

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ:
ВКЛАД В ДЕКАРБОНИЗАЦИЮ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ¹

© 2024 г. М. А. Арапов^{a, b}, О. С. Попель^{b, *}, А. Б. Тарасенко^b, С. П. Филиппов^c

^aООО “Юнигрин Инжиниринг”, Профсоюзная ул., д. 65, корп. 1, Москва, 117342 Россия

^bОбъединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, Москва, 125412 Россия

^cИнститут энергетических исследований РАН, Нагорная ул., д. 31, корп. 2, Москва, 117186 Россия

*e-mail: o_popel@mail.ru

Поступила в редакцию 25.03.2024 г.

После доработки 27.05.2024 г.

Принята к публикации 30.05.2024 г.

Рассмотрена роль солнечной и ветровой энергетики в текущих процессах декарбонизации электроэнергетической отрасли России. Обсуждаются вопросы становления и дальнейшего развития возобновляемой энергетики, которая может составить заметную долю в энергобалансе страны благодаря введенному законодательству, стимулирующему ее внедрение. Проанализированы темпы вводов объектов генерации на возобновляемых источниках энергии (далее возобновляемая генерация) по регионам, а также оценены тенденции к снижению капитальных затрат при строительстве как солнечных, так и ветровых сетевых электростанций. Важной особенностью возобновляемой генерации является ее стохастический характер, что может вызывать определенные проблемы при передаче энергии в электрические сети и требует принятия специальных мер по увеличению доли энергии от возобновляемых источников в электрических сетях и дополнительных затрат по его обеспечению. За рубежом, где пройден существенно больший путь в развитии отрасли, в качестве таких мер широко обсуждается внедрение сетевых накопителей энергии, методов преобразования ее излишков, выработанных возобновляемыми источниками, в различные полезные продукты и другие меры. В России общая доля ВИЭ в энергобалансе пока довольно мала, однако в отдельных регионах уже достигает пороговых значений, при которых реализуются несколько пилотных проектов с использованием накопителей электрической энергии как в сетевых, так и в автономных системах. В статье приведены оценки вклада сетевых солнечных и ветровых электростанций в замещение энергии от традиционных источников и снижение выбросов парниковых газов, рассмотрены проблемы и перспективы дальнейшего развития отрасли, прежде всего с точки зрения необходимости реконструкции сетевой инфраструктуры.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, солнечная и ветровая энергетика, декарбонизация, выбросы углекислого газа, сетевая инфраструктура

DOI: 10.56304/S0040363624700346

В настоящее время в мире, вступившем в новый энергетический переход, осуществляется трансформация энергетической отрасли, основными направлениями которой являются:

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-01129-23-00. Анализ влияния возобновляемой энергетики на выбросы углекислого газа в российской энергетике проведен при поддержке гранта в форме субсидий из федерального бюджета на выполнение научных исследований и работ в рамках реализации инновационного проекта “Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ” (соглашение о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с п. 4 ст. 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации от 01.03.2023 № 139-15-2023-003 и допсоглашение от 27.02.2024 № 139-15-2023-003/2).

приоритетное развитие возобновляемой энергетики вкупе с водородной энергетикой, ориентированных прежде всего на снижение выбросов парниковых газов;

широкое внедрение энергоэффективных и энергосберегающих технологий;

расширение систем малой распределенной и децентрализованной энергетики;

повышение гибкости энергетических систем путем цифровизации процессов управления и реализации возможностей превращения отдельных потребителей в объекты генерации энергии.

В 2022 г. в мировом энергетическом балансе доля органических топлив, используемых для производства электроэнергии, снизилась до 61%,

атомной энергии сократилась до 9%, а доля возобновляемых источников энергии возросла до 30%, из которых на солнечную и ветровую генерацию приходится уже более 12%. Для сравнения 10 лет назад, в 2012 г., суммарная доля солнечной и ветровой энергетики составляла менее 3% [1]. В Европе, являющейся одним из лидеров в освоении возобновляемой энергетики, доля ВИЭ в производстве электроэнергии в 2022 г. достигла 36%, из которых 11% приходилось на ветроэнергетические установки и 5% – на фотоэлектрические (в 2012 г. соответственно 25, 4 и 1.5%). Установленная мощность фотоэлектрических установок в мире в 2022 г. приблизилась к 1200 ГВт, мощность ветроустановок превысила 800 ГВт, а их ежегодный ввод составил соответственно 250 и 80 ГВт, что сопоставимо с установленной мощностью всех действующих электростанций России (около 250 ГВт).

Возникающим проблемам, связанным с энергетическим переходом и выполнением взятых странами международных обязательств по декарбонизации энергетики, уделяется большое внимание как за рубежом, так и в России. Предполагаемый ввод трансграничных углеродных налогов и декарбонизационные тенденции в энергетике и экономике с учетом глобализации торговых связей в той или иной степени экономически затронут все страны, включая Россию. Поэтому важно найти оптимальный путь осуществления энергетического перехода и регулировать внутреннее законодательство таким образом, чтобы наряду с решением экологических проблем продолжать эффективное и не наносящее ущерба стране экономическое и технологическое развитие генерации на основе ВИЭ [2]. Оценка влияния на экономику продвигаемых в энергетику новых энергетических технологий, включая масштабное использование возобновляемых источников энергии, посвящено большое количество исследований в разных странах [3–7].

Основные надежды при декарбонизации энергетики и транспорта за рубежом связаны с продвижением возобновляемой энергетики и водородных технологий [8], однако при этом нередко возникают неоправданные ожидания, а в процессе внедрения новых технологий появляются серьезные проблемы, которые приводят к необходимости изменять политику государств в данной области [9, 10]. В этой связи при принятых обязательствах по декарбонизации большой интерес, особенно для России с ее значительными запасами природного газа, наряду с развитием возобновляемой энергетики вызывают технологии улавливания и захоронения углекислого газа из отходящих газов тепловых электростанций на органическом топливе [11, 12]. Перспективными представляются разрабатываемые технические решения по созданию экологически чистых паро-

газотурбинных электростанций с внутрицикловым выводом углекислого газа для его дальнейшей транспортировки, использования в промышленности и/или захоронения [13].

