



Через голубой водород к зеленому

Анализ ситуации на примере Германии

РАЛЬФ ДИКЕЛЬ

Старший приглашенный научный сотрудник,
Оксфордский институт энергетических исследований (OIES)

Правительство ФРГ стремится к поэтапному отказу от использования бурого и каменного угля для производства энергии к 2038 году и активно поддерживает развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ) как основного средства, позволяющего добиться планируемой декарбонизации к 2050 году. Опубликована также и водородная стратегия, но в ней речь идет исключительно о зеленом водороде – водороде, получаемом при помощи электролиза с использованием электроэнергии, генерируемой ВИЭ. При этом игнорируется роль голубого водорода, получаемого методом парового риформинга или пиролизом природного газа.

Настоящая статья представляет собой обобщенный, сокращенный и обновленный вариант исследования NG 159, выполненного автором в OIES и опубликованного в мае 2020 года под тем же заголовком¹⁾.

Во многих работах проводится сравнение голубого и зеленого водорода по себестоимости и делается вывод о том, что у голубого есть потенциал для существенного уменьшения выбросов CO₂ [2]. В данной статье на примере Германии показывается, что, в дополнение к аргументу о себестоимости, внедрение голубого водорода является обязательным для любого реалистичного сценария декарбонизации, поскольку зеленый водород не будет доступен в значительных объемах до тех пор, пока электроэнергетический сектор не будет полностью переведен на ВИЭ (то есть не раньше 2040 года, а скорее всего, не раньше 2050 года).

В этой связи целесообразным подходом к декарбонизации неэлектрического сектора является его перевод в кратчайшие сроки на голубой водород, получаемый с использованием существующих технологий парового реформинга (SMR) и автотермического реформинга (ATR) с улавливанием и захоронением CO₂ (CCS), а также технологии пиролиза. Для обеспечения своевременной и глубокой декарбонизации следует начать с голубого водорода, внедрение которого проложит зеленому водороду путь на рынок, как только он станет конкурентоспособным. Временные горизонты внедрения голубого и зеленого водорода в ЕС проиллюстрированы на рисунке (см. «Сценарии для будущего производства водорода из природного газа...»).

ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ В ГЕРМАНИИ

Проводимая ранее политика Германии по стимулированию ВИЭ без обеспечения сокращения производства электроэнергии с использованием ископаемого топлива привела к некоторым нежелательным побочным эффектам. Из-за низких предельных затрат электрогенерация с применением ископаемого топлива не снижалась. Наоборот, на территории ЕС создавались новые такие мощности, поэтому динамика выбросов CO₂ в электроэнергетическом секторе Германии не отражала роста выработки электроэнергии из возобновляемых источников.

Основываясь на рекомендациях Угольной комиссии, 19 января 2020 года правительство Германии представило законопроект, предусматривающий полное прекращение электрогенерации на буром (17 ГВт) и на каменном угле (17 ГВт) к 2038 году, а возможно, и раньше – к 2035 году. Был составлен следующий график сокращения мощностей:

- к 31 декабря 2022 года снизить суммарную электрогенерацию на угле до 30 ГВт, в том числе 15 ГВт – на буром угле и 15 ГВт – на каменном угле;
- к 1 апреля 2030 года уменьшить суммарную электрогенерацию на угле до 17 ГВт, в том числе 9 ГВт – на буром угле и 8 ГВт – на каменном угле;
- обеспечить полное прекращение угольной электрогенерации к 31 декабря 2038 года.

Планируется равномерное распределение сокращаемых мощностей с 2022-го по 2030 год и с 2030-го по 2038 год. Разработана четкая схема, предусматривающая закрытие конкретных бурогоугольных электростанций [4],

которую предполагается реализовать на основе соглашений о компенсации между частными компаниями и государством (см. «График сокращения электрогенерации с использованием бурого и каменного угля»).

Подлежащие закрытию генерирующие мощности, работающие на каменном угле, будут определяться на ежегодной основе с учетом установленного суммарного объема сокращения угольной электрогенерации. На период до 2023 года предусмотрена процедура проведения тендеров, на которых операторы закрываемых электростанций смогут выставлять заявки на компенсацию (она ограничивается максимумом, установленным законом). С 2024-го по 2026 год закрытие станций и выплата компенсаций будут осуществляться в соответствии с результатами проведенных ранее тендеров.

Если в течение вышеуказанного периода (и в любом случае после 2026 года) поставленные цели по выведению мощностей не будут достигнуты, закрытие соответствующих станций будет производиться в распорядительном порядке и без выплаты компенсаций.

Этот законопроект и связанное с ним законодательство (главным образом, о региональных и социальных компенсациях) были с некоторыми поправками, но без принципиальных изменений в части схемы поэтапного вывода угольных мощностей, одобрены обеими палатами парламента Германии 3 июля 2020 года [5].

