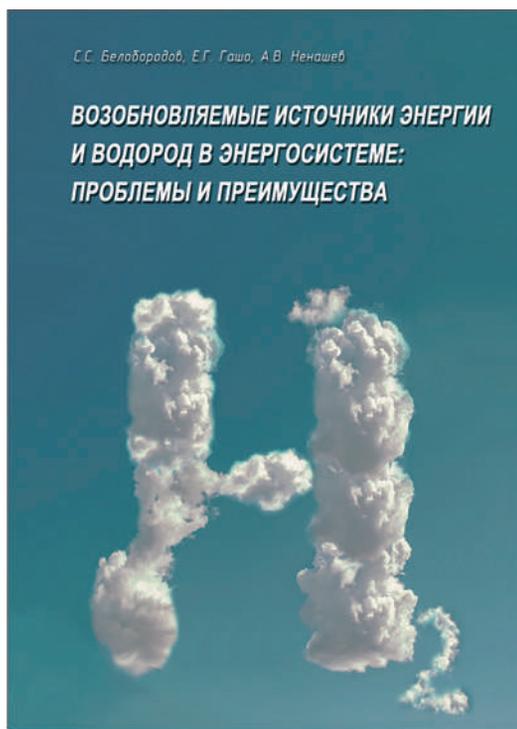


ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И ВОДОРОД В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ: ПРОБЛЕМЫ И ПРЕИМУЩЕСТВА

С.С. БЕЛОБОРОДОВ, Е.Г. ГАШО, А.В. НЕНАШЕВ

DOI: 10.7868/S0233361922090087



ются актуальные вопросы интеграции возобновляемых источников энергии в энергосистему, в том числе за счёт перехода экономики на “зелёный” водород, и связанные с этим проблемы. Приведены примеры функционирования возобновляемых источников энергии в энергосистеме Германии. Выполнена оценка наличия ресурсов и технологий, необходимых для осуществления энергетического перехода Европейского союза в рамках водородной стратегии. Проведено сравнение объёмов и динамики выбросов парниковых газов в ЕС и РФ, а также российских и зарубежных методик, используемых для расчётов углеродного следа». Монография может быть интересна широкому кругу читателей: научным сотрудникам, преподавателям, а также аспирантам, студентам и другим заинтересованным лицам.

Материал изложен в 8 главах, содержащих 51 таблицу и 89 рисунков, которым предшествует **Список сокращений** и **Введение**. В заключение приведены **Общие выводы** и **Литература** (список из 141 названия).

Во **Введении** отмечается, что «Неоднозначные задачи и проблемы участия нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в энергосистемах

Эта монография вышла в свет в 2021 г.¹ Как следует из аннотации, в монографии «рассматрива-

¹ Белобородов С.С., Гашо Е.Г., Ненашев А.В. Возобновляемые источники энергии и водород в энергосистеме: проблемы и преимущества [Электронный ресурс]. Монография. – СПб.: Научноёмкие технологии, 2021. – 152 с. – URL: <https://publishing.intelgr.com/archive/VIE-i-vodorod-v-energositsteme.pdf>

разных стран и регионов необходимо рассматривать под разными углами зрения. Это экологичность и надёжность, устойчивость функционирования и "низкоуглеродность". Разные страны выбирают различные приоритеты для развития своих энергосистем, опираясь на ключевые требования времени, тем самым отвечая на ключевые вызовы современности. <...> Переход Российской Федерации на "зелёный водород" создаёт значительные риски для конкурентоспособности отечественной экономики. <...> В соответствии с прогнозом Международного энергетического агентства (IEA), стоимость производства "зелёного" водорода в РФ будет одной из самых высоких в мире».

Первые две главы посвящены энергосистеме Германии. Авторы утверждают, что "Интерес к энергосистеме Германии вызван, в первую очередь, амбициозными планами по внедрению ВИЭ. В соответствии с энергетической стратегией планировался рост доли ВИЭ в балансе электрической энергии до 35% к 2020 г., 50% к 2030, 65% к 2040 и 80% к 2050 г."

