

ВЕСТНИК АТОМПРОМА

№8 | октябрь | 2024

Главная тема

Электроэнергетика сегодня и завтра

*Тенденции электроэнергетических
рынков, направления энергоперехода
и перспективы ядерной энергетики*

В номере

Аддитивные технологии 40

Нейроморфные вычислительные системы 42

Музей «АТОМ» 46



Уважаемые читатели!

Электричество, несомненно, определяет образ жизни современного человека. При этом электроэнергетический сектор является крупнейшим источником эмиссии парниковых газов: на его долю сейчас приходится около трети всего объема выбросов. Независимо от того, насколько каждый из нас согласен с мнением о влиянии антропогенного фактора на происходящие климатические изменения, абсолютное большинство государств ставят цели по декарбонизации различных отраслей, и прежде всего электроэнергетики.

Материалы главной темы номера рассказывают об основных трендах электроэнергетических рынков, успехах и барьерах на пути к достижению углеродной нейтральности и о роли, которую в зеленом энергопереходе могут и должны играть атомные станции — мощный, надежный и устойчивый источник чистой энергии.

Также вы узнаете о новой разработке Росатома в области аддитивных технологий — 3D-принтере для высокотемпературной печати, о работе по созданию новой элементной базы для искусственного интеллекта, ведущейся в рамках научной программы Национального центра физики и математики, и о впечатляющих итогах первого года работы музея «АТОМ».

**ВЕСТНИК
АТОМПРОМА**

№ 8, октябрь 2024 года

Информационно-аналитическое издание

Фото на обложке
Ростовская АЭС

Главный редактор
Юлия Долгова
dolgova@strana-rosatom.ru

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 1980 экземпляров.
Цена свободная.
Подписано в печать: 30.10.2024

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. Зюзинская,
д. 6, стр. 2.
Тел.: +7 (968) 724-35-91
№ заказа: Аф-009/24.

Содержание

Главная тема КОРОТКО	Точки зеленого роста 4 <i>Направления и темпы глобального энергоперехода</i>	Главная тема ЗЕЛЕНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	Поймать и обезвредить 36 <i>Как улавливание и хранение диоксида углерода может помочь человечеству в борьбе с глобальным потеплением</i>
	Новая ядерная энергетика для новых потребностей низкоуглеродной экономики 6 <i>Ядерная энергетика может стать одним из ключевых элементов инвестиционно ориентированных сценариев развития экономики России</i>		Технологии Горячий прием для тугоплавких 40 <i>В Росатоме создан 3D-принтер для высокотемпературной печати</i>
ОБЗОР	Материалы будущего 12 <i>ВНИИИМ им. академика А. А. Бочвара занимается разработками для инновационных ядерных реакторов нового поколения</i>	Наука	Искусственный интеллект: новая «весна» 42 <i>Будут ли компьютеры мыслить как человек</i>
ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПОКОЛЕНИЯ IV	Атом — миру 17 <i>Участникам 68-й сессии Генеральной конференции МАГАТЭ продемонстрированы достижения российской атомной отрасли</i>	Музей «АТОМ»	«АТОМ»: будущее здесь и сейчас 46 <i>Музей атомной энергии на ВДНХ подводит итоги первого года работы</i>
МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО	Связанные одной сетью 18 <i>Как устроена электроэнергетическая система России</i>	ИЦАЭ	О пользе многознания 52 <i>Возобновляемая энергетика просвещения: как формируется критическое мышление</i>
ИНФРАСТРУКТУРА	Электричество продолжит «зеленеть» 26 <i>Почему в мире растет потребление электроэнергии и какие технологии будут способствовать ускорению темпов энергоперехода</i>	Книжная полка	Стамбул — третий Рим 56 <i>Взгляд на привычную историю Запада с другой стороны</i>
МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОБЗОР	Зеленые энерготехнологии vs глобальное изменение климата 30 <i>С какой скоростью в мире происходит энергетический переход и что мешает этому процессу</i>		

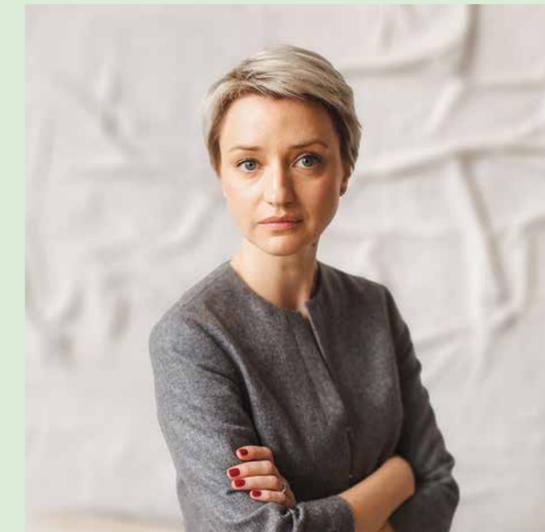
Точки зеленого роста

Электроэнергия занимает центральное место во многих областях жизни современного общества, а надежность и доступность электроснабжения напрямую влияют на экономику государств, региональное развитие, бюджеты предприятий и домохозяйств и многие другие сферы.

Декарбонизация признается одной из основных задач, стоящих перед человечеством и определяющих его будущее. Производство электроэнергии сейчас является крупнейшим в мире источником выбросов углекислого газа, в значительной степени влияющего на процессы глобального изменения климата. Но именно электроэнергетический сектор лидирует в процессе перехода к нулевым выбросам за счет быстрого роста генерации на основе возобновляемых источников энергии.

По прогнозам Международного энергетического агентства и других профильных организаций, в ближайшие годы мировая потребность в электроэнергии будет расти, в том числе благодаря увеличению доли электротранспорта и более широкому использованию электричества для отопления, кондиционирования, промышленного производства и функционирования центров обработки данных. При этом дополнительный спрос будет в основном удовлетворяться за счет возобновляемых источников и ядерной энергетики.

Материалы главной темы номера рассказывают об основных тенденциях российского и мирового электроэнергетического сектора, направлениях и темпах зеленого энергоперехода и о роли ядерной энергетики в этих процессах.



Полина Лион

Директор департамента устойчивого развития госкорпорации «Росатом»:

— Необходимость энергоперехода на чистые источники энергии, кажется, перестала быть предметом споров. Как и роль низкоуглеродной атомной энергии, без которой выполнение поставленных климатических целей невозможно. В сентябре 14 крупнейших банков мира заявили о пересмотре своей позиции, которая десятилетиями звучала как принципиальный отказ в финансировании атомных проектов. Переломным аргументом для них стала именно задача максимального содействия зеленому энергопереходу.

Развитие чистой атомной энергии не ограничено только климатическими приоритетами. Появление АЭС в регионе гарантированно означает экономический рост, развитие промышленности, рабочие места, повышение уровня образования и рост уровня жизни в целом.

Но признание атома в числе необходимых инструментов для энергоперехода — только начало пути. Для полноценной реализации климатического потенциала атомная энергетика должна в явном виде подтверждать свою «устойчивую» компоненту, соответствовать зеленому регулированию. А это значит внедрение мер по адаптации к изменению климата в проектах АЭС большой мощности и АСММ, дополнительные усилия для укрепления низкоуглеродной составляющей по всей цепочке жизненного цикла, решения для минимизации потребления природных ресурсов, повторная переработка и рециклинг сырья и материалов.

Все это — приоритет атомной отрасли на ближайшие несколько лет. В наших руках сделать атомную энергию по-настоящему востребованной энергией будущего.



Текст: Федор Веселов, кандидат экономических наук, заместитель директора Института энергетических исследований РАН (ИНЭИ РАН)
Фото: Ленинградская АЭС, Смоленская АЭС, Машиностроительный дивизион Росатома
Инфографика: ИНЭИ РАН

Новая ядерная энергетика для новых потребностей низкоуглеродной экономики

Ядерная энергетика может стать одним из ключевых элементов инвестиционно ориентированных сценариев развития экономики России

Темпы развития электроэнергетики и приоритеты изменения ее технологического облика определяются совокупностью макроэкономических, технологических и экологических факторов. Рассмотрим несколько сценариев экономического роста и возможного вклада ядерной энергетики в развитие национальной энергосистемы России в условиях меняющейся глобальной геополитической и экономической ситуации.

АЭС и сценарии экономического роста

Россия является пионером в использовании мирного атома и на протяжении более чем полувека остается одним из мировых лидеров в использовании ядерной энергии для энергоснабжения экономики. В последние годы Россия занимает четвертое место по установленной мощности действующих атомных электростанций и производству электроэнергии на АЭС, уступая лишь США, Китаю и Франции.

В Единой энергосистеме страны (ЕЭС России) атомные электростанции являются наиболее быстрорастущим сегментом электрогенерации. Если с начала 2010 по конец 2023 года (то есть за 14 лет) общее производство электроэнергии в ЕЭС России выросло на 13%, то объем электроэнергии, полученный на АЭС, — на 28%. Мощность всех электростанций выросла на 15%, а мощность АЭС — на 22%. В последние годы доля АЭС в генерирующей мощности составляет около 12%. При этом атомные электростанции имеют очень высокий коэффициент использования мощности, и в результате их доля в производстве электроэнергии существенно выше и составляет 19–20%.

В настоящее время поставлена стратегическая цель для АЭС — увеличение к 2045 году вклада в общее производство электроэнергии до 25%. В зависимости от темпов роста объемов спроса на электроэнергию в ближайшие 20–25 лет масштаб необходимого для достижения этой цели ввода мощностей АЭС и роста объемов производимой ими электроэнергии может заметно различаться.

По оценкам ИНЭИ РАН¹, в «плановом» сценарии развитие экономики с долгосрочным ростом ВВП около 3% в год при одновременном достижении целей национальной стратегии низкоуглеродного развития² (СНУР) потребует к 2050 году увеличить объем производства электроэнергии на треть. Для оценки эффективного вклада АЭС в обеспечение этого спроса проведено моделирование прогнозных балансов мощности электростанций, производства электроэнергии и централизованного тепла и оптимизирована производственная структура отрасли по традиционному для задач энергетического планирования критерию минимума суммарных дисконтированных затрат на энергоснабжение.

Полученные результаты подтверждают экономическую обоснованность увеличения вклада ядерной энергетики в производство электроэнергии к 2045 году до 25% и, более того, до 30% к середине века. Необходимая для этого мощность АЭС должна удвоиться к 2050 году — до 60 ГВт. Однако эти оценки могут оказаться еще более высокими. В настоящее время резко ускорился процесс адаптации России к радикально меняющейся системе экономических, технологических, энергетических взаимодействий в мире. При формировании нового многополярного миропорядка особенно актуальной для страны становится задача по наращиванию экономической мощи при одновременном усилении технологического суверенитета. Опыт крупнейших

¹ Веселов Ф., Макаров А., Хоршев А., Ерохина И. Развитие электроэнергетики — на распутье стратегических решений // Энергетическая политика. — 2024. — № 2 (193). — С. 90–105.

² Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года, утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 октября 2021 г., № 3052-Р.

Площадка строительства новых блоков Ленинградской АЭС (сентябрь 2024 г.)



развивающихся экономик, Китая и Индии, показывает, что главным «мотором» такого долгосрочного экономического роста становится активная инвестиционная политика.

Наряду с «плановым», в ИНЭИ РАН были сформированы и исследованы еще два сценария инвестиционно ориентированного роста экономики: «ускоренный» и «интенсивный»³. В обоих сценариях темпы инвестиций в экономике будут заметно опережать рост ВВП. «Ускоренный» сценарий ориентирован на динамику доли инвестиций в ВВП, которая наблюдалась в 2000–2020-х годах в Индии, а «интенсивный» — в Китае. Если в «плановом» сценарии среднегодовой рост ВВП будет около 3%, то в «ускоренном» он увеличивается до 3,8%, а в «интенсивном» — до 4,5%. Таким образом, к 2050 году ВВП страны вырастет в 2,3 раза в «плановом» сценарии и в 2,8 и 3,4 раза — в двух других.

С помощью межотраслевых моделей эти сценарии развития экономики России были детализированы до выпусков и инвестиций в основных отраслях и секторах, а далее на базе отраслевой экономической динамики, с учетом численности и доходов населения были определены тенденции внутреннего энергопотребления. Рост инвестиций в экономике будет стимулировать повышение ее энергоэффективности, и общая потребность в первичной энергии к 2050 году увеличится по трем сценариям лишь на 13, 24 и 32%. При этом для сохранения приемлемой стоимости энергоснабжения, не сдерживающей экономический рост, потребуются смягчение требований по декарбонизации для электро- и теплоснабжения: стабилизация объемов выбросов CO₂ на отчетном уровне или его снижение лишь на несколько процентов.

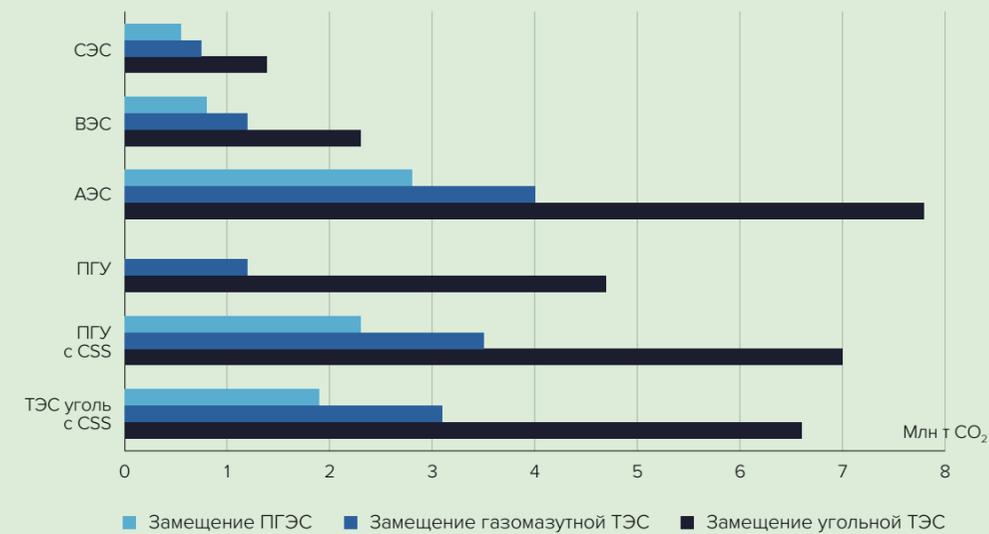
Электроэнергия будет играть все большую роль в структуре энергопотребления, в том числе за счет углубления электрификации на транспорте и в других сферах экономики. Для трех сценариев производство электроэнергии к 2050 году вырастет в 1,3; 1,5 и 1,7 раза соответственно. Как показывают модельные расчеты, для обеспечения дополнительных потребностей экономики в электроэнергии в основном будет увеличиваться мощность газовых электростанций и АЭС. По сравнению с «плановым» сценарием, мощность АЭС к 2050 году вырастет еще на 20–40%, до 72–83 ГВт (рис. 1а). Это позволит еще немного увеличить их вклад в производство электроэнергии — до 31–33% (рис. 1б) и сделает АЭС важнейшим

³ Макаров А., Веселов Ф., Малахов В. Сценарии интенсификации развития экономики и энергетики России // Проблемы прогнозирования. — 2024. — № 4 (205). — С. 102–119.

Рис. 1. Установленная мощность электростанций в РФ в 2050 году (а) и структура производства электроэнергии (б) при различных сценариях роста экономики



Рис. 2. Вклад разных типов электростанций в снижение выбросов CO₂ при замещении электроэнергии от ТЭС (расчет на 1 ГВт мощности), млн т CO₂-эquiv.



сегментом национальной энергосистемы, сопоставимым с гидрогенерацией по мощности и с газовой генерацией по выработке электроэнергии.

на рисунке 2, АЭС существенно выигрывают у ВИЭ по величине предотвращенных выбросов и немного опережают тепловые станции с CCS (которые при этом существенно более дорогие, чем АЭС).

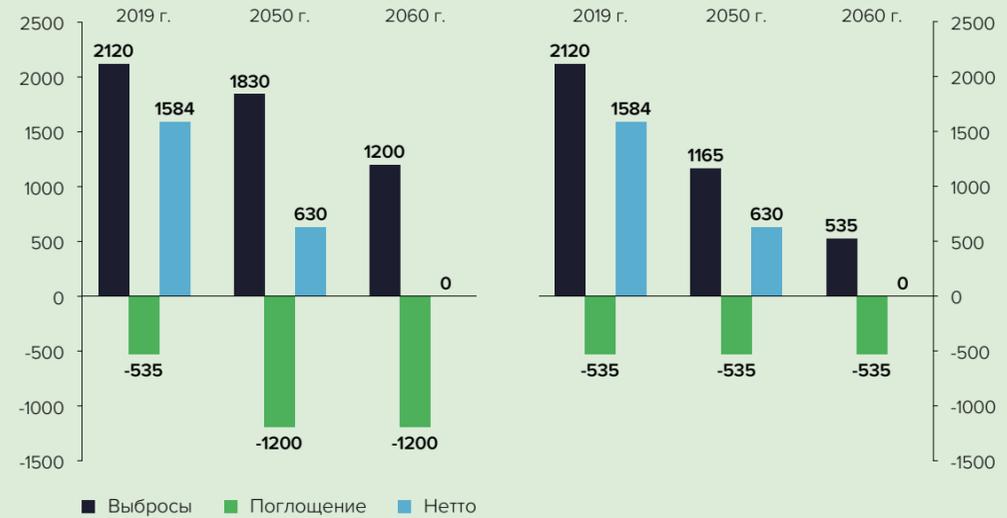
АЭС и сценарии декарбонизации экономики

Опережающий рост мощности и производства электроэнергии на АЭС в последние 15 лет уже оказал существенное влияние на сдерживание объемов выбросов парниковых газов от электростанций. Если сравнить удельный эффект декарбонизации на 1 ГВт мощности при замещении различных тепловых электростанций безуглеродными источниками или технологиями с улавливанием CO₂ (CCS), то преимущество АЭС выглядит достаточно очевидным. Как показано

Таким образом, атомные электростанции могут рассматриваться в качестве приоритетной технологии для декарбонизации электроэнергетики, заметно опережая гидроэлектростанции и прочие возобновляемые источники. Это наглядно видно по изменению структуры производства электроэнергии в «плановом» сценарии (рис. 1), где прирост доли АЭС наибольший среди безуглеродных технологий. Заметный вклад в сдерживание выбросов внесут и газовые электростанции — за счет повышения эффективности использования газа в комбинированных парогазовых и теплофикационных циклах, а также при замещении электроэнергии от угольных электростанций.

Описанный выше «плановый» вариант развития электроэнергетики обеспечивает к 2050 году декарбонизацию в отрасли с темпом снижения физического объема выбросов CO₂, как и в целом по стране, немногим меньше чем на 15% от уровня 2019 года. При этом ожидается, что за счет более чем двукратного прироста поглощающей способности экосистем нетто-выбросы в экономике России к середине века могут снизиться на 60%. Повышение потенциала поглощения является важной альтернативой ускоренному переходу на безуглеродные технологии. Так, при пессимистичной оценке, если поглощающая способность экосистем останется на существующем уровне, то для достижения целевых показателей СНУР к 2050 году потребуются снизить физические выбросы уже на 45% от уровня 2019 года (рис. 3). При этом, чтобы, согласно Климатической доктрине РФ, достичь к 2060 году углеродной нейтральности (то есть нулевых нетто-выбросов), за следующие

Рис. 3. Динамика снижения физического объема выбросов парниковых газов для достижения углеродной нейтральности в 2060 году при различном уровне поглощения экосистемами, млн т CO₂-эquiv.



10 лет (с 2050 по 2060 г.) физический объем выбросов потребуется снизить еще на 35% при высоком объеме поглощения и вдвое — при отчетном⁴.

2019 года. При этом с учетом тесной технологической связи между системами электро- и теплоснабжения правильно рассматривать квотирование общих выбросов, связанных с производством электроэнергии и централизованного тепла.

Опыт развитых стран, активно снижающих выбросы, показывает, что именно электроэнергетика является отраслью, где они сокращаются наиболее интенсивно, быстрее, чем в экономике в целом. Поэтому очень важным представляется исследовать возможности и последствия перехода к более амбициозным целям по сокращению выбросов CO₂ при производстве электроэнергии и централизованного тепла в России. Рассмотренный диапазон сокращения выбросов начинается с принятого в «плановом» сценарии показателя в 13,6% и далее расширен до 50% от уровня

Результаты оптимизации производственной структуры подтверждают тезис о том, что АЭС оказываются наиболее эффективной технологией для декарбонизации российской электроэнергетики. Уже при сокращении выбросов на 25% АЭС будут наибольшим сегментом в структуре производства электроэнергии, а при вдвое большем сокращении станут доминирующим, обеспечивая уже не менее половины всего производства электроэнергии в стране (рис. 4).

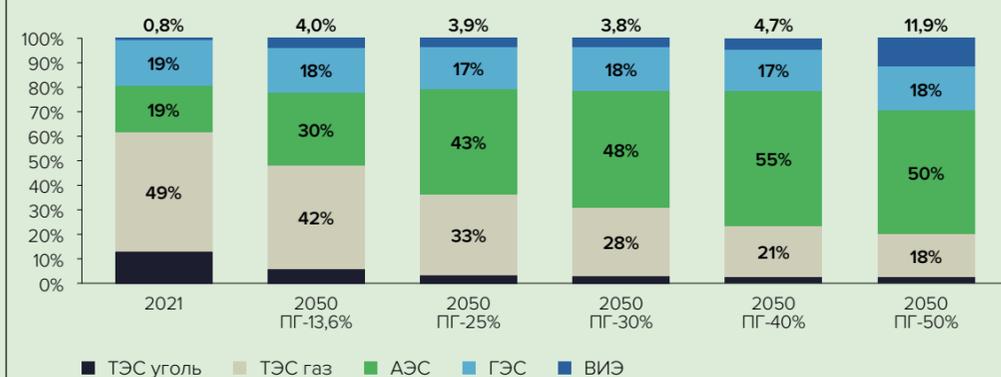
⁴ Филиппов С. Переход к углеродно-нейтральной экономике: возможности и пределы, актуальные задачи // Теплоэнергетика.— 2024.— №1.— С. 21–40.

На фото

Смоленская АЭС. Атомные станции могут рассматриваться в качестве приоритетной технологии для декарбонизации электроэнергетики



Рис. 4. Структура производства электроэнергии в 2050 году при различных сценариях сокращения выбросов CO₂ от электростанций и котельных



Фактически для достижения к 2050 году уровня выбросов CO₂ от электростанций и котельных не более 40–50% от объема 2019 года потребуются до 100 ГВт крупноблочных АЭС (рис. 5), что можно считать предельным значением как по емкости известных площадок размещения, так и по возможностям смежных отраслей промышленности. При этом декарбонизация расширяется и на производство централизованного тепла. Порядка 9–23% объемов тепла к 2050 году будет произведено за счет электрических источников (и это, в свою очередь, потребует увеличить производство электроэнергии на 10–20%). Еще 5–7% тепла будет обеспечиваться за счет ядерной энергии. Для этого потребуются до 10–15 ГВт мощностей атомных ТЭЦ на базе блоков с модульными реакторами малой мощности.

АЭС разные нужны, АЭС разные важны

Даже удвоение мощности АЭС к 2050 году до 60 ГВт в «плановом» сценарии потребует существенно скорректировать планы по промышленной и ресурсной базе атомной энергетики. Начиная с 2035 года потребуются выйти на темпы ввода в среднем двух крупных блоков в год. В предельных сценариях утроение мощности до 90–100 ГВт потребует увеличить темп роста атомных энергомошностей до четырех блоков в год. Такие амбициозные темпы не являются фантастичными в сравнении с динамикой роста ядерной энергетики Китая; более того, с учетом реализуемых зарубежных проектов госкорпорации «Росатом» ее строительные и промышленные подразделения и подрядчики работают с сопоставимой интенсивностью вводов. Однако речь идет о том, чтобы такие темпы обеспечить на протяжении длительного периода, нескольких пятилеток.

Важнейшим фактором стабильного развития ядерной энергетики является обеспеченность топливом. Кратный рост мощностей АЭС при сохранении прежней технологической стратегии на использование только

реакторов на тепловых нейтронах (РТН) потребует экстенсивного освоения природной ресурсной базы, увеличения добычи и переработки природного урана — с соответствующими рисками увеличения стоимости его добычи (и самого ядерного топлива) и усиления зависимости от зарубежных месторождений с более дешевыми ресурсами. В этой ситуации особенно актуальным для крупноблочной атомной энергетики является переход к двухкомпонентной технологической стратегии, а далее — к замкнутому топливному циклу на базе реакторов на быстрых нейтронах (РБН). Можно выделить несколько разноплановых эффектов такого перехода.

Экологические эффекты: уход от экстенсивного извлечения запасов урана позволяет снизить антропогенную нагрузку на недра, а повторное вовлечение в топливный цикл отработавшего ядерного топлива кратно уменьшает объемы остаточных отходов, позволяет снизить уровень их радиационной опасности, в перспективе вплоть до уровня природного ресурса.

Эффекты для энергетической безопасности: при ограниченных собственных природных запасах урана собственные ресурсы топлива для АЭС многократно увеличиваются; при этом снижается потребность в импорте уранового сырья и, соответственно, зависимость от других стран-поставщиков.

Эффекты для экономики страны: снижение расходов на импорт уранового сырья может быть в перспективе дополнено выручкой от экспорта новых услуг по утилизации отработавшего ядерного топлива; однако главным для экономики является мультипликативный эффект от инвестиций в АЭС с блоками РБН, которые «тянут» за собой инвестиции в производственные мощности по переработке ядерных отходов в топливо для новых блоков, снижая при этом затраты на долговременное хранение и безопасное захоронение радиоактивных отходов.

