

Смена технологического ландшафта мировой энергетики: драйверы и возможности

Кулагин В.А., Грушевенко Д.А., Галкина А.А.

Кулагин Вячеслав Александрович — заведующий отделом исследования энергетического комплекса мира и России ИНЭИ РАН.

SPIN-РИНЦ: 4140-6845
ORCID: 0000-0001-8847-8882
Researcher ID: Z-5621-2019
Scopus Author ID: 56274242400

Грушевенко Дмитрий Александрович — старший научный сотрудник ИНЭИ РАН.

SPIN-РИНЦ: 7801-4079
ORCID: 0000-0002-8660-2576
Researcher ID: AAD-4257-2019
Scopus Author ID: 57039179500

Галкина Анна Александровна — старший научный сотрудник ИНЭИ РАН.

SPIN-РИНЦ: 2474-7057
Researcher ID: M-9885-2013
Scopus Author ID: 56607057900

Для цитирования: Кулагин В.А., Грушевенко Д.А., Галкина А.А. Смена технологического ландшафта мировой энергетики: драйверы и возможности // Современная мировая экономика. Том 2. 2024. №2(6). EDN: ADUJKZ

DOI: <https://doi.org/10.17323/2949-5776-2024-2-2-6-25>

Ключевые слова: технологии в энергетике, межтопливная конкуренция, ВИЭ, себестоимость производства электроэнергии, накопители энергии, НТП.

Аннотация

В статье представлен обзор ключевых ожидаемых изменений технологического ландшафта мировой энергетики. Со стороны секторов конечного

потребления энергии существенно трансформируются требования к энергосистемам и к организации их работы. Потребители предъявляют спрос на все более универсальные, экологичные, экономичные и надежные способы энергообеспечения, все более становится востребовано энергоемкое оборудование с возможностями автономного использования. Научно-технический прогресс (НТП), в свою очередь, дает доступ к новым решениям, одновременно меняя параметры межтопливной конкуренции. Свой вклад вносит и государственная политика, инструменты которой позволяют как мягко воздействовать на привлекательность выбора, так и просто ограничивать возможности использования отдельного оборудования.

Ключевым трендом в энергоснабжении промышленности, коммерческого и бытового сектора становится электрификация. Транспортный сектор переходит от эпохи доминирования нефти к эре межтопливной конкуренции, причем ключевым субститутутом нефтепродуктов также становятся электрические решения.

В самом сегменте генерации электрической энергии растет интерес к безуглеродным и возобновляемым источникам энергии. В отдельных регионах мира новые возобновляемые источники энергии (ВИЭ) уже становятся конкурентоспособны по себестоимости производства энергии (до подачи в сеть) с ископаемой генерацией. Но при росте доли новых ВИЭ в электробалансе увеличиваются расходы на резервирование, накопление, сетевую инфраструктуру, что делает необходимым при принятии решений оценивать затраты в комплексе.

Расширение использования ВИЭ в электросистемах обязательно требует развития технологий накопления, однако текущий уровень НТП в этой сфере делает такие решения крайне дорогими, что оставляет долгосрочные ниши для тепловой генерации, но существенно изменяет режимы ее работы.

Существенно меняются технологии и в области разведки, добычи и транспортировки ископаемых топлив. Это позволяет не опасаться нехватки ресурсов в ближайшие десятилетия, несмотря на растущие уровни добычи и исчерпание наиболее простых для разработки запасов. Но условия работы традиционной энергетики будут меняться.

Введение

Мы находимся на этапе существенной технологической трансформации энергетического сектора. Этому способствуют новые возможности, открываемые научно-техническим прогрессом, усложнение ресурсной базы, рост требований к качеству и вариантам энергоснабжения со стороны конечных потребителей, государственная политика.

В каждом, без исключения, секторе конечного потребления энергии появляются новые решения, расширяется поле для межтопливной конкуренции.

Многообразие предлагаемых потенциально востребованных технологий велико и с каждым днем расширяется. Но выиграет технологическую гонку тот, кто сможет верно расставить приоритеты и направить финансовые и научные усилия в сегменты, которые на практике будут востребованы в будущем. История знает прецеденты, когда даже самые, казалось бы, перспективные технологии, которые должны были совершить революцию в мировой энергетике, заняли на рынках лишь ограниченные ниши или вовсе остались только на бумаге, столкнувшись с непредвиденными трудностями. Так, серия аварий на атомных электростанциях (АЭС) вынудила человечество осторожнее относиться к мирному атому, которому прочили долю 80% в мировом производстве энергии уже к 2020-м годам. Сложности в разработке и большие затраты при добыче газогидратов пока оставили их на уровне экспериментов, вместо 10% доли в мировом балансе к 2025 г. Высокая себестоимость и технологические сложности не позволили человечеству реализовать планы по разработке гелия-3 на Луне. А угрозы продовольственной безопасности и сопутствующее воздействие на окружающую среду не дали биотопливам существенно потеснить в моторах нефтепродукты (подробнее о технологиях, не оправдавших ожиданий в работе [Кулагин 2020]).

Разработка и испытание многих технологий требуют десятилетий до стадии выхода опытного образца из дверей лаборатории на рынок. А сроки завоевания рынка в существенной мере зависят от сегмента. Уникальный вид новой батареи для мобильных телефонов или планшетов будет использоваться в 50% устройств уже через несколько лет от начала процесса коммерциализации, а вот для масштабного внедрения нового процесса нефтепереработки потребуются 25–30 лет, нового ядерного реактора — 50–60 лет. Сроки обуславливаются темпами обновления оборудования и инфраструктуры в каждом сегменте [Кулагин 2020].

Для энергетики с ее длинными инвестиционными циклами и большими горизонтами планирования технологии, которые будут доминирующими и широко востребованными к 2050 г., должны определяться уже сейчас, что делает актуальными подобные обзорные исследования, направленные на поиск ключевых драйверов трансформации энергосистем и поиск оптимальных решений среди имеющихся.

1. Изменение технологий конечного потребления энергии: запросы потребителей и ограничения регулирования

Запросы потребителей к энергосистемам, бытовым процессам и характеристикам обслуживающих их приборов все время растут. Вот только некоторые из них:

- Экономия времени — самого ценного ресурса в нашей жизни. Покупая робот-пылесос, который выполнит уборку вместо нас, посудомоечную или стиральную машину, мы покупаем себе в первую очередь время, отдавая часть своих обязанностей домашним помощникам.
- Экономичность и экологичность. При покупке техники мы часто стремимся к рациональному потреблению, выбирая между изначальной стоимостью и расходами при эксплуатации. Так, более дорогой по цене покупки холо-

дильник класса энергопотребления А+ позволит снизить расход энергии более чем в два раза в сравнении с моделью класса С и за срок эксплуатации окажется дешевле по общим затратам. Некоторые при выборе приборов обращают внимание и на то, насколько экологичны они в производстве и при эксплуатации, из каких материалов сделаны.

