

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВЫХ И СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ, КОГЕНЕРАЦИИ И ДОЛИ УГЛЯ В ТОПЛИВНОМ БАЛАНСЕ НА СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

© 2023 г. С. С. Белобородов^а, *, Е. Г. Гашо^б, **

^аНП “Энергоэффективный город”, Семеновская наб., д. 2/1, стр. 1, оф. 311, Москва, 195094 Россия

^бНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

*e-mail: enefgorod@gmail.com

**e-mail: gashoyg@mpei.ru

Поступила в редакцию 26.01.2023 г.

После доработки 27.03.2023 г.

Принята к публикации 30.03.2023 г.

Энергопереход на “зеленый” водород планируется осуществить путем широкомасштабного использования энергии ветра. Требуемая для этого площадь ветропарков может достигать 38.5% территории Европейского союза. В научной литературе отмечается, что применение ветровых турбин для удовлетворения 10% мирового спроса на энергию к 2100 г. может привести к потеплению поверхности суши более чем на 1°C. Изменение температуры наблюдается сразу после ввода ветропарков в эксплуатацию, в то время как климатическая выгода от снижения выбросов парниковых газов является вопросом будущего. В настоящее время не принимается во внимание влияние ветровых и солнечных электростанций (ВЭС и СЭС) на рост выбросов парниковых газов в результате изменения структуры и режимов загрузки генерирующих мощностей в энергосистеме. Цель настоящей работы – определить возможность снижения количества выбросов парниковых газов в энергосистеме путем изменения структуры топливного баланса, повышения эффективности производства электрической энергии, развития ВЭС и СЭС и рассмотреть способы ее реализации. Приведены оценки снижения парниковых газов электростанциями при изменении структуры генерирующих мощностей, а также при замене одного вида топлива на другой. Показано, что в настоящее время баланс спроса и предложения в энергосистеме, например, Германии обеспечивается благодаря экспорту электроэнергии. За период с 2000 по 2018 г. выработка ВЭС и СЭС возросла на 146 ТВт · ч, а выработка АЭС снизилась на 94 ТВт · ч, при этом экспорт электроэнергии в энергосистемы соседних стран увеличился на 52 ТВт · ч. Снижение производства электроэнергии угольными ТЭС на 69 ТВт · ч было компенсировано повышением выработки на 34 ТВт · ч тепловыми электростанциями, работающими на природном газе, и на 47 ТВт · ч электростанциями, использующими в качестве топлива биогаз, твердое и жидкое биотопливо, твердые коммунальные отходы. Результаты исследований показали, что развитие ветровых и солнечных электростанций в отсутствие накопителей энергии не может считаться эффективным способом снижения выбросов парниковых газов в энергосистеме, тем более что ВЭС и СЭС значительно проигрывают различным вариантам комбинированной выработки электроэнергии и тепла.

Ключевые слова: парниковые газы, углекислый газ, возобновляемые источники энергии, ветровые электростанции, солнечные электростанции, когенерация, парогазовые установки, режимы электрической нагрузки, энергосистема, углеродная нейтральность

DOI: 10.56304/S0040363623100016

Снижение выбросов парниковых газов в целях борьбы с изменением климата на планете является ключевым фактором, определяющим текущее развитие мировой энергетики. Рамочная Конвенция ООН об изменении климата, принятая в 1992 г., объединяет усилия более 180 стран мира, и каждая страна проводит национальную политику, направленную на предотвращение отрица-

тельных последствий выбросов парниковых газов в атмосферу.

Обязательства участников Конвенции по снижению эмиссии парниковых газов оформлены Парижским соглашением, регулирующим меры по уменьшению углекислого газа в атмосфере с 2020 г. В сентябре 2019 г. Россия присоединилась

к Парижскому соглашению, принятому сторонами Рамочной Конвенции.

Указом Президента РФ поставлена задача обеспечить к 2030 г. сокращение выбросов парниковых газов до 70% относительно уровня 1990 г. с учетом максимально возможной поглощающей способности лесов и иных экосистем и при условии устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития страны [1]. Реализация целевого (интенсивного) сценария Стратегии социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. позволит достичь не позднее 2060 г. баланса между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением [2]. В России в рамках реализации эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов планируется к 2025 г. достичь “углеродной нейтральности” на Сахалине, в результате антропогенные выбросы парниковых газов в регионе должны стать меньше или равны поглотительной способности местных экосистем [3–5].

Необходимо отметить, что Россия является одним из мировых лидеров по снижению эмиссии парниковых газов. За период с 1990 по 2020 г. совокупный антропогенный выброс парниковых газов с учетом сектора землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ) снизился на 52.0%, а без его учета – на 35.1% [6]. Для сравнения, в 2017 г. снижение совокупного антропогенного выброса парниковых газов в России с учетом ЗИЗЛХ составляло 49.3%, а без учета – 33.4%.

Удельные выбросы CO_2 при выработке электрической энергии [$\text{г CO}_2/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$] в целом по энергосистеме России в 2 раза меньше, чем в Китае, на 26% ниже, чем в США, на 30%, чем в Германии, на 41% меньше среднемировых значений и соответствуют уровню Италии, Дании и ЕС (27%) в совокупности [7, 8]. Необходимо отметить, что в настоящее время благодаря значительной доле гидроэлектростанций (ГЭС), АЭС, комбинированной выработке на ТЭЦ, а также малой доле угольной генерации в энергобалансе страны электроэнергетика России может стать одним из мировых лидеров в вопросах снижения выбросов CO_2 .