Стратегия развития ядерной энергетики предусматривает, что АЭС с блоками РБН мощностью 1250 МВт будут обеспечивать все большую часть прироста мощностей крупных блоков (максимизируя эффект масштаба по стоимости 1 кВт). При этом ожидается, что блоки с реакторами ВВЭР вполнину меньшей мощности (600 МВт) будут востребованы в зонах ЕЭС России с относительно небольшими приростами базовых нагрузок или ограниченными электрическими связями. Для изолированных энергосистем и зоны автономного энергоснабжения рассматриваются решения на базе АСММ с блоками разной мощности (блоки с реакторами РИТМ-200 и РИТМ-400 мощностью 55 и 80 МВт, блок с реактором «Шельф» мощностью 10 МВт или с еще более маленькой — 7 МВт — «Еленой-АМ»). Однако АСММ могут в перспективе активно развиваться и в ЕЭС России в виде многоблочных электростанций средней мощности в несколько сот мегаватт, в том числе атомных ТЭЦ.

Само по себе увеличение масштабов строительства и ввода атомных электростанций будет способствовать росту инвестиций в расширение промышленных мощностей по производству реакторного, энергетического и прочего оборудования, необходимых для этого сырья и материалов. Таким образом, активно развивающаяся ядерная энергетика на базе российских технологий может стать очень важным элементом ранее рассмотренных инвестиционно ориентированных сценариев развития экономики страны, точкой роста инвестиционного спроса для многих отраслей.

При этом важным эффектом роста масштабов и серийности производства и строительства блоков является их удешевление в результате «технологического обучения». Эффект снижения стоимости блоков оценивается французскими экспертами в 20–40%⁵, южнокорейскими — в 25%⁶, американскими — в 35–40%^{7,8}. Для успешной конкуренции российских АЭС с современными парогазовыми электростанциями (с учетом сравнительно дешевого газа и без учета специальных мер регулирования выбросов CO₂) важной задачей является снижение удельных капиталовложений серийных блоков российских АЭС как минимум на 15% против стоимости первых образцов. При этом важно также обеспечить сопоставимость удельных капиталовложений для серийных блоков с РТН и РБН одинаковой единичной мощности.

Выводы

В следующие два-три десятилетия развитие электроэнергетики России будет определяться непростым балансом между задачами поддержки стабильного и активного экономического роста и достижения углеродной нейтральности.

При плановых показателях развития экономики и декарбонизации производство электроэнергии вырастет на треть к 2050 году, а эффективный вклад в него атомных электростанций увеличится до 30%; при этом мощность АЭС удвоится и составит около 60 ГВт.

Металлурги Росатома ведут ковку ключевых заготовок для атомной станции малой мощности, которая будет построена в Якутии



Переход к сценариям более активного, инвестиционно ориентированного экономического роста потребует увеличить производство электроэнергии уже в 1,5–1,7 раза; однако даже при смягчении целей по декарбонизации экономики АЭС будут обеспечивать 31–33% суммарной электрогенерации, а их мощность вырастет до 72–83 ГВт.

Усиление темпов декарбонизации в электроэнергетике создаст мощнейший стимул для развития ядерной энергетики, которая может стать крупнейшим и даже доминирующим сегментом отрасли, обеспечивая к 2050 году до 45–55% общего производства электроэнергии и создавая нишу для развития атомной теплофикации. Мощность крупноблочных АЭС при этом составит 80–100 ГВт и еще до 10–15 ГВт составит ниша АТЭЦ на базе АСММ.

Ядерная энергетика может стать одним из ключевых элементов инвестиционно ориентированных сценариев развития экономики, обеспечивая технологический суверенитет страны и формируя инвестиционный спрос для многих отраслей промышленности. Даже удвоение мощности АЭС к 2050 году до 60 ГВт потребует существенно пересмотреть планы по промышленной и ресурсной базе ядерной энергетики с тем, чтобы после 2035 года выйти на темпы ввода двух крупных блоков в год. В ряде сценариев эти темпы могут увеличиться до трех-четырех блоков в год (не считая АСММ).

В этой связи особенно актуальным становится переход к двухкомпонентной ядерной энергетике и наращиванию мощности АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, обеспечивающих вовлечение ядерных отходов в замкнутый топливный цикл, снижая экологическую нагрузку отрасли и повышая энергетическую безопасность страны. При этом для долгосрочной конкурентоспособности АЭС в российской энергосистеме важно обеспечить сопоставимость удельных капиталовложений в АЭС с РТН и РБН, а также снижение удельных капиталовложений в серийные блоки российских АЭС как минимум на 15% против стоимости головных образцов.

⁵ Yu A. Reduction of capital costs of nuclear power plants.— Paris, France: OECD, 2000.— 110 p.

⁶ Lovering J., Yip A., Nordhaus T. Historical construction costs of global nuclear power reactors.— Energy Policy, 2016. — V. 91. — p. 371–382.

⁷ Tolley G. S., Jones D. W. The economic future of nuclear power.— Chicago, USA: University of Chicago, 2004. — 38 p.

⁸ Kozeracki J., Vlahoplus C., Scott K. e. a. Pathways to commercial liftoff: advanced nuclear.— Washington DC, USA: DOE, 2023. — 60 p.

Рис. 5. Установленная мощность АЭС в 2050 году при различных сценариях сокращения выбросов CO₂ от электростанций и котельных



Текст: Александр Южанин
Фото: ВНИИНМ

Материалы будущего

Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А. А. Бочвара занимается разработками для инновационных ядерных реакторов нового поколения

Стратегия развития двухкомпонентной платформы ядерной энергетики в России включает задачи по дальнейшему совершенствованию технологий реакторов как на тепловых, так и на быстрых нейтронах, в том числе для создания ядерных энергетических систем четвертого поколения с замыканием ЯТЦ. Характеристик современных материалов, которые используются

в реакторах поколения III+, недостаточно для выполнения более высоких требований, определенных для реакторов четвертого поколения. Какие кандидатные материалы для таких реакторов сегодня разрабатываются и в чем их отличие и преимущество перед существующими материалами, «Вестнику атомпрома» рассказали специалисты АО «ВНИИНМ».

Дисперсно-упрочненные оксидами стали



Дисперсно-упрочненные оксидами стали (ДУО-стали) выбраны кандидатными материалами для быстрых реакторов четвертого поколения со свинцовым и натриевым теплоносителями. Об особенностях этих сталей, их разработке и причинах, по которым их выбрали в качестве кандидатных материалов, рассказала ведущий эксперт АО «ВНИИНМ» Анастасия Никитина.

— Мы занимаемся материалами для быстрых реакторов со свинцовым и натриевым теплоносителями. До 2030 года планируется пуск свинцового экспериментального реактора БРЕСТ-300, после чего на основе проведенных исследований будет построен коммерческий реактор четвертого поколения БР-1200. Второй планируемый к постройке реактор четвертого поколения — это натриевый БН-1200. От своих предшественников они отличаются более высокими температурными и радиационными параметрами, повышенной экологической безопасностью и эксплуатационной эффективностью. Следовательно, необходимы материалы, которые смогут обеспечить требуемые характеристики.

Сердце реактора — это активная зона, в которой размещаются ТВС с тепловыделяющими элементами (ТВЭлами). Что использовать в качестве материала для оболочек ТВЭлов? В современных натриевых реакторах используются аустенитные стали (ЧС-68, ЭК-164). Однако аустенитные стали по своей природе имеют склонность к радиационному распуханию,

и при приближении к повреждающим дозам 110–120 сна их безопасная эксплуатация существенно снижена. Среди преимуществ этих сталей отметим их высокую жаропрочность. Обратная ситуация со сталями ферритно-мартенситного класса. Они не распухают, не испытывают значительного формоизменения, но обладают недостаточной жаропрочностью при температурах свыше 650 °С.

Для реакторов БР-1200 и БН-1200 конструкторы задают требования для промышленной эксплуатации активной зоны реактора, предполагающей температуру свыше 700 °С, максимально повреждающую радиационную дозу до 210 сна, что требует реализации максимальных ресурсов при эксплуатации ТВЭла. Например, в БН-600 ТВЭлы работают 4 года, тогда как ресурс ТВЭла БР-1200 запланирован на срок свыше 10 лет. На сегодняшний день ни один из существующих конструктивных материалов такие дозовые, ресурсные нагрузки не выдерживает.

Такие высокие характеристики заложены конструкторами для достижения наиболее высокой экономической эффективности реакторов четвертого поколения. Исходя из этих требований возник проект разработки кандидатных материалов для оболочек ТВЭлов. Изначально в нем было несколько наименований. Во-первых, усовершенствованные ферритно-мартенситные стали. Но даже после усовершенствования химического состава и технологии переработки температура их эксплуатации ограничена 670 °С. Аустенитные стали распухают, поэтому не рассматриваются для указанных параметров. Затем основными кандидатными материалами стали ванадий и дисперсно-упрочненные

Лаборатория контроля качества и исследований ядерных материалов ВНИИНМ

оксидами стали. Сначала активно исследовали ванадий. Но у него есть два существенных недостатка, которые, на мой взгляд, не позволяют его использовать для реакторов четвертого поколения. Первый недостаток — низкая коррозионная стойкость. Ванадий вытягивает из теплоносителей все газовые примеси и затем разрушается. Мы ставили экспериментальные ТВЭлы с ванадиевыми оболочками в исследовательский реактор БОР-60, и они не выдержали долгого облучения. Второй ключевой недостаток заключается в том, что запасы ванадия на земле невелики, и, как следствие, он очень дорогой. Ванадий жаропрочный, технологичный, но его обязательно надо чем-то защищать. Как вариант ранее предлагалась технология триплекс, то есть труба из стали, труба из ванадия и сверху снова труба из стали. Такой композит имеет много технологических сложностей.

В итоге работы по ванадию прекратили, и на сегодняшний день остается один адекватный кандидатный материал — дисперсно-упрочненные оксидами стали, которыми мы занимаемся уже более 10 лет. В ферритно-мартенситную сталь добавляются оксиды иттрия, речь идет о дисперсных наночастицах размером несколько нанометров, за счет чего мы получаем многократное повышение длительной прочности (жаропрочности) ферритно-мартенситных сталей. Таким образом, сохраняются свойства нераспухающего материала, который может работать до температуры 750 °С.

Во ВНИИНМ есть лабораторные технологии по производству этих сталей. Это порошковая технология. В чем ее суть? Мы берем матричную сталь, которая обеспечивает механические характеристики и радиационную стойкость, и распыляем ее в дисперсный порошок. Затем этот порошок засыпаем в вибрационную мельницу, добавляем нанопорошок оксида иттрия, проводим механическое легирование. В результате полученный сплав вбирает в себя все преимущества матричной стали.

На мой взгляд, сегодня дисперсно-упрочненные оксидами стали — это единственное перспективное направление по созданию материалов для натриевых и свинцовых реакторов четвертого поколения. Это работа на перспективу. Мы оптимизировали работу механического легирования, можем делать качественные трубы, но чтобы этот материал обосновать, нужно сделать полномасштабные ТВЭлы. На базе имеющегося во ВНИИНМ оборудования мы не можем сделать достаточное количество труб. Поэтому было принято решение по созданию во ВНИИНМ опытно-промышленного участка по производству труб для ТВЭлов из новой стали. Сегодня идет стадия проектирования. Планируется закупка оборудования для распыления порошков и механического легирования. Мы планируем ввести в эксплуатацию этот участок в 2027 году с производительностью 1 км труб в год.

За рубежом проводятся аналогичные исследования по разработке дисперсно-упрочненных оксидами сталей. В частности, в Китае, в Корее также делается



ставка на разработку и применение дисперсно-упрочненных сталей. Но в других странах нет самого главного — быстрых реакторов, на которых они могут протестировать материалы для оболочек ТВЭлов. По факту сегодня Россия — единственная страна, где есть работающие быстрые реакторы: экспериментальный — БОР-60, два промышленных — БН-600 и БН-800. Поэтому мы имеем все возможности получить уникальные данные по качеству материалов, по радиационной стойкости и другим характеристикам.

ВНИИНМ — единственный институт, который имеет рабочую технологию на лабораторном уровне, которая продемонстрировала высокий уровень механических и других характеристик, предъявляемых к материалам для реакторов четвертого поколения. Наша технология годится не только для быстрых реакторов с натриевым и свинцовым теплоносителем, но и для реактора ВВЭР-СКД четвертого поколения (реактор со сверхкритическим давлением). Там тоже можно использовать дисперсно-упрочненные стали на базе «железо — хром — алюминий». Мы можем менять матричную сталь под тип теплоносителя, сохраняя такие характеристики, как высокая коррозионная стойкость в воде, жаропрочность и нераспухание.

Эти разработки ведутся с 2006 года, но сейчас потребность в них стала действительно актуальной: на сегодняшний день понятно, что кроме наших ДУО-сталей для полномасштабной эксплуатации свинцовых и натриевых теплоносителей альтернативы нет. Сегодня проводятся НИОКР и обоснования с использованием лабораторной технологии. В этом году мы должны сделать экспериментальные трубы на базе стали «железо — хром — алюминий» по усовершенствованной технологии. В следующем году планируем изготовить из нее ТВЭлы и поставить на облучение в БОР-60 и в 2027 году получить послереакторные данные. Полномасштабные топливные сборки со СНУП-топливом планируется поставить в БН-600 в 2030 году.

Для БРЕСТА и БН-1200 будет разный матричный материал. Для БРЕСТА сегодня основной конструкционный материал — это сталь ЭП-823. Но у нее много проблем с жаропрочностью и коррозионной стойкостью. Мы предлагаем новые составы — стали, которые гарантированно обеспечивают коррозионную стойкость. Чтобы поднять жаропрочность стали ЭП-823, в нее вводим дисперсно-упрочняющие оксидные частицы.

Для натриевого теплоносителя рекомендуется дисперсно-упрочненная оксидами сталь, но с другой матрицей — ферритно-мартенситной сталью ЭП-450, которая на сегодняшний день используется в качестве чехлов ТВС в БН-600 и БН-800, но она недостаточно жаропрочная. Ее используют как матрицу и формируют на ее основе дисперсно-упрочненную модификацию, то есть мы упрочняем и многократно улучшаем жаропрочные и другие характеристики путем добавления оксида иттрия. Это обеспечит возможность работы при более высоких температурах, повысит радиационную стойкость и увеличит срок топливной кампании для реакторов четвертого поколения.

Карбид кремния



Создание керамических оболочек для твэлов — одно из направлений в разработке толерантного топлива, более устойчивого к авариям, которое в перспективе может обеспечить еще большую безопасность эксплуатации АЭС. Материал, из которого планируется изготавливать оболочки, — карбид кремния. Об уникальности и преимуществах этого материала рассказал главный эксперт АО «ВНИИНМ» Федор Макаров.

— Во ВНИИНМ разрабатывается толерантное топливо, включающее различные типы оболочек для твэлов, в частности циркониевые оболочки, покрытые хромом для повышения коррозионной стойкости, и оболочки на основе стали 42ХНМ. Я занимаюсь третьим направлением — оболочками на основе композиционных материалов, а именно карбида кремния (SiC). Данная технология по своим свойствам хорошо подходит для атомной энергетики из-за таких характеристик, как низкое сечение захвата тепловых нейтронов (ниже, чем у циркония), высокие теплопроводность, термостойкость и радиационная стойкость, низкая активированность, высокая коррозионная стойкость в паре. Тем не менее технологии работы с композиционными материалами у нас развиты хуже, чем с металлами. В России не производятся коммерческие волокна из карбида кремния требуемого для нас качества: всего две-три организации занимаются разработкой SiC-волокна, в том числе АО «Композит» и АО «ГНИИХТЭОС», с которыми мы и сотрудничаем. Созданы опытные

ДМО-сталь ЭП-450 мы предлагаем как кандидатный материал для следующего поколения быстрых реакторов с натриевым теплоносителем.

Перспективы. Главная идея — сделать из БН коммерческий реактор, обеспечить его высокую экономическую эффективность с использованием в качестве топлива элементов ОЯТ реакторов ВВЭР, то есть реализовать ЗЯТЦ и при этом обеспечить коммерческую окупаемость и развить научную составляющую реакторов на быстрых нейтронах. Реакторы четвертого поколения должны обеспечить решение четырех задач: это стабильное производство электроэнергии с минимальным количеством отходов; преимущество в стоимости производимой энергии; исключение возможности запроектных аварий, то есть исключительная безопасность; гарантии соблюдения режима нераспространения. Создание новых материалов — важный шаг на пути к решению этих задач.

образцы определенной длины и состава, но у них имеются недостатки. В частности, химический состав немного не дотягивает до общемировых показателей. Совместно с этими организациями мы работаем над улучшением состава и масштабированием данного направления.

Композиты на основе карбида кремния сейчас активно исследуются на предмет их коррозионной стойкости в условиях работы в реакторе ВВЭР с температурой 360–380 °С под давлением. Также проводятся высокотемпературные испытания до 1200 °С в паре, имитирующие условия проектной аварии. Это микроструктурные исследования, позволяющие лучше изучить свойства композита. Мы провели облучение наших образцов в исследовательском реакторе БОР-60 в АО «ГНЦ НИИАР», где получили первые данные, показывающие, что наши материалы ведут себя достаточно хорошо под облучением и не теряют своих характеристик. Сейчас наша задача — создание герметичной оболочки, позволяющей получить низкое натекание по гелию.

В следующем году мы должны продемонстрировать, что наши оболочки соответствуют всем требованиям по герметичности и прочности. В АО «ВНИИНМ» проводятся работы по моделированию поведения оболочек из карбида кремния в реакторах ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. Мы постоянно получаем новые данные, проводим уточнение характеристик и пополняем созданными нами данными базы данных по этому материалу. После проведения каждого исследования мы понимаем, что именно нужно улучшить в материале,

На фото

Запуск опытно-лабораторного участка по изготовлению герметизированных труб — оболочек твэлов нового поколения на основе карбида кремния — произведен в апреле 2021 года

думаем, как это сделать, и составляем дорожные карты на следующие этапы работы. Следующий этап — испытания оболочек твэлов из SiC уже в действующих реакторах на тепловых нейтронах.

Данные, которые мы получим в результате исследования материала на основе карбида кремния, войдут в основу проектирования тепловыделяющих сборок для реакторов четвертого поколения. В частности, будет понятно, можно ли продолжать использовать существующую конструкцию активной зоны реакторов или придется разрабатывать новую. Сечение захвата тепловых нейтронов в твэлах из карбида кремния ниже, чем у действующих сегодня твэлов из циркониевых сплавов. Это улучшает нейтронно-физические характеристики реактора и позволяет более эффективно использовать топливо, что соответствует требованиям, предъявляемым к реакторам четвертого поколения, — высокой экономической эффективности. Для топлива в этих оболочках, возможно, будет достаточно более низкого обогащения, но этот вопрос требует проведения отдельных исследований, которые покажут, насколько может повыситься степень выгорания топлива в твэлах с оболочками из карбида кремния.

Основное преимущество оболочки из SiC — это высокая безопасность эксплуатации атомных электростанций. В частности, они делают невозможными аварии, подобные той, что была на АЭС «Фукусима». Какая проблема у циркониевых оболочек? При высоких температурах в случае возникновения нештатной ситуации или аварии цирконий нагревается и начинает разлагать воду с образованием водорода, который взрывоопасен. Кинетика при взаимодействии с водой карбида кремния очень низкая, и процессы, которые происходят с цирконием, физически невозможны.



Перспективы. Оболочки из SiC обеспечивают одно из главных требований, предъявляемых к реакторам четвертого поколения, — высокую безопасность. Твэлы с такими оболочками могут использоваться как в уже действующих реакторах типа ВВЭР, так и в активных зонах новых реакторов четвертого поколения. Оболочки из карбида кремния — это будущее атомной энергетики.

Малоактивируемые сплавы ванадия для энергетических термоядерных и быстрых ядерных реакторов

Энергетические термоядерные (ТЯР) и быстрые ядерные реакторы (БР) являются важной частью мировой ядерной энергетики, делая ее практически возобновляемым источником энергии. Конструкционные материалы (КМ) определяют работоспособность энергетических реакторов (режимы и длительности топливных кампаний, экономическую эффективность). Перспективными КМ являются малоактивируемые сплавы ванадия. Мировая координация работ по разработке и применению малоактивируемых сплавов ванадия для ТЯР осуществляется специальной рабочей группой Международного энергетического агентства (МЭА).

О малоактивируемых сплавах ванадия для ядерного применения рассказал Вячеслав Чернов — главный научный сотрудник АО «ВНИИНМ», сопредседатель рабочей группы по разработке малоактивируемых сплавов ванадия для ТЯР МЭА (сопредседатели — представители США и России).



— Малоактивируемые КМ (МАКМ) безальтернативны для ТЯР и перспективны для быстрых реакторов нового поколения (БР-4) с реализацией полного замкнутого ядерного топливного цикла (рефабрикация облученных топливных и конструкционных материалов за исторически короткое время после облучения). В значительной мере проблемы выбора



На фото

Вакуумно-дуговая печь предназначена в том числе для изготовления слитков из различных сплавов

и создания МАКМ определены. МАКМ являются продуктом высоких металлургических технологий. Такие сплавы должны иметь минимальные технологические концентрации сильно и длительно активируемых элементов (N, Nb, Mo, Ni, Co, Cu, Al). Создаваемые МАКМ по своим физико-механическим свойствам не должны уступать созданным обычным КМ (сильно и длительно радиоактивным сталям и сплавам с захоронением после облучения на тысячулетия) и должны существенно превосходить их по ядерно-физическим свойствам (меньшее поглощение нейтронов, меньшая и быстро спадающая радиоактивность, рефабрикация после облучения для повторного использования за время менее 100 лет).

Требованиям действующих БР-3 (БН-600, БН-800) и планируемых демонстрационных ТЯР (ДЕМО-ТЯР) с длительностями топливных кампаний до трех лет и радиационными повреждаемостями КМ до 100 сна удовлетворяют созданные МАКМ-3 (ферритно-мартенситные хромистые стали, сплав ванадия V-4Ti-4Cr).

Для создаваемых БР-4 (БРЕСТ-300, БН-1200, БР-1200) и ТЯР определены более высокие требования (относительно БР-3 и ДЕМО-ТЯР). Эти требования включают длительности топливных кампаний 5+ лет, радиационные повреждаемости КМ 200+ сна, повышение экономической эффективности (более эффективное использование топлива, более широкие температурные интервалы эксплуатации), уменьшение уровня радиационного воздействия на окружающую среду, минимизацию количества РАО и объемов работ, связанных с долгосрочным обращением с РАО,

исключение необходимости глубинного геологического захоронения радиоактивных материалов, меньшие затраты природных ресурсов, технологическое усиление принципа нераспространения. Обеспечить такие требования можно только МАКМ нового поколения (МАКМ-4). Удовлетворить таким требованиям всеми видами аустенитных и ферритно-мартенситных сталей, включая их ДУО-модификации, проблематично. Необходима разработка МАКМ-4 на основе тугоплавких металлов (перспективны многокомпонентные сплавы ванадия). Определяющее значение имеют хладноломкость и жаропрочность создаваемых КМ, определяющие длительности топливных кампаний и температурные интервалы эксплуатации реакторов.

Наиболее трудной задачей является повышение жаропрочности КМ. Жаропрочность КМ определяется свойствами матричного металла (тугоплавкость) и твердорастворными концентрациями матричного элемента и легирующих элементов. Свойства КМ при низких и высоких температурах определяются и контролируются различными механизмами. Факторы прочности КМ при низких температурах могут быть факторами их разупрочнения при высоких температурах. К определяющему фактору «композиционный состав — жаропрочность» в условиях реакторного облучения добавляется фактор «равновесие (состояние) микроструктуры — жаропрочность». Состояния (уровни равновесности) структуры и свойства КМ в условиях «до/после» (квазиравновесные состояния) и «в процессе» (динамические состояния) облучения существенно различны. Сохранение (удержание от распада) твердорастворных состояний КМ-4 является определяющей материаловедческой задачей. Важной задачей является необходимость повышения температуры рекристаллизации создаваемых КМ.

Перспективы. Обоснованно перспективными МАКМ-4 для БР-4 и ТЯР являются жаропрочные и с уменьшенной (практически подавленной) хладноломкостью наноструктурированные многокомпонентные сплавы ванадия системы V-Cr-W-Ta-Zr-C-O с оптимизированной концентрацией композиционных составов (легирующих элементов, O, C, N). Мировой конкурентоспособный уровень работ по созданию таких сплавов ванадия имеет Россия (АО «ВНИИНМ», промышленность). Такие сплавы обоснованно безальтернативны и перспективны для крупномасштабной ядерной и термоядерной энергетики с реализацией полного замкнутого ядерного топливного цикла, конкурентоспособной экономической эффективностью, существенным уменьшением радиационного влияния на окружающую среду и другими требованиями. Задача по созданию малоактивируемых сплавов ванадия нового поколения для ТЯР и БР-4 является обоснованной и развивающейся мировой перспективой. Такой прогресс неизбежен.

Атом — миру

Участникам 68-й сессии Генеральной конференции МАГАТЭ продемонстрированы достижения российской атомной отрасли

Делегация Российской Федерации приняла участие в 68-й сессии Генеральной конференции Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), состоявшейся с 16 по 20 сентября 2024 года в Вене. Возглавил делегацию генеральный директор госкорпорации «Росатом» Алексей Лихачев, в ее состав также вошли руководитель Ростехнадзора Александр Трембицкий и постоянный представитель Российской Федерации при международных организациях в Вене Михаил Ульянов.

