали. По нитриду галлия серьезные научные публикации датируются началом 1990-х годов — и лишь в наши дни он начинает входить в практический обиход в опытном производстве. Его преимущество в универсальности: он находит

«Небольшой размер прибора в электронике имеет колоссальную важность. Условно говоря, там, где на одну задачу вам требовалось десять одинаковых полупроводниковых устройств на основе кремния, с той же задачей справится один прибор такого же размера из оксида галлия».

Кристаллический карборунд (карбид кремния) — термически стабильный материал, очень твердый и химически инертный, был случайно открыт в 1824 году Йенсом Якобом Берцелиусом при попытке синтезировать алмаз



применение, скажем, в светодиодах, излучающих свет в видимой области (такие, к примеру, используются в экранах смартфонов или современных телевизоров). Но у него есть серьезный недостаток — невысокая теплопроводность. Это приводит к необходимости выращивать кристаллы для силовых устройств на «вспомогательных» подложках, например, из кремния или карбида кремния — а тогда зачем вам замыкаться именно на нитриде галлия, если в технологическом процессе все равно придется задействовать другой материал?

В последнее десятилетие разворачиваются серьезные научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки по оксиду галлия. Этот материал может обеспечить втрое большие по сравнению с уже применяемыми полупроводниковыми силовыми устройствами пробивные напряжения. Для силовых применений в области очень высоких напряжений это, конечно, очень интересно. Но резкий скачок к применению Ga₂O₃ на практике пока сковывает невозможность добиться приемлемой проводимости р-типа (напомню, что в полупроводниках важно задействовать перенос тока не только электронами — так называемую проводимость п-типа, но и дырками — проводимость р-типа). Кроме того, определенные перспективы по инновационным полупроводниковым материалам просматриваются с алмазом. Но это, скорее, послезавтра полупроводниковой техники: есть очень много трудностей с выращиванием кристаллов большого диаметра и с контролем проводимости (в особенности п-типа).

«Человечество возлагает огромные надежды на новые полупроводниковые приборы в силовой электронике, которая имеет дело с большими напряжениями, например в электроприводах электротранспорта».

Россия, к сожалению, в современных полупроводниковых материалах отстает, и весьма значительно. Мне известно всего лишь несколько изучающих эти вопросы небольших научно-исследовательских коллективов и примерно столько же компаний, производящих кристаллы и пленки и делающих из них приборы в небольших объемах. Остальное мы закупаем. Для сокращения отставания надо подойти к этому вопросу комплексно: создать целевые программы; разработать или приобрести (если это возможно) технику для выращивания материалов, изготовления приборов, изучения их свойств; определить головные научно-производственные предприятия; озаботиться подготовкой молодых кадров. Самое главное — предусмотреть бюджетное финансирование на эти цели и забыть про немедленную отдачу: в течение нескольких лет упорной работы придется тратить средства, а не зарабатывать их!



Николай Каргин

Доктор технических наук, профессор, проректор, директор центра радиопоники и СВЧ-технологий Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

«Рынок современных широкозонных полупроводников растет на десятки процентов ежегодно»

— По прогнозам одной из ведущих аналитических компаний Yole Group (см. Боднарь Д. Полупроводниковая микроэлектроника — 2022. Ч. 2. Широкозонные полупроводники — мировые фавориты в новых производствах и научных разработках // Электронные компоненты. 2023. № 1), к 2027 году совокупный объем мирового рынка мощных приборов с полупроводниками на основе карбида кремния достигнет 6,297 млрд долларов. Главным сегментом их применения останется автомобильный, который вырастет с 63% от всех использований этого материала до 79%. Основными устройствами для электромобилей, как и сейчас, будут тяговые инверторы двигателя и зарядные системы.

Мировыми лидерами в производстве SiC-приборов считаются STMicroelectronics (Европа), Infineon Technologies (Европа), Wolfspeed (Северная Америка), ROHM (Азия), Onsemi (Северная Америка) и Mitsubishi Electric (Азия).

Та же аналитическая компания прогнозирует почти 16-кратное увеличение мирового рынка мощных приборов на основе GaN с 127 млн долларов в 2021 году до 2 млрд долларов в 2027-м со среднегодовым темпом роста 59%. Доминировать здесь будут потребительский и автомобильный сегменты. К 2027 году они достигнут объемов в 964,7 млн и 308,9 млн долларов соответственно.

Как ожидается, спрос на GaN-изделия будет непрерывно увеличиваться в системах обработки данных, оборудовании для промышленных предприятий с высокой мощностью и энергопотреблением. При этом основные страны-производители сохраняют ориентир на нулевой уровень углеродных выбросов. Поэтому на автомобильном рынке растет интерес к применению GaN-преобразователей для зарядных систем и так называемых DC-DC-преобразователей. Отдельное направление рынка для GaN — СВЧ-устройства для станций сотовой связи поколений 5G и 6G, радаров гражданского и военного назначений, спутниковых систем и так далее, где к 2026 году объем рынка достигнет 2,4 млрд долларов.

Лидерами в производстве GaN-приборов являются EpiGaN (Европа), EPC (Северная Америка), GaN Systems (Северная Америка), SEI (Азия), MicroGaN (Европа), NTT-AT (Азия), Toshiba (Азия), Transphorm (Северная Америка) и др.

Промышленного производства карбидкремниевых приборов в России в настоящее время нет. Одна из основных проблем в технологии как SiC, так и GaN (у этого материала отсутствуют собственные подложки больших размеров, поэтому растить кристаллы приходится на материалах с близкой кристаллической структурой, в том числе на карбиде кремния) — получение подложек с низкой концентрацией дефектов.

А для снижения себестоимости кристалла необходимо переходить к подложкам большого размера (не менее 200 мм). Для этого необходима адаптация всех производственных линий, особенно технологических участков формирования структур, что, в свою очередь, требует соответствующего оборудования, зачастую недоступного отечественным предприятиям из-за санкций.

Технологиями изготовления подложек карбида кремния в России владеют компании АО «Светлана-Электронприбор» (полуизолирующий SiC диаметром до 76 мм) и АО «Нитридные кристаллы» (проводящие SiC диаметром до 100 мм). К освоению технологии роста подложек карбида кремния также приступила ставропольская компания «Монокристалл».

Промышленные технологии изготовления структур нитрида галлия и карбида кремния политипа 4H, предназначенного для применения в электронных устройствах, в России отсутствуют. В лабораторных масштабах эти технологии имеются в НИЯУ «МИФИ» (3C-SiC, GaN), ФТИ им. Иоффе РАН (GaN), АО «Элма-Малахит» (GaN), СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (кристаллы SiC, выращиваемые методом Лэли), НТЦ микроэлектроники РАН (GaN), ИФП СО РАН (GaN).

Коммерческие дискретные транзисторы СВЧ-диапазона предлагает АО «Светлана-Рост». АО «ОКБ-Планета» в настоящее время внедряет технологию производства GaN СВЧ-дискретных приборов и монолитных микросхем с размером обрабатываемых подложек, ограниченных 50 мм. АО «НПП «Исток» им. Шокина» также активно развивает технологии дискретных приборов на основе нитрида галлия.

Технологии процессирования дискретных GaN-приборов в лабораторных масштабах имеются в НИЯУ «МИФИ», ИСВЧПЭ РАН, НПП «Пульсар». Сборку СВЧ-модулей на основе GaN производят в компании «Микроволновые системы». Мощные СВЧ- и силовые транзисторы на основе импортных чипов GaN предлагает воронежский НИИЭТ.

Отдельно стоит отметить компании, разрабатывающие и предлагающие так называемые фаундри-услуги (производство микропроцессоров по проектной документации фирмы-заказчика) по технологии дискретных GaN-приборов с проектными нормами 0,15 и 0,25 мкм. В настоящее время это АО «Светлана-Рост», НИЯУ «МИФИ» и НИЦ «Курчатовский институт».

Отдельной проблемой в технологии широкозонных материалов представляется необходимость ионной имплантации и последующей высокотемпературной обработки, что особенно актуально для карбида кремния. Такое оборудование в России не производится, в настоящий момент имеются только планы по его разработке.

