

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ РОСТА ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

© 2022 г. А. А. Акаев^{a,*}, А. И. Рудской^{b,**}, В. В. Кораблёв^{b,***}, А. И. Сарыгулов^{c,****}

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^bСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

^cСанкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: askarakaev@mail.ru

** E-mail: rector@spbstu.ru

***E-mail: korablev@spbstu.ru

****E-mail: dept.cfr@unecon.ru

Поступила в редакцию 23.05.2022 г.

После доработки 31.05.2022 г.

Принята к публикации 21.06.2022 г.

Резкое изменение геополитической ситуации в мире после начала специальной военной операции России на Украине уже сказывается на мировых энергетических рынках. Постепенный отказ от российских энергоносителей, анонсированный странами Европы, ставит на повестку дня вопрос не только о новых энергетических маршрутах, но и о новых альтернативных источниках энергии. Скорее всего, следует ожидать, что Климатический пакт Глазго не будет выполнен, а поэтапный отказ от угля как самого разрушительного для экологии ископаемого топлива затянется на долгие годы. Невозможность быстрого отказа от ископаемых видов топлива, в первую очередь угля и нефти, уже стала одной из причин поиска новых источников энергии с нейтральным или низким углеродным следом. Энергетика, основанная на возобновляемых источниках, таких как ветер и солнце, получившая быстрое развитие в последние 30 лет, пока не стала серьёзной альтернативой традиционной энергетике, основанной на нефти, угле и газе. Это в значительной степени объясняет повышенный интерес к водороду как источнику энергии. Однако на пути становления водородной энергетики всё ещё существуют значительные барьеры, прежде всего технологического и экономического характера. В статье проводится комплексный анализ основных барьеров на пути использования водорода как конкурентного источника основным видам ископаемого топлива.

Ключевые слова: водород, технологии, барьеры развития, энергетика, экономика, энергетический переход.

DOI: 10.31857/S0869587322100024



АКАЕВ Аскар Акаевич — доктор технических наук, иностранный член РАН, главный научный сотрудник ИМИСС МГУ им. М.В. Ломоносова. РУДСКОЙ Андрей Иванович — академик РАН, ректор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. КОРАБЛЁВ Вадим Васильевич — доктор физико-математических наук, профессор, советник при ректорате Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. САРЫГУЛОВ Аскар Исламович — доктор экономических наук, главный научный сотрудник СПбГЭУ.

Интерес в последние годы к водороду как источнику энергии в значительной степени объясняется всё более жёсткими требованиями к уровню выбросов CO₂, особенно в развитых странах, не имеющих собственных значительных запасов природного ископаемого топлива. К таковым можно отнести практически все страны Европы за исключением Норвегии, а также Японию и Корею. Другим фактором стали политические решения Германии и Японии после аварии на АЭС Фукусима в 2011 г. по полному или частичному сокращению использования атомной энергетики. Ценовой фактор на такие энергоносители, как нефть и природный газ, особенно в периоды самых высоких цен (147 долл./баррель в июле 2008 г., 1924 долл./тыс. куб. м в октябре 2021 г.), также стимулировал интерес к водороду. Немаловажное значение имеет бесценный позитивный опыт, который страны Евросоюза накапливали в течение почти четверти века в области разработки и использования инновационных технологий генерации электричества на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

ОПЫТ РАЗВИТИЯ ВИЭ КАК СЦЕНАРИЙ ПЕРЕХОДА К ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Успехи в сегменте ВИЭ послужили основанием для принятия долговременной энергетической программы ЕС о переходе к 2050 г. на энергетическую систему с нулевыми выбросами CO₂. Важной составной частью этой программы стали ориентиры на полномасштабное использование ВИЭ в электроэнергетическом, теплоснабжающем и транспортном секторе и секторе опреснения воды к 2050 г. Такие амбициозные цели хорошо согласовывались с уже заявленными ранее новыми тенденциями — переходом к третьей промышленной революции, в основе которой лежат зелёные технологии, уменьшающие негативное воздействие на окружающую среду последствий глобального потепления, которые обусловлены антропогенным фактором [1]. В ряде работ одного из авторов данной статьи также рассматривались проблемы, связанные с глобальным потеплением и его возможными последствиями, построением низкоуглеродных сценариев энергетического развития и перехода на ВИЭ [2–4]. Хотелось бы отметить последовательность энергетической политики ЕС: в нынешнем году ещё раз была подтверждена приверженность амбициозным целям, а в качестве промежуточного результата определено сокращение чистых выбросов парниковых газов как минимум на 55% к 2030 г. по сравнению с 1990 г. [5]. Подчеркнём, что показатели и энергетического баланса Евросоюза, и производства электроэнергии отражают значительный рост доли ВИЭ: в производстве электроэнергии она выросла с 16.3% в 2005 г. до 34.6% в

2019 г., а в энергобалансе — с 8.5% в 2004 г. до 18.0% в 2018 г. [6, 7].

Существенный технологический прогресс в развитии возобновляемых источников энергии, прежде всего энергии солнца и ветра (энергоустановки на суше и на море), позволил резко повысить экономическую эффективность проектов на основе ВИЭ. Согласно последним данным о затратах Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA), глобальная средневзвешенная приведённая стоимость электроэнергии (LCOE), то есть средняя расчётная себестоимость производства электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла электростанции (включая все возможные инвестиции, затраты и доходы) солнечной фотоэлектрической энергии (PV) для коммунальных предприятий в период с 2010 по 2019 г. упала на 82%; для наземных энергоустановок — на 39%, а морских — на 29%. Глобальная средневзвешенная LCOE для наземных ветроэнергетических проектов, введённых в эксплуатацию в 2019 г., снизилась до 0.053 долл./кВт.ч, по сравнению с 0.086 долл./кВт.ч в 2010 г. Для морской ветроэнергетики за этот же период данный показатель уменьшился с 0.161 долл./кВт.ч до 0.115 долл./кВт.ч [8]. С 2000 по конец 2019 г. мировые мощности по производству возобновляемой энергии увеличились в 3.4 раза — с 754 гигаватт (ГВт) до 2537 ГВт [9]. Рост мощностей сопровождался и ростом числа занятых в отрасли: их абсолютная численность выросла с 5.6 млн человек в 2012 г. до 9.5 млн в 2019 г. [10].

