

ВКЛАД УГОЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИИ В ГЛОБАЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ CO₂: СУЩЕСТВУЮЩЕЕ ПОЛОЖЕНИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИХ СОКРАЩЕНИЯ

© 2024 г. А. Н. Тугов*

Всероссийский теплотехнический институт, Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия

**e-mail: ANTugov@vti.ru*

Поступила в редакцию 23.01.2024 г.

После доработки 22.02.2024 г.

Принята к публикации 29.02.2024 г.

Выбросы CO₂ в атмосферу в электроэнергетическом секторе в 2022 г. превысили 12.4 млрд т, что в 1.8 раза больше, чем в 2000 г. Анализируются причины такого роста. Отмечается, что значительный вклад в эти выбросы (75%) вносит электрогенерация с использованием угля в качестве топлива. Показано, что в ближайшее время ожидать снижения выбросов CO₂ вследствие сокращения угольных мощностей не приходится: в мире наблюдается их устойчивое увеличение. В XXI в. суммарная мощность угольных ТЭС возросла примерно в 1.9 раза. Рассматриваются альтернативные пути снижения выбросов парниковых газов, прежде всего за счет строительства новых высокоэффективных энергоблоков на повышенные параметры пара и вывода из эксплуатации устаревшего оборудования. Благодаря этому существенно меняется структура угольной генерации в мире: ТЭС с энергоблоками на суперсверхкритические (ССКП) параметры пара и сверхкритическое давление (СКД) составляют уже более 47% общей мощности угольных ТЭС. Такие изменения способствовали снижению удельных выбросов парниковых газов с 466 г CO₂/(кВт·ч) в 2000 г. до 436 г CO₂/(кВт·ч) в 2022 г. В электроэнергетическом секторе России выбросы CO₂ в 2022 г. составили примерно 0.41 млрд т. С 2000 г. они выросли всего на 22%. Доля выбросов CO₂ угольными ТЭС России оценивается на уровне 35–45% общего количества парниковых газов, связанных с производством электроэнергии, и не превышает 0.5% общемировых, обусловленных использованием ископаемых топлив. Вследствие низкого вклада выбросов CO₂ российскими угольными ТЭС в общемировые, вопросы снижения эмиссии парниковых газов угольной электрогенерацией не столь актуальны и решаются, главным образом, замещением угля природным газом. Необходимость внедрения на угольных ТЭС высокоэффективного, но дорогостоящего оборудования (например, энергоблоков ССКП) для сокращения выбросов парниковых газов не столь очевидна, как за рубежом, и для его реализации требуется детальное технико-экономическое обоснование.

Ключевые слова: экономический рост, угольная электрогенерация, электрическая мощность, тепловая электростанция, повышенные параметры пара, выбросы парниковых газов, природный газ, технологии улавливания и захоронения CO₂, внутрицикловая газификация

DOI: 10.56304/S0040363624700061

В 2022 г. годовые выбросы CO₂, связанные с использованием в качестве первичных источников энергии нефти, угля, газа и других ископаемых топлив, увеличились по сравнению с предыдущим годом на 2.5% и превысили 33.8 млрд т CO₂ [1]. В период 2010–2019 гг. их рост составлял примерно 1%/год.

В двух крупнейших странах-эмитентах (Китае и США) выбросы CO₂ увеличились незначительно: на 1.0 и 1.2% соответственно. Выбросы CO₂ снизились в европейских странах (2.0%), Бразилии (6.2%), Южной Африке (4.7%) и Южной Корее (2.9%), оставались стабильными в Японии и России. Но зато очень быстрыми темпами выбро-

сы CO₂ росли в Саудовской Аравии (10.0%), Мексике (10.0%), Индии (8.8%) и Индонезии (28.0%). В последних трех странах — вследствие значительного роста производства электроэнергии с использованием угля.

