
ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	7
Глава 1. Возобновляемая энергетика и проблемы выбросов углерода	15
1.1. Перспективы ветряной и солнечной энергетики в рассуждениях двух российских академиков – нобелевских лауреатов	16
1.2. Мировой тренд развития возобновляемой энергетики	26
1.3. Выбросы углекислого газа при производстве электроэнергии	39
1.4. Резюме	52
Глава 2. Инвестиции, производственные мощности и ценообразование в возобновляемой энергетике	55
2.1. Динамика инвестиций и производственных мощностей в возобновляемой энергетике	56
2.2. Ценообразование в возобновляемой энергетике	66
2.3. Резюме	91
Глава 3. Преодоление проблем возобновляемой энергетики и искусственный интеллект	95
3.1. Основные проблемы возобновляемой энергетики	96
3.2. Ресурсы гибридных электростанций и накопителей энергии	113
3.3. Искусственный интеллект и возобновляемая энергетика	131
3.4. Резюме	141

Глава 4. Модель определения социально-экономической выгоды от использования возобновляемой энергетики	145
4.1. Цель исследования	146
4.2. Социальная стоимость углерода	150
4.3. Социальная ставка дисконтирования	154
4.4. Экономическая стоимость жизни и эффект от ветряной и солнечной генераций	157
4.5. Расходы на здравоохранение	160
4.6. Беспрецедентное решение суда по иску 17000 граждан к нефтегазовой корпорации о выбросах CO ₂	162
4.7. Резюме	167
Глава 5. Расчет экономии от применения солнечной и ветряной энергии при замещении ископаемых источников.....	169
5.1. Общая величина потенциально сэкономленных средств	170
5.1.1. Экономия от замены газа ветряной энергией	174
5.1.2. Экономия от замены угля ветряной энергией.....	180
5.1.3. Экономия от замены нефти ветряной энергией	182
5.1.4. Ресурсосбережение при замене ископаемых источников энергии ветряной энергией в производстве мировой электроэнергии	185
5.1.5. Экономия от замены природного газа солнечной энергией.....	187
5.1.6. Экономия от замены угля солнечной энергией	189
5.1.7. Экономия от замены нефти солнечной энергией	192
5.1.8. Ресурсосбережение при замене ископаемых источников энергии солнечной энергией в производстве мировой электроэнергии	194
5.2. Инвестиции в газовую и ветряную генерации	206
5.3. Резюме	209

Глава 6. Сила ветра и солнца в переустройстве европейской энергетики.....	212
6.1. Великобритания	213
6.2. Германия.....	221
6.3. Испания	237
6.4. Италия.....	244
6.5. Франция.....	249
6.6. Резюме	253
Глава 7 Евразийская роза ветров	258
7.1. Китай	258
7.2. Япония	266
7.3. Индия.....	271
7.4. Россия	278
7.5. Резюме	286
Глава 8. США: декарбонизация посредством диверсификации энергоносителей	290
8.1. Климатический план 46-го президента США.....	291
8.2. Ветряная и солнечная энергетика в 2030 г.	294
8.3. Льготы и преференции для ветряной и солнечной энергетики	298
8.4. Резюме	300
Глава 9. Интеграция энергетических компаний.....	302
9.1. Разворот в деятельности крупнейших энергетических компаний	303
9.2. «Зеленый водород» и углеродная нейтральность	314
9.3. Резюме	329
Заключение	331
Библиографический список.....	345

Моей семье посвящается!

Кто понял жизнь, тот верно знает –
С энергией солнца страна прирастает!

Аллюзия на стихотворение Омара Хайяма

Введение

Смены энергетических формаций синхронизируются с новыми техническими и технологическими прорывами и резким возрастанием экономической мотивации у пользователей к новшествам. Вместе с тем каждый новый энергетический переход не означает моментальный вывод из эксплуатации устаревших видов генераций и ввод новых. Скорее речь идет о сложившемся в течение определенного периода времени тренда на обновление. Практика подтверждает этот тезис.

По устоявшемуся мнению, начало которому положил канадский профессор Вацлав Смил, в литературных источниках рассматриваются четыре энергетических перехода [Смил, 2020]. Первый энергетический переход — это путь от биомассы к углю. Он датируется периодом с 30–40-х годов XIX в. и до начала XX в. Это период, когда уголь стал приоритетным энергоносителем для нового индустриального мира. Следует отметить, что и в настоящее время дрова, биомасса продолжают, правда в значительно меньшем объеме, использоваться в качестве энергоносителя. Второй энергетический переход был связан с бумом нефти, когда появился и получил всестороннее развитие, прежде всего, на транспорте, двигатель внутреннего сгорания. По длительности этот переход примерно равен предыдущему, и продолжился с 10-х до 80-х годов XX в. Третий энергетический переход привел к широкому использованию природного газа в энергетике и в различных отраслях хозяйствования. Его отличительной особенностью является то, что значительный период этого перехода осуществлялся параллельно прохождению второго перехода и характеризуется частичным вытеснением угля и нефти. Вместе с тем уголь по-прежнему продолжает доминировать среди энергоносителей.

Более детализированная по срокам периодизация энергетических переходов позволила исследователям сделать вывод о том, что

снижается порог доминирования нового энергоносителя. Так, при первом переходе удельный вес угля в общем объеме потребления первичной энергии за период с 1840 г. по 1900 г. увеличилась с 5 до 50%. При втором переходе доля нефти менялась с 3% в 1915 г. до 45% к 1975 г. При третьем переходе доля газа выросла с 3% в 1930 г. до 23% в 2017 г. [Прогноз развития энергетики мира и России, 2019, с. 15].

Принято считать, что четвертый энергетический переход только начинается, поскольку объемы используемых в экономике альтернативных генераций еще не столь велики. В отличие от предыдущих энергетических переходов, у четвертого основным стимулом становится не столько достижение прямой экономии, что, впрочем, достаточно интересно и продуктивно, но и, главное — противоборство изменению климата, декарбонизация.

Считаю, что такой методологический подход к существу энергетических переходов не совсем точный. Дело в том, что традиционно применяемые дефиниции, характеризующие энергетическую принадлежность сырьевых ресурсов, так называемые ископаемые источники энергии (уголь, нефть, природный газ), могут лишь потенциально использоваться как энергоносители¹. В реальности часть из этих источников в энергетике в полном объеме не используется, поскольку они применяются и в химической промышленности, например, для производства химикатов, удобрений, водорода, для отопления зданий, нагрева воды, для нужд транспорта, для цветной и черной металлургии (коксующиеся угли)². В то же вре-

¹ В литературе помимо «ископаемых источников энергии» можно обнаружить и другие схожие термины. Так, в работе [Фридман, 2010] рассматриваются экономические аспекты «истощаемых природных ресурсов» со ссылкой на Гарольда Хотеллинга, который является основоположником теории истощаемых природных ресурсов (1931 г.). Считаю, что этот термин действительно хорош с точки зрения более точного обоснования альтернативы экологически чистым возобновляемым источникам энергии. Следует иметь в виду, что в состав истощаемых природных ресурсов входят не только энергоносители. Позже Г. Хотеллинг стал также использовать термин «невозобновляемые источники».

² По данным исследования Международного энергетического агентства (IEA), доля металлургических углей в общем объеме добытых углей в 2019 г. составляла 14%

мя возобновляемые источники энергии также не в полном объеме применяются только в энергетике, но частично, хоть и в незначительных размерах, используются в других отраслях, например, в бумагоделательном и химическом производстве.

Отдельного внимания заслуживает использование ископаемых и возобновляемых источников в транспортных средствах. В настоящее время в этом секторе используется 90% нефти.

С учетом отмеченных обстоятельств, считаем целесообразным осуществлять сравнительный анализ изменений, происходящих, прежде всего, в энергетике, на основе динамики, сложившейся в электроэнергетике. То есть ретроспективно и перспективно исследовать и сопоставлять пропорции между углем, нефтью и природным газом, с одной стороны, и ветряной и солнечной энергией, с другой стороны, при производстве электроэнергии.

