ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, 2020, том 90, № 10, с. 926–938

ТОЧКА ЗРЕНИЯ

ПАРИЖСКОЕ КЛИМАТИЧЕСКОЕ СОГЛАШЕНИЕ ВСТУПАЕТ В СИЛУ. СОСТОИТСЯ ЛИ ВЕЛИКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД?

© 2020 г. А. А. Акаев[a],*, О. И. Давыдова[a],**

[a] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

**E-mail: askarakaev@mail.ru*

***E-mail: davydova.olga.msk@gmail.com*

Поступила в редакцию 22.06.2020 г.
После доработки 06.07.2020 г.
Принята к публикации 20.07.2020 г.

Парижское климатическое соглашение ООН, требующее удержания глобального потепления в пределах 1.5–2°C, вступило силу 4 ноября 2016 г. и начинает действовать с 2020 г. По расчётам Международной группы экспертов по изменению климата, для достижения этой цели требуется сократить энергетические выбросы парниковых газов в атмосферу в 3 раза – от уровня 2019 г., когда они составляли 33.3 Гт, что позволит к 2050 г. ограничить рост температуры на уровне 1.5°C или на 2°C – к 2070 г. Это возможно, считает Международное агентство по возобновляемым источникам энергии, только при условии, если к 2040–2050 гг. будет осуществлён так называемый Великий энергетический переход от использования доминирующих в настоящее время ископаемых углеводородных видов топлива (угля, нефти и природного газа) к возобновляемым источникам энергии, когда их доля в общем энергобалансе достигнет 40% и выше.

В статье с помощью математического моделирования показана возможность осуществления Великого энергоперехода, а значит, и достижения целей Парижского соглашения. Однако при этом, наряду с ускоренным распространением возобновляемых источников энергии, для создания стабильной и устойчивой энергосистемы будущего необходимо одновременно развивать ядерную энергетику как низкоуглеродный источник генерации базовой электроэнергии. Только симбиоз возобновляемых источников энергии и атомных станций с ядерными реакторами малой и средней мощности последнего поколения, обладающими высокой степенью безопасности, позволит вытеснить и заместить углеводородное топливо и решить проблему климатической безопасности без ущерба для экономического развития.

Ключевые слова: Парижское климатическое соглашение, глобальное потепление, политика декарбонизации, энергоэффективность, возобновляемые источники энергии, накопители энергии, электрификация энергопотребления, децентрализация энергосистемы, “умные” сети, низкоуглеродная ядерная энергетика, энергетический переход, математическое моделирование.

DOI: 10.31857/S0869587320100023

АКАЕВ Аскар Акаевич — доктор технических наук, иностранный член РАН, профессор, главный научный сотрудник Института математических исследований сложных систем МГУ им. М.В. Ломоносова. ДАВЫДОВА Ольга Игоревна – аспирант Института математических исследований сложных систем МГУ им. М.В. Ломоносова.

Энергетика – ключевой фактор развития современной индустриальной цивилизации. Она охватывает все виды хозяйственной деятельности человека от добычи полезных ископаемых, промышленного производства, сельского хозяйства и транспорта до сферы услуг и оказывает решающее влияние на рост экономики и повышение благосостояния населения. В XX в. мировое ВВП росло прямо пропорционально объёму выработки энергии: $Y_w \sim E_w$. Ведущая роль энергетики в формировании и развитии информационно-цифрового общества, безусловно, сохранится и в XXI в. Вместе с тем энергетика относится к основным источникам загрязнения окружающей природы – земли, атмосферы и водных ресурсов, что уже привело к невиданной деградации среды обитания человека. Более того, интенсивно разрушается биосфера Земли, постепенно утрачивая

важнейшую функцию стабилизации окружающей среды и климата.

Парниковые газы, выбрасываемые в атмосферу в процессе сжигания в энергетических установках ископаемых углеводородных видов топлива, – угля, нефти и природного газа, вызвали повышение средней температуры атмосферы на планете более чем на 1°С по сравнению с доиндустриальным (1850–1900) уровнем. Известно, что превышение температурных показателей на 2°С может спровоцировать глобальный экологический кризис с непредсказуемыми для человечества негативными последствиями. Поэтому ООН признала стабилизацию климата Земли главным экологическим императивом.

ПАРИЖСКОЕ КЛИМАТИЧЕСКОЕ СОГЛАШЕНИЕ ПЯТЬ ЛЕТ СПУСТЯ

Парижское соглашение по климату, принятое 12 декабря 2015 г. по итогам 21-й конференции Рамочной конвенции об изменении климата (РКИК, 1992) в Париже [1], сразу стали называть историческим, что обусловливалось беспрецедентными масштабами его всемирной поддержки. Впервые подобный документ был одобрен практически единогласно: его подписали 195 из 198 стран-участниц конференции. Не прошло и года, как соглашение юридически вступило в силу, поскольку к 4 ноября 2016 г. его уже ратифицировали 111 государств (57% из числа подписавших соглашение), на которые приходится 77% глобальных выбросов углекислого газа, то есть значительно больше, чем требовалось условиями соглашения (55%). К настоящему времени Парижское соглашение ратифицировали свыше 190 стран. Официально оно вступит в силу в конце 2020 г., после окончания действия Киотского протокола 1997 г. к РКИК, который, по признанию видных экспертов, также сыграл весомую роль, изменив в лучшую сторону отношение многих стран к проблеме сокращения выбросов парниковых газов в атмосферу Земли.

Основные итоги Парижской конференции ООН по вопросам изменения климата можно сформулировать в пяти пунктах:

1. Подписано всеобъемлющее юридически обязательное климатическое соглашение, которое ставит амбициозную цель не допустить превышения глобальной среднегодовой температуры на планете к концу XXI в. более чем на 2°С от доиндустриального уровня, когда она составляла +14°С, и предписывает всем странам разработать и принять национальные долгосрочные стратегии по развитию низкоуглеродной энергетики, сокращению выбросов парниковых газов в атмосферу, а также планы по адаптации к изменениям климата на ближайшие 15–20 лет.

2. Странами-участницами конференции принят научно обоснованный вывод Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) о том, что глобальное потепление в XX–XXI вв. обусловлено главным образом антропогенными выбросами парниковых газов, в первую очередь CO_2, вследствие сжигания ископаемого углеводородного топлива – угля, нефти и газа.

3. Запущен механизм, снижающий потребление угля в энергетических целях как наиболее “грязного” ископаемого топлива.

4. Международными и крупными национальными банками, финансовыми организациями и инвестиционными компаниями принято решение о преимущественном кредитовании низкоуглеродных энергетических проектов, в первую очередь основанных на возобновляемых источниках энергии, и прекращении инвестиций в угольные проекты.

5. С 2021 г. развитые страны, а также Китай и Сингапур обязались предоставлять 100 млрд долл. в год для слаборазвитых стран, чтобы помочь им адаптироваться к последствиям изменения климата.

Можно утверждать, что Парижское соглашение уже внесло свои коррективы в характер борьбы с климатическим потеплением, дало мощный импульс процессу декарбонизации энергетики. Сложилась глобальная необратимая тенденция на замораживание угольных проектов и преимущественное развитие безуглеродной энергетики, основанной на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ). Ярким подтверждением этого стал стремительный рост мировых потоков инвестиций в ВИЭ и объёмов вырабатываемой за счёт таких источников энергии [2]. Начиная с 2015 г. страны стали ежегодно вводить больше мощностей возобновляемых источников энергии, чем углеводородных. В 2017 г. суммарная мощность ВИЭ в мире превысила 1000 ГВт. В 2018 г. на их долю приходилось около 64% мировых инвестиций в электроэнергетику и примерно столько же новых вводов генерирующих мощностей. За год совокупная мощность подобных установок увеличилась на 181 ГВт, или на 15%, – до 1360 ГВт. Причём половина этого прироста пришлась на солнечные электростанции. В 2019 г. доля ВИЭ в мировом производстве электроэнергии составляла уже 26% [3].