Европейский союз планирует достичь “углеродной нейтральности” к 2050 г. путем реализации стратегии развития водородной энергетики, в которой водород является новым глобальным энергоносителем [9]. В рамках водородной и новой промышленной стратегии ЕС [10] предполагается использовать в качестве накопителя электрической энергии, производимой с помощью возобновляемых источников, водород, получаемый в результате электролиза воды [11, 12]. Однако для обеспечения энергоперехода на “зеленый” водород требуемая площадь ветропарков может

достигать 38.5% всей территории Европейского союза [13].

В настоящее время в научных кругах обсуждаются вопросы влияния широкомасштабного использования энергии ветра на локальные и глобальные изменения климата. Строительство ветровых турбин для удовлетворения 10% мирового спроса на энергию к 2100 г. может привести к потеплению поверхности суши более чем на 1°C и охлаждению водной поверхности также на 1°C при размещении установок в море [14]. Воздействие на климат происходит сразу после ввода ветропарков в эксплуатацию, в то время как положительный результат от снижения выбросов парниковых газов будет очевиден в будущем [14–16]. Таким образом, оценка влияния ВЭС и СЭС на снижение эмиссии парниковых газов в энергосистеме является актуальной задачей.

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ США И ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА

Снижение выбросов углекислого газа может быть достигнуто вследствие изменения структуры топливного баланса, повышения эффективности производства электрической энергии и тепла, роста доли комбинированной выработки электрической энергии и тепла, развития ВЭС и СЭС. В энергосистеме США доля угольной генерации снизилась с 49.6% в 2005 г. до 23.4% в 2019 г. (рис. 1, а) [17].

За этот период времени доля выработки электроэнергии на электростанциях, использующих в качестве топлива природный газ, выросла с 18.8 до 38.4%. Доля ВЭС в балансе электрической энергии в 2019 г. составила 7.1%, а СЭС – 1.7%. Снижение производства электрической энергии на угольных станциях было компенсировано в основном увеличением ее производства на электростанциях, работающих на газе.

В энергосистеме Европейского союза доля угольной генерации снизилась с 39.29% в 1990 г. до 20.55% в 2017 г. (рис. 1, б) [18].

Наиболее существенно снижается доля электростанций, на которых в качестве топлива применяется каменный уголь, импортируемый в страны ЕС. Бурый уголь дешевле каменного, он добывается местными компаниями на территории стран Европейского союза. Необходимо отметить, что удельные выбросы углекислого газа на $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ электроэнергии при сжигании бурого угля выше, чем при сжигании каменного. За рассматриваемый период времени доля выработки электроэнергии на электростанциях, использующих в качестве топлива природный газ, выросла с 7.42 до 20.14%.

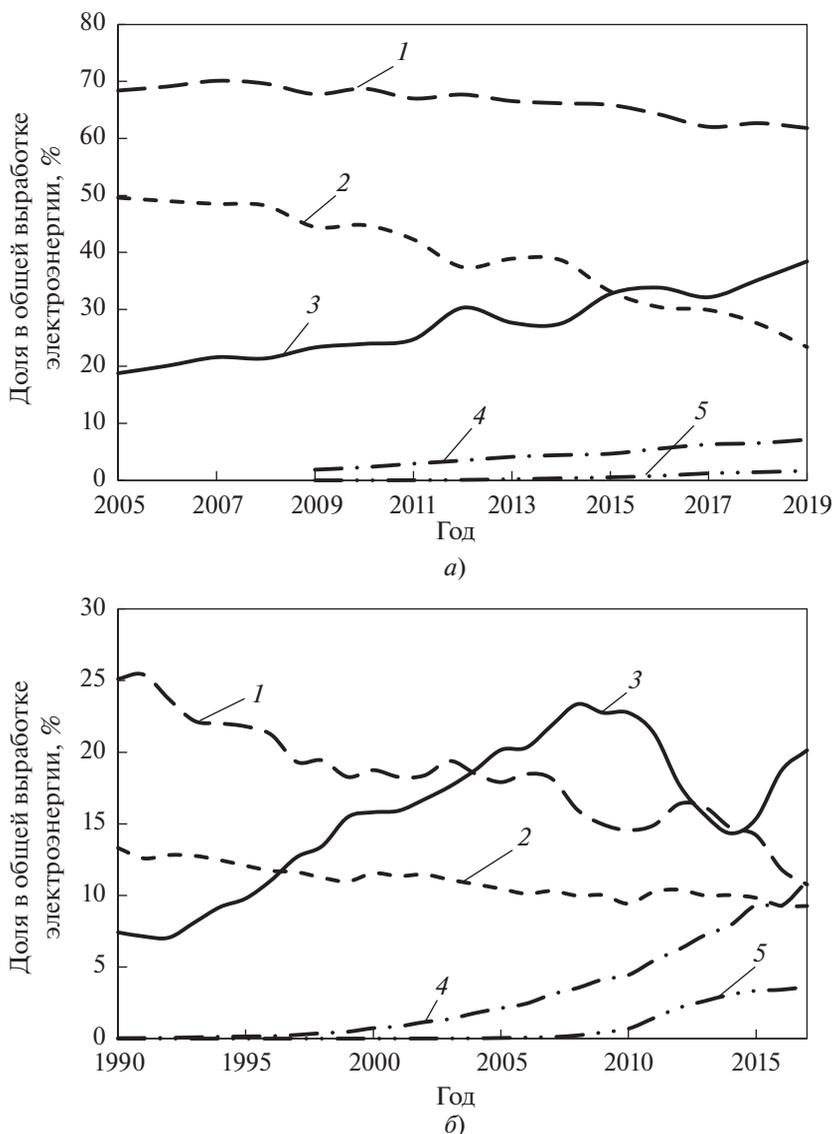


Рис. 1. Выработка электрической энергии в США (а) и странах Европейского союза (б).
Источник энергии: 1 – уголь и природный газ; 2 – уголь; 3 – природный газ; 4 – ветер; 5 – солнце

ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА КОНДЕНСАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Активное развитие ВЭС и СЭС оказывает влияние на режимы загрузки всех электростанций в энергосистеме, так как объем производства электроэнергии ветровыми и солнечными установками является переменным и трудно прогнозируемым [19, 20]. Но можно оценить, как снижаются выбросы парниковых газов в энергосистеме при изменении структуры топливного баланса, повышении эффективности производства электрической энергии, развитии ВЭС и СЭС.