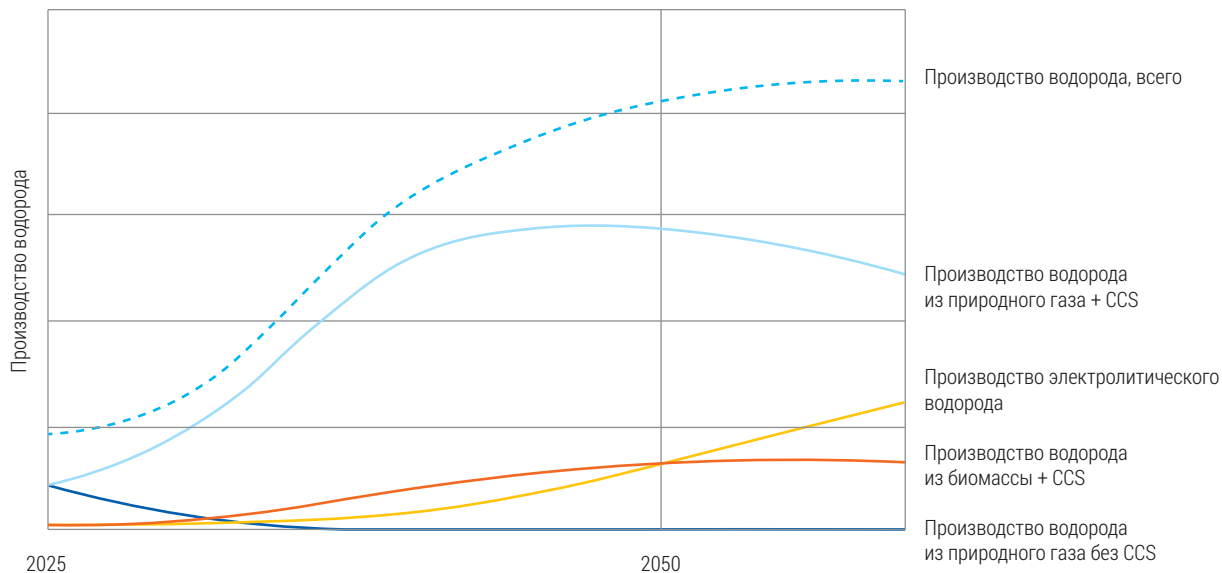
Почти одновременно, 10 июня 2020 года, была опубликована концепция водородной стратегии Германии [6]. Эта концепция предусматривала множество стимулов для исследований и разработок различных элементов водородной экономики, но была ориентирована исключительно на зеленый водород, игнорируя большой потенциал голубого водорода. В работе OIES NG159 [1] показано, что такой подход не внесет существенного вклада в достижение целей Парижского соглашения, которое является обязывающим для Германии как члена ЕС.

КАК ДОСТИЧЬ ОПТИМАЛЬНОГО ЭФФЕКТА?

Электроэнергия, произведенная ВИЭ, может быть использована либо для замены электроэнергии, генерируемой на тепловых электростанциях (ТЭС) на основе ископаемого топлива, либо для производства зеленого водорода путем электролиза. Эффект сокращения выбросов парниковых газов будет значительно больше в первом случае – от замещения электроэнергии вследствие неизбежных потерь энthalпии, которые на ТЭС достигают 50% и более (см. «Максимальный эффект сокращения выбросов CO₂...»).

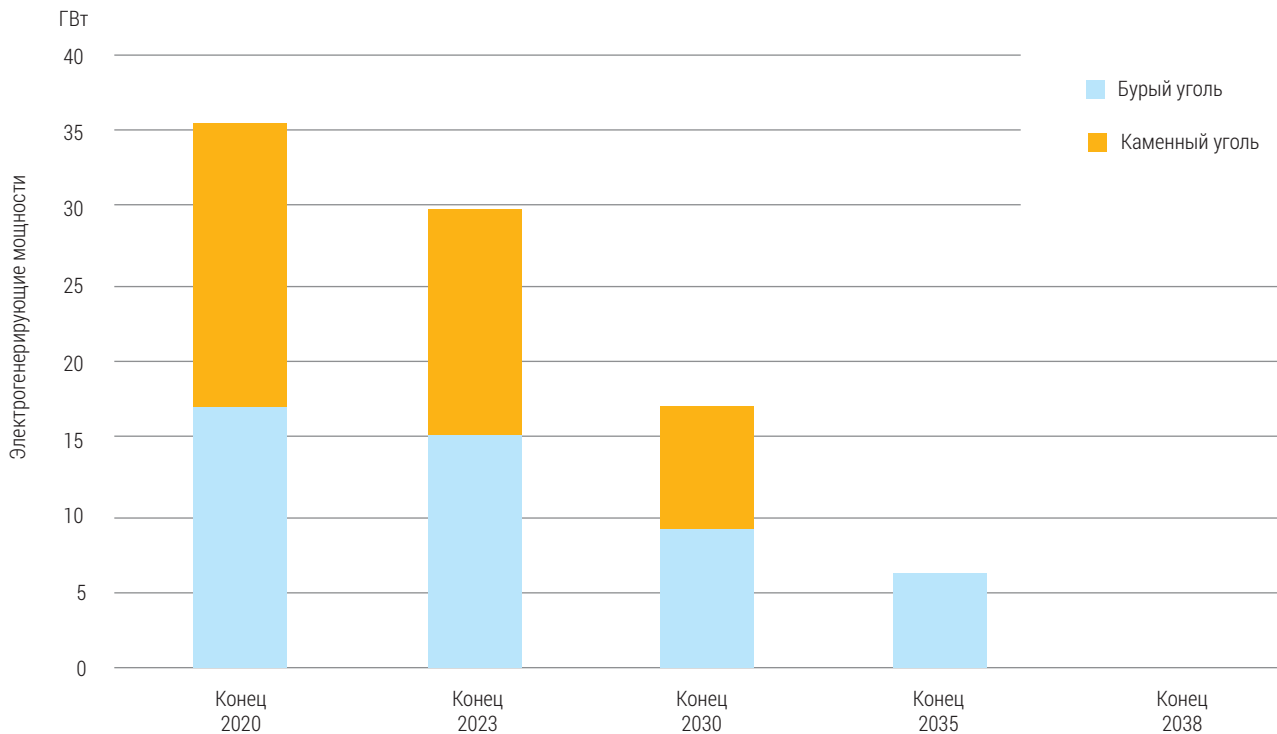
1 кВт*час, произведенный ВИЭ, способен заменить 1 кВт*час электроэнергии ТЭС. При этом объем подведенной тепловой энергии на ТЭС как минимум в два раза превышает объем производимой электроэнергии при использовании парогазовых установок (комбинированного цикла). А на бурогоугольных электростанциях превышение может достигать трехкратной величины, с соответствующими выбросами CO₂, которыми сопровождается производство электроэнергии на ТЭС.