С каждым годом возобновляемая энергетика становится всё более конкурентоспособной. Быстрыми темпами снижается себестоимость ВИЭ: только за восемь посткризисных лет (2011–2019) по солнечным электростанциям (СЭС) она уменьшилась на 35%, а по ветряным электростанциям (ВЭС) – на 20%. Сегодня по этим показателям ВИЭ сопоставимы с традиционными углево-

дородными источниками энергии, а через несколько лет опередят их [3, с. 13]. Важным преимуществом становится близость ВИЭ к конечным потребителям энергии, что сокращает транспортные издержки. Особенно впечатляют успехи в практическом освоении солнечной энергетики. Долгое время её развитие зависело от субсидий и государственной поддержки. Однако быстрое снижение стоимости солнечных панелей и приток инвестиций в эту перспективную отрасль коренным образом изменили ситуацию. Во многих странах СЭС оказались рентабельнее, чем угольные электростанции, а в Индии они и вовсе стали самыми дешёвыми источниками электричества. Если 10 лет назад на долю солнечной энергии приходилось менее 1% мощностей в мировой электрогенерации, то к началу 2020 г. – уже 9%, причём во многом эти мощности увеличивались благодаря Индии, где стоимость строительства СЭС за последние 10 лет снизилась почти на 90% [4]. Издержки при их сооружении существенно уменьшились также в США, Китае и Австралии, сегодня стоимость солнечного электричества в этих странах – одна из самых низких в мире.

Таким образом, возобновляемая энергетика становится важным ресурсом мировой структуры производства электроэнергии. В последние годы именно ВИЭ обеспечивают основной прирост генерирующих мощностей, на них приходится примерно две трети объёма генерации [3]. Технологии использования ВИЭ на практике доказали свою надёжность и конкурентоспособность. Для многих стран они стали самым дешёвым способом выработки электроэнергии. Оказалось, что станции, использующие ВИЭ, можно успешно интегрировать в существующие энергетические системы. Позитивный опыт Германии и Дании по интеграции распределённой и нестабильной генерации электроэнергии на основе ВИЭ в действующие электрические сети показал, что эта проблема вполне разрешима и при дальнейшем росте доли возобновляемых источников в топливно-энергетическом балансе (ТЭБ). К примеру, в Дании доля ВЭС в годовой выработке электроэнергии составляет около 40%, при этом датская энергетическая система – одна из наиболее стабильных и надёжных в Европе. Сейчас по меньшей мере девять стран производят более 20% электроэнергии на основе ВИЭ с высокой долей нестабильной переменчивой генерации [3, с. 10].

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВИЭ В СВЕТЕ ТРЕБОВАНИЙ ПАРИЖСКОГО СОГЛАШЕНИЯ

Возникает вопрос: смогут ли возобновляемые источники энергии так быстро вытеснить из мировой энергетической системы мощности работающих на ископаемом углеводородном топливе источников, чтобы снизить выбросы парниковых газов в атмосферу до требуемого минимума в установленный период времени? Следует отметить, что все стратегии энергетического развития в XXI в., направленные на достижение климатических целей, зафиксированных в Парижском соглашении, предусматривают широчайшее использование ВИЭ в сочетании с быстрым повышением энергоэффективности конечных потребителей. Например, Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (International Renewable Energy Agency – IRENA) подсчитало: чтобы удержать рост средней глобальной температуры ниже 2°C, необходимо, во-первых, суммарную долю ВИЭ в общих запасах первичной энергии увеличить с 15% в 2015 г. до 65% к 2050 г., а во-вторых, уменьшить к указанному сроку общие запасы первичной энергии до 13.37 млрд т нефтяного эквивалента, что ниже показателей 2015 г., путём существенного повышения энергоэффективности [5]. А это, как будет продемонстрировано далее, очень трудная задача.

Моделирование, выполненное Международной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК), показывает, что для удержания глобальной средней температуры на уровне 1.5°C достичь чисто нулевого значения выбросов можно к 2050 г., а для удержания на уровне 2°C – к 2070 г. [6, с. 33]. Под чисто нулевым значением имеется в виду объём выбросов, который полностью поглощается океанами и экосистемами суши. Сейчас эта величина равна примерно 3.1 Гт углерода (или 11.36 Гт углекислого газа) в год. Для сравнения: выбросы CO_2 в 2019 г. составили 33.3 Гт – почти в 3 раза больше. Причём они оставались стабильными в течение трёх лет подряд (2017–2019), создавая впечатление о прохождении пика выбросов. Действительно, как показали наши расчёты, если со стороны международного сообщества будут предприняты энергичные меры по декарбонизации энергетики в полном соответствии с требованиями Парижского соглашения, то антропогенные выбросы углекислого газа в 2018–2019 гг. вполне могут оказаться пиковыми за всю индустриальную эпоху.

Сегодня национальные планы по развитию ВИЭ и национальные обязательства по сокращению выбросов CO_2 не соответствуют требованиям Парижского соглашения – таков вывод IRENA [4]. Он подтверждается также расчётами МГЭИК [7]. По данным этой группы экспертов, текущие национальные обязательства приведут к 2100 г. к глобальному потеплению примерно на 3°C, после чего потепление продолжится. Поэтому ООН отмечает, что сейчас, как никогда, от всех государств требуется осуществить переход к беспрецедентным и неотложным действиям, что-

Таблица 1. Доля электроэнергетики в конечном энергопотреблении, %

Годы	2018	2030	2040	2050
Консервативный сценарий	20	24	27	30
Амбициозный сценарий	20	29	38	49

Таблица 2. Доля ВИЭ в производстве электроэнергии, %

Годы	2018	2030	2040	2050
Консервативный сценарий	25	38	47	55
Амбициозный сценарий	25	57	75	86

бы подготовить радикально обновлённые в сторону повышения обязательства по определяемым на национальном уровне вкладам в глобальное реагирование на изменение климата, которые должны быть представлены в 2020 г. Причём основные усилия следует предпринять именно в 2020-е годы, поскольку, по расчётам МГЭИК, для удержания глобального потепления на 2°C и 1.5°C уже в 2030 г. выбросы парниковых газов необходимо сократить от уровня 2017 г. на 25% и 55% соответственно [7]. В этой связи IRENA разработало весьма амбициозный сценарий ускоренного преобразования энергетической системы REmapCase, который требует быстрого развёртывания технологий ВИЭ в сочетании с повышением энергоэффективности [4]. Утверждается, что реализация такого сценария позволит удержать глобальное повышение температуры на уровне 1.5°C.

Для его практического воплощения потребуется к 2050 г. инвестировать в энергетическую отрасль 110 трлн долл. США, в том числе 37 трлн долл. в энергоэффективность и 27 трлн долл. в ВИЭ. Ключевые показатели для амбициозного сценария ускоренного преобразования мировой энергетической системы, наряду с аналогичными показателями консервативного сценария, определяемого текущими планами и обязательствами стран мира, представлены в таблицах 1 и 2. Данные свидетельствуют, что сценарий IRENA требует к 2050 г. повышения доли электроэнергетики в конечном энергопотреблении в 2.5 раза – почти до 50%, а доли ВИЭ в производстве электроэнергии – более чем в 3 раза (до 86%). Такое радикальное повышение, в свою очередь, потребует дальнейшего удешевления себестоимости строительства солнечных и ветровых электростанций.

ЭВОЛЮЦИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ОСНОВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Возобновляемые источники энергии, стремительно расширяясь, станут замещать и вытеснять традиционные ископаемые топлива, при этом доля последних в топливно-энергетическом балансе будет снижаться, уменьшая выбросы CO_2 в атмосферу. В прогнозе, составленном российскими учёными с горизонтом до 2040 г. [8], предполагается, что доля угля снизится с нынешних 28 до 19–23%, а нефти – с 30 до 21–22%. Только удельный вес природного газа может увеличиться до 26%, поскольку сейчас при генерации электроэнергии он рассматривается как эффективная замена углю. Однако российские учёные придерживаются консервативных позиций в прогнозе развития ВИЭ и полагают, что возобновляемые источники смогут обеспечить к 2040 г. только 35–50% мирового производства электроэнергии и 19–25% всего энергопотребления (сравните с данными таблиц 1 и 2) [8, с. 5]. Но есть обнадёживающие прогнозы Международного энергетического агентства (МЭА) [9], которые поддерживают реализуемость амбициозных целей IRENA (табл. 2). По данным МЭА, в ближайшие 20 лет мощность ветровых электростанций будет расти в среднем на 13% в год и к 2040 г. достигнет примерно 8000 ГВт, притом что в 2017 г. суммарная мощность всех электростанций мира равнялась 6765 ГВт. Ключевыми факторами роста ВЭС станут их растущая мощность, увеличение срока эксплуатации и снижение к 2040 г. издержек на их установку на 40%. Солнечная генерация будет расти в среднем на 15% в год и к 2040 г. её суммарная мощность в мире составит примерно 12 тыс. ГВт. Таким образом, СЭС и ВЭС в 2040-е годы будут вырабатывать в 3 раза больше электроэнергии, чем все существующие электростанции мира. Солнечная энергетика за счёт быстро растущей конкурентоспособности до 2025 г. обойдёт по установленной мощности ветроэнергетику, примерно к 2030 г. – гидроэнергетику и до 2040 г. – теплоэнергетику на угольном топливе [9, с. 4].

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ НА ПУТИ УСКОРЕННОГО ВНЕДРЕНИЯ ВИЭ

Планируемый в ближайшие два-три десятилетия взрывной рост генерации безуглеродной и низкоуглеродной электроэнергии ставит вопрос о необходимости ускоренной электрификации всей сферы конечного энергопотребления. И это первая проблема, которую надо решить, осуществляя переход на возобновляемую энергетику. Процесс масштабной электрификации конечного энергопотребления нелёгкий, и идёт он медленно. Так, с 1990 г. до настоящего времени уровень электрификации первичного энергопотребления в мире вырос с 31 до 36%, то есть всего на пять процентных пункта. Но важно, что уже сложилась долгосрочная тенденция [8, с. 25]. Сегодня доля электричества в общемировом конечном потреблении составляет лишь 20%. Правда, к

2040 г. ожидается удвоение его спроса в развивающихся странах, тогда как в развитых он будет скромным [9, с. 3]. Рост спроса будет зависеть от того, как быстро электричество сможет утвердиться в роли предпочтительного носителя энергии в теплоснабжении домов, офисов и предприятий, а также на транспорте. Именно эти сферы потребляют основную часть энергии: отопление и охлаждение – около 35%, транспорт – примерно 25%. Сегодня ВИЭ вырабатывают только 10% энергии, используемой для отопления и охлаждения, и 3.5% энергии – для транспортных услуг [3, с. 12, 13]. Поэтому необходимо стимулировать ускоренную программу интеграции ВИЭ в эти сферы народного хозяйства. МЭА считает возможным и целесообразным существенное повышение рассматриваемых показателей к 2040 г.: в секторе теплоснабжения – до 25%, в транспортном – до 19% [9, с. 7]. Это означает, что больше половины автомобильного парка в мире к 2040 г. должно перейти на электромоторы [9, с. 5], электромобили станут основным транспортным средством.

Вторая проблема, тормозящая ускоренное внедрение возобновляемой энергетики, – переменный нестабильный характер генерации электроэнергии как на ВЭС, так и на СЭС, обусловленный изменениями погоды, сменой дня и ночи, а также времён года. Эти обстоятельства вызывают большие скачки генерируемой мощности. Для обеспечения управляемой выдачи мощности от ВИЭ с учётом потребностей энергосистемы, в частности пикового спроса, обычно используют накопители энергии. Характеристики накопителя должны придать ВИЭ достаточную гибкость и адаптивность, что крайне важно для их стабильной работы. Сегодня наиболее распространенным способом промышленного хранения электроэнергии стали гидроаккумулирующие электростанции. Они обеспечивают 99% мировых мощностей по накоплению и хранению энергии [8, с. 30]. В 2017 г. их суммарная мощность оценивалась примерно в 140 ГВт, что составляло около 15% от общемировой мощности СЭС и ВЭС. В последнее время всё активнее используются альтернативные накопители энергии, например, литий-ионные батареи, предназначенные для электромобилей. За последние 10 лет они подешевели в 5 раз, но ещё дороги, составляя около трети себестоимости самой машины. Аккумулятор с твёрдым электролитом пока не стал коммерческой реальностью. Когда это произойдёт, пробег электромобиля увеличится вдвое – с 500 до 1000 км. Это будет начало эры электромобилей. Ожидаемый прорыв в области инновационных технологий хранения энергии может существенно снизить ограничения на пути ускоренного развития ВИЭ и их интеграции в действующую энергосистему.

Третья проблема, стоящая на пути широкомасштабного использования ВИЭ, – децентрализация генерации электроэнергии, обусловленная применением СЭС и ВЭС, в противовес доминирующему сегодня централизованному производству электроэнергии на крупных электростанциях. Развёртывание большого количества скромных по мощности СЭС и ВЭС потребует качественного скачка в развитии технологий создания и управления распределённой энергетикой. Придётся иметь дело со сложными распределёнными энергосистемами и распределительными электрическими сетями, управлять которыми можно будет только с помощью интеллектуальных цифровых технологий. Цель цифровизации энергетики – создание “умных” сетей, обеспечивающих оптимальную синхронизацию спроса и предложения на основе массива данных производителей и потребителей в реальном времени. “Умные” сети также должны гибко управлять перетоками электроэнергии на большие расстояния из одних регионов в другие с учётом метеорологических данных. Надрегиональные сети сокращают потребность в дорогих аккумулирующих мощностях для ВИЭ. “Умные” сети станут ключевым элементом энергосистемы будущего, обеспечивая успешную интеграцию и эффективное функционирование всё большего числа распределённых ВИЭ в составе действующих национальных энергосистем. Одно из важных требований к ним – надёжность и возможность быстрого самовосстановления в случае сбоев, что достигается внедрением технологий искусственного интеллекта. Обширная сеть из ВИЭ и ряда крупных базовых электростанций с помощью “умной” сети сможет обеспечить доступное, надёжное и стабильное энергообеспечение большого региона мира.