В **Главе 1. ВИЭ в энергосистеме** обсуждаются проблемы обеспечения баланса в энергосистеме Германии в дни с максимальной долей ВИЭ: режимы работы ВЭС и СЭС и регулирование электрических режимов в энергосистеме (режимы работы АЭС, экспорт и импорт электроэнергии, режимы работы ТЭС, требования к скорости изменения нагрузки и количеству пусков/остановов ТЭС, комбинированная выработка электроэнергии и тепла, резерв электрической мощности в энергосистеме), а также рассматривается вопрос о влиянии суточной и сезонной неравномерности выработки электроэнергии СЭС и ВЭС на долю ВИЭ в энергосистеме Германии (суточная и сезонная неравномерность выработки ВИЭ, структура генерирующих мощностей).

В **Выводах по главе 1** подчёркивается: "Достижение поставленных стратегических целей по доле ВИЭ в потреблении электроэнергии потребует значительных инвестиций в строительство СЭС и ВЭС, аккумуляторов, манёвренных тепловых электростанций, сетевой инфраструктуры, затрат на вывод из промышленной эксплуатации АЭС и ТЭС, не предназначенных для работы в режиме ежедневных пусков/остановов".

В **Главе 2. Влияние развития ВИЭ на конкурентоспособность централизованной системы электроснабжения промышленных потребителей в энергосистеме Германии**, как указывают авторы, "представлены результаты расчётов стоимости электрической энергии для промышленных потребителей в энергосистеме Германии в зависимости от структуры генерирующих мощностей, коэффициента использования установленной мощности (КИУМ), капитальных и эксплуатационных затрат, средневзвешенной стоимости капитала. Выполнено сравнение стоимости производства электроэнергии в системе централизованного и автономного электроснабжения. Показано влияние роста доли ВИЭ в энергосистеме Германии на структуру топливного баланса и режимы загрузки газотранспортной системы."

Из **Выводов главы 2** следует, что за период 2000–2014 гг. в результате увеличения количества средств, собираемых на поддержку развития ВИЭ в энергосистеме Германии, "централизованная система электроснабжения промышленных потребителей стала неконкурентоспособной по сравнению с электроснабжением от собственной автономной генерации". Разрешить кризисную ситуацию удалось путём предоставления значительных скидок на цену электроэнергии её промыш-

ленным потребителям, работающим в базовой части суточного графика нагрузок: для таких потребителей возможна скидка до 95% на установленные платежи при поддержке ВИЭ и когенерации и до 80% на сетевые тарифы (без оплаты подключения ВИЭ к электрическим сетям). Отмечается, что в Германии «возможности снижения налогов и прочих обязательных платежей для промышленных потребителей практически исчерпаны, источники компенсации дальнейшего роста цены электроэнергии в системе централизованного электроснабжения в результате роста доли ВИЭ в энергобалансе отсутствуют. Выравнивание стоимости производства электрической энергии в энергосистеме с долей ВИЭ 65% в потреблении электроэнергии возможно только за счёт роста налогов и сборов на источники автономной генерации».

Относительно положения в РФ авторы утверждают следующее: «В 2019 г. средневзвешенная стоимость производства электрической энергии ВИЭ в Российской Федерации оценивается в 28–30 руб./кВт·ч <...>, что значительно превосходит стоимость производства электроэнергии ВЭС и СЭС в Германии. Экспорт каменного угля из Российской Федерации в страны ЕС будет прекращён уже на первом этапе реформ к 2030 г. Экспорт природного газа будет сильно сокращён на втором этапе реформы к 2050 г.».

В преамбуле к **Главе 3. Водород в энергетике ЕС** авторы так объясняют, почему водородная энергетика до сих пор не получила должного развития: «для получения водорода расходуется больше энергии, чем выделяется при его использовании». Кроме того, «для получения водорода в результате электролиза воды потребляется электрическая энергия, а в процессе использования водорода выделяется тепло,

которое с эффективностью значительно меньше 100% может быть преобразовано обратно в электроэнергию. <...> С энергетической точки зрения данный процесс не имеет смысла». В связи с этим авторы предлагают рассматривать этот процесс «с точки зрения обеспечения надёжности и эффективности функционирования электроэнергетической системы. <...> В данном случае водород становится источником хранения возобновляемой электроэнергии. И как накопитель энергии водород конкурирует с другими типами накопителей».

В этой главе речь идёт о производстве и потреблении водорода, о сравнении величины коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) электролизёров с КИУМ ветровых (ВЭС) и солнечных (СЭС) электростанций, о месте электролиза в электроэнергетической системе ЕС, о стоимости производства «зелёного» водорода.