В Европе с учетом высокой доли возобновляемых источников в энергетическом балансе идут активные поиски решений задач декарбонизации с обеспечением сохранения стабильной работы энергосистем [14], что обусловлено возникающими проблемами поддержания баланса генерации и потребления из-за неравномерной выработки электроэнергии с использованием возобновляемых источников [15]. Одно из направлений – стимулирование потребления энергии, выработанной внутри домохозяйств, энергорайона, региона, в целях минимизации ее перетоков [16]. В Германии в этой связи наблюдается существенный прогресс в развитии домашних и промышленных систем аккумулирования электрической энергии на основе литий-ионных аккумуляторов. Крупные промышленные сетевые накопители также внедряют Южная Корея и Австралия [17].

На повестке дня оказался вопрос продолжения эксплуатации выработавших ресурс на электромобилях аккумуляторных батарей в составе подобных сетевых накопителей [18]. Возрос также интерес к организации максимального потребления энергии на месте ее производства. Во многих европейских странах предприняты попытки стимулировать самопотребление через ограничение продаж избытков энергии в сеть.

В работе [19] проводится сравнительный технико-экономический анализ водонагревательных систем и аккумуляторных батарей как средств запасания энергии, избыточно выработанной солнечными батареями. При этом сама система присоединена к централизованной сети, но авторами работы поставлена задача свести обмен энергией с сетью до минимума, особенно в часы пиковой выработки энергии фотоэлектрическими модулями. Показано, что использование электроэнергии для накопления горячей воды в часы пиковой выработки фотоэлектрическими модулями и благодаря этому последующее сокращение энергозатрат на горячее водоснабжение оказываются выгоднее аккумулирования электроэнергии.

В [20] обсуждаются вопросы оптимизации электрических систем теплоснабжения с учетом применения гибких тарифов на электрическую энергию и возможностей использования электрической энергии, вырабатываемой солнечными модулями, для нужд теплоснабжения.

Применение фотоэлектрических модулей для горячего водоснабжения и отопления в условиях малоэтажных зданий в северных регионах рассматривается в работе [21] как часть концепции здания с нулевым потреблением энергоресурсов.

Это позволяет говорить о развитии самопотребления как нового тренда на повышение устойчивости энергосистем в условиях роста в энергетическом балансе доли возобновляемых источников энергии.

В России пока не достигнуты уровни присутствия ВИЭ в энергосистеме, угрожающие ее стабильности в целом, однако проблемы могут возникнуть в отдельных регионах и объединенных энергосистемах при дальнейшем росте доли ВИЭ [22].

В период с 2009 г. по настоящее время Правительством РФ выпущен ряд нормативных документов, касающихся государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии. В этих документах ставится цель доведения к 2035 г. объемов производства и потребления электрической энергии с использованием ВИЭ (кроме гидроэлектростанций установленной мощностью более 25 МВт) не менее чем до 6%. Принят ряд постановлений Правительства, создающих правовую основу строительства объектов возобновляемой энергетики, присоединения их к электрическим сетям и устанавливающих механизмы возврата инвестиций в альтернативные виды генерации.

Ряд документов [23–30], регламентирующих различные аспекты внедрения ВИЭ, разработан при участии НП “Совет рынка”.

Наиболее результативной мерой поддержки развития ВИЭ в России стало Постановление Правительства РФ [27]. Программа стимулирования ВИЭ-генерации в ЕЭС России путем гарантированной в течение определенного времени оплаты мощности по договору о предоставлении мощности (ДПМ) на оптовый рынок, заключенному с владельцем электростанции, стала сокращенно называемая ДПМ ВИЭ. В рамках этого механизма были установлены предельные объемы ВИЭ по видам генерации [солнечные (СЭС), ветровые (ВЭС) и малые гидроэлектростанции (мГЭС)] на каждый год до 2024 г. Право возведения объектов возобновляемой энергетики получали участники, в проектах которых были заявлены минимальные удельные капитальные затраты на строительство объекта ВИЭ в рублях за 1 кВт, при этом суммарный объем отобранных проектов был ограничен установленным предельным объемом.

В 2021 г. Правительство РФ Постановлением от 5 марта № 328 ввело новые правила, которые указаны в программе поддержки отрасли возобновляемых источников энергии на период 2025–2035 гг. (ДПМ ВИЭ 2.0). В этой программе был изменен подход к механизму возврата инвестиций в возобновляемую энергетику. Отбор проектов стал осуществляться по одноставочной цене

за 1 кВт · ч электроэнергии. Новые правила существенно повлияли на рынок возобновляемой энергетики на этапе отборов проектов. Так, преимущество получали проекты, привязанные к площадкам с максимально высоким энергетическим потенциалом ВИЭ, что существенно сузило перечень привлекательных для строительства объектов регионов.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗВИТИЯ РЫНКА ВИЭ В РОССИИ

Всего на территории России до 2023 г. было введено в эксплуатацию 4.2 ГВт мощности на ВИЭ, в том числе: СЭС – 1.9 ГВт, ВЭС – 2.1 ГВт, мГЭС – около 0.2 ГВт. При этом на ДПМ ВИЭ пришлось 97% введенных мощностей.

Подробная информация по введенным мощностям на ВИЭ и распределению по регионам представлена в табл. 1.

Особенностью введенного в стране механизма поддержки являлся возврат инвестиций через плату за мощность при достижении граничного значения коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) объекта. Для фотоэлектрических станций этот показатель был установлен равным 12.5%, что дало возможность начать их строительство во всех южных районах РФ, а также в Поволжье.

Динамика вводов объектов возобновляемой энергетики в период с 2014 по 2022 г. отражена на рис. 1, а поквартальные объемы выработки электроэнергии объектами ВИЭ в 2021–2022 гг. представлены на рис. 2.

Средние значения КИУМ СЭС, %, по регионам РФ следующие:

Республика Бурятия.....	14.65
Республика Алтай	14.10
Республика Башкортостан.....	13.63
Оренбургская область.....	14.67
Саратовская область	13.67
Волгоградская область.....	13.26
Астраханская область	15.43
Республика Калмыкия.....	14.20
Омская область	13.03
Забайкальский край	15.14
Республика Дагестан.....	13.26

Масштабное развитие отрасли возобновляемой энергетики в России позволило существенно сократить капитальные затраты на создание электростанций на основе ВИЭ.