«Перспективная область применения широкозонных полупроводников заключается в силовой электронике, которая необходима для связи, телекоммуникации, энергетики»

— Основное отличие материалов третьего поколения (широкозонных полупроводников) от предыдущих — это наличие большей запрещенной зоны, которая во многом определяет электронные свойства полупроводников. В нитриде галлия запрещенная зона 3,4 эВ, в карбиде кремния — 3,2 эВ, в оксиде олова — 3,6 эВ. Чем больше ширина запрещенной зоны, тем большие токи может через себя пропускать транзистор на основе данного материала. Для сравнения, у кремния ширина запрещенной зоны около 1,1 эВ. Нитрид галлия выдерживает в 10 раз большее напряжение, чем кремний.

Кроме того, и нитрид галлия, и карбид кремния являются твердыми и тугоплавкими материалами с температурой плавления в два раза большей, чем у кремния. А это значит, что электронные устройства на основе новых материалов должны быть меньше подвержены воздействию перегрева и будут продолжать функционировать при более высоких температурах по сравнению с традиционными кремниевыми устройствами. Большая ширина запрещенной зоны материала также позволяет значительно уменьшать размеры транзистора по сравнению с кремнием, в котором при значительном уменьшении начинается происходить электрический пробой. Уменьшение размеров транзисторов, в свою очередь, приведет к еще большей миниатюризации электронных устройств с соответствующим приростом в производительности таких устройств.

Нитрид галлия уже сейчас используется в большинстве современных синих и ультрафиолетовых светодиодов, также на основе кристаллов нитрида галлия работает система считывания и записи дисков Blu-ray. Потенциальные рынки для приборов на основе нитрида галлия могут включать в себя СВЧ-устройства (радиочастотные усилители мощности) и высоковольтные коммутационные устройства для электрических сетей. Карбид кремния также может быть использован в силовой электронике, так как транзисторы на его основе будут обладать большим быстродействием, выдерживать высокое напряжение и будут меньше нагреваться.

Помимо увеличения быстродействия устройств и увеличения срока их службы, у широкозонных полупроводников есть и другие преимущества. За счет возможности выдерживания более высокого напряжения эти материалы могут быть использованы для создания электронных приборов, работающих на значительно более высоких частотах. Например, мобильные телефоны на кремниевых транзисторах могут работать на частоте нескольких гигагерц или десятков гигагерц. Использование нитрида галлия или других широкозонных полупроводников позволит увеличить эти частоты на порядки.

В настоящий момент компания Xiaomi вместе с новыми смартфонами поставляет зарядные устройства мощностью 65–67 Вт, в которых используется нитрид галлия. За счет этого зарядное устройство имеет меньшие габариты, быстрее заряжает смартфон и при этом значительно меньше нагревается. Перспективная область применения широкозонных полупроводников заключается в силовой электронике, которая необходима для связи, телекоммуникации, энергетики и т. д.

Одним из основных препятствий на пути распространения и масштабирования использования широкозонных полупроводников в электронике является огромный рынок производства технологий на основе кремния. Невозможно совершить глобальный переход на новые материалы в короткие сроки. Большинство технологических процессов должно быть перестроено, и это должно осуществляться постепенно. Кроме того, несмотря на все преимущества новых материалов, их все еще нужно тестировать при разных режимах работы и условиях эксплуатации, чтобы проверить надежность работы устройств на их основе.

Исследования по применению широкозонных полупроводников в электронике крайне важны и интенсивно ведутся в том числе в России, в научных институтах и вузах, где есть направления по микроэлектронике. Это Алферовский университет, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Московский институт электронной техники и многие другие.

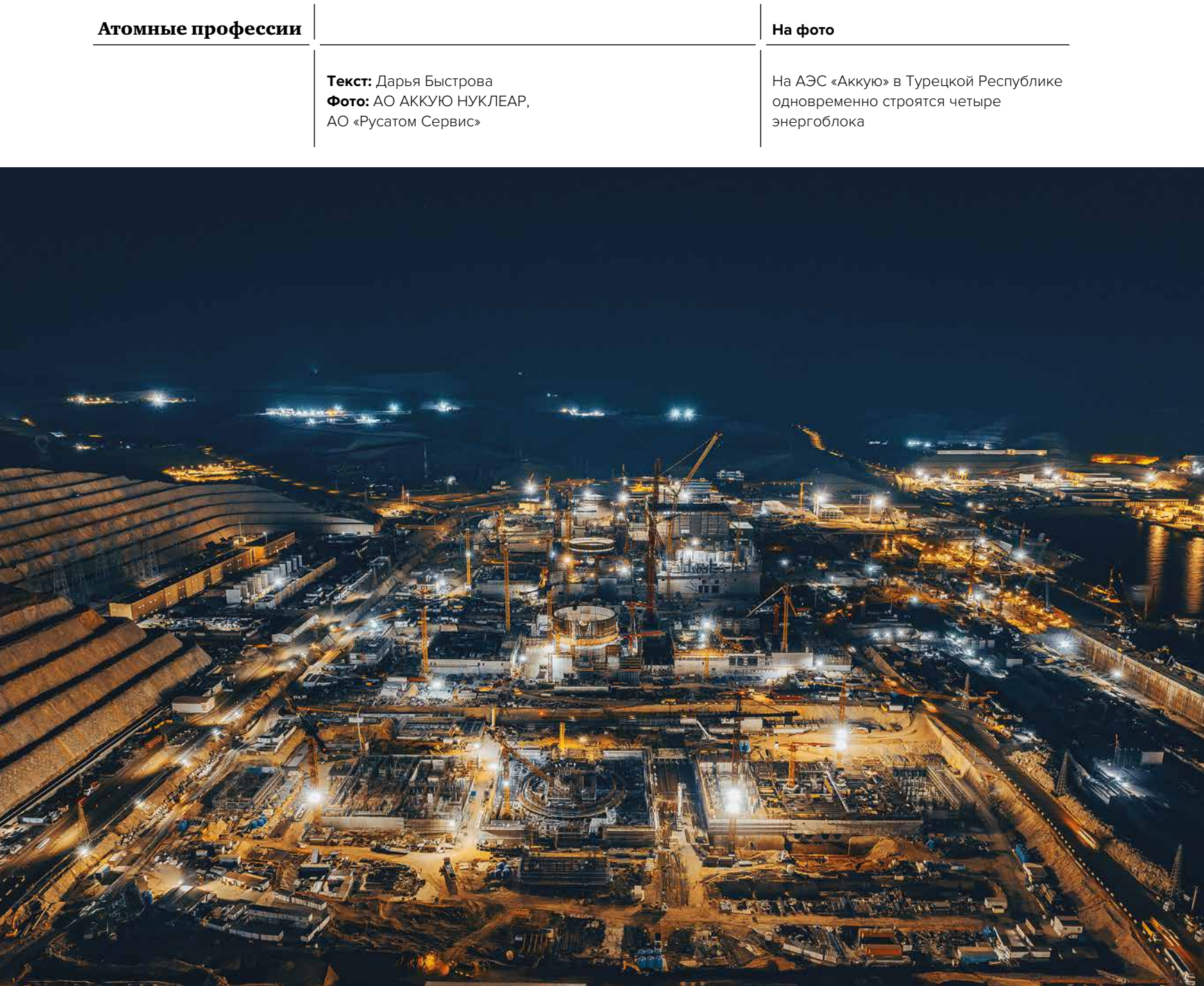
Если говорить о выпуске широкозонных полупроводников в России, насколько мне известно, в Зеленоградском нанотехнологическом центре был введен в эксплуатацию участок по производству транзисторов на основе нитрида галлия, также воронежский Научно-исследовательский институт электронной техники запустил производство силовых транзисторов на основе нитрида галлия. Пока это производство мелкосерийное, но оно стратегически важно для сфер телекоммуникации, промышленности и энергетики.

«Одним из основных препятствий использования широкозонных полупроводников в электронике является огромный рынок производства технологий на основе кремния».



Александр Квашнин

Доктор физико-математических наук, старший преподаватель Проектного центра Сколтеха по энергопереходу



На службе безопасности

Тонкости профессии: как вводятся в эксплуатацию системы, контролирующие радиационную обстановку на АЭС и прилегающих территориях

На самой большой на сегодняшний день стройке Росатома — АЭС «Аккую» в Турецкой Республике — в разгаре подготовка к пусконаладочным работам на первом блоке. В апреле на площадку станции привезли первую партию ядерного топлива. В это же время филиал АО «Русатом Сервис» в Турции вводил в эксплуатацию автоматизированные системы контроля радиационной

обстановки и радиационного контроля (АСКРО и АСРК). Предлагаем взглянуть на сложные системы простым, жизненным взглядом человека, для которого АСКРО и АСРК — не просто аббревиатуры, а дело жизни. О специфике своей работы рассказывает главный технолог по СКУД филиала компании «Русатом Сервис» в Турецкой Республике Лидия Кожуховская.