В разделе **Выводы по главе 3** отмечается, что «Водородная стратегия Европейского союза охватывает вопросы полного цикла от разработки технологий производства «зелёного» водорода до его конечного потребления. Предусматривается комплекс организационных, нормативных, инвестиционных мер, обеспечивающий конкурентоспособность экономики ЕС». Однако, как утверждает далее, «Не решены вопросы обеспечения баланса производства и потребления электроэнергии вследствие неравномерности и малой предсказуемости выработки ВЭС и СЭС в энергосистеме. Появление необходимых технологий ожидается не ранее 2030 г.».

Глава 4. Переход к водородной энергетике посвящена анализу «наличия необходимого количества ресурсов для обеспечения перехода ЕС на водородную экономику». Обсуждаются

следующие вопросы: общее потребление энергоресурсов странами ЕС, потребность экономики ЕС в водороде, в электрической и тепловой энергии для получения дистиллированной воды и в площади для размещения ВИЭ, а также электролиз воды, выбросы углекислого газа в процессе получения дистиллированной воды, утилизация кислорода, тепловое загрязнение атмосферы водяным паром и инфраструктура для перехода к водородной экономике

Из **Выводов по главе 4:** «При переходе на водородную экономику потребуются решить сложную задачу обеспечения баланса производства и потребления "зелёного" водорода с учётом сезонной и суточной неравномерности производства электрической энергии ВИЭ и сезонной неравномерности водных ресурсов, а также принять во внимание риски маловодных лет. Необходимость выделения территории для размещения ВЭС и СЭС противоречит Стратегии сохранения биоразнообразия до 2030 г. <...> Необходимость создания систем накопителей исходной воды для обеспечения производства водорода в процессе электролиза противоречит Рамочной директиве по водным ресурсам и Стратегии ЕС в области сохранения биоразнообразия, предполагающих значительное сокращение количества барьеров на реках».

Глава 5. Изменение материалоемкости элементов энергосистемы при переходе на водородную энергетику начинается с утверждения: «Важным параметром любой энергосистемы является показатель удельного расхода материалов (металлов, пластика, бетона и др.) на единицу полезного отпуска электрической энергии – материалоемкость энергосистемы. Баланс производства и потребления электрической мощности в энергосистеме должен обеспе-

чиваться в течение всего года с учётом сезонной и суточной неравномерности выработки электрической энергии ВЭС и СЭС. Рост доли ВЭС и СЭС в энергобалансе приводит к снижению коэффициента использования установленной электрической мощности электростанций в энергосистеме Европейского Союза».

Далее рассматриваются следующие вопросы: материалоемкость энергосистемы при переходе к ВЭС и СЭС, транспортировка водорода (трубопроводами, автомобильным и железнодорожным транспортом, с помощью носителей), изменение материалоемкости энергосистемы при переходе к водородной энергетике (в предположении, что электроэнергия производится в первую очередь ВИЭ) и баланс производства и потребления "зелёного" водорода, обеспечиваемый системой его хранения у производителей и потребителей.

Из **Выводов по главе 5:** «При переходе энергосистемы на "зелёный" водород происходит рост её материалоемкости в результате снижения КИУМ и роста удельных показателей материалоемкости оборудования в энергосистеме». При этом, отмечают авторы, изменяется структура материальных ресурсов, возрастает доля полупроводников, углепластика, цветных и редкоземельных металлов. В целом, в результате роста материалоемкости энергосистемы в ЕС увеличится добыча и переработка полезных ископаемых.

В **Главе 6. Экологическое давление на окружающую среду при переходе к водородной экономике** речь идёт о том, что в атмосфере Земли CO₂ – не только не единственный, но даже не основной парниковый газ. К таким газам относятся ещё и водяной пар, озон, метан, оксиды азота и ряд других, а основной парниковый

газ в атмосфере – водяной пар. Обсуждается вопрос о характере и количестве выбросов различных парниковых газов и молекулярного водорода и сравнивается влияние этих газов на парниковый эффект, а также о разработке программ борьбы с изменением климата и контроля за их исполнением. Как указано в главе, «Выбросы различных парниковых газов выражают в общей единице, называемой “выбросы в CO₂ эквиваленте”. Парниковая активность соединений выражается через так называемые “потенциалы глобального потепления” (ПГП) – специальные коэффициенты, рассчитываемые для каждого газа, исходя из способности его молекул задерживать солнечную радиацию». Подчеркивается важность решения проблемы утилизации выработавших ресурс ВЭС и СЭС, топливных элементов, аккумуляторных батарей и электролизёров.