Динамика снижения удельных инвестиций в строительство солнечных электростанций на при-

Таблица 1. Введенные в эксплуатацию электростанции на основе ВИЭ по субъектам РФ, МВт [31]

Субъект РФ	СЭС	ВЭС	мГЭС	Итого
Астраханская область	285.0	340.2	—	625.2
Волгоградская область	120.0	88.2	—	208.2
Забайкальский край	100.0	—	—	100.0
Карачаево-Черкесская Республика	—	—	79.1	79.1
Краснодарский край	46.1	—	—	46.1
Мурманская область	—	201.0	16.5	217.5
Омская область	60.0	—	—	60.0
Оренбургская область	370.0	—	—	370.0
Республика Адыгея	8.9	150.0	—	158.9
Республика Алтай	120.0	—	—	120.0
Республика Башкортостан	109.0	—	—	109.0
Республика Бурятия	115.0	—	—	115.0
Республика Калмыкия	234.1	216.6	—	450.7
Республика Карелия	—	—	57.9	57.9
Республика Хакасия	5.2	—	—	5.2
Чеченская Республика	5.0	—	—	5.0
Ростовская область	—	607.3	—	607.3
Самарская область	75.0	—	—	75.0
Саратовская область	105.0	—	—	105.0
Ставропольский край	100.0	450.0	31.0	581.0
Свердловская область	37.9	—	—	37.9
Ульяновская область	—	85.4	—	85.4
Республика Дагестан	15.0	—	—	15.0
Всего	1911.2	2138.7	184.5	4234.4
В том числе по ОЭС:				
Юга	814.1	1852.3	110.1	2776.5
Средней Волги	289.0	85.4	—	374.4
Сибири	180.2	—	—	180.2
Урала	407.9	—	—	407.9
Северо-Запада	—	201.0	74.4	275.4

мере ведущей в области солнечной энергетики российской компании ГК “Хевел” иллюстрируется рис. 3 с соответствующей линейной аппроксимацией. Учитывалось, что если на один год приходилось несколько вводов станций, то бралось среднее значение по ним. Данные рисунка показывают, что по сравнению с 2018 г. в настоящее время удельные капитальные затраты на создание сетевых фотоэлектрических станций снизились почти в 2 раза – примерно до 50–60 тыс. руб/кВт.

Результаты оценки капитальных затрат для сетевых ветропарков на основе конкурсных отборов 2019–2024 гг. приведены на рис. 4 [31]. Там же представлена аппроксимация изменения этих затрат для двух ведущих игроков российского рынка. Объекты ПАО “Энел-Россия” не

рассматривались, так как эта компания построила на территории России всего один крупный ветропарк при удельных капиталовложениях около 90 тыс. руб/кВт. С 2023 г. строительство ветропарков в России осуществляют только компания “Нова-Винд”, добившаяся высокой степени локализации оборудования.

По данным компании ООО “Дампес”, являющейся основным поставщиком сетевых ветрогенераторов на российский рынок [32], стоимость сетевой ветроустановки мощностью 2.5 МВт составляет в настоящее время около 275 млн руб., что соответствует удельной стоимости примерно 110000 руб/кВт, или почти 80% удельной стоимости всего ветропарка.

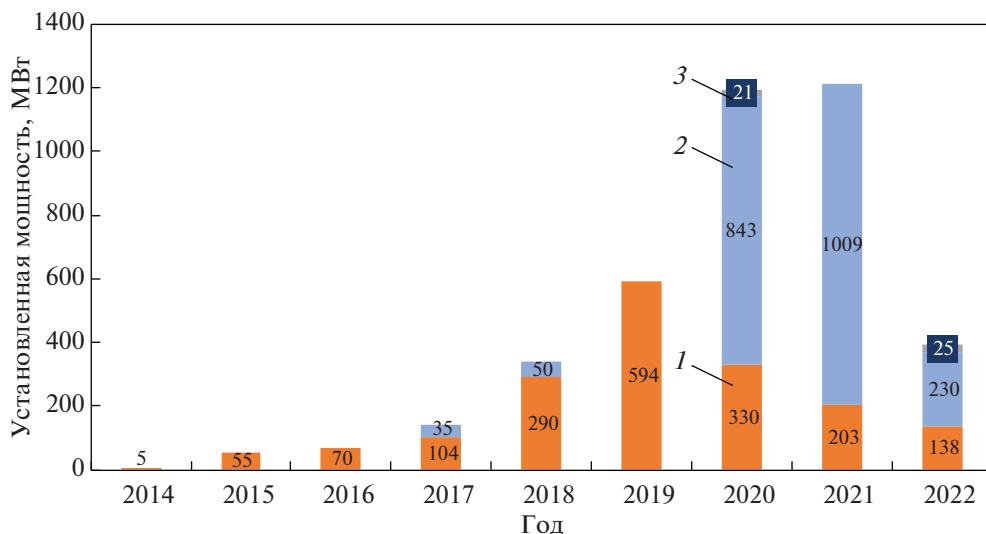


Рис. 1. Динамика ввода мощностей возобновляемой энергетики с 2014 по 2022 г. [31].
Электростанции: 1 – СЭС; 2 – ВЭС; 3 – мГЭС