Профиль



Лидия Кожуховская

Главный технолог по СКУД филиала компании «Русатом Сервис» в Турецкой Республике

Окончила Томский политехнический университет по специальности «электроника и автоматика физических установок». Начала свой карьерный путь в качестве инженера Управления специальных систем на Белорусской АЭС, где в ее обязанности входила наладка систем контроля, управления и диагностики (СКУД) и систем специальных измерений. Следующим этапом в карьере стала должность технического руководителя пусконаладочных работ по специальным системам реакторного отделения и машинного зала.

— Лидия, какое образование вы получили, как складывался ваш карьерный путь после окончания вуза?

— Можно сказать, что я получила классическое инженерное образование. Я окончила один из опорных вузов Росатома — Томский политехнический университет — по специальности «электроника и автоматика физических установок». И мой карьерный путь сразу начался с Росатома: после окончания Томского политеха я устроилась на работу в АО «Атомтехэнерго» и была направлена на Белорусскую АЭС в качестве инженера Управления специальных систем. Для меня, как молодого специалиста с почти нулевым опытом работы, это было своеобразным вызовом самой себе, который я сознательно приняла. В мои обязанности входила наладка СКУД (системы контроля, управления и диагностики) и систем специальных измерений.

Постепенно круг моих обязанностей расширился: время от времени мне делегировали обязанности технического руководителя ПНР (пусконаладочных работ) по специальным системам РО и МЗ (реакторного отделения и машзала) энергоблока № 1 Белорусской АЭС. Признаюсь, что достойно прошла проверку на прочность. Я координировала выполнение работ специалистами филиалов, а также сама выполняла пусконаладочные работы на различных системах. Следующим этапом в карьере стала должность технического руководителя ПНР по специальным системам РО и МЗ.

Однако «не ПНРами едиными...», сказала я себе и отправилась с мужем в Боливию — на проект ЦЯИТ (Центр ядерных исследований и технологий) — по приглашению принимающей стороны.

В итоге судьба привела меня в АО «Русатом Сервис», где я продолжаю совершенствовать свои навыки и приобретать новый, уникальный опыт.

— Вы с самого начала работали в области эксплуатации АЭС? Если бы не эта профессия, в какой сфере вы могли бы себя видеть?

— Да, я всегда работала по направлению ввода в эксплуатацию. Но если бы мой брат не рассказал мне о кафедре электроники и автоматики физических установок в самых ярких красках (он сам на тот момент был студентом кафедры), я бы посвятила себя медицине — налаживала бы процессы в человеческом организме, чем не ПНР?

— Как вы оказались в Турции? Для вас переезд — это стресс или вы более философски относитесь к перемене мест? Какие задачи были перед вами поставлены? Как вы с ними справлялись с учетом новой локации, новой команды, внешних факторов?

— Я не философ по натуре, но и стрессом свой переезд назвать не могу. Я в целом привыкла

к командировочному образу жизни, для меня это естественный процесс. Наверное, первая задача при переезде — адаптироваться не только к работе, но и к быту. Первое время я жила в отеле, была в поиске жилья, которое я нашла (или оно меня нашло) достаточно быстро — отдельное спасибо хочу сказать своим коллегам, которые в тот период очень помогали, давали лайфхаки по оперативной адаптации. Хочу заметить, что коллектив филиала сразу принял меня тепло и радушно. И это здорово — осознавать, что тебя окружают заботливые и отзывчивые люди.

— Вы занимаетесь АСКРО и АСРК. Для неспециалиста эти аббревиатуры звучат как что-то очень сложное для понимания. Сможете простыми словами описать, для чего нужны эти системы, объяснить принцип их работы и рассказать, почему считается, что они жизненно необходимы для сотрудников станции и населения региона?

— Думаю, людям, не связанным с атомной отраслью, многие такие аббревиатуры кажутся непривычными для слуха и понимания. Однако если разобраться, то все довольно быстро становится понятным. АСКРО — это автоматизированная система контроля радиационной обстановки. АСРК — это автоматизированная система радиационного контроля.

Иными словами, главная задача АСКРО — непрерывно контролировать радиационные параметры, при этом компоненты системы устанавливаются как на территории АЭС, так и за ней на разном расстоянии. Здесь мы говорим о контроле радиационных и метеорологических параметров в зоне наблюдения вокруг площадки АЭС «Аккую» (радиусом 24 км по суше и 33 км по морю). Данные собираются

и обрабатываются с помощью математических моделей.

Почему эти системы так важны? Они напрямую работают на обеспечение наивысшего приоритета Росатома — безопасности. По ним оценивают и прогнозируют радиационную обстановку — то, что часто тревожит население, проживающее вблизи от станций. Система моделирует опасное воздействие на население и окружающую среду при выбросе радионуклидов. Такие прогнозы необходимы, чтобы своевременно принять меры, минимизирующие последствия выброса. АСКРО устанавливается на всю станцию. Роль поставщика АСКРО на АЭС «Аккую» выполняет Концерн «ТИТАН-2», а изготовителя — НПП «Доза».

АСРК тоже относится к контролю радиационной обстановки, но в помещениях энергоблоков, общестанционных помещениях АЭС и в пределах санитарно-защитной зоны. АСРК контролирует состояние технологического оборудования станции и целостность защитных барьеров. Также система обеспечивает контроль и учет индивидуальных доз персонала АЭС, предупреждает распространение радиоактивного загрязнения. Например, контролирует наличие течи в первом контуре реактора, выявляет факт загрязнения спецодежды, спецобуви и поверхности тела персонала. Оборудование АСРК устанавливается как на энергоблоках, так и на общестанционных сооружениях. АСРК на АЭС «Аккую» поставляет АО «Русатом Автоматизированные системы управления».

В целом можно смело утверждать, что АСКРО и АСРК — это системы, которые помогают атомной электростанции и ее персоналу работать надежно и безопасно.

— Опишите обычный день технолога по SKUД. Что в вашей работе вас особенно привлекает, что для вас приятная рутина?

— Обычный день технолога по SKUД включает как работу с документами, так и живое общение.

Справка

Между АО «Русатом Сервис» и АО АККУЮ НУКЛЕАР заключен комплексный контракт, в который входят работы по обучению эксплуатационного персонала, поставка полномасштабного и аналитического тренажера в УТЦ с последующим их включением в процесс обучения, выполнение пусконаладочных работ, ввод в эксплуатацию блоков №1–4 АЭС и сервисное обслуживание АЭС «Аккую» на этапе эксплуатации. Общая длительность контракта — 60 лет.

Я анализирую рабочую документацию, общаюсь со специалистами участка SKUД ЦТАИ (цех тепловой автоматики и измерений), плотно взаимодействую с АО «РАСУ» по поставкам оборудования, обязательно также разрабатываю планы и графики предстоящих работ. Самое приятное для меня, как ни странно, это идти на сам блок и разбираться с тем, что не работает так, как нужно. Можно провести такую параллель: если для мужчин любимое место — это гараж, где они и отдыхают, и работают, то для меня таким местом является блок, где я налаживаю системы контроля.

— В работе по вводу в эксплуатацию АСКРО и АСРК есть то, что раньше представляло для вас особую сложность, а теперь является обычным делом?

— Уже пройден большой путь по знакомству и пусконаладочным работам по многим сложным и интересным системам — уже кажется, что так было всегда! Поэтому каких-либо сложностей в данных системах я не вижу. Считаю, что главное в работе с неизвестным — постараться быстро сориентироваться и определить правильный вектор развития.

— Расскажите, как АСКРО и АСРК вводились в эксплуатацию именно на АЭС «Аккую»? Каким был процесс? Вы с самого начала поняли, как все будет происходить, или адаптировались к особенностям станции?