Однако не все регионы мира демонстрировали такое масштабное замещение традиционных источников энергии на возобновляемые, как страны Евросоюза. Неравномерность технологического роста и выбор разных моделей развития экономики привели к существенному разрыву в использовании “зелёных” технологий между различными странами. Два эмпирических факта, которые будут приведены далее, существенно снижают позитивные ожидания от глобального использования ВИЭ как реальной альтернативы ископаемым видам топлива, по крайней мере, до конца нынешнего столетия. Первый эмпирический факт относится к динамике мирового энергетического баланса за последние 45 лет: с 1973 по 2018 г. (табл. 1).

Прежде всего обращает на себя внимание незначительная доля ВИЭ в мировом энергобалансе — всего 2.01%, хотя за этот период произошёл более чем одиннадцатикратный рост её доли. За это же время практически в одинаковой пропорции возросли как потребление энергоресурсов, так и выбросы CO₂. Если обратиться к энергобалансам за 2018 г. пяти наиболее энергопотребляющих экономик мира (табл. 2), то можно найти

Таблица 1. Динамика мирового энергетического баланса и эмиссии CO₂

| Источники энергии | 1973 | | 2018 | |
|---|-------------|---------|-------------|---------|
| | Объём, Mtoe | Доля, % | Объём, Mtoe | Доля, % |
| Уголь | 1474.0 | 23.73 | 3893.68 | 27.0 |
| Нефть | 2938.22 | 47.3 | 4552.55 | 31.57 |
| Природный газ | 990.94 | 15.95 | 3293.12 | 22.83 |
| Ядерная энергетика | 53.04 | 0.8 | 706.81 | 4.9 |
| Гидроэнергетика | 110.29 | 1.77 | 362.33 | 2.51 |
| Биотопливо и отходы | 638.16 | 10.27 | 1324.21 | 9.18 |
| Другие источники (геотермальные, солнечные, ветряные) | 6.13 | 0.18 | 288.44 | 2.01 |
| Всего | 6210.77 | 100 | 14421.15 | 100 |
| Эмиссия CO ₂ , млн т | 14531.0 | – | 33513.0 | – |

Составлено авторами по данным источников [11, 12].

Таблица 2. Энергетический баланс и эмиссия CO₂ отдельных стран в 2018 г.

| Источники энергии | Китай | | США | | Индия | | Япония | | Россия | |
|--|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|
| | Mtoe | % | Mtoe | % | Mtoe | % | Mtoe | % | Mtoe | % |
| Уголь | 1885.9 | 59.0 | 232.0 | 10.4 | 251.9 | 27.4 | 109.7 | 25.7 | 118.5 | 15.6 |
| Нефть | 639.2 | 20.0 | 803.1 | 36.0 | 229.9 | 25.0 | 166.5 | 39.0 | 151.9 | 20.0 |
| Природный газ | 223.7 | 7.0 | 713.9 | 32.0 | 55.2 | 6.0 | 98.2 | 23.0 | 410.0 | 54.0 |
| Ядерная энергетика | 63.9 | 2.0 | 223.1 | 10.0 | 9.2 | 1.0 | 17.1 | 4.0 | 53.2 | 7.0 |
| Гидроэнергетика | 108.7 | 3.4 | 24.5 | 1.1 | 12.0 | 1.3 | 6.8 | 1.6 | 19.0 | 2.5 |
| Биотопливо и отходы | 95.9 | 3.0 | 102.6 | 4.6 | 180.2 | 19.6 | 9.8 | 2.3 | 3.0 | 0.4 |
| Другие источники (геотермальные, солнечные и ветряные) | 179.1 | 5.6 | 131.6 | 5.9 | 181.0 | 19.7 | 18.7 | 4.6 | 3.7 | 0.5 |
| Итого | 3196.4 | 100 | 2230.8 | 100 | 919.4 | 100 | 426.8 | 100 | 759.3 | 100 |
| Объём эмиссии CO ₂ , млн т | 9 571 | | 4921.1 | | 2307.8 | | 1080.7 | | 1587.0 | |

Составлено авторами по данным источников [13–18].

объяснение всё ещё сохраняющейся высокой доли ископаемых источников энергии.

Самой высокой долей возобновляемой энергии характеризуется экономика Индии – 19.7%, что более чем в 3 раза превышает долю природного газа. Самой низкой – экономика России, всего 0.5%. Три мировых лидера по объёму ВВП – Китай, США и Япония – в сегменте ВИЭ производят 5–6% потребляемой энергии. При этом надо отметить, что доля угля в энергобалансе Китая составляет почти 60%, а ведь именно уголь является основным источником выбросов CO₂, по-

этому вполне объяснимо лидерство этой страны по выбросам. В неразрывной связи с энергобалансом находится производство электроэнергии. Электроэнергетика, с которой связана вторая промышленная революция, существенно влияет на все сферы экономической и социальной жизни. Поэтому данные о структуре мирового производства электроэнергии и установленной мощности электростанций могут быть важным индикатором основных трендов декарбонизации (табл. 3).

Здесь необходимо отметить, что по доле выработки электроэнергии ВИЭ занимают четвертое

Таблица 3. Структура мирового производства электроэнергии и установленной мощности электростанций (на 01.01.2019 г.)

| Генерирующие мощности | Структура выработки электроэнергии | Структура установленной мощности электростанций |
|---|------------------------------------|---|
| Тепловые электростанции (ТЭС – газ и уголь) | 63.2 | 63.5 |
| Гидроэлектростанции (ГЭС) | 15.8 | 18.6 |
| Атомные электростанции (АЭС) | 10.6 | 6.0 |
| Возобновляемые энергоисточники, всего | 7.9 | 11.5 |
| в том числе: ветровые | 5.5 | 7.1 |
| солнечные | 2.4 | 4.4 |
| Прочие | 2.5 | 0.4 |
| Всего: в процентах | 100 | 100 |
| в абсолютных значениях | 25000 млрд кВт.ч | 7000 ГВт |

Составлено авторами по данным источника [19].

место, а в структуре установленной мощности они опережают АЭС, что свидетельствует о целевом использовании ВИЭ – только для производства “зелёной” электроэнергии.