В **Выводах по главе 6** описаны проблемы, возникающие при переходе на водородную энергетику, с экологической точки зрения. Отмечается, что нельзя считать электроэнергию, вырабатываемую ВЭС, экологически чистой, поскольку нет “эффективных с экономической и экологической точек зрения технологий утилизации лопастей. <...> Солнечные панели и аккумуляторы содержат токсичные химические вещества, такие как кадмий, свинец и другие, которые невозможно безопасно извлечь без наличия соответствующего технологического оборудования. <...> В настоящее время отсутствуют экологически и экономически приемлемые промышленные технологии утилизации литий-ионных аккумуляторов <...> Вопросы промышленной утилизации электролизёров в настоящее время открыты, <...> отсутствуют технологии промышленной утилизации топливных элементов”.

В **Главе 7. Углеродная нейтральность**² рассматриваются следующие вопросы: динамика выбросов углекислого газа и поглощения парниковых газов; снижение выбросов CO₂ в энергосистемах ЕС и США; методики расчёта выбросов парниковых газов; поглотительная способность лесов стран ЕС и РФ (увеличение площади лесов и их поглотительной способности – это один из способов достижения нейтральности стран к выбросам CO₂); удельные выбросы CO₂ в электроэнергетических системах; конкурентоспособность российской экономики при переходе к водородной экономике; климатические особенности РФ и стран ЕС; стоимость электроэнергии ВИЭ в РФ; последствия водородной стратегии для РФ. Авторы сообщают, что «Рамочная конвенция ООН об изменении климата, принятая в 1992 г., объединяет усилия стран, направленные на предотвращение опасных изменений климата. В соответствии с Конвенцией каждая страна “проводит национальную политику” с целью ограничения выбросов парниковых газов в атмосферу. Обязательства стран по снижению выбросов парниковых газов оформлены в Киотском протоколе и Парижском соглашении. Изменение объёма выброса парниковых газов рассчитывается относительно показателей 1990 г., принятых в качестве базовых значений. <...> Максимальный рост мировых выбросов наблюдался в период с 2001 г. по 2010 г., при этом вклад Китая составил 64.5%. Динамика выбросов парниковых газов в РФ характеризуется резким снижением показателей за период с 1990 г. по 2000 г. и дальнейшим незначительным ростом до 2018 г.».

² Углеродная нейтральность – термин, обозначающий состояние с нулевыми выбросами углекислого газа. Этого можно достичь, сбалансировав выбросы углекислого газа с его удалением или исключив выбросы.

В **Выводах по главе 7** отмечается, что «Стоимость производства “зелёного” водорода в Российской Федерации в процессе электролиза воды с использованием электроэнергии материковых ветровых и солнечных электростанций в соответствии с прогнозом IEA³ будет одной из самых высоких в мире», но при этом “выполнение обязательств ЕС по снижению выбросов парниковых газов значительно уступает результатам РФ. <...> Российская Федерация и США являются мировыми лидерами по снижению удельных выбросов CO₂ за период с 2000 г. по 2018 г., опережая ЕС. Европейский союз не обладает необходимым объёмом лесов для компенсации выбросов парниковых газов. <...> При проектировании развития электроэнергетической и теплоэнергетической систем Российской Федерации необходимо обеспечить надёжность и эффективность энергоснабжения потребителей при температурах воздуха, которые значительно ниже, чем в странах ЕС”.

В **Главе 8. Водородные проекты**, как пишут авторы, «представлена информация о нескольких наиболее крупных водородных проектах, реализуемых и планируемых к реализации, в Российской Федерации и за рубежом. В РФ в настоящее время активно обсуждается вопрос об использовании потенциала приливных электростанций для производства “зелёного” водорода. Проекты наиболее крупных приливных электростанций мощностью десятки ГВт, которые не были реализованы из-за отсутствия потребителей электроэнергии, могут быть востребованы при переходе мировой экономики на “зелёный” водород». К таким проектам относятся Мезенская и Пенжинская приливные электростанции, проекты которых описаны в этой главе.

³ IEA – Международное энергетическое агентство.

