

С.С. Белобородов, Е.Г. Гашо, А.В. Ненашев

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И ВОДОРОД В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ: ПРОБЛЕМЫ И ПРЕИМУЩЕСТВА



С. С. Белобородов, Е. Г. Гашо, А. В. Ненашев

**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ
И ВОДОРОД В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ:
ПРОБЛЕМЫ И ПРЕИМУЩЕСТВА**

Монография

Электронное текстовое издание

Санкт-Петербург
Научные технологии
2021

© Белобородов С. С., Гашо Е. Г., Ненашев А. В., 2021
ISBN 978-5-6047314-3-7

УДК 620.9
ББК 31
Б43

Рецензенты:

Стенников В. А. – директор ИСЭИ СО РАН, член-кор. РАН, д-р техн. наук;

Попов С. К. – профессор НИУ МЭИ, д-р техн. наук

Б43

Белобородов С. С., Гашо Е. Г., Ненашев А. В. Возобновляемые источники энергии и водород в энергосистеме: проблемы и преимущества [Электронный ресурс]. Монография. – СПб.: Научное издание технологий, 2021. – 151 с. – URL: <https://publishing.intelgr.com/archive/VIE-i-vodorod-v-energositseme.pdf>.

ISBN 978-5-6047314-3-7

В монографии рассматриваются 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.

Работа может быть интересна широкому кругу читателей: научным сотрудникам, преподавателям, а также аспирантам, студентам и другим заинтересованным лицам.

УДК 620.9
ББК 31

ISBN 978-5-6047314-3-7

© Белобородов С. С., Гашо Е. Г., Ненашев А. В., 2021

Научное издание

Белобородов Сергей Сергеевич
Гашо Евгений Геннадьевич
Ненашев Александр Васильевич

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И ВОДОРОД В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ:
ПРОБЛЕМЫ И ПРЕИМУЩЕСТВА

Монография
Электронное текстовое издание

Подписано к использованию 27.11.2021.
Объем издания – 6,4 МБ

Издательство «Наукоемкие технологии»
ООО «Корпорация «Интел Групп»
<https://publishing.intelgr.com>
e-mail: publishing@intelgr.com
тел.: +7 (812) 945-50-63

ISBN 978-5-6047314-3-7



9 785604 731437



Содержание

Список сокращений	7
Введение	8
Глава 1. ВИЭ в энергосистеме	13
1.1. Обеспечение баланса в энергосистеме Германии в дни с максимальной долей ВИЭ.....	15
1.1.1. Режимы работы ВЭС и СЭС в энергосистеме	15
1.1.2. Регулирование электрических режимов в энергосистеме	17
1.2. Влияние суточной и сезонной неравномерности выработки электроэнергии СЭС и ВЭС на долю ВИЭ в энергосистеме Германии.....	30
Выводы по главе 1.....	38
Глава 2. Влияние развития ВИЭ на конкурентоспособность централизованной системы электроснабжения промышленных потребителей в энергосистеме Германии	39
2.1. Собственная генерация или централизованное электроснабжение	39
2.2. Льготы промышленных потребителей по оплате ВИЭ	40
2.3. Динамика цен на электрическую энергию и природный газ для промышленных потребителей в энергосистеме Германии	41
2.4. Цена электроэнергии в системе автономного электроснабжения	43
2.5. Цена электроэнергии в системе централизованного электроснабжения	45
2.6. Ресурс газовых турбин ПГУ.....	48
2.7. Режим работы газотранспортной системы	48
2.8. Сравнение стоимости электроэнергии в централизованной и автономной системах электроснабжения	50
Выводы по главе 2.....	51
Глава 3. Водород в энергетике ЕС	52
3.1. Производство и потребление водорода	52
3.2. КИУМ ВЭС, СЭС и электролизёров	53
3.3. Место электролиза в электроэнергетической системе ЕС.....	54
3.4. Стоимость производства «зелёного» водорода	57
3.5. Отрицательные цены электроэнергии в энергосистеме Германии.....	58
Выводы по главе 3.....	62
Глава 4. Переход к водородной энергетике.....	63
4.1. Общее потребление странами ЕС энергоресурсов	63
4.2. Потребность экономики ЕС в водороде	64
4.3. Электролиз воды	65
4.4. Потребность в электрической и тепловой энергии для получения дистиллированной воды.....	67
4.5. Потребность в площади для размещения ВИЭ	68
4.6. Выбросы углекислого газа в процессе получения дистиллированной воды	70