- **Удобство.** По мере роста благосостояния цена перестает быть критическим параметром. Все больше обращается внимания на комфортность использования оборудования: способность проводить самоочистку с минимальным вмешательством человека (холодильники, духовые шкафы, пылесосы), возможность использования приборов в движении без переключения шнура между розетками и т.д.
- **Интеллектуальность и управляемость.** Все больший спрос предъявляется на умные устройства, в том числе дистанционно управляемые через интернет. Становятся востребованными системы удаленного управления климатом в помещении, автоматического приготовления пищи, доступного видеонаблюдения, радионяни, умные колонки и т.д. Многие из них появляются в жизни пользователей впервые и тем самым создают дополнительный спрос на энергию.
- **Мощность и длительность работы заряжаемых устройств.** Они тоже нередко выступают важным параметром при выборе потребительской электроники. Более востребованными оказываются телефоны, ноутбуки, планшеты, электросамокаты, которые могут дольше проработать на одном заряде.
- **Универсализация.** Стремление к единообразию портов-разъемов, розеток и штекеров не просто потребительский тренд, а зачастую и ответ на требования регуляторов. Например, к концу 2024 г. все мобильные устройства, продаваемые на территории Европейского союза (ЕС), должны иметь разъем Type-C [EU Parliament 2022]. Эта тенденция характерна не только для бытовой электроники. Вспомним загородные дома: плита на пропане, печь — на дровах, электричество в доме на дизель-генераторе и постоянный контроль за запасом целого набора энергоносителей. Многие стремятся перейти на единый источник и запитать от него все домашние системы.
- **Устойчивость энергоснабжения.** Потребители ищут надежный источник, чтобы в самый неподходящий момент не остаться без необходимой энергии.
- **Автономность.** Временные выезды, освоение новых территорий и потребность в энергии проживающих на удалении от централизованной инфраструктуры потребителей вынуждают искать оптимальные решения автономного энергоснабжения.

Запросы потребителей формируют и требования к энергоснабжению коммерческого и бытового сектора. Главным трендом тут будет рост потребности в электрификации и решениях по аккумулярованию энергии.

Благодаря развитию технологий расширяется число альтернатив и поле для межтопливной конкуренции в системах обогрева помещений и нагрева воды. В большинстве случаев использование газа и угля остается самым дешевым вариантом. Причем при централизованном теплоснабжении это позволяет

повысить коэффициент полезного действия (КПД) станций за счет полезного отвода тепла. Но параллельно растет привлекательность и электрических устройств различного типа — как для дополнительного нагрева, так и для создания более комфортных условий в местах, где это не позволяют сделать централизованные системы (теплые полы, входные зоны и пр.). Отдельное внимание следует уделить автономным объектам, не подключенным ни к централизованным системам отопления, ни к газовым сетям. Здесь появляется широкий выбор. При наличии электричества оно становится одним из удобных решений. Но есть варианты и при полной автономности: бензиновые и дизельные генераторы, газовые установки на сжиженных углеводородных газах (СУГ) и метане (в газообразном или сжиженном виде), угольные и дровяные печи, а также новые технологии: солнечные панели, тепловые насосы, биогаз. Выбор здесь придется делать с учетом физической доступности источника энергии, цены и экологичности.

При покупке транспортных средств потребитель традиционно делает выбор исходя из набора показателей, по каждому из которых производители соревнуются, стремясь предложить более привлекательное решение — стоимость эксплуатации (входит цена транспортного средства, расходы на обслуживание и заправку), динамика разгона, пробег без дозаправки/дозарядки, комфорт, качество мультимедийных систем, надежность (доверие бренду и применяемым технологиям). Все чаще и сами потребители, и регуляторы обращают внимание на экологичность машины. Важным параметром при выборе является наличие сервисной и заправочной / зарядной инфраструктуры. Кроме того, изменение образа жизни, стремление к повышению повседневного комфорта и НТП привели к появлению принципиально новых видов транспорта: индивидуальных средств малой мобильности (электро-самокатов, электровелосипедов, моноколес), роботов-доставщиков, дронов. И здесь, как и в коммунально-бытовом секторе, одной из ключевых тенденций становится электрификация. Поле межтопливной конкуренции расширяется во всех видах транспорта — для дорожного между нефтепродуктами, природным газом, биотопливами, электроэнергией и водородом [Кулагин и др. 2020], для железнодорожного — между нефтепродуктами и электричеством [Grushevenko et al. 2023], для морского — между нефтепродуктами, аммиаком, метанолом, биотопливами и даже атомными установками.

В промышленности запросы к технологиям энергоснабжения тоже видоизменяются. Традиционно в секторе при выборе энергоресурса следовали трем основным принципам: энергия должна быть дешевой (для снижения себестоимости продукции), безопасной, а энергоноситель должен подаваться устойчиво (для непрерывности техпроцесса). Теперь к этим ориентирам добавляются новые:

- Имиджевая составляющая энергоносителя. Нередко производители выбирают не самые дешевые, а самые экологичные решения, монетизируя свои ESG-ценности в росте стоимости собственных акций [Deloitte 2023]. Но во многих случаях этот выбор имеет точечный демонстрационный характер, без масштабного переоборудования всех производств.
- Автономность энергоснабжения — возможность обеспечить энергией производство, удаленное от сетевой инфраструктуры на новых территориях.

- Качество энергоресурса — современное оборудование становится более требовательно к источнику энергии (класс нефтепродуктов, соответствие параметров электроэнергии установленным значениям и т.д.).
- Оптимизация налоговых выплат. Углеродное налогообложение и пограничные углеродные барьеры заставляют некоторых производителей энергоемкой продукции задуматься об источнике энергоснабжения.

На фоне развития автоматизации и роботизации технологических процессов возрастает спрос на электроэнергию и в промышленном секторе.

Кроме потребительских требований, существенное влияние на набор вариантов энергоснабжения в каждом из секторов оказывает государственная политика, которая позволяет корректировать потребительские запросы и привлекательность использования конкретных решений. Среди наиболее ярких примеров:

- Тарифное, налоговое и ценовое регулирование, которое позволяет искусственно завышать стоимость для потребителя одних решений и снижать стоимость других.
- Стандарты по энергоэффективности, отдающие предпочтение конкретным технологическим схемам для зданий, оборудования, промышленных установок и пр.
- Требования к классам топлив.
- Прямые запреты и ограничения — например, запрет на использование ламп накаливания, продажу определенной тары, запрет на въезд на автомобилях с ДВС в черту города и др.
- Прямое и косвенное субсидирование энергоснабжения — например, подключение к электросетям или к газу не за счет потребителя или по схемам софинансирования.
- Углеродное регулирование.