Ежегодное увеличение эмиссии CO₂ объясняется, в первую очередь, ростом потребления угля, на который приходится примерно 46% всех выбросов. В 2022 г. мировая добыча угля выросла на 8.2% и достигла почти 8.3 млрд т [2]. Азиатские страны—производители угля, на долю которых приходится более 70% его мировой добычи, в 2022 г. увеличили добычу этого вида топлива на 11%, в том числе Китай — на 10%, Индия — на

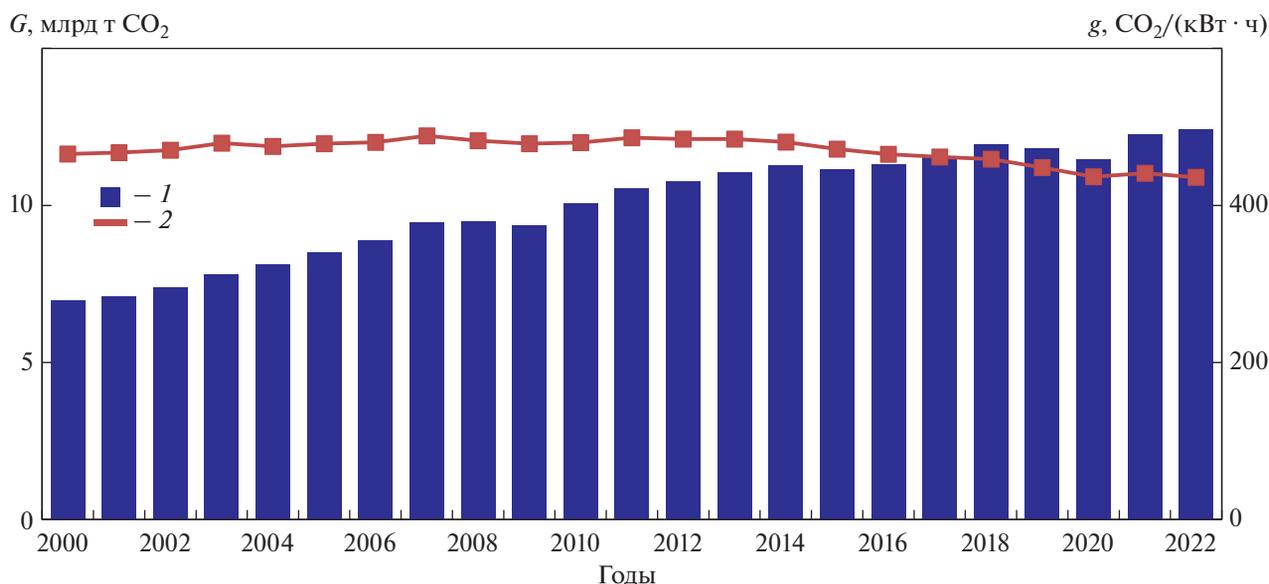


Рис. 1. Выбросы CO_2 общие G (1) и удельные g (2) в мире, связанные с выработкой электроэнергии [3]

14%, Индонезия — на 12%. Из-за высоких цен на газ в 2022 г. на 4.8% выросла добыча угля и в Европе, в том числе на 11.0% в Турции, на 3.5% в Германии и на 12.0% в Чехии. В СНГ объем производства угля увеличился незначительно (на 0.3%).

Около 40% всех выбросов CO_2 , связанных с энергетическим использованием ископаемых топлив, приходится на производство электроэнергии. С 2000 г. эти выбросы возросли почти вдвое, увеличившись с 6972 млн т CO_2 в 2000 г. до 12431 млн т CO_2 в 2022 г. (рис. 1), что соответствует среднегодовому их повышению на 2.7%. Причинами такого увеличения стало, во-первых, повышение глобального спроса на электроэнергию (и, следовательно, ее производства) из-за быстрого экономического роста во многих регионах мира. В 2022 г. мировой спрос на электроэнергию достиг нового рекордного максимума 28510 ТВт · ч. Во-вторых, по-прежнему сохраняется значительная зависимость электроэнергетики от ископаемого топлива, прежде всего от угля. Так, например, производство электроэнергии в Китае с начала века увеличилось в 6.5 раза с 1356 ТВт · ч в 2000 г. до 8858 ТВт · ч в 2022 г. Это почти треть всего мирового производства электроэнергии. Доля угольной генерации в Китае в общем объеме выработанной в стране электроэнергии составляет более 61%, что привело к увеличению абсолютных выбросов CO_2 в Китае с 2000 по 2022 г. на 415% (3782 млн т CO_2). В 2022 г. рост мирового производства электроэнергии был обеспечен также США (3.2% к предыдущему году), Саудовской Аравией (5.9%), Индонезией (7.9%), Индией (9.7%). Следует отметить, что, поскольку доля угля в структуре производства элек-

троэнергии в Индонезии и Индии значительна и в 2022 г. составляла 61.5 и 74.2% соответственно, быстрыми темпами, как отмечалось ранее, росли и выбросы CO_2 .