Для определения количества выбросов парниковых газов при сжигании природного газа и угля

используются расчетные коэффициенты перевода в энергетические единицы и коэффициенты выбросов диоксида углерода ($t\ CO_2/TДж$), представленные в национальном докладе о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2020 г. [6]. Разработанный в российском кадастре национальный коэффициент выбросов CO_2 в результате сжигания природного газа включен в базу коэффициентов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) и рекомендован для расчета количества выбросов при операциях с российским природным газом.

Коэффициенты выбросов диоксида углерода в пересчете на условное топливо составляют

Таблица 1. Удельные выбросы парниковых газов по типам электростанций, работающих в конденсационном режиме

Тип станции	Источник энергии	КПД ТЭС, %	Доля в выработке электроэнергии, %		Удельные выбросы CO ₂ , г CO ₂ /(кВт · ч)
			АЭС, ВЭС, СЭС	ТЭС	
ПСУ	Уголь	35	–	100	968.9
ПСУ	Газ	35	–	100	559.4
ПГУ	Газ	55	–	100	356.0
АЭС	Ядерное топливо	–	100	–	0
ВЭС + ГТУ	Ветер/газ	35	23	77	430.7
СЭС + ГТУ	Солнце/газ	35	13	87	486.7

около 1.594 г CO₂/г у.т. для природного газа и 2.761 г CO₂/г у.т. для угля [21].

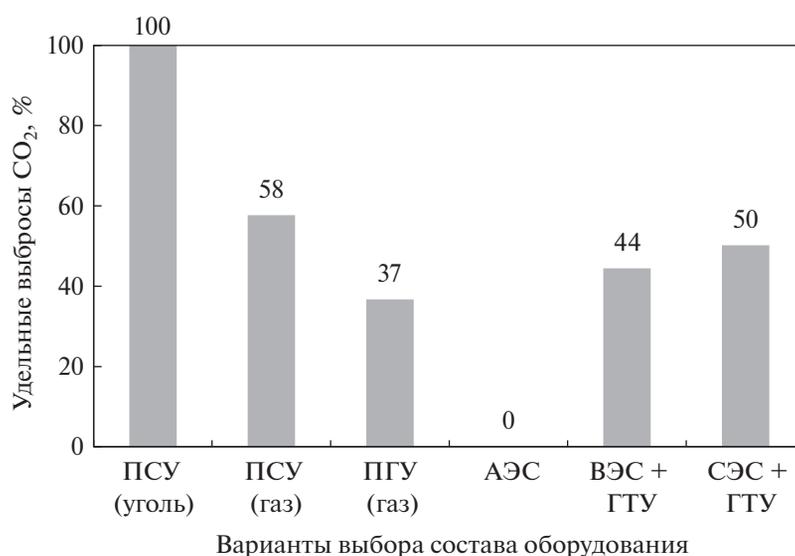
Объемы электроэнергии, вырабатываемой паросиловыми установками (ПСУ), парогазовыми установками (ПГУ) и АЭС, являются предсказуемыми показателями. Гарантированная выработка электроэнергии в отсутствие накопителей энергии может быть обеспечена совместной работой ветровых и солнечных электростанций с маневренными газотурбинными установками (ГТУ). В энергосистеме Европейского союза в 2018 г. коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) ВЭС составил 23.2%, а КИУМ СЭС – 12.6% [18]. В табл. 1 представлены результаты расчетов удельных выбросов парниковых газов по электростанциям разных типов, работающих в конденсационном режиме в базовой части суточного графика нагрузок.

При замещении угольной ПСУ газовой ПГУ удельные выбросы CO₂ будут ниже, чем при вариантах замены на ВЭС + ГТУ и СЭС + ГТУ.

Представленные результаты расчетов необходимо рассматривать как оптимистичные. С учетом снижения КПД газовых турбин при работе на частичных нагрузках удельные выбросы парниковых газов для вариантов ВЭС + ГТУ и СЭС + ГТУ будут выше указанных в табл. 1 значений. Так, при снижении КПД ГТУ до 30% удельные выбросы составят 502.5 г CO₂/(кВт · ч) для ВЭС + ГТУ и 567.8 г CO₂/(кВт · ч) для СЭС + ГТУ. Таким образом, вариант СЭС + ГТУ будет уступать по эффективности газовой ПСУ.

На рис. 2 приведены результаты расчета относительных удельных выбросов парниковых газов для вариантов с разной структурой генерирующих мощностей. Эмиссия парниковых газов конденсационной угольной паросиловой установкой принята за 100%.

Выбросы парниковых газов при работе ПГУ в конденсационном режиме составляют 37% варианта угольной ПСУ. Замена угля на природный газ без повышения топливной эффективности

**Рис. 2.** Удельные выбросы парниковых газов по типам электростанций, работающих в конденсационном режиме

электростанции позволяет уменьшить выбросы парниковых газов на 42%, а повышение КПД с 35 до 55% дает дополнительно снижение выбросов CO₂ на 21%.