Генеральная конференция МАГАТЭ — высший руководящий орган организации, который собирается ежегодно для обсуждения ключевых вопросов в области ядерной безопасности, нераспространения и мирного использования атомной энергии. Конференция проводится в штаб-квартире МАГАТЭ в Вене. В Генконференции принимают участие все государства — члены МАГАТЭ, международные организации и представители различных отраслей.

В выступлении на пленарном заседании Генеральной конференции глава Росатома Алексей Лихачев заявил о последовательной поддержке Российской Федерацией деятельности МАГАТЭ. Он также обозначил две темы, которые будут определять будущее атомной энергетики в горизонте XXI века, — замыкание ядерного топливного цикла и малые модульные реакторы. Оба эти направления успешно реализуются в России.

Сразу после открытия Генеральной конференции МАГАТЭ Алексей Лихачев встретился с генеральным директором агентства Рафаэлем Гросси. Основное внимание, как и на всех последних переговорах, было уделено обеспечению безопасности ядерных объектов. Эту задачу обе стороны рассматривают как абсолютный приоритет.

«На полях» конференции генеральный директор госкорпорации «Росатом» провел переговоры с рядом ключевых иностранных партнеров. С венгерскими, индийскими и иранскими коллегами Алексей Лихачев обсудил весь комплекс вопросов, связанных с сооружением в этих странах атомных станций российского дизайна.

С директором агентства «Узатом» состоялся обстоятельный разговор о ходе работ по строительству

в Узбекистане АЭС малой мощности. Договоренность о ее сооружении — первый в мире экспортный контракт на малую атомную станцию — была заключена в мае этого года.

С иракскими и казахстанскими партнерами Алексей Лихачев обсудил перспективы расширения сотрудничества. В частности, с Комиссией по атомной энергии Республики Ирак был подписан Меморандум о взаимопонимании по сотрудничеству в области использования атомной энергии. Всего же в ходе Генеральной конференции МАГАТЭ члены российской межведомственной делегации провели встречи с представителями более чем 30 стран из профильных министерств, ядерных регуляторов и крупнейших атомных компаний.

В развитие тем, поднятых Алексеем Лихачевым в выступлении на пленарной сессии, госкорпорация «Росатом» организовала ряд мероприятий «на полях» Генеральной конференции МАГАТЭ. Участники круглого стола «Инновационные ядерные энергетические системы с замкнутым топливным циклом» обсудили потенциал таких систем в обеспечении безопасного, экономически эффективного и экологичного развития атомной энергетики. На сессии «Устойчивый ядерный топливный цикл: инновации для долгосрочного успеха» были представлены новейшие разработки в области обращения с отработавшим топливом и радиоактивными отходами. На круглом столе «Малые и микро-реакторы: потенциал для декарбонизации промышленности» состоялся обмен мнениями о перспективах малой атомной энергетики и ее роли в достижении целей устойчивого развития. Также силами Росатома были организованы слайд-ивенты по научной и кадровой тематике.

На традиционном выставочном стенде были представлены интерактивные презентации о российской атомной отрасли. В частности, участники конференции могли ознакомиться с атомными технологиями будущего — строящимся в рамках проекта «Прорыв» энергетическим комплексом с реактором на быстрых нейтронах и пристанционным замкнутым ядерным топливным циклом. Это комплексное решение, которое позволит многократно использовать отработавшее ядерное топливо.

На Генеральной конференции МАГАТЭ Россия подтвердила свою готовность к дальнейшему сотрудничеству с зарубежными партнерами и укреплению международных связей в области мирного использования атомной энергии.



Текст: Екатерина Артеменкова, старший консультант группы «Аналитика в энергетике» Kept
Фото: Kept, Ростовская АЭС, Unsplash, Wikipedia / Басир Меджинов

Связанные одной сетью

Как устроена электроэнергетическая система России

Электроэнергетика — критически важная отрасль, характеризующаяся непрерывностью процессов генерации, передачи и потребления энергии и составляющая основу экономического развития любой страны. Стабильное и надежное функционирование этого комплекса, за которым стоят сложные организационные и технические процессы, в конечном итоге определяет благосостояние всего населения. В статье рассматриваются различные аспекты электроэнергетики, начиная с исторических основ формирования энергосистемы нашей страны и основных принципов ее функционирования. Понимание истоков и принципов, лежащих в основе электроэнергетической инфраструктуры, позволит глубже осознать современные вызовы, пути их преодоления и перспективы данной области.

Единая электроэнергетическая система России (ЕЭС) — самый сложный комплекс, в котором функционирующие объекты электроэнергетики (электростанции, линии электропередачи, электроприемники, устройства преобразования, управления, регулирования и защиты) объединены общим режимом и непрерывным процессом производства, передачи и потребления электрической энергии.

Основопологающие технические характеристики энергосистемы нашей страны, такие как частота 50 Гц и трехфазная электропередача на переменном токе, были установлены более ста лет назад и обусловлены как развитием электротехнической отрасли, так и историческими событиями. А концептуальные основы, согласно которым осуществлялась электрификация территорий, заложенные в плане ГОЭЛРО, по сей день определяют схему и инфраструктурный каркас энергосистемы России и стран постсоветского пространства.

Перед электроэнергетикой России стоит широкий спектр задач, включая обновление и модернизацию

инфраструктуры, удовлетворение растущего спроса на электроэнергию, адаптацию методов и подходов к развитию, а также решение вопросов «интеллектуализации», энергетического перехода, экологических и климатических вызовов. Эти задачи требуют внимательного и скоординированного подхода к их решению, инициирования разработки и разумного использования передовых технологий, направленных на улучшение функционирования энергосистемы, повышение ее эффективности и надежности.

Коротко

Электроэнергетика является ключевой отраслью, обладающей рядом уникальных характеристик, которые отличают ее от других секторов экономики. Первая особенность — одновременность и непрерывность процессов генерации, передачи и потребления, что делает систему единым механизмом и обуславливает невозможность накопить электроэнергию в промышленных масштабах. Вторая особенность — быстрота переходных процессов в системе. Волновые процессы происходят за тысячные или миллионные доли секунды, а процессы, связанные с включениями и отключениями или короткими замыканиями, совершаются в течение долей секунд или нескольких секунд. Третья особенность — тесная связь электроэнергетики с другими отраслями промышленности, транспортом, связью, что обуславливает высокие требования к готовности энергосистемы обеспечить в любой момент времени потребности всех связанных с ней отраслей.

На фото

Ростовская АЭС. Концерн «Росэнергоатом» — оператор российских АЭС — является крупнейшей генерирующей компанией в РФ



Генерирующий комплекс

Каждой электростанции, а точнее каждому типу, в энергосистеме отводится своя роль, которая зависит от технических возможностей и особенностей станции.

Большее распространение (в настоящее время — 66% в структуре установленных мощностей электростанций в ЕЭС) получили **теплоэлектростанции (ТЭС)**, использующие для производства электроэнергии тепло, выделяемое при сгорании органического топлива, такого как газ, уголь, а ранее — мазут и торф. Несмотря на то, что нефть — более калорийный вид топлива (теплота сгорания 1 кг каменного угля оценивается в 4000–7000 ккал, а 1 кг нефти дает 10000 ккал), исторически ей не была отведена роль ведущего источника энергии для электростанций: нефть являлась более ценным исходным материалом для промышленности, а также источником поступления валюты. Топливная структура выработки ТЭС различается по регионам: в западной части России около 93% от общей мощности ТЭС составляют газовые станции, в восточной части примерно 88% занимают угольные станции. Это отражает региональные особенности доступности топливных ресурсов и экономические условия использования различных видов топлива.

Теплоэлектростанции, в зависимости от их типа, выполняют две основные функции: производство электроэнергии и снабжение технологическим паром и горячей водой промышленных предприятий и жилых районов. Есть электростанции, производящие только электрическую энергию. Их расположение обусловлено либо близостью к месту добычи ресурса, либо близостью к районам потребления энергии. **Теплоэлектроцентрали (ТЭЦ)** производят и элек-

тричество, и тепло, что делает их важным элементом системы отопления и горячего водоснабжения в городах и на предприятиях. Именно это вынуждает располагать ТЭЦ рядом с потребителями, поскольку передача тепла, в отличие от электроэнергии, возможна только на небольшие расстояния (порядка 30 км) из-за существенных потерь при передаче, проще говоря из-за остывания воды. Для снабжения топливом такие станции соединяются с местами добычи ресурса с помощью железнодорожных или газопроводных сетей.

Гидроэлектростанции в генерирующем комплексе составляют 20% установленных мощностей и вырабатывают до 17% от всей производимой электроэнергии. Строительство мощных ГЭС, себестоимость производства электроэнергии на которых в три-шесть раз меньше, чем на ТЭС, придало значительный импульс развитию металлургической промышленности, в частности, использующей энергоемкие технологии, такие как электропечь и электролиз. Взглянув на карту размещения крупнейших ГЭС, мы можем видеть находящегося рядом якорного энергоемкого потребителя, например алюминиевый завод.

Гидроэлектростанциям, обладающим лучшими маневренными характеристиками, отводится особая ответственная роль в обеспечении надежной и устойчивой работы системы: незамедлительное реагирование на любые аварийные события или изменения нагрузки, приводящие к отклонению частоты в энергосистеме даже на сотые доли герц, и возвращение ее обратно к 50 Гц. **Гидроаккумулирующие (ГАЭС)** — отдельный подвид гидроэлектростанций — обеспечивают сглаживание неравномерностей графика нагрузки в течение суток и за счет своего комби-

нированного технологического цикла («генераторный — насосный» режимы, или «выработка — потребление») аккумулируют, накапливают энергию в энергосистеме.

Второй важной функцией ГЭС является рационализация потребления и сбережение ископаемых природных ресурсов. Не каждому известен тот факт, что еще недавно, примерно 70 лет назад, наша страна переживала хронический дефицит органического топлива, несмотря на кажущееся его изобилие, а еще ранее испытывала серьезную зависимость от импортных поставок угля из европейских стран, таких как Германия и Великобритания.

Нужно отметить, что в нашей стране ряд мощных гидроэлектростанций, а точнее каскадов ГЭС, имеет серьезное социально-экономическое значение и является неотъемлемой частью водных речных путей, что накладывает сложнейшие неэнергетические требования к электрическим режимам работы и загрузке станций.

Грандиозные перспективы производства электроэнергии открыла **атомная энергетика**, которая вывела на новую ступень электрификацию и индустриализацию нашей страны. В настоящее время атомная генерация составляет 12% установленных мощностей электростанций энергосистемы, вырабатывая при этом около 20% от всего производимого электричества. Ввод в работу атомных станций в период 1970-х — середины 1980-х годов позволил качественно совершенствовать структуру топливно-энергетического баланса. Сегодня атомная генерация выполняет важную роль в обеспечении выработки базовых объемов электроэнергии, тем самым снижая (замещая) использование ископаемого топлива и облегчая решение этой же задачи ГЭС, позволяя последним запасать воду в водохранилищах для выполнения регулирующей функции.

Благодаря совершенствованию технологий на протяжении последних 20 лет в мире происходит развитие электростанций на альтернативных, **возобновляемых источниках энергии**: солнечной, ветровой, геотермальной, энергии морских волн, приливов океанов, биомассы (древесины, торфа, древесного угля, сахарного тростника и др.). В ЕЭС получили более активное распространение солнечные и ветровые электростанции, сейчас они составляют почти 2% установленных мощностей электростанций ЕЭС, вырабатывая менее 1% всей производимой электроэнергии.



Сетевой комплекс: передача и распределение

В любой момент времени в энергосистеме генерируется на электростанциях ровно столько электроэнергии, сколько необходимо для покрытия спроса потребителей. Критерием данного непрерывного процесса является баланс между генерируемой и потребляемой мощностью, ключевым показателем — частота 50 Гц, а связующим элементом — электропередача.

Центры потребления электрической энергии не всегда расположены вблизи электростанций и, более того, распределены на значительной территории. Выбор оптимального размещения электростанций определяется путем проведения технико-экономического анализа, в котором основными являются топливный и потребительский факторы, при этом важнейшими параметрами в вопросе передачи мощности являются передаваемая мощность, протяженность линии и потери при передаче.

Совершенствование и развитие электропередачи осуществлялось по пути увеличения номинального напряжения, а не за счет увеличения тока в линии. Выбор именно такого направления исходит из чисто экономических соображений: увеличение тока приводит к увеличению сечения проводника или большему числу параллельных цепей в передаче, что влечет кратное возрастание расходов на цветной металл, при этом увеличение напряжения приводит к возрастанию затрат на черный металл для опор и изоляцию (при сопоставлении затрат это является выгодным решением). Как правило, удвоение напряжения в линии увеличивает ее пропускную способность в три-четыре раза. К примеру, одна цепь ЛЭП напряжением 330 кВ может передать мощность примерно 450 МВт, 500 кВ — порядка 1300 МВт, а вот ЛЭП сверхвысокого напряжения 1150 кВ — 6000 МВт. Очевидно, что для того, чтобы передавать мощность

6000 МВт, необходимо построить 13 цепей 330 кВ, что при строительстве приведет к кратному росту затрат. Для сравнения, пропускная способность ЛЭП постоянного тока напряжением ±300 кВ составляет 1000 МВт, ±500 кВ — 4000 МВт. Передача постоянного тока имеет меньшие по сравнению с линиями переменного тока затраты при равных условиях надежности в случае превышения некоторой длины линии. Оценивается, что критическое значение длины линии, при котором вложения в электропередачу на переменном и постоянном токе становятся равными, составляет 400–700 км.

Максимальный допустимый переток по электропередаче в энергосистеме определяется критериями токовой нагрузки линии, напряжением, устойчивостью, а также наличием устройств противоаварийного управления, предотвращающих развитие аварийного режима работы.

Современные энергосистемы, в частности ЕЭС, обладают сложной структурой, конфигурацией, многоступенчатостью электрической сети. Повышение или понижение напряжения происходит обычно несколькими ступенями. Каждой ступени напряжения соответствует своя сеть линий электропередачи и электрических подстанций, через которые электроэнергия поступает в сеть следующей ступени напряжения.

Коротко

Благодаря трудам российского электротехника Михаила Осиповича Доливо-Добровольского, который является не просто создателем техники переменного тока, а создателем всей цепочки «генерация — трансформация — передача — потребление» на трехфазном переменном токе, появилась возможность передавать энергию на значительные расстояния, что определило выбор переменного тока в дальнейшем использовании. Однако стоит отметить, что ставка на переменный ток не отменяла развитие систем передачи на постоянном токе. Наши лучшие инженеры и ученые, работающие в ведущих институтах страны, таких как Всероссийский электротехнический институт (сейчас РФЯЦ-ВНИИТФ) и Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения (НИИПТ), продолжили трудиться над совершенствованием технологий постоянного тока, опережая мировое развитие на десятки лет.

Основу системы передачи электрической энергии от электростанций до крупных потребителей или распределительных узлов (подстанций) составляет системообразующая сеть. Она создает «каркас» энергосистемы, обеспечивает транзит больших объемов мощности, а также объединяет различные энергосистемы между собой. Исторически в энергосистеме России такая сеть представлена системой номинальных напряжений 220–500 кВ в восточной части ЕЭС и 220–330–500–750 кВ — в западной части ЕЭС. Основное требование, предъявляемое к таким сетям, — обеспечение надежной и устойчивой работы в нормальных и аварийных режимах.

Основу системы передачи мощности от небольших станций, распределение между подстанциями 110–35–10–6 кВ и доставку электроэнергии от центров питания до потребителей составляют распределительные сети. В основном распределительные функции возлагаются на сети 110 кВ и ниже, однако такое деление на базе номинального напряжения довольно условно, так как в отдельных энергосистемах (из-за большого охвата территорий и наличия крупных энергоемких потребителей) задача распределения мощности переходит к сетям высшего класса напряжения. Сложная, разветвленная и многоступенчатая конфигурация распределительных сетей позволяет обеспечивать надежную доставку мощности до потребителей, удаленных на значительные расстояния от узловых центров питания.

Потребитель: замыкающее звено

Замыкающим звеном в цепочке поставки электроэнергии являются потребители. За каждым потребителем стоит определенный технологический процесс преобразования электрической энергии в другой вид — механическую, тепловую, химическую, световую,

Цифры

Магистральный электросетевой комплекс России:

> 130 тыс. км

воздушных и кабельных линий электропередачи напряжением 220–1150 кВ

> 810

трансформаторных подстанций

звуковую. Электроэнергия, доставляемая до этих преобразователей-потребителей, должна соответствовать требованиям или нормам качества, обеспечивающим их бесперебойную и стабильную работу. На первый взгляд может показаться, что нарушение этих норм сказывается только на работе локальных потребителей: приводит к снижению их производительности, отключению или в худшем случае повреждению электроустановки. Но на самом деле несоблюдение этих требований приводит к ухудшению работы всех потребителей в энергосистеме, включая электроустановки, которые являются непосредственными участниками технологического процесса выработки энергии на электростанциях. Цикл замыкается, и возникает лавинообразный процесс нарушения баланса в цепочке «генерация — передача — потребление», приводя к погашению всей энергосистемы. Таким образом, потребитель предъявляет технические требования к энергоснабжению, начиная с процессов выработки электроэнергии и ее передачи, такие как бесперебойность, надежность и обеспечение качества.

Многочисленный ряд особенностей, параметров и взаимосвязей формирует задачу управления режимом работы энергосистемы, которую концептуально можно разделить на два этапа — планирование и управление в режиме реального времени.

Планирование режима: прогноз и баланс

Планирование режимов работы электростанций и сетей имеет два временных уровня: долгосрочное и краткосрочное планирование. Ключевой задачей планирования является прогнозирование и формирование режима, сбалансированного по потреблению и нагрузке электростанций с учетом межсистемных перетоков, сезонных, технических и технологических ограничений генерации, ремонтов сети и оборудования, допустимых перетоков по электропередачам. Для обеспечения надежного электроснабжения и функционирования энергосистемы при колебаниях

Цифры

Распределительный сетевой комплекс России:

> 2 млн км

линий электропередачи

> 490 тыс.

трансформаторных подстанций

нагрузки, выбытии генерирующих мощностей, отключении потребителей также планируются резервы мощности. Очевидный факт: чем крупнее блоки в энергетической системе, чем больше станций с переменной выработкой электроэнергии (ВИЭ), тем больше объемы требуемых резервов в системе. Спланированный режим должен обеспечиваться минимизацией суммарных затрат для покупателей электроэнергии.

Участие станции в балансе определяется ее техническими, режимными и экономическими возможностями или ролью станции в системе, о которой мы говорили ранее. График нагрузки имеет три зоны: базовая, полупиковая и пиковая. В базу графика помещается АЭС, режим которой в течение суток, недели и месяца менять обычно нежелательно (в силу различных, в том числе экономических, причин), хотя у современных энергоблоков с реакторами ВВЭР такая возможность есть. Также в базу графика размещается вынужденная мощность ГЭС, которая обусловлена условиями водохозяйственного комплекса, и теплофикационная мощность ТЭС, определенная требованиями тепловых потребителей. После формирования обязательной мощности баланс составляется из генерации по критериям экономичности — от дешевой к более дорогой. При этом ГЭС работает в пике нагрузки и ведет регулирование мощности, сглаживая графики режимов работы тепловых и атомных станций, повышая их надежность и экономичность, а также балансируя режим при выработке мощности солнечными и ветровыми станциями.

Управление режимом: реагировать без промедления

Управление режимами работы энергосистем осуществляется диспетчерским и оперативным персоналом, а также системами и устройствами противоаварийной и режимной автоматики. Быстрота переходных процессов устанавливает требования к организации автоматического управления без участия человека, настройка и алгоритмы которого определяются в большей части заранее, для обеспечения требуемых параметров режима работы, незамедлительного выявления и ликвидации нарушений.

Диспетчерский персонал контролирует нагрузку электростанций, перетоки по линиям электропередачи, регулирует частоту тока и напряжение на шинах энергообъектов, осуществляет переключения в электроустановках дистанционным способом или посредством отдачи команд, разрешений оперативному персоналу, непосредственно управляющему электроустановками на объекте. При возникновении аварийной ситуации, приводящей к выходу за допустимые пределы параметров электрического режима (частоты, мощности, тока, напряжения), задачей персонала становится ликвидация аварийной ситуации и восстановление нормального режима в минимально возможный срок. Ликвидация аварий в энергосистеме — сложнейшая задача. В минимальное время диспетчер должен определить причину и последствия

нарушений и на базе тысяч сигналов, поступивших в информационный комплекс, и сообщений от оперативного персонала с места аварии принять верное решение о дальнейших действиях.

«Умные сети»: естественная эволюция ЕЭС

С развитием энергетической системы, увеличением мощности потребителей и электростанций, а также усложнением конфигурации электрической сети становится очевидно, что планирование режимов и их управление требует совершенствования средств автоматизации процессов и повышения их эффективности.

Особую популярность это направление приобрело в России при запуске процессов цифровизации экономики и промышленности, в значительной мере пересекающихся с программами Smart Grid (что можно перевести как «Умные сети», «Интеллектуальная электроэнергетическая система с активно-адаптивной сетью»). При этом отсутствие единого и однозначного трактования термина Smart Grid, не отражающего его первоначальную сущность (внедрение контроллеров, предназначенных для управления режимом работы и синхронизации автономных ветрогенераторов), позволило распространить подход «интеллектуальности» на все

Коротко

Цифровые технологии и механизмы автоматизированного управления энергетическим режимом совсем не новые направления для ЕЭС России. Первая аналоговая централизованная система автоматического регулирования частоты и перетоков активной мощности (ЦС АРЧМ) была введена в эксплуатацию еще в 1973 году. Данная система обеспечивала автоматизацию регулирования частоты в энергосистеме, контроль и ограничение перетоков активной мощности по основным электрическим связям 500 кВ в центральной зоне ЕЭС. В 1980 году была введена в эксплуатацию цифровая центральная координирующая система АРЧМ. Развитие систем автоматического противоаварийного и режимного управления являлось естественным процессом эволюции нашей энергосистемы, вызванной технологической необходимостью эффективного управления и надежной работы территориально протяженной ЕЭС.

элементы электроэнергетики и затронуть даже экологические аспекты. Концепция «умной сети» предполагает активное участие в процессах выработки, передачи и распределения электроэнергии всех участников цепочки поставки. Используя современные информационные, цифровые и коммуникационные технологии, оборудование энергосистемы взаимодействует друг с другом, управляется автоматизированной системой на базе анализа поступающей информации от объектов. Результатом такого подхода является оптимальное функционирование энергосистемы во всех режимах работы, снижение затрат, повышение надежности, эффективности и экономичности работы энергосистемы.

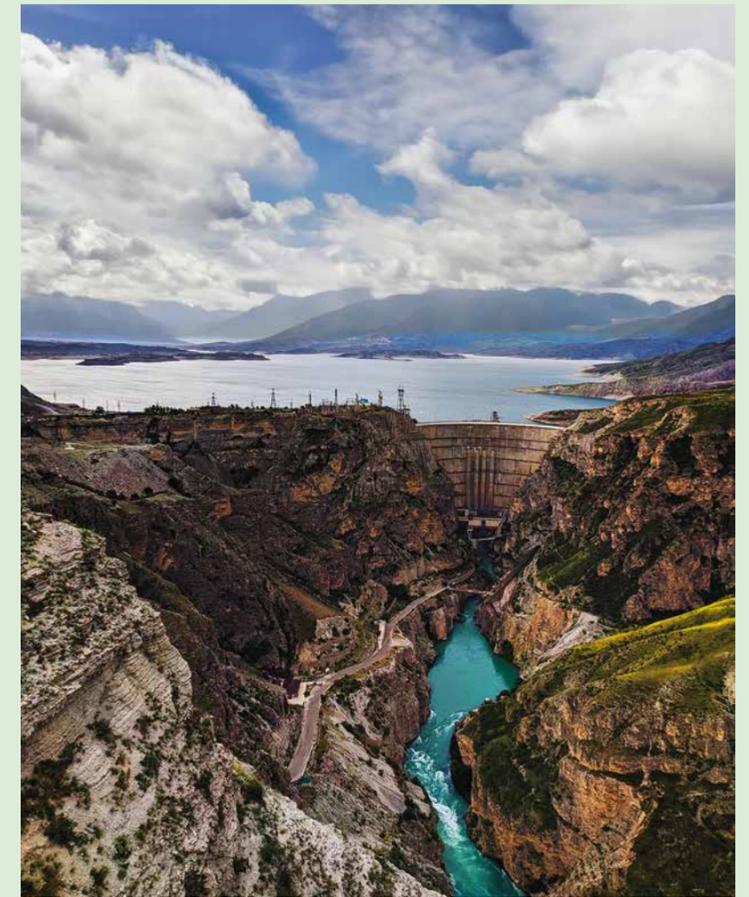
Стоит отметить, что идеология «умной сети» формирует предпосылки к созданию комплексного эффекта для энергосистемы, и распределение долей этих эффектов между участниками может быть сильно неравномерным. В рамках текущей организационной структуры электроэнергетики в России компании готовы развивать подходы «умной сети» для повышения эффективности собственных процессов. Однако перед непосредственной «интеллектуализацией» всей ЕЭС стоит сложный процесс формирования методологии и нормативов, а также их принятия всеми участниками цепочки поставки.

С появлением и развитием технологий искусственного интеллекта (ИИ) все активнее обсуждается его возможное применение в электроэнергетике для повышения качества планирования, эффективности, снижения затрат на производство и распределение энергии. Использование обучаемых нейронных сетей для анализа и обработки данных, а также для выполнения рутинных задач значительно уменьшает трудозатраты и минимизирует влияние человеческого фактора. Такое применение ИИ оправданно и может существенно повысить эффективность ряда процессов в энергосистеме. Тем не менее делегирование полномочий по принятию решений и ответственности за них в критически значимых процедурах сопряжено со значительными опасностями, даже если система обеспечена мерами кибербезопасности.