СИМБИОЗ ВИЭ И ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ – АРГУМЕНТЫ “ЗА”

Для покрытия пиковой части графика электрических нагрузок, а также кратковременных колебаний спроса и предложения широко применяют традиционные газовые и угольные электростанции. Есть ряд примеров успешного использования в этом качестве атомных электростанций (АЭС). Так, опыт Франции хорошо продемонстрировал способность АЭС адаптироваться к расширению распределённой системы ВИЭ при меньших затратах, а также обеспечивать стабильность и устойчивость функционирования национальной энергосистемы. Сегодня французская электроэнергетика, состоящая из 20% ВИЭ и 77% ядерной энергии, на 97% низкоуглеродна, что позволяет стране возглавлять борьбу с глобальным потеплением. Более того, там планируют к 2022 г. закрыть все угольные электростанции и к 2030 г. расширить долю ВИЭ в производстве

электроэнергии до 40%. Опыт Франции убедительно демонстрирует, что ядерная энергетика способна обеспечивать надёжные поставки низкоуглеродной электроэнергии в масштабах крупной страны, а также успешно замещать газовые и угольные электростанции во время пиковой нагрузки.

Наши расчёты показывают, что без учёта ядерной энергетики как источника низкоуглеродного электричества и базовой стабильно генерирующей энергосистемы целей Парижского соглашения не достичь. Поэтому необходимо преодолевать негативное отношение к ней, сложившееся во многих странах, и учитывать эту отрасль в сценариях развития мировой энергетики, разработанных Мировым энергетическим советом (МИРЭС). Наибольший интерес представляет оптимистический сценарий "Незаконченная симфония" (Unfinished Simphony), который предусматривает повсеместное использование ядерной энергии в качестве одной из доступных и эффективных мер реагирования на климатический вызов [10, с. 2, 3]. При таком сценарии к 2060 г. доля ядерной энергетики достигнет 13.5% от общего объёма производства энергии, а установленная мощность АЭС увеличится почти в 3 раза – до 10000 ГВт. Естественно, этот сценарий имеет шанс на успех, если будет опираться на безопасные ядерные технологии.

Особенно привлекательны в этом отношении проекты ядерных реакторов малой и средней мощности, которые сейчас находятся на стадии разработки и строительства в разных странах и, как ожидается, будут коммерциализированы в ближайшие 10–15 лет [10, с. 4]. Атомные электростанции малой и средней мощности хорошо совместимы с относительно небольшими по размеру энергосистемами или же децентрализованными энергосистемами. Всемирная ядерная ассоциация, в свою очередь, разработала программу "Гармония" (Harmony), направленную на интенсивное развитие ядерной энергетики, которая находится в полном согласии с планами МИРЭС довести к 2050 г. генерацию надёжной и безопасной низкоуглеродной ядерной электроэнергии до 25% общемирового объёма производства электроэнергии [10, с. 8]. Похоже, именно синергия ВИЭ и ядерной энергии будет способствовать ускоренному замещению традиционной энергетики на ископаемом топливе.

Стало быть, для достижения целей Парижского соглашения глобальная энергетическая система должна претерпеть революционное преобразование – трансформироваться из низкоэффективной и высокоуглеродной, базирующейся преимущественно на ископаемом топливе (уголь, нефть и газ), в высокоэффективную, основанную на гармоничном симбиозе ВИЭ и АЭС. Подобный процесс называют энергетическим переходом. Термин "энергетический переход" введён выдающимся канадским учёным Вацлавом Смилом, которого Билл Гейтс назвал лучшим экспертом по энергетике. Согласно определению Смила, энергопереход охватывает временной период от внедрения новых первичных энергетических ресурсов до получения ими значительной доли на мировом энергетическом рынке, достаточной для дальнейшего доминирования [11, с. 203]. За величину начальной доли нового ресурса обычно принимают 3–5%. Величину "значительной доли" Смил устанавливает свыше 25%, если на рынке присутствуют четыре конкурирующих ресурса, и больше 33%, когда их три. Чтобы стать абсолютным лидером, необходимо иметь долю более 50%. Поскольку использование угля будет неуклонно снижаться, а природный газ и нефть, согласно всем сценариям устойчивого развития, и в 2040-е годы продолжат обеспечивать основную часть глобального спроса на энергию [9, с. 7], то доля ВИЭ в ТЭК к этому времени должна превысить 35%, чтобы в дальнейшем стать доминирующей. Именно на это нацелен амбициозный сценарий развития возобновляемых источников энергии REmapCase [4].

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД: МИФЫ И РЕАЛЬНОСТЬ

Итак, сегодня мировая энергосистема вошла в четвёртый этап фундаментальной трансформации – перехода к широкомасштабному использованию ВИЭ и постепенному вытеснению ископаемых видов топлива. Доля ВИЭ в ТЭК к 2020 г. как раз достигла начального уровня в 5%, достаточного для старта широкого распространения во все сферы народного хозяйства. Время перехода к доминированию нового ресурса в предыдущих трансформациях мировой энергосистемы от дров и отходов к углю, от угля к нефти и от нефти к газу составляло примерно 60 лет [12]. На этот раз потребуется сократить временной коридор в 2–3 раза – до 20–30 лет, что обусловлено требованиями стабилизации климата к 2050 г. Но возможно ли это?

Распространение нового энергоресурса – эволюционный процесс, и описывается он нелинейной S-образной функцией, в данном случае представляющей логистическую функцию Ферхюльста. Впервые это показали С. Марчетти и Н. Накиценович в работе [12], где с большим успехом анализировалась с помощью логистических уравнений эволюция энергетических ресурсов в современном мире, начиная с промышленной революции. Учёные рассчитали прогноз изменения доли нефти и угля на 50 лет вперёд с точностью до 2–3%. Поскольку эволюционные процессы обладают эндогенной скоростью раз-

вития, может получиться так, что не удастся сильно ускорить распространение ВИЭ, как это планируется в слишком амбициозных сценариях.

В этой связи следует особо подчеркнуть, что любые заявления или планы по осуществлению перехода к ВИЭ за один-два десятилетия абсолютно необоснованны и крайне вредны, тем более если они исходят от политических лидеров. Смил в авторской книге [11], посвящённой развенчанию мифов, которые сложились вокруг использования различных видов энергии, и ставшей в своё время бестселлером, также считал выдумкой предлагавшиеся невероятно высокие темпы перехода от традиционных источников энергии к ВИЭ, например, попытки осуществить переход к возобновляемым источникам энергии в США за 10 лет. Действительно, именно к этому в июле 2008 г., когда цены на нефть достигли исторического максимума в 147 долл. за баррель, призывал бывший вице-президент США Альберт Гор, заявляя буквально следующее: “Сегодня я призываю наш народ взять на себя обязательство в течение десяти лет производить 100% электроэнергии из возобновляемых источников. Эта цель достижима и выполнима” [13].

Все подобные призывы и прогнозы игнорируют фундаментальное обстоятельство, обусловленное эволюционным поведением современных энергосистем. Для них изначально характерен медленный темп перехода от одного доминирующего вида энергии к другому [11, с. 201] (здесь Смил абсолютно прав), поскольку энергосистемы имеют весьма сложную и капиталоёмкую инфраструктуру и по своей сути чрезвычайно инерционны. Моделирование энергетического перехода, выполненное нами, подтверждает это.

Прогнозировать такие нелинейные динамические процессы, как распространение инноваций, весьма сложно, здесь могут ошибаться даже учёные и высококвалифицированные эксперты. Эти примеры всегда поучительны. В частности, сам Смил всего 12 лет назад считал мифом, что ВИЭ когда-либо станут устойчивой энергетической базой для развития человеческой цивилизации: “Сегодня мы можем говорить о возобновляемой энергетике как о ярком историческом феномене, очередной интересной попытке преобразования общества... У всех этих попыток есть общая черта: все они потерпели неудачу” [11, с. 89].