Удельные выбросы для вариантов ВЭС + ГТУ и СЭС + ГТУ на 7 и 13% соответственно превышают выбросы для варианта ПГУ. При замещении в энергобалансе электроэнергии, произведенной на АЭС, на выработанную на ВЭС и СЭС с учетом необходимой пиковой генерации эмиссия CO₂ существенно возрастает. Таким образом, основной эффект в снижении эмиссии парниковых газов дает замена в топливном балансе угля на природный газ. Внедрение ВЭС и СЭС при отсутствии накопителей энергии приводит к худшим результатам в снижении выбросов CO₂, чем внедрение ПГУ.

КОМБИНИРОВАННАЯ И РАЗДЕЛЬНАЯ ВЫРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ТЕПЛА

Представляет интерес проанализировать опыт Европейского союза, касающийся влияния развития ВЭС и СЭС на работу ТЭЦ в комбинированном режиме. При комбинированной выработке тепловой и электрической энергии ТЭЦ наряду с атомными электростанциями, тепловыми электростанциями, сжигающими твердые коммунальные отходы, гидроэлектростанциями без регулируемого стока покрывают базовую часть суточного графика потребления электрической энергии, тогда как ветрогенерация снижает объем базовой выработки в энергосистеме [22].

Развитие ВЭС и СЭС оказывает влияние на объем комбинированной выработки электроэнергии в энергосистеме. Например, за период с 2010 по 2018 г. доля комбинированной выработки электроэнергии снизилась в энергосистеме Дании с 49.2 до 37.6%, в энергосистеме Швеции с 12.5 до 5.6%, а в энергосистеме Финляндии с 36.2 до 32.5%. За этот же период доля комбинированной выработки электроэнергии в энергосистеме Германии сохранялась примерно на одном уровне (выросла с 13.2 до 13.8%), в то время как доля выработанной на АЭС электроэнергии в энергобалансе сократилась с 22.3 до 11.8% [18].

На рис. 3 представлены результаты расчета относительных совокупных выбросов парниковых газов для вариантов с разным набором генерирующего оборудования, работающего в режимах как комбинированного, так и раздельного производства электроэнергии и тепла. Сравнение вариантов проводилось при условии одинакового объема выработки электрической и тепловой энергии. Их соотношение для ПГУ-ТЭЦ использовано в качестве базового варианта. Также приняты следующие допущения: коэффициент использования тепла топлива источников комбинированной выработки равнялся 80%; КПД выработки тепла водогрейными котлами (ВК) составил 94%. Эмиссия парниковых газов при раздельной выработке электрической энергии и тепла угольной ПСУ и ВК принята за 100%.

Выбросы парниковых газов при раздельном производстве электрической энергии и тепла ПГУ + ВК составляют 40% варианта угольной ПСУ + ВК. При замене угля на природный газ

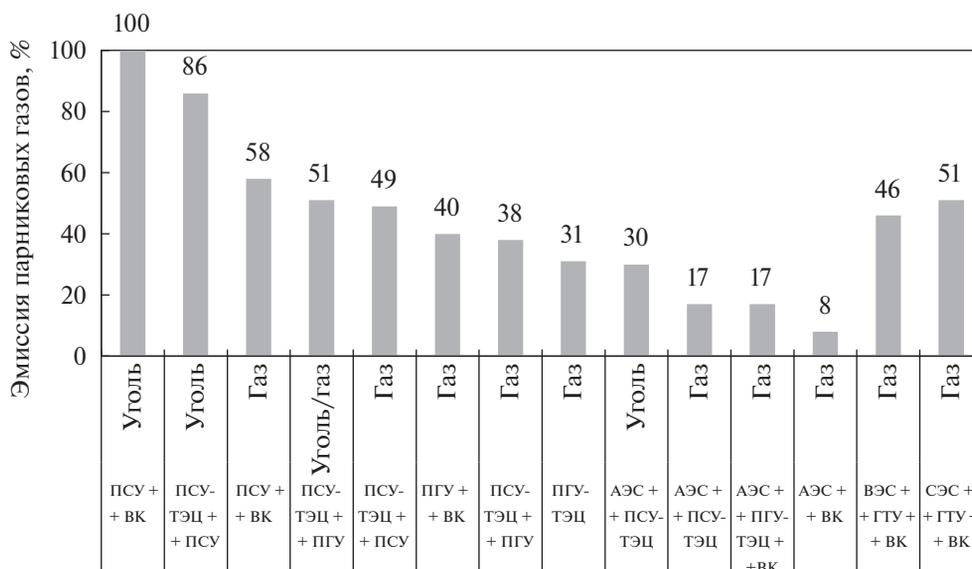


Рис. 3. Выбросы парниковых газов при одинаковом объеме выработки электрической энергии и тепла в базовом режиме по типам генерирующего оборудования, работающего как в комбинированном, так и в раздельном режиме

без повышения топливной эффективности электростанции выбросы парниковых газов уменьшаются на 42%, а при повышении КПД ПГУ с 35 до 55% – еще на 18%. Для вариантов ВЭС + ГТУ + ВК и СЭС + ГТУ + ВК удельные выбросы увеличиваются на 6 и 11% соответственно относительно варианта ПГУ + ВК.

Выбросы парниковых газов при комбинированном производстве электрической энергии и тепла ПГУ-ТЭЦ составляют 31% количества, образующегося в варианте угольной ПСУ + ВК, что на 9% меньше, чем в варианте ПГУ + ВК. Удельные выбросы для вариантов ВЭС + ГТУ + ВК и СЭС + ГТУ + ВК на 15 и 21% соответственно превышают выбросы CO₂ от ПГУ-ТЭЦ.

Варианты АЭС + ПСУ-ТЭЦ (газ) и АЭС + ПГУ-ТЭЦ + ВК, при которых осуществляется выработка электрической и тепловой энергии в базовом режиме, имеют практически одинаковые относительные совокупные выбросы парниковых газов, равные примерно 17%.