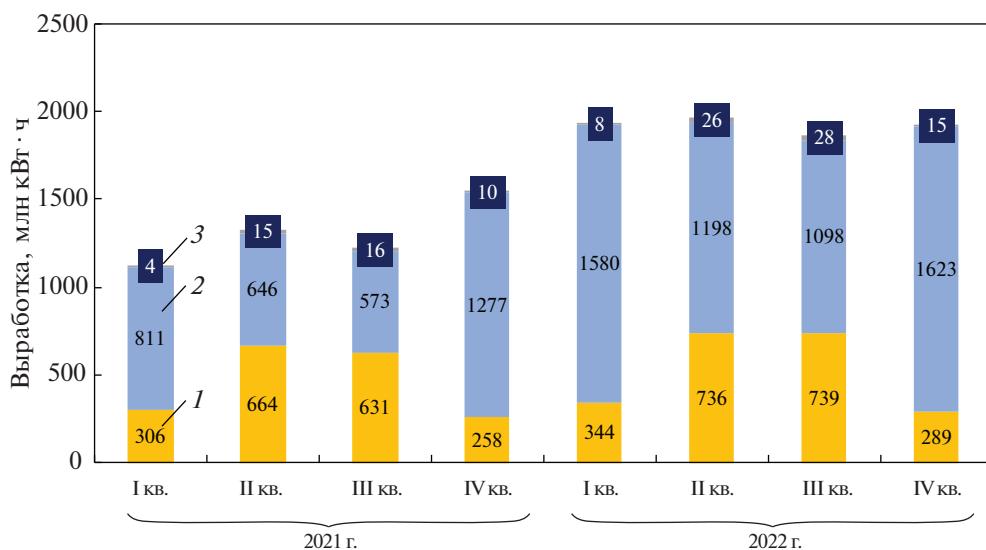


Рис. 2. Поквартальная динамика выработки энергии от ВИЭ в 2021–2022 гг. [31].
Обозначения см. рис. 1

Важно отметить, что в рамках реализации этапа программы ДПМ ВИЭ в период с 2014 по 2024 г. будет практически полностью исчерпана возможность технологического присоединения генерирующих объектов к электрическим сетям среднего напряжения, поскольку были задействованы почти все мощности подстанций 6/10/35 кВ и, кроме того, было использовано большинство свободных транзитных линий электропередачи 110 и 220 кВ. При реализации проектов 2021–2023 гг. это привело к необходимости выполнения значительного объема работ по реконструкции прилегающей инфраструктуры, связанных с установкой дополнительных защит и противоаварийной автоматики.

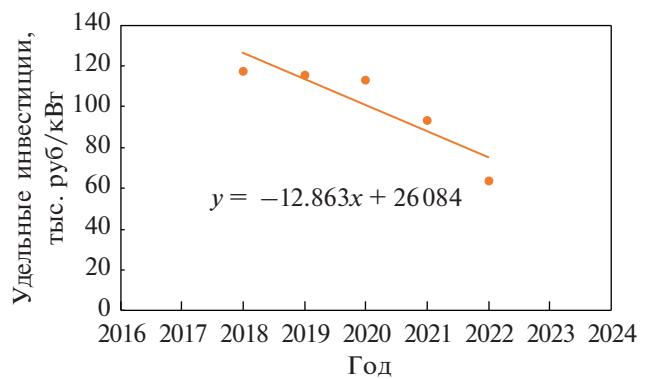


Рис. 3. Тренд изменения удельных инвестиций для сетевых солнечных электростанций установленной мощностью более 25 МВт

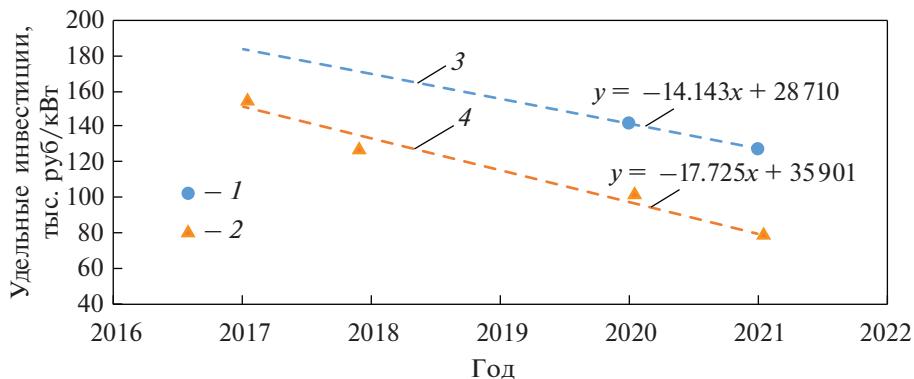


Рис. 4. Тренды снижения удельных инвестиций в создание ветропарков мощностью более 30 МВт.

Удельные инвестиции компаний: 1 – “Нова-Винд”; 2 – “Роснано-Фортум”.

Пунктиром показана линейная аппроксимация данных компаний “Нова-Винд” (3) и “Роснано-Фортум” (4)

Следует отметить, что новые правила, введенные по ДПМ ВИЭ 2.0, стимулировали участников рынка пересмотреть концепцию строительства генерирующих объектов. Для солнечной энергетики преимущества получили электростанции с использованием систем слежения за Солнцем и двусторонних фотоэлектрических модулей, что существенно увеличивало их шансы на победу в конкурсах по отбору объектов благодаря повышению выработки электроэнергии. Следует отметить, что интерес к двусторонним модулям растет во всем мире. После 2018 г. практически все мировые производители предлагают хотя бы один типоразмер такого модуля в своих продуктовых линейках [33].

Начатая в 2005 г. борьба за снижение удельного расхода кремния привела к постепенному уменьшению толщины пластин от 200 до 100–120 мкм. При такой толщине пластин операция спекания пасты контактной сетки ведет к их изгибным деформациям, если контакты фронта и тыла не формируются симметрично один относительно другого. Подобная симметрия и позволяет использовать тыльную сторону для выработки энергии. Кроме того, на тыльной поверхности формируется изотипный переход (путем легирования тем же материалом, что и основная пластина, но в большей концентрации), служащий своеобразным зеркалом для “отталкивания” носителей заряда от тыльной стороны пластины, что позволяет избежать паразитной рекомбинации на дефектах края пластины [34].

По результатам отборов, проведенных в России в 2021 и 2023 гг. по новой программе поддержки ДПМ ВИЭ 2.0, были дополнительно отобраны объекты ВИЭ установленной мощностью 4556.34 МВт, в том числе СЭС 1870.54 МВт, ВЭС 2589.79 МВт, мГЭС 96 МВт, что увеличило прогнозный общий объем возобновляемой генерации на уровне 2028 г. до 8790.76 МВт.

Информация по введенным и планируемым к вводу мощностям электростанций на основе ВИЭ в период 2023–2028 гг. и их распределению по регионам страны представлена в табл. 2.