— Как и для любой другой системы, работа всегда начинается с разработки пусконаладочной документации, которая включает в себя анализ как конструкторской документации, так и проектной. А поскольку львиная доля документации уже обработана, то быстро приходит понимание, что и как должно работать. Когда усилиями коллег из Концерна «ТИТАН-2» были закончены монтажные работы и оборудование было передано в наладку, мы приступили к своей части. Поскольку АСКРО, а именно 18 из 21 постов радиационного контроля, находятся за территорией АЭС и на приличных расстояниях друг от друга, дорога была разнообразная: там и горные серпантины, и морское



побережье — открывалась вся красота турецких пейзажей. Бывали ситуации, когда мы работали допоздна и приезжали домой ближе к полуночи, работали без выходных, однако работа шла гладко и без проблем. Наверное, срабатывал командный дух, одобренный морским воздухом.

С работами по АСРК было проще — это была небольшая часть большой системы, в плане расположения оборудования не было такого территориального разброса, поэтому справились быстрее.

— Очевидно, что это была горячая пора. Можете ли вы сказать, что выросли как профессионал на этом проекте? Может быть, открыли в себе новые качества? В каких ситуациях они у вас проявились в дальнейшем — в работе и в жизни?

— Мне кажется, не важно, горячая пора или обычное течение рабочей жизни, — при желании ты всегда будешь расти и развиваться как специалист. Развитие — это часть нашей профессиональной жизни: общение с коллегами по другим направлениям, обмен опытом в конечном счете играют свою положительную роль. Кажется, что вы просто вместе решаете поставленные задачи, а вместе с этим у тебя выстраивается полноценная картина всей работы АЭС.

— Расскажите про вашу команду филиала АО «Русатом Сервис» в Турции. Это сплав разносторонних личностей, или команда — это единение интересов? Возможно, и то и другое? Проект «Аккую» сблизил вас как профессионалов и товарищей?

— АО «Русатом Сервис» на площадке сооружения АЭС «Аккую» — генеральный подрядчик по пусконаладочным работам и вводу в эксплуатацию. В части ПНР АСРК и АСКРО (и не только) наш филиал выполняет работы собственными силами — специалистами

направления АСУ ТП. Команда этих специалистов пока небольшая, состоящая из трех человек, двое из которых — девушки. Для них нет трудностей, начиная с документации и заканчивая непосредственно выполнением ПНР. Девушки уверенно справляются с поставленными задачами, наравне с мужской частью коллектива. И совсем неудивительно, что коллеги приходят к ним за помощью и советами по тем или иным вопросам.

Наша команда филиала собрана из разносторонних и интересных личностей. Каждый — истинный профессионал своего дела, будь то сотрудник, занимающийся документооборотом, технический специалист или специалист по сметной документации. Все мы разные, но всех нас объединяет отзывчивость и готовность помочь ближнему. При этом мы поддерживаем дружеские отношения за пределами работы: ходим в походы, организовываем внутренние мероприятия (недавно вместе проходили квиз), да и просто прийти в гости и устроить вечер просмотра кино — это про нас.

— Сможете поделиться ближайшими карьерными планами? Какие проекты у вас на очереди и что будет реализовано в рамках этих проектов?

— Сейчас я максимально сосредоточена на текущем проекте — все силы и амбиции отданы именно ему. Мы готовимся к выполнению работ и, как говорят, за периметром АЭС «Аккую» — там, где наши услуги будут востребованы. Поэтому сегодня мы планируем работы и на других площадках и даже в других отраслях. Также в рамках развития бизнеса у нас открыто подразделение филиала в Стамбуле — оно занимается поиском новых партнеров и расширением сферы деятельности АО «Русатом Сервис» в Турецкой Республике для реализации перспективных проектов в будущем.



Разбор	Справка
Текст: Сергей Петровский	Согласно информации, размещенной на официальном сайте МАГАТЭ, тритий — это естественная радиоактивная форма водорода, которая образуется в атмосфере при столкнове-нии космических лучей с молекулами воздуха и оказывает наименьшее радиологическое воздействие среди всех природных радионуклидов, содержащихся в морской воде. Тритий имеет период полураспада 12,32 года и испускает слабые бета-частицы — со средней энергией 5,7 кэВ, которые могут распространяться на расстояние около 6 мм в воздухе, но не могут проникнуть в организм человека через кожу. Тритий может представлять радиационную опасность при вдыхании или проглатывании, но вреден для человека только в очень больших дозах.

Тритий — лишний?

Сброс воды с «Фукусимы»: как, куда и почему

24 августа 2023 года оператор АЭС «Фукусима» Tokyo Electric Power Company Holdings (TEPCO) начал сброс воды, накопленной в резервуарах на территории станции. Разбираемся, почему Япония вынуждена это делать и почему это вызывает обеспокоенность в мире.

Точка отсчета

11 марта 2011 года в результате землетрясения магнитудой 9, одного из мощнейших в истории, и последовавшей за ним серии цунами с высотой волн, достигавшей 14–15 м, произошла авария на АЭС «Фукусима». Разрушение инфраструктуры, как эксплуатациионной, так и обеспечивающей безопасность, а также потеря внешнего энергоснабжения и выход из строя дизельных генераторов на площадке привели к утрате функции охлаждения на трех работавших на тот момент энергоблоках и в бассейнах выдержки отработавшего топлива. Произошел перегрев активной зоны реакторов энергоблоков № 1–3, ядерное топливо расплавилось, целостность защитных оболочек была нарушена. Затем выбросы водорода в результате пароциркониевой реакции привели к взрывам внутри реакторных зданий блоков № 1, 3 и 4. Аварии был присвоен седьмой, максимальный, уровень по классификации МАГАТЭ, и спустя 12 лет к ее последствиям вновь приковано внимание политиков, ученых и СМИ.

В чем проблема?

В процессе охлаждения расплавленного реакторного топлива уже образовалось и продолжает скапливаться огромное количество загрязненной воды. Кроме того, на зараженной радиоактивными материалами территории необходимо собирать грунтовые воды и дождевую воду. С течением времени TEPCO удалось сократить прирост количества загрязненной воды примерно до 100 тонн в день, что составляет 1/5 от первоначального объема. Вся эта вода собирается, подвергается обработке для максимально возможного удаления радионуклидов и частично вновь используется для охлаждения, остальной же объем хранится более чем в 1000 резервуаров вместимостью в 1,37 млн тонн, которые к августу 2023 года оказались заполненными на 98%.

Правительство Японии и TEPCO заявляют, что необходимо постепенно опорожнять резервуары и демонтировать их, чтобы предотвратить возможность утечек

и освободить место для объектов, необходимых для вывода АЭС из эксплуатации,— хранилищ расплавленного топлива (его внутри реакторов около 880 тонн) и других радиоактивных отходов. Около 70% воды, находящейся в резервуарах, все еще содержит цезий, стронций, углерод-14 и другие радионуклиды в количествах, превышающих установленные нормы.

Как это происходит?

Вода, хранящаяся на объекте, подвергается очистке в системе ALPS (Advanced Liquid Processing System), в результате чего удаляется большая часть содержащихся в ней радиоактивных веществ (62 нуклида). Однако в воде остается тритий, который невозможно удалить с помощью системы ALPS или любой другой существующей на сегодняшний день промышленной технологии (согласно заявлениям TEPCO) — с учетом объема воды и низких концентраций трития.

Очищенная вода — именно на такой формулировке настаивает японская сторона, не называя ее загрязненной,— разбавляется морской водой в 120 раз (в результате концентрация трития становится значительно ниже норм, разрешенных международными и японскими стандартами безопасности), а затем выпускается в Тихий океан через подводный тоннель на глубине 12 м в 1 км от береговой линии.

Сколько нужно времени?

24 августа начался сброс воды, предварительно прошедшей все стадии очистки в системе ALPS. По словам представителей TEPCO, сброс всего объема воды будет постепенным — и на это потребуются десятилетия. Исполнительный директор TEPCO Дзюнъити Мацумото подчеркивает, что медленное и постепенное высвобождение снижает воздействие процесса на окружающую среду.

Первый этап сброса проходил непрерывно в течение 17 дней, в этот период спускалось около 460 тонн воды в сутки. Компания планирует постепенно сбросить 31 200 тонн воды к концу марта 2024 года, но это приведет к опорожнению только 10 резервуаров. Планируется, что позже темп очистки и сброса должен увеличиться: около 1/3 резервуаров будет освобождено и демонтировано в течение следующих 10 лет. Мацумото сообщил, что вода будет сбрасываться постепенно в течение 30 лет. Но пока расплавленное топливо остается в реакторах, ему будет по-прежнему требоваться охлаждающая вода, так что резервуары будут продолжать заполняться.