Представленные результаты расчетов необходимо рассматривать как оптимистичные. При снижении КПД газовых турбин при работе на частичных нагрузках до 30% относительные совокупные выбросы увеличиваются до 53% для ВЭС + ГТУ + ВК и до 58% для СЭС + ГТУ + ВК. Таким образом, развитие ВЭС и СЭС в отсутствие накопителей энергии не может считаться эффективным путем снижения выбросов парниковых газов в энергосистеме, поскольку значительно проигрывает другим вариантам комбинированной выработки электроэнергии и тепла.

ВЛИЯНИЕ УСТАНОВОК НА ВИЭ НА ВЫБРОСЫ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ ГЕРМАНИИ

Германия является одним из мировых лидеров по внедрению установок на возобновляемых источниках в энергосистему. На рис. 4 представлены фактические данные по выработке электрической энергии ТЭС, а также требуемый режим загрузки ТЭС по суткам месяцев при отсутствии экспорта электроэнергии из энергосистемы Германии в соседние страны с долей ВИЭ в балансе производства электроэнергии более 50% (табл. 2) [19].

Экспорт электроэнергии из энергосистемы Германии 08.12.2018 составил 77.1% объема электроэнергии, вырабатываемой ТЭС, 08.06.2019 – 58.2%, 08.03.2019 – 45.7%. В рассматриваемые сутки производство электроэнергии превышало потребление и значительный ее объем не был востребован в энергосистеме Германии. Баланс спроса и предложения обеспечивался благодаря экспорту электроэнергии в энергосистемы сопредельных государств, а цены на электроэнергию в эти периоды принимали отрицательные

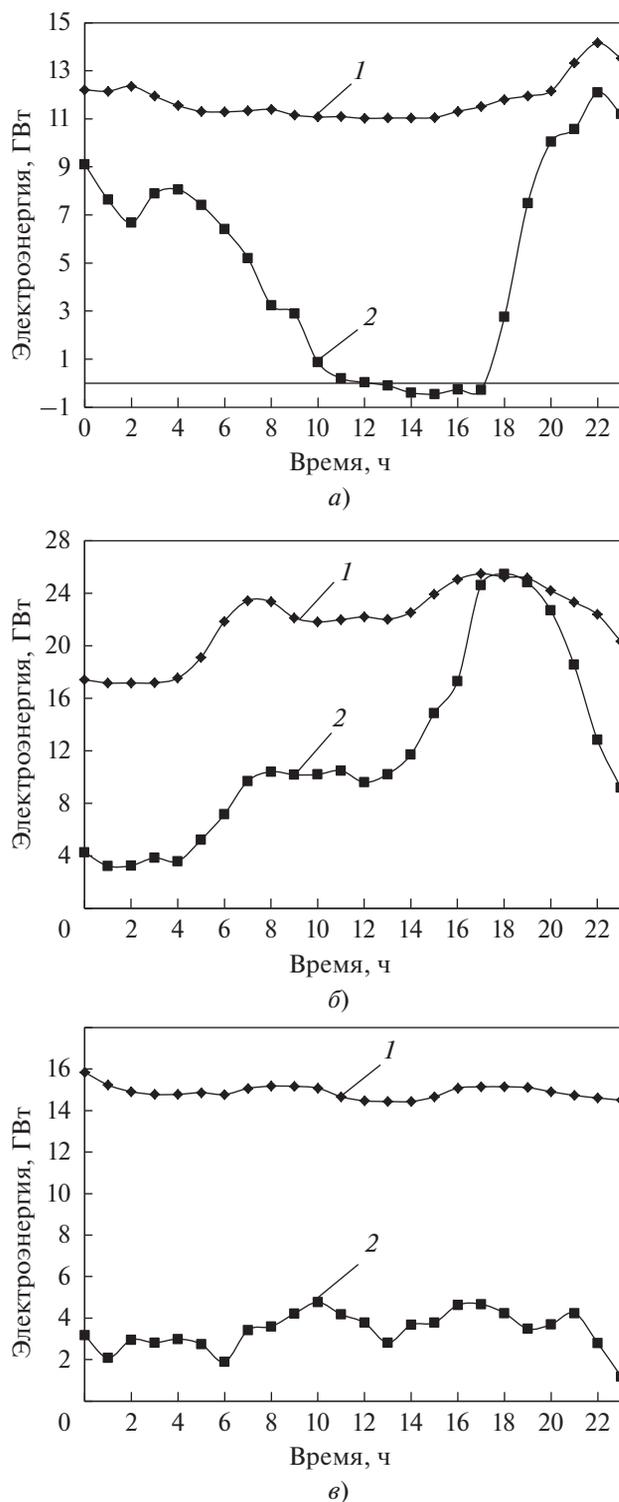


Рис. 4. Производство электроэнергии на ТЭС в энергосистеме Германии 08.06.2019 (а), 08.03.2019 (б), 08.12.2018 (в). 1 – фактический режим загрузки ТЭС; 2 – требуемый режим загрузки ТЭС при отсутствии экспорта электроэнергии

Таблица 2. Доля ВИЭ в балансе производства электроэнергии в энергосистеме Германии [23]

Дата	Доля ВИЭ в производстве электроэнергии, %			
	всего	ГЭС и электростанции, работающие на биотопливе	СЭС	ВЭС
08.06.2019	68.71	12.18	14.21	42.32
08.03.2019	57.23	9.56	4.84	42.83
08.12.2018	67.36	9.39	1.13	56.84

Таблица 3. Динамика изменения структуры и баланса производства и потребления электроэнергии в энергосистеме Германии

Показатель	Объемы выработки электроэнергии, ТВт · ч		
	2000 г.	2018 г.	изменение
Тип электростанции:			
АЭС	169.6	76.0	−93.6
ТЭС (на биотопливе) и на ВИЭ	39.7	230.9	191.2
В том числе:			
ВЭС	9.40	109.95	100.55
СЭС	0.10	45.78	45.68
ТЭС:			
на жидком и твердом биотопливе, коммунальных отходах	2.65	17.46	14.81
на биогазе	1.68	33.42	31.74
на угле	296.7	228.0	−68.7
на газе	60.0	94.2	34.2
Выработка электроэнергии, всего	576.5	640.5	64.0
Импорт-экспорт электроэнергии	3.5	−48.8	−52.3
Потребление, всего:			
с учетом ГАЭС	579.6	591.7	12.1
без учета ГАЭС	575.4	585.5	10.1

Примечание. ГАЭС – гидроаккумулирующая электростанция.