СЦЕНАРИИ ДЛЯ БУДУЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА ИЗ ПРИРОДНОГО ГАЗА (С ССС И БЕЗ НЕГО), ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ИЗ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ И ИЗ БИОМАССЫ С ССС



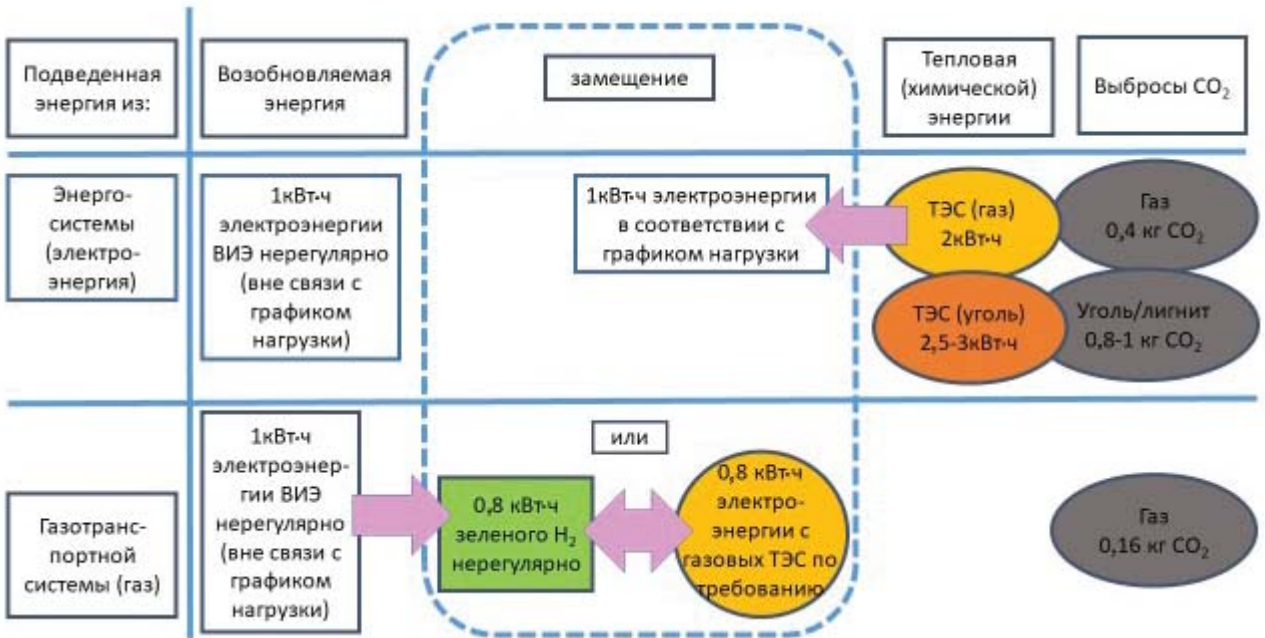
Источник: [3]

ГРАФИК СОКРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БУРОГО И КАМЕННОГО УГЛЯ



Источник: собственные расчеты автора, выполненные на основе закона «Об отказе от угля» (Kohleausstiegsgesetz) [4]

МАКСИМАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ СОКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ CO₂ ОТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИЭ ДОСТИГАЕТСЯ ПРИ ЗАМЕЩЕНИИ ИМИ ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ, РАБОТАЮЩИХ НА ИСКОПАЕМОМ ТОПЛИВЕ



Источник: собственные расчеты автора

Оптимальным вариантом использования ВИЭ является максимально возможное замещение ими выработки электроэнергии с использованием ископаемого топлива. Возможны случаи, когда электросети не могут принять избыточную энергию, генерируемую возобновляемыми источниками. Тогда эта энергия может быть использована для получения зеленого водорода, однако доступные для этой цели мощности недостаточны для выработки сколько-нибудь существенных объемов водорода. Пока для генерации электричества используются значительное количество ископаемого топлива, создавать возобновляемые мощности специально для получения водорода не имеет смысла.

Чем быстрее будут вводиться в эксплуатацию электрогенерирующие мощности на ВИЭ, тем раньше наступит момент, когда электроэнергию из возобновляемых источников станет целесообразно использовать для производства зеленого водорода. Кроме того, сокращение спроса на электроэнергию будет приближать этот момент, в то время как рост ее потребления будет его отдалять. Эти выводы применимы к любым энергосистемам, в которых присутствует генерация на базе ископаемого топлива.