Насколько это безопасно?

МАГАТЭ в июле признало безопасным японский план по сбросу воды в океан, придя в своем отчете к выводу, что эта мера «окажет незначительное радиологическое воздействие на окружающую среду и здоровье человека». Глава агентства Рафаэль Гросси также в июле посетил АЭС и заявил, что удовлетворен ходом подготовительных работ.

Согласно данным TEPCO, расчетная концентрация трития в очищенной воде перед сбросом составляла 53–210 беккерелей на литр (Бк/л), анализы же показали 43–63 Бк/л. При этом изначально компания обещала, что концентрация трития не будет превышать 1500 Бк/л, то есть 1/40 от стандарта для сброса воды с атомных объектов (60 тыс. Бк/л). Правительство Японии подчеркивает, что сброс воды с тритием в море является обычной, разрешенной МАГАТЭ практикой на АЭС по всему миру и что содержание трития в воде с «Фукусимы» будет меньше, чем в сбросах со станций в Китае и Южной Корее. Проведенные позднее замеры, по сообщениям TEPCO, показали, что концентрация трития в океане ниже допустимого предела, как и ожидали специалисты. В начале сентября было впервые зафиксировано наличие трития в море, на северо-восточной границе примыкающего к станции порта его концентрация составила 10 Бк/л, что является нижней границей уровня выявления. Концентрация трития на других точках в радиусе 10 км от станции по-прежнему была ниже этого уровня.

Несмотря на заявления МАГАТЭ и правительства Японии о безопасности применяемой технологии, часть ученых, в том числе российских, считает, что долговременные последствия влияния малых доз трития на организм человека недостаточно изучены. Например, в статье Scientific American, опубликованной в 2014 году, приводились данные, что при попадании в организм (в частности, через морепродукты) тритий может повысить риск развития рака.

Кто против?

Китай, который осудил этот план как «крайне безответственный», когда о нем было объявлено в 2021 году, в августе вновь заявил о своем несогласии, призвав приостановить сброс воды. Японские ассоциации рыбаков в префектуре Фукусима также выступают против, заявляя, что сброс воды может свести на нет более чем десятилетнюю работу по восстановлению рыболовной промышленности, так как потребители, скорее всего, будут избегать покупки местных морепродуктов. Рыбная и туристическая отрасли префектуры Фукусима, как и вся ее экономика, все еще восстанавливаются. Так, нынешние объемы вылова рыбы составляют лишь около 1/5 от уровня 2010 года. Поэтому рыбаки обеспокоены возможным нанесением дополнительного ущерба репутации местных морепродуктов.

Власти Фукусимы ввели одни из самых строгих в мире режимов радиационного тестирования, но многие

потребители не уверены, что рыба и другие продукты из региона безопасны. После начала сброса воды Китай приостановил импорт всех японских морепродуктов, а Южная Корея продлила запрет на импорт морепродуктов из нескольких префектур Японии, включая Фукусиму.

В конце августа была опубликована видеозапись, демонстрирующая, что премьер Японии Фумио Кисида и несколько министров съели фукусимские морепродукты. Кисида ел сашими с морским окунем, камбалой, осьминогом и рисом, также выращенным в префектуре Фукусима. Министр промышленности Ясutosи Нисимура подчеркнул, что властям необходимо информировать людей как в своей стране, так и за рубежом о безопасности морепродуктов, выловленных в море недалеко от АЭС.

Насколько это касается России?

Часть экспертов, опрошенных российскими СМИ, например РБК, полагает, что прямой опасности для России от сброса воды с АЭС «Фукусима» нет, так как «тритиевая» вода тяжелее обычной. Она будет относиться течением от берегов в восточном направлении, в центральную часть океана, и постепенно «тонуть», при этом растворяясь в массах воды. Рассеивание по большой акватории, в толще воды и у дна, приведет к тому, что общее воздействие радиоактивных изотопов на поверхности существенно снизится. Кроме того, отмечается, что во время аварии на «Фукусиме» в воду попало довольно много радиоактивных материалов, но они постепенно ушли в открытый океан, и их концентрация в воде довольно быстро стала минимальной.

Однако, как поясняют эксперты, японское правительство не предоставило иностранным, в том числе российским, представителям возможность провести собственные замеры содержания в воде радиоактивных элементов непосредственно на объекте, поэтому одно из возможных дальнейших решений — проведение исследований российскими специалистами в открытой акватории по маршруту следования воды с АЭС «Фукусима».

География научных впечатлений

Как прошло лето с ИЦАЭ: интеллектуальный досуг, новые знания и яркие эмоции



Парк Маяковского в Екатеринбурге и просторы Калужской области, атомные города Десногорск и Заречный, дворик Дома-музея братьев Столетовых во Владимире, Центральная площадь бело-русского Островца и Музей Мирового океана в Калининграде — это лишь самые масштабные точки на карте событий,

которые организовали Информационные центры по атомной энергии (ИЦАЭ) за три летних месяца. В сети ИЦАЭ не задумываются о том, как провести лето. Мы формируем пространство научных впечатлений для всех, кто интересуется технологиями и выбирает интеллектуальный досуг.

«СтолетовФест»: физика и музыка

Открыл Генрих Герц, экспериментально изучал Александр Столетов, получил Нобелевскую премию Альберт Эйнштейн — всё это о фотоэффекте, благодаря которому включается свет в подъезде, когда туда входит человек, открываются двери в супермаркетах и офисных зданиях, работают системы безопасности в музеях и солнечные батареи.

Во Владимире до сих пор сохранился дом, в котором жила семья Столетовых, и деревянный флигель, где сейчас находится музей, посвященный их родословной и знаменитым братьям — генералу и топографу Николаю Столетову и физику Александру Столетову. Семейные традиции, например проведение музыкальных вечеров, Столетовы старались сохранять — в московской квартире Александра Григорьевича, когда он уже стал профессором Московского университета, собирались ученики и коллеги на заседания физического кружка, а потом звучала музыка, в том числе в исполнении еще одного его знаменитого земляка — композитора Сергея Танеева.

О физике и о музыке во двореке Дома-музея братьев Столетовых впервые за 150 лет снова заговорили на «СтолетовФесте». Фестиваль стартовал с иммерсивного спектакля «Столетов»: актер в образе Александра Столетова провел экскурсию по экспозиции музея, делясь историями из жизни семьи. Зрители успели побывать в роли актеров, сыграв фрагмент французской пьесы «Маленький разносчик», стать ассистентами в физической лаборатории, а также узнали, что старший брат — Николай Григорьевич — познакомился в Крыму с офицером, с которым они проговорили всю ночь, и тот подарил Николаю небольшой рассказ. Звали офицера Лев Николаевич Толстой.

В музыкально-лекционной зоне поочередно звучали терменвокс, электроскрипка, синтезатор и электронная композиция со звуками работающей АЭС. Спикеры рассказывали о физике звука, изобретении музыкальных инструментов и звукозаписывающей аппаратуры, авангардной и экспериментальной музыке, сопровождая лекции игрой на музыкальных инструментах.

«Звук — это волна! Все это знают, но не многие понимают», — так начал свою лекцию «Физика звука. Появление и развитие звукозаписи» скрипач из Санкт-Петербурга Никита Демин. Спикер рассказал гостям фестиваля о разных видах волн, при помощи скрипки демонстрируя их звучание. Зрители услышали, как звучит волна в виде синусоиды, треугольника, пила и прямоугольника. Если «синусоида» звучит плавно и привычно для человеческого уха, то «пила», например, обладает очень агрессивным звучанием, а для «прямоугольника» характерен яркий и насыщенный восьмибитный звук.

Музыкант-экспериментатор Илья Чертков познакомил аудиторию с фрагментами выступлений известных авангардистов, которые для создания своих композиций используют не только звуки музыкальных

инструментов, но и звуки природы и различных приборов, например датчиков. Поделится Илья и своим опытом перевода в музыкальное произведение записи электроэнцефалограммы головного мозга, а завершил лекцию авторской композицией, составленной из звуков атомной электростанции.