Прогресс в области ВИЭ за последнее десятилетие стал весьма впечатляющим ответом на ошибочный прогноз Смила: выработка электроэнергии на основе возобновляемых источников выросла на порядок, в 10 раз, – со 136 ГВт в 2008 г. до 1360 ГВт к концу 2018 г. [3, с. 8]. Огромный потенциал ВИЭ настолько очевиден, что сегодня мало кто сомневается в перспективах возобновляемых источников как одного из основных энергетических ресурсов середины XXI в. Такова природа нелинейного процесса эволюционного распространения всех инноваций: сначала в течение длительного периода времени, около 30 лет, он идёт весьма медленно, затем по достижении некоторого критического момента резко и взрывообразно нарастает до определённого уровня и, наконец, плавно переходит к стадии насыщения, фиксируя тем самым завершение времени энергетического перехода. Первый переход был инкубационным периодом технологического развития ВИЭ. Сейчас мы находимся в начале второго.

Он будет весьма трудным по ряду причин. Прежде всего потребуется создать новую инфраструктуру для ВИЭ, которая может оказаться довольно затратной. Вытеснение традиционных ископаемых видов топлива из энергетики будет связано с необходимостью “созидательного разрушения” уже существующей дорогостоящей инфраструктуры, чего не может себе позволить большинство государств. Например, средний возраст угольных электростанций в странах Азии составляет менее 15 лет, тогда как в развитых странах – около 40 лет. Так что мировое потребление угля будет сокращаться медленно, по крайней мере до 2040 г., причём снижение в Китае, Европе и Северной Америке компенсируется увеличением в Индии и странах Юго-Восточной Азии [9, с. 5]. Поэтому необходимо жёстко противостоять новым угольным проектам в 2020-е годы, чтобы прирост энергетических мощностей в дальнейшем производился за счёт ВИЭ и АЭС. Но тут мы встречаемся со сменой направления энергоперехода.

Если в предыдущих переходах основным драйвером была экономическая привлекательность, высокая энергетическая ценность нового ресурса по сравнению с действующими конкурирующими, то теперь им становится государственная энергетическая политика декарбонизации, направленная на сокращение выбросов парниковых газов в соответствии с требованиями Парижского соглашения. Поэтому для ускоренного развития ВИЭ нужны активные политические и нормативные решения правительств всех стран, подписавших и ратифицировавших Парижское соглашение 2015 г. Поскольку государственная политика находится под влиянием различных групп лоббистов, среди которых выделяется мощное лобби нефтегазового сектора, то ряд авангардных стран мира не сможет проводить твёрдую последовательную политику декарбонизации. К сожалению, к их числу относятся США – лидер по объёму выбросов парниковых газов в мире. Учитывая все трудности на пути к ВИЭ, МИРЭС называет предстоящий энергопереход Великим [10].

Следует подчеркнуть, что развёртывание технологий ВИЭ требует значительного повышения эффективности энергопотребления. Существует большой кластер разнообразных технологий, обеспечивающих этот процесс. Среди них пока нет ни одной революционной, но в совокупности они дают поистине революционный эффект, обеспечивая существенное замедление темпов роста глобального энергопотребления. Например, если традиционные лампы накаливания заменить светодиодами, то можно получить десятикратное сокращение энергии, потребляемой на освещение. Ещё один пример – широкое применение интеллектуальных цифровых технологий для управления расходованием энергии. Данные, собираемые “умными” датчиками, – ключевой фактор в системе энергопотребления, работа которой оптимизируется интеллектуальными цифровыми устройствами путём регулирования спроса и предложения в реальном времени.

Энергетика сейчас переживает волну дизруптивных (подрывных) технологий, коренным образом меняющих ситуацию на рынке энергопотребления. Они позволяют оторвать рост потребления энергии от экономического роста, требуемого для повышения благосостояния населения. Во многих технологически развитых странах объёмы первичного энергопотребления уже стабилизировались, а в некоторых, например, в США, Германии, Японии и Швеции, начали даже снижаться [8, с. 23]. Важно, чтобы развитые страны через механизмы Парижского соглашения способствовали широкому распространению подрывных технологий, обладающих большой энергоэффективностью и низким уровнем углеродных выбросов. Повышение энергоэффективности по всему миру будет содействовать существенному замедлению роста глобального первичного энергопотребления к середине века.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА

Ответить на поставленные в статье вопросы и проверить многочисленные прогнозы поможет проведённое нами математическое моделирование предстоящего энергоперехода. Для прогнозирования траектории роста энергопотребления, динамики изменения структуры топливно-энергетического баланса, траекторий снижения доли ископаемых углеводородных видов топлива и объёмов выброса парниковых газов при их сжигании в энергоустановках мы воспользовались формулами, предложенными в работах одного из авторов [14, 15] и получившими признание международных экспертов [15]. Указанные модели создавались в рамках новой парадигмы энергопотребления в XXI в., основанной на стабилизации среднедушевого энергопотребления в мире. Отсюда следует, что глобальный спрос на энергию будет расти прямо пропорционально численности населения Земли $N_w(t)$:

$$E_w(t) = e_w \cdot N_w(t), \tag{1}$$

где e_w – среднедушевое стационарное энергопотребление в мире в XXI в. Установлено, что $e_w = 2.5$ т.у.т. (тонн условного топлива) или 1.8 т.н.э. (тонн нефтяного эквивалента) на человека в год.

Таким образом, динамика роста глобального спроса на энергопотребление напрямую зависит от текущей численности населения Земли. Мы рассчитали прогнозную мировую демографическую динамику по двум сценариям: модели роста с возвратом к стационарному уровню [16], которая учитывает реальную вмещающую ёмкость биосферы Земли, и модели неограниченного эволюционного роста по Капице [17]. Все расчётные траектории роста численности населения до 2100 г. представлены на рисунке 1, где для сравнения приводится также прогноз ООН. Из графика следует, что прогноз ООН даёт завышенный рост численности населения, начиная с середины XXI в., а прогноз по модели Капицы, не учитывающей ограничений биосферы, опережает наши сценарии после 2060-х годов.

Траектории роста глобального энергопотребления $E_w(t)$, рассчитанные по формуле (1), представлены на рисунке 2. Повышение энергоэффективности, как отмечалось в статье, – основное средство для замедления роста объёмов энергопотребления. Прогнозная траектория повышения энергоэффективности описывается логистической функцией, её вид дан в работе [18, с. 68–69]. С учётом коэффициента энергоэффективности мы рассчитали траектории роста реального энергопотребления $E_{wr}^{(a)}(t)$, графики которых представлены на рисунке 3. Из сравнительного анализа графиков, воспроизведённых на рисунках 2 и 3, следует, что технологии повышения энергоэффективности весьма существенно замедляют рост энергопотребления.