Несмотря на то что доля безуглеродных технологий в производстве электроэнергии в XXI в. постоянно увеличивается и уже превышает долю угольной генерации (рис. 2), удельные выбросы углекислого газа снизились незначительно: с 466 г $\text{CO}_2/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$ в 2000 г. до 436 г $\text{CO}_2/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$ в 2022 г. (см. рис. 1).

Таким образом, существенное влияние на удельные выбросы парниковых газов оказывают именно угольные ТЭС, которые являются крупнейшим источником выбросов CO_2 . Сейчас их доля оценивается на уровне 75% всех выбросов в секторе электроэнергетики. Увеличатся или уменьшатся выбросы CO_2 угольными ТЭС — зависит от текущего состояния угольной электрогенерации и перспектив ее изменения.

УГОЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИЯ В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ

В последние годы на тепловых электростанциях мира ежегодно сжигается около 3.3 млрд т условного твердого топлива и производится 8.5—10.0 трлн кВт · ч электроэнергии. Выработка электроэнергии при использовании угля в качестве топлива увеличилась на 78%: с 5719 ТВт · ч в 2000 г. до 10 186 ТВт · ч в 2022 г. (рис. 3).

Сокращение объемов угольной электрогенерации в одних странах компенсируется ее ростом в других. Так, например, в 2022 г. по сравнению с

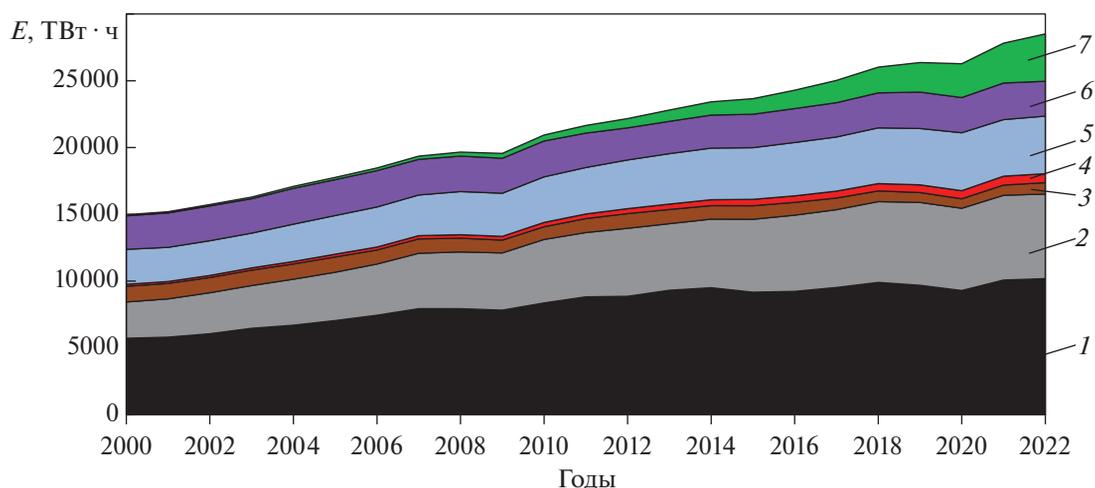


Рис. 2. Валовая выработка электроэнергии E в мире в 2000–2022 гг. [3].
 1 – уголь; 2 – газ; 3 – другое ископаемое топливо; 4 – биоэнергетика; 5 – гидроэнергетика; 6 – атомная энергетика; 7 – возобновляемые источники энергии