Набор применяемых инструментов может существенно корректировать изначально сформированный потребителями запрос к системе энергоснабжения и самому уровню потребления.

В перспективе межтопливная конкуренция продолжит расширяться, а спрос на электрическую энергию в секторах конечного потребления будет расти быстрее, чем на любой другой вид энергоносителей, что хорошо видно в прогнозах ИНЭИ РАН [Макаров и др. 2024], Мирового энергетического агентства [IEA 2023], ОПЕК [OPEC 2023] и др.

Таким образом, главным полем боя для топливных альтернатив становится сегмент генерации электрической энергии, а его технологический ландшафт во многом определит будущее мировой энергетики.

2. Генерация электрической энергии: возобновляемая или ископаемая?

В сегменте генерации электрической энергии ключевой вопрос заключается в будущих параметрах межтопливной конкуренции между традиционной генерацией на ископаемых топливах, атомной энергией и возобновляемыми источниками.

В 2021 г. возобновляемые источники обеспечивали 15% потребления первичной энергии в мире. Примерно половина использовалась напрямую в секторах конечного потребления. В основном это биомасса и отходы, которые востребованы, прежде всего, для отопления и приготовления пищи. Вторая половина обеспечивала производство электрической энергии. Из них 40% выработки поступало за счет гидроэнергии, 25% из биоэнергии (биогаз, твердая биомасса, отходы) и оставшиеся около трети из новых ВИЭ (солнечных электростанций (СЭС), ветровых станций (ВЭС), геотермальных станций (геоТЭС), энергия океана и пр.) [IEA 2023]. При этом именно новые ВИЭ в последние 10 лет показывают наибольшие темпы прироста, и именно с ними связываются основные надежды по переходу к новой энергетике. Но реальные перспективы будут зависеть от НТП в каждом из сегментов.

В солнечной энергетике самыми распространенными в настоящий момент являются фотоэлектрические станции из кристаллического кремния, которые преобразуют солнечный свет непосредственно в электричество с помощью фотоэлементов. С 2010 г. они подешевели по себестоимости с 0,43 долл. 2023/кВт·ч до 0,08 долл. 2023/кВт·ч, что в ряде регионов сделало их конкурентоспособными с «традиционными» решениями по стоимости производимого киловатт-часа. Удешевление достигалось в основном за счет масштабирования производств и их переноса из стран ОЭСР в страны развивающейся Азии, где труд и ключевые материалы, из которых производятся панели, существенно дешевле. Кривая обучения технологии уже в значительной степени пройдена, но сохраняется некоторый потенциал для удешевления за счет уменьшения толщины ячеек, увеличения срока службы и оптимизации архитектуры модуля [VDMA 2022; DNV 2023; AEGIR 2022].

Возможные прорывы в фотовольтаике связывают с перовскитными технологиями (чистый перовскит / перовскит-кремниевый тандем), разработка которых ведется в том числе и в России [Akbulatov et al. 2017]. Опытные образцы таких панелей показывают высокие КПД и являются менее затратными относительно традиционных кремниевых в производстве, однако не решена проблема чрезвычайно высокой скорости деградации материала (самый долгий достигнутый срок службы – 1 месяц). Как и для кремниевых панелей, для них характерна проблема неравномерности выработки. Панели показывают максимальную эффективность при определенных параметрах инсоляции, при этом пасмурная погода или, наоборот, излишне жаркая не позволяют выйти на оптимальные параметры работы. Традиционной проблемой солнечной генерации является и отсутствие выработки после захода солнца, и сильное ее снижение в периоды дождя, облачности, в холодное время года.

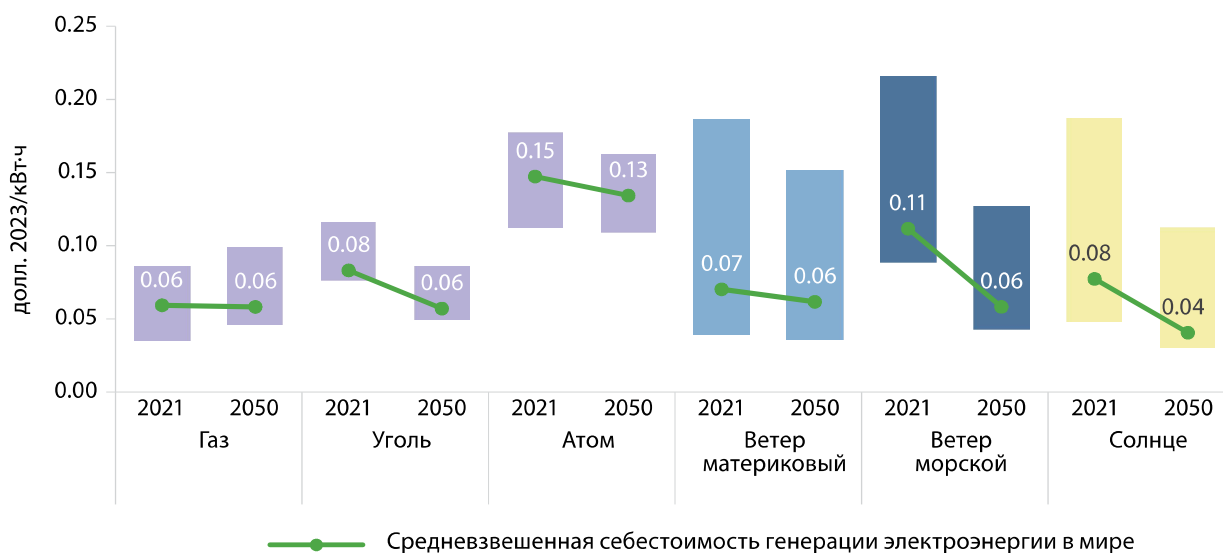
Теоретически проблему ночного времени могут решить технологии концентрированной солнечной энергии (CSP). В таких системах солнечные лучи отражаются от зеркал-гелиостатов и нагревают расположенную по центру станции башню, где хранится разогреваемый до температуры 600 градусов теплоноситель. Даже когда солнце перестает светить, башня может работать как классическая ТЭС, превращая тепловую энергию в электрическую на протяжении нескольких часов. Минусы таких систем (кроме того, что они дороже обычных кристаллических панелей по

себестоимости производства энергии в 2–3 раза [IRENA 2023a] — потребность в больших площадях и наличие рядом значительных ресурсов пресной или опресненной воды, необходимой в технологических процессах.