4.7. Утилизация кислорода	71
4.8. Тепловое загрязнение атмосферы водяным паром	71
4.9. Инфраструктура для перехода к водородной экономике	71
Выводы по главе 4.....	73
Глава 5. Изменение материалоемкости элементов энергосистемы при переходе на водородную энергетику	74
5.1. Материалоемкость энергосистемы при переходе к ВЭС и СЭС	74
5.1.1. Материалоемкость ВЭУ	75
5.1.2. Материалоемкость СЭС	76
5.1.3. Материалоемкость ТЭС.....	77
5.1.4. Материалоемкость АЭС.....	79
5.2. Транспортировка водорода	80
5.2.1. Трубопроводы.....	81
5.2.2. Транспортировка автомобильным и железнодорожным транспортом	82
5.2.3. Транспортировка водорода с помощью носителей	83
5.3. Изменение материалоемкости энергосистемы при переходе к водородной энергетике	85
5.3.1. Электрические станции.....	86
5.3.2. Электрические сети	87
5.3.3. Накопители электроэнергии.....	87
5.3.4. Газотранспортная система	87
5.3.5. Топливные элементы	88
Выводы по главе 5.....	89
Глава 6. Экологическое давление на окружающую среду при переходе к водородной экономике	90
6.1. Выбросы водяного пара	91
6.2. Выбросы водорода	94
6.3. Выбросы оксидов азота.....	94
6.4. Утилизация выработавших ресурс ВЭС и СЭС	95
6.4.1. Утилизация ВЭС.....	95
6.4.2. Утилизация СЭС.....	100
6.5. Утилизация выработавших ресурс топливных элементов и аккумуляторных батарей.....	103
Выводы по главе 6.....	106
Глава 7. Углеродная нейтральность.....	107
7.1. Динамика выбросов углекислого газа и поглощения парниковых газов	107
7.2. Снижение выбросов углекислого газа в энергосистемах ЕС и США	110
7.3. Методики расчёта выбросов парниковых газов.....	112
7.4. Поглощительная способность лесов стран ЕС и РФ	114
7.5. Удельные выбросы углекислого газа в электроэнергетических системах	117



7.6. Конкурентоспособность российской экономики при переходе к водородной экономике.....	120
7.6.1. Климатические особенности РФ и стран ЕС.....	120
7.6.2. Стоимость электроэнергии ВИЭ в РФ.....	122
7.7. Последствия водородной стратегии для РФ.....	123
Выводы по главе 7.....	124
Глава 8. Водородные проекты.....	125
8.1. Мезенская приливная электростанция.....	125
8.2. Пенжинская приливная электростанция.....	128
8.3. Атомно-водородная энергетика.....	130
8.4. Проект поставки сжиженного водорода из Австралии в Японию.....	133
8.4.1. Описание проекта.....	133
8.4.2. Энергетическая и экологическая эффективность проекта.....	135
8.5. Инициатива «European Hydrogen Backbone».....	136
Основные выводы.....	140
Литература.....	144

Список сокращений

- Alkaline – щелочные электролизёры
ЕНВ – Европейская магистральная водородная магистраль
ЕОН – эквивалентные часы
СВАМ – Carbon Border Adjustment Mechanism
IEA – международное энергетическое агентство
РЕМ – электролизёры с протонными мембранами
SOEC – твёрдооксидные электролизёры
WACC – средневзвешенная стоимость капитала
АЭТК – атомные энерготехнологические комплексы
АЭС – атомная электростанция
ВИЭ – возобновляемые источники энергии
ВТГР – высокотемпературный газоохлаждаемый реактор
ВТО – Всемирная торговая организация
ВЭС – ветровая электростанция
ГАЭС – гидроаккумулирующая станция
ГТУ – газотурбинная установка
ГТД – газотурбинный двигатель
ГЭС – гидроэлектростанция
ДПМ – договор предоставления мощности
ЕС – Европейский союз
ЕЭС – единая энергетическая система
ЗИЗЛХ – сектор землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства
КИТТ – коэффициент использования тепла топлива
КИУМ – коэффициент использования установленной мощности
КПД – коэффициент полезного действия
НВИЭ – нетрадиционные возобновляемые источники энергии
НДС – налог на добавленную стоимость
НДТ – наилучшие доступные технологии
НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
ООН – Организация Объединённых Наций
ОС – окружающая среда
ПГУ – парогазовая установка
ПГХ – подземное газовое хранилище
ПСУ – паросиловая установка
ПЭС – приливная электростанция
РФ – Российская Федерация
СЭС – солнечная электростанция
ТЭК – топливно-энергетический комплекс
ТЭС – тепловая электростанция
ТЭЦ – теплоэлектроцентраль
УРУТ – удельный расход условного топлива
ФЗ – федеральный закон

Введение

Неоднозначные задачи и проблемы участия нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в энергосистемах 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.