Далее, следуя Марчетти и Накиценовичу [12], мы рассчитали прогнозные траектории глобального роста мощностей безуглеродных ВИЭ и низкоуглеродной ядерной энергетики с помощью аппроксимирующей логистической функции вида:

$$E_{ws}(t) = E_{ws1} + \frac{E_{ws2}}{1 + r_{ES} \cdot \exp\left[-\vartheta_{ES}\left(t - T_0\right)\right]}, \tag{2}$$

где $E_{ws}(t)$ – прогнозный рост мощностей солнечной (*sun*) энергетики; E_{ws1}, E_{ws2}, r_{ES}, ϑ_{ES} – постоянные параметры, подлежащие определению. В случае ветряной (*wind*) энергетики в (2) вводятся обозначения $E_{ww}(t)$ и параметры с индексами “*ww*”, а для ядерной (*nuclear*) энергетики, соот-

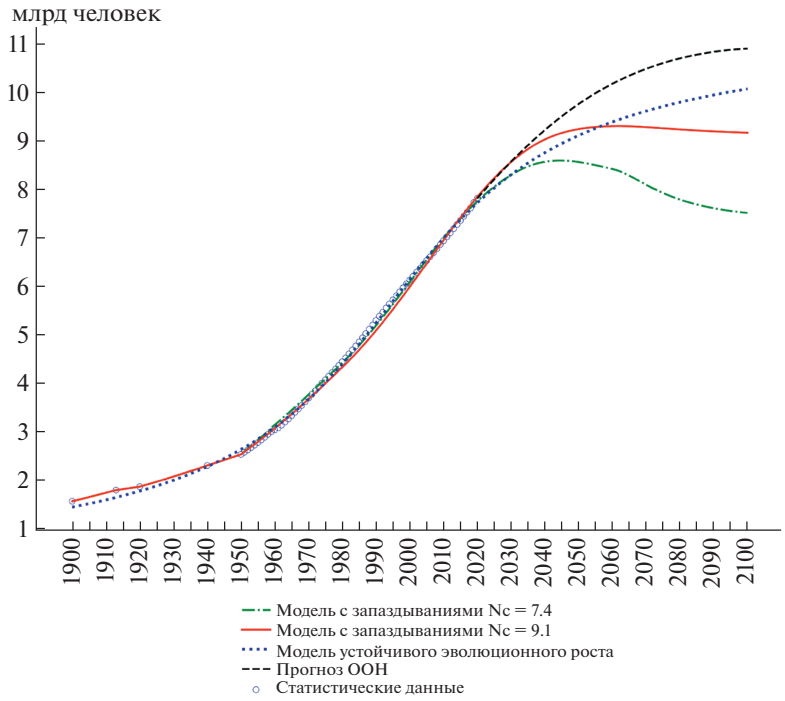

Рис. 1. Сценарии развития динамики численности населения мира в XXI в.

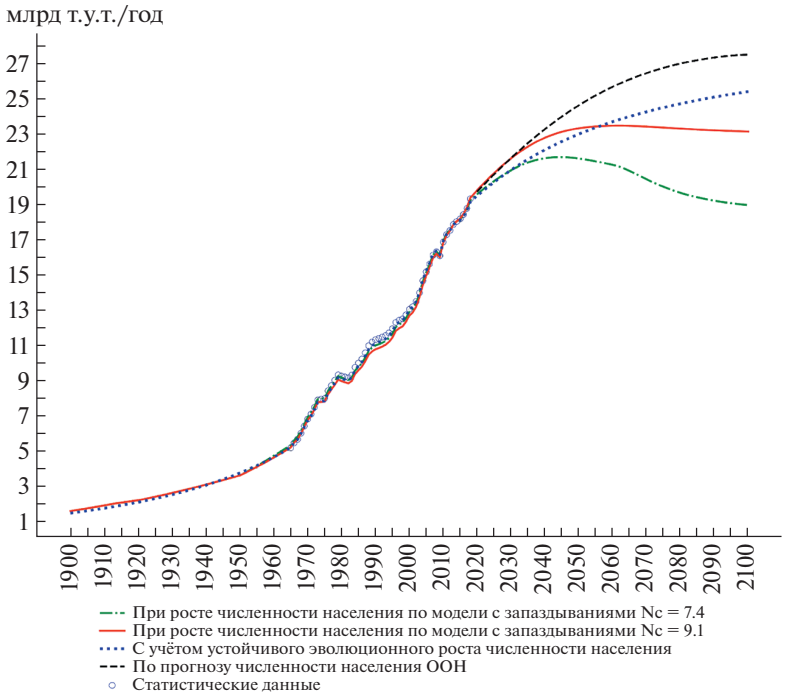

Рис. 2. Динамика номинального мирового энергопотребления в XXI в.

ветственно, $E_{wn}(t)$. Постоянные параметры определяются методом наименьших квадратов с использованием ретроспективных данных за период с 2000 по 2018 г. и прогнозных значений по развитию СЭС и ВЭС, взятых из доклада IRENA [4], а по перспективам развития ядерной энергетики – из доклада МИРЭС [10]. Причём все траектории рассчитываются для двух сценариев раз-

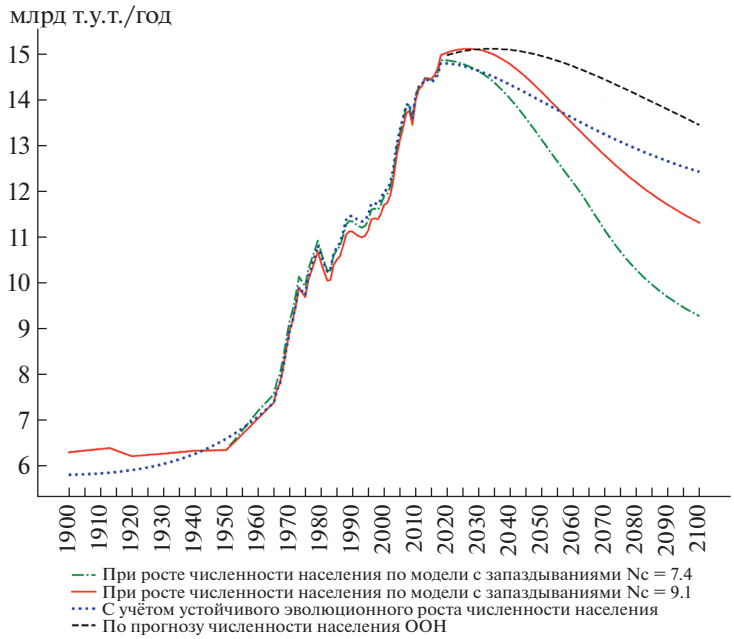

Рис. 3. Динамика реального мирового энергопотребления в XXI в.

вития: консервативного и амбициозного (табл. 1, 2). Расчёты показывают, что они выходят на насыщение в 2060-е годы, обозначая завершение Великого энергоперехода.

Если вычесть из общего прогнозного объёма реального энергопотребления $E_{wr}^{(a)}(t)$ (рис. 3) прогнозные объёмы солнечной, ветряной и ядерной энергетики, а также гидроэнергетики (*hydropower*) и биоэнергетики (*bioenergetic*), то получим траектории снижения объёмов потребления ископаемых углеводородных видов топлива при различных сценариях:

$$E_{wff}(t) = E_{wr}^{(a)}(t) - E_{ws}(t) - E_{ww}(t) - E_{whp} - E_{wbe}. \quad (3)$$

Исходя из данной формулы, можно предположить, что гидроэнергетика, доля которой в мировом ТЭБ сейчас составляет около 6.9%, сохранит достигнутый уровень в течение всего XXI в., то есть E_{whp} = 6.9%. Что касается биоэнергетики, включающей традиционную биомассу (дрова и отходы – 7.4%), доля которой будет несколько снижаться, и современную биоэнергетику (1%), включая биотопливо (этанол и биодизель), доля которой будет несколько повышаться, то в целом она будет сохранять постоянную долю в мировом ТЭБ: E_{wbe} = 8.4%.