Прогресс в области электроники, коммуникационных технологий, а также алгоритмов обработки и поиска информации сегодня позволяет внедрять все более автоматизированные системы управления, контроля и учета. Реализация масштабных проектов по созданию «умных сетей», подобных тем, что разрабатываются в Европе, Китае или США, требует значительных инвестиций. В России же целесообразно поэтапно развивать концепцию «умной сети», отдавая приоритет модернизации устаревших активов и повышению энергетической безопасности, не забывая при этом о кибербезопасности.

Обновление фондов: ключ к надежности

Старение основных фондов остается одной из серьезнейших проблем для энергосистемы России. Период с 1960 по 1990 год стал временем интенсивного



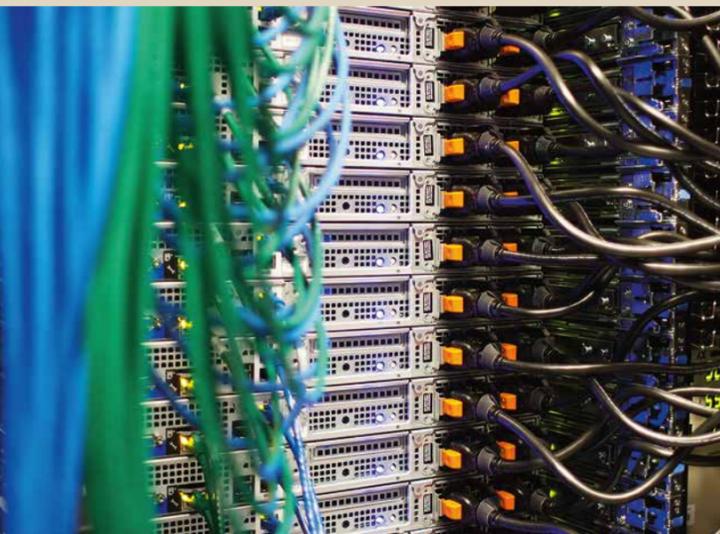
ввода новых энергетических мощностей (от 2 до 8 ГВт ежегодно). В дальнейшем принимаемые программы модернизации значительно обновили парк генерации: в рамках программы ДПМ было модернизировано около 30 ГВт, а программа КОММод, рассчитанная до 2031 года, предполагает обновление еще до 50 ГВт. Однако впереди еще примерно такие же объемы работ.

Системообразующий сетевой комплекс имеет значительный износ: 59% подстанций работают более 25 лет, а 49% линий электропередачи — более 35 лет. Что касается распределительного комплекса, то здесь показатели еще выше: 63% подстанций имеют срок службы свыше 25 лет, а 51% линий электропередачи — более 35 лет. Поэтому состояние электросетей определяет приоритетные направления инвестиционной политики сетевых компаний.

Установленное на объектах основное оборудование изготовлено в основном в 1960–1970-е годы и уступает современным аналогам по техническим характеристикам, требует увеличивающихся с ростом срока службы затрат на техобслуживание и ремонт, а также приводит к нарастанию числа аварий и нарушений в энергосистеме. Отдельный вопрос связан

На фото

Чиркейская ГЭС в Дагестане — самая мощная гидроэлектростанция на Северном Кавказе, основная регулирующая станция в Объединенной энергосистеме Юга России. Введена в эксплуатацию в 1970-х годах



Энергетическая безопасность: приоритет страны

В последние годы во многих регионах России зафиксирован существенный рост спроса на электроэнергию. Это объясняется не только социально-экономическими изменениями, но и активным подключением потребителей нового типа. Особое место среди них занимают центры майнинга криптовалют. Отличительные особенности этих потребителей — их способность распределенно подключаться к разным центрам питания в одном энергорайоне, быстро увеличивать потребляемую мощность и мигрировать между регионами. В результате миграции майнинга (из Китая после его запрета правительством в 2021 году и Казахстана после введения квот) в отдельных регионах России возник дефицит генерирующих и сетевых мощностей, ликвидация которого возможна теперь только за счет строительства новой генерации и не раньше чем через пять-шесть лет. Ожидаемо, что сохранение ситуации хронического дефицита мощности на протяжении такого времени отразится на экономическом развитии этих территорий не в лучшую сторону.

Темпы строительства энергетической инфраструктуры не соответствуют скорости развития майнинговых проектов. С учетом того, что жизненный цикл последних составляет всего два-три года, возникает необходимость пересмотра традиционных методов энергетического планирования. Цель такой корректировки — предотвратить инвестиции в новые энергетические мощности, которые могут оказаться невостребованными в долгосрочной перспективе, или, наоборот, создать условия для привлечения инвестиций от майнингового бизнеса в строительство энергетической инфраструктуры. Это поможет избежать экономических потерь и будет способствовать более эффективному распределению ресурсов в текущей непростой ситуации нашей страны.

с климатическими изменениями: аномалии все чаще оказывают влияние на функционирование сетевого комплекса. Мы можем наблюдать растепление грунта и грозовую активность на арктических территориях, длительную аномальную жару и ледяные дожди в средней и южной полосах России, что значительно усложняет эксплуатацию объектов и режимы работы энергосистемы. Опыт показывает, что режимные ситуации, которые сложились на Дальнем Востоке в прошлом году и в ОЭС Юга в текущем, связанные в том числе как с погодными условиями, так и с аварийностью оборудования, все больше приоритизируют направление обновления энергетической инфраструктуры с учетом новых климатических реалий.

Энергетический переход: развитие ВИЭ

В контексте глобального энергоперехода энергетический сектор и экономика России столкнулись с новыми вызовами и задачами.

Возвращаясь к историческим предпосылкам формирования структуры топливного баланса в нашей энергосистеме, необходимо еще раз отметить, что благодаря условиям единства народного хозяйства, в котором происходило становление энергосистемы, цель рационального и эффективного использования ископаемого топлива и уменьшения издержек на производство энергии была ключевой и направляющей для всех стратегий электрификации и индустриализации государства. А выстроенная в те времена система охраны и сбережения природы абсолютно противоречит истинным целям современного зеленого перехода, который служит инструментом регулирования и управления экономиками стран. Эти моменты важно разделять, в особенности когда речь идет о развитии отрасли, являющейся основой для экономического развития и, как следствие, благополучия жизни населения.

В условиях экономической доступности технологий на базе ВИЭ в энергосистеме России активно развиваются солнечные и ветровые электростанции. Программы развития ВИЭ, получившие преимущественное распространение в ОЭС Юга, подтвердили на практике вопросы, которые необходимо заблаговременно решать для эффективной интеграции таких станций. Одна из ключевых проблем — зависимость мощности ВИЭ от погодных условий, что не гарантирует бесперебойного электроснабжения и затрудняет прогнозирование выработки возобновляемыми источниками. Это требует от энергосистемы наличия достаточных резервных мощностей на маневренных электростанциях, которые могут быть оперативно задействованы при снижении или увеличении выработки ВИЭ. Концепция программ ДПМ ВИЭ-1 и ДПМ ВИЭ-2, не предполагающая дополнительных затрат на строительство магистральной сети для обеспечения выдачи мощности СЭС и ВЭС, привела к невозможности использования их максимального, проектного потенциала, а при управлении режимом работы приходится отдавать команды на ограничение выдачи мощности ВИЭ-генерации.

Анализ балансов энергосистем зарубежных стран порой показывает качественное ухудшение структуры топливного баланса в стране при нескоординированном подходе к интеграции ВИЭ. Так, масштабное развитие СЭС и ВЭС во Франции привело к необходимости суточного регулирования мощности атомными электростанциями, что в целом противоречит роли данной технологии в энергосистеме.

Наиболее перспективным вариантом реализации программ строительства СЭС и ВЭС в России могут стать комплексные технические решения: сочетание ВИЭ-генерации с промышленными системами хранения электроэнергии или ГЭС/ГАЭС. Отдельным направлением эффективного развития ВИЭ в целях рационализации экономических параметров северного завоза и снижения выбросов можно отметить комбинированные решения (в сочетании с дизель-генераторами) в локальных энергосистемах на неэлектрифицированных территориях нашей страны.

Электрификация транспорта также является одним из направлений энергоперехода. В соответствии со стратегией развития отрасли электромобилей в России, к 2030 году планируется установить 72 000 зарядных станций, более 40% из которых будут станциями быстрой зарядки. Предположительно, суммарная мощность всех зарядных станций достигнет 6,3 ГВт, при этом большая часть будет приходиться на регионы с высоким спросом на электромобили, то есть с высокой плотностью населения. Геопропространственное размещение зарядных станций может способствовать снижению их концентрации и уменьшению вероятности одновременного использования. Однако массовое строительство зарядных станций, как правило в крупных городах и населенных пунктах, требует тщательного анализа их влияния на городскую распределительную электросеть, а также учета резервов мощности генерации для обеспечения надежного и стабильного энергоснабжения всех потребителей в пиковые часы нагрузки.

Вызовы развития энергосистемы и новые технологии

Задачи развития электроэнергетики, стоящие в условиях современных технологических, геополитических и экологических вызовов, весьма серьезны. Тесная связь электроэнергетики с другими отраслями промышленности усиливает ответственность за принимаемые решения в планах развития энергосистемы. Стоит отметить, что 50% потребления электроэнергии в России приходится на добывающую и обрабатывающую промышленности. Географическое положение страны, в основном расположенной в умеренном, арктическом и субарктическом поясах, влияет на себестоимость производства электроэнергии: она значительно выше, чем в странах, находящихся, например, южнее 50-й параллели. При этом доля расходов на электроэнергию и тепло в себестоимости продукции может составлять до 35–40%. Этот факт подчеркивает важность рационального подхода к планированию развития энергетической системы

для сохранения конкурентоспособности товаров и продукции промышленного сектора как на внутреннем, так и на мировом рынке.

В настоящее время на общественное обсуждение вынесен проект Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2042 года, который определяет стратегию развития на ближайшие 18 лет. Учитывая сложность и политизированность энергоперехода, этот проект демонстрирует взвешенный подход к формированию структуры топливного баланса. Среди принципиально уникальных направлений в российской энергосистеме можно выделить строительство атомных электростанций на быстрых нейтронах и линий электропередачи на постоянном токе. Развитие этих технологий обусловлено как серьезными вызовами, стоящими перед мировой атомной отраслью, так и необходимостью устранения локальных дефицитов мощности в ряде регионов России. При этом решение вопроса передачи больших объемов мощности поставило под сомнение экономическую целесообразность использования традиционных электропередач переменного тока.

Говоря о концепции «интеллектуальной сети», можно уверенно сказать, что она продолжит развиваться на базе единой информационной CIM-модели энергосистемы, формируя системный подход к управлению и развитию, повышая энергетическую и экономическую эффективность. Для достижения желаемых эффектов критически важно своевременно обновлять устаревшее оборудование, внедрять инновационные технологии и материалы. В их числе активные элементы сети: устройства продольной компенсации, управляемые шунтирующие реакторы, фазоповоротные устройства, статические компенсаторы реактивной мощности, промышленные накопители электроэнергии, реклоузеры, а также интеллектуальные системы мониторинга оборудования, учета электроэнергии, новые материалы — сверхпроводники и композиты.

Сверхпроводящие материалы представляют собой особенно перспективное направление благодаря их способности передавать электричество с минимальными потерями. Но высокая стоимость таких технологий становится значительным препятствием для их широкого применения в протяженной по территории энергосистеме нашей страны.

История показывает, что реализация новых технологий требует времени: многие из них были известны более 70–100 лет назад, но лишь сейчас начинают активно использоваться и внедряться в промышленную эксплуатацию. На настоящем этапе развития электротехники прорывные технологии находятся в стадии поиска. Без сомнений, самая амбициозная технология электропередачи — это ее физическое отсутствие. Однако поиск путей реализации такого решения, как и общий прогресс в сфере прорывных технологий, требует мощной фундаментальной основы, а также значительных инвестиций в научную отрасль, исследования и подготовку кадров.

Текст: Сергей Петровский
Инфографика: МЭА

Электричество продолжит «зеленеть»

Почему в мире растет потребление электроэнергии и какие технологии будут способствовать ускорению темпов энергоперехода

Несмотря на сохраняющиеся последствия мирового энергетического кризиса, за прошедшие месяцы 2024 года в мире было продемонстрировано увеличение спроса на электроэнергию. Это обусловлено как устойчивым ростом экономической активности во многих регионах, так и продолжающейся электрификацией различных отраслей, а также новыми температурными рекордами, которые были зафиксированы по всему миру.

Раскаленная планета

Лето 2024 года на нашей планете было самым жарким за всю историю наблюдений. Температурные показатели в июне — августе превысили прошлогодние, говорится в бюллетене службы «Коперник», отслеживающей глобальное изменение климата (The Copernicus Climate Change Service, C3S). Это увеличивает вероятность того, что 2024-й превзойдет 2023-й с точки зрения температурных рекордов. По словам заместителя директора «Коперника» Саманты Берджесс, человечество увидело «самые жаркие июнь и август, самый жаркий день и самое жаркое

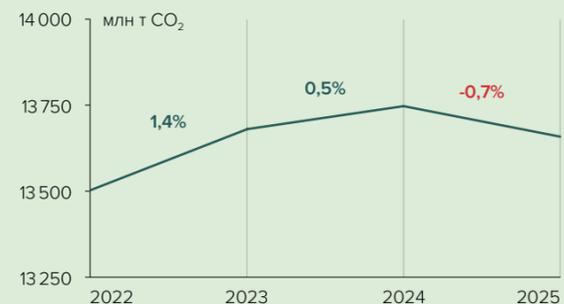
бореальное лето за всю историю наблюдений» (самым жарким днем было 22 июля 2024 года — со средней глобальной температурой воздуха у поверхности Земли 17,15 °C). Ученые также отмечают, что с февраля этого года Эль-Ниньо (природное явление, из-за которого нагреваются поверхностные воды в восточной части Тихого океана, что влияет на температуру в планетарном масштабе) начал ослабевать, но это не принесло облегчения. Средние температуры поверхности океана в августе были выше, чем в том же месяце любого другого года с начала индустриального периода (1850 г.), за исключением 2023-го.

Максимилиано Эррера, эксперт, ведущий архив экстремальных погодных явлений в течение 35 лет, сообщил, что с начала этого года были побиты 15 национальных температурных рекордов, а также десятки тысяч локальных максимумов, зарегистрированных на станциях мониторинга от Арктики до южной части Тихого океана. Это означает, что экстремальные погодные явления становятся все более частыми, а климатические изменения нарастают. Всемирная метеорологическая организация ООН сообщила, что в этом году по крайней мере в 10 странах зафиксированы температуры выше 50 °C. Беспрецедентное число тепловых рекордов за прошедшие месяцы года было поразительным: «Такое количество экстремальных явлений превосходит все, что когда-либо наблюдалось или даже считалось возможным», — сказал Эррера.

По словам Карло Буонтемпо, директора службы «Коперник», конца нежелательным рекордам не видно. «Даже если эта конкретная полоса экстремальных явлений в какой-то момент закончится, мы обязательно увидим новые рекорды, поскольку климат продолжает становиться более теплым. Это неизбежно, если мы не прекратим добавлять парниковые газы в атмосферу и океаны», — подчеркнул он.

Электроэнергетический сектор является лидером по количеству глобальных выбросов CO₂. Как ожидается, их количество останется на плато до 2025 года. Небольшое увеличение выбросов в текущем году, по прогнозам, сменится снижением менее чем на 1% в 2025-м. Экстремальные погодные условия, такие как волны тепла и засухи, снижающие выработку электроэнергии на ГЭС, а также экономические шоки или политические изменения могут вызвать рост

Глобальные выбросы CO₂ от производства электроэнергии (2024–2025 гг. — прогноз)



выбросов в отдельные годы. Тем не менее, по мнению аналитиков Международного энергетического агентства, сформировавшаяся структурная тенденция замещения ископаемого топлива чистыми источниками энергии останется устойчивой.

Электричества нужно больше

Согласно прогнозам Международного энергетического агентства (МЭА), ожидается, что в период 2024–2025 годов мировое потребление электроэнергии будет расти быстрыми темпами (на 4% ежегодно) и опережать рост мирового ВВП. Это обусловлено высоким спросом на электроэнергию во многих регионах и странах, особенно в Китае, Индии и США. Ожидаемый рост является самым высоким с 2007 года, за исключением резких подъемов в 2010-м после мирового финансового кризиса и в 2021-м после обвала спроса, вызванного пандемией COVID-19.

В Китае прогнозируется рост спроса более чем на 6% благодаря быстрому увеличению производства солнечных батарей, электромобилей и аккумуляторов, а также электроемкой переработке связанных материалов. Продолжающееся развертывание сетей 5G и центров обработки данных и широкое внедрение электромобилей на внутреннем рынке также являются факторами, способствующими росту потребления электроэнергии.

Индия, самая быстрорастущая крупная экономика в мире, по прогнозам МЭА, продемонстрирует 8-процентный рост потребления электроэнергии в 2024 году, что соответствует темпам 2023-го. Это обусловлено значительным ростом ВВП страны и возросшим спросом на охлаждение из-за длительных и интенсивных волн тепла: в текущем году Индия пережила волны тепла рекордной продолжительности, при этом пиковая нагрузка на энергосистемы достигла нового максимума. Если в дальнейшем произойдет возвращение к средним погодным условиям, то рост спроса на электроэнергию в Индии умеренно снизится (до 6,8%) в 2025 году.

Спрос на электроэнергию в США, по прогнозам, увеличится на 3% в годовом исчислении в 2024 году. Потребление электроэнергии увеличивается за счет улучшения экономических перспектив, а также роста спроса на кондиционирование воздуха на фоне сильной жары и быстрого увеличения количества центров обработки данных.

Ожидается, что спрос на электроэнергию в Европейском союзе в текущем году увеличится на 1,7%, поскольку экономические трудности в регионе ослабевают. Потребление электроэнергии в ЕС сократилось за два предыдущих года (важным фактором стало снижение производства в энергоемких отраслях). Признаки восстановления спроса в ЕС появились начиная с четвертого квартала 2023 года, рост набрал обороты в первой половине 2024-го, поскольку цены на энергоносители стабилизировались, а отрасли, которые ранее сократили производство, начали его

4%

прогноз роста мирового спроса на электроэнергию в период 2024–2025 годов. Основные источники увеличения потребления — рост развивающихся экономик в сочетании с ожидаемым восстановлением промышленности и продолжающейся электрификацией жилого и транспортного секторов во многих регионах мира

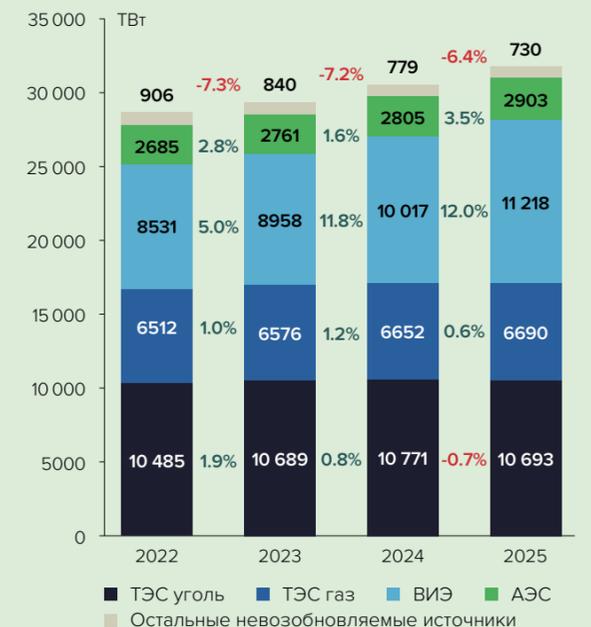
~30%

доля электроэнергии в конечном потреблении энергии к 2030 году в сценарии МЭА «Чистый ноль к 2050 году» (20% — доля в 2023 году, 18% — в 2015-м)

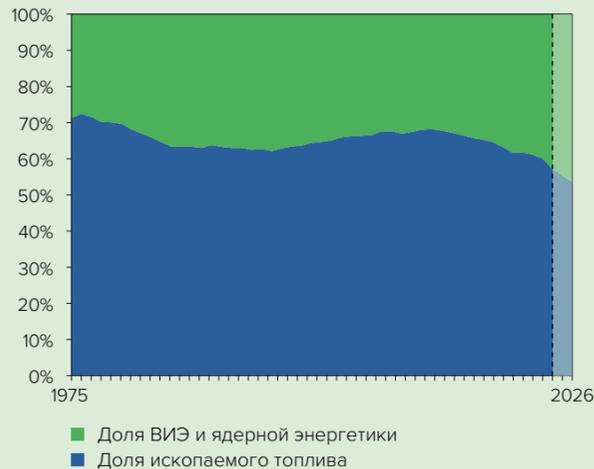
до 1,5–3%

может вырасти доля потребления электроэнергии центрами обработки данных (без учета майнинга криптовалют) к 2026 году. Потребление, связанное с электромобилями, в это же время составит примерно 1,5–2%. Для сравнения: на первичное производство алюминия, очень энергоемкий процесс, в настоящее время приходится около 4% мировой электроэнергии

Структура мирового предложения электроэнергии (2024–2025 гг. — прогноз)



Изменение доли источников с низким уровнем выбросов CO₂ и доли ископаемого топлива в мировом производстве электроэнергии (2024–2026 гг. — прогноз)



> 1/3

мировой электроэнергии будут, согласно прогнозам, генерировать ВИЭ в 2025 году, обогнав уголь в качестве крупнейшего источника

46%

мировой генерации будут, по прогнозу, составлять низкоуглеродные источники — возобновляемые и ядерные — к концу 2026 года (39% в 2023-м)

55 г CO₂ /кВт·ч

ожидаемое снижение глобальной интенсивности выбросов (с 455 г CO₂ /кВт·ч в 2023 году до 400 г CO₂ /кВт·ч в 2026-м) благодаря росту доли низкоуглеродных источников (возобновляемых и ядерных)

> 900 ТВт·ч

ожидаемый прирост ветровой и солнечной генерации в мире в 2025 году, что эквивалентно общему потреблению электроэнергии во Франции и Италии вместе взятых

восстанавливать. Тем не менее, несмотря на снижение с предыдущих максимумов, цены на энергоносители в Европе по-прежнему высоки по сравнению с допандемийными уровнями. В сочетании с умеренными макроэкономическими перспективами это продолжает оказывать давление на некоторые отрасли и повышает неопределенность относительно темпов восстановления спроса.

Электричество станет чище

МЭА прогнозирует, что чистые источники энергии установят новые рекорды к 2025 году. Несмотря на значительный рост потребления электроэнергии, ожидается, что только солнечные фотоэлектрические системы покроют примерно половину роста мирового спроса на электроэнергию к следующему году. Вместе с генерацией ветровой энергии они составят почти 75% прироста.

Ожидается, что мировая выработка электроэнергии с помощью солнечных фотоэлектрических систем и ветростанций в 2024 году превзойдет выработку гидроэлектроэнергии. Это следует за значительным ростом (на 33% в годовом исчислении) мировой солнечной генерации и устойчивым ростом ветровой генерации (на 10%).

Глобальный энергетический переход должен достичь еще одной важной вехи к 2025 году: общая выработка возобновляемой энергии должна превзойти выработку электроэнергии на угле. Доля возобновляемых источников в мировом электроснабжении выросла до 30% в 2023 году и, по прогнозам, вырастет до 35% в 2025-м.

В Евросоюзе производство электроэнергии ветровыми и солнечными фотоэлектрическими установками должно превысить производство на ископаемом топливе в 2024 году. Основной движущей силой является быстрый рост солнечной энергетики, обусловленный снижением цен на солнечные модули и сильной политической поддержкой. Ожидается, что доля всех ВИЭ в общем объеме генерации достигнет 50% в 2024 году.

Глобальная ядерная генерация также находится на пути к достижению нового максимума в 2025 году, превзойдя свой предыдущий рекорд 2021-го. Прогнозируется, что ядерная генерация вырастет во всем мире на 1,6% в 2024 году и на 3,5% в 2025-м благодаря устойчивому росту выработки на АЭС Франции по мере завершения работ по техническому обслуживанию, перезапуску энергоблоков в Японии и вводу в эксплуатацию новых блоков в Китае, Индии, Южной Корее и Европе.

Зеленые идеи

Сообщения о разработке и внедрении новых энерготехнологий, способствующих декарбонизации, появляются регулярно. Некоторые из них предполагают усовершенствование уже имеющихся устройств,

другие обещают принципиально новые решения и звучат пока довольно фантастически. Время покажет, смогут ли какие-то из этих технологий найти широкое применение и способствовать скорейшему достижению целей декарбонизации.

Первый в мире коммерческий гравитационный аккумулятор энергии сдала в эксплуатацию швейцарская компания Energy Vault. Новый метод сохранения энергии заключается в строительстве башен с электродвигателями, работающими от солнечных батарей и поднимающими в воздух 24-тонные блоки. Когда блоки затем опускаются под действием гравитации, генерируется электроэнергия. Построенный в Китае аккумулятор имеет мощность 25 МВт и емкость 100 МВт·ч. Ожидается, что его КПД составит 80%, что сделает его таким же эффективным, как аккумуляторные батареи и гидроаккумуляторы, работающие по аналогичному принципу.

Первый в мире модульный центр обработки данных, работающий на водороде и напечатанный с использованием 3D-принтера, создал стартап EdgeCloudLink. ЦОД мощностью 1 МВт построен в Маунтин-Вью (Калифорния) для поставщика облачных услуг Sato Digital. ЦОД специально разработан для высокоплотного размещения графических процессоров, необходимых для повышенных нагрузок, связанных с функционированием искусственного интеллекта. Для производства электроэнергии использованы водородные топливные элементы, что позволяет ЦОДу вообще не вырабатывать углекислый газ. Вода, образующаяся в процессе работы топливных элементов, используется для охлаждения оборудования.