Второй эмпирический факт связан со значительными затратами на субсидирование энергии в мировой экономике. Общие прямые субсидии энергетического сектора в мире, включая ископаемое топливо, возобновляемые источники энергии и атомную энергетику, в 2017 г. достигли почти 634 млрд долл. Среди них преобладали субсидии на ископаемые виды топлива – около 70% (447 млрд долл.) от общей суммы. Субсидии на технологии производства возобновляемой энергии составляют около 20% от общего объёма вложений энергетического сектора (128 млрд долл.), на биотопливо приходится около 6% (38 млрд долл.), ядерную энергетику – не менее 3% (21 млрд долл.). Из 128 млрд долл. расходов на ВИЭ основная доля – 90 млрд долл. – приходилась на страны Евросоюза [20].

Если вновь обратиться к мировому энергобалансу за 2018 г., становится очевидным, что на 2.01% возобновляемых источников энергии приходится 20% всех вложений – непропорционально много. Очевидно, что экономически бедные страны не могут позволить себе развитие ВИЭ как реальной альтернативы ископаемым видам топлива. Летом 2021 г. Еврокомиссия объявила о конкретных механизмах по достижению целей сокращения чистых выбросов парниковых газов как минимум на 55% к 2030 г. по сравнению с уровнем 1990 г. Одним из таких механизмов станет введение трансграничного углеродного налога (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) на импорт в страны ЕС стали, цемента, алюминия, удобрений и электроэнергии. Взимание дан-

ного вида налога начнётся с 1 января 2026 г. Многие российские эксперты рассматривают такой механизм как источник дополнительных средств для реализации амбициозной программы ЕС по декарбонизации собственной экономики [21].

Мировой опыт развития ВИЭ за последние 25 лет даёт нам определённые сигналы относительно того, что ждёт страны, претендующие на широкое использование водорода как реальной альтернативы традиционным ископаемым источникам энергии. Во-первых, речь должна идти о необходимости решения многих технологических задач. В случае развития солнечной и ветряной энергии это были: развитие фотогальванических (PV) технологий – кристаллические кремниевые фотоэлементы и солнечные элементы из теллурида кадмия (CdTe); технологии концентрирования и хранения солнечно-тепловой энергии (CSP); системная интеграция солнечной и ветряной энергии в национальные электрические сети; инженерные задачи по обеспечению стабильной работы и заданного коэффициента мощности источников, то есть совершенствование smart-грид системы в целом. Во-вторых, неизбежны периоды, скорее всего очень длительные, по прямому субсидированию сектора водородной энергетики. В-третьих, становление рынка водородной энергетики займёт несколько десятилетий, что означает значительную нагрузку на национальные бюджеты на длительных временных горизонтах. Очевидно, что это могут позволить себе только развитые страны. Следует также учитывать, что в отличие от энергии солнца и ветра, которая сразу преобразовывалась в электрическую, водород надо ещё получить, то есть здесь присутствует дополнительный технологический передел. Принимая во внимание, до какой степе-

ни “не дружны” водород и металлы, можно предположить высокую степень сложности предстоящих задач по прямому использованию водорода в различных секторах экономики.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА: ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

Сегодня мировое производство водорода составляет около 85 млн т. Основными потребителями являются химическая промышленность – около 70%, нефтепереработка – более 20%, металлургия – около 7%, доля транспортной энергетики не превышает 1% [22]. Что касается источников получения водорода, то 48% приходится на природный газ, 30% – на нефть, 18% – на уголь и только 4% – на электролиз воды [23].

Основной технологией, традиционно используемой для получения голубого водорода, является паровая конверсия метана. Однако в настоящее время всё большее распространение получает технология автотермического риформинга как более экономичного способа массового производства водорода. Оба этих процесса отделяют водород от природного газа (метана) с получением синтез-газа, который затем можно разделить на водород и двуокись углерода. Паровой риформинг метана (SMR) использует пар для отделения водорода от природного газа. Большинство работающих в настоящее время установок SMR производят водород для использования в качестве сырья для других процессов, таких как переработка нефти, производство удобрений или химическое производство. Автотермический риформинг (ATR) – это коммерческая технология, обычно используемая в производстве аммиака и метанола. В настоящее время ATR предлагается в качестве предпочтительной технологии для производства чистого водорода из природного газа, поскольку она позволяет улавливать углерод с более высокой скоростью, чем традиционный SMR, при меньших затратах. По сравнению с SMR, ATR имеет более простой производственный поток с высокой концентрацией углекислого газа. Это облегчает улавливание более высокого процента выбросов углерода в процессе конверсии. Обе технологии производят одинаковые уровни выбросов углерода во время химических реакций, которые отделяют водород от молекулы метана. Однако при использовании SMR обычно только около 60% углерода содержится в потоке технологического газа. Остальные 40% находятся в дымовых газах (выхлопных газах), где они менее концентрированы. Водород, получаемый на основе этих технологий получил название “серого” [24].

Действующие сегодня установки SMR не улавливают углерод из потока дымовых газов, что да-

ло толчок для модернизации технологии – совершенствования процессов улавливания, утилизации и хранения углерода (carbon capture and storage – CCS). Этот процесс направлен на отделение выбросов двуокиси углерода, образующихся при сжигании ископаемого топлива (выбросы от сжигания) или в результате самих промышленных процессов (выбросы от процессов), от других газов и хранение их под землёй. Благодаря этому производство “серого” водорода в комбинации с технологиями по улавливанию и хранению углекислого газа (CCS) позволило получать “голубой” водород. Все технологии улавливания, а их порядка 25, можно разделить по степени освоенности на пять направлений [25, с. 11–12]:

1) с использованием жидких растворителей. Здесь наиболее распространёнными являются традиционные аминовые растворители, широко используемые в производстве удобрений, кальцинированной соды и на заводах по переработке природного газа, а также физические растворители, применяемые в переработке природного газа и на заводах по газификации угля. Ещё примерно восемь различных технологий находятся на различных стадиях разработки;

2) на основе твёрдых абсорбентов. Здесь главными являются технологии переменного давления или переменного вакуума, а также перепада температур (TSA). Ещё порядка шести других технологий находятся на стадиях пилотных или лабораторных испытаний;

3) мембранные технологии на основе полимерных мембран и гибрида криогенного разделения или же полимерных мембран и гибридных растворителей;

4) технологии на основе сплошной петли или химического петлевого сжигания, а также петлевые циклы на основе извести;

5) собственно технологии улавливания CO₂.