Важно отметить, что применение в проектах солнечных электростанций систем слежения за Солнцем и двусторонних фотоэлектрических модулей, а также размещение СЭС на площадках с более высоким уровнем инсоляции должно привести к существенному увеличению среднего КИУМ для СЭС. Прогнозный средний КИУМ солнечных электростанций в нескольких субъектах, %, составил:

Астраханская область	16.92
Забайкальский край	19.00
Республика Бурятия	17.61

Большинство из отобранных проектов возобновляемой энергетики будут подключаться к электрическим сетям напряжением 110 и 220 кВ, и в целях нормального функционирования энергосистем в соответствии с требованиями нормативных документов потребуется масштабная реконструкция прилегающей инфраструктуры. После присоединения отобранных проектов в некоторых регионах РФ сложится ситуация, при которой присоединение новых объектов генерации из-за превышения перетока в контрольных сечениях (чаще всего на границе энергосистем соседних регионов) будет невозможно без строительства новых транзитных линий, что по уровню капитальных вложений будет превышать стоимость самих объектов генерации. Примерами таких регионов могут стать Республика Калмыкия, Астраханская область, Республика Алтай, Республика Бурятия, Забайкальский край.

Таблица 2. Ожидаемый ввод мощностей возобновляемой энергетики в 2023–2028 гг. по регионам России, МВт

Субъект РФ	Введены до 2023 г.	Будут введены в 2023–2028 гг.				Всего
		СЭС	ВЭС	мГЭС	итого	
Астраханская область	625.20	330.00	324.00	—	654.00	1279.20
Волгоградская область	208.20	—	1066.50	—	1066.50	1274.70
Забайкальский край	100.00	1039.86	—	—	1039.86	1139.86
Карачаево-Черкесская Республика	79.13	—	—	—	—	79.13
Кабардино-Балкарская Республика	—	—	—	23.20	23.20	23.20
Краснодарский край	46.10	—	151.20	—	151.20	197.30
Мурманская область	217.47	—	—	—	—	217.47
Омская область	60.00	—	—	—	—	60.00
Оренбургская область	370.00	—	154.47	—	154.47	524.47
Республика Адыгея	158.90	—	—	—	—	158.90
Республика Алтай	120.00	—	—	—	—	120.00
Республика Башкортостан	109.00	—	—	—	—	109.00
Республика Бурятия	115.00	118.12	—	—	118.12	233.12
Республика Калмыкия	450.70	120.00	—	—	120.00	570.70
Республика Карелия	57.90	—	—	—	—	57.90
Республика Татарстан	—	—	349.00	—	349.00	349.00
Республика Хакасия	5.20	—	—	—	—	5.20
Чеченская Республика	5.00	34.20	—	23.00	57.20	62.20
Ростовская область	607.29	—	155.07	—	155.07	762.36
Самарская область	75.00	—	372.55	—	372.55	447.55
Саратовская область	105.0	72.00	17.00	—	89.00	194.00
Ставропольский край	581.04	—	—	—	—	581.04
Свердловская область	37.90	—	—	—	—	37.90
Ульяновская область	85.40	—	—	—	—	85.40
Республика Дагестан	15.00	156.36	—	49.80	206.16	221.16
Итого	4234.50	1870.54	2589.79	96.00	4556.33	8790.83
В том числе по ОЭС:						
Юга	2776.50	484.2	1696.77	46.2	2227.17	5003.67
Средней Волги	374.40	72	738.55	0	810.55	1184.95
Сибири	180.20	1157.98	0	0	1157.98	1338.18
Урала	407.90	0	154.47	0	154.47	562.37
Северо-Запада	275.40	0	0	0	0	275.40

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ВЫБРОСЫ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Развитие возобновляемой энергетики в России рассматривается как одно из важных средств достижения целей декарбонизации отечественной экономики [35]. Практический интерес представляет дезагрегирование ее на регионы. Это позволит учесть региональные особенности ресурсов ВИЭ и структуры электрогенерации. Также появятся возможности для корректной оценки влияния развития возобновляемой энергетики

на экономические показатели регионов, в том числе через сокращение объемов платы за выбросы парниковых газов. Ожидаемый существенный рост темпов ввода мощностей и объемов выработки электроэнергии на основе использования солнечной и ветровой энергии обуславливает целесообразность оценки вклада электростанций на основе ВИЭ в снижение выбросов CO₂.

По данным Росстата, в 2022 г. солнечными электростанциями было произведено 2556 ГВт · ч электроэнергии, а ветровыми электростанциями – 5548 ГВт · ч, в сумме 8104 ГВт · ч (табл. 3). Это со-

Таблица 3. Планируемый прирост производства электроэнергии на СЭС и ВЭС по регионам России до 2028 г., ГВт · ч/год

Регион	Производство в 2022 г.	Прирост в 2023–2028 гг.	Производство в 2028 г.
<i>Солнечные электростанции</i>			
Центр	0	0	0
Северо-Запад	0	0	0
Юг	1333	954	2287
Поволжье	750	95	845
Урал	0	0	0
Сибирь	218	1825	2043
Дальний Восток	255	0	255
Всего	2556	2874	5430
<i>Ветровые электростанции</i>			
Центр	0	0	0
Северо-Запад	53	0	53
Юг	5290	6925	12215
Поволжье	187	2410	2597
Урал	0	609	609
Сибирь	0	0	0
Дальний Восток	18	0	18
Всего	5548	9944	15492
<i>Солнечные и ветровые электростанции (в сумме)</i>			
Северо-Запад	53	0	53
Юг	6623	7879	14502
Поволжье	937	2505	3442
Урал	0	609	609
Сибирь	218	1825	2043
Дальний Восток	273	0	273
Всего	8104	12818	20922

ставило 0.69% суммарного производства электроэнергии в России в 2022 г. Следует отметить, что выработка электроэнергии микроустановками на базе ВИЭ для собственных нужд в статистической отчетности не включается.

Наибольшее развитие возобновляемая энергетика на базе ВИЭ получила в южных регионах России. На них в 2022 г. приходилось 52.1% выработки СЭС и 95.4% выработки ВЭС. Основная часть СЭС и ВЭС эксплуатируется в составе Единой энергетической системы (ЕЭС) России. По данным Системного оператора (СО) ЕЭС, в 2022 г. ими было произведено 5875 ТВт · ч электроэнергии, в том числе на СЭС 2254 и на ВЭС 3621 ТВт · ч [36].