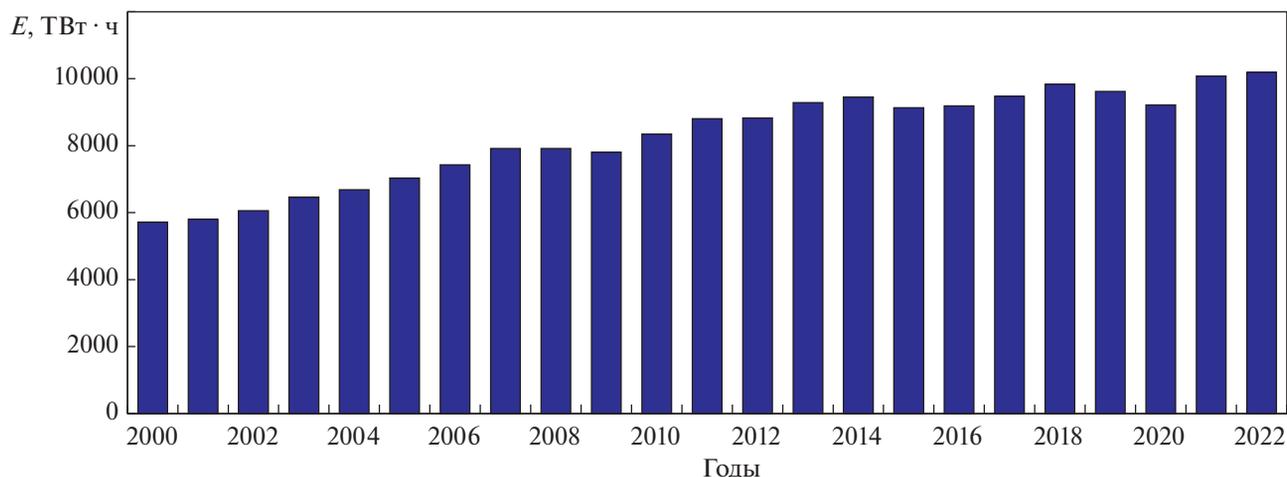


Рис. 3. Выработка электроэнергии E на ТЭС при использовании угля в качестве топлива [3]

предыдущим годом выработка электроэнергии при использовании угля снизилась в США (–70.0 ТВт·ч, –7.8%), но выросла в Китае (+81.0 ТВт·ч, +1.5%), Индии (+92.0 ТВт·ч, +7.2%), Японии (+9.7 ТВт·ч, +3.1%) и странах ЕС (+27.0 ТВт·ч, +6.4%) [4].

В январе 2024 г. уголь в качестве основного топлива на ТЭС использовался в 75 странах мира, а суммарная установленная электрическая мощность угольных ТЭС составляла более 2.1 ТВт. Примерно 86.5% всех электрогенерирующих мощностей на угольном топливе находится в девяти странах (см. таблицу), причем на долю трех (Китая, США и Индии) приходится 73%.

Угольная генерация сосредоточена в Азиатском регионе (примерно 77%), но она продолжает играть заметную роль в Северной Америке и Европе. В абсолютном значении в мире наблюдает-

ся устойчивое увеличение суммарной мощности угольных ТЭС (рис. 4). После некоторого замедления темпов ее роста в 2015–2021 гг., обусловленного выводом из эксплуатации устаревшего оборудования, в 2023 г. мощность угольных ТЭС увеличилась на 48.4 ГВт, почти на столько же, на сколько за предыдущие три года вместе взятые (рис. 5).

Доля угольной генерации в общей мировой выработке электроэнергии в XXI в. остается стабильной (на уровне 36–40%) (см. рис. 2) и по-прежнему преобладающей над другими первичными источниками энергии.

В то же время по сценарию Международного энергетического агентства (МЭА) [7] во исполнение Парижского соглашения, принятого в 2015 г., – Рамочной конвенции ООН об измене-

Производство электроэнергии при использовании угля в качестве топлива

Страна	Выработка электроэнергии в 2022 г., ТВт · ч [3]	Установленная электрическая мощность в январе 2024 г., МВт [5]		
		всего	энергоблоков СКД	энергоблоков ССКП
Мир	10 191	2 129 111	550 758	448 037
Китай	5 420	1 136 731	305 510	352 629
Индия	1 363	237 148	715 030	2920
США	828	200 090	62 413	609
Япония	321	55 123	13 682	28 265
Южная Корея	206	40 134	15 580	20 102
Россия	197	37 857	10 426	–
Индонезия	190	51 557	8 005	7 806
ЮАР	182	43 624	7 969	–
Германия	181	40 362	7 658	9 239

нии климата, в мировой структуре энергетики доля выработки электроэнергии на угольных ТЭС должна снизиться к 2030 г. до 12% (рис. 6, а). Для этого потребуется сокращение выработки электроэнергии ежегодно в период с 2021 по 2030 г. на 8,3% (рис. 6, б). Чтобы достигнуть поставленной МЭА цели, странам ОЭСР необходимо будет отказаться полностью от угольных ТЭС к 2030 г., а остальному миру – поэтапно к 2040 г.

Но в настоящее время картина пока совершенно иная: в 2022–2023 гг. было закрыто меньше угольных электростанций, чем в любой другой год после 2014 г. (см. рис. 5).