Еще один распространенный вид ВИЭ — ветровые станции. Здесь за период с 2010 по 2022 г. также наблюдалось значительное снижение приведенных удельных затрат на производство электроэнергии (LCOE) с 0,11 долл./кВт·ч до 0,07 долл./кВт·ч для береговых ВЭС и с 0,20 долл./кВт·ч до 0,11 долл./кВт·ч для офшорных ВЭС. Перспективы дальнейшего удешевления материковой генерации за счет совершенствования роторных систем и материалов лопастей оцениваются в экспертном сообществе в пределах 10% [ETIP WIND 2021; DNV 2022]. Потенциал удешевления офшорных ВЭС выше — порядка 30–40%, в первую очередь за счет ожидаемого роста единичной мощности турбины, оптимизации систем управления и передачи электроэнергии [AEGIR 2022; Makarov 2020].

Уже сегодня в отдельных регионах мира по затратам на выработку единицы энергии (LCOE) генерация СЭС и ВЭС конкурентоспособна с традиционной генерацией. В перспективе, учитывая прогнозируемое снижение затрат, привлекательность ВИЭ должна возрастать (см. рисунок 1 на с. 13).

Рисунок 1. Прогноз изменения себестоимости производства электроэнергии (LCOE) по источникам в 2050 г. в сравнении с 2021 г.

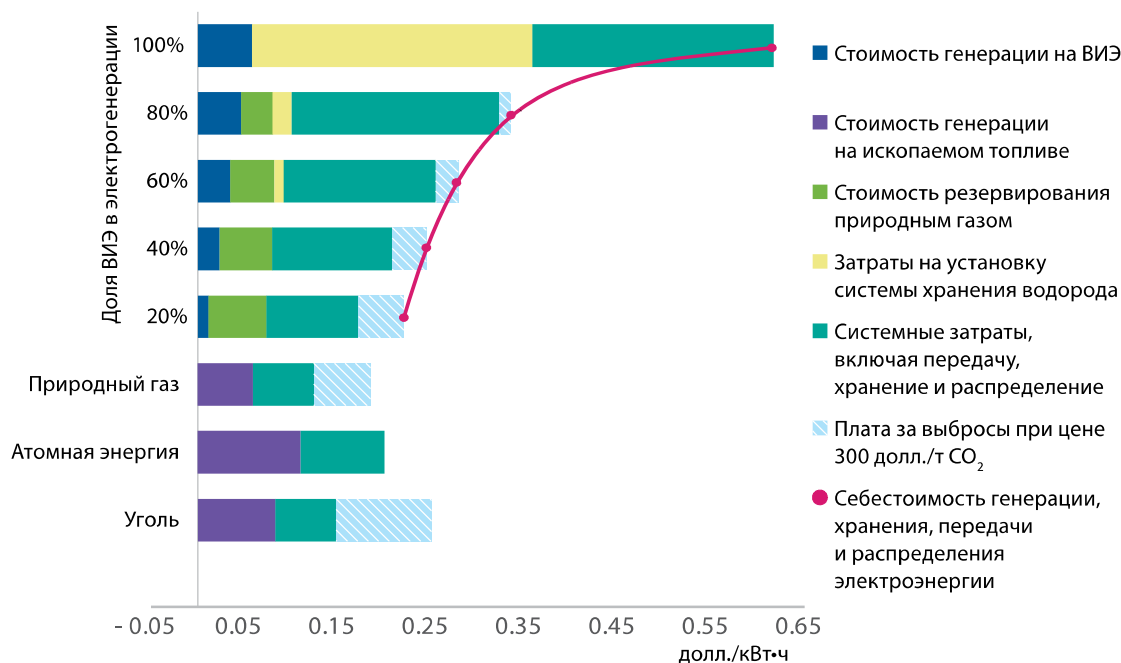


Столбцы показывают диапазон себестоимости генерации электроэнергии по регионам мира. Источник: расчеты ИНЭИ РАН.

Однако энергосистема — это намного больше, чем максимально дешевое производство электроэнергии. На пути к потребителю к себестоимости выработки добавляются расходы на передачу, хранение, распределение электричества, поддержание резервных мощностей, диспетчеризацию и т.д. Для учета системных

эффектов отдельные исследования пытаются перейти от показателя приведенных удельных затрат на производство электроэнергии LCOE к показателю приведенных удельных затрат на производство электрической энергии с учетом добавленной стоимости VALCOE [Karn et al. 2022; Moses 2023].

Рисунок 2. Схематическое соотношение полных затрат на поставку электроэнергии до уплаты налогов с учетом стоимости генерации, системных эффектов, платы за выбросы CO₂-экв. для разных источников энергии



Источник: ИНЭИ РАН.

Главные проблемы ВИЭ-генерации — расхождение пиков спроса на электроэнергию и пиков ее выработки, а также высокая зависимость от погодных условий. Например, солнечные панели не способны покрывать вечерние пики спроса, а в пасмурную или очень жаркую погоду возможны провалы генерации и в дневном режиме, во многих регионах мира выработка сильно падает в зимний период. Не спасает в этом вопросе и ветровая генерация, которая может показывать высокую выработку ночью, а безветренным днем или в периоды сильного ветра вовсе не обеспечивать производство электроэнергии. Как показывает практика наблюдений за ветровой энергетикой в ЕС, провалы выработки могут длиться неделями. Подобные проблемы требуют резервирования возобновляемой генерации или накопления и последующей отдачи в сети произведенной электрической энергии. Причем чем выше доля ВИЭ в энергобалансе, тем большие затраты на резервирование потребуются (поскольку со снижением коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) растет себестоимость генерации на традиционных станциях). Кратно растут затраты и на накопление, если рассматривать режимы не внутрисуточные (днем/ночью заряд, в утренние и вечерние пики отдача), а запас на несколько дней, что требует существенно больших мощностей с очень низким

количеством циклов работы в течение года. Проще говоря, с ростом доли новых ВИЭ в генерации системные затраты увеличиваются непропорционально, и эта логика верна для всех стран мира (см. рисунок 2 на с. 14). Конкретный уровень затрат зависит от доступности ресурсов, исходной структуры генерации электроэнергии, природно-климатических условий, возможностей балансировки перетоками с соседними странами и многих других параметров. В полностью безуглеродных системах (где 100% генерации — ВИЭ) единственным решением для покрытия долгосрочных провалов в генерации является преобразование электричества в другой вид энергии для хранения, в частности в водород. Но такие решения достаточно дороги, как из-за затрат на оборудование (электролизная установка, хранилище водорода, топливный элемент), так и из-за потерь энергии в процессе преобразований [Кулагин и др. 2023]. Так, для сравнения: эффективность водородных систем по циклу «производство – заряд – разряд – подача в сеть» составляет 25–45%, при 85–95% для химических батарей [Environmental and Energy Study Institute 2019], а стоимость хранения в водородных системах (LCOS) превышает 300 долл./МВт·ч, против 150 долл./МВт·ч у химических источников тока [Lazard 2023]. При этом работа с водородом предъявляет особые требования к безопасности.