Изменения, происходящие в мировом энергетическом балансе, — процесс, основанный на инновациях, но, тем не менее, длительный, на него оказывают влияние многочисленные факторы, подчас подверженные высокой неопределенности. В каждом из перечисленных энергетических переходов отмечен наиболее важный, присущий ему и определяющий его, энергоноситель. Вместе с тем и уголь, и нефть, и природный газ продолжают использовать в различных сочетаниях и объемах в электроэнергетике наряду с возобновляемыми источниками энергии. Параллельно используются еще и атомное сырье, гидроэлектроэнергия. Несмотря на указанную выше датировку, все они вместе формируют энергетические балансы стран, континентов, мира в целом.

Энергетические стратегии разных стран формируются и реализуются в зависимости от наличия энергетических ресурсов, сложив-

(<https://www.iea.org/reports/coal-2020/supply>); химическая промышленность является крупным потребителем нефти и газа. На нее приходится 15% от общего объема спроса на нефть и 9% газа (<https://www.iea.org/reports/chemicals>). По данным U.S. Energy Information Administration (May 26, 2021), использование природного газа в США от общего объема потребления природного газа в США в 2020 г. составляло 38% (<https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/use-of-natural-gas.php>).

шейся инфраструктуры, географического положения, уровня экономического развития. Хорошо понимая, что у каждой генерации есть определенные пределы роста, ряд стран, имеющих много общего и, прежде всего, запасы ресурсов, географическое расположение, тем не менее, активно нацелены на развитие возобновляемой энергетики, на наиболее полное использование ее потенциала.

Мы поставили своей целью исследовать феномен под названием «возобновляемая энергетика», удельный вес которой достиг почти 12% в общем объеме производства электроэнергии, а с учетом гидроэлектроэнергии – почти 28%. При этом основное внимание в этой монографии намерены уделить социально-экономическим аспектам ее ключевых составляющих – ветряной и солнечной энергии, доля которых во всей электроэнергетике мира составляла на момент написания этой книги немногим более 9% и почти 78% во всей возобновляемой энергии (без учета гидроэлектроэнергии).

Автор посчитал целесообразным рассмотреть в настоящей публикации два важнейших аспекта применения ветряной и солнечной энергии: формирование новой структуры энергобаланса в мире и по странам в результате их конкуренции с другими генерациями; в качестве эффективного способа осуществления декарбонизации посредством снижения выбросов CO₂ при замещении ископаемых источников энергии.

В девяти главах этой книги читатель познакомится с динамикой развития возобновляемой энергетики на трех уровнях: в целом по миру, по наиболее крупным в экономическом и энергетическом отношении странам, на ведущих энергетических компаниях и электростанциях; выяснит, как эволюционируют ветряные, солнечные и газовые источники в производстве электроэнергии, ознакомится с аналитической информацией о происходящих процессах декарбонизации и выбросах углекислого газа в атмосферу при производстве электроэнергии во взаимосвязи с использованием ветряной и солнечной энергии; узнает, какой является структура и масштабы выбросов CO₂ при использовании нефти, природного газа, угля в ми-

ровой электроэнергетике и в десяти ведущих странах, на долю которых приходится около трех четвертей всех выбросов углекислого газа в электроэнергетике.

Автор рассмотрит вопросы развития инвестиционной активности в возобновляемой энергетике, включая ветряную и солнечную энергию. Будут исследованы характерные особенности роста производственных мощностей, динамика изменений коэффициента использования установленных мощностей, факторы, оказывающие влияние на ценообразование электроэнергии, соразмерность нормированной стоимости электроэнергии и цен для домохозяйств и предприятий. Здесь внимание будет акцентировано на том, насколько оказались неучтенными некоторые значимые факторы в нормированной стоимости генераций; какую реальную мотивацию в виде экономии ресурсов могут получить инвесторы при замещении ископаемых энергоносителей, в частности, природного газа, ветряной и солнечной энергии, с учетом сокращения затратной части в цене электроэнергии; рассмотрены льготы и преференции, применяемые в электроэнергетике.

Не останутся без внимания основные сложности, все еще стоящие перед возобновляемой энергетикой. Все проблемы классифицированы автором и разделены на четыре основные группы. Они включают проблемы, реально существующие и требующие своего быстрейшего разрешения, а также некоторые мнимые или надуманные, и способы преодоления реальных проблем. Особое внимание уделено ресурсному потенциалу, который имеется у гибридных электростанций и накопителей энергии. По мнению автора, важным и значимым вкладом в деле устранения имеющихся проблем и возникающих сложностей в осуществлении непрерывной подачи электроэнергии в сети может стать включение в этот процесс искусственного интеллекта, применение на его основе активно-адаптивной системы электроснабжения. Представлен опыт компаний Германии, Италии, Испании, Дании по работе электрических сетей на основе использования искусственного интеллекта. Анали-

зируется динамика происходящих изменений в структуре инвестиций в создание интеллектуальных энергосетей по направлениям энергетических технологий.

Важнейшая часть монографии посвящена определению социально-экономической выгоды от использования возобновляемой энергетики. Конкуренция обусловлена экономической мотивацией хозяйствующих субъектов, для которых важно знать, насколько значимым может быть эффект от использования новых технологий, применения новой техники. Представлено теоретическое обоснование построения принципиально новой оригинальной авторской модели расчетов экономии ресурсов, возникающей при замене ископаемых источников энергии – природного газа, угля и нефти ветряной и солнечной генерациями. Рассмотрены такие социально-экономические критерии как экономическая стоимость жизни, социальная ставка дисконтирования, социальный налог на выброс двуокиси углерода. Это является важным обстоятельством не только для роста предпринимательской активности, но, что может быть еще важнее, для реализации адекватной государственной политики не только в электроэнергетике, но и в области здравоохранения, экологии, во многих сферах жизнедеятельности. Указана мотивационная составляющая, побуждающая снизить зависимость от углеродоемких технологий. Теоретические предпосылки подкреплены соответствующими подробными выкладками формирования экономического эффекта в целом по миру и по ведущим энергетическим странам. Руководствуясь методологией определения социально-экономических выгод от применения возобновляемой энергии, были рассчитаны объемы выбросов углекислого газа, предотвращенные замещением ископаемых источников энергии ветряной и солнечной энергией, по четырем странам – США, Китаю, Германии и Великобритании. Приведены расчеты на уровне отдельных крупных электростанций, находящихся на шельфе и использующих ветряной ресурс при производстве электроэнергии. Определены фактические показатели динамики изменения пропор-

ций между сложившимся инвестиционным насыщением ветряной энергетикой по сравнению с энергией природного газа, приходящихся на единицу вырабатываемой электроэнергии. Представлены комментарии автора по рассмотрению беспрецедентного решения суда по иску к одной из крупнейших нефтегазовых корпораций о выбросах CO₂.

Особое внимание уделено прогнозированию развития ветряной и газовой генераций на предстоящее десятилетие. Автор представил читателям проведенные и прокомментированные им расчеты использования ветра и солнца для достижения в 2030 г. тех целевых установок, которые заложены в законодательных и нормативно-правовых актах, правительственных программах, анонсированных руководителями десяти ведущих энергетических стран мира. При этом выясняются, насколько велико влияние, оказываемое этими генерациями на снижение уровня выбросов двуокиси углерода в атмосферу, возможности замещения в энергобалансе стран токсичных ископаемых источников ветряной и солнечной энергией. Представлена обширная многолетняя экономико-статистическая информация, собранная, обобщенная и систематизированная автором по динамике использования в электроэнергетике «зеленых» энергоносителей – ветряной и солнечной энергии. Рассматриваются ключевые показатели и особенности национальных программ на перспективу до 2030 г. Определяется степень оказываемого влияния на вредные выбросы CO₂, пропорции и потенциал использования ветра и солнца в общих объемах производства электроэнергии, включая замещение ископаемых источников энергии, расширение выработки в целях увеличения парка электромобилей, подачи «зеленой» энергии в домохозяйства.

Читатель узнает о двух основных направлениях интеграции ведущих в мире энергетических компаний, отраженных в корпоративных стратегиях и нацеленных на декарбонизацию и достижение углеродной нейтральности в их деятельности с учетом принятой общемировой доктрины по климату, европейских и национальных

программ. Особое внимание будет уделено дискуссии, определяющей целесообразность и направленность использования различных видов водорода — зеленого, розового, голубого, бирюзового, желтого, серого, бурого, черного, выяснению приводимых доводов pro и contra; проведению сопоставительного анализа декларируемых и реальных инвестиционных затрат, которые могут быть связаны с применением этого энергетического топлива в будущем.