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 Парижском соглашении [1], регулирующем меры по снижению углекислого газа в атмосфере с 2020 года.

В рамках реализации Парижского соглашения 8 июля 2020 года была представлена стратегия развития водородной экономики [2], которая позволит Европейскому союзу достичь поставленной цели по нейтральности к углероду к 2050 году. Приоритетом для ЕС является развитие возобновляемых источников водорода, производимых с использованием главным образом энергии ветра и солнца. Выбор в пользу возобновляемого водорода основывается на лидирующих позициях европейской промышленности в технологиях производства электролизёров. В стратегии указано, что: «Инвестиции в водород будут способствовать устойчивому росту и созданию рабочих мест, что будет иметь решающее значение в контексте восстановления после кризиса COVID-19».

Стратегия охватывает вопросы полного цикла от разработки технологий производства «зелёного» водорода¹ до его конечного потребления, включая: хранение, транспортировку; разработку конкурентоспособных технологий на базе «зелёного» водорода в промышленности, транспорте, энергетике и строительстве; создание условий для инвестиций; разработку нормативной базы и системы налоговой поддержки; формирование спроса на «зелёный» водород; разработку рыночных схем поддержки возобновляемых источников водорода; формирование механизмов защиты собственных производителей. Предусматривается комплекс организационных, нормативных, инвестиционных мер, обеспечивающий конкурентоспособность экономики Европейского союза.

Важным аспектом реализации водородной стратегии Европейского союза является намерение распространить её действия на внешних торговых партнёров с помощью экономических связей и дипломатии, в том числе за счёт инвестиций «в международное сотрудничество в области климата, торговли и исследовательской деятельности» [3]. Новая промышленная стратегия ЕС предусматривает установление «глобальных стандартов высокого качества» с целью укрепления «промышленной конкурентоспособности». «ЕС будет продолжать прикладывать усилия по поддержанию,

¹ «Зелёный» водород – производство на базе ВИЭ; «голубой» водород – на базе АЭС и ГЭС, технологий с улавливанием и хранением CO₂; «серый» водород – на базе природного газа, угля, нефтепродуктов.

обновлению и модернизации мировой торговой системы, с тем чтобы она соответствовала сегодняшним вызовам и реалиям завтрашнего дня» [3].

Следующим шагом по продвижению водородной и новой промышленной стратегии стала публикация 14 июля 2021 года Европейским парламентом пакета предложений по изменениям в экономике ЕС, позволяющим обеспечить сокращение выбросов парниковых газов к 2030 году на величину не менее 55% по сравнению с 1990 годом, а к 2050 году стать первым климатически нейтральным континентом. Пакет предложений включает в том числе правила пограничного углеродного регулирования Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) [4]. Предполагается, что в рамках механизма CBAM цена на выбросы углекислого газа будет одинаковой как для продукции европейских производителей, так и для импортных товаров. Таким образом, Европейским союзом декларируется недискриминационный характер механизма CBAM и его соответствие правилам ВТО и другим международным обязательствам ЕС.

Предполагается, что механизм CBAM будет вводиться постепенно, на начальном этапе под его действие попадёт ограниченное количество товаров. В рамках конференции по торговле и развитию ООН были рассмотрены последствия внедрения механизма CBAM на развивающиеся страны и определены страны, которые больше всего могут пострадать от введения данного механизма [5] (рис. 1).

В соответствии с результатами анализа выполненных конференцией по торговле и развитию ООН наибольшие риски от введения CBAM с точки зрения совокупной стоимости экспорта несёт Российская Федерация.