Производство “голубого” водорода в зависимости от используемых для его получения технологий имеет разную стоимость (табл. 4). Чистый водород может быть получен и за счёт использования пиролиза углеводородов. Имеются данные о технологиях получения водорода из метана без доступа кислорода (прямой пиролиз, низкотемпературная плазма и др.) и без выбросов CO₂, со ссылками на работы по созданию реакторов, которые ведутся европейскими компаниями (BASF New Business GmbH, BASF SE, VdEh Betriebsforschungs Institut, HTE GmbH, Linde AG, Thyssenkrupp Industrial Solutions AG, TU Dortmund, Verbundnetz Gas) в рамках государственного и частного финансирования [26]. По мнению авторов этой публикации, именно пиролиз водорода из метана – наиболее перспективная с точки зрения затрат технология, поскольку обеспечивает низкое потребление энергии, использует природный

Таблица 4. Последние опубликованные оценки стоимости производства чистого водорода, долл. на один кг продукта

| Источник | В случае использования ВИЭ | В случае сокращения использования ВИЭ | Паровая конверсия метана (SMR) в комбинации с технологиями по улавливанию и хранению углекислого газа (CCS) | Газификация каменного угля в комбинации с технологиями по улавливанию и хранению углекислого газа (CCS) |
|-----------------------|---|--|---|---|
| CSIRO 2018 | 7.7 долл. (коэффициент использования мощности 35%, цена на электроэнергию 6 центов/кВт.ч) | 18.20 долл. (коэффициент использования мощности 10%, цена на электроэнергию 2 цента/кВт.ч) | 1.60–1.90 долл. (при цене за газ \$8/GJ) | 1.8–2.2 долл. (при цене за уголь \$3/GJ) |
| IEA 2020 | 2.3–6.604 долл. (нижний предел – коэффициент мощности 57% и стоимость электроэнергии 2 цента/кВт.ч; верхний предел – коэффициент мощности 57% и стоимость электроэнергии 10 центов/кВт.ч) | Нет данных | 1.4–2.4 долл. (нижняя граница цены за газ – \$3/GJ; верхняя граница цены за газ – \$9/GJ) | 2.05–2.2 долл. (нижняя граница цены за уголь – 43 цента/GJ; верхняя граница цены за уголь – \$1.15/GJ) |
| IRENA 2019 | 2.7–6.9 долл. (нижний предел – ветроэнергия; коэффициент мощности 48%, цена на электроэнергию 2.3 цента/кВт.ч; верхний предел – фотоэлектрическая энергия; коэффициент мощности 26% и цена на электроэнергию 8.5 цента/кВт.ч) | Нет данных | 1.5–2.3 долл. (нижняя граница цены за газ – \$3/GJ; верхняя граница цены за газ – \$8/GJ) | 1.8 долл. (цена угля – \$1.5/GJ) |
| Hydrogen Council 2020 | 6.00 долл. (коэффициент использования мощности 50%, цена на электроэнергию 5.7 центов/кВт.ч) | Нет данных | 2.1 долл. (предполагаются “европейские цены на газ”) | 2.1 долл. (цена за уголь \$60/тонна) |

Источник: [26, с. 11].

газ в качестве сырья, позволяет получать твёрдый углерод в качестве дополнительного продукта и имеет перспективы для коммерциализации, поскольку уже существуют соответствующие промышленные установки [27, с. 431].

Самый чистый водород – “зелёный” – получают путём расщепления молекулы воды на водород и кислород с использованием электролизера. Электролиз не приводит к прямым выбросам парниковых газов, а если входное электричество не связано с выбросами парниковых газов в процессе его производства (например, от солнечной, ветровой, гидроэнергии или атомной энергии), то получают “зелёный” водород. Привлекатель-

ность данной технологии обусловлена практически нулевой стоимостью воды, её повсеместной и неограниченной доступностью, отсутствием вредных выбросов при извлечении водорода и возможностью использования дешёвой энергии крупных ГЭС при их наличии. Однако серьёзными барьерами являются дороговизна электроэнергии, большие затраты первичной энергии на разложение и необходимость использования современного электролизного оборудования. Что касается последнего, то наиболее распространёнными в мире являются электролизеры на основе полимерно-электролитных мембран (ПЭМ), где в качестве электролита используется твёрдый специальный пластиковый материал, и щелоч-

ные электролизеры, в которых в качестве электролита выступает жидкий щелочной раствор гидроксида натрия или калия.

Щелочной электролиз и электролиз на основе ПЭМ — это низкотемпературные процессы, в то время как в случае твёрдых оксидов (SOE) используется высокотемпературный электролиз (~ 500°C). Хотя эта технология ещё не является широко доступной, она имеет ~~потенциал~~ большой потенциал. Одно из преимуществ SOE состоит в том, что более высокие температуры делают электролиз более эффективным, и в период до 2050 г. возможно повышение эффективности преобразования с 74 до 86%. Одно из возможных применений SOE в будущем — её объединение с будущими ядерными источниками энергии, когда можно будет получать как высокотемпературное тепло, так и электричество из одного источника. Мощности используемых электролизеров быстро растут от мегаваттных (МВт) до гигаваттных (ГВт), но радикальных прорывов не предвидится, хотя прогнозируется, что к 2040–2050 годам затраты на электролизеры сократятся вдвое — с нынешних 840 долл. за киловатт до 375 долл. [28]. Крупнейший завод “зелёного” водорода с планируемой производительностью 650 тонн в день планируется ввести в строй в 2025 г. в Саудовской Аравии.

Что касается стоимости производства водорода, то она варьируется в разных регионах в зависимости от цены на газ, стоимости электроэнергии, возобновляемых ресурсов и инфраструктуры. Сегодня “серый” водород стоит 0.90–1.78 долл./кг, “голубой” — от 1.20 до 2.60 долл., а “зелёный” — от 3 до 8 долл. [29]. Международное энергетическое агентство прогнозирует 30-процентное падение цен на “зелёный” водород к 2030 г. в результате снижения стоимости возобновляемой электроэнергии и за счёт эффекта масштаба в производстве водорода [30]. В нынешних условиях конкурентоспособным будет рассматриваться возобновляемый водород, производимый по цене менее 2.5 долл./кг [31]. Более точные расчёты показывают, что даже такие гипотетически низкие цены на электроэнергию, полученную от ветроэнергоустановок, как 20–40 долл./МВт.ч, а также при текущих и будущих инвестициях в щелочные электролизеры в размере около 840 долл./кВт и 200 долл./кВт, возобновляемые источники энергии, как правило, не могут конкурировать с дешёвым природным газом, доступным в промышленности (5 долл./ГДж) [32]. Вместе с тем имеются оптимистичные оценки стоимости производства возобновляемого “зелёного” водорода: 1.4–2.9 долл./кг к 2030 г. и 0.8 долл./кг к 2050 г. Однако эти оценки ставятся под сомнение, а более реалистичными считаются цены на уровне 4.9 долл./кг для США и 4.70 долл./кг для стран Евросоюза [33].