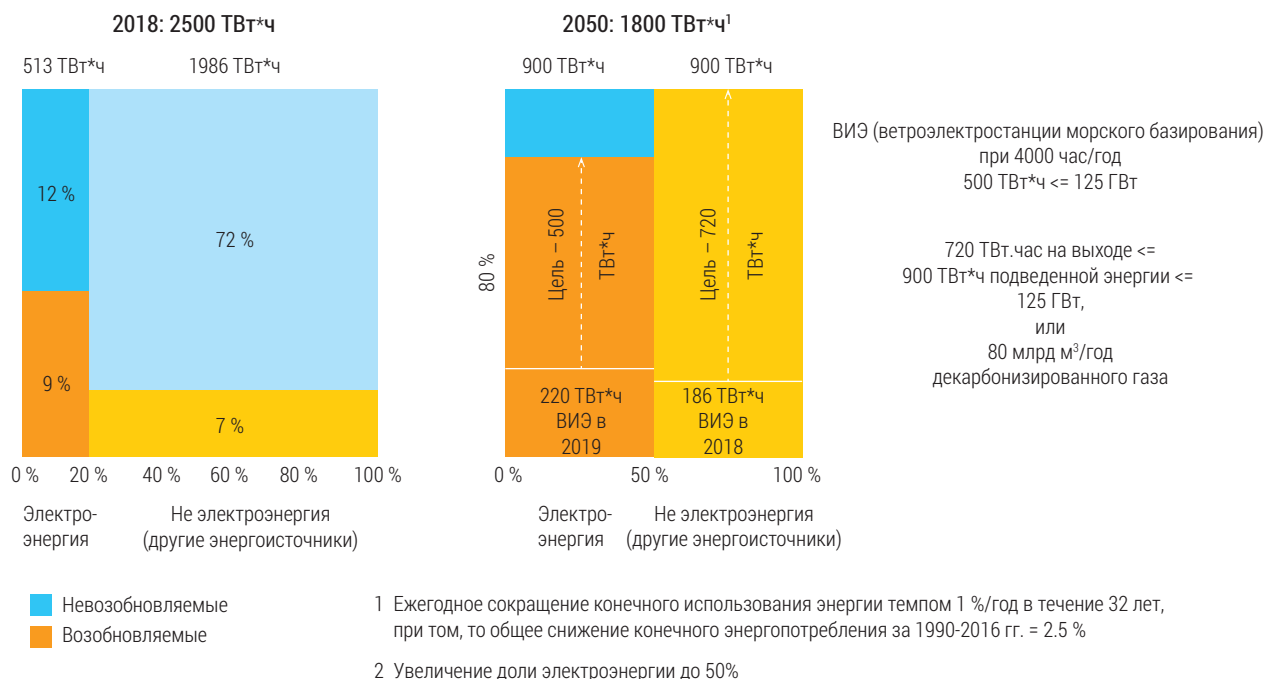
Это не имело бы значения, если бы не фактор времени: Германия, как и ЕС, нацелена на достижение безуглеродной экономики к 2050 году. Так, в 2019 году доля ВИЭ в электрогенерации на территории ЕС в целом составляла 36,6%. В некоторых странах Евросоюза доля

возобновляемых источников энергии выше, чем в Германии, и даже выше 50%. В случае Австрии, Хорватии, Португалии и Швеции это обусловлено большой доступностью гидроэнергии, а в случае Дании – использованием энергии ветра и биомассы (см. программу *Agora Energiewende, 2020*)^[7].

В соответствии с Парижским соглашением, Германия несет обязательства по удержанию глобального потепления (роста глобальной температуры) на уровне значительно ниже 2°C и по приложению усилий для его удержания ниже 1,5°C. Обе эти цели увязаны с установленной квотой выбросов CO₂. В специализированном отчете Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК/IPCC) отмечается наличие большого риска превышения глобальным потеплением порога в 1,5°C^[8].

Ожидание момента, когда использование энергии возобновляемых источников для производства зеленого водорода станет целесообразным, не вариант для построения водородной экономики. Использование энергии ВИЭ для получения зеленого водорода вместо удовлетворения текущего спроса на электроэнергию привело бы к сильному замедлению процесса декарбонизации и неоправданному расходованию углеродной квоты. Во всех прочих отношениях зеленый водород как безуглеродный и экологически чистый энергоноситель стал бы идеальным решением для декарбонизации. Это относится как к Германии, так и к Европейскому Союзу в целом, с его интегрированными рынками газа и электроэнергии.

ДОЛЯ ВИЭ В КОНЕЧНОМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИИ В ГЕРМАНИИ (ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ/НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СЕКТОР): 2018 г. и прогноз на 2050 г.



Источник: собственные расчеты автора, выполненные на основе закона «Об отказе от угля» (Kohleausstiegsgesetz) [4]

В связи с вышеприведенными аргументами, рациональным вариантом видится сокращение выбросов CO₂ путем использования декарбонизированного природного газа (голубого водорода) вместо иллюзорного упования на возобновляемые источники энергии, чреватого крайне высоким риском срыва планов декарбонизации.