Существуют ли иные способы производства энергии из возобновляемых источников, обладающие достаточной маневренностью, а значит, не имеющие недостатков, присущие СЭС и ВЭС? Теоретически — да. Это технологии, использующие энергию океана — например, донные турбины-генераторы, приводимые в работу за счет сильного приливного течения, генераторы-буи, использующие практически постоянную энергию волн, станции, работающие за счет океанотермической энергоконверсии на перепаде температур на дне и на поверхности океана [Lewis et al. 2011]. В меньшей степени к таким технологиям можно отнести станции-плотины приливного диапазона, поскольку они работают только в периоды прилива и отлива. Однако по показателю LCOE все «океанические» решения значительно дороже ВЭС и СЭС (см. таблицу 1 на с. 15), не говоря уже о традиционной генерации. Кроме того, до конца не изучены риски их применения с точки зрения окружающей среды — воздействия на морскую флору и фауну.

Таблица 1. Ключевые технологии, использующие для генерации электроэнергии энергию океана

Технология	Стадия отработки	LCOE 2023, долл. 2023/кВт·ч	LCOE 2050, долл. 2023/кВт·ч
Приливного диапазона (станции-плотины)	Действуют коммерческие станции	0,11–0,24	0,11–0,24
Приливного течения (донные турбины-генераторы)	Отрабатываются пилотные проекты	~ 0,9	< 0,14
Преобразование энергии волн (генераторы-буи)	Отрабатываются опытные проекты	~ 1,024	< 0,21
Преобразование тепловой энергии океана (ОТЭК-станции)	Имеются экспериментальные станции	~ 0,26	~0,13

Источник: IRENA 2023b, European Commission 2021, ETIP OCEAN 2020.

Существует и более дешевая альтернатива, чем океанические решения — гидроэлектростанции, более ста лет используемые человечеством. Получение электроэнергии на крупных гидроэлектростанциях (ГЭС) сравнительно дешево — от 0,02 долл. 2023/кВт·ч. В некоторых странах они являются основным источником производства электроэнергии, например в Норвегии их доля превышает 90%. Но в целом по миру ГЭС обеспечивают только 15% в производстве электроэнергии и 8% в первичном потреблении [IEA 2023]. Сдерживающими факторами для развития гидроэнергетики являются ограниченный гидропотенциал во многих странах, географическая разнесенность гидроресурсов и центров потребления, потребность в специфичных ландшафтных условиях для установки. Достаточно большой критике подвергается гидроэнергетика со стороны экологов, в частности из-за нарушения экосистем в зоне затопления. Растущий интерес проявляется к мини-ГЭС и микро-ГЭС, которые теоретически могут размещаться даже на небольших проточных водоемах. Но они часто демонстрируют нестабильную выработку и оказываются дороги по стоимости производства электрической энергии — LCOE микро-ГЭС в среднем по миру начинается от 0,13 долл. 2023/кВт·ч [IRENA 2023a].

Еще один вариант — использование геотермальной энергии, уже получившей достаточно широкое распространение в подходящих для этого местах (выход на поверхность гейзеров, горячих источников и пр.). Рассматриваются и варианты применения геотермальных систем нового поколения, использующих энергию с больших глубин посредством бурения глубоких скважин. Однако пока затраты на производство электроэнергии по таким технологиям превышают 0,45 долл./кВт·ч. Для этих решений все сильно зависит от геотермического градиента (уровня температур на различных глубинах от поверхности Земли) — чем раньше удастся перейти к высоким температурам, тем выше вероятность вхождения станции в зону экономической эффективности.

Дороговизна одних технологий ВИЭ и несовершенство других в части непредсказуемости динамики выработки на фоне активизации низкоуглеродной повестки возвращают интерес к безуглеродным атомным технологиям. Производство электроэнергии на АЭС по показателю LCOE зачастую дороже других безуглеродных альтернатив, а кроме того, требует больших капиталовложений и беспрецедентных (по сравнению с другими способами генерации) мер безопасности, но в отличие от ВЭС и СЭС они могут работать без провалов выработки и для них достаточно внутрисуточного балансирования, что дает существенную экономию на системах резервирования и накопления по сравнению с системами на ВИЭ. Но и здесь не обойтись без резервирующих мощностей или использования накопителей энергии, что делает необходимым анализ ситуации в технологиях сегмента хранения энергии.

3. Технологии накопителей энергии

Технологии накопления важны не только для балансировки выработки электроэнергии на безуглеродных источниках, но и для обеспечения электрификации секторов конечного потребления: они используются в потребительской электронике,

автономных системах энергоснабжения, на транспорте и пр. Несмотря на широкий спектр предлагаемых решений в сфере накопления энергии, все они могут быть классифицированы на:

- Физические системы. В них поступающая от источника генерации электроэнергии преобразуется в кинетическую, потенциальную или тепловую, а затем обратно в электрическую. К таким накопителям относятся: ГАЭС, тепловые накопители, системы со сжатым воздухом, маховики.
- Электрохимические системы. Они осуществляют накопление и последующую отдачу электроэнергии посредством химической реакции. К ним относятся: щелочные батарейки, свинцово-кислые аккумуляторы, литий-ионные, редокс-ванадиевые батареи и пр.
- Водородные системы. В них посредством электролиза воды производится чистый водород, который впоследствии подается на топливный элемент для выработки электричества.
- Электрические – суперконденсаторы и сверхпроводники. Они хранят и отдают электроэнергию без ее преобразования.
- Химико-термические системы. В них электроэнергия преобразуется в топливо (синтез-газ, либо водород), которое затем сжигается.

Одновременно с этим можно выделить пять основных секторов, формирующих потребность в хранении электроэнергии, в каждом из которых развернется конкуренция между различными технологиями накопителей с уникальным набором параметров. Важно отметить, что во многих случаях стоимостные параметры не являются определяющими. Для принятия решения о выборе могут быть важнее габариты, количество циклов заряда/разряда или скорость заряда и продолжительность работы. В сегментах хранения электроэнергии важно еще, для чего именно применяется резервирование и нужны ли дневные режимы работы или хранение в больших объемах на длительный период.