Отдельную проблему представляет вопрос транспортировки произведённого водорода вследствие его значительных потерь. Способы транспортировки включают морские, железнодорожные, автомобильные магистрали и трубопроводы. Основными носителями водорода являются жидкий водород (LH₂), аммиак (NH₃), органический гидрид (MCH) и сжатый водород (CH₂). Водород можно сжижать при температуре –253°C, эта технология уже коммерциализирована. Однако процесс сжижения водорода — энергоёмкий. При использовании в качестве энергоносителя аммиака потери составляют 45%, при использовании метилциклогексана — 43% [34]. Таким образом, в случае транспортировки значительные потери возникают в логистической цепочке, как при герметизации, так и при сжижении. Потери при сжижении составляют от 20% до 45% энергии, содержащейся в водороде [35]. Опыт Германии показал, что модернизация существующих газовых сетей для транспортировки газа с более высоким содержанием метана и более высокой теплотворной способностью для 30% потребителей обошлась казне в 7 млрд евро [36]. Здесь полезно вспомнить практику формирования рынка сжиженного природного газа (СПГ): понадобилось 15 лет, чтобы осуществить переброску первой партии СПГ, после того как технология транспортировки была создана в 1954 г., и более 30 лет, чтобы сформировался рынок этого продукта. Следует ожидать, что и в случае с водородом потребуется значительное время для формирования и развития его рынка [37].

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ

Выше уже отмечалось, что среди пяти ведущих по потреблению энергии экономик мира Россия имеет самую низкую долю ВИЭ в энергобалансе — менее 0.5%. К сожалению, наша страна, богатая углеводородным сырьём, на протяжении последних 30 лет не считала необходимым развивать технологии, связанные с возобновляемыми источниками энергии. Исключения составляют атомная и гидроэнергетика. Такое пренебрежение на уровне государства к вопросам технологического развития обусловило имеющееся на сегодня отставание от развитых европейских стран по всем основным компонентам производства ВИЭ. В то же время очевидно, что широкая география и невозможность обеспечения всех регионов страны в одинаковой мере природным газом (в России уровень газификации к 1 января 2021 г. достиг 71.4%: в городах — 73.7%, в сельской местности — 64.8%) диктуют настоятельную необходимость диверсификации используемых источников энергии, в том числе за счёт возобновляемых.

Намерения отдельных стран принять меры по защите национальных рынков в форме запретов на использование углеродоёмкой продукции, введении технических стандартов, ограничивающих уровень выбросов парниковых газов, маркировки продукции по уровню углеродного следа стимулировали разработку Правительством РФ Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года и Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации. В частности, согласно Стратегии, предусмотрено “создание экспортного сектора по производству водорода на основе углеводородного сырья и за счёт производства низкоуглеродного водорода для выхода на международный рынок торговли водородом и развития отрасли водородных технологий за счёт мероприятий по запуску коммерческих водородных предприятий, создание водородно-производственных комплексов, организация цепочек поставок водорода на внешний и внутренний рынки и наращивание доли водорода в экспортируемой продукции” [38, с. 27]. В Концепции эти задачи поставлены более конкретно: “В период до 2035 года в качестве приоритетных направлений рассматривается производство низкоуглеродного водорода из ископаемого сырья, в том числе с применением технологий улавливания углекислого газа, на базе атомной энерготехнологической станции (с обеспечением улавливания углекислого газа), методом электролиза воды на базе атомной электростанции, гидроэлектростанции и электроэнергетики энергосистемы при условии обеспечения соответствующего углеродного следа, а также на базе мощностей возобновляемых источников энергии в тех регионах, где себестоимость производимого на базе таких источников водорода является конкурентоспособной” [39, с. 6]. Согласно этой Концепции, потенциальные объёмы экспорта водорода из Российской Федерации на мировой рынок могут составить до 0,2 млн тонн в 2024 г., 2–12 млн тонн в 2035 г., 15–50 млн тонн в 2050 г. – в зависимости от темпов развития мировой низкоуглеродной экономики и роста спроса на водород на мировом рынке [39, с. 11]. Однако геополитические события последних месяцев ставят под вопрос саму возможность экспорта водорода из России, поскольку следует ожидать как закрытия для нас рынков ЕС, так и существенного расширения финансирования внутри ЕС всего комплекса поисковых НИР, связанных с практическим использованием водорода в промышленных масштабах.

Постараемся оценить, насколько достижимы для внутренней экономики поставленные Правительством РФ цели. Прежде всего отметим: чтобы не усилить технологическое отставание России от стран-лидеров, необходимо развивать отече-

ственные технологии и реализовывать пилотные научно-технические проекты. В литературе отмечается, что традиционными потребителями водородных технологий как в РФ, так и за рубежом являются потребители спецтехники. Критическим моментом для подобных разработок в настоящее время является отставание по ключевым компонентам: катализаторам, мембранам, биполярным пластинам, газодиффузионным слоям, герметикам [40]. В России имеется определённый задел по получению водорода и синтез-газа методом плазмохимической конверсии углеводородов и гидролиза металлов и сплавов, но для конкурентной борьбы на рынке водородных технологий необходимо опережающее их развитие, как и технологий хранения и транспортировки водорода в химически связанном состоянии [41, 42]. Серьёзной проблемой остаётся физическое и моральное устаревание отечественного электролизного оборудования, основу которого составляют установки типа СЭУ производства “Уралхиммаш”, а твердополимерные аналоги, разрабатываемые РНЦ “Курчатовский институт” и ФГУП “Красная звезда”, до серии не дошли [40].