Оптимальным вариантом использования таких ВИЭ, как солнечные батареи, морские и береговые ветропарки, является декарбонизация энергетического сектора, где польза от них будет как минимум в два раза больше, чем от их применения для выработки зеленого водорода.

Энергосистема Германии нацелена на принятие всей электроэнергии, произведенной из возобновляемых источников. Согласно реализуемой в настоящее время программе, полная замена электрогенерации на буром и каменном угле, а также атомной электрогенерации возобновляемыми источниками будет достигнута к 2040 году. А если задействовать значительный гидроэнергетический потенциал соседних стран, главным образом Норвегии, то полная декарбонизация электроэнергетического сектора Германии должна быть достигнута к 2050 году. Однако декарбонизация значительно более крупного неэлектрического сектора энергетики путем его перевода на электроэнергию возобновляемых источников не представляется возможным ни в Германии, ни в других странах ЕС раньше 2050 года (если только электроэнергия ВИЭ не будет поставляться по тарифам, значительно отличающимся от текущих

ожиданий). Производство значительных объемов зеленого водорода поставит под угрозу успех декарбонизации электроэнергетического сектора, а также достижение целей, поставленных Парижским соглашением.

Доля ВИЭ в неэлектрической энергетике низка и не демонстрирует роста, будучи ограниченной в основном использованием дров домохозяйствами и коммерческими предприятиями, биоотходов в промышленности и биодизельного топлива на транспорте. И перспективы сколько-нибудь значительного увеличения здесь невелики [9].

В конечном счете потребности неэлектрического сектора, которые, возможно, уменьшатся в будущем благодаря повышению энергоэффективности и внедрению тепловых насосов и аккумуляторных электромобилей, должны быть обеспечены зеленым или голубым водородом. На сегодняшний день доля электроэнергии в энергетическом балансе Германии составляет 21%, а остальные 79% приходятся на неэлектрический сектор.

Даже с учетом очень оптимистичных предположений об экономичном использовании энергии и росте числа эксплуатируемых аккумуляторных электромобилей и тепловых насосов, питаемых электроэнергией из возобновляемых источников, для удовлетворения нужд неэлектрического сектора потребуются колоссальное количество водорода. Оно не сможет быть обеспечено зеленым водородом в обозримом будущем. В отсут-

ствие декарбонизации неэлектрического сектора углеродная квота будет расходоваться с высокой скоростью, что поставит под угрозу достижение цели по удержанию глобального потепления на уровне 1,5°C. На диаграмме (см. «Доля ВИЭ в конечном энергопотреблении в Германии») в левой части показана доля ВИЭ в электроэнергетическом и неэлектрическом секторах Германии в 2018 году.

В правой части диаграммы проиллюстрирован гипотетический вариант реализации амбициозного плана сокращения конечного потребления энергии (темпами 1% в год) до 2050 года. При этом следует заметить, что за период с 1990-го по 2016 год суммарное сокращение конечного энергопотребления составило всего 2,5%. Приведенный сценарий также предполагает увеличение доли электроэнергии в конечном энергопотреблении до 50%, что в цифрах означает рост с 513 ТВт*ч в 2018 году до примерно 900 ТВт*ч в 2050-м, в основном за счет использования аккумуляторных электромобилей и тепловых насосов.

Для достижения целевой доли электроэнергии, вырабатываемой ВИЭ, в 80% (официально объявленная цель на 2050 год), за период с 2018-го по 2050 год потребуются увеличить производство электроэнергии из возобновляемых источников на 500 ТВт*ч/год. Это амбициозно, но реалистично: в период с 2014-го по 2019 год был достигнут впечатляющий среднегодовой прирост выработки электроэнергии из возобновляемых источников – на 15 ТВт*ч/год. Что, однако, явно выходит за рамки политики, определенной на текущий момент.

Это оставляет 180 ТВт*ч/год произведенной электроэнергии (что соответствует 360 ТВт*ч/год подведенной энергии для ТЭС, или 33 млрд м³/год природного газа) на долю электростанций, работающих на природном газе или, в конечном итоге, на декарбонизированном газе/водороде для обеспечения соблюдения графика нагрузки и в качестве резервного источника на случай пасмурной и безветренной погоды. Для обеспечения этой мощности зеленым водородом потребовалось бы израсходовать 440 ТВт*ч/год электричества, произведенного на ВИЭ, с учетом того, что потери при электролизе составляют как минимум 20%. Это также очень амбициозная, но все же достижимая цель на 2050 год. В качестве альтернативы большую часть этой недостающей мощности можно покрыть за счет интеграции немецких ВИЭ со скандинавским энергетическим рынком.

Тем не менее обеспечение нужд неэлектрического сектора за счет зеленого водорода выглядит нереалистичным с учетом как технических, так и политических ограничений. Для выработки недостающих 720 ТВт*ч/год на нужды неэлектрического сектора из зеленого водорода потребуются израсходовать 900 ТВт*ч/год на питание электролизеров (с учетом 20% потерь). Для этого, в свою очередь, потребуется ввод 225 гВт (при 4000 ч/год использования мощности) дополнительных ветровых мощностей к 2050 году, что совсем не реалистично. В то же время для выработки этих 720 ТВт*ч/год из голубого водорода потребуются 80 млрд м³

природного газа в год (или примерно 900 ТВт*ч/год с учетом потерь при конверсии, составляющих около 20%), что соответствует загрузке 60–80 установок автотермического риформинга. Это сложно, но достижимо. И этого можно добиться, не дожидаясь завершения декарбонизации электроэнергетического сектора.