Устройство для преобразования гидравлической энергии дождевых капель в электричество разработали китайские ученые из Даляньского технологического университета. Это супергидрофобный магнитно-электрический генератор, который деформируется, когда на него падают дождевые капли, а затем восстанавливается. Такой процесс и приводит к тому, что генератор производит электрический ток. Экспериментаторы утверждают, что устройство имеет высокую эффективность и сможет быстро заряжать конденсаторы и обеспечивать питание для различных электронных устройств.

Новый сверхтонкий и гибкий материал на основе перовскита, разработанный учеными Оксфордского университета, сопоставим по эффективности с традиционными кремниевыми панелями солнечных батарей, но его толщина в 150 раз меньше. Главное преимущество разработки — возможность нанесения на любую поверхность, включая крыши зданий и автомобилей.

Создание многокилометровых транспортных «конвейеров», которые заменят перевозку грузов автотранспортом, обсуждают в Японии. Первую логистическую линию длиной 500 км предполагается проложить между крупнейшими городами — Токио и Осакой. По расчетам, такая линия сможет заменить 25 тыс. грузовиков.

3%

средний прогнозируемый рост атомной генерации в период 2024–2026 годов

29 ГВт

ожидаемый ввод новых мощностей АЭС в мире в период с 2024 по 2026 год, более половины из них будут в Китае и Индии

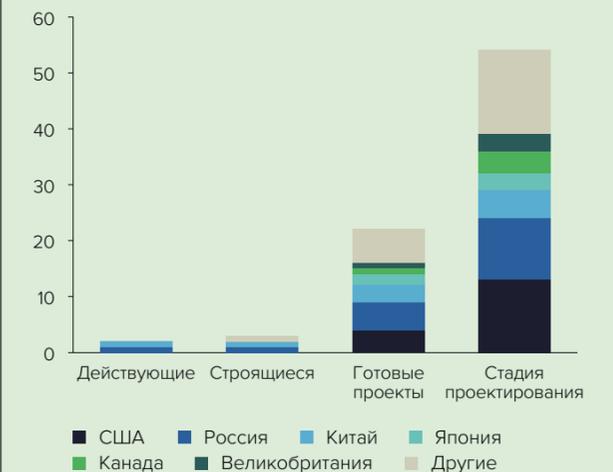
> 20 стран

подписали на COP-28 в 2023 году совместную декларацию об увеличении мощностей ядерной энергетики в три раза к 2050 году. В глобальном масштабе это означает добавление 740 ГВт к текущему показателю в 370 ГВт

3 страны

являются крупнейшими игроками в области разработки малых модульных реакторов: США, Китай и Россия, на их долю приходится более половины разработок, находящихся на стадии проектирования

Текущие проекты малых модульных реакторов (страны и статус)



Зеленые энерготехнологии vs глобальное изменение климата

С какой скоростью в мире происходит энергетический переход и что мешает этому процессу

Эксперты ответили на вопросы «Вестника атомпрома» о том, как они оценивают текущие темпы энергоперехода и реалистичность достижения целей Парижского соглашения, а также перспективы

совершенствования и удешевления уже существующих безуглеродных энерготехнологий, возможность появления новых прорывных решений в этой области и роль ядерной энергетики в энергосистемах будущего.



«Ядерная энергетика может сыграть ключевую роль в глобальном энергетическом переходе»

— При оценке мощности генерации ВИЭ на основе определяемых на национальном уровне вкладов (ОНУВ) в достижение целей Парижского соглашения и целей в области устойчивого развития можно говорить, что прогресс Китая и ЕС был в целом удовлетворительным. Например, цели Китая по возобновляемой энергии, установленные в его ОНУВ, включают достижение показателя 1200 ГВт мощности ветровой и солнечной энергии к 2030 году. К концу 2022 года, на семь лет раньше запланированного срока, Китай уже превзошел этот показатель, установив более 1200 ГВт. Кроме того, Китай намерен увеличить долю неископаемого топлива в своем первичном потреблении энергии до 25% к 2030 году. По состоянию на 2022 год неископаемое топливо составляло примерно 17–18% его энергетического баланса, и ожидается, что быстрый рост позволит достичь целевого показателя в 25% к 2030 году. Однако такое ускоренное развитие предполагает возможность потенциального «эффекта отскока», когда быстрое продвижение может привести к проблемам с сохранением темпов или с эффективным управлением энергетическим переходом.

Цель Евросоюза по доле ВИЭ в 32% к 2030 году была повышена до 42,5% в 2023 году в рамках плана REPowerEU. К 2023 году ЕС достиг 23–24% возобновляемой энергии в своем энергобалансе (563 ГВт установленной мощности к концу 2022 года), в основном за счет энергии солнца и ветра. Хотя прогресс ускорился, особенно из-за энергетического кризиса, вызванного конфликтом между Россией и Украиной, для достижения обновленной цели в 42,5% необходимы дальнейшие усилия. ЕС сталкивается с трудностями в поддержании энергетической безопасности и стабильных цен в процессе перехода от российского газа на другие источники, что приводит к временному увеличению использования ископаемого топлива, включая уголь. Хотя энергоэффективность улучшается, ЕС все еще отстает от необходимого ежегодного прироста для достижения своих целей к 2030 году, что требует более жестких мер по энергосбережению.

Если говорить о других странах и регионах, то Соединенные Штаты Америки достигли около 20% своих целей (электроэнергетический сектор, на 100% свободный от углеродных выбросов к 2035 году, и нетто-нулевой уровень выбросов к 2050 году). Индия, несмотря на прогресс, все еще далека от своей цели в 500 ГВт мощностей возобновляемой энергетики. В Африке многие страны имеют цели по возобновляемой энергии в своих ОНУВ, но недостаточность финансирования, инфраструктурные и политические проблемы сдерживают их достижение, несмотря на огромный потенциал солнечной энергетики. Аналогичным образом Латинская Америка и Юго-Восточная Азия отстают в развертывании возобновляемой энергетики.

Проблемы с достижением целей в области возобновляемой энергетики различаются в зависимости от страны и региона, но, как правило, они обусловлены экономическими, политическими, техническими и социальными факторами. Основные причины включают дефицит финансирования, инфраструктурные ограничения и недостаточную политическую поддержку. Если говорить более подробно, то эти причины следующие.

- Высокие первоначальные затраты, отсутствие финансирования, субсидии на ископаемое топливо. Например, при цели финансирования около \$100 млрд в год, в 2020 году было привлечено всего \$83,3 млрд.

- Резкий рост спроса на критически важные минералы, к которому привел энергопереход. По данным Международного энергетического агентства, спрос на такие минералы, как литий, кобальт и никель, может увеличиться в четыре-шесть раз к 2040 году из-за роста производства электромобилей и накопителей энергии и внедрения возобновляемых источников энергии. Например, для производства электромобиля требуется в шесть раз больше минеральных ресурсов, чем для обычного автомобиля, а для ветряных турбин и солнечных панелей требуются большие количества редкоземельных элементов, меди и алюминия. Литий необходим для аккумуляторов в электромобилях и систем хранения энергии. Кобальт и никель также важны для аккумуляторов электромобилей и решений для хранения в масштабах электросети. Медь широко используется в ветряных турбинах, солнечных панелях и электрических сетях. Редкоземельные элементы необходимы для магнитов в ветряных турбинах и электродвигателях. Цены на критически важные минералы в последние годы значительно колебались из-за сбоев в цепочках поставок, геополитической напряженности и быстрого роста спроса.

- Непоследовательная политика, бюрократические задержки, слабая сетевая инфраструктура.

- Препятствия при доступе к чистым технологиям и при создании потенциала, необходимого для внедрения климатических решений, с которыми продолжают сталкиваться развивающиеся страны. Медленные темпы передачи технологий мешают им масштабировать проекты в области возобновляемой энергии и адаптации.

- Недостаточность внедрения рыночных решений.

- Недостаточность обеспечения институционального качества.

- Политическая нестабильность и отсутствие последовательных политических решений, что препятствует развертыванию возобновляемой энергетики в некоторых странах.



Сохраз Казми

Ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией международной и региональной экономики, доцент УрФУ; внешний исследователь в Центре передового опыта исследований в области возобновляемых источников энергии и энергетических систем Университета короля Абдул-Азиза (Джидда, Саудовская Аравия); соавтор III Рабочей группы МГЭИК в рамках РКИК ООН; PhD по экономике окружающей среды

■ Общественное сопротивление, конфликты в области землепользования, потеря рабочих мест в секторе ископаемого топлива.

Кроме того, несмотря на отчеты о достижении прогресса, некоторые страны по-прежнему имеют проблемы с прозрачностью отчетности по действиям в области борьбы с изменением климата и особенно с точным измерением выбросов парниковых газов.

По моему мнению, несмотря на заметные достижения, существуют значительные пробелы в движении к целям Парижского соглашения. Текущие ОНУВ, даже с недавними обновлениями, недостаточны для достижения цели по удержанию роста температуры в пределах 1,5 °C по сравнению с доиндустриальным периодом. Согласно отчету ЮНЕП (Программа ООН по окружающей среде — United Nations Environment Programme, UNEP) за 2022 год, мир находится на пути к повышению температуры на 2,4–2,6 °C к концу столетия, что значительно превышает целевые показатели Парижского соглашения.

Существующие источники утверждают, что экономическая эффективность при внедрении возобновляемой энергетики значительно улучшилась. Например, затраты в области солнечной энергетики значительно снизились за последнее десятилетие, при этом стоимость фотоэлектрических модулей снизилась на 85% с 2010 года. Перовскитные солнечные элементы также стали дешевле в производстве и стали потенциально более эффективными, чем традиционные элементы на основе кремния. Эти материалы могут еще больше снизить стоимость солнечной энергетики и сделать ее более доступной. Важно отметить, что панели, которые могут поглощать солнечный свет с обеих сторон, как ожидается, улучшат улавливание энергии и эффективность, способствуя снижению общих затрат.

Аналогичным образом стоимость ввода наземных ветроустановок снизилась на 70% за последнее десятилетие, а морские установки, хотя в настоящее время и дороже, также демонстрируют быстрое снижение затрат из-за более крупных турбин и более эффективных методов строительства. Ожидается, что более крупные турбины — с мощностью 15–20 МВт — повысят эффективность и снизят приведенную стоимость электроэнергии (LCOE) ветровых электростанций, особенно морских.

Стоимость литий-ионных аккумуляторов, критически важных для хранения энергии в электромобилях и сетевых накопителях, упала на 89% с 2010 года. Продолжающееся совершенствование химии аккумуляторов, характеристик плотности энергии, а также производственных процессов еще больше снизит затраты. Аккумуляторы следующего поколения обещают более высокую плотность энергии, более быстрое время зарядки и повышенную безопасность по сравнению с литий-ионными аккумуляторами, что может произвести революцию как в электромобилях, так и в сетевых накопителях. Предполагается, что натрий-ионные

аккумуляторы и железо-воздушные аккумуляторы, которые находятся в стадии разработки, будут более дешевой и мощной альтернативой литий-ионным аккумуляторам.

Кроме того, я считаю, что зеленый водород имеет потенциал для декарбонизации секторов, где выбросы трудно поддаются сокращению, таких как промышленность, судоходство и авиация. Текущие затраты высоки, но ожидается, что развитие технологий электролиза и масштабирование производства сделают зеленый водород более конкурентоспособным по стоимости с ископаемым топливом к 2030-м годам.

Я скорее экономист в области энергетики, чем ученый-энергетик, однако я пришел к выводу, что термоядерный синтез обещает практически безграничную чистую энергию, копируя процесс, который происходит в недрах Солнца. Он все еще находится в экспериментальной фазе, но уже достигнут значительный прогресс, и синтез может произвести революцию в производстве энергии, если ученым удастся сделать его коммерчески жизнеспособным. Недавние эксперименты показали чистый прирост энергии, что является важной вехой на пути к созданию устойчивого термоядерного реактора. Малые модульные ядерные реакторы компактны, безопасны и более дешевы в строительстве, чем традиционные ядерные реакторы, что делает их более адаптируемыми для обеспечения людей низкоуглеродной энергией, особенно в отдаленных районах. Кроме того, во многих источниках утверждается, что реакторы на основе тория, которые могли бы предложить более безопасную и эффективную ядерную энергетику, изучаются как будущий источник энергии, хотя все еще необходимы значительные исследования, прежде чем они станут коммерчески жизнеспособными.

Я считаю, что ядерная энергетика может сыграть ключевую роль в глобальном энергетическом переходе, предоставляя надежную низкоуглеродную электроэнергию в дополнение к непостоянным ВИЭ, таким как ветер и солнце. Несмотря на значительный потенциал, некоторые экономические, политические, социальные и технические барьеры помешали полномасштабному развертыванию ядерной энергетики во всем мире. Например, атомные электростанции требуют огромных первоначальных капиталовложений и длительных сроков строительства. Кроме того, есть проблемы в области общественного восприятия и беспокойности темой безопасности. До сих пор, как я знаю, во многих странах действуют строгие нормативные рамки для ядерной энергетики из-за связанных рисков безопасности. Например, Германия и Италия скептически относятся к ядерной энергетике. Россия в лице госкорпорации «Росатом» является крупным игроком в ядерной энергетике, поставляя реакторы и топливо по всему миру. Реакторы четвертого поколения, которые повышают безопасность и эффективность ядерной энергетики и снижают количество отходов, могут помочь решить некоторые из проблем этого вида генерации.

«Цели Парижского соглашения вполне реалистичны, но недостаточно амбициозны»

— Энергопереход в разных странах происходит по-разному. Есть впечатляющие примеры ускоренного развития и внедрения безуглеродных/зеленых энергетических технологий. Пожалуй, Китай по масштабам наиболее яркий пример для всего мира. Но и в других крупных странах, например в ряде стран ЕС, в США (в Калифорнии и других штатах), Индии, Бразилии, масштабы использования возобновляемых источников энергии уже достаточно большие и продолжают увеличиваться. По данным МЭА, ввод новых генерирующих мощностей на основе ВИЭ в мире увеличивается нарастающими темпами. Растет и выработка зеленой электроэнергии. По оценкам аналитиков МЭА, в 2023 году ввод новых мощностей ВИЭ превысил 500 ГВт/год (на 25–30% больше, чем в 2020–2022 гг.).

Однако в электроэнергетике важнее учитывать более долгосрочные аспекты развития, ведь сроки ввода и эксплуатации объектов — это десятки лет. Динамика показателей по годам в этой отрасли не так значима, как тренды. А вот прогнозы, в частности МЭА, показывают дальнейшее увеличение энергетики на основе ВИЭ при всех сценариях, причем установленная мощность может вырасти почти вдвое к 2028 году по сравнению с 2022 годом.

Цели Парижского соглашения, сформулированные большинством сторон на 2030 год, вполне реалистичны, но недостаточно амбициозны. Их выполнение не позволяет рассчитывать на удержание роста глобальной температуры в пределах 1,5–2 °C. Это наглядно показано, например, в отчете ЮНЕП (Программа ООН по окружающей среде — United Nations Environment Programme, UNEP) Emission Gap Report 2023. Нарастание целевых показателей во многих

странах рассматривается на самом высоком уровне. Развивающиеся государства готовы ставить более амбициозные цели, если им будет предоставлена международная помощь. Барьерами для выполнения обязательств и более активных действий по декарбонизации являются неэффективность государственного управления в экономической, энергетической, экологической сферах, недостаток квалификации, финансов, ресурсов и технологий, недостаточная поддержка международных партнеров и доноров.

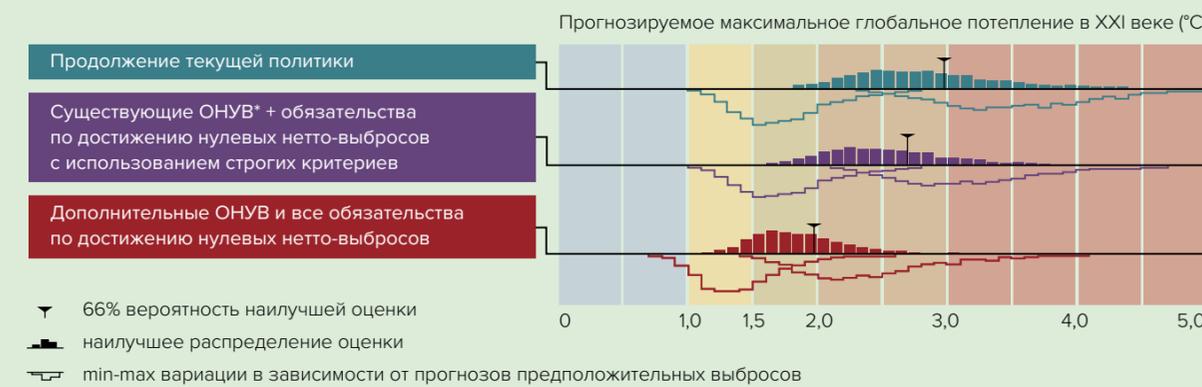
Есть яркие примеры удешевления технологий ВИЭ: солнечная энергетика за последние 10 лет показала снижение себестоимости выработки электроэнергии примерно в 10 раз. Дальнейшее развитие этих технологий и увеличение масштабов производства (что наблюдается в последние годы) обязательно приведут к дополнительному снижению затрат. Некоторое снижение себестоимости заметно и в ветровой энергетике. Вероятно, можно ожидать сокращения затрат в секторе накопителей энергии, в эту сферу вкладываются большие инвестиции. Для АЭС, угольных и газовых электростанций ожиданий существенного сокращения затрат я не обнаружил. В последние десятилетия издержки в этих секторах не сильно менялись. Учитывая, что финансовые институты и инвесторы не просто предпочитают зеленые проекты в энергетике, но и принимают политику по отказу финансирования незеленых проектов, то можно ожидать, что масштабные финансовые потоки в зеленые секторы энергетики обеспечат дальнейшие технологические прорывы и, согласно определению Клейтона Кристенсена (Clayton M. Christensen), «подрывные инновации», которые будут менять модели поведения и бизнес-модели в недалеком будущем.



Георгий Сафонов

Международный эксперт-экономист, IDDRI (Institut du Développement Durable et des Relations Internationales — Институт устойчивого развития и международных отношений)

Температурные последствия различных сценариев декарбонизации



*ОНУВ — определяемые на национальном уровне вклады в достижение целей Парижского соглашения. Источник: UNEP



Алексей Терешин

Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник НИЛ глобальных проблем энергетики НИУ «МЭИ»

«В ближайшие годы следует ожидать возвращения нисходящего тренда углеродной интенсивности энергопотребления»

— Климатическую эффективность энергетики определяет так называемый углеродный коэффициент — сколько парниковых газов (в пересчете на CO₂) выбрасывается в атмосферу при производстве, транспортировке и использовании энергии на единицу потребления первичной энергии. Для периода 1950–2000 годов этот показатель снижался практически линейно, уменьшившись на 20% за счет перехода с угля на нефтегазовое топливо и развития ГЭС, АЭС и ВИЭ. Для следующих семи лет характерна обратная тенденция, когда этот коэффициент несколько вырос (на 2%), в первую очередь за счет роста потребления угля в бурно развивающемся Китае, после чего возобновилось его падение примерно с прежними темпами. Последние три года наблюдается стагнация этого параметра.

Геополитические события последних лет, в первую очередь конфронтация на Украине и Ближнем Востоке, в значительной мере повлияли на мировую энергетику, особенно на цены и логистические цепочки. С одной стороны, это повысило мотивацию целого ряда регионов в долгосрочной перспективе обеспечить себя собственными источниками энергии, большей частью возобновляемыми. С другой — для решения текущих энергетических задач некоторым странам пришлось вернуться к более «грязному» топливу — углю. В ближайшие годы все-таки следует ожидать возвращения нисходящего тренда углеродной интенсивности энергопотребления.

Цель Парижского соглашения 2015 года — не допустить повышения глобальной температуры более чем на 2 °C по сравнению с доиндустриальной эпохой (до 1850 г.) и предпринять усилия по ограничению этого превышения до 1,5 °C — остается актуальной. Как показывают модельные климатические расчеты, последствия перехода через этот опасный порог будут иметь катастрофический характер для миллиардов жителей планеты. Другое дело, что, как показали наши исследования в Национальном исследовательском университете «МЭИ», те добровольные обязательства по ограничению выбросов парниковых газов, которые на тот момент (к 2015 г.) приняли практически все страны мира, не обеспечивали достижения этих целей. По нашим расчетам, более энергичные

решения, принятые в Глазго в 2021 году и в Дубае в 2023-м, в случае их полного выполнения способны замедлить темпы глобального потепления в указанных пределах. Однако все крупнейшие эмитенты парниковых газов не справляются со взятыми на себя обязательствами, что, по нашим расчетам, делает неизбежным превышение планки в 1,5 °C уже в ближайшие 10–20 лет и 2 °C — к концу текущего столетия.

Основным препятствием, на наш взгляд, является отставание в экономическом развитии большинства стран, в которых проживает около 80% мирового населения (для бедных экономик климатическая повестка — не самая главная), и инерционность энергетики, не позволяющая быстро проводить масштабные изменения. Не меньшее значение имеет продолжающийся бурный демографический рост в развивающихся странах, стимулирующий рост энергопотребления.

За последние два десятилетия достигнут значительный прогресс в области повышения КПД солнечных фотоэлектрических панелей и мощности ветряных турбин. Потенциал существующих технологий ВИЭ в значительной мере исчерпан, для прорыва в этой области требуются фундаментальные открытия, прогнозирование которых затруднительно. Кроме того, важно менять культуру потребления, оптимизировать работу энергосетей. Несомненно, использование цифровых технологий, ИИ ускорит этот процесс.

Ядерная энергетика является важным элементом мирового энергетического комплекса, значительно снижая выбросы парниковых газов. На нее приходится 9% мировой суммарной выработки электроэнергии и 23% — безуглеродной генерации (ГЭС, АЭС и ВИЭ). В потреблении первичной энергии, понятно, цифры заметно ниже — 4% и 21% соответственно.

Препятствий к увеличению доли ядерной энергетики в мировом энергобалансе, на наш взгляд, несколько: — большие сроки и высокая стоимость строительства; — проблемы безопасности, в том числе при обращении с отработавшим топливом, а также современные военные конфликты только усиливают озабоченность населения в этой области; — неравномерное распределение ресурсов природного урана (более 80% геологических запасов приходится на 10 стран, а 80% производства — на 5 стран).

Перспективы ядерной энергетики представляются довольно умеренными. АЭС малой мощности, несомненно, займут свою нишу в энергоснабжении, но не займут в нем заметной доли. Технологические перспективы замкнутого цикла и тем более термо-ядерного синтеза представляются весьма туманными.

«Ядерная энергетика является важным элементом мирового энергетического комплекса, значительно снижая выбросы парниковых газов».

«Энергопереход как мировой тренд в целом видится неизменным»

— Энергопереход как мировой тренд продолжит развиваться до середины века и далее в соответствии с национальными целями по декарбонизации, заявленными крупнейшими странами-потребителями — Китаем и Индией (к 2060 и 2070 годам соответственно). Безусловно, на этом пути возможны замедления и ускорения, но сам тренд в целом мне видится неизменным. КНР и ЕС уже не первый год лидируют по объему ввода мощностей ВИЭ-генерации. Замедление темпов ввода в мировом масштабе связано с геополитической и экономической турбулентностью, высокой инфляцией и стоимостью заемных денег (что и раньше было проблемой для стран с переходной экономикой на развивающихся рынках и в странах с низким уровнем дохода), а также с ограничениями на доступ к технологиям (в связи с протекционизмом, торговыми ограничениями и недостатком помощи развитию). Хотя доля ВИЭ в мировом энергобалансе растет быстро, этого недостаточно для вытеснения углеводородов в связи с ростом совокупного спроса на энергоресурсы. Сохраняются инфраструктурные ограничения: многие проекты ВИЭ-генерации откладываются в ожидании ввода электросетей, объемы которых в мире вдвое меньше необходимых.

Исторические решения по устроению установленной мощности ВИЭ, а также по постепенному отказу от углеводородов, принятые на 28-й Конференции сторон, своевременны. В последние годы среднегодовая температура на планете бьет все рекорды, а ледники тают быстрее, чем ожидалось. Вероятно, мы пробьем планку в 1,5 °C в ближайшие пять лет. Экстремальные погодные явления хорошо заметны жителям многих стран: в то время как Европа справлялась с наводнением, в ЮАР выпал снег. В последние несколько лет значимый вклад в глобальное потепление вносит Эль-Ниньо — периодическое (каждые 2–7 лет) колебание температуры в экваториальной части Тихого океана. Можно надеяться, что в последующие несколько лет этот феномен будет способствовать снижению температуры.

Парижское соглашение — прекрасный пример того, как почти все страны мира сплотились для исследования и решения общей глобальной проблемы. В то же время у каждой страны есть соблазн стать в этом процессе фрирайдером, то есть, не делая ничего, получить все преимущества от коллективных усилий других стран. Для выполнения Парижского соглашения, на мой взгляд, не хватает рыночных механизмов его реализации, позволяющих компаниям разрабатывать и выводить на рынок новые климатически нейтральные продукты и сервисы. Кроме того, развитые страны очень неохотно делятся технологиями декарбонизации с экономиками Глобального Юга, у которого не хватает собственных ресурсов для создания собственных решений. Медленнее, чем это необходимо, пополняется Зеленый климатический фонд, созданный для помощи развивающимся странам.