1. Сегмент крупных балансирующих электросистем. Именно он во многом должен принять на себя нагрузку по демпфированию провалов в выработке ВИЭ. Здесь ключевой параметр — нормированная стоимость хранения энергии, учитывая коммерческую направленность подобных проектов. Важным параметром является компактность (единица занимаемой площади на единицу мощности хранилища). Немаловажен и срок службы, поскольку такие объекты могут вписываться в городскую инфраструктуру на многие годы, и энергопотери на цикл заряда/разряда.
2. Сегмент бесперебойного/резервного питания у потребителей на случай аварий и нештатных ситуаций предельно чувствителен к первоначальной стоимости приобретения накопителя (за весь срок службы он может отработать всего один-два раза, если энергоснабжение осуществляется бесперебойно, поэтому показатель LCOS для таких систем теряет смысл). При этом важен рабочий диапазон температур, поскольку источники бесперебойного питания могут требоваться в экстремальных климатических условиях.
3. Сегмент энергоемкой портативной электроники — мобильных телефонов, планшетов, электрических зубных щеток и прочих автономных электро-

приборов. Накопитель должен быть легким и компактным, а также обеспечивать максимальную длительность работы по умеренной цене.

4. Сегмент накопителей для средств малой мобильности — электросамокатов, моноколес, дронов, роботов-доставщиков, складских погрузчиков и пр. Он чувствителен к стоимости накопителя (она не должна существенно влиять на стоимость техники). Значима также удельная выдаваемая мощность, поскольку аккумулятор должен при небольших размерах обеспечивать приличный запас хода.
5. Сегмент накопителей для автотранспорта на электроприводах — электромобилей, электробусов, речных трамваев на электротяге и пр. Он чувствителен к стоимости накопителя (выражается в приведенной стоимости аккумулятора на цикл зарядки за срок владения автомобилем), а также компактности батареи и скорости перезаряда.

Ключевые параметры, которые важны при принятии решения о выборе накопителя в каждом из сегментов, и перспективы изменения этих параметров до 2050 г. представлены в таблицах (см. таблицы 2–6 на с. 18–20).

Таблица 2. Ключевые характеристики технологий хранения электроэнергии для балансирующих систем в электроэнергетике

	LCOS, долл. 2023/МВт·ч		Компактность системы, м куб./МВт·ч	Срок службы в циклах заряда-разряда и годах	КПД на цикл накопления-отдача, %
	2023	2050			
ГАЭС	105	100	500–5000	30–60 лет	70–85
Гравитационные	350	315	>100	30 лет	70–80
Тепловые	211	180	5–15	30 лет	50–60
Маховики	620	555	13–50	20 000–100 000 циклов (более 50 лет)	70–85
Сжатый воздух	230	200	150–500	20–40 лет	40–50
Lead-acid	881	724	10–15	500–600 циклов (1–2 года)	85–95
Li-ion	175	135	1–5	1000–8000 циклов (3–20 лет)	85–95
Na-ion	230	120	3–5	~5000 циклов (15 лет)	85–95
VO-flow	315	205	25–50	~20 000 циклов (до 60 лет)	70–80
H ₂ fuel cell	350	250	1–2	5–30 лет	25–45
Hydrogen-to-power	400	350	н/д	20–40 лет	25–40
SNG-to-power	450	380	н/д	20–40 лет	20–30
СПИН (сверхпродуктивный индукционный накопитель энергии)	Более 3000	Более 2000	>100	20–30 лет	более 95

Источник: составлено авторами.

Таблица 3. Ключевые характеристики технологий хранения электроэнергии для накопителей на стороне потребителей (в сегменте бесперебойного / резервного питания)

	Удельная стоимость емкости, долл. 2023/кВт·ч		Срок службы системы, лет	Оптимальный рабочий диапазон температур, °С
	2023	2050		
Lead-acid	90	90	3–5	+15... +25
Li-ion	120–400	95–300	~ 10	0...+40
Na-ion	151	65	10–15	0...+40
NiCd	350	350	До 20	–20...+40
VO-flow	650	430	20–30	+10...+40
H ₂ fuel cell	750	550	До 30	0...+80
Маховики	1500	1350	До 30	Теоретически не ограничен

Источник: составлено авторами.

Таблица 4. Ключевые характеристики технологий хранения электроэнергии для энергоемкой портативной электроники

	Удельная энергоемкость, Вт·ч/кг (объем энергии, вмещаемый в единицу массы)		Средняя удельная стоимость массы единицы емкости, долл. 2023 г. (стоимость единицы массы)		Время цикла полного заряда
	2023	2050	2023	2050	
Li-ion	200–300	250–350 (потенциально более 1000)	0,45	0,35	5–60 мин
Na-ion	80–120	100–150	0,65	0,45	20–60 мин
NiCd	40–60	40–60	7	7	4–6 ч
NiMH	140–300	140–300	2,75	2,75	4–6 ч

Источник: составлено авторами.

Таблица 5. Ключевые характеристики технологий хранения электроэнергии для средств малой мобильности

	Удельная стоимость единицы емкости, долл. 2023/кВт·ч		Удельная мощность, Вт/кг	
	2023	2050	2023	2050
Lead-acid	90	90	100–250	100–250
Li-ion	141	110	200–500	250–800
Na-ion	150	65	100–200	150–300
NiMH	550	550	250–1000	250–1000

Источник: составлено авторами.

Таблица 6. Ключевые характеристики технологий хранения электроэнергии для автономного транспорта

	Приведенная стоимость батареи на цикл, долл. 2023/цикл заряд-разряд		Масса стандартной батарейки*, кг	Продолжительность цикла полного заряда
	2023	2050		
Li-ion	28	25	150–700	5–60 мин
Na-ion	30	13	350–700	20–60 мин
NiMH	111	111	200–400	4–6 ч
Lead-acid	20	18	1100–1800	6–8 ч

* Емкость средней батареи электромобиля составляет 55 кВт·ч

Источник: составлено авторами.

Практически во всех сегментах литий-ионные аккумуляторы оказываются в списке наилучших решений, что позволяет с уверенностью назвать литий новым золотом. Но в случае нехватки металла и существенного удорожания аккумуляторов с использованием лития возрастет интерес и к альтернативным решениям, например на основе натрия. При этом большинство решений по накоплению все еще достаточно дороги. Поэтому в электроэнергетике по показателю доступности энергии рациональным решением балансирования ВИЭ является резервирование за счет традиционной генерации.

4. Технологии производства и поставок ископаемых топлив

Истощение наиболее доступных месторождений и растущая межтопливная конкуренция в электроэнергетике и секторах конечного потребления стимулируют активизацию НТП в сфере производства, поставок и переработки ископаемых топлив. При этом широко используются достижения смежных отраслей науки: IT, химии, физики, материаловедения и др.