В Китае в 2021–2023 гг. выведено из эксплуатации только 0,1% угольных мощностей (рис. 7, а), а количество новых угольных электростанций, анонсированных, получивших разрешение на строительство и находящихся в стадии строитель-

ства, достигло самого высокого уровня с 2015 г. Только с января по июнь 2023 г. было начато строительство новых угольных электростанций установленной мощностью 37 ГВт, разрешено 52 ГВт, из которых уже 10 ГВт находятся в стадии строительства, было объявлено о новых проектах на 41 ГВт и возрождены ранее отложенные проекты строительства ТЭС мощностью 8 ГВт. Сейчас в Китае находятся в стадии строительства и разрешены к строительству угольные электростанции общей мощностью 243 ГВт [8].

В Индии в 2022 г. Центральное управление электроэнергетики потребовало, чтобы угольные электростанции не закрывались до 2030 г. [3], и уже в 2023 г. вывод угольных мощностей из эксплуатации в этой стране был прекращен (рис. 7, б).

В Японии с 2019 г. существенно увеличился ежегодный ввод новых угольных электростан-

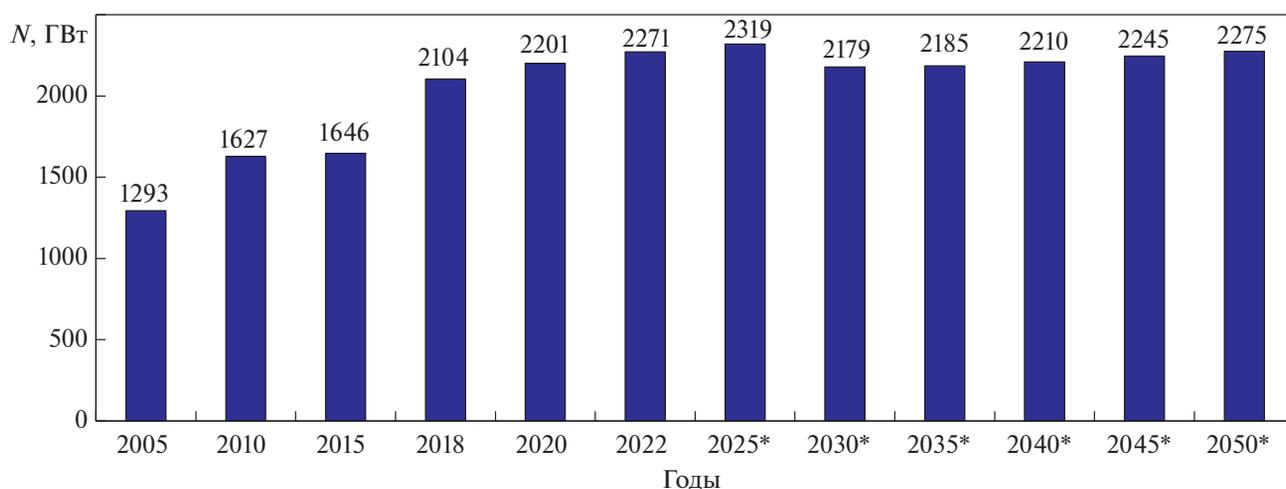


Рис. 4. Установленная мощность N на угольных электростанциях в мире с 2005 по 2022 г. с прогнозом (*) до 2050 г. [6]