Большинство развивающихся стран действительно пока вносят очень небольшой вклад в общий объем выбросов парниковых газов, но у них впереди индустриализация, которую развитые страны уже прошли. Многие зависят от двух развивающихся стран с самым большим народонаселением и потреблением энергии — Индии и Китая. И если Китай не только справляется сам, но и является мировым лидером по многим показателям, то Индии необходима поддержка.

В части ВИЭ-генерации ставка почти всех стран на солнце и ветер тормозит исследования и разработки многих других видов чистой энергии, в том числе волновой, петротермальной и других. Солнце выигрывает в конкуренции с ветром по стоимости единицы установленной мощности и стоимости электроэнергии. Страны-лидеры, включая Россию, разрабатывают и тестируют новые революционные технологии — ядерный синтез, атомные реакторы четвертого поколения с замкнутым топливным циклом, прямую «доставку» солнечной энергии из космоса с использованием микроволнового излучения и некоторые другие. Новые энерготехнологии появятся при условии расширения международной кооперации в этой сфере, а также при диверсификации бюджетов на НИОКР (или дефиците / росте цен на редкоземельные элементы для солнечной и ветровой генерации).

Полномасштабному развертыванию атомной энергетики мешает ее дороговизна (высокая полная приведенная стоимость электроэнергии в сравнении с другими видами генерации) и высокий объем отходов при добыче и утилизации отработанного топлива. Немаловажны и аспекты безопасности: расходы на обеспечение охраны АЭС, высокие риски в случае удара стихии, кибер- или террористической атаки, усилия по обеспечению нераспространения. Немногие страны обладают технологиями атомной генерации и запасами ядерного топлива. Проблему могут решить атомные реакторы четвертого поколения с замыканием ядерного топливного цикла, которые, безусловно, являются крайне перспективным направлением в энергетике при условии обеспечения конкурентоспособности по цене.

«Атомные реакторы четвертого поколения с замыканием ядерного топливного цикла, безусловно, являются крайне перспективным направлением в энергетике при условии обеспечения конкурентоспособности по цене».

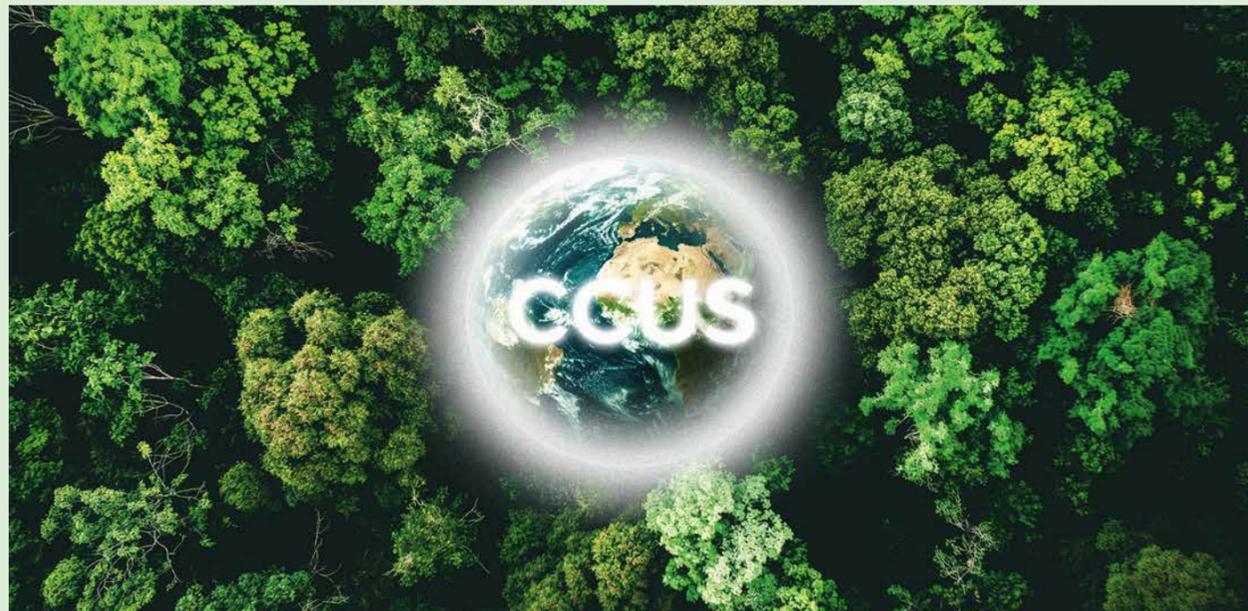


Лилиана Проскурякова

Заведующая Лабораторией исследований НИУ «ВШЭ», член ученого совета НИУ «ВШЭ»



Текст: Екатерина Грушевенко, старший аналитик, Проектный центр по энергопереходу, Сколтех
Иллюстрация и фото: Midjourney, Climeworks



Поймать и обезвредить

Как улавливание и хранение диоксида углерода может помочь человечеству в борьбе с глобальным потеплением

Согласно последним данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата, уровень углекислого газа в атмосфере продолжает расти, что приводит к опасным климатическим изменениям. Чтобы ограничить повышение температуры на уровне 1,5 °C (согласно Парижскому соглашению), необходимо снизить выбросы диоксида углерода на 45% к 2030 году по сравнению с уровнем 2010 года и достичь углеродной нейтральности к 2050 году. Развитие и применение технологий улавливания и хранения CO₂ — один из путей достижения этой цели. Рассказываем, что означает понятие «улавливание и хранение углекислого газа», которое является зонтичным и включает в себя целый ряд направлений и технологий.

Технологии CCUS: захват на месте

Технологии CCUS (Carbon Capture, Utilization, and Storage — улавливание, использование и хранение) — это совокупность методов, которые предлагают возможность уменьшить выбросы, улавливая углекислый газ непосредственно из источников выбросов и храня его или используя для производства различных продуктов.

Данный метод является эффективным инструментом в борьбе с изменением климата, не требующим радикальной перестройки промышленных предприятий и позволяющим сократить негативное воздействие на окружающую среду прямо у источника загрязнения.

Отдельно стоит выделить улавливание и полезное использование диоксида углерода (Carbon Capture and Utilization, CCU) — комплекс методов и процессов, направленных на захват углекислого газа из различных

источников выбросов и его последующее использование в промышленных или коммерческих целях.

Технологическая цепочка CCUS включает в себя несколько этапов. Первый этап — это улавливание диоксида углерода. Этот процесс заключается в захвате CO₂, который эмитируется, например, на электростанциях или заводах в процессе сжигания ископаемых видов топлива. Существуют разные технологии для улавливания, одним из наиболее распространенных методов является метод аминовой очистки дымовых газов.

Далее следует транспортировка CO₂. Она может осуществляться различными методами: от цистерн до трубопроводов и танкеров. Транспортируемый CO₂ может быть направлен на производство для полезного использования или в подземные резервуары на долгосрочное хранение.

После улавливания CO₂ можно применять для создания различных продуктов. Например, углекислый газ можно преобразовать в синтетическое топливо и использовать для автомобилей или в промышленности. В строительной отрасли CO₂ применяется для производства бетона. Диоксид углерода может служить сырьем для производства пластмасс и других химических веществ. Также CO₂ нужен в пищевой промышленности и сельском хозяйстве.

Если CO₂ не используется, он может быть закачан под землю в истощенные нефтегазовые коллекторы, угольные шахты или соленосные пласты (аквиферы). Также углекислый газ может быть использован для увеличения нефтеотдачи на старых месторождениях.

Технологии CDR: почистить атмосферу

Суть технологий удаления диоксида углерода (Carbon Dioxide Removal, CDR) заключается в активном антропогенном удалении CO₂ из атмосферы с целью снижения концентрации парниковых газов, что, в свою очередь, помогает бороться с изменением климата. CDR охватывает широкий спектр методов, включая как естественные процессы, такие как лесоразведение и восстановление экосистем, так и технологические решения. Эти технологии могут быть разделены на несколько основных категорий.

Одной из наиболее перспективных технологий CDR является прямое улавливание CO₂ из воздуха (Direct Air Capture, DAC). Эта технология представляет собой подход к извлечению углекислого газа непосредственно из атмосферы с использованием сложных химических процессов. Специально разработанные установки оснащены мощными фильтрами, которые пропускают через себя огромные объемы воздуха, эффективно улавливая CO₂. Захваченный таким образом углекислый газ может быть закачан под землю либо использован для создания различных полезных продуктов.

Другой важной технологией в арсенале CDR является BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage). Этот метод представляет собой симбиоз производства

биоэнергии и процесса улавливания и хранения углекислого газа. В основе BECCS лежит использование растительных культур, которые в процессе своего роста активно поглощают CO₂ из атмосферы. Затем эти культуры сжигаются для получения энергии, а выделяющийся при этом углекислый газ улавливается. Захваченный CO₂ может быть использован в различных промышленных процессах или закачан под землю для долговременного хранения.

Ускоренная минерализация CO₂ представляет собой еще один перспективный метод в области CDR. Этот процесс, эффективно удаляющий CO₂ из атмосферы на длительный срок, основан на природных геологических процессах, но значительно ускоренных благодаря технологиям. В ходе ускоренной минерализации CO₂ вступает в реакцию с определенными минералами, в результате чего образуются стабильные карбонатные соединения. Эти соединения способны хранить углерод в течение тысячелетий.

Возможно использование океанов в качестве естественных поглотителей углекислого газа. Океаны играют ключевую роль в глобальном углеродном цикле, поглощая значительную часть атмосферного CO₂, и некоторые технологии CDR направлены на увеличение способности океанов поглощать углекислый газ. Это может достигаться путем внесения питательных веществ в определенные участки океана для стимулирования роста фитопланктона, который поглощает CO₂ в процессе фотосинтеза. Также разрабатываются искусственные методы, направленные на усиление природных процессов поглощения CO₂ океанами, такие как использование специальных плавучих устройств для увеличения площади контакта воды с атмосферой.

Важно подчеркнуть, что технологии CDR не являются панацеей и не могут полностью заменить необходимость сокращения выбросов CO₂ в атмосферу. Они должны рассматриваться как дополнительный инструмент в комплексной стратегии по борьбе с изменением климата. Технологии CDR призваны дополнять усилия по ограничению выбросов CO₂, создавая необходимый баланс и помогая достичь целей по сокращению концентрации парниковых газов в атмосфере.

Экономические аспекты: дорого, но перспективно

Важной частью технологий улавливания и хранения CO₂ является экономическая составляющая. Эти технологии требуют значительных инвестиций в исследования и разработки, а также в инфраструктуру. Не все области применения технологий улавливания и хранения, а также не все элементы технологической цепочки имеют одинаковую стоимость.

Если говорить об улавливании диоксида углерода, то стоимость может сильно варьироваться в зависимости от источника CO₂: от \$15–25 за тонну CO₂ для промышленных процессов, производящих высококонцентрированные потоки CO₂ (например, производство этанола или переработка природного газа), до \$40–120



На фото

Крупнейший в мире проект по улавливанию углекислого газа из атмосферы (36 тыс. тонн CO₂ в год) введен в строй в 2023 году в Исландии

за тонну CO₂ для процессов с низкоконцентрированными газовыми потоками, таких как производство цемента и выработка электроэнергии¹.

Улавливание CO₂ непосредственно из воздуха в настоящее время является наиболее дорогостоящим. Правда, оценки разнятся и варьируются от \$100 до \$1000 за тонну. Так, согласно недавней оценке IEAGHG², стоимость удаления CO₂ с помощью DAC находится в диапазоне \$200–700 за тонну CO₂.

Если говорить о стоимости транспортировки и хранения, то она также может сильно различаться в каждом конкретном случае, в основном в зависимости от объемов CO₂, расстояния транспортировки и условий хранения. Например, в США стоимость наземного трубопроводного транспортирования находится в диапазоне \$2–14 за тонну, в то время как стоимость подземного хранения имеет еще более широкий разброс. Однако более половины мощностей хранилищ могут быть доступны по цене ниже \$10 за тонну. В некоторых случаях затраты на хранение могут быть даже отрицательными, если CO₂ закачивается в нефтяные месторождения (и постоянно хранится в них) для увеличения добычи и, таким образом, способствует получению большего дохода от продажи нефти³.

Существует значительный потенциал для снижения затрат по всей цепочке создания стоимости CCUS, особенно в связи с тем, что многие технологии все еще находятся на ранних стадиях коммерциализации⁴. Опыт показывает, что CCUS должен стать дешевле по мере роста рынка, развития технологий, снижения затрат на финансирование, достижения экономии за счет масштаба и накопления опыта строительства и эксплуатации объектов CCUS. Эта модель уже наблюдалась для технологий возобновляемой энергии в последние десятилетия.

Снижение затрат уже было достигнуто в крупномасштабных проектах CCUS. Например, стоимость улавливания CO₂ в энергетическом секторе снизилась на 35% в процессе эволюции от первого до второго крупномасштабного объекта CCUS (с 2014 по 2017 г.), и эта тенденция должна продолжиться по мере расширения рынка в следующие два-три года⁵.

Барьеры: как преодолеть?

Широкое внедрение технологий CCUS сталкивается с рядом барьеров и проблем, которые необходимо решить. Одним из основных препятствий для внедрения CCUS являются значительные первоначальные инвестиции, необходимые для улавливания, транспортировки и хранения CO₂. Затраты, связанные со строительством и эксплуатацией инфраструктуры CCUS, включая специализированное оборудование для улавливания, транспортные трубопроводы и безопасные хранилища, могут быть огромными.

Экономической целесообразности проектов по улавливанию, использованию и хранению диоксида углерода препятствует отсутствие надежных финансовых механизмов, которые стимулировали бы компании инвестировать в эту технологию. Эффективным экономическим стимулом для внедрения CCUS может стать ценообразование, которое устанавливает денежную стоимость выбросов CO₂. Однако схемы такого ценообразования еще не получили широкого распространения, а существующие схемы часто не содержат необходимого ценового сигнала, чтобы сделать технологии CCUS экономически привлекательными. Так, в 2024 году только 24% антропогенной эмиссии покрывалось углеродными налогами и системами торговли квотами на выбросы⁶. При этом средняя цена за тонну CO₂ составила \$32, тогда

как для достижения целей Парижского соглашения она должна находиться в диапазоне \$40–80 за тонну.

Несмотря на то, что за последние годы технологии CCUS значительно продвинулись вперед, необходимы дальнейшие исследования и разработки для повышения их зрелости, эффективности и масштабируемости. Повышение эффективности процессов улавливания CO₂, расширение спектра вариантов утилизации CO₂ и оптимизация методов хранения имеют решающее значение для повышения экономической эффективности и конкурентоспособности технологий CCUS.

Отсутствие четкой и упорядоченной нормативно-правовой базы может привести к неопределенности и задержкам в разработке проектов. Навигация по сложным нормативным процедурам и получение необходимых разрешений могут отнимать много времени и средств. Разработка комплексных нормативных актов, учитывающих вопросы безопасности, мониторинга и ответственности, необходима для создания предсказуемой и благоприятной нормативной среды для проектов CCUS.

Потенциал: промышленность и электроэнергетика

Наиболее перспективными сферами применения технологий CCUS являются отрасли промышленности. Но достижение глубокой декарбонизации в тяжелой промышленности (производство цемента, стали и химикатов) — сложная задача по ряду причин.

Во-первых, промышленные объекты служат 30–40 лет. Досрочное закрытие для перехода на новые технологии слишком дорого. Во-вторых, многие процессы требуют температур 1000–1500 °C, что обычно обеспечивается сжиганием ископаемого топлива. Электрические альтернативы пока непрактичны. В-третьих, при некоторых процессах неизбежно выделяется CO₂ (например, при производстве цемента). И в-четвертых, многие промышленные товары торгуются на конкурентных глобальных рынках. Переход на более дорогие низкоуглеродные технологии затруднен из-за риска потери конкурентоспособности.

Однако улавливание, использование и хранение диоксида углерода является относительно передовым и экономически конкурентоспособным вариантом для значительного сокращения выбросов CO₂ при производстве этих важнейших материалов. Также может быть более экономически эффективным модернизировать существующие объекты с помощью CCUS, чем строить новые мощности с использованием альтернативных технологий⁷.

CCUS в настоящее время является самым дешевым вариантом для сокращения выбросов при производстве

Проблема изменения климата требует срочных действий по сокращению выбросов углекислого газа в атмосферу. Технологии улавливания и хранения диоксида углерода представляют собой перспективный комплекс решений для борьбы с этой проблемой. Существует несколько ключевых направлений в рамках CCUS, CCU, а также технологии удаления CO₂ из атмосферы. Последние охватывают как естественные методы, например лесовосстановление, так и высокотехнологичные решения, типа прямого захвата из воздуха.

Несмотря на большой потенциал, широкое внедрение технологий улавливания и хранения сталкивается с рядом барьеров. Ключевые проблемы: высокие первоначальные инвестиции, отсутствие экономических стимулов и четкой нормативной базы. Стоимость улавливания CO₂ сильно варьируется в зависимости от источника и может достигать сотен долларов за тонну при прямом захвате из воздуха. Однако наблюдается тенденция к снижению затрат по мере развития технологий и расширения рынка.

CCUS имеет наибольший потенциал применения в промышленных секторах с высокими выбросами, таких как производство цемента, стали и химикатов. Здесь эти технологии могут быть более экономически эффективными, чем альтернативные методы декарбонизации. Кроме того, CCUS может играть важную роль в энергетике, позволяя модернизировать существующие электростанции и поддерживая интеграцию возобновляемых источников энергии.

некоторых важных химических веществ, таких как аммиак, который широко используется в удобрениях. Предполагаемые затраты на производство аммиака и метанола с использованием CCUS на основе природного газа примерно на 20–40% выше, чем без использования, в то время как стоимость производства на основе электролитического водорода, по оценкам, выше на 50–115%.

CCUS также может быть экономически эффективной стратегией для решения проблемы выбросов от существующих угольных и газовых электростанций. Около трети сегодняшних угольных и газовых станций были построены только в последнее десятилетие; модернизация с помощью CCUS может позволить им продолжать работу и избежать затрат на досрочный вывод из эксплуатации.

CCUS может поддерживать интеграцию возобновляемых источников энергии в энергосистемы. Растущая доля энергии от переменных возобновляемых источников приводит к большей потребности в мощностях, доступных «по требованию» для обеспечения стабильной работы энергосистем. Угольные или газовые электростанции, оснащенные CCUS, могут обеспечить эту мощность и поставлять электроэнергию в любое время.

¹Осипцов А., Гайда И., Грушевенко Е., Капитонов С. Технологии по улавливанию, хранению и использованию углерода (CCUS) — технологическая основа декарбонизации тяжелой промышленности в Российской Федерации. — Сколтех, 2022.

²https://ieaghg.org/publications/technical-reports

³Is carbon capture too expensive? / IEA. Paris, 2021. URL: https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive

⁴Грушевенко Е.В., Капитонов С.А., Ляшик Ю.А., Гайда И.В., Осипцов А.А. Анализ конкурентоспособности технологий CCUS: технологическая готовность и экономика // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. — 2023. — Т. 8. — № 1. — С. 158–176. — URL: https://doi.org/10.51890/2587-7399-2023-8-1-158-176

⁵Осипцов А., Гайда И., Грушевенко Е., Капитонов С. Технологии по улавливанию, хранению и использованию углерода (CCUS) — технологическая основа декарбонизации тяжелой промышленности в Российской Федерации. — Сколтех, 2022.

⁶World Bank. 2024. State and Trends of Carbon Pricing 2024. Washington, DC: World Bank. DOI: 10.1596/978-1-4648-2127-1. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.

⁷The challenge of reaching zero emissions in heavy industry / IEA. — Paris, 2020.

Текст: Ирина Дорохова
Фото: НИИ НПО «ЛУЧ»

Горячий прием для тугоплавких

В Росатоме создан 3D-принтер для высокотемпературной печати



Посмотрите на фотографию. Непосвященный может подумать, что это шеф-повар возле высокотехнологичной жаропрочной духовки, и сейчас он, как фокусник, достанет из нее что-то умопомрачительно вкусное. И это действительно образец высоких технологий, и действительно он связан с высокими температурами, но в металлургии. Это 3D-принтер для печати порошками тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена, тантала, ниобия и проч.) и их композициями. Это одна из первых таких установок в стране.

Происхождение принтера

Идею создать установку для тугоплавких металлов и их композиций в Росатоме предложил первый заместитель генерального директора АО «Наука

и инновации», научный руководитель приоритетного направления научно-технологического развития «Материалы и технологии» Алексей Дуб. Создавали принтер на площадке НИИ НПО «ЛУЧ» ведущие российские разработчики вакуумной техники и автоматизированных систем управления. Например, для управления печатью использовали унифицированную программно-аппаратную платформу, разработанную в рамках комплексной программы «РТТН». В целом критические узлы установки на 90% состоят из российских комплектующих.

Особенности технологии

Принтер работает по технологии селективного электронно-лучевого плавления с высокотемпературным подогревом рабочего объема. Принцип действия в самом общем виде такой: в рабочую камеру засыпается слой порошка, потом рабочий инструмент в соответствии с заложеной программой выборочно сплавляет его. Затем засыпается новый слой,

и процедура повторяется. В конце порошок отводят, а в камере остается изделие, готовое для финишной обработки.

Для принтера, печатающего тугоплавкими металлами и сплавами, выбрали технологию селективного плавления, потому что для альтернативной технологии — прямого выращивания — нужен газ для транспортировки порошка. Из-за необходимости подводить газ невозможно создать в камере принтера необходимый уровень разрядки. Вакуум необходим, потому что тугоплавкие металлы легко реагируют с газами, и это мешает нагреву и плавлению, ухудшает свойства изделия. Кроме того, электронный луч, который плавит порошок, тоже может работать правильно только в вакууме. «При наличии инертных или любых других газов электроны будут сталкиваться с их молекулами, в результате чего будет происходить ионизация, отклонение электронного пучка и другие нежелательные эффекты», — объясняет начальник лаборатории НИИ НПО «ЛУЧ» Сергей Пшенов.

Высокий вакуум в камере принтера создается известным, хорошо отработанным способом: предварительно форвакуумными насосами, затем турбомолекулярными. Таким образом дегазируется не только порошок, но и материал конструктивных элементов.

Особенности устройств

Технологии, применяемые для 3D-принтеров, которые печатают порошками из стали, для тугоплавких материалов не подходят, так как для них необходима более высокая температура в зоне плавления, в области печати и рабочем объеме в целом — для создания и поддержания оптимальных режимов остывания напечатанных частей изделия. «Стандартные электронно-лучевые пушки, которые используются в известных принтерах, не подходят, так как они не могут генерировать пучок электронов с достаточной энергией для плавления тугоплавких материалов. Поэтому для опытного образца установки селективного электронно-лучевого плавления порошка с высокотемпературным подогревом рабочего объема была разработана более мощная электронно-лучевая пушка. Она способна генерировать электронный луч с ускоряющим напряжением до 80 кВ. Кроме того, конструктивные элементы в зоне построения разработаны таким образом, чтобы выдерживать высокие температуры в процессе изготовления изделия», — рассказывает Сергей Пшенов.

Стол построения представляет собой круглую платформу диаметром 300 мм, которая опускается в процессе работы принтера на глубину 350 мм. Эти параметры определяют и максимальные габариты получаемых изделий. Они были выбраны на основе запросов предполагаемых заказчиков.

Особенности порошков

Порошки тугоплавких металлов и сплавов выпускает Научный дивизион Росатома. По своим свойствам

В структуре Росатома создана экосистема использования аддитивных технологий, включающая разработку программного обеспечения, изготовление комплектующих и сборку 3D-принтеров, производство металлических порошков и предоставление услуг 3D-печати. Атомная отрасль выступает одновременно и поставщиком, и крупным заказчиком аддитивного производства.

Аддитивные технологии позволяют производить детали и комплектующие, которые сложно изготовить традиционными методами — с применением литья и механообработки. Трехмерная печать дает возможность снизить массу изделий, объем отходов и сроки производства. Современные 3D-принтеры позволяют перенастраивать параметры печати для изготовления изделий различного назначения, размера, единичного и массового производства.

Продукция 3D-печати используется в разных областях, от ядерных технологий до медицины.

они похожи на те, что используют для печати в 3D-принтерах с лазерными установками. Но для высокотемпературного селективного электронно-лучевого плавления нужен порошок с более крупным стехиометрическим составом (размером «порошок» 60–120 мкм).

Особенности применения

На установке можно производить изделия сложной формы, например узлы турбоагрегатов. Такие детали способны работать в условиях очень высоких, порядка нескольких тысяч градусов Цельсия, температур. Благодаря высокой точности изготовления (около 100 мкм) скорость изготовления изделий увеличивается в три-четыре раза, а себестоимость сокращается на 20% по сравнению с традиционным методом (пепел с последующей механической обработкой).

Следующий этап

Получив первый результат, разработчики будут трудиться над повышением надежности установки, чтобы она могла работать в течение длительного времени. Как отметил Сергей Пшенов, о серийном выпуске таких принтеров в классическом понимании этого термина речь не идет, так как каждая установка, дорогая и сложная, будет дорабатываться в соответствии с пожеланиями заказчиков.

Текст: Сергей Петровский
 Фото: пресс-служба ННГУ им. Н. И. Лобачевского

Искусственный интеллект: новая «весна»

Будут ли компьютеры мыслить как человек

Стремительное развитие и массовое внедрение технологий искусственного интеллекта, происходящее в последние годы, ставит перед учеными совершенно новые задачи по созданию гибридного интеллекта на основе симбиоза искусственных и биологических нейронных сетей. В качестве первоочередных в настоящее время рассматриваются задачи по созданию мозгоподобных самообучающихся спайковых нейросетей и адаптивных нейроинтерфейсов на основе мемристоров. «Вестник атомпрома» разбирается, что это за технологии, для чего они нужны и как они развиваются в России¹.