К основным разработчикам и производителям отечественного оборудования в области водородных технологий надо отнести: ОАО “Уралхиммаш” – щелочные электролизёры типа СЭУ; СКТБ Электрохимии – твердополимерные электролизёры малой производительности, термосорбционные компрессоры водорода; ГК “Инэнержи” – твердополимерные топливные элементы и генераторы на их основе, преимущественно с открытым катодом для транспортных и стационарных применений; VM Power – твердополимерные топливные элементы и генераторы на их основе с открытым катодом для транспортных применений (базовый блок мощностью в 1–1,5 кВт); ФГУП “Крыловский Центр” – электрохимические генераторы на основе топливных элементов с твердоксидным и твердополимерным электролитом; Всероссийский НИИ экспериментальной физики – электрохимические генераторы на основе топливных элементов с твердоксидным электролитом (трубчатого типа); Институт физики твёрдого тела РАН – батареи топливных элементов с твердоксидным электролитом (планарного типа); Институт проблем химической физики РАН – батареи топливных элементов с твёрдым полимерным электролитом; “Центротех” – щелочные топливные элементы и электролизёры (задел АО “Уральский электрохимический комбинат”, возможно мелкосерийное производство) [40].

В области материалов для водородной энергетики необходимо отметить уже разработанную системную концепцию и методы улучшения металлургии и свариваемости высокопрочных сталей для низкотемпературной и криогенной экс-

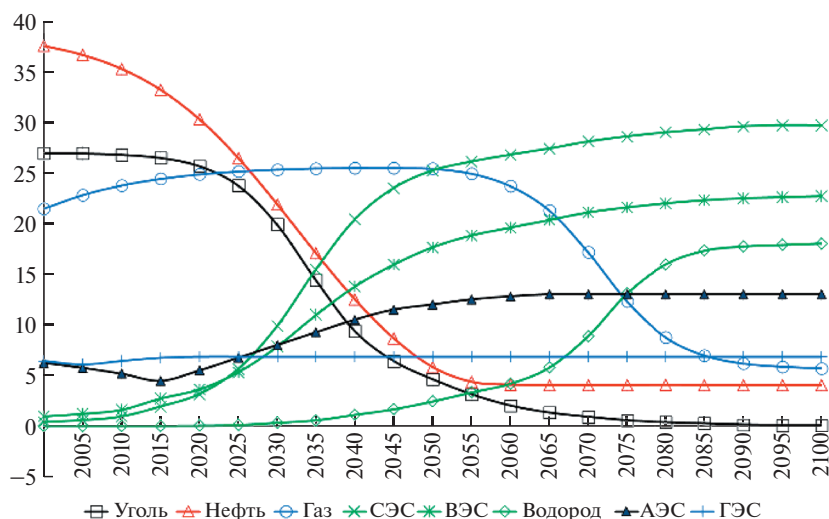


Рис. 1. Динамика изменения структуры мирового топливно-энергетического баланса на XXI век при реализации сценария Net Zero.

плуатации [43]. Определённый научный задел по проблемам устойчивости материалов к воздействию водорода при хранении и транспортировке, а также технологиям получения водорода и газовых смесей создан в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого [44–46]. Также предложены технологии получения полимерных композиционных материалов для хранения водорода, обладающих параметрами, конкурентоспособными по сравнению с лучшими зарубежными образцами. В частности, разработана технология и введена в действие установка по получению однонаправленных термопластических лент. Данная технология позволяет производить композиты на основе углеродных волокон и таких полимеров, как полиамид, полифениленсульфид и полиэфирэфиркетон. Полученный материал был исследован на устойчивость к низким температурам и таким агрессивным средам, как жидкий кислород и водород. В результате было подтверждено, что материал сохраняет свою герметичность после 50 циклов криогенного воздействия. Ведутся работы по созданию технологического оборудования для роботизированной выкладки ленты, позволяющего изготавливать баллоны высокого давления из композиционных материалов [47–49]. В университете создан уникальный стенд для проведения полного спектра исследований газовой проницаемости композиционных материалов. Кроме того, к настоящему времени разработаны технологии газофазного синтеза углеродных наноструктур, включая углеродные нанотрубки, выступающие в качестве адсорбера водорода (способного обеспечить гравиметрическую плотность хранения до 2 массовых %). Материалы на основе углеродных

нанотрубок предложены как перспективные для топливных элементов [50–52].

В настоящее время мы являемся свидетелями, по существу, тектонических изменений на геополитической карте мира, и энергетика становится одним из ключевых элементов этих изменений. Страны Западной Европы, США и Япония, а это наиболее технологически развитые страны мира, в течение 5–10 лет могут полностью отказаться от закупок российских энергоносителей. Это означает начало технологической гонки за промышленное освоение возобновляемых источников энергии. И здесь следует ожидать, что роль водорода, как нового источника энергии, может кардинально измениться. Наиболее оптимальный сценарий 4-го энергетического перехода (2020–2080) к преимущественно безуглеродным ВИЭ и безопасным низкоуглеродным АЭС нового поколения, получивший название Net Zero [53], как показано в работе [54], реализуется только в случае экспоненциального роста водородной энергетики в предстоящие 50 лет (2025–2075) с дальнейшей стабилизацией на уровне 18% в структуре мирового топливно-энергетического баланса (ТЭБ) (рис. 1). По сути, водород должен заместить природный газ в ТЭБ к концу столетия. При реализации этого сценария энергоперехода достигается снижение объёма выбросов углекислого газа в атмосферу в 3 раза к 2070 г. (11 Гт) по сравнению с максимальным объёмом выбросов (рис. 2), наблюдавшимся в 2019 г. (33.3 Гт), что позволит стабилизировать потепление климата на уровне 1.7°C, как того требует Парижское климатическое соглашение 2015 г.