При подготовке монографии использовано большое количество первоисточников, рассмотрены мнения большого количества специалистов — ученых и практиков. Публикуемые в монографии результаты исследования основывались на статистических данных ведущих в мире аналитических агентств: British Petroleum, IEA, IRENA, Lazard, Ember, Global Wind Energy Council — GWEC, Berkeley Lab, EIA, Национальной лаборатории по возобновляемым источникам энергии (NREL) в США, REN21, Bloomberg NEF, немецкого института Fraunhofer ISE, Массачусетского технологического института (MIT) и др. При подготовке этой книги приходилось обращаться ко многим информационно-аналитическим ресурсам, но считаю необходимым особо выделить и поблагодарить Владимира Сидоровича и ведомый им сайт www.genep.ru.

Автор стремился осуществить в монографии сбалансированный подход при анализе развития ветровой и солнечной энергии, определить значимость их вклада в декарбонизацию. Теперь слово за читателем. Только ему решать, что получилось и насколько оправдались его ожидания по поводу прочитанного в книге.

Глава 1

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ПРОБЛЕМЫ ВЫБРОСОВ УГЛЕРОДА

В этой главе можно узнать, какими представлялись перспективы ветряной и солнечной энергетики двум российским академикам – нобелевским лауреатам, другим известным ученым, сопоставить их точку зрения с собственным пониманием и восприятием рассматриваемых вопросов, выяснить, насколько подтвердились их прогнозы. Читатель познакомится с динамикой развития возобновляемой энергетики в трех ее вариациях в целом по миру и по многим странам, в том числе Китаю, США, Германии, Великобритании, Японии, Индии. Особо акцентируется внимание на вопросе, как эволюционируют ветряные, солнечные и, особенно, газовые и угольные источники в производстве электроэнергии; выясняется, как складывалось соотношение ветряной и солнечной энергии с газовой генерацией на протяжении более тридцати лет; что скрывается за так называемой «энергетической мифологией». Представляется возможность ознакомиться с аналитической информацией о происходящих процессах декарбонизации и выбросах углекислого газа в атмосферу при производстве электроэнергии во взаимосвязи с использованием ветряной и солнечной энергии. На примере Гер-

мании, Великобритании приводится разъяснение, какова реальная роль ветряной и солнечной энергии в проведении политики декарбонизации, замещении угля и других ископаемых источников энергии. Выясняется, какой является структура и масштабы выбросов двуокиси углерода при использовании нефти, природного газа, угля в мировой электроэнергетике и в десяти ведущих странах, на долю которых приходится около трех четвертей всех выбросов углекислого газа в электроэнергетике.

1.1. Перспективы ветряной и солнечной энергетики в рассуждениях двух российских академиков — нобелевских лауреатов

Академик Петр Леонидович Капица 8 октября 1975 г. сделал доклад «Энергия и физика» на научной сессии, посвященной 250-летию Академии наук СССР. В этом научном труде, получившем большой резонанс, были представлены несколько важных соображений ученого, которые до настоящего времени продолжают будоражить сознание как сторонников, так и оппонентов солнечной и ветряной энергии. Причин здесь много.

Во-первых, мы обратили внимание на следующее заявление ученого: «Сейчас в качестве основных энергетических ресурсов используются торф, уголь, нефть, природный газ. Установлено, что запасенная в них химическая энергия была накоплена в продолжение тысячелетий благодаря биологическим процессам. Статистические данные по использованию этих ресурсов показывают, что в ближайшие столетия они будут исчерпаны. Поэтому, на основе закона сохранения энергии, люди, если они не найдут других источников энергии, будут поставлены перед необходимостью ограничения ее потребления, и это приведет к снижению уровня материального благосостояния человечества. Неизбежность глобального энер-

гетического кризиса сейчас полностью осознана» [Капица, 1975]. Почти полностью соглашаюсь с соображениями из цитируемой части доклада.

Как видно, вывод нобелевского лауреата однозначный: необходим поиск альтернативных источников энергии. Единственное здесь может быть уточнение, внесенное временем: запасы ресурсов, о которых говорил академик П.Л. Капица, истощаются быстрее, чем «в ближайшие столетия». Так, руководитель Министерства природных ресурсов России А. Козлов сообщил в интервью СМИ, что обеспеченность всех запасов нефти в России при текущей ее добыче составляет 59 лет, а запасы природного газа составляют 103 года [Козлов, 2021]. С некоторым сомнением отношусь к утверждению, что действительно всеми осознана неизбежность возникновения глобального энергетического кризиса в связи с истощаемостью природных ресурсов. Думаю, что далеко не все восприняли предостережение академика.

Во-вторых, мы решили проверить утверждение относительно вычисленного ученым норматива освещения поверхности Земли Солнцем на современных данных. В докладе П.Л. Капицы содержится следующее соображение: «Оптимальный расчет сейчас показывает, что снимаемая с одного квадратного метра освещенной Солнцем поверхности мощность в среднем не будет превышать 100 Вт. Поэтому, чтобы генерировать 100 МВт, нужно снимать электроэнергию с площади в 1 кв. км. Ни один из предложенных до сих пор методов преобразования солнечной энергии не может этого осуществить так, чтобы капитальные затраты могли оправдаться полученной энергией. Чтобы это было рентабельно, надо понизить затраты на несколько порядков, и пока даже не видно пути, как это можно осуществить. Поэтому следует считать, что практическое прямое использование солнечной энергии в больших масштабах нереально. Использование ветра, также из-за недостаточной плотности энергетического потока, оказывается экономически неоправданным. Конечно, использование солнечной энергии, малых

водяных потоков, ветряков часто может быть полезным для бытовых нужд в небольших масштабах» [Капица, 1975].

Считаю, что приведенный тезис следует рассмотреть в рамках нескольких исследовательских вопросов. Прежде всего, необходимо определиться, возможно ли на практике построить солнечные и ветряные электростанции, на которых достижима мощность 100 МВт на 1 кв. км? Сейчас, спустя почти полвека, можно утверждать, что да, вопреки утверждению ученого, это вполне возможно. В табл. 1.1 мы представили в качестве примера данные по десяти ветряным и солнечным электростанциям (фотоэлектрическим – PV и концентрированным – CSP), общая мощность которых составляет более 3402 МВт, работающих в шести странах, находящихся в разных уголках мира, где выдерживается или почти достигаемым является предложенный академиком условный норматив.

Таблица 1.1.

**Мощность и площадь современных ветряных
и солнечных электростанций**

Наименование энергетического проекта	Страна дислокации электростанции	Мощность электростанции, МВт	Площадь, кв. км	Мощность электростанции на 1 кв. км, МВт
Солнечные фотоэлектрические (PV) электростанции				
EL Romero	Чили	246,0	2,8	88
Boungala Solar	Австралия	220,0	3,0	73
Солнечные концентрированные (CSP) электростанции				
Atacama plant	Чили	210,0	0,24	875
Aurora Solar Terminal Power Project	Австралия	150,0	1,20	125
Extremadura Solar Complex Caceres	Испания	20,00	1,15	247
Miraah Solar Thermal Plant	Оман	1021,0	3,0	340

Окончание табл. 1.1.

Наименование энергетического проекта	Страна дислокации электростанции	Мощность электростанции, МВт	Площадь, кв. км	Мощность электростанции на 1 кв. км, МВт
Ветряные электростанции				
King Mountain Wind Farm	США	278,2	2,1	132
Snowtown Wind Farm	Австралия	370,0	0,3	1233
San Gorgonio Pass Wind Farm	США	619,0	1,4	442
Купе Muir	Великобритания	88,0	0,24	367

Источник: рассчитано автором на основе собранных им данных по энергетическим проектам.