Четвертая промышленная революция, на пороге которой стоит человечество, предъявляет совершенно новые требования к аппаратному обеспечению технологий искусственного интеллекта (ИИ). Это обеспечение должно по своим возможностям приближаться к возможностям человеческого мозга, то есть естественного интеллекта. Таким образом, развитие технологий ИИ опирается на развитие нейроморфных вычислительных систем в соответствии с известным прогнозом в рамках международной дорожной карты технологий The Future of AI is Neuromorphic.

Кроме компактности и энергоэффективности, к новым аппаратным средствам ИИ предъявляются требования по совместимости как с существующей кремниевой технологией микроэлектроники, так и с живыми системами. Удовлетворение этих требований обеспечит массовое производство аппаратных систем ИИ и реализацию новых гибридных форм ИИ, причем требование совместимости с живыми системами подразумевает, что новые электронные системы должны не только по форме (как сейчас), но и по функциональности воспроизводить свойства элементов нервной системы и мозга.

ИИ: тупик или новые возможности?

В течение последних 50 лет мировая микроэлектроника развивалась в соответствии с законом Мура, который предсказывает экспоненциальное увеличение числа транзисторов на чипе, соответствующее увеличение скорости вычислений и снижение энергопотребления для каждого нового поколения технологий.

В настоящее время эта тенденция приблизилась к физическому пределу: дальнейшее увеличение числа транзисторов уже не приводит ни к увеличению тактовой частоты, ни к снижению энергопотребления. Узким местом является процесс обмена данными между центральным процессором и рабочей памятью вне кристалла, что делает цифровые процессоры на базе традиционной архитектуры фон Неймана крайне неэффективными с точки зрения энергопотребления и временных задержек. При этом объем цифровых данных, требующих обработки, продолжает лавинообразно увеличиваться. Каждые два года создается больше данных, чем было создано за всю предыдущую историю. Неструктурированные данные составляют уже более 80% от общего объема ежедневно генерируемых данных.

Таким образом, потребности в обработке данных растут быстрее, чем возможности современных компьютеров. Очевидно, на данном этапе требуется разработка прорывных технологических решений. Исследования, ведущиеся сегодня в мировых научных центрах, выявили два основных направления решения этой проблемы: во-первых, совмещение вычислений и памяти в единых функциональных блоках и, во-вторых, переход от традиционных фоннеймановских архитектур к нейроморфным, воспроизводящим принципы хранения и обработки информации в нервной системе и мозге.

Новая парадигма

В основе новой, «постцифровой» парадигмы, с развитием которой связывается прорыв в аппаратной

реализации нейроморфных информационно-вычислительных систем, лежит мозгоподобная электронная компонентная база (ЭКБ), представленная мемристорами (аналоговыми резистивными элементами с памятью) и мемристивными устройствами, которые имитируют функции элементов живой нервной системы (нейронов и синапсов). Многообразие возможных вычислительных архитектур обеспечивается универсальным характером мемристивного эффекта, поскольку он может быть реализован как в классических, так и в квантовых системах, как в различных искусственных материалах и структурах (неорганических, органических, молекулярных и т.д.), так и в живых системах.

Такие устройства могут не только хранить логическое значение, задаваемое проводимостью, но и позволяют менять его в том же физическом месте, реализуя новые не фоннеймановские парадигмы «вычислений в памяти». Кроме того, простая структура мемристора обеспечивает создание сверхплотных и в перспективе трехмерных массивов кроссбар, которые естественным образом (на основе законов Ома и Кирхгофа и в аналоговой форме) реализуют операции векторно-матричного умножения, лежащие в основе инференса в традиционных искусственных нейронных сетях с глубоким обучением и новых алгоритмов обучения спайковых нейронных сетей.

Мозгоподобная ЭКБ, представленная мемристорами и мемристивными системами, даст возможность для своевременной диверсификации аппаратного обеспечения, которое в основном накладывает фундаментальные ограничения на каждом цикле развития ИИ, и позволит избежать очередной «зимы» ИИ.

Альтернативные нейроморфные технологии на новой ЭКБ только вступают в стадию зрелости, конкурируя с доминирующими сейчас цифровыми технологиями высокопроизводительных вычислений на основе чипов центрального процессорного устройства, графических ускорителей, тензорных ускорителей и т.д. Согласно международной дорожной карте мозгоинспирированных вычислительных чипов, создание мемристивных нейропроцессоров общего пользования ожидается уже в течение ближайших 5–10 лет.

Сравнение нейроморфных вычислительных систем на основе традиционной и новой элементной базы показывает, что уже сейчас существующие прототипы значительно (на порядки величины) опережают известные вычислительные системы на основе традиционной элементной базы по производительности и энергоэффективности без снижения точности.

Результаты всестороннего исследования и разнообразных применений мемристивных устройств стали за последние годы предметом многочисленных публикаций, которые свидетельствуют о важности и актуальности этого направления на мировом уровне, а также о необходимости реализации генерального плана (комплексных и междисциплинарных проектов) в области биоинспирированных систем, нацеленного

Архитектура фон Неймана — концепция построения компьютеров, предложенная в середине XX века и до сих пор остающаяся ключевой в вычислительной технике. Ее основными особенностями являются единое хранилище для программ и данных, а также последовательное выполнение команд. При этом большая часть энергии при выполнении задачи затрачивается не на само вычисление, а на постоянный перенос данных от памяти к процессору. Это также накладывает ограничения на скорость выполнения вычислений, которые в современных процессорах происходят по большей части последовательно, и это, несмотря на высокую тактовую частоту и даже наличие нескольких ядер, значительно ограничивает пропускную способность. Графические процессоры (видеокарты) благодаря большей параллельности вычисления показывают себя значительно лучше, но проблема тепловыделения и энергоэффективности актуальна и для них. Решить проблему узкого места архитектуры фон Неймана можно, перенеся вычисления непосредственно в память, как это происходит в биологических нейронных сетях.

Мемристор (англ. memristor = memory + resistor) был теоретически описан Леоном Чуа в 1971 году как недостающий пассивный элемент электрических схем, который связывает изменение магнитного потока и электрического заряда. В 1976 году Л. Чуа и С. Канг предложили обобщенное определение мемристора и мемристивных динамических систем, которые описываются общим уравнением, эквивалентным закону Ома и связывающим вход и выход системы, а также набором уравнений состояния, описывающих динамику параметров внутреннего состояния системы. Это определение является универсальным и описывает изменение сопротивления (эффект памяти) на основе различных явлений в неорганических и органических наноматериалах, а также в фотонных и сверхпроводниковых схемах.

Спайковые нейронные сети (СНС) отличаются от классических искусственных нейронных сетей тем, что стремятся использовать биологически реалистичные модели нейронов. Входом и выходом СНС являются не векторы числовых значений, а временные последовательности дискретных событий — спайков. Событийное представление данных позволяет выполнять вычисления асинхронно, задействуя только те фрагменты сети, которые непосредственно участвуют в обработке события. В настоящее время многие крупные компании разрабатывают специализированные нейроморфные процессоры для запуска и обучения СНС. Одним из преимуществ таких чипов является их высокая энергоэффективность по сравнению с традиционными процессорами с архитектурой фон Неймана.

¹ На основе материалов статьи: Михайлов А. Н. и др. На пути к реализации высокопроизводительных вычислений в памяти на основе мемристивной электронной компонентной базы / Михайлов А. Н., Грязнов Е. Г., Лукоянов В. И., Коряжкина М. Н., Борданов И. А., Ццаников С. А., Тельминов О. А., Иванченко М. В., Казанцев В. Б. // Физмат. — 2023. — Т. 1. — №1. — С. 42–64. — DOI: 10.56304/S000000023010021 (Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление №9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах»).

на технологическое освоение новой элементной базы и создание прототипов информационно-вычислительных систем нового поколения.

На пути к нейрогибридным системам

Мемристоры — это очень простые устройства и в то же время очень умные и сложные нелинейные системы, обещающие широкий спектр применений: от микросхем памяти и нейроморфных вычислительных систем в памяти до адаптивных нейроинтерфейсов.

При всех успехах в развитии технологий ИИ и впечатляющем прогрессе в разработке специализированных вычислительных систем, реализующих нейросетевые алгоритмы, все больше внимания уделяется перспективам существенно более глубокой адаптации нейроморфных принципов, чем достигнуто на настоящий момент. Кроме того, что они не только по форме, но и по функциональности приближаются к принципам работы мозга, нейроморфные системы (в их узком понимании), реализуемые на базе мемристоров, обладают существенным потенциалом для достижения нового уровня когнитивных возможностей, в первую очередь за счет возможности эффективной

обработки в реальном времени электрической активности биологических нейронных систем в составе так называемых био- или нейрогибридных систем.

Первые известные из литературы примеры, в которых мемристоры использовались для обработки биоэлектрической активности, либо только фиксируют сам факт коммуникации электронных и биологических систем через единичные мемристорные устройства, либо делают это в отрыве от самих живых систем. Однако существенный прогресс в создании мемристорных нейрогибридных систем уже достигнут: российскими учеными продемонстрирован первый в мире двунаправленный адаптивный нейроинтерфейс на основе передовых решений в области мемристорной электроники и нейроинженерии.

Со стороны живой системы впервые использована культура клеток нейронов гиппокампа на мультиэлектродной матрице с функциональными связями между группами нейронов, пространственно упорядоченными с помощью микрофлюидного чипа. Мемристорная сеть впервые используется не только для решения задачи нелинейной классификации пространственно-временного отклика клеточной культуры на электрические стимулы, но и для контроля ее функционального состояния. А именно: выходные сигналы мемристорной сети соответствуют разным стимулам и используются для адаптивного управления стимуляцией, что позволяет восстанавливать нарушенные функциональные связи в нейрональной культуре.

Большой интерес вызывают перспективы использования таких нейрогибридных технологий для задач нейрореабилитации, восстановления или реорганизации биологических нейрональных функций после развития патологического состояния. Крайне привлекательной как с точки зрения удобной экспериментальной модели, так и с точки зрения использования в реальной нейрогибридной технологии является перспектива создания клеточных культур, в высокой степени воспроизводящих архитектурные особенности мозга.

Таким образом, сочетание высокой энергоэффективности и уникальной масштабируемости мемристорных систем позволяет сделать решающий шаг от нейроморфных вычислительных систем к нейрогибридным системам на основе прямого (физиологического) и безопасного взаимодействия искусственных электронных систем и живых нейрональных систем.

Благодаря этому, мемристорные нейроморфные системы займут достойное место и в медицинских технологиях ИИ: обеспечат не только эффективное решение традиционных задач ИИ, связанных с обработкой и анализом биомедицинских данных, но и создание компактных и энергоэффективных адаптивных систем для замещения/восстановления утраченных или улучшения существующих функций мозга и нервной системы (нейропротезирования и инструментальной коррективы/поддержки/усиления когнитивных способностей человека).

Иллюстрация комплексного (многоуровневого) и междисциплинарного подходов к созданию нейроморфных и нейрогибридных систем на основе мемристоров



Сергей Щаников

Старший научный сотрудник ННГУ им. Н. И. Лобачевского:

— В данный момент исследования нейроморфных систем в России находятся на высоком уровне, сопоставимом с международным. Это та область, в которой у российских ученых есть хороший фундаментальный задел и глубокие знания как о принципах функционирования живых биологических систем, полученные в результате выполнения нейронаучных проектов, так и о технологиях микро- и нанoeлектроники, нацеленных на создание новых видов электронной компонентной базы на основе мозгоподобных принципов хранения и обработки информации. Этот задел на новом междисциплинарном уровне удалось реализовать в рамках научной программы Национального центра физики и математики (НЦФМ, одним из соучредителей выступает госкорпорация «Росатом»).

В частности, ведутся исследования и уже получены новые научные результаты в области разработки мемристорных устройств, обладающих характеристиками, достаточными для практического применения, а также больших кроссбар-матриц, содержащих тысячи таких устройств. Это очень важный шаг, без которого невозможно дальнейшее движение. Параллельно этому в рамках программы НЦФМ развиваются технологии создания масштабируемых нейроморфных систем на базе мемристорных устройств, создаются новые модели спайковых нейронных сетей, а также прорабатываются задачи их применения для обработки сигналов различной природы в нейроинтерфейсах и многое другое. Высокий уровень результатов также подтверждается получением в этом году премии президента РФ профессором ННГУ Сусанной Гордлеевой за разработку моделей и технологий нейроморфного искусственного интеллекта на основе биофизических нейрон-астроцитарных сетевых моделей для мемристорной электроники. Сусанна Гордлеева также является участником программы НЦФМ, и ее идеи составляют существенный вклад в достижение поставленных целей.

Во многих странах есть свои программы или проекты по разработке нейроморфных технологий как в науке, так и в промышленности. США, Европа, Китай, Израиль, Россия и другие страны уже имеют свои нейроморфные процессоры, хоть и работающие на транзисторной технологии и по достаточно формальным алгоритмам импульсных нейронных

сетей, тем не менее демонстрирующие значительные преимущества по энергопотреблению и быстродействию, а самое главное, позволяющие накапливать собственный опыт как в технологиях, так и в поиске новых задач и областей применения.

Поэтому и в России нейроморфные технологии имеют большие перспективы — уже сейчас можно прорабатывать вопросы их дальнейшего применения в области робототехники, например для создания самообучающихся робототехнических комплексов, в системах технического зрения различного назначения, для создания человеко-машинных интерфейсов и нейрогибридных систем. На самом деле область применения нейроморфных систем очень широка и согласуется со всеми стратегическими направлениями развития страны, утвержденными президентом и правительством РФ.

По оценкам крупных аналитических агентств, мировой рынок нейроморфных систем в прошлом году составлял не менее 5 млрд долларов, а прогнозы оценивают в среднем пяти-, шестикратное увеличение к 2030 году. Учитывая, что это достаточно новая область науки и техники, то такие показатели — очень высокие. На российском рынке сейчас также есть крупные потребители, заинтересованные в подобных технологиях, например госкорпорация «Росатом», которая является основным заказчиком по проекту НЦФМ.

В целом везде, где сейчас применяется ИИ, нейроморфные системы будут востребованы, не говоря уже о тех задачах, которые могут быть решены только с их применением. Для российского рынка сейчас как никогда важно иметь отечественную технологию и полный цикл создания нейроморфных чипов, чтобы обеспечивать технологический суверенитет и развивать системы ИИ. Исследования, проводимые в рамках НЦФМ, подтверждают достижимость данной цели.





«АТОМ»: будущее здесь и сейчас

Музей атомной энергии на ВДНХ подводит итоги первого года работы

К первому дню рождения музей «АТОМ» с учетом гостей выставки-форума «Россия» принял более 1,9 млн посетителей. Масштабные фестивали науки, которые проводятся каждый квартал, атмосферная экспозиция, визиты первых лиц государства, иностранных делегатов, возможность полюбоваться закатом на крыше... Гордость за атомную отрасль — многие посетители, выходя из музея, именно так озвучивают свои впечатления. Как появился «АТОМ», чем он жил весь этот год, какие цели достигнуты за первый год работы и какие планы ставит перед собой музей — этому посвящена статья.

«Ты носи меня, река...»

Еще в начале XX века на месте расположения музея «АТОМ» протекала река Каменка. Это обстоятельство усложнило реализацию проекта. В процессе возведения грунтовые воды приподняли здание, и строителям пришлось опускать его на запланированную глубину. Поэтому «АТОМ» иногда метафорически называют подземным кораблем.

«АТОМ» стал первым капитальным строением на ВДНХ за последние 30 лет. Реализация проекта началась с демонтажа обветшавшего павильона № 19, в котором в разные годы располагались выставки «Таджикская ССР», «Татарская АССР», «Механизация и электрификация сельского хозяйства»,

«Главный демонстрационно-испытательный вычислительный центр».

В международном конкурсе проектов нового павильона, посвященного атомной энергетике, победила архитектурная концепция российского проектного бюро UNK. Этот проект называли самым сложным и невероятным, но его воплощение в реальности оказалось еще более впечатляющим, чем чертежи и виртуальный макет.

При строительстве здания был реализован ряд уникальных инженерных решений. Первое, что видят гости ВДНХ, — это две прозрачные стены; 12-метровые стекла фасада и правой торцевой стены создают ощущение легкости, воздушности и прозрачности. Над ними парит, не опираясь на стекла, выносная консоль длиной 53 м. Опора на фундамент, сложная система блоков, противовесов и узлов, спрятанная под потолком, точные инженерные расчеты — все это в совокупности помогло создать лаконичные и плавные линии, визуально не загромождающие пространство.

Музей «АТОМ» — это семь этажей, три из которых располагаются под землей. Причина заключается в ограничении по высотности построек на ВДНХ, а концепция экспозиции была такова, что только наземных площадей не хватило бы для ее размещения. Поэтому здание заглублено на 17 м, и это вносит дополнительные смыслы в содержание. Спускаясь на минус третий этаж, посетители начинают знакомство с историей зарождения и развития атомной промышленности. Двигаясь вверх, от прошлого к будущему, они проходят путь от создания ядерного щита к мирным атомным технологиям и перспективным направлениям развития — от атомных ледоколов нового поколения и радиационных технологий в медицине, сельском хозяйстве и космосе до создания платформы двухкомпонентной ядерной энергетике и термоядерного реактора.

Отдельная история — это постройка фундамента. Рытье котлована могло бы привести к повреждению соседнего павильона «Беларусь», поэтому строили по технологии top down, сверху вниз. Сначала установили фундаментную плиту, потом в пробуренные скважины закачивали бетон под давлением, а затем аккуратно вынимали грунт.

Музею еще не исполнилось и года, а первые награды уже вручены. «АТОМ» получил премию «Время молодых» в номинации «Событие года. Международная выставка-форум „Россия“». Он был признан самым молодежным музеем компании. Также музей получил награду за вклад в создание уникальной экспозиции на Международной выставке-форуме «Россия».

Не секретные материалы

Первые дни работы «АТОМА» сразу задали высокую планку содержательной программы. Уникальную авторскую экскурсию для талантливых старшеклассников в День народного единства, 4 ноября 2023 года,

провел Сергей Кириенко, первый заместитель руководителя Администрации президента РФ.

«Для меня открытие этого павильона определяется двумя словами, или даже чувствами, — гордость и мечта. Все, чем мы сегодня гордимся, когда-то появилось как чья-то мечта, а затем — цель, которую удалось достичь. Такова история создания атомной отрасли. И такова история создания этого павильона. Он родился как мечта, а теперь станет предметом общенациональной гордости, крайне важным местом не только для Москвы, но и для всей страны», — отметил на церемонии открытия павильона Сергей Кириенко.

Одним из первых экскурсоводов на открытии также стал генеральный директор госкорпорации «Росатом» Алексей Лихачев. Это не было запланированным событием: Алексей Евгеньевич, начав отвечать на вопросы других участников экскурсии, в число которых вошли Александр Новак и Сергей Собянин, решил продолжить рассказ об экспозиции.

«На торжественном открытии «АТОМА» мы говорили о той сложной, инновационной, жизненно важной задаче, которую решали первые участники атомного проекта в условиях послевоенной разрухи. Сейчас трудно представить, что такой глобальный проект можно реализовать во время тотального дефицита ресурсов и специалистов, но наши атомщики совершили невозможное. Они заложили мощную основу, благодаря которой сегодня атомная промышленность России ассоциируется с прорывными технологиями, высокой надежностью и хорошей репутацией у зарубежных партнеров. На мой взгляд, самый важный итог работы музея «АТОМ» за этот неполный год — это чувство гордости за нашу страну, с которым посетители выходят, познакомившись с экспозицией», — рассказал Алексей Лихачев.

Одним из идеологов проекта был Андрей Черемисинов, советник генерального директора госкорпорации «Росатом» по информационным проектам.



«Мы разрабатывали содержание таким образом, чтобы оно было понятно и интересно любой аудитории, и теперь можно с полной уверенностью сказать, что наша цель достигнута. При этом у нас огромный потенциал развития, что не менее важно», — подчеркнул Андрей Валериевич.

Приходите в гости

От президента Российской Федерации Владимира Путина до официальных делегаций из 36 стран мира: в список почетных гостей попали и министры из Беларуси и Камбоджи, и послы Израиля и Туниса, и атомщики из Индии и Пакистана, и участники арктической экспедиции Росатома «Ледокол знаний».

Книга отзывов для почетных гостей начинается с фразы «Гордимся нашими достижениями!», написанной президентом России.

«Посещение павильона Росатома стало для меня ярким и захватывающим опытом. Выставка представляет собой яркую демонстрацию любви к ядерным технологиям, содействующим прогрессу, процветанию и энергетической безопасности. Я уверен, что выставка побудит и вдохновит молодые умы глубже погрузиться в атомную науку и технологии ради общего блага будущих поколений на нашей планете. Я был рад получить представление о ключевых вехах многолетнего сотрудничества в области гражданской атомной энергетики между Индией и Россией, которое было важнейшей опорой нашего партнерства. Мы надеемся на дальнейшее ускорение и углубление этого сотрудничества. Я также глубоко признателен президенту Путину за то, что он сопровождал меня на этой чудесной выставке», — поделился впечатлениями премьер-министр Индии Нарендра Дамодардас Моди, посетивший «АТОМ» в сентябре 2024-го.

На следующий день после возвращения из арктической экспедиции Росатома «Ледокол знаний — 2024» гостями музея стали зарубежные участники рейса



к Северному полюсу. «Мне очень нравится история России, мне нравится «АТОМ», здесь очень красиво и очень круто! Приезжай в «АТОМ», и твоя жизнь поменяется!» — дал отзыв об экскурсии Ник Пруна из ЮАР.

Для ценителей уникального контента несколько раз в месяц проходят авторские экскурсии, которые проводят «атомные» спикеры.

«Совсем недавно, 7 сентября, я имел большое удовольствие провести свою вторую авторскую экскурсию по всемирно любимому музею «АТОМ» на ВДНХ. Как и в прошлый раз, по роду профессиональной деятельности я делал акцент именно на термоядерной части экспозиции (благо, представлена она вполне широко). И снова — живая, заинтересованная аудитория всех возрастов: школьники, студенты, взрослые посетители, которые задавали интересные вопросы, делились мнениями. Было крайне приятно видеть в глазах экскурсантов восторг от услышанного о проекте ИТЭР, о нашем вкладе в развитие мировых термоядерных исследований. Я убежден, что авторские экскурсии от специалистов, глубоко погруженных в различные аспекты атомного проекта, — это правильный, нужный формат. Неподдельный отклик аудитории — лучшее тому подтверждение!» — рассказал Александр Петров, руководитель пресс-службы ЧУ «ИТЭР-Центр».

«Когда я провожу авторские экскурсии, я стараюсь глубже раскрыть задуманное в павильоне при его создании. История человечества — это череда великих открытий, которые меняли жизнь людей. В XX веке путь познания привел нас к основе мироздания — к атомам, из которых состоит все сущее, и огромной энергии, которая в них сокрыта. И мир навсегда изменился. Я вожу экскурсии по минус третьему этажу, который посвящен подвигу. Там я говорю о том, что началось все с оружия, но это был не наш выбор. Мы вынуждены были делать бомбу, чтобы обеспечить безопасность страны. Атомная промышленность рождалась напряжением сил всего советского народа. А на переднем крае стояли молодые ученые и инженеры, которые делали, казалось, невозможное, в условиях послевоенной разрухи создавали ядерный щит родины. Эти люди — наша гордость. Благодаря их труду Россия и сегодня остается сильным и независимым государством. Формат авторской экскурсии позволяет рассказать о личных встречах с ветеранами и поделиться с аудиторией их воспоминаниями. А знание текущего момента развития Росатома дает возможность пропагандировать новый облик атомной отрасли, которая вышла за рамки оружия и энергетики и сегодня является лидером технологического развития страны в разных сферах народного хозяйства: от новых материалов и квантовых вычислений до новой мировой логистики и освоения космоса», — подчеркнул Михаил Полуниин, главный редактор корпоративного телевидения «Страна Росатом».

За год экскурсионный отдел подготовил около десятка программ, рассчитанных на разную



аудиторию — от детей с 6 лет до подростков и взрослых — и разную степень подготовленности посетителей. Это и обзорные экскурсии, где демонстрируются самые зрелищные экспонаты, и тематические программы для более детального изучения разных этапов развития атомной отрасли, и интерактивные экскурсии, где посетители становятся активными участниками программы, и особенно полюбившиеся семейной аудитории иммерсивные, игровые экскурсии, где экскурсоводы выступают в роли персонажей.

«Первое, что я сделала, став генеральным директором, — переименовала павильон в музей, потому что именно музей как социальный институт сейчас формирует особое общественное пространство, открытое и дружелюбное. Мы все находимся на рынке свободного времени. За один день современное человечество производит столько же информации, сколько за предыдущие 5000 лет. Музей — это место, где есть темы и поводы для серьезных разговоров, создающих общее информационное поле для детей и родителей», — рассказала Елена Мироненко, генеральный директор фонда «АТОМ».

Внимание посетителей обычно привлекают яркие, атмосферные экспонаты: РДС-1, макет «Царь-бомбы»,

арт-объект «Атомная симфония», вагоны с бочками урана, макет первого в Евразии реактора Ф-1, капитанский мостик атомного ледокола, рубка подводной лодки.

«Музей про атом, поэтому мы рассказываем на наших экскурсиях про атомную энергетику, ядерные технологии. Непростые темы? Да, но наша задача — объяснить их простым, понятным языком. Развеем мифы об атомной энергетике, например донести, почему атомные электростанции считаются самыми безопасными в мире, или показать, что ядерная медицина — это возможность сохранить жизнь людей при тяжелых заболеваниях. Мы рассказываем, какое огромное количество профессий связано с атомной энергетикой, и объясняем, что ядерные технологии не только помогут выжить человечеству, но и сделают его жизнь комфортней и лучше», — прокомментировала Елена Мироненко.