Далее речь идёт о концепции водородной энергетики с атомным производством водорода, получившей название атомно-водородной энергетики. Отмечается, что ещё в СССР с середины 1970-х гг. “активно развивались работы по применению атомной энергии не только для производства электричества, но и для энергообеспечения промышленных процессов. <...> Новый мировой тренд по достижению углеродной нейтральности экономик разных стран к 2050 г. открывает новые возможности для реализации проектов в области атомно-водородной энергетики. Производство электрической энергии и тепла АЭС характеризуется отсутствием выбросов углекислого газа. <...> Таким образом, применение атомно-водородных технологий позволяет либо полностью устранить, а в случае наличия ресурсных ограниченийкратно снизить выбросы углекислого газа в атмосферу”. Экономическая эффективность атомно-водородной энергетики повышается благодаря введению ЕС трансграничных налогов на выбросы CO₂.

Проект поставки сжиженного водорода из Австралии в Японию, предусматривающий производство водорода в процессе газификации бурых углей с последующей утилизацией CO₂ на территории Австралии и транспортировку его в Японию, находится в стадии реализации. В рамках этого пилотного проекта “проходит апробация логистики и технологий производства, сжижения, погрузки/разгрузки, транспортировки наземным и морским транспортом и хранения водорода”.

Инициатива European Hydrogen Backbone – так озаглавлена заключительная часть главы. В ней сообщается: “В Европейском союзе прорабатывается инфраструктурный проект формирования единой газотранспортной системы

ЕС для транспортировки водорода, получивший название *European Hydrogen Backbone (ЕНВ)*". В рамках проекта крупнейшие европейские газотранспортные компании, газовые сети которых, транспортирующие природный газ, "охватывают 19 государств-членов ЕС, а также Великобританию и Швейцарию, готовясь к возможному переходу на транспортировку водорода, разработали предложение о специальной инфраструктуре водородных трубопроводов, в значительной степени основанной на перепрофилированных трубопроводах природного газа". Инициатива ЕНВ – это долгосрочный, находящийся в стадии проработки проект европейских газотранспортных компаний, рассчитанный "на горизонт 2040 года". Его перспективы, утверждают авторы, "зависят от перспектив водорода как энергоносителя в будущей энергетической системе".

Завершает книгу раздел **Основные выводы**. Предоставим слово авторам: «Проблематику энергетического перехода, повышения устойчивости, экологичности и надёжности энергоснабжения невозможно сводить только к вопросам "безуглеродности" энергоисточников и роста доли ВИЭ в энергобалансе. Значительный рост мощности ВИЭ обуславливает новые проблемы обеспечения устойчивой и надёжной работы энергосистем стран, регионов. <...> Достижение поставленных стратегических целей по доле ВИЭ в генерации электроэнергии потребует значительных инвестиций <...> в капиталоемкие проекты модернизации сетевой инфраструктуры, систем аккумулирования, манёвренных тепловых электростанций, а также затрат на вывод из промышленной эксплуатации ТЭС и АЭС, не предназначенных для работы в режиме ежедневных пусков/остановов. <...> Водородная стратегия является попыткой ЕС одновременно ре-

шить проблему дефицита ископаемых энергетических ресурсов на территории Евросоюза и проблемы надёжности функционирования электроэнергетической системы из-за неравномерности и непредсказуемости выработки электроэнергии ВЭС и СЭС. Получение водорода в результате электролиза может быть интересно с точки зрения обеспечения баланса производства и потребления электроэнергии. Потребление энергии электролизёрами будет реагировать на изменение баланса в энергосистеме в режиме реального времени. Появление таких технологий ожидается к 2030 г. В данном случае водород становится источником хранения возобновляемой электроэнергии и конкурирует с другими типами накопителей. <...> Ограниченность ресурсов в странах ЕС, а также неравномерность и малая предсказуемость производства электроэнергии ВЭС и СЭС, величины стока рек, потребления электрической энергии и тепла, топлива ставят вопросы о достижимости полного перехода экономики на "зелёный" водород. <...> Вопросы адаптации энергетических систем и комплексов больших и малых стран к совокупности беспрецедентных изменений и вызовов времени, вне всякого сомнения, являются ключевыми вопросами не только выживания цивилизации, но и её дальнейшего сбалансированного развития в гармонии с природой. Создание интегрированных адаптивных энергетических систем нового поколения, органично использующих разные виды источников и энергоносителей, – грандиозная научно-техническая задача, решение которой требует концентрации интеллектуальных, финансовых и других ресурсов в самое ближайшее время».

**Материал подготовила
кандидат технических наук
Г.А. ГУХМАН**