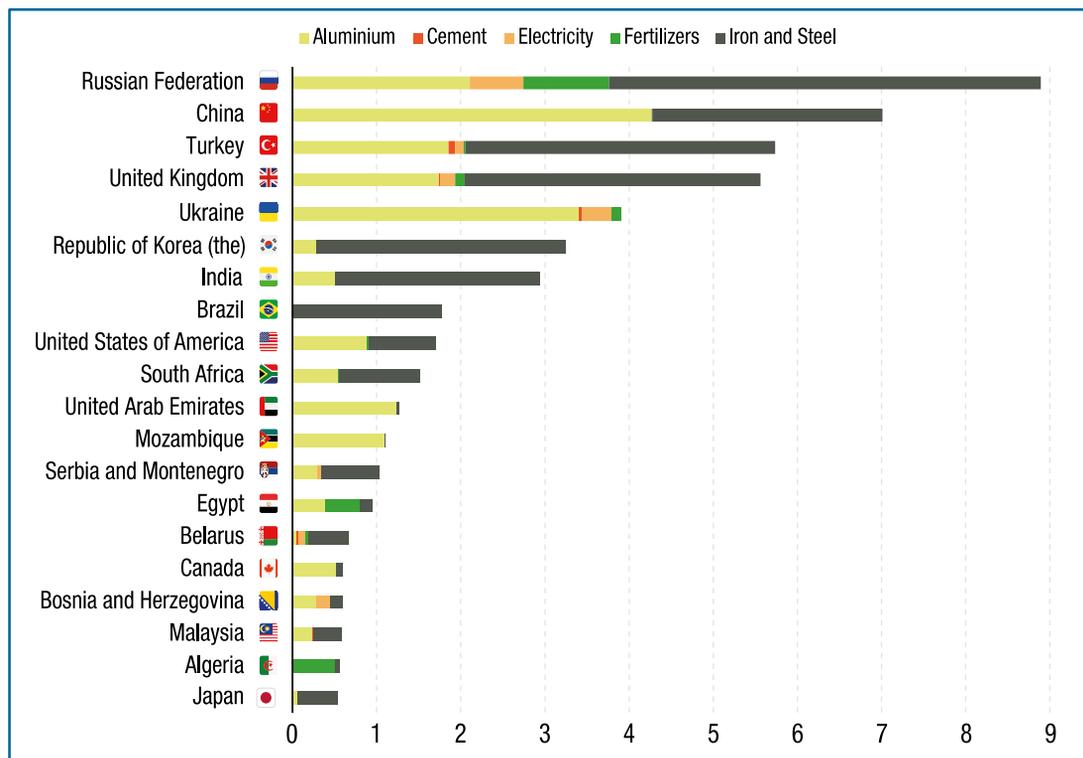


Рисунок 1. Экспорт стран в Европейский союз в 2019 году в разрезе отдельных секторов, которые могут попасть под действие CBAM (млрд долл. США). [5]

Европейский союз является одним из ключевых торговых партнёров Российской Федерации. Структурные изменения в экономике ЕС могут привести к изменению условий и структуры экспорта (импорта) товаров и услуг из РФ, поэтому анализ причин и последствий перехода на водородную экономику является актуальной задачей.

Российская Федерация присоединилась к Парижскому соглашению 23 сентября 2019 г. Необходимо отметить, что в настоящее время значительная доля ГЭС, АЭС, комбинированной выработки ТЭЦ, а также малая доля угольной генерации в энергобалансе позволяют электроэнергетике Российской Федерации быть одним из мировых лидеров в вопросах снижения выбросов CO₂. Удельные выбросы CO₂ на выработку электрической энергии (гCO₂/кВт·ч) в целом по энергосистеме РФ на 26% ниже, чем в США, на 30% ниже, чем Германии, в два раза ниже, чем в Китае, на 41% ниже среднемировых значений, и соответствуют уровню Дании [6]. Более поздний анализ подтвердил данные выводы: удельные выбросы CO₂ на выработку электрической энергии в энергосистеме РФ ниже, чем в США, Германии, Португалии, Мексике, Голландии, Японии, Южной Корее, Китае, Австралии, Индонезии, Индии, Польши и ЮАР, чуть лучше, чем в Дании и чуть хуже, чем в Италии [7]. Проектирование развития электроэнергетической и теплоэнергетической систем с точки зрения соответствия структуры генерирующих мощностей структуре потребления, роста доли комбинированной выработки электрической энергии и тепла, использования наилучших доступных технологий (НДТ) приведёт к дальнейшему снижению удельных выбросов углекислого газа в нашей стране.

Важно отметить, что Российская Федерация обладает огромным опытом разработки и реализации комплексных программ развития. Так, сто лет назад был разработан план ГОЭЛРО, включающий комплексную программу развития генерирующих мощностей, промышленных предприятий, подготовку кадров, научно-исследовательские работы, вопросы повышения топливной эффективности, вопросы финансирования. Следующим этапом была масштабная теплофикация городов и промышленных узлов.

Научные основы проектирования энергетических систем были заложены советскими (российскими) учёными ещё в прошлом веке [8, 9]. Вопросы горизонтальной интеграции энергетических систем разрабатывались в конце 70-х годов прошлого века международной научной группой, в том числе с участием советских учёных [10]. К сожалению, после запуска рынка электрической энергии в 2003 году, при проектировании развития электроэнергетической системы РФ отечественный опыт практически не используется, а в основном идёт простое копирование модных зарубежных тенденций без учёта их применимости для отечественной экономики.