Согласно планам развития электроэнергетики России, к 2028 г. производство электроэнергии на СЭС и ВЭС должно удвоиться и достичь 20922 ТВт · ч/год. Приrostы выработки электроэнергии на СЭС должны составить 2874 ТВт · ч/год, а на ВЭС – 9944 ТВт · ч/год (см. табл. 3). Лидиру-

ющими в развитии возобновляемой энергетики будут оставаться южные регионы страны.

Оценки экономии топлива и сокращения выбросов CO₂ в результате дополнительных вводов СЭС и ВЭС были получены на основе данных Росстата по удельным расходам топлива и удельным выбросам CO₂ замещаемыми тепловыми электростанциями в районах развития возобновляемой энергетики (табл. 4). Региональные различия в показателях ТЭС обусловлены, прежде всего, структурой потребляемых топлив (табл. 5), а также составом основного оборудования, его состоянием и режимами работы. В Сибири и на Дальнем Востоке преобладающим топливом на ТЭС является уголь. На сибирских ТЭС его доля в топливной структуре превышает 84%. В европейской части страны превалирующим топливом на ТЭС является природный газ. В южных регионах его доля достигает 96%, а в Поволжье превы-

Таблица 4. Удельные расходы топлива на отпущенную электроэнергию и удельные выбросы CO₂ на ТЭС по регионам России

Регион	Удельный расход топлива, МДж/(кВт · ч)	Удельные выбросы CO ₂ , т/(ГВт · ч)
Центр	7.81	578
Северо-Запад	7.96	487
Юг	9.19	493
Поволжье	7.96	428
Урал	8.91	561
Сибирь	10.19	872
Дальний Восток	11.36	872

Таблица 5. Структура потребляемых топлив на ТЭС по регионам России, %

Регион	Природный газ	Жидкие топлива	Уголь	Прочие топлива	Всего
Центр	92.2	0.2	3.1	4.5	100.0
Северо-Запад	86.1	0.2	3.3	10.4	100.0
Юг	96.0	0.2	3.5	0.3	100.0
Поволжье	98.8	0.6	0.1	0.5	100.0
Урал	83.2	0.4	14.0	2.4	100.0
Сибирь	13.1	0.4	84.5	2.0	100.0
Дальний Восток	33.7	1.5	64.8	0.0	100.0

шает 98%. Дальневосточные ТЭС характеризуются использованием устаревшего оборудования.

В результате развития солнечной и ветровой энергетики суммарная ежегодная экономия топлива к 2028 г. составит более 190 ПДж (табл. 6). При этом выбросы CO₂ будут сокращены на 11 Mt/год, или примерно на 1.9% их выброса всеми ТЭС страны в 2022 г. Основные эффекты от вводов СЭС и ВЭС ожидаются в южных регионах страны. В 2028 г. на них в совокупности придется около 70% экономии топлива и 65% сокращения выбросов CO₂.

КЛЮЧЕВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ДАЛЬНЕЙШЕГО УВЕЛИЧЕНИЯ ДОЛИ ВЫРАБОТКИ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ВИЭ В ЕЭС

Несмотря на значительный объем введенных объектов генерации на основе ВИЭ, суммарная выработка ими электроэнергии в 2022 г. составила 8.6 ТВт · ч, что не превышает 0.74% общего производства электроэнергии в России. Для достижения целевого показателя 6%, предусмотренного распоряжением Правительства РФ от 2009 г., необходимо после 2028 г. ввести в эксплуатацию дополнительно от 16 до 25 ГВт мощностей возобновляемой энергетики в зависимости от соотношения вводов СЭС, ВЭС и мГЭС. С учетом

уже накопленного опыта наиболее серьезной проблемой при этом станут ограничения со стороны сетевой инфраструктуры, проявившиеся уже сегодня в нескольких регионах страны.

В этой связи при формировании новых программ поддержки развития возобновляемой энергетики в России следует до объявления конкурсов на реализацию проектов в конкретных регионах и объединенных энергосистемах определять и предоставлять участникам отборов информацию о предельных объемах электроэнергии и мощности, которые целесообразно обеспечивать генерацией на основе ВИЭ, с указанием оптимальных точек присоединения объектов возобновляемой энергетики к электрическим сетям.

Кроме того, нужно стимулировать:

строительство объектов генерации поблизости от крупных потребителей или непосредственно на их территории, что будет способствовать снижению нагрузки на сетевую инфраструктуру;

частные домохозяйства и малые предприятия к развитию собственной генерации на ВИЭ с установкой аккумуляторов электроэнергии в целях снижения потребления электроэнергии из сети, что также позволит снизить нагрузку на сетевую инфраструктуру в утренние и вечерние часы потребления;

Таблица 6. Экономия топлива и снижение выбросов CO₂ к 2028 г. в результате использования СЭС и ВЭС

Регион	Экономия топлива, ПДж/год	Снижение выбросов CO ₂ , Мт/год
<i>Солнечные электростанции</i>		
Центр	0	0
Северо-Запад	0	0
Юг	21.0	1.13
Поволжье	6.7	0.36
Урал	0.0	0.00
Сибирь	20.8	1.78
Дальний Восток	2.9	0.22
Всего	51.4	3.49
<i>Ветровые электростанции</i>		
Центр	0	0
Северо-Запад	0.4	0.03
Юг	112.3	6.02
Поволжье	20.7	1.11
Урал	5.4	0.34
Сибирь	0.0	0.00
Дальний Восток	0.2	0.02
Всего	139.0	7.52
<i>Солнечные и ветровые электростанции (в сумме)</i>		
Центр	0	0
Северо-Запад	0.4	0.03
Юг	133.3	7.15
Поволжье	27.4	1.47
Урал	5.4	0.34
Сибирь	20.8	1.78
Дальний Восток	3.1	0.24
Всего	190.4	11.01

ночное потребление электроэнергии благодаря использованию накопителей электроэнергии, в том числе электромобилей.