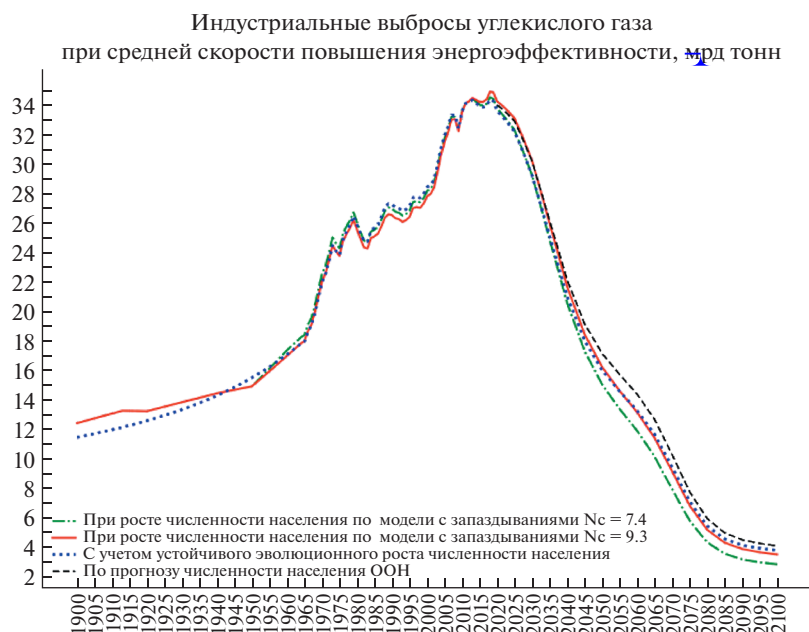


Рис. 2. Динамика сокращения антропогенных выбросов углекислого газа (CO_2) в атмосферу в XXI веке при сценарии энергоперехода Net Zero при использовании водорода и технологии CCS для улавливания и захоронения части CO_2 .

Таким образом, водородная энергетика, начиная с 2040-х годов будет играть заметную роль в мировом ТЭБ, а с 2060-х годов – важную роль и, наконец, с 2080-х годов – одну из ключевых ролей. Поэтому в предстоящей гонке Россия не может быть пассивным наблюдателем, поскольку речь идёт не только о новом источнике энергии, но и о широком комплексе промышленных технологий (от новых материалов до систем управления), которые могут дать существенные конкурентные преимущества тем, кто ими будет обладать. Достаточно вспомнить печальный урок, полученный ещё в период существования СССР, когда была полностью проиграна технологическая гонка в сфере микроэлектроники. Памятуя об этом, Россия не может позволить себе проиграть ещё одну битву в сфере высоких технологий.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Статья подготовлена в рамках гранта № 220-1688-3710 “Технологические вызовы и социально-экономическая трансформация в условиях энергетических переходов”, предоставленного Министерством науки и высшего образования РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rifkin J. The Third Industrial Revolution. How Lateral Power is Transforming Energy, The Economy, and The World. Palgrave Macmillan, 2011.
2. Акаев А.А. Стабилизация климата Земли в XXI веке путём перехода к новой парадигме энергопотребления // Доклады АН. 2012. № 4. С. 1–6.
3. Акаев А.А. От Рио до Парижа: достижения, перспективы и проблемы в борьбе с изменениями климата // Вестник РАН. 2017. № 7. С. 587–598.
4. Акаев А.А., Давыдова О.И. Парижское климатическое соглашение вступает в силу. Состоится ли Великий энергетический переход? // Вестник РАН. 2020. № 10. С. 926–938.
5. European Green Deal: Commission proposes transformation of EU economy and society to meet climate ambitions. 14 July 2021. Press release. https://ec.europa.eu/com-mission/presscorner/detail/en/IP_21_3541
6. Matuszewska-Janica A., Żebrowska-Suchodolska D., Ala-Karwia U., Hozer-Koćmiel M. Changes in Electricity Production from Renewable Energy Sources in the European Union Countries in 2005–2019 // Energies 2021. № 14 (19). P. 6276. <https://doi.org/10.3390/en14196276>
7. Eurostat. The average share of electricity from renewable energy sources in @the EU. 24 August 2021. https://ec.europa.eu/eurostat/documents/38154/4956088/The+average+share+of+electricity+from+renewable+energy+sources+in+the+EU_2004-2019.pdf/a338-445c-2a4c-b303-aea5-5c857eb77833?t=1629797780121
8. IRENA (2020a). Renewable Power Generation Costs in 2019. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
9. IRENA (2020b). Renewable capacity statistics 2020. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
10. IRENA (2020c). Reaching Zero with Renewables, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
11. Key World Energy Statistics 2020 // IEA. P. 46–47. <https://iea.blob.core.win-dows.net/assets/1b7781df->