В Российской Федерации накоплен значительный опыт реализации проектов в области водородной энергетики, в том числе получения «зелёного» водорода.

Первоначально водородные технологии применялись в ракетостроении и космической отрасли. В 1971 году был разработан электрохимический генератор «Волна» мощностью 1,2 кВт для лунной программы, в 1988 году система «Фотон» мощностью 10 кВт для «Бурана». Позже водород нашёл применение в судостроении, машиностроении и авиастроении. В 1982 году был выпущен автомобиль «РАФ» с водородным щелочным топливным элементом. Первый экспериментальный самолёт на водородном топливе ТУ-155 совершил полёт в 1988 году. В России для автономной

энергетики созданы установки с электрохимическими генераторами, в том числе корабельными, мощностью 150 кВт и более [11].

Атомно-водородные технологии (получение водорода с помощью ВТГР, термохимия и опреснение воды, промышленные энерготехнологические комплексы) активно развивались в СССР под руководством академиков В.А. Легасова, Н.Н. Пономарева-Степного, в самом конце 80-х годов [12]. В 1994 году комитетом Российской Федерации по пищевой и перерабатывающей промышленности были приняты «Нормы технологического проектирования производства водорода методом электролиза» [13]. В нормах проектирования рассмотрены вопросы надёжности, безопасности, эффективности производства водорода методом электролиза.

Основным тормозом к применению водорода в энергетике является то, что для получения водорода расходуется больше энергии, чем выделяется при его использовании [14]. Процесс получения водорода рассматривается как способ аккумулирования электрической энергии ВЭС и СЭС, характеризующейся неравномерностью и малой предсказуемостью производства. Эффективность цикла на базе электролиза воды в настоящее время составляет около 65%.

К анализу перспектив и необходимых условий перехода энергетических систем России и Европейского союза на «зелёный» водород необходимо подходить с точки зрения системного (научного) подхода.

Актуальным вопросом является анализ достижимости целей, поставленных ЕС в рамках водородной стратегии, а также наличие необходимых ресурсов для перехода на «зелёный» водород: потребность в электрической мощности ВЭС и СЭС; наличие территории для размещения ВЭС и СЭС; требуемое качество водных ресурсов для электролиза; неравномерность размещения ресурсов на территории ЕС.

Важным аспектом производства «зелёного» водорода является использование энергетических и водных ресурсов, характеризующихся значительной сезонной и суточной неравномерностью. При переходе на водородную экономику потребуются решить сложную задачу обеспечения баланса производства и потребления «зелёного» водорода с учётом сезонной и суточной неравномерностью производства электрической энергии ВИЭ, сезонной неравномерностью водных ресурсов, а также принять во внимание риски маловодных лет [15]. Неравномерность и малая предсказуемость выработки ВЭС и СЭС потребует создания комплексной систем накопителей электроэнергии, хранения исходной и дистиллированной воды, а также водорода.

Важно отметить, что в соответствии с Рамочной директивой по водным ресурсам отсутствие искусственных барьеров для свободного, непрерывного течения воды является ключом к достижению хорошего статуса европейских вод. Совокупное воздействие большого числа речных барьеров в Европе является одной из основных причин более чем 80-процентного сокращения биоразнообразия пресноводных ресурсов и потери 55% контролируемых популяций мигрирующих рыб. Стратегия ЕС в области биоразнообразия направлена на восстановление по меньшей мере 25 000 км свободно текущих рек к 2030 году путём устранения ранее возведённых барьеров и восстановления пойм и водно-болотных угодий [16].

Следует отметить, что в принимаемых в ЕС директивах и программных документах отсутствует рассмотрение возможных рисков влияний на изменение климата перехода на водородную энергетику, в результате которого произойдёт резкое увеличение



выбросов водяного пара в атмосферу, основного парникового газа в атмосфере, а также сопутствующего теплового загрязнения атмосферы [17].

Отдельного изучения требуют вопросы, связанные с оценкой влияния роста объёмов использования водорода в экономике на выбросы оксидов азота (NOx), которые регулируются протоколами к «Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния ЕЭК ООН» [18].

Переход Российской Федерации на «зелёный» водород создаёт значительные риски для конкурентоспособности отечественной экономики. Важно отметить, что в соответствии с прогнозом международного энергетического агентства (IEA), стоимость производства «зелёного» водорода в Российской Федерации будет одной из самых высоких в мире [19].