Для получения прогнозной траектории антропогенных выбросов углекислого газа необходимо умножить прогнозные объёмы потребления углеводородных топлив $E_{wff}(t)$ (3) на прогнозные значения среднемирового коэффициента углеродной интенсивности $c_c(t)$, рассчитанной в работе [15]:

$$c_c(t) = c_{-\infty} + \frac{a}{1 + r \cdot \exp[-k(t - 2000)]}, \quad (4)$$

где $c_{-\infty} = 0.564$; $a = 0{,}17$; $r = 37$; $k = 0.045$.

В результате получаем прогнозную траекторию антропогенных выбросов CO_2 в XXI в.:

$$C_w(t) = c_c \cdot E_{wff}(t). \quad (5)$$

Графики траекторий антропогенных выбросов углекислого газа представлены на рисунках 4 и 5. Они показывают, что при реализации амбициозных сценариев распространения ВИЭ и АЭС в сочетании с ускоренным повышением энергоэффективности (рис. 5) скорость сокращения выбросов CO_2 значительно выше, чем при консервативном сценарии энергоперехода (рис. 4).

Зная прогнозную динамику антропогенных выбросов углекислого газа в атмосферу Земли (рис. 4, 5), можно приближённо рассчитать прогнозную динамику дальнейшего роста средней глобальной температуры приземной атмосферы [14, 15]. Часть CO_2 поглощается океанами и экосистемами суши. Один из пионеров в разработке современных климатических моделей А. Тарко показал, что её можно принять в первом приближении как постоянную величину, равную 3.1 Гт в год [19, с. 177]. Следовательно, накопление антро-

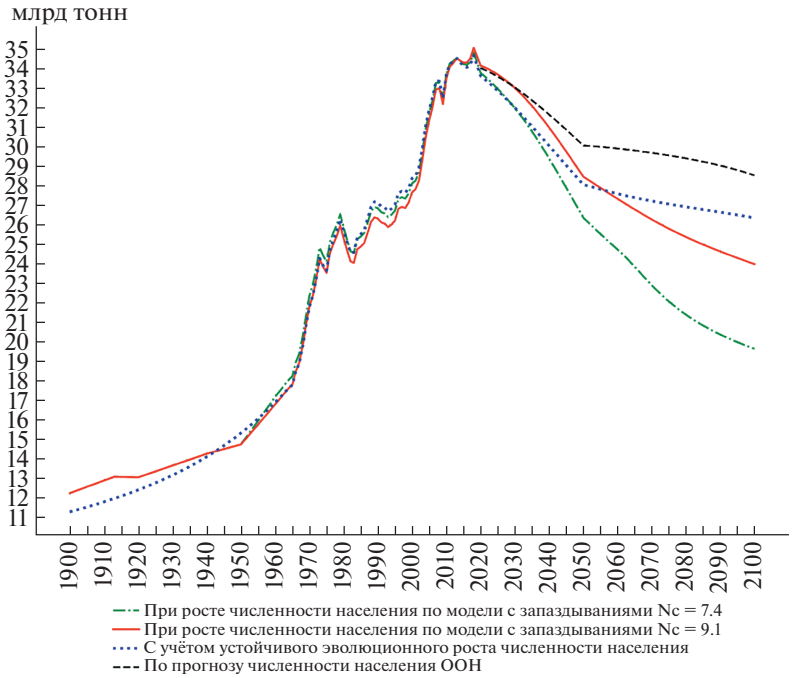

Рис. 4. Динамика сокращения антропогенных выбросов CO_2 в атмосферу в XXI в. (консервативный сценарий энергоперехода в сочетании с умеренным повышением энергоэффективности)

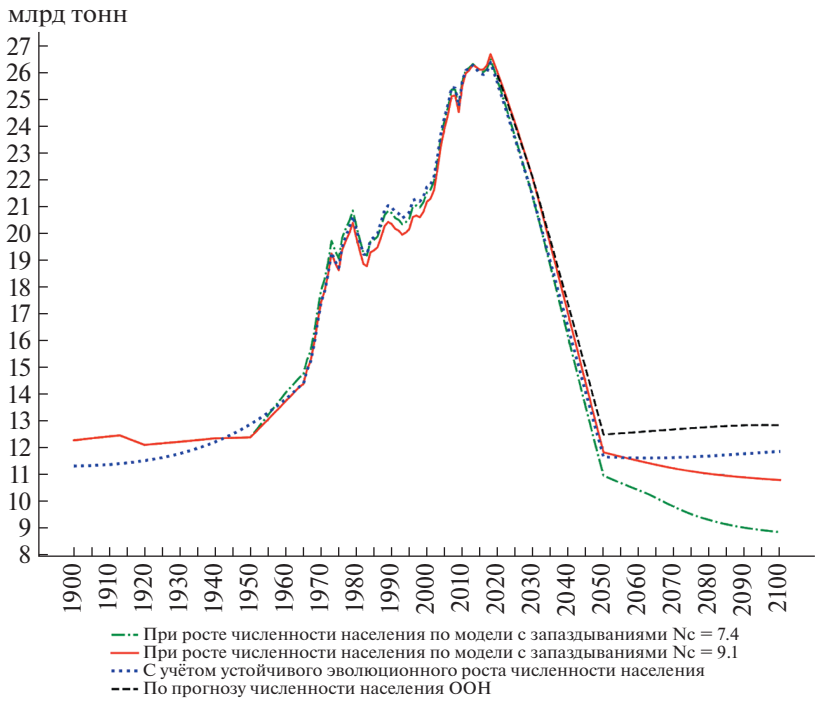

Рис. 5. Динамика сокращения антропогенных выбросов CO_2 в атмосферу в XXI в. (амбициозный сценарий энергоперехода в сочетании с ускоренным повышением энергоэффективности)

погенного углерода C_w (5) в атмосфере можно описать интегральной формулой:

$$C_w(T) = \int_{T_0}^{T} C_w(t)dt - 3.1(T - T_0), \qquad (6)$$

где $C_w(T)$ – динамика накопления углерода (углекислого газа) в атмосфере Земли; T_0 = 2020 г.; 2020 г. $\leq T \leq$ 2100 г.

Тарко также получил приближённую формулу, связывающую динамику отклонения сред-

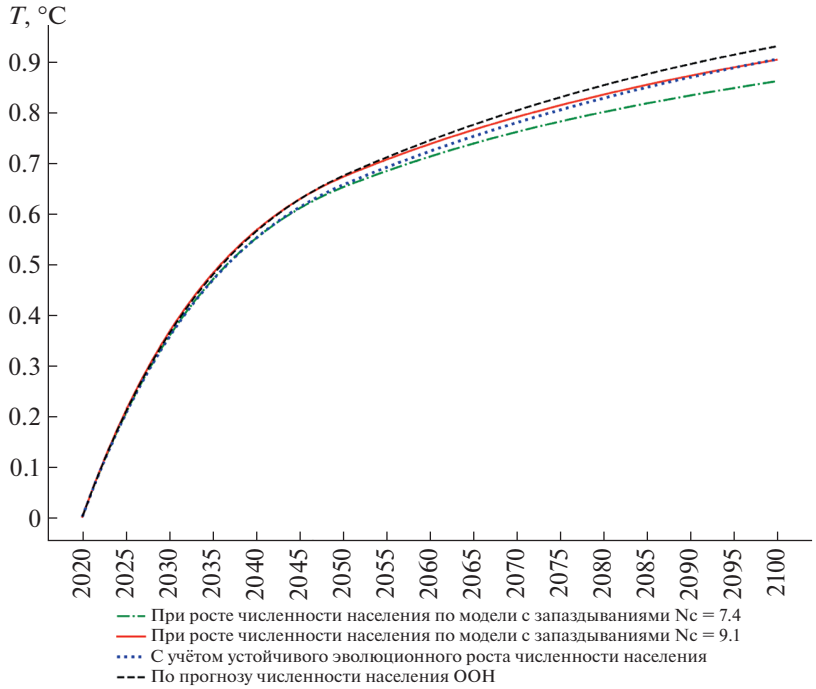

Рис. 6. Динамика отклонения средней глобальной температуры приземной атмосферы в XXI в. при реализации амбициозного сценария Великого энергетического перехода