«Экскурсовод — это очень интересная и сложная профессия. Сотрудник нашего музея должен не только обладать знаниями об атомной энергетике и ядерных технологиях, но и уметь доходчиво их донести до посетителей. А в игровых программах, чтобы перевоплотиться в персонажа, ему понадобятся и актерские

качества (открытость, эмоциональность), грамотная речь, образованность и желание постоянно совершенствоваться, потому что атомная наука не стоит на месте. Но прежде всего он должен любить свою работу и, конечно, посетителей, которые к нему пришли», — уверен Максим Несмашных, начальник отдела экскурсионной деятельности.

Формируем будущее

Долгосрочное планирование — неотъемлемая часть жизни госкорпорации «Росатом». Например, срок службы новых АЭС — от 60 лет с продлением до 100. Поэтому тема будущего присутствует во всей событийной программе музея «АТОМ».

Конференция «Производство будущего: вызовы, задачи, возможности» состоялась в июне 2024 года. Ученые, фантасты и философы искали ответ на вопрос о том, как может выглядеть новая российская модель будущего и каких ошибок важно избежать в проектировании его образа. Формулу «материи будущего», в частности, предложил Тарас Вархотов, кандидат философских наук, доцент МГУ: «Опора на опыт, забота о традиции, коллективные интеллектуальные усилия и немного атомной энергии».

Тему будущего для широкой аудитории продолжил фестиваль науки «Лето-2040» в июле 2024 года. Посетителей в холле музея встречали Алиса Селезнева и герои мультфильма «Тайна третьей планеты», на лекциях и панельных дискуссиях обсуждали технологическую сингулярность и искусственный интеллект, а также особенности коммуникации и влияния в интернет-пространстве и реальной жизни. Эксперты, в частности, отметили, что генеративные нейросети нельзя назвать искусственным интеллектом в полной мере этого слова, предсказали падение их популярности в ближайшие несколько лет и подчеркнули парадокс, который на современном этапе развития мешает сделать сильный ИИ. По мнению Дмитрия Чермошнцева, старшего научного сотрудника Российского квантового центра, это противоречие заключается в том, что базы данных для обучения искусственного интеллекта и нейросетей берут из центральной части кривой распределения Гаусса, то есть используют «усредненную», широко распространенную, порой элементарную информацию, тогда как гении (как и сложная информация, нетривиальные алгоритмы, глобальные проблемы) в силу их редкости и эксклюзивности находятся на краю этой кривой.

Первой глобальной выездной программой стала работа сотрудников музея «АТОМ» на Всероссийском молодежном образовательном форуме «Территория смыслов». Инженерные логические игры, фирменный «Хронограф 2.0», выступления отраслевых спикеров привлекли на площадку более 80% участников форума.

Программа решала две задачи. Первая — это привлечь участников на площадку научно-просветительским контентом. И фирменные игры

с «атомным» контентом ее прекрасно решают. Вторая задача — познакомить молодежь с отраслевыми экспертами. Ситуация живого общения с профессионалами высокого уровня дает гораздо больший результат, чем десятки видеороликов. И после лекций с Александром Петровым из российского офиса ИТЭР, Василием Корельским из «Аккую Нуклеар», Михаилом Полуниным, возглавляющим корпоративное телевидение «Страна Росатом», слушатели не расходились, задавали десятки вопросов. Это главный показатель того, что интерес к атомной отрасли и атомным профессиям у них сформировался. «В эпоху информационных технологий интерес к живому общению сохраняется, и главная ценность такой коммуникации — в передаче опыта и эмоциональной насыщенности такой информации», — считает Михаил Полунин.

Для посетителей музея «АТОМ» разработаны мастер-классы, на которых школьники и семейная аудитория могут почувствовать себя настоящими инженерами-исследователями. Квесты по экспозиции помогают погрузиться в атмосферу научного поиска, секретных технологий и развенчивания мифов о радиации. Квизы в игровой форме знакомят участников с атомными технологиями. На иммерсивных спектаклях зрители встречаются с историческими персонажами — знаковыми участниками советского атомного проекта, попадая то на испытания первой атомной бомбы, то в кабинет Курчатова, то на полустанок с вагонами, заполненными немецким ураном.

Больше чем музей

Любое современное музейное пространство — это живой организм, в котором экспозиция и событийная программа органично дополняют друг друга, позволяют посетителям почувствовать себя частью истории своей страны, дают импульс к развитию и пробуждают воображение.

«АТОМ» — музей науки, технологий и будущего. Наша задача — дать посетителю почувствовать уже на входе, что он становится соучастником всего происходящего, что для него найдется место в этом пространстве. И тогда сложные технологии для него станут чем-то близким и вдохновляющим. Одного визита в нашу лабораторию достаточно, чтобы понять, сколько всего может дать будущее», — уверена Елена Мироненко.

Что ждет посетителей «АТОМА» в ближайшее время? 1 ноября музей отмечает свой первый день рождения большим научным фестивалем «Цепная реакция». 9 ноября здесь пройдет фестиваль «ВНауке», который совместно организуют Росатом и «ВКонтакте». А 16 и 17 ноября посетители музея смогут погрузиться в мир современных технологий на фестивале «Композиты без границ».

Планы на будущее масштабные, и уже сейчас можно сказать, что «АТОМ» как главная музейно-выставочная площадка об атомной энергетике стартовал успешно.



О пользе многознания

Возобновляемая энергетика просвещения: как формируется критическое мышление

Еще Гераклит Эфесский утверждал, что «многознание уму не научает». Поэтому, вопреки распространенному представлению, просветительская деятельность — это не про умножение количества знаний, а в первую очередь про формирование критического мышления. В современном мире, перенасыщенном информацией и полярными точками зрения, только этот навык и позволяет выстроить собственное взвешенное представление о проблеме, которую нужно рассматривать комплексно. Это касается, например, возобновляемой энергетике, которая уже много лет вызывает жаркие споры между ее противниками и сторонниками.

Генерация дискуссии

Сегодня, кажется, уже никто не оспаривает влияние антропогенного фактора на изменение климата

и негативную роль, которую играют традиционные энергоносители в этом вопросе. Да и зеленая генерация преодолела болезни роста, главной из которых была стоимость первых поколений оборудования, и превратилась в массовый коммерческий продукт. По данным Международного энергетического агентства, в 2023 году ежегодный прирост мировых мощностей возобновляемых источников энергии увеличился почти на 50% и составил почти 510 ГВт, что является самым быстрым ростом за последние два десятилетия.

И тем не менее полемика вокруг альтернативной генерации не утихает. Как ни парадоксально, в первую очередь предметом споров является степень воздействия зеленых источников энергии на окружающую среду, хотя на заре эпохи ВИЭ основным преимуществом такой генерации считалась именно экологичность. И действительно, при выработке электроэнергии фотоэлектрическими модулями или ветроустановками, геотермальными или гидроэлектростанциями выбросы вредных веществ в атмосферу (как это происходит при сжигании ископаемого



топлива) отсутствуют. Но если мы говорим об «углеродном следе» возобновляемых источников на протяжении всего жизненного цикла, то тут ситуация перестает быть столь однозначной. Те же гидроэлектростанции оказывают существенное влияние на биоценоз в местах своего возведения. А крупные ветроэлектростанции, по мнению некоторых ученых, вполне способны влиять на интенсивность воздушных потоков и, как следствие, на климат.

Еще один камень преткновения — надежность. «Метеозависимость» — самое уязвимое место зеленой энергетике. Шквалистый ветер, пригнавший облака, или, наоборот, полный штиль могут стать большой проблемой для ВИЭ без надежных технологий промышленного накопления энергии, способных запастись избыточную энергию в моменты спада потребления и покрывать дефицит выработки, образовавшийся из-за непогоды. Но именно таких массовых, надежных и, главное, экологических решений по хранению энергии пока нет.

Энергетический баланс для самых маленьких

По разным причинам эти и другие вопросы развития зеленой генерации зачастую остаются за рамками широкой публичной дискуссии, навсегда прописавшись на страницах сугубо научных статей в строгих академических изданиях. Но только не на мероприятиях сети Информационных центров по атомной энергии. Например, для самых юных посетителей ИЦАЭ экспертами из центра Ростова-на-Дону несколько лет назад был разработан специальный урок «Источники энергии», который сегодня входит в программу «Атомных практикумов» — регулярных занятий с учащимися школ, которые проводятся ИЦАЭ по всей стране.

Занятие состоит из двух частей. Сначала школьники изучают основные экологические проблемы, в том числе парниковый эффект, знакомятся с принципами работы различных электростанций, вместе анализируют их плюсы, минусы, место и роль в энергосистемах будущего. Вторая часть — практическая. Участникам занятий предлагается поставить себя на место покорителей космоса и создать устойчивую энергосистему на одной из четырех колонизируемых планет. Каждый из этих воображаемых миров обладает своим уникальным ландшафтом, климатическими особенностями, а также набором доступных ресурсов.

«Юг России в силу климатических особенностей сегодня является центром развития отечественной возобновляемой энергетике. И нам, казалось бы, просто уготовано почетное место в ряду ее горячих сторонников. Но в разработанных нами занятиях по большому счету нет правильных ответов на вопрос, какой должна быть энергосистема будущего. Кроме, пожалуй, одного — сбалансированной. Свои преимущества и недостатки есть у всех источников энергии. Поэтому всегда интересно наблюдать, как ребята сами приходят к этому выводу, разбирают применимость и экономическую целесообразность

Светлана Чурикова

Руководитель ИЦАЭ Ростова-на-Дону:

”

В разработанных нами занятиях нет правильных ответов на вопрос, какой должна быть энергосистема будущего. Кроме, пожалуй, одного — сбалансированной. Свои преимущества и недостатки есть у всех источников энергии. Поэтому всегда интересно наблюдать, как ребята сами приходят к этому выводу.

“



использования каждого технологического решения в заданных условиях выдуманных планет», — отмечает Светлана Чурикова, руководитель ИЦАЭ города Ростова-на-Дону.

«Упрямся — разберемся»

Минусы возобновляемой энергетике — предмет обстоятельного разговора уже со взрослой аудиторией Информационных центров по атомной энергии, который состоялся этим летом с посетителями в Обнинске и Кирове. Тема обсуждения — отдельные аспекты влияния возобновляемой энергетике на окружающую среду.

Так, Александра Болдырева, научный сотрудник Центра энергетических технологий Сколтеха, кандидат химических наук, основатель стартапа «Сансенс-фотомодули для питания умных устройств», рассказала гостям ИЦАЭ Обнинска не только о разнообразии возобновляемых источников энергии и способах их применения, но и о неочевидных побочных эффектах использования этих технологий.



По ее словам, солнечная панель, если совсем упрощенно, похожа на слоеный пирог. В ее основе — полупроводниковый материал, который представляет собой пластину монокристаллического кремния, который, собственно, и преобразует солнечную энергию в электрическую. Для того чтобы снять ток, на него наносят сетку серебряных нитей. Для защиты от внешних воздействий пластина покрывается защитным слоем. Далее все это помещается в специальный стеклянный корпус с металлическим каркасом. И в таком виде солнечная панель монтируется на СЭС и подключается к сети.

Из всей этой конструкции после ее вывода из эксплуатации понятно, что делать, только с металлической рамой: ее можно переплавить или использовать повторно. А вот дальше возникают сложности. Для начала солнечную панель необходимо извлечь из защитной упаковки — снять адгезионный слой. Затем очистить от нанесенной сверху сетки из серебра. И наконец, добравшись до монокристаллического кремния, решить, что делать с ним.

«На сегодняшний день существует несколько проектов, предлагающих разные технологии утилизации, переработки или повторного использования отработавших солнечных батарей. Но пока ни одну из них нельзя назвать полностью рабочей и, что главное, экологически безопасной», — отмечает Александра Болдырева. — Это не первый раз в истории, когда человечество руководствуется принципом

«Упрямся — разберемся». Сегодня история повторяется: прошло примерно 25 лет с момента, когда в строй вступили солнечные электростанции на базе фотоэлектрических модулей первого поколения. Как известно, их производительность со временем снижается. И вот наступил момент, когда встал вопрос утилизации таких солнечных панелей».

С аналогичной проблемой сталкиваются и крупнейшие эксплуатанты ветряков, говорит Ольга Бервицкая, научный сотрудник Института химии и экологии ВятГУ и специалист по водородной энергетике, которую пригласили в ИЦАЭ Кирова поговорить о проблеме утилизации компонентов ветроэнергетических установок.

«Очередная крупная волна выводов из эксплуатации ВЭС была в 2023 году. Симптоматично, что с ней совпал и рост числа научных публикаций, посвященных вопросу утилизации лопастей ВЭУ: в период с 2022 по 2024 год их количество выросло в два раза. Крупные игроки на рынке ВИЭ по-разному пытаются справиться с проблемой. Например, китайские ученые активно ищут способ выделить стекловолоконную основу лопасти, не ухудшив ее свойств, чтобы повторно ее использовать. Однако пока добиться этого не получается. Европейцы делают ставку на ремонт отработавших лопастей и их реэкспорт. Полноценным решением проблемы утилизации этот подход тоже назвать сложно. В США долгое время практиковали захоронение отработавших свой срок лопастей. Так

или иначе, но оказалось, что на сегодняшний день не существует технологии переработки лопастей, которая была бы эффективна, безопасна и при этом коммерчески выгодна», — отметила Ольга Бервицкая.

О способах бескорыстного обогащения

Но зачем вообще говорить на такую специфическую тему? И стоит ли так фокусироваться на ограниченных возобновляемой энергетике, если, кажется, все уже признали это направление генерации необходимым? Александра Болдырева считает: «Тот факт, что мы говорим о недостатках ВИЭ, вовсе не делает нас их противниками. Мне кажется, что сейчас самое главное — это пробудить любопытство, потому что есть ощущение, что люди сегодня преимущественно живут так: каждый в своем информационном пузыре. В этом не было бы ничего плохого, если бы не два обстоятельства: информация за пределами пузыря интересует мало, ну а то, что попало в поле зрения, воспринимается некритически. Такова специфика современного медиапотребления, и не только в вопросах зеленой энергетике. И, конечно, хочется эту ситуацию исправить», — поясняет Александра Болдырева.

И в какой-то степени это сделать удастся. По крайней мере, так полагает Ольга Бервицкая. «Если честно, мне казалось, что экологические аспекты развития возобновляемой энергетике — слишком специфический вопрос, чтобы вызвать какой-то заметный интерес аудитории. Но результат лекции превзошел все мои ожидания. Даже делая скидку на то, что постоянные гости ИЦАЭ — люди подготовленные, меня приятно удивила не только и не столько заинтересованность аудитории в проблемах, которые ее, кажется, напрямую не касаются, но и уровень дискуссии. Даже после сессии вопросов и ответов и завершения лекции ко мне подходили участники мероприятия и задавали, скажем так, очень квалифицированные вопросы, которые и меня заставляли задуматься».

Мнение Ольги Бервицкой тем интереснее, что для нее подобное выступление было своего рода первым опытом после выпускных экзаменов в школе популяризаторов, которую организовал ИЦАЭ Кирова. На протяжении нескольких месяцев группу молодых исследователей готовили к роли просветителей, привлекая специалистов из сферы медиабизнеса: прокачивали навыки публичных выступлений и сценической речи, подготовки презентаций и аргументации в спорах.

«Не могу сказать, что идея самой выступить в роли популяризатора науки увлекла меня сразу. Я с большим уважением отношусь к просветительству, но как слушатель. Я думала, что моих знаний и умений недостаточно для того, чтобы в один момент переместиться из зрительного зала на сцену. И, конечно же, ошибалась», — отметила Ольга Бервицкая. В конечном счете обсуждения, подобные тем, что проходят в ИЦАЭ, полезны не только посетителям центров, пришедшим туда за новыми знаниями. «Во-первых, ты получаешь

Ольга Бервицкая

Научный сотрудник Института химии и экологии ВятГУ, выпускница школы популяризаторов науки (ИЦАЭ Кирова):

”

Как это ни удивительно, но иногда вопросы неподготовленных, но вовлеченных людей заставляют тебя взглянуть на проблему под совершенно неожиданным углом. Это бескорыстная работа, которая обогащает всех участников.

“

те самые soft skills, которые приобретаются только в процессе общения с живой аудиторией. Обладать информацией — это одно, и совсем другое — научиться так ее подавать, чтобы удержать внимание слушателей. Во-вторых, как это ни удивительно, но иногда вопросы неподготовленных, но вовлеченных людей заставляют тебя взглянуть на проблему под совершенно неожиданным углом. Редкий пример бескорыстной работы, которая тем не менее обогащает всех участников», — отмечает Ольга Бервицкая.

Неожиданная «оптика» и расширение кругозора, пожалуй, главное, что могут предложить популяризаторы своей аудитории. В конце концов, все большие открытия начинались именно с рассматривания привычных и обыденных явлений под необычным углом. И хотя знакомство с полярными точками зрения не сделает из нас выдающихся ученых, но и недооценивать просветительство не стоит. Именно со знакомства с максимальным набором фактов, широкой палитрой чужих мнений начинается формирование своего собственного мнения.





Текст: Федор Буйновский,
обозреватель «Вестника атомпрома»

Стамбул — третий Рим

Взгляд на привычную историю Запада с другой стороны

Марк Дэвид Бэр — историк, доктор философии, профессор Лондонской школы экономики и политических наук, автор книг, посвященных в том числе истории Османской империи и ислама. Шестая по счету книга Бэра — «Османь. Как они построили империю, равную Римской, а затем ее потяряли» — недавно вышла в свет на русском языке.

Марк Дэвид Бэр воссоздает перед нами историю Османской империи с ее зарождения до образования на ее месте «новой Турции». Книга позволяет увидеть привычную нам историю мира с «обратной», «не западной» стороны — глазами граждан колоссального государства, которому в течение нескольких веков принадлежала ведущая роль в глобальной геополитике. Это дает пищу для размышлений о современной Турции, о том, кем считает себя элита данного государства, учитывая исторический контекст. «Воображая себя правителями мировой империи и соперничая с португальцами в битве за моря от Египта до Индонезии, османь были заинтересованы в том, чтобы идти в ногу с последними западноевропейскими открытиями», — пишет Марк Бэр.

И Европа, и Азия

Как и ее язык, Османская империя (около 1288–1922 гг.) была не просто турецкой и состояла не только из мусульман. Как и Римская империя, она была многонациональной, многоязычной, многорасовой, многоконфессиональной и простиралась через Европу, Африку и Азию. Это государство включало в себя часть территории, которой ранее правили римляне. Уже в 1352 году и еще в самом начале Первой мировой войны османская династия контролировала часть Юго-Восточной Европы, а в период своего расцвета управляла почти четвертью всей Европы. С 1369 по 1453 год византийский город Адрианополь (ныне Эдирне, Турция), расположенный в юго-восточной европейской области Фракии, являлся второй столицей государства. Константинополь, столица Восточной Римской империи, или Византийской империи, служил престольным городом османов почти пять столетий, начиная с 1453 года. Ему было присвоено

новое название — Стамбул — только в 1930 году, через семь лет после создания Турецкой Республики на руинах империи.

Если в течение почти пятисот лет Османская империя граничила с Востоком и Западом, Азией и Европой, почему была забыта ее двойственная природа? Изменились ли общепринятые представления об этом?

Османь правили страной, которая частично находилась в Азии, но также частично и в Европе. Это была европейская империя, и она остается неотъемлемой частью европейской культуры и истории. Автор предлагает читателю взглянуть на Европу с точки зрения географии в целом, чтобы концептуализировать данный феномен, не опираясь на христианство.

«Представьте себе Европу, остающуюся Европой независимо от того, правят ли ею христиане или мусульмане. Представьте себе, что ее граница не заканчивалась у стен Вены — границы Священной Римской империи, места двух неудачных османских осад. Как же мы тогда могли бы определить Европу и кого мы могли бы отнести к ее населению по праву?» — задается вопросом автор.

Новые римляне

Принято интерпретировать османское завоевание Константинополя в 1453 году как отделение восточных земель Римской империи (Византийской империи) от Европы. Однако автор заявляет, что от этого данная территория не перестает принадлежать Европе, даже когда ею правят мусульмане. По мнению османов, их продвижение в Европу означало, что они были наследниками Византии и, таким образом, должны были считаться новыми римлянами. Эти мусульманские правители считали себя законными наследниками Рима не только в силу присоединения территории, но и из-за своего видения построения универсальной империи. Османов называли мусульманскими императорами и халифами Европы так же часто, как и цезарями Ближнего Востока и римлянами мусульманского мира.

Арабы, персы, индийцы и турки именовали османских правителей цезарями, а их владения «Римской империей», и, начиная с османского завоевания

Константинополя, некоторые западноевропейские писатели делали то же самое. Кто-то утверждал, что османь были потомками троянцев. Других беспокоила законность их претензий на наследование римских прав.

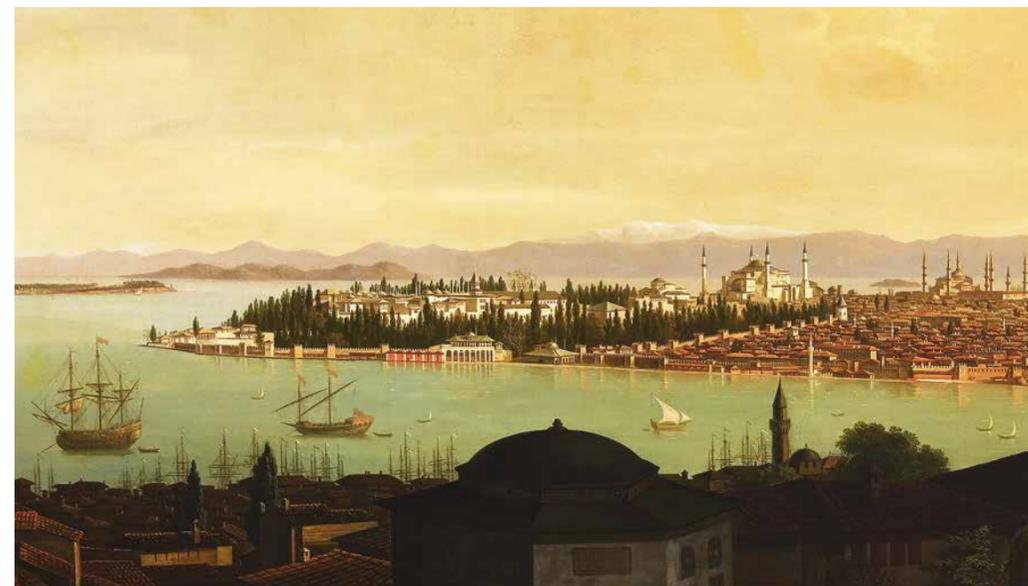
Один папский советник XVI века отметил, что султан «часто говорит, что Римская империя и весь Запад принадлежат ему по праву, поскольку он является законным преемником императора Константина, перенесшего империю в Константинополь».

Вне стандартов

На самом деле с османями обращались так же плохо, как и с византийцами. И Османская, и Византийская империи, чье наследие унаследовала османская династия и чью столицу сделала собственной, были долговечными централизованными империями, по сей день стоящими вне стандартных западных повествований о формировании Европы.

Обе они не соответствуют более поздним западноевропейским этапам развития и истории, таким как Ренессанс и Реформация, и признаны недостаточными.

«Подумайте о том, что приходит на ум, когда мы используем термин «византийский» сегодня: средневековый, отсталый, восточный, экзотический, отличающийся вероисповеданием и непостижимый из-за языковых барьеров и орфографии, — пишет автор. — Поскольку религиозность обеих империй была переоценена, их светские аспекты исследуются реже. В определенный момент они были изображены как декадентские, коррумпированные и находящиеся в состоянии безвозвратного упадка. И византийцы, и османь изображались преимущественно в негативном свете — как антитеза Западу».



На фото

Вид Константинополя, Антуан де Фавре, 1750 год

Обе эти империи считали себя наследниками Рима и претендовали на европейскость. Изложение исторических событий Византии и Османской империи подчинено националистическим и религиозным целям их современников: византийцев — по отношению к грекам, османов — по отношению к туркам. Сегодня эти установки связаны с трактовкой восстановления истории ранее принадлежавшей им империи, например, когда турецкий «неосманизм» прославляет былые завоевания и отрицает преступления османов. История используется в политических целях всякий раз, когда греческие «доноры» представляют университетские исследования древних византийских и эллинических или современных греческих текстов, игнорирующие тот факт, что османь правили на территории современной Греции более пятисот лет. Или когда Турецкая Республика организывает кафедры османских исследований, где не изучается весомое наследие византийских и греческих народов, их социальные и культурные отношения.

«Признание османской династии частью европейской истории позволяет нам увидеть, что османь не были отделены от Римской империи и не стремились к этому, а, скорее, претендовали на то, чтобы унаследовать универсальное правление над завоеванными территориями», — уверен Бэр.

Они не развивались параллельно с Европой; их становление — непризнанная часть истории, которую Запад рассказывает о себе. Однако современная Турция очень хорошо понимает свое место в становлении современной Европы, таких понятий как Ренессанс, эпоха Великих географических открытий, Реформация, Просвещение и научная революция. Не понимать этого самоосознания в попытках построить с Турцией сотрудничество — значит игнорировать очевидные факты.

Фото: АО АСЭ / Никита Грейдин

Начало загрузки имитаторов тепловыделяющих сборок на первом энергоблоке АЭС «Руппур» в Бангладеш (сентябрь 2024 г.)



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 и 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 медиabanке газеты «Страна Росатом».