значения [19]. Гидроэлектростанции и электростанции, работающие на биотопливе, характеризуются ровным суточным графиком нагрузки, а производство ими электроэнергии хорошо прогнозируется. Следовательно, часть переменной и трудно прогнозируемой выработки ВЭС и СЭС остается не востребованной в энергосистеме Германии и направляется на экспорт.

В отсутствие экспорта электрической энергии потребовалась бы работа генерирующего оборудования ТЭС в пиковых режимах, в том числе с ежедневными пусками/остановами, что привело бы к росту выбросов парниковых газов.

Изменение структуры и баланса производства и потребления электрической энергии в энергосистеме Германии за период с 2000 по 2018 г. представлено в табл. 3 [18].

Производство электроэнергии установками на ВИЭ и электростанциями, работающими на био-

топливе, увеличилось с 39.7 ТВт · ч в 2000 г. до 230.9 ТВт · ч в 2018 г. Рост выработки ВЭС и СЭС составил 146.23 ТВт · ч, в то время как выработка АЭС уменьшилась на 93.6 ТВт · ч. Таким образом, рост выработки электроэнергии ВЭС и СЭС превысил ее снижение на АЭС на 52.6 ТВт · ч. Как было показано ранее, объем электроэнергии, выработанный ВЭС и СЭС и не потребляемый внутри энергосистемы Германии, направляется на экспорт. В 2000 г. импорт электроэнергии равнялся 3.5 ТВт · ч, а в 2018 г. ее экспорт составил 48.8 ТВт · ч, т.е. изменение объемов импорта и экспорта за рассматриваемый период составило 52.3 ТВт · ч, что практически равняется разности изменившихся объемов выработки ВЭС + СЭС и АЭС.

Снижение производства электроэнергии в 2018 г. угольными ТЭС на 68.7 ТВт · ч было компенсировано его ростом на ТЭС, работающих на природном газе, на 34.2 ТВт · ч и электростанци-

ями, используемыми в качестве топлива биогаз, твердое и жидкое биотопливо, твердые коммунальные отходы, на 46.6 ТВт · ч [18].

Таким образом, вклад ВЭС и СЭС в снижение выбросов парниковых газов в энергосистеме Германии за период с 2000 по 2018 г. не очевиден. Если бы объемы выработки электроэнергии АЭС, ВЭС и СЭС остались в 2018 г. на уровне 2000 г., то выбросы парниковых газов с учетом уменьшения экспорта практически не отличались бы от фактических. При реализации программы снижения выбросов парниковых газов путем замещения угольных ПСУ газовыми ПГУ, ПСУ-ТЭЦ или ПГУ-ТЭЦ, как было показано ранее, эффект был бы больше, чем при развитии ВЭС и СЭС без накопителей энергии.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ЕЭС РОССИИ

Основой научного подхода к проектированию развития энергетических систем являются проведение системных исследований с учетом технологических, экологических, экономических, социальных факторов [24–30], сопоставление живучести объектов электроэнергетики при различном их территориальном размещении [31–34].

В рамках борьбы с изменением климата развитие ВЭС и СЭС рассматривается как одно из приоритетных направлений снижения выбросов парниковых газов. Однако, как уже было показано на примере Германии, изменение структуры и режимов загрузки генерирующих мощностей в результате развития ВЭС и СЭС может привести не к снижению, а к росту выбросов парниковых газов. При этом широкомасштабное строительство ВЭС приводит как к локальным, так и к глобальным климатическим изменениям.

При принятии стратегических решений при проектировании развития ЕЭС России необходимо учитывать, что при активном развитии ВЭС и СЭС и подключении их к энергосистеме может произойти следующее:

изменяются режимы загрузки электростанций ЕЭС России, поэтому возникнет необходимость увеличения регулировочного диапазона генерирующего оборудования, повышения скорости изменения нагрузки внутри регулировочного диапазона, увеличения количества и снижения времени пусков/остановов генерирующего оборудования [19, 20, 22];

надежность (живучесть) систем электроснабжения будет в большей степени зависеть от перетоков электрической энергии (мощности) в ЕЭС России [29];

возрастет стоимость электроэнергии в энергосистеме [стоимость электрической энергии, вырабатываемой ВЭС и СЭС, построенными в рамках

программы стимулирования развития ВИЭ, на начало 2020 г. составляла около 30 руб/(кВт · ч)] [35];

будет оказываться негативное влияние на экологию; кроме того, в настоящее время не решены вопросы утилизации отработавшего парковый ресурс оборудования ВЭС и СЭС.

ВЫВОДЫ

1. При конденсационной выработке электроэнергии замена угольной ПСУ на ПГУ обеспечивает лучшие показатели по сравнению с вариантами замены на ВЭС + ГТУ и СЭС + ГТУ. Выбросы парниковых газов при работе угольной ПГУ составляют около 37%, что на 7 и 13% ниже по сравнению с вариантами ВЭС + ГТУ и СЭС + ГТУ. Вклад замены угля на природный газ составил 67% общего эффекта, еще 33% обеспечило повышение КПД электростанции с 35 до 55%.