На всех элементах производственных цепочек эффективность работы удается повысить внедрением умных и цифровых решений. Это затрагивает моделирование пластов, умное бурение, интеллектуальное управление трубопроводными потоками, цифровые автозаправочные станции и другие сегменты. Благодаря использованию датчиков и систем роботизированного осмотра появляется возможность своевременно выявить неполадки и не допустить аварийных ситуаций. Цифровые двойники всё более востребованы при отработке вариантов проекта до начала эксплуатации, тестировании нештатных ситуаций и программного обеспечения, обучении специалистов. Развитие отрасли беспилотных летательных аппаратов дает новые возможности для мониторинга месторождений и трасс трубопроводов (визуального и с использованием диагностической аппаратуры), проведения геологоразведки, обеспечения доставки грузов на удаленные объекты. В геологоразведке, добыче и транспортировке углеводородов внедряются алгоритмы искусственного интеллекта с обработкой больших массивов данных.

Программные решения в совокупности с внедрением оборудования для многокустового бурения, удлинением латералей и оптимизацией расхода пропанта на гидроразрыве пласта уже позволили совершить революцию в разработке низкопроницаемых коллекторов. Технологический прогресс продолжается как в этом направлении, так и в части снижения энергозатрат и повышения коэффициента извлечения нефти (КИН) для сверхтяжелых нефтей и керогена, где поверхностный ретортинг все чаще заменяется внутрипластовыми технологиями добычи.

Стремление использовать ресурсы водных акваторий по мере истощения других запасов стимулирует развитие технологий шельфовой и глубоководной добычи. Здесь помимо морских платформ становятся всё более востребованы современные подводные роботизированные комплексы добычи.

Большое внимание компании уделяют методам повышения нефтегазоотдачи — используются различные конфигурации поверхностно активных веществ (ПАВ), отрабатываются варианты с термическим воздействием на пласт и закачкой разных видов газов, включая CO_2 .

В транспортировке по трубопроводам повысить эффективность позволяет улучшение характеристик используемых материалов, увеличение давления, гладкостные покрытия, антифрикционные присадки, роботизация процессов дефектоскопии и ремонта.

При переработке ископаемых ресурсов активно применяются новые решения, направленные на повышение выхода наиболее ценных и дорогостоящих компонент и адаптацию к изменению входящего сырья. При этом в некоторых проектах есть возможность достигнуть хорошего синергетического эффекта за счет переработки сырья для последующего получения топлива более высокого качества и одновременного производства химической продукции.

Значительно расширяются возможности традиционной энергетики в обеспечении автономного энергоснабжения. Появляется оборудование для устойчивого снабжения объектов на основе различных топлив: компримированного природного газа, СУГ, сжиженного газа, угля, дизеля.

Совершенствуется и тепловая генерация, где основные усилия направлены на повышение эффективности сжигания в турбинах, обеспечение маневренности работы, внедрение систем минимизации выбросов.

5. Прогресс в технологиях улавливания, использования и хранения углерода (CCUS)

Низкоуглеродная повестка и планы по ведению налогов на выбросы парниковых газов, а также пограничные углеродные платежи стимулировали исследования в области CCUS, в том числе как элемента «озеленения» ископаемых топлив и улучшения их конкурентных позиций в меняющихся рыночных условиях.

Уже есть точечные проекты в местах добычи по улавливанию CO_2 и погружению обратно в пласт для вытеснения углеводородов. В качестве перспективных направлений использования технологий CCUS рассматриваются нефтегазохимия, переработка, производство водорода, металлургия, цементная промышленность,

тепловая генерация. Однако пока всё ограничивается стадией оценок и экспериментов из-за высоких затрат и необходимости существенной доработки элементов производственных цепочек, начиная со стадии улавливания.

Основными проблемами, сдерживающими расширение использования решений в области CCUS, являются:

- большие географические расстояния между центрами эмиссии CO₂ и приемлемыми местами хранения;
- риски воздействия на окружающую среду процессов CCUS из-за высокого углеродного следа самих подобных производственных цепочек и возможных утечек CO₂ после захоронения;
- снижение КПД тепловой генерации при использовании процессов CCUS из-за высоких энергозатрат процесса;
- необходимость мониторинга и обслуживания хранилищ CO₂ на длительных временных горизонтах с постоянными затратами.

Перспективы CCUS будут определяться как способностью решить часть обозначенных проблем, так и уровнем цен на выбросы CO₂, который напрямую влияет на экономическую эффективность решений. При этом их технологическое совершенствование будет продолжаться за пределами энергетики там, где выделение углекислого газа является частью производственного процесса. Со временем новые решения могут быть и более востребованы в энергетическом секторе.

Заключение

Ключевыми драйверами технологической трансформации энергетики становятся изменения потребительского спроса, приоритеты регулирования, появление новых возможностей и ограничений в секторе из-за научных прорывов и потребности в переходе на более сложные объекты добычи. При этом сама энергетика преобразуется на глазах, переходя от замкнутых топливных рынков к единой взаимосвязанной конкурентной системе.

Запросы общества к энергетическим системам существенно меняются с одновременным появлением принципиально новых видов бытового и промышленного энергопотребляющего оборудования, транспортных средств. Во всех сегментах конечного потребления идет процесс постепенной электрификации. И именно производство электроэнергии становится основным полем межтопливной конкуренции в глобальной энергетике.

Себестоимость производства электроэнергии на базе солнечных установок и ветрогенерации для многих стран мира становится ниже, чем генерация на ископаемых топливах. Отрабатываются и иные безуглеродные решения, которые локально могут проникать в зоны конкурентоспособности. Но при росте доли ВИЭ в балансе выработки существенно увеличиваются и системные затраты (резервирование, хранение, сетевая инфраструктура и пр.), а значит, цены на энергию для конечных потребителей. Таким образом, становится важен поиск баланса между целями по доступности энергии и целями по ее экологичности.

Критическими в безуглеродных энергосистемах, учитывая неравномерную выработку ВИЭ станций, становятся вопросы накопления и хранения энергии. В этом направлении продолжаются активные исследования и отработки технологий. На данном этапе с относительной уверенностью можно говорить, что литий-ионные решения пока являются оптимальными по сравнению с другими альтернативами для большинства сегментов хранения. Однако вызывает опасения высокая зависимость батарей от редких металлов, что, в свою очередь, стимулирует поиск альтернативных решений по хранению электрической энергии. Причем в каждом из сегментов использования батарей оптимум по требуемым параметрам свой, что позволяет занять свои ниши сразу нескольким технологиям. Для долгосрочного хранения электроэнергии (когда нужно покрывать провал генерации длиной в несколько недель) по большому счету нет безуглеродных альтернатив, кроме водорода, который крайне дорог. Это делает резервирование ископаемой генерацией пока практически неизбежной экономически разумной опцией.