Что касается невозможности, по мнению академика, понижения затрат, т.е. стоимости, на «несколько порядков для достижения рентабельности энергетических проектов», то этот вопрос нам также удалось прояснить. В этой связи сошлемся на данные международного агентства Blumberg New Energy Finance [Сидорович, 2017]. Согласно этим данным, в 1977 г. стоимость одного киловатта электроэнергии, вырабатываемой на фотоэлектрических станциях, была чрезвычайно высокой, действительно почти неподходящей для промышленных целей – 76,67 долл. На тот момент, когда была произнесена речь, академик П.Л. Капица был абсолютно прав. Однако спустя 38 лет, т.е. в 2015 г., стоимость электричества сократилась до 0,03 долл. за один киловатт, т.е. более чем в 2555 раз, а через пять лет сократилась еще на треть. При наличии высокой мотивации, связанной с резким удешевлением электроэнергии, экономические условия реализации инвестиционных проектов могут быть очень динамичными. Относительно экономической «неоправданности

использования ветра из-за недостаточной плотности энергетического потока», на что обращает внимание академик, то, конечно, погодные условия, влияющие на прерывистость ветра, имеют большое значение. Однако следует иметь в виду, что здесь также произошли более чем существенные изменения. Правильно обозначенная академиком проблема отнюдь не является непреодолимой. Она имеет несколько способов практических решений, например, посредством строительства более высоких и мощных ветрогенераторов; путем использования накопителей для хранения электроэнергии в течение нескольких часов; созданием гибридных электростанций; применения искусственного интеллекта в преодолении проблем возобновляемой энергетике.

Статистика, учитывающая масштабную выработку электроэнергии в мире, когда в качестве энергоносителя выступает ветер, стала формироваться через десять лет после знаменитого доклада П.Л. Капицы. По данным British Petroleum, все началось в 1985 г. в Дании с показателя объема всего в 0,1 ТВт-ч, а статистический учет солнечной генерации берет начало в 1989 г., когда в США было произведено 0,3 ТВт-ч [BP Statistical Review of World Energy – all data, 1965–2020]. Через 35 лет, т.е. в 2020 г., за счет ветряной энергии было произведено 1591,2 ТВт-ч, а за счет солнечной – 855,7 ТВт-ч, т.е. суммарно 2446,9 ТВт-ч [BP Statistical Review of World Energy 2021]. В результате стала формироваться новая отрасль в энергетике. Поэтому рекомендация академика на необходимость поиска «других источников энергии» реализуется.

Конечно, высказывать критические замечания в адрес положений доклада знаменитого ученого физика, причем спустя почти полвека, мне, скромному экономисту, куда проще, чем ему – великому ученому делиться с научным миром концептуальными соображениями. Поэтому моя функция достаточно простая – сопоставить сложившиеся показатели и в меру своего понимания прокомментировать их. Тем не менее собранная информация позволяет утверждать, что глубокие теоретические и практические выводы

нобелевского лауреата о будущем солнечной и ветряной энергии могут быть скорректированы с учетом достигнутых впоследствии результатов.

Еще один российский нобелевский лауреат, академик Жорес Иванович Алферов глубоко проникся идеей развития возобновляемой энергетики и, прежде всего, станциями, использующими в качестве энергоносителя Солнце. Отвечая на вопрос издательства «Свободная пресса» 5 апреля 2010 г., какие направления инновационного развития самые важные, Ж.И. Алферов ответил: «Безусловно, это альтернативная энергетика. У нас, казалось бы, много нефти и газа. Тем не менее альтернативная энергетика – это движитель массы новых технологий, и без нее человечество не проживет... Подсчитано, что если бы мы перешли на альтернативную энергию в мировом масштабе, то к 2020 году, когда потребление энергии должно вырасти до 16 триллионов ватт, нам хватило бы 11 триллионов ватт за счет уменьшения потерь» [Алферов, 2010]. Выступая на панельной дискуссии конференции ENES, академик Ж.И. Алферов отметил, «развитие каскадных солнечных концентраторных батарей позволяет при массовом производстве сегодня добиться КПД в 40%, а значит, возможно заметное увеличение прироста мощности при снижении стоимости одного киловатта. Этот способ преобразования солнечной энергии достиг того уровня, когда он начинает экономически конкурировать с существующими типами производства электроэнергии. С моей точки зрения, к середине столетия он будет составлять заметную часть, десятки процентов производства электроэнергии в мире» [Алферов, 2015].

Представим хронологию установления наивысших в мире показателей достижения КПД в работе солнечных модулей. В 2009 г. компания Spectrolab (дочерняя фирма Boeing) продемонстрировала солнечный элемент с эффективностью 41,6%. В 2011 г. калифорнийская компания Solar Junction увеличила КПД фотоэлемента до 43,5%. Затем в университете Джорджа Вашингтона был создан каскадный солнечный модуль с коэффициентом полезного действия

батареи в 44,5%. В 2013 г. компания Sharp создала трехслойный фотоэлемент на индиево-галлий-арсенидной основе с КПД 44,4%, а группа специалистов из Института систем солнечной энергии общества Фраунгофера, компаний Soitec, CEA-Leti и Берлинского центра имени Гельмгольца создали фотоэлемент с КПД 44,7%. В 2014 г. в Институте солнечных энергосистем Фраунгофер создали солнечные батареи, в которых благодаря фокусировке линзой света на очень маленьком фотоэлементе КПД удалось увеличить до 46%. Спустя три года в 2020 г. ученые из Национальной лаборатории по возобновляемым источникам энергии (NREL) в США установили два мировых рекорда эффективности преобразования солнечной энергии. Сделали они это благодаря инновационному элементу, который преобразует свет в электричество и содержит 140 слоев полупроводниковых материалов. При естественной освещенности солнцем фотоэлемент показал КПД в 39,2%, что является рекордным достижением. Под сконцентрированными солнечными лучами, когда освещенность превышает естественную в 143 раза, также был зафиксирован наивысший мировой результат, превышающий предыдущий, которого достигли их коллеги из Института Фраунгофера в Германии. Новый рекорд составил 47,1% [Mazengarb, 2020].

Необходимо иметь в виду, что каскадные концентраторные солнечные панели (CPV) являются наиболее эффективными среди всех фотоэлектрических модулей. Здесь нам представляется наиболее важным то, что для станций концентрационной солнечной энергии (CSP) имеются значительно большие возможности для осуществления процесса диспетчирования в ходе поставок электроэнергии в сети, поскольку более совершенная технология позволяет в течение многих часов аккумулировать и хранить электроэнергию. Однако их применение наиболее приемлемо в регионах, постоянно освещаемых солнцем.

Наиболее крупные солнечные энергетические станции имеют явно выраженную южную прописку. Традиционно считается, что

в южных странах больше солнца, и оно бесплатно светит чуть ли не круглый год. Это не совсем точно. Количество солнечных дней в году во многих городах России, например, в Омске, Хабаровске составляет 300 ясных дней в году, в Иркутске — 318. Это почти столько же, сколько в таких регионах как Монако, Сенегал, Марокко, Кипр, Западная Андалуссия (в Валенсии — 300 дней). Причем продолжительность светового дня в сибирских городах — 17,2 часа против 15,5 часов в Крыму. Конечно, угол наклона солнечных панелей при перемещении от экватора к полюсам следует увеличивать для того, чтобы концентрировать больший объем солнечной энергии на единицу площади. Причем с повышением температуры происходит снижение выходной мощности. Кремниевые солнечные панели, а их пока большинство, имеют средний температурный коэффициент $-0,45\%$. Это означает, что для каждого градуса, превышающего 25°C , выход мощности снижается на этот процент. То есть при 35°C 40-ваттная солнечная панель с температурным коэффициентом $-0,45\%$ произвела бы менее 35,5 Вт. Таким образом, для кремниевых фотоэлементов при понижении температуры напряжение солнечных элементов, как минимум, возрастает, повышая при этом выходную мощность электростанции. Кроме того, увеличение угла наклона панелей позволяет сократить образующийся на них снежный покров.

Вместе с тем погодные условия все-таки вносят свои существенные коррективы при проведении сравнений. Так, например, несмотря на относительно высокий уровень инсоляции, выпадающий в течение нескольких месяцев в году снег может толстым слоем покрыть солнечные панели и существенно затруднить процесс аккумуляции солнечной энергии. Высказываются соображения, что наиболее эффективный и радикальный вариант установки на земле солнечных энергетических станций — это их строительство, например, по экватору и объединение в единую сеть. Хотя, к примеру, в пустынях тоже возникают проблемы с необходимостью постоянного очищения солнечных панелей от песка, а сезоны дождей не увеличивают выработку электроэнергии.