- 5c93-492a-acd6-01fc90388b0f/Key_World_Energy_Statistics_20-20.pdf
12. Friedrich J., Damassa T. The History of Carbon Dioxide Emissions. World Resources Institute, 2014. <https://www.wri.org/insights/history-carbon-dioxide-emissions>
 13. Key World Energy Statistics 2020 // IEA. P. 60–68. https://iea.blob.core.win-dows.net/assets/1b7781df-5c93-492a-acd6-01fc90388b0f/Key_World_Energy_Statistics_20-20.pdf
 14. Japan. Energy Profile. IRENA, September 2021. https://www.irena.org/IRE-NADocuments/Statistical_Profiles/Asia/Japan_Asia_RE_SP.pdf
 15. China. Energy Profile. IRENA, September 2021. https://www.irena.org/IRE-NADocuments/Statistical_Profiles/Asia/China_Asia_RE_SP.pdf
 16. USA. Energy Profile. IRENA, September 2021. https://www.irena.org/IRE-NADocuments/Statistical_Profiles/North%20America/United%20States%20of%20America_North%20America_RE_SP.pdf
 17. India. Energy Profile. IRENA, September 2021. https://www.irena.org/IRE-NADocuments/Statistical_Profiles/Asia/India_Asia_RE_SP.pdf
 18. Russian Federation. Energy Profile. IRENA, September 2021. https://www.irena.org/IRE-NADocuments/Statistical_Profiles/Eurasia/Russian%20Federation_Eurasia_RE_SP.pdf
 19. IEA: Data and Statistics, 2019.
 20. Taylor M. Energy subsidies: Evolution in the global energy transformation to 2050. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.
 21. Правительственная комиссия займётся адаптацией экономики России к энергопереходу // Ведомости. 20.09.2021. <https://www.vedomosti.ru/economics/articles/20-21/09/19/887328-pravitelstvennaya-komissiya-energoperedodu>
 22. Dawood F. Hydrogen production for energy: An overview / F. Dawood, M. Anda, G.M. Shafiullah // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. V. 45. № 7. P. 3847–3869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>
 23. International Association of Oil & Gas Producers. Hydrogen from natural gas. Fact Sheet. October 2018. <https://www.iogp.org/wp-content/uploads/2019/01/Hydrogen-Factsheet.pdf>
 24. Gorski J., Jutt T., Wu K.T. (2021). Carbon intensity of blue hydrogen production. Accounting for technology and upstream emissions. PEMBINA Institute. Technical Paper.
 25. Kearns D., Liu H., Consoli C. Technology Readiness and Costs of CCS. Global CCS Institute, 2021.
 26. Zapantis A. Blue Hydrogen. Global CCS Institute, 2021. <https://www.global-ccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/04/Circular-Carbon-Economy-series-Blue-Hydro-gen.pdf>
 27. Литвиненко В.С., Цветков П.С., Двойников М.В., Буслаев Г.В. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 428–438. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.5>
 28. IRENA. Hydrogen: A renewable energy perspective, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019.
 29. Ochu E.R., Braverman S., Smith G., Friedmann J. Production of Low – Carbon Hydrogen. Hydrogen Fact Sheet. Center on Global Energy Policy. Columbia University. May 2021.
 30. International Energy Agency. The Future of Hydrogen. June 2019. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/07/f76/USDOE_FE_Hydrogen_Strategy_July-2020.pdf
 31. IRENA. Hydrogen: A renewable energy perspective, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019.
 32. IRENA. Global energy transformation: A roadmap to 2050 (Full report, 2019 edition). International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019.
 33. Christensen A. Assessment of Hydrogen Production Costs from Electrolysis: United States and Europe. Three Seas Consulting, 2020. <https://theicct.org/publication/assessment-of-hydrogen-production-costs-from-electrolysis-united-states-and-europe/>
 34. Obara S. Energy and exergy flows of a hydrogen supply chain with truck transportation of ammonia or methyl cyclohexane // Energy. 2019. № 174. P. 848–860. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.103>
 35. Cardella U., Decker L., Klein H., 2017. Roadmap to economically viable hydrogen liquefaction // Int. J. Hydrogen Energy, Special Issue on The 21st World Hydrogen Energy Conference (WHEC 2016). 13–16 June 2016. Zaragoza, Spain. № 42. P. 13329–13338. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.068>
 36. Newman N. The Great German Gas Switch-Over // Pipeline Gas J. 2018. № 245 (4). P. 44 (3).
 37. The Potential and Costs of Hydrogen Supply in Kimura / S. and Y. Li (eds.). Demand and Supply Potential of Hydrogen Energy in East Asia. ERIA Research Project Report FY2018 no.01, Jakarta: ERIA, 2019. P. 140–183.
 38. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 3052-р от 29 октября 2021 г.
 39. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 2162-р от 5 августа 2021 г.
 40. Тарасенко А.Б., Попель О.С. Перспективные пути развития водородной энергетики в условиях России // Материалы XII Школы молодых учёных “Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов” имени Э.Э. Шпильрайна. 2020. DOI:
 41. Константинов В.О., Шарафутдинов Р.Г., Шукин В.Г. Конверсия попутного нефтяного газа в метанолсодержащую жидкость в плазме электронного пучка // Тезисы докладов Международных конференций “Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надёжных конструкций” и “Химия нефти и газа” в рамках Международного симпозиума “Иерархические

- материалы: разработка и приложения для новых технологий и надёжных конструкций”. 2018. С. 800.
42. Zhuk A.Z., Sheindlin A.E., Kleymenov B.V. et al. Use of low-cost aluminum in electric energy production // Journal of Power Sources 2006. V. 157. P. 921–926.
 43. Rudskoi A.I., Parshin S.G. Advanced Trends in Metallurgy and Weldability of High-Strength Cold-Resistant and Cryogenic Steels // Metals. 2021. № 11. P. 1891. <https://doi.org/10.3390/met11121891>
 44. Масликова Е.И., Андреева В.Д., Алексеева Е.Л., Яковлев Ю.А. Кинетика диффузии водорода в различных условиях применительно к сплаву ВТ6 // Вопросы материаловедения. 2020. № 2 (102). P. 98–107. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2020-102-2-98-107>
 45. Polyanskiy V.A., Belyaev A.K., Alekseeva E.L. et al. Phenomenon of skin effect in metals due to hydrogen absorption, Continuum Mechanics and Thermodynamics. October 2019. <https://doi.org/10.1007/s00161-019-00839-2>
 46. Alekseeva E.L., Belyaev A.K., Grishchenko A.I. et al. The Initiation Mechanism of Plastic Strain Localization Bands and Acoustic Anisotropy // Procedia Structural Integrity. 2017. V. 6. P. 128–133. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.11.020>
 47. Kobrykhno I.A., Yunusov F.A., Breki A.D. et al. Regularities of Friction of Multiscale Composite Materials Containing Highly Dispersed Particles of Fullerene Soot // Technical Physics Letters. 2021. № 47 (3). P. 243–247. <https://doi.org/10.1134/S1063785021030111>
 48. Goncharenko D., Kobrykhno I., Bobrynina E., Tolochko O. The Mechanical Properties Improvement of Thermoplastics-Based Fiber Metal Laminates // Materials Physics and Mechanics. 2021. № 47 (4). P. 592–599. https://doi.org/10.18149/MPM.4742021_6
 49. Panina O.A., Nemov A.S., Zobacheva A.Y. et al. Numerical analysis of mechanical behavior of unidirectional thermoplastic-based carbon fiber composite for 3D-printing // Materials Today: Proceedings. 2020. № 30. P. 559–563.
 50. Tonkov D.N., Gasumyants V.E., Vasilyeva E.S. et al. Modification of the CVD-graphene resistivity by post-processing sample annealing // (2021) Chinese Journal of Physics. 2021. № 74. P. 256–261. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2021.09.010>
 51. Larionova T., Koltsova T., Bobrynina E. et al. Comparative characterization of graphene grown by chemical vapor deposition, transferred to nonconductive substrate, and subjected to Ar ion bombardment using X-ray photoelectron and Raman spectroscopies // (2017) Diamond and Related Materials. 2017. № 76. P. 14–20.
 52. Bobrynina E.V., Larionova T.V., Kol'tsova T.S. et al. Preparation, Structure and Properties of Copper-Based Composites with Additions of Fullerenes and Fullerene Soot // Metal Science and Heat Treatment. 2020. № 62 (1–2). P. 70–75.
 53. BP, Energy Outlook 2020. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2020.pdf>.
 54. Akaev A.A., Davydova O.I. Mathematical Description of Energy Transition Scenarios Based on the Latest Technologies and Trends // Energies. 2021. V. 14. № 8360. <https://doi.org/10.3390/en14248360>