НТП в ископаемой энергетике позволит ей, несмотря на исчерпание наиболее доступных месторождений, продолжать обеспечивать высокие уровни добычи и предлагать потребителям новые более эффективные решения по энергоснабжению. Одновременно рынкам газа и угля нужно быть готовыми работать в более стохастичных режимах из-за перепадов в производстве ВИЭ. Фактически ископаемые топлива и ВИЭ становятся не только конкурентами, но и важными взаимодополняющими элементами новой энергетической системы, которая должна предлагать потребителю и доступную, и более экологичную энергию.

Предстоящие десятилетия будут эрой активной технологической конкуренции, причем во всех сегментах производства, поставок и потребления энергоресурсов. При этом в глобальной энергетике будет возрастать доля торговли оборудованием и услугами. И в этой технологической гонке крайне важно не только выбрать верные приоритеты, но и сформировать реально работающие механизмы прохождения технологической инновации от теории до промышленного выпуска.

Хорошие перспективы откроются перед теми компаниями и странами, которые способны будут интегрироваться в меняющуюся систему, обеспечив технологическую готовность к этой адаптации.

Библиография

Кулагин В.А., Грушевенко Д.А. Водородная энергетика: за и против // Экология, энергетика, энергосбережение: бюллетень / под ред. ак. РАН Клименко А.В. М.: ПАО «Мосэнерго». Вып. 2, 2023.

Перспективы развития мировой энергетике с учетом влияния технологического прогресса / под ред. В.А. Кулагина. М.: ИНЭИ РАН, 2020. Режим доступа: https://www.eriras.ru/files/monograph_2020_ed_kulagin_v_a.pdf

Прогноз развития энергетике мира и России 2024 / под ред. А.А. Макарова, В.А. Кулагина, Д.А. Грушевенко, А.А. Галкиной. М.: ИНЭИ РАН, 2024. Режим доступа: <https://www.eriras.ru/files/prognoz-2024.pdf>

AEGIR, 2022. LCOE: update on recent trends (offshore). Режим доступа: <https://www.nrel.gov/wind/assets/pdfs/engineering-wkshp2022-1-1-jensen.pdf>

Akbulatov A.F. et al. Probing the Intrinsic Thermal and Photochemical Stability of Hybrid and Inorganic Lead Halide Perovskites // Journal of Physical Chemistry Letters. 2017. Vol. 8. Issue 6. P. 1211–1218. Режим доступа: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.6b03026>

Deloitte, 2023. How Companies Can Integrate ESG in Capital Allocation – and Why It Matters. WSJ. Jul 19, 2023. Режим доступа: <https://deloitte.wsj.com/sustainable-business/how-companies-can-integrate-esg-in-capital-allocationand-why-it-matters-a546a6c1>

DNV, 2022. Energy Transition Outlook 2022: The Rise of Renewables. Режим доступа: <https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/rise-of-renewables.html#:~:text=From%20today%20to%202050%2C%20wind,sees%20cost%20reductions%20of%2052%25>

DNV, 2023. Energy Transition Outlook 2023. Режим доступа: <https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/download.html>

Environmental and Energy Study Institute. Energy Storage. February 2019 : Fact Sheet. Режим доступа: https://www.eesi.org/files/FactSheet_Energy_Storage_0219.pdf

EU Parliament. Press Release: Long-awaited common charger for mobile devices will be a reality in 2024. April 2022. Режим доступа: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20220930IPR41928/long-awaited-common-charger-for-mobile-devices-will-be-a-reality-in-2024>

ETIP OCEAN, 2020. 2030 Ocean Energy Vision. Режим доступа: https://www.etipocean.eu/knowledge_hub/2030-ocean-energy-vision/

ETIP WIND, 2021. Getting fit for 55 and set for 2050. Режим доступа: <https://etipwind.eu/files/reports/Flagship/fit-for-55/ETIPWind-Flagship-report-Fit-for-55-set-for-2050.pdf>

European Commission, 2021. EU Strategic Energy Technology (SET) Plan. Режим доступа: https://setis.ec.europa.eu/implementing-actions/ocean-energy_en

Grushevenko D., Kapustin N. Modelling of energy consumption in the transport sector // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2552.

IEA, 2023. World Energy Outlook 2023 Free Dataset. Режим доступа: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-outlook-2023-free-dataset-2>

IRENA, 2023a. Renewable Power Generation Costs in 2022. Abu Dhabi. Режим доступа: <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>

IRENA, 2023b. Scaling up investment in clean energy technologies. Abu Dhabi. Режим доступа: <https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023>

Karn A., Raj K.B., Gupta R., Pustokhin D., Pustokhina I., Alharbi M., Vairavasundaram, S., Varadarajan V., Sengan S. An Empirical Analysis of the Effects of Energy Price Shocks for Sustainable Energy on

the Macro-Economy of South Asian Countries // *Energies*. 2022. Vol. 16. Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/en16010363>

Kulagin V. A., Grushevenko D. A. Will Hydrogen Be Able to Become the Fuel of the Future? // *Thermal Engineering*. 2020. Vol. 67. P. 189-201. Режим доступа: <https://doi.org/10.1134/S0040601520040023>

Lazard. LCOE Lazard. April 2023. Режим доступа: <https://www.lazard.com/media/20zoovyg/lazards-lcoeplus-april-2023.pdf>

Lewis A., Estefen S., Huckerby J., Musial W., Pontes T., Torres-Martinez J. Ocean Energy // IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation / Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Seyboth K., Matschoss P., Kadner S., Zwickel T., Eickemeier P., Hansen G., Schlömer S., von Stechow C. (eds.). Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2011. Режим доступа: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/Chapter-6-Ocean-Energy-1.pdf>

Makarov A., Mitrova T. & Kulagin V. Long-term development of the global energy sector under the influence of energy policies and technological progress // *Russian Journal of Economics*. 2020. Vol. 6. No 4. P. 347–357. Режим доступа: <https://doi.org/10.32609/j.ruje.6.55196>

Moses J.B.K, Oludolapo A.O. The levelized cost of energy and modifications for use in electricity generation planning // *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. Supp. 9. P. 495–534. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.egyр.2023.06.036>

ОПЕС, 2023. World Oil Outlook. Vienna. Режим доступа: https://www.opec.org/opec_web/en/publications/340.htm

VDMA, 2022. International Technology Roadmap for Photovoltaic. Results (ITRPV). Режим доступа: <https://www.vdma.org/viewer/-/v2article/render/78984725/>