Можно предположить, что расположение солнечных электростанций (CSP и PV) на юге США, Испании, Италии, Португалии, Марокко и в некоторых других регионах мира, где наблюдается среднегодовая высокая температура, не всегда определяется только интенсивностью солнечных излучений. Так, еще в работе выдающегося российского экономиста, статистика и математика Е.Е. Слуцкого (1880—1948) «К вопросу о существовании связи между солнечной постоянной и температурой» (опубликована в Журнале геофизики, 1933. Т. III. Вып. 3. С. 263—281) была проанализирована зависимость количества энергии, «изливаемой Солнцем на 1 кв. см перпендикулярной к его лучам площади и постоянной температурой». Слуцким было доказано, что «корреляционной связи между этими показателями или вовсе нет, или она весьма незначительна» [Слуцкий, 2010, с. 1054]. Современная локация таких электростанций может быть объяснена пустынной местностью или высоким плоскогорьем, т.е. таким местоположением, при котором для солнечных лучей, достигающих поверхности Земли, нет естественных препятствий; комфортными климатическими условиями для функционирования персонала; близостью электропередач и удобной транспортировкой электроэнергии, другими факторами. Если руководствоваться только высокой интенсивностью солнечных излучений, то строительство солнечных электростанций было бы целесообразно осуществлять, например, на северном и южном полюсах Земли.

Наиболее часто используемые в производстве электроэнергии солнечные панели строятся на основе применения кремния. Их эффективность значительно ниже, чем у концентраторных солнечных панелей. Однако и здесь происходят существенные подвижки, конвертируемые в рост показателей эффективности. Отметим, что мировой рекорд эффективности для кремниевых солнечных элементов коммерческого размера был установлен в сентябре 2021 г. стартапом SunDrive (Сидней, Австралия) и составляет 25,54%. Примечательно, что дорогое серебро, используемое в обычных крем-

ниевых солнечных элементах, было заменено на более дешевую (в 100 раз) и более распространенную медь. Это обстоятельство позволяет существенно снизить стоимость производства солнечных фотоэлектрических панелей [Carroll, 2021].

В настоящее время активно развивается использование в солнечных панелях фотоэлементов из перовскита (элементу присвоено имя русского ученого-химика Льва Перовского) вместо кремния. Это направление становится одной из самых перспективных технологий изготовления солнечных панелей. Исследовательская группа в Германии Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) в конце 2020 г. сообщила о разработке tandemного солнечного элемента из перовскита и кремния. Его эффективность составила 29,15%. Это мировой рекорд. Предыдущее рекордное значение было равно 28%. Ученые рассчитывают довести эффективность указанного tandemного солнечного элемента до 30%. Более того, они полагают, что и эта отметка может быть превышена¹.

Конечно, от установления рекорда до практического широкомасштабного использования новых энергетических установок дистанция не малая. Вместе с тем, если в течение нескольких лет коэффициент полезного использования установленных мощностей солнечных панелей будет составлять примерно 25%, то по сравнению с показателем, рассчитанным международным аналитическим агентством IRENA для новых инсталлированных мощностей в 2020 г., который равнялся 16,1%, выработка электроэнергии новыми фотоэлектрическими панелями увеличится более чем в полтора раза.

Вполне вероятно, что прогноз академика Ж.И. Алферова может состояться на десятилетие раньше обозначенного им срока. Во всяком случае, солнечная фотоэлектрическая энергетика придет к этому до 2030 г. Соображения российского ученого оказались про-

¹ См.: <https://www.ixbt.com/news/2020/12/25/jeffektivnost-solnechnyh-batarej-doveli-do-2915.html>

видческими. Программы и планы будущего развития в области электроэнергетики, которые в настоящее время активно формируются во многих странах мира, стали переориентироваться на солнечную и ветряную энергетику. Причем эти целевые задания строятся не в рамках гипотетических заявлений правительств, а напрямую синхронизируются с динамикой инвестиций в указанные сегменты электроэнергетики.

1.2. Мировой тренд развития возобновляемой энергетики

Стало уже своеобразной традицией, что очередные новые годовые отчеты ведущих в мире аналитических агентств в области энергетики и энергетических компаний (British Petroleum, IRENA, IEA, REN21) приносят информацию, которая свидетельствует о продолжающейся глобальной структурной перестройке в электроэнергетике. Становятся более высокими значения удельного веса возобновляемых источников энергии в общем объеме производимой электроэнергии как в целом по миру, так и по регионам; сокращается нормированная стоимость ветряной и солнечной генераций; увеличивается коэффициент использования установленных мощностей; расширяются возможности накопителей электроэнергии, растет рынок этого оборудования, что позволяет ветряной и солнечной энергии приблизиться по масштабам к традиционным генерациям и в большей степени составить им конкуренцию, хотя ключевой вопрос бесперебойной подачи в сеть электроэнергии при различных нагрузках для возобновляемой энергетики все еще остается достаточно острым.

Тем не менее развитие конкуренции среди энергоносителей является нормальным и естественным для мировой экономики, поскольку позволяет более рачительно и целенаправленно использовать ископаемые источники энергии, снижать социальную нагрузку,

связанную с экологией, изменением климата, со здоровьем людей. Состязательность между поколениями в преодолении существующих экологических проблем — явление масштабное и многогранное. Вот почему эти проблемы стали предметом незатихающих многолетних острых дебатов с участием нобелевских лауреатов, ведущих ученых мира.

Оценку уровня развития возобновляемой энергетики мы разделили на три наиболее часто применяемых в публикуемых аналитических обзорах и отчетах показателя, которые представлены в табл. 1.2.

Первый показатель отражает возможность использования в проводимых расчетах методологии статистических наблюдений, которая позволяет отнести к возобновляемым источникам энергию, вырабатываемую небольшими гидроэлектростанциями с мощностью до 25–30 МВт (например, в ряде европейских стран, включая Россию) или не более 50 МВт (например, Министерство энергетики США; агентство REN21), или без ограничений по величине мощности, как это делается в Китае.

Более распространенным является представленный в аналитических обзорах второй показатель. Назовем его классическим. Речь идет о показателе, оценивающем объемы возобновляемой энергии без учета той, которая вырабатывается на гидроэлектростанциях. Данный вариант предусматривает учитывать ветряную, солнечную энергию, энергию биомассы, термальную, геотермальную, приливную энергию. Эта методология оценки значимости возобновляемой энергетики не отвергает первый показатель. Оба варианта в различных интерпретациях используются в публикуемых аналитических исследованиях.

Третий показатель предусматривает учет производства электроэнергии на основе использования только двух ведущих энергоносителей, которые относятся к возобновляемой энергетике. Имеются в виду ветряная и солнечная энергия, так как они в совокупности составляют более трех четвертей от объемов, учитываемых

во втором варианте. Конечно, для соответствующих аналитических целей можно использовать все три методологии. В настоящей публикации мы, не отвергая первых два, большее внимание будем уделять третьему варианту. Это обусловлено, прежде всего, значимостью ветряной и солнечной энергии и перспективами повышенной динамики их роста.

Таблица 1.2.

**Удельный вес энергоносителей
в общем объеме производства электроэнергии, %**

Годы	Ископаемые источники энергии	Атомное сырье	Все возобновляемые источники энергии с учетом гидроэлектроэнергии	Все возобновляемые источники энергии без учета гидроэлектроэнергии	Ветряная и солнечная энергия
2000	64,70	16,71	18,58	1,41	0,21
2005	67,00	15,11	17,88	1,97	0,58
2010	67,42	12,92	19,58	3,55	1,78
2011	68,06	12,00	19,92	4,08	2,28
2012	68,28	10,91	20,80	4,69	2,79
2013	67,57	10,71	21,68	5,32	3,33
2014	67,15	10,65	22,21	5,89	3,79
2015	66,45	10,68	22,84	6,75	4,52
2016	65,72	10,58	23,69	7,45	5,23
2017	65,07	10,38	24,54	8,54	6,25
2018	64,63	10,23	25,15	9,35	7,02
2019	62,85	10,36	25,99	10,33	7,87
2020	61,32	10,07	27,75	11,73	9,12

Источник: рассчитано автором на основе данных, содержащихся в [BP Statistical Review of World Energy – all data, 1965–2020].