«Еще в детстве Лев Термен мечтал об инструменте, на котором можно играть не прикасаясь. В 11 лет он придумал свой первый инструмент, созданный на базе катушек Теслы. Под управлением Льва Термена его одноклассники сыграли «Эй, ухнем», во время исполнения каждый отвечал за свою ноту. Уже гораздо позже, будучи радиоинженером, Термен заметил, что, прикасаясь к антенне прибора, созданного им для лаборатории физика Абрама Иоффе, можно извлекать звук. В итоге в 1920 году им был создан единственный в мире бесконтактный музыкальный инструмент, позже названный терменвоксом», — рассказал на лекции «Физика и музыка Льва Термена» его правнук Петр Термен.

Интересно, что среди гостей фестиваля были и потомки рода Столетовых. Поприветствовал участников и зрителей Анатолий Леонидович Столетов, исследователь и автор книг о роде Столетовых. Его сын, Леонид Столетов, как оказалось, вот уже больше 20 лет работает в «Атомстройэкспорте».

В социальных сетях успехов и процветания фестивалю пожелали жители Болгарии, а также мэр села Столетово из Пловдивской области.



Научный стритфуд: праздник вкуса

По-настоящему вкусным и запоминающимся делает лето один из проектов «Росэнергоатома» — серия стритфуд-фестивалей, которые концерн проводит при участии ИЦАЭ. В этом году научные локации на стритфуд-фестивалях были организованы в Заречном Свердловской области, Десногорске и Калининграде.

В Десногорске на фестивале уличной еды развернулась «Научная лужайка». Отвечая на вопросы викторины «Детектор знаний», жители и гости города вспомнили основные вехи строительства и особенности работы Смоленской АЭС, а на лототроне «Физика для чайников» они проверили знание общих вопросов из области физики и атомных технологий. С помощью огромной «Физической дженги» гости площадки повторили основные физические величины и их обозначения.

Юные гости фестиваля на «Курчатовской рисовалке» создавали свои художественные шедевры-раскраски и знакомились с атомными профессиями, сражались в «Атомные шашки», выступая за команду «позитронов» или «электронов» и аннигилируя шашки соперников. Малыши успешно осваивали «Атомное домино», выстраивая цепочки из костяшек с изображениями атомных объектов. В спортивной части «Научной лужайки» самые активные участники фестиваля смогли с помощью прыжков на «Атомных скакалках» увидеть, сколько они затрачивают энергии за одну минуту (в среднем — примерно 0,01 кВт·ч), и узнать, сколько электроэнергии за то же время вырабатывает ядерный реактор РБМК-1000 (17 000 кВт·ч).

В Заречном Свердловской области фестиваль Street Food Russia состоялся впервые. Команда ИЦАЭ организовала для посетителей интеллектуальный досуг: на фестивале можно было сразиться в командной игре «Адреналин» и принять участие в других атомных играх. «Может быть, для тех, кто никогда не интересовался наукой и пришел на фестиваль съездить ватрушку, это станет толчком к науке и технологиям», — написали о площадке ИЦАЭ сотрудники пресс-службы Белоярской АЭС.

В «Научной песочнице» дети могли сделать из песка модель атома и ледокол, а также узнать от палеозоолога о древних животных, когда во время раскопок



участникам нужно было найти в песочнице настоящие кости и окаменелости возрастом от нескольких тысяч до сотен миллионов лет. Примерить на себя роль ученого детям помог сотрудник лаборатории палеоэкологии Института экологии растений и животных Уральского отделения РАН Антон Кисагулов. Ребята смогли найти и рассмотреть настоящий моляр мамонта, позвонок дельфина и другие кости древних животных. «Очень здорово, что у детей на фестивале была целая научная зона, где они могли не просто поиграть, но и узнать новое — даже пообщаться с настоящим ученым. Антон показал, как проводят раскопки настоящие археологи: работают в команде и обследуют квадрат за квадратом. Как только детей организовали на такую командную работу, у них сразу получилось что-то найти, а сколько радости было из-за самих находок — не описать!» — поделилась Маргарита Тетерина, посетительница фестиваля.

Сыграли посетители площадки и в «Термоядерную бочу». «Столкновение шаров в игре чем-то похоже на реакцию термоядерного синтеза — при слиянии два легких элемента преодолевают кулоновский барьер, а игрокам нужно бросить свой шар как можно ближе к шару соперника», — рассказала Айгуль Хуснутдинова, руководитель ИЦАЭ Екатеринбурга.

Посетители стритфуд-фестиваля в Калининграде стали зрителями научно-популярного ток-шоу о еде «Научный холодильник: гаспачо» и интеллектуально-музыкального ток-шоу «ED(и)М: кухня современной электронной музыки», а также узнали о судьбе знаменитого долгостроя советской эпохи — Дома Советов, на площади у которого проходил фестиваль.

Дом Советов, по мнению историка архитектуры и культуролога Александра Попадина, можно назвать Вавилонской башней по-калининградски — его строили как символ новой советской власти на месте снесенного королевского замка, но чиновники в него так и не переехали, и в 2023 году заброшенное здание решили снести, а освободившееся пространство застроить так, чтобы оно было связано со всеми остальными частями города. «После сноса Дом Советов, как и королевский замок ранее, перейдет в категорию призраков, и тогда они наконец примирятся друг с другом, а площадь, которая может стать сердцем города, приобретет новый облик», — рассказал эксперт.

На ток-шоу «ED(и)М: кухня современной электронной музыки» Никита Демин, скрипач, саунд-продюсер, мультиинструменталист, из контроллера и овощей собрал настоящую драм-машину и с помощью электро-скрипки в режиме реального времени создал музыкальную композицию. В роли музыкантов попробовали себя и некоторые зрители. Спикер также рассказал, в чем особенность электронной музыки. «Синтезатор создает звук, которого в природе не существует. А электронная музыка складывается из повторяющихся сэмплов, синтезируемых звуков и вокала», — пояснил Никита Демин.



«Форсаж» и «Шухов-фест»: инжиниринг как философия жизни

Ажурные башни Владимира Шухова, истории российских инженеров, рассказанные ими от первого лица, язык как инженерная коммуникация, проектирование нейрографического романа и культурная трансформация энергии стали блоками программы «Инженергу», которую сеть ИЦАЭ при поддержке инжинирингового дивизиона Росатома организовала на форуме сообществ молодых специалистов «Форсаж» в Калужской области.

Рассказ о выдающихся инженерах был построен в жанре нейрографического романа. Каждый из персонажей рассказывал о себе от первого лица, представляясь в финале, а зрители по известным им фактам и деталям получили возможность догадаться, чью историю жизни и инженерного творчества они услышали. Участники «Форсажа» познакомились с 10 инженерами. Это, например, Павел Роттерт, инженер-белогвардеец, «мэтр протяженных тоннелей», первый начальник Метростроя. «Москва как большой наземный корабль, она совершенно не подходит для подземного строительства. Грунты, пливуны, подземные воды... Но мы справились всего за четыре года! Кстати, слово «метро» в 20-е годы XX века было мужского рода. Перед архитекторами была поставлена почти невыполнимая задача — создать ощущение, что пассажиры находятся не под землей. Высокие потолки, теплый солнечный свет ламп, сиденья в поездах — впервые — с мягкой обивкой!» — рассказал актер в роли Павла Роттерта.

Познакомились слушатели и с родной сестрой Маяковского Людмилой, которая преподавала во ВХУТЕМАС. «Фабрика «Красная роза» производила шелк в промышленных масштабах. Перед нами поставили задачу — придумать орнамент, соответствующий эпохе. Все увлекались аэронавтикой. Но как наносить узор на сотни, тысячи метров ткани? Я придумала, как создать эффект шелковых обоев с помощью обычной краски. Работала я точно и быстро, ведь я Людмила Владимировна Маяковская. Мой брат говорил: «Ну, Люда, тяп да ляп, не выйдет у тебя корабль!» Но ведь

получилось же! Я уверена: место художника — на заводе! Мои студенты слишком мало рисовали с натуры. Но ведь даже самые абстрактные формы вырастают из природной логики», — рассуждала дизайнер.

Зрители также познакомились с «рыцарем ветра» Григорием Сабининым, который в детстве для проверки аэродинамических характеристик вращающихся лопастей винта стащил у отца пачку сигарет, а во взрослом возрасте построил ветроэлектростанцию за два месяца. А также с инженером — амазонкой авангарда, как называла себя Лидия Комарова, которая спроектировала здание МГТУ, Горный институт в Кемерово и Политехнический институт в Караганде.