СПРОС НА ВОДОРОД И ИНФРАСТРУКТУРА

Имеются все предпосылки для существенного сокращения выбросов CO₂ за счет использования голубого водорода, получаемого методом парового риформинга (SMR) или автотермического риформинга (ATR) с захоронением CO₂. В последующем предполагается подключение технологии пиролиза, которая, при условии выхода на промышленные масштабы, сможет работать там, где нет возможностей для реализации процесса парового риформинга. Решающее значение приобретает развитие технологии CCS (улавливания и захоронения CO₂), которая впервые была реализована Норвегией в рамках проекта «Северное сияние». В связи с этим требуется выход на промышленный масштаб и тиражирование CCS. Параллельно следует развивать рынок водорода и соответствующую инфраструктуру.

Целесообразным подходом к декарбонизации неэлектрического сектора является его перевод в кратчайшие сроки на голубой водород, получаемый с использованием технологий парового и автотермического риформинга, а также технологии пиролиза

Смешивание водорода и метана (H₂ и CH₄) для транспортировки не может рассматриваться как решение для перехода на водородный рынок, так как оно применимо только для транспортировки и поставки обогащенного водородом природного газа и к тому же создает проблемы, связанные с изменением качественных характеристик газа. Максимальное содержание H₂ в смеси ограничено 15–20% по объему, а выделение H₂ из таких смесей недоступно в промышленных масштабах.

Однако для распределительных сетей ситуация иная. Допустимый диапазон концентраций водорода в метановодородной смеси может быть шире, чем для магистральных сетей высокого давления, а оборудование потребителей легче адаптируется к переменным свойствам газа. Поэтому метановодородные смеси могут быть в перспективе приняты для использования на уровне домохозяйств.

Водород – это продукт, получаемый либо с использованием электроэнергии посредством электролиза, либо из природного газа по технологии парового риформинга метана или его пиролиза. В обоих случаях происходит добавление в цепочку соответствующих процессов и затрат на них. И газ, и электроэнергия, в принципе, доступны на всей территории Германии (и в ЕС), поэтому ограничений по выбору места производства водорода нет. И поскольку инфраструктура для получения водорода может быть размещена где угодно, нет необходимости в инфраструктурном регулировании.

Таким образом, необходимо развитие рынка водорода в виде отдельных кластеров, которые в конечном счете будут расти вместе. Установки конверсии CH_4 в H_2 , как правило, лучше всего размещать на выходе газовой системы высокого давления с подачей продукта в местные или региональные распределительные сети чистого водорода для крупных клиентов, а также в сети метановодородной смеси для использования бытовыми потребителями. Такой подход позволяет использовать все преимущества газовых систем высокого давления, обеспечивая конкурентность и надежность поставок на интегрированном, устойчивом и диверсифицированном газовом рынке, а также надежность поставок по требованию за счет доступа к существующим хранилищам. Он дает возможность осуществлять периодические подерживающие поставки зеленого водорода при его наличии, а также импорт зеленого водорода (что, однако, не ожидается в сколько-нибудь значительных масштабах до 2040-х годов).

Проводимая ранее политика Германии по стимулированию ВИЭ без обеспечения сокращения производства электроэнергии с использованием ископаемого топлива привела к некоторым нежелательным побочным эффектам

Затраты на декарбонизацию природного газа (порядка €50–70/т CO_2 , из которых €10–20/т CO_2 приходятся на транспортировку и захоронение) добавляются к его рыночной стоимости. Поскольку декарбонизация является общественно полезным делом (общественным благом), организация покрытия этих затрат – обязанность государственных структур.

Германия поддерживала и продолжает поддерживать развитие технологий возобновляемой энергии в объемах, явно превышающих затраты на декарбонизацию по схеме голубого водорода, которой нет альтернативы для декарбонизации неэлектрического сектора. Поскольку для декарбонизации природного газа не требуется строительство масштабных объектов, она

не является предметом инфраструктурного регулирования. Скорее, речь идет об общественно полезном деле, требующем подключения механизмов экономической поддержки.

Процесс получения голубого водорода в основном опирается на уже существующие технологии с ограниченным потенциалом снижения затрат, поэтому здесь не следует делать ставку на дальнейшее уменьшение его себестоимости. Как и в случае с электроэнергией ВИЭ в Германии или захоронением CO_2 в США, здесь необходимо разработать механизмы поддержки, которые обеспечат достаточные стимулы потенциальным игрокам для быстрого внедрения известных технологий и разработки новых. По мере технического и экономического развития такая поддержка в конечном итоге может быть сокращена.

Полезно посмотреть на практику, применяемую в США: правилами налогообложения (IRS 45Q) предусмотрен налоговый зачет в размере \$50 за каждую тонну захороненного CO_2 . Германия и ЕС рискуют не только не выполнить свои обещания по декарбонизации, но и позволить своим ключевым отраслям промышленности отстать от США в части декарбонизации.

ВЫВОДЫ

Правильно определенная взаимосвязь между декарбонизацией и устойчивой энергетикой является важнейшей предпосылкой успеха декарбонизации.