ней глобальной температуры с ростом $C_\Sigma(t)$ [19, с. 57]:

$$T_g = \begin{cases} 2.5\{1 - \exp[-0.82(z-1)]\}, & z \geq 1; \\ -5.25z^2 + 12.55z - 7.3, & z < 1. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь T_g – отклонение средней глобальной температуры атмосферы от современного значения (+15°C), обусловленное только парниковым эффектом, вызванным антропогенными выбросами CO_2;

$$z = 1 + \frac{C_\Sigma}{C_0}; \quad C_0 = 867 \text{ Гт}. \quad (8)$$

С помощью формул (6)–(8) мы рассчитали динамику дальнейшего роста средней глобальной температуры приземной атмосферы T_g для амбициозного сценария Великого энергетического перехода в сочетании с ускоренным повышением энергоэффективности (рис. 5), которая графически изображена на рисунке 6. Из рассмотрения графика температурного роста видно, что дополнительное потепление за оставшиеся 80 лет XXI в. составит примерно 0.9°C. Если вспомнить, что уже к 2018 г. глобальная средняя температура повысилась ровно на 1°C по сравнению с доиндустриальным уровнем (+14°C), то становится очевидным, что амбициозный сценарий Великого энергоперехода позволит удержать глобальное потепление на уровне 2°C, но никак не 1.5°C, при этом требуется широкое внедрение технологий улавливания, связывания и захоронения углекислого газа, образующегося в процессе сжигания углеводородов, а также удаления CO_2 из атмосферы. Однако эти технологии весьма затратны и существенно снижают рентабельность энергоустановок. Например, они понижают степень эффективности угольных ТЭС на 20–25%. Кроме того, не везде есть подходящий резервуар для захоронения огромных масс CO_2. Поэтому вряд ли стоит рассчитывать на скорый прогресс от их использования.

* * *

Великий энергетический переход от доминирующих в настоящее время ископаемых углеводородов к преимущественному использованию ВИЭ, когда их доля в общем энергобалансе превысит 40%, может состояться в 2060-е годы. Но только в случае реализации амбициозного сценария распространения возобновляемых источников энергии REmapCase от IRENA и энергетического сценария Unfinished Simphony от МИРЭС, связанного с развитием АЭС. При этом доля ядерной энергетики в общем энергобалансе должна увеличиться с нынешних 4.9 до 13.5%.

Важно подчеркнуть, что только симбиоз ВИЭ и АЭС с ядерными реакторами малой и средней мощности последнего поколения позволит в достаточной мере вытеснить и заместить углеводороды для достижения климатической безопас-

ности, не нанося ущерба экономике. Без динамичного развития ядерной энергетики как низкоуглеродного источника генерации, обеспечивающего базовые и пиковые потребности, необходимые для создания стабильной и устойчивой энергосистемы, Великий энергопереход невозможен.

В результате такого перехода уже к 2050 г. объём выбросов CO_2 в атмосферу Земли сократится в 3 раза (рис. 5) по сравнению с пиковым в 2018–2019 гг. (33.3 Гт), как предсказывает МГЭИК. Но это, согласно нашим расчётам, позволит удержать глобальное потепление только на уровне 2°C, а не 1.5°C (рис. 6), как утверждает международная группа экспертов.

Чтобы глобальное потепление не превысило 1.5°C, соответствующих амбициозной цели Парижского соглашения, требуется повсеместное внедрение химических технологий улавливания, связывания и захоронения углекислого газа, образующегося в процессе сжигания углеводородов, а также удаления CO_2 из атмосферы физическим или химическим путём. Однако этому препятствуют дороговизна энергоустановок, а также неизбежное снижение их рентабельности.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 20-61-46004 по проекту «Мировое развитие и “пределы роста” в XXI веке: моделирование и прогноз».

ЛИТЕРАТУРА

1. Итоговый документ 21-й конференции Рамочной конвенции об изменении климата. Париж. 30 ноября–11 декабря 2015 г. http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/rus/109r01r/pdf
2. Мировая энергетическая модель. Сценарный анализ будущих энергетических трендов. Доклад МЭА. 2019. https://www.iea.org/reports/world-energy-model#abstract
3. Перспективы глобального перехода к возобновляемой энергетике / Глобальный доклад REN21 “Возобновляемая энергетика-2019”. http:/www.ren21.net/GSR
4. Преобразование энергетической системы и удержание глобального повышения температуры / Доклад IRENA. 2019. http:/www.irena.org/publications.
5. Преобразование глобальной энергетической системы: дорожная карта до 2050 г. / Доклад IRENA. 2018. http:/ www.irena.org/publications.
6. Глобальное потепление на 1.5°C / Специальный доклад МГЭИК. Техническое резюме. 2018. https://www.ipcc.ch/sr15/
7. Доклад ООН о разрыве в уровнях выбросов за 2018 год. Резюме. http:/ http:/www.ipcc.ch
8. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / Под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина. М.: ИНЭИ РАН – Центр энергетики Московской школы управления. Сколково, 2019.
9. World Energy Outlook 2018. OECD/IEA, 2018. http:/www.iea.org.
10. Сценарии развития мировой энергетики-2019: Будущее атомной энергетики. WEC, 2019. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WEC_Nuclear_Scenarios_Report_2019_-RU.pdf
11. *Смил В.* Энергетика: мифы и реальность. Научный подход к анализу мировой энергетической политики. М.: АСТ-Пресс Книга, 2012.
12. *Marchetti C., Nakicenovic N.* The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model. RR-79-13. Luxemburg: International Institute for Applied Systems Analysis, 1979.
13. *Gore Al.* A Generational Challenge to Repower America. http://www.algore.org/generational_challenge_repower_america_algore (accessed January 6, 2010)
14. *Акаев А.А.* Стабилизация климата Земли в XXI веке путём перехода к новой парадигме энергопотребления // ДАН. 2012. № 4. С.1–6.
15. *Akaev A.A.* The Stabilization of Earth’s Climate in the 21st Century by the Stabilization of Per Capita Consumption / The Oxford Handbook of the Macroeconomics of Global Warming. N.Y.: Oxford University Press, 2014.
16. *Акаев А.А., Садовничий В.А.* Математическая модель демографической динамики со стабилизацией численности населения мира вокруг стационарного уровня // ДАН. 2010. № 3. С. 320–324.
17. *Капица С.П.* Очерк теории роста человечества. Демографическая революция и информационное общество. М.: Никитский клуб, 2008.
18. *Плакиткин Ю.А.* Закономерности инновационного развития мировой экономики: Энергетические уклады XXI века. СПб.: РАЕН, 2012.
19. *Тарко А.М.* Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. М.: Физматлит, 2005.