Приведенные в табл. 1.2 три варианта исчисления объемов возобновляемой энергетики, прежде всего, классический, и с учетом двух основных генераций – ветряной и солнечной, наглядно демонстрируют наличие неуклонного роста. В результате классический вариант учета возобновляемой энергии, изначально уступая всем иным генерациям, сумел за 21 год сделать большой шаг вперед. Возобновляемой энергетике удалось опередить такие традиционные энергоносители, как нефть, атомную энергию, значительно приблизиться к гидроэлектроэнергии, составляя на момент проведения нашего исследования почти три четверти от всей ее величины. Что касается угля и природного газа, то позиции этих генераций, несмотря на разную направленность их векторов развития, пока еще достаточно устойчивые. Вместе с тем удельный вес угля в общем объеме производства электроэнергии сокращается (за десять лет его доля в производстве электричества уменьшилась с 40,3 до 35,1%), и нет весомых причин для изменения явно наметившегося тренда, поскольку добыча, переработка и транспортировка угля являются наиболее токсичными для жизнедеятельности, для экологии. Природный газ считается наименее экологически вредным по уровню оказания негативного воздействия на окружающую среду из всех ископаемых топливных источников, но и его темпы роста заметно уступают динамике развития возобновляемых источников энергии.

Как в первом, так и во втором методологических вариантах прироста 2020 г. к предыдущему году составляли 1,4–1,8 п.п. Если в перспективе такая динамика продолжит сохраняться или произойдет некоторое ускорение в годовом исчислении, т.е. темповые характеристики увеличатся, например, до двух процентных пунктов, то для достижения абсолютного превосходства, т.е. до 50-процентного долевого участия в производстве электроэнергии, возобновляемым источникам энергии (с учетом гидроэлектроэнергии) потребуется примерно десятилетие. Однако для того чтобы возобновляемая энергия стала лидером в электроэнергетике, а это означает добиться, как минимум, превышения 30-процентного уровня, потребуется всего несколько лет.

Следует отметить, что оценка динамики показателей по изменению их темпов роста может содержать некий элемент лукавства, так как с точки зрения математики осуществлять увеличение по отношению к малым величинам всегда намного проще, чем к большим величинам. Однако и в случае с классическим вторым вариантом учета возобновляемой энергии, и при рассмотрении третьего варианта, как суммарных значений ветряной и солнечной энергий, темпы прироста и, соответственно, увеличение абсолютных значений здесь оказываются больше, чем при сравнении с другими генерациями.

Более быстрый рост возобновляемой энергетика может быть обусловлен динамичным развитием отдельных генераций, прежде всего, за счет активного внедрения технических и технологических новаций. Поэтому с практической точки зрения представляют особый интерес пропорции, сложившиеся между отдельными генерациями. Например, между ветряной и газовой энергией или суммы ветряной и солнечной энергии, с одной стороны, и газовой энергии, с другой стороны. Такой выбор базы для сравнительного анализа определяется тем, что:

- во-первых, энергетика, основанная на природном газе, наиболее динамичная по темпам роста среди всех ископаемых источников;
- во-вторых, она эмитирует наименьшие вредные выбросы углерода среди ископаемых источников;
- в-третьих, ветряная энергия является до настоящего времени лидером среди возобновляемых источников энергии по темпам роста производства электроэнергии;
- в-четвертых, ветряная и солнечная генерации могут объединиться и эффективно функционировать в рамках единой энергосистемы, при этом генерация природного газа может со временем рассматриваться как резервная, с удельным весом менее одной третьей в общем объеме производства электроэнергии.

Проанализируем предложенные для рассмотрения ситуации с помощью данных табл. 1.3. Здесь временной отрезок составляет поч-

ти треть века. Сравнение будет осуществляться нами посредством сопоставления пропорций, характеризующих отношение выработки электроэнергии в мире за счет ветра и природного газа и за счет ветра и солнца, с одной стороны, и природного газа, с другой стороны.

Таблица 1.3.

**Соотношение между ветряной и солнечной энергией
и энергией природного газа в мире в 1990–2020 гг.**

Годы	Природный газ, ТВт-ч	Ветряная энергия, ТВт-ч	Солнечная энергия, ТВт-ч	Ветряная и солнечная энергия, ТВт-ч	Соотношение ветряная энергия/ энергия природного газа, %	Соотношение ветряная и солнечная энергия/ энергия природного газа, %
1990	1785,09	3,63	0,39	4,02	0,20	0,22
1991	1811,07	4,09	0,51	4,60	0,23	0,25
1992	1822,88	4,73	0,47	5,20	0,26	0,29
1993	1856,38	5,70	0,56	6,26	0,31	0,34
1994	1917,40	7,12	0,60	7,72	0,37	0,40
1995	2028,08	8,26	0,64	8,90	0,41	0,44
1996	2090,28	9,21	0,70	9,91	0,44	0,47
1997	2258,31	12,02	0,76	12,78	0,53	0,57
1998	2394,40	15,92	0,83	16,75	0,66	0,70
1999	2586,89	21,22	0,92	22,14	0,82	0,86
2000	2759,34	31,42	1,12	32,54	1,14	1,18
2001	2937,84	38,39	1,40	39,79	1,31	1,35
2002	3141,59	52,33	1,76	54,09	1,67	1,72
2003	3297,09	62,92	2,26	65,18	1,91	1,98

Окончание табл. 1.3.

Годы	Природный газ, ТВт-ч	Ветряная энергия, ТВт-ч	Солнечная энергия, ТВт-ч	Ветряная и солнечная энергия, ТВт-ч	Соотношение ветряная энергия/энергия природного газа, %	Соотношение ветряная и солнечная энергия/энергия природного газа, %
2004	3550,30	85,12	2,98	88,10	2,40	2,48
2005	3752,96	104,09	4,17	108,26	2,77	2,88
2006	3966,30	132,86	5,72	138,58	3,35	3,49
2007	4289,81	170,73	7,77	178,50	3,98	4,16
2008	4434,26	220,65	12,64	233,29	4,98	5,26
2009	4453,60	276,05	20,97	297,02	6,20	6,67
2010	4871,29	346,51	33,72	380,23	7,11	7,81
2011	4925,44	440,62	65,12	505,74	8,95	10,27
2012	5216,51	530,85	100,81	631,66	10,18	12,11
2013	5083,66	635,77	139,12	774,89	12,51	15,24
2014	5240,46	706,47	197,86	904,33	13,48	17,26
2015	5588,03	831,57	256,84	1088,41	14,88	19,48
2016	5823,70	963,77	328,24	1292,01	16,55	22,19
2017	5925,57	1140,97	446,95	1587,92	19,26	26,80
2018	6082,47	1270,16	582,75	1852,91	20,88	30,46
2019	6323,80	1418,20	707,90	2126,10	22,43	33,62
2020	6268,10	1591,20	855,70	2446,90	25,39	39,04

Источник: рассчитано автором на основе данных, содержащихся в [BP Statistical Review of World Energy – all data, 1965–2020; BP Our World in Data].

Сопоставление суммы ветряной и солнечной энергии, с одной стороны, и газовой генерации, с другой стороны, наглядно свидетельствует о том, что разрыв между ними сокращается. В 1990 г. производство электроэнергии за счет ветряной энергии составляло всего 0,2% от объема генерации природного газа. Спустя десять лет соотношение между ними оставалось все еще незначительным – чуть более одного процента. Однако в 2012 г. был преодолен уровень в 10%, т.е. соотношение равнялось один (ветряная энергия) к десяти (энергия природного газа). Через восемь лет соотношение стало один к пяти. Еще через два года, в 2020 г. пропорция составляла один к 3,9. Таким образом, приведенная статистика подтверждает тренд направленности на преодоление существующего разрыва между рассматриваемыми генерациями.

Дополним эту статистику результатом еще одного сопоставления. В 2015 г. ветряная и солнечная энергия в производстве электроэнергии по отношению к газовой генерации составляла 19,5%, а в 2020 г. этот же показатель вырос вдвое и равнялся 39,0% (см. табл. 1.3).