Национальная водородная стратегия Германии нацелена исключительно на зеленый водород, основываясь на следующей аргументации: «По мнению правительства Германии, только водород, произведенный на основе возобновляемых источников энергии (зеленый водород), можно считать устойчивым в долгосрочной перспективе». Это банальное утверждение не способствует ни достижению целей декарбонизации, ни осуществлению национальной водородной стратегии. Безусловно, в долгосрочной перспективе устойчивой можно считать только энергетику на базе возобновляемых источников, но задача состоит в декарбонизации энергетического сектора к 2050 году. И с точки зрения инвестиций в энергетическую инфраструктуру и перехода на водород эта перспектива является краткосрочной.

Неудобная правда состоит в том, что у возобновляемых источников энергии и зеленого водорода нет никаких шансов обеспечить к 2050 году достижение декарбонизации неэлектрического сегмента, на который в Германии (и в ЕС) сегодня приходится почти 80% конечного энергопотребления. Каждый киловатт*час энергии ВИЭ лучше всего использовать для замещения электроэнергии, получаемой из ископаемого топлива, поскольку достигаемый при этом эффект декарбонизации, по крайней мере, вдвое превосходит эффект от его применения для получения зеленого водорода.

На протяжении последующих нескольких десятилетий выработка больших количеств зеленого водорода будет неизбежно оказывать негативное влияние на процесс

замещения генерирующих мощностей энергией ВИЭ и поставит под угрозу все еще возможный успех в достижении целей Парижского соглашения. Вопреки широко распространенному мнению, объемы избыточной энергии, которые не могут быть реализованы на энергетическом рынке Германии, очень малы, так как сеть спроектирована таким образом, чтобы принять всю энергию, выработанную на базе ВИЭ.

В Германии разработана четкая схема, предусматривающая закрытие конкретных бурогольных электростанций, которую предполагается реализовать на основе соглашений о компенсации между частными компаниями и государством

И для чего? Голубой водород мог бы запустить декарбонизацию неэлектрического сектора уже сегодня, что дало бы возможность ее завершения к 2050 году. А зеленый водород мог бы подключиться в дальнейшем, когда он будет готов составить конкуренцию.

Для производства голубого водорода на основе парового риформинга (SMR) и автотермического риформинга (ATR) – пиролиз пока еще находится на ранней стадии разработки – необходимо захоронение (утилизация) CO_2 в масштабах современной газодобычи. МГЭИК приходит к выводу, что достижение цели удержания глобального потепления на уровне 2°C будет в два раза дороже без применения технологий улавливания, утилизации и хранения углерода [8, стр. 151 и далее].

Отрицание огромной роли CCS (улавливание и захоронение CO_2) в последующие несколько десятилетий отражает позицию, в которой неприятие ископаемого топлива превалирует над серьезным подходом к проблеме.

Что касается Германии, то декарбонизация электроэнергетического сектора за счет возобновляемых источников энергии пока идет успешно и велика вероятность ее почти полного завершения к 2050 году. Неэлектрический сектор (на который приходится около 80% конечного энергопотребления) также предполагается декарбонизировать к 2050 году. Водород является очевидным кандидатом на замещение углеводородов, так как его можно использовать аналогичным способом и переход на него не вызовет больших проблем.

В то же время крайне маловероятно, что в течение последующих двух-трех десятилетий зеленый водород будет доступен в сколько-нибудь значительных количествах. Рассчитывать на импорт зеленого водорода нереалистично: ЕС и другие промышленно развитые страны находятся в такой же, как и Германия, ситуации в отношении декарбонизации энергетического

сектора. Что касается развивающихся стран, то любая дополнительно произведенная энергия потребуется им самим для собственного развития. А импорт водорода из отдаленных государств, богатых возобновляемыми источниками, столкнется с серьезными транспортными проблемами – при использовании как трубопроводного, так и морского транспорта. Причем последний, по всей вероятности, будет слишком дорогим к 2040 году, согласно МЭА [10].

На 2070 год МЭА прогнозирует (сценарий устойчивого развития) равные доли мирового производства зеленого и голубого водорода [11]. Расчет на безуглеродный импорт в отдаленном будущем будет означать отрицание Германией ответственности за собственную декарбонизацию. Ставка на зеленый водород в качестве единственного или доминирующего подхода к декарбонизации неэлектрического сектора до 2050 года – рискованная игра, ставящая под угрозу вклад Германии в достижение целей Парижского соглашения.

ВИЭ в Германии щедро поддерживались и поддерживаются (прямо и косвенно) согласно закону «О возобновляемой энергии» (Erneuerbare-Energie-Gesetz) с целью обеспечить прохождение ими начальной стадии развития. Цена этой поддержки очевидно превышает затраты на декарбонизацию с использованием голубого водорода. Стимулирование развития технологий получения возобновляемой энергии для обеспечения их конкурентоспособности было и остается необходимым элементом декарбонизации путем замещения всех ныне доминирующих технологий, основанных на ископаемом топливе. Однако эти усилия не помогут осуществить декарбонизацию неэлектрического сектора.