Об эволюции носителей информации участники «Форсажа» узнали на лекции Варвары Любовой, специалиста по цифровизации и AI-технологиям в сфере культуры и искусства, лектора и экскурсовода проекта «Глазами инженера». Все начиналось с глиняных табличек, свитков из папируса и бересты, а продолжилось цифровыми носителями. «Нам необходим физический объем, который наше сознание определяет как материальный конструктор, а гаджет вписывается в картину тела. Мозг считает его нашей частью. Поэтому мой главный совет — читайте бумажные книги! Они осязаемы, содержат определенный объем данных, а лента в социальных сетях — это бесконечный поток информации, в котором запросто можно утонуть, у нее нет материальных границ», — рассказала Варвара.

Темы и интерактивные форматы проведения мероприятий настолько понравились аудитории, что впоследствии блоки программы «Инженергу» были дополнены и представлены на фестивале инженерных технологий «Шухов-фест», который прошел в Москве в конце августа в честь 170-летия со дня рождения выдающегося русского инженера. Гостей фестиваля ждали иммерсивная НЕлекция «Гиперболоид Шухова. Больше, чем башня», арт-практикум «Инженергу», а также мультимедийная лекция «Великая цифровая: как оживить историю при помощи современных технологий».



Екатеринбург: кто мы и откуда

Второй год подряд фестиваль науки «Кстати» в Екатеринбурге проходит в парке Маяковского. Под открытым небом проводятся лекции, мастер-классы, научные дискуссии, и завершается день музыкальной программой, в которой зрителям рассказывают о физике звука, акустических характеристиках инструментов и иллюстрируют лекционную часть исполнением музыкальных композиций.

В 2023 году фестиваль был приурочен к 300-летию Екатеринбурга, а основной темой программы стал ответ на вопрос «Кто мы, откуда, куда мы идем?» — инсталляции, установленной над водами Екатеринбургского городского пруда, представляющей собой аллюзию на картину Поля Гогена.

Программа стартовала с лекции физиолога, доктора биологических наук Вячеслава Дубынина «Мозг: как мы думаем и принимаем решения». «Наш мозговой компьютер функционирует как непрерывно работающая сущность. Все время новые задачи, движение. Чтобы мы «зависли», нужно очень постараться. Центр сна и бодрствования можно сравнить с блоком питания компьютера. Вроде бы не самая важная деталь, но если выйдет из строя, то компьютер работать не будет», — пояснил эксперт. Физиологические потребности, по словам Дубынина, это «биос нашего мозгового компьютера», и они определяют стратегию наших дальнейших действий. «Если нам удастся удовлетворить свою потребность, то у нас возникают положительные эмоции — радость, удовольствие, и мозг их воспринимает как подтверждение правильности выбранных действий, а если что-то не получается, то мы расстраиваемся, сердимся, и тогда кора больших полушарий головного мозга тормозит неудачные программы. Поведение оценивается по тому, удалось или не удалось удовлетворить потребность», — рассказал Вячеслав Дубынин.

Кульминацией программы фестиваля стало ток-шоу «Наука в мемах», на котором молодые атомщики

разобрали мемы о радиации и атомных технологиях. «Такое количество радиации, от которого человек может немедленно умереть, мы нигде в обычных условиях не встретим, несмотря на то что небольшой радиационный фон есть везде на планете, и это совершенно нормально», — пояснил один из известных мемов — изображение мультипликационного героя Гомера Симпсона с его словами «Радиация убивает только тех, кто в нее верит» — Дмитрий Хмелинин, начальник научно-исследовательской лаборатории аппаратуры для лучевой терапии АО «НИИТФА». Эксперт также рассказал о том, как устроена медицинская техника, использующая радиационные технологии. «Чтобы получить лучевую болезнь, надо под рентгеном пролежать год без перерыва», — прокомментировал Дмитрий расхожий миф о вреде рентгеновских исследований.

Роман Горячев, руководитель группы аналитики и учета ОПВК Федерального экологического оператора (ФЭО), объяснил, почему использованные батарейки ни в коем случае нельзя выбрасывать в обычный мусор: «В батарейке содержатся никель, кадмий, свинец, и она защищена металлической оболочкой. При попадании на свалку оболочка теряет целостность, и эти металлы попадают в окружающую среду. Одна батарейка загрязняет 20 квадратных метров почвы и около 400 литров воды. Поэтому сдавайте их в пункты сбора!» Поводом для рассказа о вреде выброшенных батареек для окружающей среды послужил мем, на котором изображен муравей-мутант метрового роста, который завелся в саду у человека, выбрасывающего батарейки в урну. Также спикер рассказал, как Росатом занимается ликвидацией накопленного вреда окружающей среде.

Завершился фестиваль концертом музыкальной группы «Научно-технический рэп», на котором прозвучали песни «Теорема Лагранжа», «Тыжпрограммист» и другие композиции.

Островец: выводим формулу праздника

555-летие небольшого города Островца, спутника Белорусской АЭС, стало еще одним поводом поговорить о науке и атомных технологиях. Более 10 тыс. участников научно-познавательного фестиваля выводили формулу празднования Дня атомного города, в которую вошли сразу несколько переменных — от юбилея белорусских стройотрядов и 25-летия АСЭ до уровня позитивных эмоций, полученных на празднике.

В Центральном парке под шатрами-звездами и на главной сцене одновременно проводились более 40 мастер-классов, инженерных, логических и интеллектуальных игр, а также интерактивных программ.

Впервые в Островце сконструировали гигантскую машину Голдберга — механизм, который демонстрирует цепную реакцию. «Сегодня я работаю на научной локации прорабом по сооружению гигантской машины Голдберга. У нас есть 620 деталей, 523 болта, 667 гаек, 41 ось и 15 веревок. Командная работа, четкость и точность, я надеюсь, помогут нам

построить 25-метровый механизм и запустить цепную реакцию. Здорово, что в процесс включились как взрослые, так и дети», — рассказал волонтер Дня атомного города, студент, член Белорусского республиканского союза молодежи Константин Хона.

Участие ИЦАЭ и инженерингового дивизиона Росатома в организации и проведении праздничных мероприятий в Островце стало городской традицией. «Впервые интерактивную научную программу «Зеленый квадрат» мы провели на праздновании 550-летия Островца в 2018 году. Сегодня мы проводим уже шестое масштабное городское мероприятие и очень рады, что наши научные зоны стали отличительной чертой и уникальной особенностью городских праздников белорусского атомного города. Каждый год мы стараемся удивлять островчан новыми шоу, играми, мастер-классами, рассказывать о научных открытиях и разнообразии атомных технологий на простом и понятном языке. На каждой площадке всегда аншлаг, мы очень рады, что наша работа находит такой отклик у аудитории», — рассказала руководитель ИЦАЭ Минска Татьяна Казючиц.





Федор Буйновский,
обозреватель «Вестника атомпрома»

Наука убеждать

Особенности успешных стратагем на примере тысячелетнего опыта Византийской империи

Эдвард Люттвак — историк, экономист, специалист по международным отношениям, политический консультант Государственного департамента и Министерства обороны США, старший советник Центра стратегических и международных исследований в Вашингтоне. Бывший советник президента Рейгана, а ныне советник администрации президента Байдена является автором многочисленных научных работ, посвященных преимущественно вопросам военной (но не только) стратегии.

Лучшим и основным произведением — magnum opus — историка и экономиста стала фундаментальная работа «Стратегия Византийской империи», в которой Люттвак описывает, как происходили политические и военные процессы в Византии и что позволило ей просуществовать целое тысячелетие, несмотря на предельно жесткие условия. Специалисты с удовольствием изучают этот труд, поскольку считается, что советник президента Рейгана, одержавшего победу в холодной войне, руководствовался во многом стратагемами или, как теперь у нас говорят, кейсами Византийской империи.

В кольце врагов

В отличие от пренебрежительного отношения к византийцам, обычно характерного для западных идеологов и политиков, Люттвак оценивает их чрезвычайно высоко, утверждая, что Византийская империя «выработала стратегический метод, позволивший ей отражать волны завоевателей, накатывавшие одна за другой в течение более восьми веков». Дело в том, что Древнему Риму хватало для обеспечения своей безопасности одной только военной силы, финансируемой умеренными налогами и комплектовавшейся в основном добровольцами.