Для реализации указанных задач необходимо интенсифицировать исследования и работы по следующим направлениям:

разработка расчетных моделей энергосистем для определения оптимальных объемов и мест размещения объектов ВИЭ в энергосистемах страны;

создание усовершенствованных автоматизированных систем управления объектами генерации для более эффективной интеграции объектов ВИЭ в энергосистемы с минимальным использованием дорогостоящих устройств защиты и противоаварийной автоматики;

разработка нового электротехнического оборудования и автоматизированных систем управления для потребителей, обеспечивающих возможность их электропитания от нескольких источников

электроэнергии, в том числе от объектов возобновляемой энергетики с использованием различных систем накопления электроэнергии, включая аккумуляторные батареи электромобилей;

реализация проектов в области аккумулирования электрической энергии и накопление опыта применения сетевых накопителей электрической энергии для снижения нагрузки на регулирующие мощности СО ЕЭС и формирование более предсказуемых графиков выработки энергии объектами возобновляемой энергетики.

ВЫВОДЫ

1. Развитие возобновляемой энергетики в России происходит в основном благодаря конкурсным отборам мощности для ВИЭ. Наиболее успешно СЭС и ВЭС внедряются в южных регионах страны.

2. Развитие солнечной и ветровой энергетики позволит к 2028 г. ежегодно экономить более 190 ПДж органических топлив и сокращать эмиссию диоксида углерода на 11 Mt/год, или примерно на 1.9% его суммарных выбросов всеми ТЭС страны в 2022 г.

3. Выбор регионов размещения сетевых объектов возобновляемой энергетики определяется главным образом располагаемым энергетическим потенциалом ВИЭ. Однако уже сегодня на выбор мест размещения таких объектов накладывает ограничения доступность сетевой инфраструктуры. При этом регионы, в которых имеются технические возможности присоединения дополнительных объемов ВИЭ, остаются невостребованными из-за особенностей существующего механизма поддержки ВИЭ.

4. Уже сейчас можно отметить некоторый перекос в строительстве мощностей на основе ВИЭ. Из-за их концентрации в регионах с невысоким потреблением энергии требуется строительство новых линий электропередачи для обеспечения перетоков в другие энергосистемы. Могут потребоваться дополнительные меры стимулирования строительства мощностей в регионах с относительно низким качеством ресурсов ВИЭ (с низкой среднегодовой инсоляцией и скоростью ветра), но с высоким потреблением электрической энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **REN21. 2023. Renewables 2023 Global Status Report Collection, Renewables in Energy Supply.** (Paris: REN21 Secretariat.) ISBN 978-3-948393-08-3.
2. **Подходы к формированию прогнозов развития ТЭК России как составной части сценариев декарбонизации экономики страны / С.П. Филиппов, Ф.В. Веселов, А.В. Кейко, А.А. Хоршев // Проблемы прогнозирования. 2023. Т. 201. № 6. С. 67–78.**
<https://doi.org/10.47711/0868-6351-201-67-78>
3. **Using a new USA multi-region input output (MRIO) model for assessing economic and energy impacts of wind energy expansion in USA / Futi Faturay, Venkata Sai Gargeya Vunnava, Manfred Lenzen, Shweta Singh // Appl. Energy. 2020. V. 26. P. 114141.**
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114141>
4. **Cho Yonghee, Shaygan Amir, Daim Tugrul U. Energy technology adoption: Case of solar photovoltaic in the Pacific Northwest USA // Sustainable Energy Technol. Assess. 2019. V. 34. P. 187–199.**
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.05.011>
5. **Comparative analysis of drivers of energy consumption in China, the USA and India – A perspective from stratified heterogeneity / Qiang Wang, Xue-ting Jiang, Xue Yang, Shuteng Ge // Sci. Total Environ. 2020. V. 698. P. 134117.**
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134117>
6. **Brummer V. Community energy – benefits and barriers: A comparative literature review of Community Energy in the UK, Germany and the USA, the benefits it provides for society and the barriers it faces // Renewable Sustainable Energy Rev. 2018. V. 94. P. 187–196.**
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134117>
7. **Fikru M.G. Electricity bill savings and the role of energy efficiency improvements: A case study of residential solar adopters in the USA // Renewable Sustainable Energy Rev. 2019. V. 106. P. 124–132.**
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.028>
8. **Lux B., Pfluger B. A supply curve of electricity-based hydrogen in a decarbonized European energy system in 2050 // Appl. Energy. 2020. V. 269. P. 115011.**
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115011>
9. **Rodríguez-Caballero C.V., Ventosa-Santaulària D. Energy-growth long-term relationship under structural breaks. Evidence from Canada, 17 Latin American economies and the USA // Energy Econ. 2017. V. 61. P. 121–134.**
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.10.026>
10. **Amro M. Elshurafa, David A. Hobbs, Hind M. Farag. Blind spots in energy transition policy: Case studies from Germany and USA // Energy Rep. 2019. V. 5. P. 20–28.**
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.11.001>
11. **Филиппов С.П. Экономические характеристики технологий улавливания и захоронения диоксида углерода (обзор) // Теплоэнергетика. 2022. № 10. С. 17–31.**
<https://doi.org/10.56304/S0040363622100022>
12. **Филиппов С.П., Жданеев О.В. Возможности использования технологий улавливания и захоронения диоксида углерода при декарбонизации мировой экономики (обзор) // Теплоэнергетика. 2022. № 9. С. 5–21.**
<https://doi.org/10.56304/S0040363622090016>
13. **Эксергетический анализ новых термодинамических циклов с улавливанием оксидов углерода / А.С. Косой, А.А. Косой, О.С. Попель, Ю.А. Зейгарник, М.В. Синкевич, С.П. Филиппов // Теплоэнергетика. 2023. № 7. С. 29–50.**
<https://doi.org/10.56304/S0040363623070032>
14. **Lowitsch J., Hoicka C.E., van Tulder F.J. Renewable energy communities under the 2019 European Clean Energy Package – Governance model for the energy clusters of the future? // Renewable Sustainable Energy Rev. 2020. V. 122. P. 109489.**
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109489>
15. **Comparison of two residential Smart Grid pilots in the Netherlands and in the USA, focusing on energy performance and user experiences / U. Obinna, P. Joore, L. Wauben, A. Reinders // Appl. Energy. 2017. V. 191. P. 264–275.**
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.086>
16. **Chen Y., Strothers M., Benigni A. All-day coordinated optimal scheduling in distribution grids with PV penetra-**