Здесь следует принять во внимание следующие аргументы:

1. Зеленый водород – как выработанный с использованием электроэнергии отечественных ВИЭ, так и импортированный – вряд ли сыграет существенную роль в достижении глубокой декарбонизации к 2050 году. Единственным реалистичным подходом для достижения скорейшей и глубокой декарбонизации неэлектрического сектора является крупномасштабное внедрение голубого водорода.
2. Все элементы технологии голубого водорода готовы к широкомасштабному применению, а технология пиролиза может быть выведена на промышленный масштаб в течение ближайших 10 лет. Необходимо в срочном порядке организовать трансграничную транспортировку CH_4 и захоронение (утилизацию) CO_2 в масштабах, соответствующих объемам выбросов неэлектрического сектора для обеспечения его декарбонизации (по возможности внутри страны, а если это невозможно – с привлечением потенциала соседних государств).
3. Это потребует дополнительных затрат на конверсию CH_4 в H_2 и безопасную утилизацию CO_2 . Причем эти затраты диктуются не рыночными

- соображениями, а политикой, направленной на достижение общественно полезной цели (общественного блага), которой является декарбонизация. Размеры этих затрат известны. И хотя существует возможность для их уменьшения, не следует медлить с определением источников финансирования (например, за счет налогоплательщиков или потребителей путем включения в цену). Декарбонизация является общественно полезным делом, не требующим строительства масштабных объектов. Необходимость в инфраструктурном регулировании отсутствует, за исключением обеспечения легкого доступа к местным и региональным системам H₂.
4. Германия и ЕС в целом должны найти варианты возмещения таких затрат с обеспечением достаточной привлекательной прибыли с целью привлечения инвестиций и игроков, способных управлять декарбонизационной составляющей производства голубого водорода (главным образом, из нефтегазовой промышленности, в которой есть профильные специалисты, активы, а также заинтересованность в сохранении своего бизнеса).
 5. Размещение установок конверсии на выходе газовых систем высокого давления позволило бы использовать все преимущества отлаженной инфраструктуры и существующие выходы на рынок, включая конкурентные преимущества. Это также обеспечило бы надежность поставок, диверсификацию и возможность поставок по требованию

из существующих хранилищ. Рынок чистого водорода может развиваться региональными кластерами, которые со временем могут сливаться и расти вместе, а в дальнейшем ассимилировать и зеленый водород, когда он станет доступным. Применительно к Германии такой подход позволил бы обеспечить эффективный перевод неэлектрического сектора на водород.

Несмотря на объявленный выход из Парижского соглашения, США в 2018 году внесли поправки в свое налоговое законодательство с целью стимулирования захоронения (утилизации) CO₂ (IRS 45Q), включив в него увеличенный налоговый зачет в размере \$50 за каждую тонну утилизированного CO₂. В декабре 2019 года Национальный нефтяной совет США представил документ «Решение двойной задачи»^[12] – хорошо проработанную дорожную карту широкомасштабного развития улавливания, использования и хранения углерода. В нем предлагается увеличить налоговый зачет с сегодняшних \$50 до \$90–110 за тонну CO₂ в будущем с перспективой улавливания (и утилизации) 350–400 млн тонн CO₂ в год с целью обеспечения производства чистого водорода для промышленности США.

Хотя в Германии и ЕС ситуация более сложная, им не следует отставать от США в этом вопросе. Необходимо реализовывать аналогичные эффективные схемы CCUS (улавливания, использования и захоронения CO₂) для обеспечения своей промышленности чистым водородом, чтобы быть на конкурентном уровне с США и вносить вклад в достижение собственных амбициозных целей по декарбонизации. ❗

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ralf Dickel. «Blue hydrogen as an enabler of green hydrogen: the case of Germany». // OIES, OIES Paper: NG 159, May 2020

[2] CE Delft, «Feasibility study into blue hydrogen», July 2018, p. 43, см.: <https://www.cedelft.eu/en/publications/2149/feasibility-study-into-bleu-hydrogen>.

[3] «Hydrogen for Europe. Final report of the pre-study». SINTEF Energy Research, 2019-08-22 (доклад подготовлен совместно Норвежским Фондом научных и промышленных исследований (SINTEF) и Французским институтом нефти, новая энергия (IFPEN)), p.16, см.: https://www.sintef.no/globalassets/sintef-energi/pdf/hydrogen-for-europe-pre-study-report-version-4_med-omslag-2020-03-17.pdf/

[4] Федеральное правительство Германии, 2020 г., закон «Об отказе от угля» (The Federal Government of Germany, 2020, «Coal Phase out law»), стр. 59–60.

[5] См. официальный документ по адресу: <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2020/kw27-dekohleausstieg-701804>

[6] См. официальный документ по адресу: ([https://](https://www.bmw.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf?__blob=publicationFile&v=6)

www.bmw.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf?__blob=publicationFile&v=6)

[7] Программа Agora Energiewende (2020) «The European Power Sector in 2019: Up-to-Date Analysis on the Electricity Transition», March 2020, стр. 7: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2019/Jahresauswertung_EU_2019/172_A-EW_EU-Annual-Report-2019_Web.pdf.

[8] IPCC (2018) «Summary for Policymakers»: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf.

[9] Ralf Dickel. The Role of Natural Gas, Renewables and Energy Efficiency in Decarbonisation in Germany: The need to complement renewables by decarbonized gas to meet the Paris targets. // OIES, OIES Paper: NG129, May 2018

[10] IEA, World Energy Outlook 2018, p. 510

[11] IEA, «Energy technology perspectives IEA 2020, CCUS in clean energy transitions» Sept. 2020, p.76

[12] Meeting the Dual Challenge: A Road-map to At-scale Deployment of Carbon Capture, Use and Storage, US National Petroleum Council, December 2019, <https://dualchallenge.npc.org/>