2. При отдельной выработке электрической энергии и тепла замена угольных ПСУ с водогрейными котлами на комбинированную выработку ПГУ-ТЭЦ обеспечивает лучшие показатели по сравнению с вариантами замещения ВЭС + ГТУ + ВК и СЭС + ГТУ + ВК. Выбросы парниковых газов для варианта комбинированного производства электрической энергии и тепла ПГУ-ТЭЦ составили 31%, что ниже на 15 и 21% по сравнению с вариантами замещения ВЭС + ГТУ + ВК и СЭС + ГТУ + ВК соответственно. Вклад от замены угля на природный газ составил 61% общего эффекта, от замены ПСУ на ПГУ – 26%, и еще 13% получено в результате замены ПГУ + ВК на ПГУ-ТЭЦ.

3. Наилучшие показатели снижения выбросов парниковых газов у вариантов АЭС + ПСУ-ТЭЦ (газ) и АЭС + ПГУ-ТЭЦ + ВК, для которых относительные совокупные выбросы парниковых газов практически одинаковые – около 17%.

4. В настоящее время баланс спроса и предложения в энергосистеме Германии обеспечивается экспортом электроэнергии. Анализ изменения баланса производства и потребления электроэнергии за период с 2000 по 2018 г. показал, что рост выработки ВЭС и СЭС составил 146 ТВт · ч при снижении выработки АЭС на 94 ТВт · ч. Рост экспорта электроэнергии в энергосистемы соседних стран составил 52 ТВт · ч, что соответствует изменению объема выработки ВЭС, СЭС и АЭС.

5. Развитие ВЭС и СЭС с учетом изменения структуры выработки электроэнергии и объема экспорта не привело к дополнительному снижению выбросов парниковых газов в энергосистеме Германии в 2018 г. по сравнению с 2000 г. При замещении угольных ПСУ газовыми ПГУ, ПСУ-ТЭЦ или ПГУ-ТЭЦ снижение выбросов парниковых газов было бы более значительным, чем в результате развития ВЭС и СЭС без накопителей энергии.

6. Развитие ВЭС и СЭС в отсутствие накопителей энергии не является эффективным путем снижения выбросов парниковых газов в энергосистеме и значительно проигрывает вариантам комбинированной выработки электроэнергии и тепла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Указ** Президента РФ от 04.11.2020 № 666 “О сокращении выбросов парниковых газов”.
2. **Распоряжение** Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р “Об утверждении стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года”.
3. **Федеральный закон** № 34-ФЗ от 06.03.2022 “О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации”.
4. **Постановление** Правительства РФ от 05.08.2022 № 1390 “Об утверждении Правил исчисления и взимания платы за превышение квоты выбросов парниковых газов в рамках проведения эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов на территории Сахалинской области”.
5. **Постановление** Правительства РФ от 18.08.2022 № 1441 “О ставке платы за превышение квоты выбросов парниковых газов в рамках проведения эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов на территории Сахалинской области”.
6. **Национальный доклад** о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг. Ч. 1 / А.А. Романовская, А.И. Нахутин, В.А. Гинзбург, В.А. Грбар, Е.В. Имшенник, Р.Т. Карабань, В.Н. Коротков, В.Ю. Вертянкина, Т.В. Григурина, И.Л. Говор, Г.Г. Литвинчук, В.М. Лытов, П.Д. Полумиева, Н.В. Попов, А.А. Трунов, Л.А. Прохорова. М., 2022.
7. **Белобородов С.С.** Снижение эмиссии CO₂: развитие когенерации или строительство ВИЭ? // Энергосовет. 2018. № 1 (51). С. 16–25.
8. **Energy revolution: A global outlook** / L. Staffell, M. Jansen, A. Chase, E. Cotton, C. Lewis. Drax: Selby, 2018.
9. **A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.** European Commission, Brussels, 08.07.2020.
10. **A new industrial strategy for Europe: Communication from the Commission.** European Commission, Brussels, 10.03.2020.
11. **Study on energy storage – contribution to the security of the electricity supply in Europe** / C. Andrey, P. Barberi, L. Lacombe, L. van Nuffel, F. Gerard, J. Gorenstein Dedecca, K. Rademakers, Y. el Idrissi, M. Crenes. Publications office of the European Union, 2020.
12. **Mainstreaming RES: flexibility portfolios. Design of flexibility portfolios at Member State level to facilitate a cost-efficient integration of high shares of renewables** / C. Andrey, P. Attard, R. Bardet, L. Fournie, P. Khalouf. Publications office of the European Union, 2017.
13. **Белобородов С.С., Гашо Е.Г., Ненашев А.В.** Переход ЕС к водородной энергетике: потребность в ресурсах // Промышленная энергетика. 2021. № 6. С. 36–47.
14. **Wang C., Prinn R.G.** Potential climatic impacts and reliability of very large-scale wind farms // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10. No. 4. P. 2053–2061. <https://doi.org/10.5194/acp-10-2053-2010>
15. **The influence of large-scale wind power on global climate** / D.W. Keith, J.F. DeCarolis, D.C. Denkenberger, D.H. Lenschow, S.L. Malyshev, S. Pacala, P.J. Rasch // Proc. Nat. Acad. Sci. 2004. V. 101. No. 46. P. 16115–16120. <https://doi.org/10.1073/pnas.0406930101>
16. **Miller L.M., Keith D.W.** Climatic impacts of wind power // Joule. 2018. V. 2. No. 12. P. 2618–2632. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.09.009>
17. **Electric power annual 2019.** U.S. Energy Information Administration, Oct. 2020.
18. **EU energy in figures: Statistical pocketbook.** Published: 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020.
19. **Белобородов С.С.** Обеспечение баланса производства и потребления электроэнергии в энергосистеме Германии в дни с максимальной выработкой ВИЭ // Электрические станции. 2020. № 2. С. 16–22.
20. **Белобородов С.С., Дудолин А.А.** Влияние развития ВИЭ на сбалансированность производства и потребления электроэнергии в ЕЭС России // Новое в российской электроэнергетике. 2020. № 5. С. 6–17.
21. **Белобородов С.С.** Оксидоуглеродный след ветровых и солнечных электростанций // Электрические станции. 2022. № 8. С. 10–18.
22. **Белобородов С.С., Дудолин А.А.** Анализ наличия регулировочного диапазона в ЕЭС и размещение “базовой” генерации на территории Российской Федерации // Новое в российской электроэнергетике. 2017. № 7. С. 6–16.
23. **Power generation and consumption.** Agora Energiewende. Smart Energy for Europe Platform (SEFEP).
24. **Мелентьев Л.А.** Системные исследования в энергетике: элементы теории, направления развития. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1983.
25. **Справочник по проектированию электроэнергетических систем** / В.В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.А. Илларионов, Л.Я. Рудых, Д.Л. Файбисович, Р.М. Фришберг, Л.Д. Хабачев. И.М. Шапиро // 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985.
26. **Макаров А.А., Воропай Н.И.** Системные исследования в энергетике: методология и результаты. М.: ИНЭИ РАН, 2018.
27. **Мелентьев Л.А.** Научные основы теплофикации и энергоснабжения городов и промышленных предприятий: науч. изд. М.: Наука, 1993.
28. **Руденко Ю.Н.** Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1976. № 1. С. 7–17.