- tion // Electr. Power Syst. Res. 2018. V. 164. P. 112–122.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.07.028>
17. **Gomes I.S.F., Perez Y., Suomalainen E.** Coupling small batteries and PV generation: A review // Renewable Sustainable Energy Rev. 2020. V. 126. P.109835.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109835>
 18. **Economic** evaluation of a PV combined energy storage charging station based on cost estimation of second-use batteries / Xiaojuan Han, Yubo Liang, Yaoyao Ai, Jianlin Li // Energy. 2018. V. 165. Part A. P. 326–339.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.022>
 19. **Parra D., Walker G.S., Gillott M.** Are batteries the optimum PV-coupled energy storage for dwellings? Techno-economic comparison with hot water tanks in the UK // Energy Build. 2016. V. 116. P. 614–621.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.039>
 20. **Impact** of PV and variable prices on optimal system sizing for heat pumps and thermal storage / D. Fischer, K. Byskov Lindberg, H. Madani, C. Wittwer // Energy Build. 2016. V. 128. P. 723–733.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.008>
 21. **Zero** energy level and economic potential of small-scale building-integrated PV with different heating systems in Nordic conditions / Janne Hirvonen, Genku Kayo, Ala Hasan, Kai Sirén // Appl. Energy. 2016. V. 167. P. 255–269.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.037>
 22. **Филиппов С.П., Дильман М.Д.** Возобновляемая энергетика: системные эффекты // Матер. 12-й Междунар. конф. “Управление развитием крупномасштабных систем”. MLSD’2019. Москва, ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова, 1–3 окт. 2019 г. / под ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна, С. 38–45.
https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41727613_10014779.pdf
 23. **Федеральный** закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ “Об электроэнергетике”.
 24. **Об основных** направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2035 года: Распоряжение Правительства РФ от 08.01.2009 № 1-р.
 25. **Об утверждении** Правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности: Постановление Правительства РФ от 27.12.2010 № 1172.
 26. **О функционировании** розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии (вместе с “Основными положениями функционирования розничных рынков электрической энергии”, “Правилами полного и (или) частичного ограничения режима потребления электриче-
- ской энергии”): Постановление Правительства РФ от 04.05.2012 № 442 (ред. от 03.05.2024).
27. **О механизме** стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности (вместе с “Правилами определения цены на мощность генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии”): Постановление Правительства РФ от 28.05.2013 № 449 (ред. от 03.05.2024).
 28. **О квалификации** генерирующего объекта, функционирующего на основе использования возобновляемых источников энергии”: Постановление Правительства РФ от 03.06.2008 № 426 (ред. от 13.09.2023).
 29. **О некоторых** вопросах, связанных с сертификацией объемов электрической энергии, производимой на функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии квалифицированных генерирующих объектах (вместе с “Правилами ведения реестра выдачи и погашения сертификатов, подтверждающих объем производства электрической энергии на функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии квалифицированных генерирующих объектах”): Постановление Правительства РФ от 17.02.2014 № 117 (ред. от 12.07.2021).
 30. **О ценообразовании** в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике (вместе с “Основами ценообразования в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике”, “Правилами государственного регулирования (пересмотра, применения) цен (тарифов) в электроэнергетике”): Постановление Правительства РФ от 29.12.2011 № 1178 (ред. от 03.05.2024).
 31. **Возобновляемая** энергетика в России и в мире: докл. М.: РЭА Минэнерго России, 2022.
<https://rosenergo.gov.ru/press-center/news/vozobnovlyayemaya-energetika-v-rossii-i-mire/>
 32. **Ветрогенераторы** – энергия будущего. Сайт компании DAMPES. <https://dampes.ru>
 33. **Salloom A.H., Abdulrazzaq O.A., Ismail B.H.** Assessment of the performance of bifacial solar panels // Int. J. Eng. Techn. (IJETR). 2018. V. 8. Is. 7. P. 13–17.
https://www.erppublication.org/published_page/IJETR2634.pdf
 34. **Попель О.С., Тарасенко А.Б.** Современные тенденции развития фотоэлектрической энергетики (обзор) // Теплоэнергетика. 2011. № 11. С. 5–25.
<https://doi.org/10.1134/S0040363621100039>
 35. **Филиппов С.П.** Переход к углеродно-нейтральной экономике: возможности и пределы, актуальные задачи // Теплоэнергетика. 2024. № 1. С. 21–40.
<https://doi.org/10.56304/S004036362401003X>
 36. **Системный** оператор Единой энергетической системы. Russian Power System Operator.
<https://www.so-ups.ru>.

Renewable Energy Sources: Contribution to Decarbonization of Russian Energy

M. A. Arapov^{a, b}, O. S. Popel^{b, *}, A. B. Tarasenko^b, and S. P. Filippov^c

^a *OOO Unigrin Engineering, Moscow, 117342 Russia*

^b *Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia*

^c *Energy Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117186 Russia*

*e-mail: o_popel@mail.ru

Abstract—The role of solar and wind energy in the current processes of decarbonization of the Russian electric power industry is considered. The issues of the formation and further development of renewable energy, which can make up a significant share of the country's energy balance thanks to the legislation introduced to stimulate its implementation, are discussed. The rates of commissioning of renewable energy-generation facilities (hereinafter referred to as renewable generation) by region are analyzed, and trends towards reducing capital expenditures in the construction of both solar and wind grid power plants are assessed. An important feature of renewable generation is its stochastic nature, which can cause certain problems when transmitting energy to electrical networks and requires the adoption of special measures to increase the share of renewable energy sources in electrical networks and additional costs to ensure it. Abroad, where a significantly greater path has been taken in the development of the industry, the introduction of grid energy-storage devices, methods for converting surplus energy generated by renewable sources into various useful products and other measures are widely discussed as such measures. In Russia, the overall share of RES in the energy balance is still quite small, but it has already reached threshold values in some regions, at which several pilot projects are being implemented using electric energy-storage devices in both network and autonomous systems. The article provides estimates of the contribution of grid solar and wind power plants to replacing energy from traditional sources and reducing greenhouse gas emissions, and examines the problems and prospects for further development of the industry, primarily from the point of view of the need to reconstruct the grid infrastructure.

Keywords: renewable energy, solar and wind energy, decarbonization, carbon emissions, grid infrastructure