В ряде стран в 2020 г. ветряная и солнечная энергия превалировали в энергобалансе. Так, например, в Германии производство электроэнергии за счет ветра и солнца было вдвое больше, чем за счет природного газа; в Испании первая генерация опережала вторую на 7,7%; во Франции – на 38,7%; в Китае – почти втрое; в Индии – на две третьих. Правда, в Германии, пока, доминировал уголь, во Франции – атомная энергия, в Китае и Индии также уголь был основным энергоносителем.

К рассмотрению обозначенного вопроса мы вернемся более подробно в главах 4 и 5 настоящей книги, когда проанализируем методологические принципы проведения расчетов экономии, возникающей при замене трех ископаемых источников энергии солнечной и ветряной генерациями.

Структурные изменения в электроэнергетике обострили дискуссию по поводу значимости возобновляемых источников энер-

гии. Так, в выступлении на сессии «Газ как эффективный инструмент достижения экологических целей глобальной экономики» Петербургского международного экономического форума 24 мая 2018 г. отмечалось, что в мировом топливно-энергетическом балансе доля природного газа будет расти, и этот рост будет обеспечен в первую очередь за счет электроэнергетики и за счет транспорта. При этом солнце и ветер дают около 5% выработки всей мировой электроэнергии (выступление А. Миллера).

Владимир Сидорович образно назвал положения этого доклада «энергетической мифологией», следование которым может привести к ошибкам в планировании развития энергетического сектора и неправильным инвестиционным решениям. Энергетическая статистика свидетельствует об обратном. «В США потребление электроэнергии сегодня находится на уровне 2005 года, первичной энергии — ниже уровня 2000 года. При этом с тех пор в Соединенных Штатах выросли и ВВП, и население. В Германии с 1990 года ВВП вырос на 50,5%, потребление электроэнергии на 9%, а потребление первичных энергетических ресурсов снизилось на 9,7%. Ряд можно продолжать долго. Это явление известно под названием “рассоединение” (decoupling). Благодаря распространению возобновляемых источников энергии и повышению энергоэффективности экономический рост отсоединился от потребления ископаемого сырья» [Сидорович, 2018]. Действительно, возникает вопрос, почему внимание акцентируется на совокупных значениях ветра и солнца, общая доля которых, как указывалось, совсем незначительна, а не на более весомых энергоносителях-конкурентах, например, на угле, нефти, атомном сырье, гидроэлектроэнергии? Возможно, здесь проявилось стремление преуменьшить потенциал конкурента, что вполне объяснимо.

По мнению одного из докладчиков, высказанному на Петербургском международном экономическом форуме 6 июня 2019 г.: «вызывают сомнение популярные сегодня сценарии низкоуглеродного развития, — докладчик полагал, что важнейшей составляющей

«зеленых» сценариев является тема опережающего роста использования возобновляемых источников энергии, — но эти сценарии невозможно обосновать ни наблюдаемыми тенденциями динамики энергоемкости, ни доступными технологическими изменениями, ни структурными сдвигами в мировой экономике» [Сечин, 2019].

Следует внести уточнение в терминологию. Понятия «низкоуглеродное развитие» и «зеленая энергетика» не являются синонимами, ни, тем более, тождественными с точки зрения результативности функционирования электроэнергетики, поскольку при низкоуглеродном развитии допускаются, а иногда в немалом объеме, выбросы CO₂.

Последовательно разберемся, какие изменения происходили в мировой электроэнергетике в действительности, опираясь на данные нефтегазового концерна British Petroleum (BP), ежегодно публикуемые на протяжении нескольких десятилетий, и аналитические исследования которого являются одними из наиболее уважаемых и часто цитируемых документов в мировом энергетическом сообществе. Так, по данным отчетов [BP, 2021], в 2015 г. производство электроэнергии за счет использования природного газа равнялась 5588,03 ТВт-ч, и это соответствовало 23,2% в общемировом объеме производства электроэнергии. Спустя пять лет, в 2020 г. абсолютный размер использования природного газа достиг 6268,1 ТВт-ч, что повысило его удельный показатель в структуре электроэнергетики до 23,4%. То есть имело место более чем скромное увеличение — всего на 0,2 п.п. Абсолютный прирост газовой генерации за четыре года соответствовал 680,07 ТВт-ч. Что касается ветряной и солнечной энергии, то в 2015 г. их доля в мировом производстве электроэнергии была немногим более 4,5%. Однако в 2020 г. этот показатель вырос на 4,6 п.п., и превысил 9,1% (см. табл. 1.3). В абсолютном выражении прирост ветряной и солнечной энергии составил 1358,5 ТВт-ч. Этот показатель прироста оказался в два раза больше, чем у конкурирующего с ним визави — природного газа.

Таким образом, в реальности разрыв в выработке между генерациями стал достаточно быстро сокращаться. Если этот тренд сохранится, а предпосылок для иного пока не обнаружено, то в течение ближайших нескольких лет сложится вполне определенный паритет в объемах производства электроэнергии между ветряной и солнечной энергией, с одной стороны, и генерацией природного газа, с другой стороны.

В табл. 1.4 представлен составленный нами рейтинг. В список входит 21 страна. Страны размещены в порядке преобладания удельного веса ветряной и солнечной энергии в общем объеме производимой электроэнергии по состоянию на 2020 г. Для проведения сравнительного анализа в этой таблице также представлены данные, сложившиеся в среднем по всему миру.

Таблица 1.4.

**Доля возобновляемой энергии
в производстве электроэнергии, %**

Страна	Ветряная и солнечная энергия		Возобновляемая энергия без учета гидроэлектроэнергии		Возобновляемая энергия с учетом гидроэлектроэнергии	
	2019 г.	2020 г.	2019 г.	2020 г.	2019 г.	2020 г.
Дания	57,97	62,63	78,98	81,14	78,98	81,14
Германия	28,87	31,75	36,54	40,64	39,86	43,89
Великобритания	23,77	28,26	35,28	40,86	37,10	42,93
Испания	25,50	27,59	28,93	31,47	36,00	42,22
Бельгия	14,83	20,02	20,49	26,00	20,81	26,33
Нидерланды	13,87	19,12	18,74	26,14	18,83	26,14
Австралия	14,22	17,50	15,49	18,82	20,80	24,28
Швеция	12,17	17,26	19,89	23,70	58,61	67,02

Окончание табл. 1.4.

Страна	Ветряная и солнечная энергия		Возобновляемая энергия без учета гидроэлектроэнергии		Возобновляемая энергия с учетом гидроэлектроэнергии	
	2019 г.	2020 г.	2019 г.	2020 г.	2019 г.	2020 г.
Италия	14,94	15,81	23,65	24,87	39,44	41,39
Австрия	12,40	11,72	18,73	18,97	73,92	76,15
Турция	10,17	11,66	14,25	16,31	43,47	41,88
США	9,18	11,08	10,97	12,87	17,44	19,61
Бразилия	10,01	10,48	18,78	19,40	82,31	83,39
Франция	8,23	10,23	10,15	12,25	20,10	23,93
Китай	8,39	9,35	9,89	11,10	26,85	28,09
Мир в целом	7,87	9,12	10,33	11,73	25,99	27,75
Япония	7,66	9,03	10,79	12,50	17,94	20,21
Индия	6,83	7,63	8,68	9,69	18,78	20,17
Канада	5,69	6,29	7,26	7,95	65,79	67,70
ЮАР	4,59	5,09	4,75	5,26	5,15	5,47
Южная Корея	1,98	3,43	5,21	6,45	5,69	7,13
Россия	0,12	0,28	0,16	0,32	17,55	19,89

Источник: рассчитано автором на основе данных, содержащихся в [BP Statistical Review of World Energy – all data, 1965–2020].