У Византии, в отличие от Рима, таких огромных военных сил никогда не было. Хотя экономически она унаследовала самую выгодную часть Римской

империи, с военно-стратегической точки зрения ее положение было гораздо опаснее, чем у римского Запада. На своей восточной границе Византия была вынуждена постоянно противостоять агрессивному Ирану, а затем арабам и тюркам, причем без прежней возможности перебрасывать силы с запада. На Балканах же Византия постоянно находилась под угрозой вторжений из Великой Евразийской степи. Таким образом, Западная империя обладала значительной стратегической глубиной, а угрожали ей только с востока; Византия была такой глубины лишена и постоянно оборонялась одновременно с разных направлений. И в таких сложных условиях Западная империя рухнула уже в 476 году, тогда как Восточная ухитрилась просуществовать до 1453 года.

Секреты успеха

Несмотря на более высокую уязвимость, Византия выстояла, что дает однозначный ответ на вопрос, чья стратегия была эффективнее. Успех долго сопутствовал ей, потому что «ее правители сумели стратегически приспособиться к ухудшившимся обстоятельствам». Прежде всего, Константинополь научился полагаться «не столько на военную силу, сколько на всевозможные формы убеждения: вербовку союзников, запугивание врагов, срамливание старых и новых, а также потенциальных противников между собой». Если же приходилось воевать, то византийцы «старались не столько уничтожить врагов, сколько сдерживать их: как для того, чтобы сберечь военную силу, так и потому, что нынешний враг завтра может стать союзником».

Итак, «эпически долгое выживание» Византии есть следствие не стечения обстоятельств, а исключительно успешной стратегии. Ее результат — «стойкая способность столетие за столетием создавать непропорционально высокую мощь из любой военной силы, сочетая ее со всеми приемами убеждения и руководствуясь при этом более обширными сведениями». Армия и флот этой страны были порой «настолько слабы (или противник настолько силен), что само выживание Империи становилось возможным только благодаря иностранным союзникам».

Выжить за счет стратегии

Стратегическими преимуществами Византии, носившими решающий характер в долгосрочном плане, Люттвак считает две унаследованные от Рима системы. Во-первых, это налоговая система и реализующий ее фискальный аппарат, во-вторых — финансируемая благодаря им профессиональная армия, чья боеготовность поддерживалась постоянным обучением и тренировками. Ни того, ни другого абсолютное большинство современных Византии держав не имело.

Эти два преимущества дополнялись собственным достижением — высокой культурой стратегического управления, полностью сформировавшейся уже к VII веку. Эта культура включала развитую военную науку, солидную традицию разведки и изощренную и высокоэффективную дипломатию. Так как Византия была лишена превосходящих ресурсов, сравнимых со временами единого Рима, ей «приходилось либо выжить за счет стратегии, либо не выжить вообще». И благодаря этому Империя выживала век за веком — «враги Империи могли разгромить ее войска и флот в сражении, но победить ее великую стратегию они не могли».

Эта стратегия начала формироваться благодаря беспрецедентному вызову, брошенному Атилой в середине V века. Гунны обладали гигантским и в то же время чрезвычайно подвижным войском, противостоять которому римляне не могли. В ходе противостояния с войсками Атилы Константинополь разработал оригинальный стратегический подход, который лег в основу выживания Империи на длительную перспективу.

В чисто военном отношении тяжелая пехота как основная вооруженная сила Византии уступила место хорошо натренированным конным копейщикам и лучникам. Это повысило подвижность и убийную силу армии — не до уровня гуннов, но в значительной степени. Еще важнее, что Византия отказалась от тотального уничтожения врагов в пользу их ослабления и срамливания с другими врагами, то есть, руководствуясь принципом «лучше два средних по силе противника, чем один очень сильный», стала откупаться от наиболее сильных врагов и ослаблять их, подкупая других — их возможных конкурентов.

Ставка на дипломатию

Сначала дипломатия и только потом сила — таким стал новый стратегический подход, резко отличавшийся от римского. Это позволило эффективно использовать для защиты Империи ее величайшее преимущество: финансовое могущество, основанное на работающей налоговой системе. Византийцы поняли, что «мир был лишь временным перерывом в войне, что едва будет разбит один враг, как другой займет его место». И вместо окончательного уничтожения врага лучше ослабить, чтобы со временем сделать его союзником и противопоставить его

силу новым угрозам. Ставка на военную силу сменилась ставкой на дипломатию, шпионаж и тайные операции.

После Юстиниана стратегия Восточной Римской империи стала совсем не римской. «Гений византийской большой стратегии заключался в том, чтобы саму многочисленность врагов превратить в преимущество, используя дипломатию, переманивание на свою сторону, выплаты и обращение в свою веру, чтобы заставить их сражаться друг с другом, а не с Империей». Военная сила была подчинена дипломатии и использовалась отныне скорее для сдерживания и наказания, чем для нападения или защиты.

Чтобы завершить войну успехом, следует вербовать союзников, а самый дешевый путь к победе — подкуп. Если же все-таки необходимо сражаться, то следует обходить самые сильные стороны врага и использовать его слабости. «Это может потребовать немало времени. Но спешить некуда: если покончено с одним врагом, другой наверняка займет его место, ибо все постоянно меняется, когда возникают и гибнут правительства и нации». И это самое ценное, что было сохранено от большой византийской стратегии.

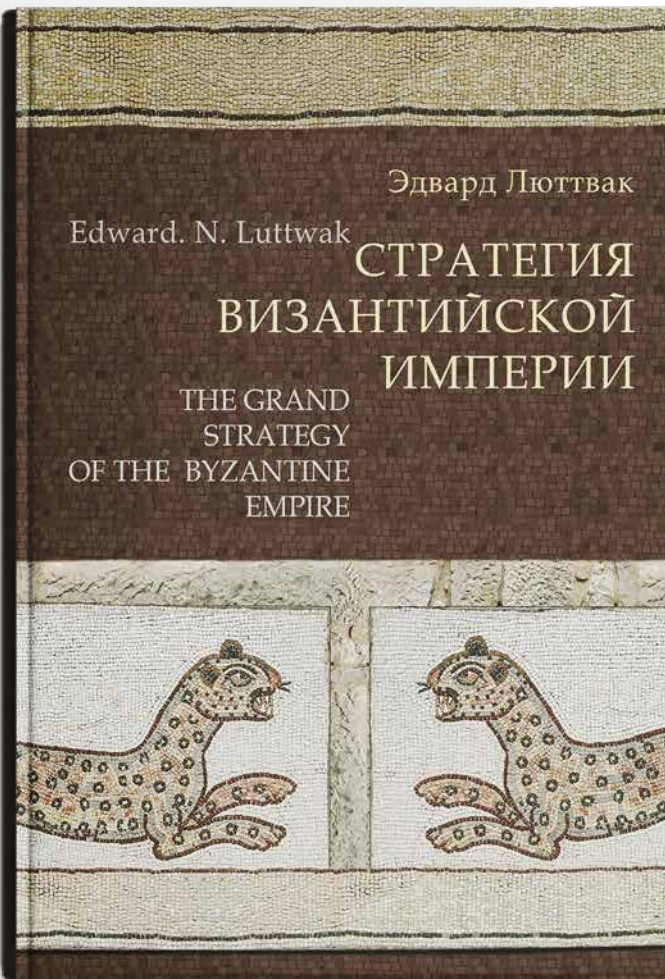


Фото: ПАО «НЭХК»

На Новосибирском заводе химконцентратов состоялась приемочная инспекция ядерного топлива для стартовой загрузки первого энергоблока АЭС «Руппур» в Бангладеш



ДАВАЙ ПОДЕЛИМСЯ



От А до Я!

От «Атомэнергомаша» до ЯОКа, от освоения Арктики до строительства АСММ в Якутии, от атомной науки до ядерных прорывных технологий — телеграм-канал газеты «Страна Росатом» рассказывает о важных событиях от А до Я.

Спрашивайте!

У вас есть уникальная возможность задать вопросы топ-менеджерам и ведущим экспертам.

Будьте в курсе!

В нашем телеграм-канале — горячие новости оперативные комментарии, в том числе выходящие далеко за пределы отрасли.



Присоединяйтесь, с нами интересно! Чтобы подписаться, отсканируйте QR-код или вбейте в поиске StranaRosatom.

Выигрывайте призы!

Мы регулярно проводим конкурсы среди подписчиков.



Самое полное хранилище актуальных фотоматериалов атомной отрасли — в медиабанке газеты «Страна Росатом».