29. **Белобородов С.С.** О необходимости применения системного подхода при проектировании развития ЕЭС России // *Электрические станции*. 2021. № 9. С. 2–9.
30. **Energy in a finite world: Paths to sustainable future.** V. 1 / W. Hafele, J. Anderer, A. McDonald, N. Nakićenovic // Report by the Energy Systems Program Group of the International Institute for Applied Systems Analysis. Cambridge, Massachusetts: Ballinger Publish Company, 1981.
31. **Руденко Ю.Н., Ушаков И.А.** К вопросу оценки живучести сложных систем энергетики // *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт*. 1979. № 1. С. 14–20.
32. **Антонов Г.Н., Черкесов Г.Н., Криворуцкий Л.Д.** Методы и модели исследования живучести систем энергетики. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1990. С. 9–17.
33. **Воропай Н.И., Ковалев Г.Ф., Кучеров Ю.Н.** Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике. М.: Энергия, 2013.
34. **Руденко Ю.Н., Синьчугов Ф.И., Смирнов Э.П.** Основные понятия, определяющие свойство “надежность” систем энергетики // *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт*. 1981. № 2. С. 3–17.
35. **Белобородов С.С.** Влияние развития ВИЭ на конкурентоспособность централизованной системы электроснабжения промышленных потребителей в энергосистеме Германии, а также на изменения режимов работы газовой сети // *Электрические станции*. 2020. № 9. С. 2–11.

Evaluating the Influence of Wind and Solar Power Plants, Cogeneration, and Coal Share in the Fuel Balance on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions

S. S. Beloborodov^{a, *} and E. G. Gasho^{b, **}

^a NP Energy Efficient City, Moscow, 195094 Russia

^b National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

*e-mail: enefgorod@gmail.com

**e-mail: gashoyg@mpei.ru

Abstract—The energy transition for “green” hydrogen is supposed to be carried out through a widescale use of wind energy. The area of wind farms required for this purpose may reach 38.5% of the European Union’s territory. In the scientific literature, it is pointed out that the use of wind turbines for meeting 10% of the world demand for energy can result in that the land surface temperature will increase by more than 1°C by 2100. A change in the temperature is observed immediately after commissioning of wind farms, whereas the climatic gain from reduction of greenhouse gas emissions is a matter of the future. Currently, no attention is paid to the influence of wind and solar power plants (WPPs and SPPs) on the growth of greenhouse gas emissions as a consequence of changes in the structure and loading conditions of generating capacities in the power system. The aim of this work is to determine the possibility of reducing the amount of greenhouse gas emissions in the power system by changing the fuel-balance structure, achieving more efficient generation of electricity, developing WPPs and SPPs, and consider methods for implementing it. Assessments of the reduction of greenhouse gas emissions by power plants in changing the structure of generating capacities and also in replacing one fuel kind by another are given. It is shown that nowadays, the balance of demand and offer in the power system, e.g., of Germany, is maintained owing to electric energy export. For the period from 2000 to 2018, the amount of electricity generated by WPPs and SPPs increased by 146 TW h, whereas that by nuclear power plants (NPPs) dropped by 94 TW h, while the export of electric energy to the power systems of neighboring countries increased by 52 TW h. The decrease in the amount of electricity generated by coal-fired thermal power plants (TPPs) by 69 TW h was compensated by increasing the amount of electricity generated by natural gas fired thermal power plants by 34 TW h, and by 47 TW h owing to power plants that use biogas, solid and liquid biofuel, and solid municipal waste as fuel. Study results have shown that, in the absence of energy storage devices, the development of wind and solar power plants cannot be regarded as an efficient way of reducing greenhouse gas emissions in the power system, the more so that WPPs and SPPs are significantly inferior to various combined electricity- and heat-generation versions.

Keywords: greenhouse gases, carbon dioxide, renewable energy sources, wind power plants, solar power plants, cogeneration, combined-cycle power plants, electric load modes, power system, carbon neutrality