По мнению Вацлава Смилы (Vaclav Smil), профессора университета Манитоба (Канада), который первым ввел в оборот термин «четвертый энергетический переход», имелось в виду, что этот переход будет характерен сменой природного газа возобновляемыми

источниками энергии. Ученый выдвинул предположение, что достичь 40–50% доли ветра и солнца в общем производстве электроэнергии «будет технически и экономически сложно, поскольку для производства большей доли периодически доступной электроэнергии потребуются более высокие резервные мощности для спроса в ночное время, а также для пасмурных и спокойных дней; улучшенные высоковольтные соединения; и более обширные хранилища электроэнергии, в том числе для целых городов» [Smil, 2015, p. 37]. Указанные проблемы действительно все еще имеют место, но они решаемы, и мы к рассмотрению этого вопроса еще вернемся. Сейчас обратим внимание читателя на то, что спустя несколько лет после публикации статьи у нас имеется возможность продемонстрировать примеры преодоления нормативов «предельного уровня», обозначенные В. Смилом. Отметим, что с учетом сложившихся тенденций в ближайшее десятилетие отмеченные ученым нормативы станут обычаем делового оборота.

Наиболее развитой в мире страной с ветряной энергией является Дания, где доля ветряной энергии в 2020 г. была свыше 62,6%. Эта страна также лидер по удельному весу возобновляемой энергии во всей электроэнергии. За ней, преодолев 40-процентный рубеж, идут Великобритания и Германия, а 30-процентный уровень – Испания.

С учетом данных по гидроэлектроэнергии самыми экологически чистыми при производстве электроэнергии в 2020 г. оказались Бразилия (83,39%), Дания (81,14%) и Австрия (76,15%). Россия, пока, находится в нижней части списка, однако с долей в 19,89% опережает по размерности удельного показателя такие страны, как США, Южную Корею, ЮАР и совсем ненамного отстает от Японии, Индии, Франции, Австралии.

1.3. Выбросы углекислого газа при производстве электроэнергии

Сложившаяся в течение нескольких десятилетий ненормальная ситуация с увеличивающимися выбросами углекислого газа в атмосферу неизбежно повлекла за собой нарушение экологического императива, вредоносное воздействие CO_2 на жизни и здоровье людей. Требовалось найти способ эффективного и срочного преодоления общемировой острой социально-экономической проблемы. В связи с данными обстоятельствами пристальное внимание ученых, практиков, а также политиков было обращено на возобновляемую энергетику. Таким образом, своеобразной предтечей и одним из основных побудительных мотивов быстрого развития в мире возобновляемой энергетики стала декарбонизация.

Поэтому и в нашем исследовании, отраженном в настоящей книге, мы уделили большое внимание выяснению зависимостей, которые сформировались при производстве электроэнергии между источниками выбросов углекислого газа. Указанные рамки определяются, прежде всего, тем, что примерно одна треть всех выбросов углекислого газа в атмосферу находится непосредственно в этом сегменте хозяйственной деятельности. Для решения поставленной задачи мы привлекли статистическую информационную базу ведущих мировых аналитических агентств, к числу которых относятся и British Petroleum.

Прежде чем составить сводную таблицу, нам потребовалось выявить выработку электроэнергии, осуществленную ископаемыми источниками энергии в ТВт-ч, затем перевести полученные показатели в миллионы тонн произведенной электроэнергии. После этого, пользуясь данными British Petroleum по выбросам в атмосферу CO_2 за счет применения в производстве каждого из энергоносителей, определить их реальный уровень и общий совокупный результат, достигнутый этими источниками.

В работе [BP, 2019] отмечалось, что в версии British Petroleum, изданной тремя годами ранее, в 2016 г., применялись следующие показатели: при переработке одной тонны нефти происходит выброс в атмосферу 3,07 т CO₂; по углю – 3,96 т CO₂; по природному газу – 2,35 т CO₂. Затем в версии 2019 г. было предусмотрено понизить указанные нормативы на 8%. Поэтому расчет велся нами исходя из новых пропорций. Теперь стали учитывать, что при использовании одной тонны нефти выброс в атмосферу составлял 2,82 т CO₂; показатель по углю равнялся 3,64 т CO₂; по природному газу – 2,16 т CO₂. Это означает, что нефть считается экологически более токсичной, чем природный газ на 30%, а уголь – более чем вдвое.

Рассчитав объемы вредных выбросов двуокиси углерода, мы осуществили затем сопоставление полученных результатов с данными British Petroleum по эмиссии углекислого газа по каждому году в период с 2006 г. по 2020 г.

Таблица 1.5.

**Выбросы CO₂,
возникающие при производстве электроэнергии**

Годы	Выбросы CO ₂ , млн т		Производство электроэнергии в млн т за счет:			Выбросы CO ₂ в млн т при производстве электроэнергии за счет:		
	всего	в электроэнергетике за счет использования ИИЭ*	нефти	угля	природного газа	нефти	угля	природного газа
2006	29430,1	9009,0	241,1	1755,7	897,4	679,9	6390,7	1938,4
2007	30078,7	9583,6	245,5	1866,8	970,5	692,3	6795,2	2096,1
2008	30336,7	9649,2	239,4	1870,1	1003,2	675,1	6807,2	2166,9
2009	29745,2	9492,2	224,4	1836,0	1007,6	632,8	6683,0	2176,4
2010	31085,5	10093,0	213,5	1953,4	1102,1	602,1	7110,4	2380,5

Окончание табл. 1.5.

Годы	Выбросы CO ₂ , млн т		Производство электроэнергии в млн т за счет:			Выбросы CO ₂ в млн т при производстве электроэнергии за счет:		
	всего	в электро-энергетике за счет использования ИИЭ*	нефти	угля	при-род-ного газа	нефти	угля	при-род-ного газа
2011	31973,4	10547,2	236,2	2053,3	1114,4	666,1	7474,0	2407,1
2012	32373,5	10779,6	257,9	2061,3	1180,2	727,3	7503,1	2549,2
2013	32795,6	11053,9	241,4	2167,3	1150,1	680,7	7889,0	2484,2
2014	32804,7	11253,4	232,8	2207,1	1186,6	656,5	8033,8	2563,1
2015	32787,2	11129,9	231,7	2127,9	1264,3	653,4	7745,6	2730,9
2016	32936,1	11240,5	219,4	2136,2	1317,6	618,7	7775,8	2846,0
2017	33279,5	11474,0	198,6	2202,8	1340,6	560,1	8018,2	2895,7
2018	34007,9	11850,8	201,4	2283,1	1376,1	567,9	8310,5	2972,4
2019	34356,6	11705,8	185,6	2223,1	1430,7	523,4	8092,1	3090,3
2020	32284,1	11305,4	171,5	2131,5	1418,1	483,6	7758,7	3063,1

* ИИЭ – ископаемые источники энергии.

Источник: рассчитано автором на основе данных [BP Statistical Review of World Energy – all data, 1965–2020].

Руководствуясь полученными показателями, которые приведены в табл. 1.5, отметим некоторые наиболее важные особенности.

Во-первых, проведенное сравнение показало, что значение удельного веса выбросов углекислого газа, возникающего в результате переработки ископаемых источников энергии при производстве электроэнергии в общем объеме выбросов CO₂, имеет доста-

точно весомое значение. Так, за анализируемый период этот удельный показатель колебался в пределах от 30 до 35%.

Во-вторых, вредоносные выбросы углекислого газа в электроэнергетике выросли за 14 лет на 25,5%, т.е. их среднегодовое увеличение в течение рассматриваемого временного периода составляло 1,64%.

В-третьих, наметился вполне отчетливый тренд на сокращение выбросов CO₂ за счет переработки нефти в электроэнергетике, что связано с уменьшением использования этого вида топлива. Наблюдается переменчивое изменение динамики по углю, увеличение составило 21,4% (в основном, за счет показателей по Китаю). Выбросы, связанные со сжиганием природного газа, увеличились более чем в полтора раза, несмотря на то, что этот источник наименее экологически вредный по сравнению с двумя своими визави. Сокращение, происшедшее в 2020 г., было обусловлено уменьшением потребности в электроэнергии из-за пандемии Covid-19.

В результате сложилась следующая структура выбросов углекислого газа при использовании ископаемых источников энергии в производстве электроэнергии (табл. 1.6).

Таблица 1.6.

**Структура выбросов CO₂ при использовании
ископаемых источников в электроэнергетике, в 2006–2020 гг., %**

Год	Выбросы CO ₂ при производстве электроэнергии за счет:		
	нефти	угля	природного газа
2006	7,5	70,9	21,5
2007	7,2	70,9	21,9
2008	7,0	70,5	22,5
2009	6,7	70,4	22,9
2010	6,0	70,4	23,6
2011	6,3	70,9	22,8