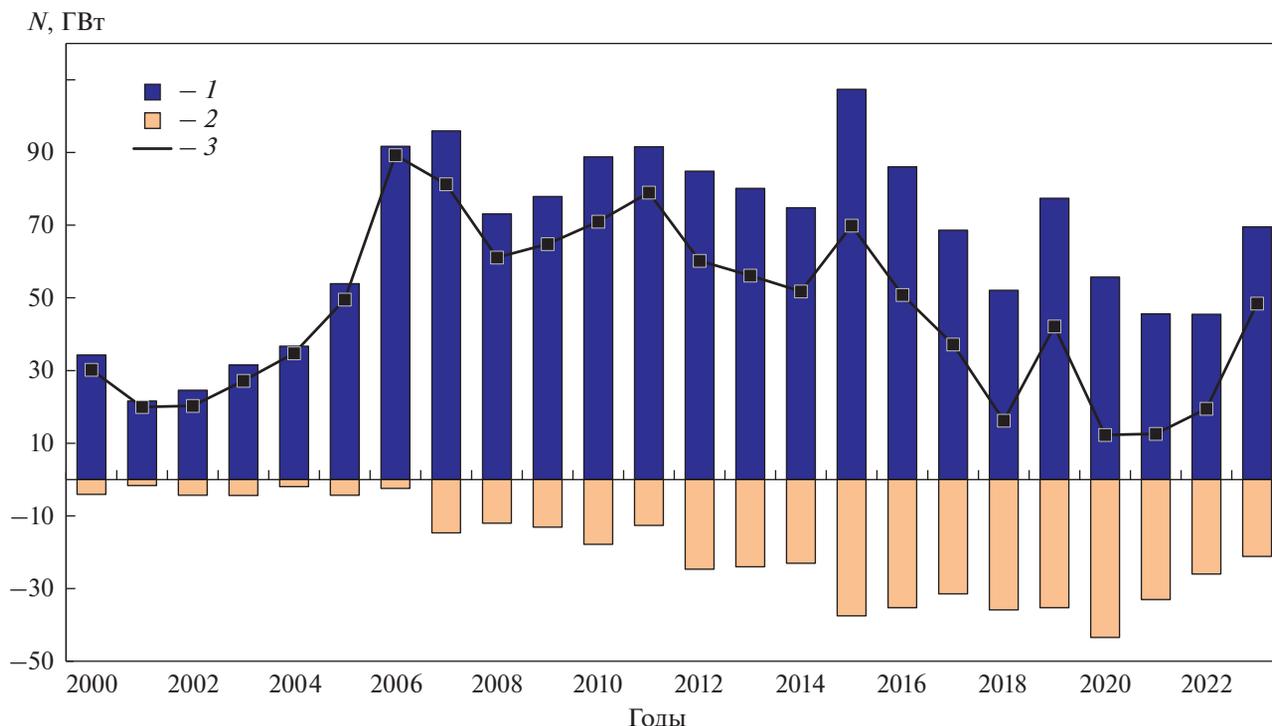


Рис. 5. Ввод (1) и вывод (2) мощностей и ввод мощностей-нетто (3) (разница между вводом и выводом) на угольных ТЭС в мире [5]

ций, а вывод действующих в последние годы значительно уменьшился (рис. 7, в). В [9] указывается, что, несмотря на разработанную в стране стратегию поэтапного отказа от угольной генерации к 2030 г., вывод из эксплуатации большинства ТЭС к этому времени не планируется.

В странах ЕС возобновили работу 26 “старых” угольных энергоблоков, которые ранее были выведены в резерв. Их средняя загрузка зимой 2022 г. составила примерно 18%, и они добавили около 1% к годовой выработке электроэнергии в Европе [3].

Таким образом, закрытие угольных ТЭС не является безальтернативным и легко реализуемым способом сокращения выбросов CO₂, по крайней мере в ближайшей перспективе. Другой способ снижения выбросов CO₂ на угольных ТЭС – повышение их эффективности и внедрение технологий, способствующих улавливанию углекислого газа для его последующего захоронения или использования.

ПУТИ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ CO₂ НА УГОЛЬНЫХ ТЭС

В последние годы некоторому сокращению выбросов CO₂ на угольных ТЭС способствовало то обстоятельство, что ввод новых угольных мощностей осуществлялся в основном за счет строительства новых современных энергоблоков СКД и энергоблоков ССКП. За последние 10 лет в ми-

ре были запущены в эксплуатацию энергоблоки СКД общей мощностью примерно 220 ГВт (32% общего количества введенных в эксплуатацию в этот период) и энергоблоки ССКП общей мощностью более 305 ГВт (45%) [6]. На рис. 8 показана динамика роста количества n и суммарной электрической мощности N энергоблоков ССКП.

Сейчас в мире работает более 530 энергоблоков ССКП общей мощностью около 448 ГВт. Примерно 78% таких энергоблоков находится в Китае, в Японии эксплуатируется 37 энергоблоков ССКП, в Южной Корее – 26, в Германии – 10. Энергоблоки ССКП работают также на Тайване, в Малайзии, Нидерландах, Италии, Польше, Марокко, Турции, Индии, США и других странах. В 2021–2023 гг. запущены головные образцы в Греции, Пакистане, Индонезии, Вьетнаме.

Энергоблоки ССКП высокоэкономичны и, следовательно, характеризуются пониженными выбросами CO₂ в окружающую среду. Например, КПД запущенного в эксплуатацию в 2020 г. энергоблока Datteln 4 (Германия) мощностью 1100 МВт превышает 45%.

В Китае КПД новых энергоблоков ССКП мощностью 1000–1350 МВт составляют 46–49%, КПД энергоблока мощностью 1000 МВт с двойным промежуточным перегревом пара на электростанции Guodian Taizhou, запущенного в 2015 г., – 47,8%, КПД энергоблоков (ст. № 5, 6) мощностью по 1240 МВт, введенных в эксплуатацию на ТЭС

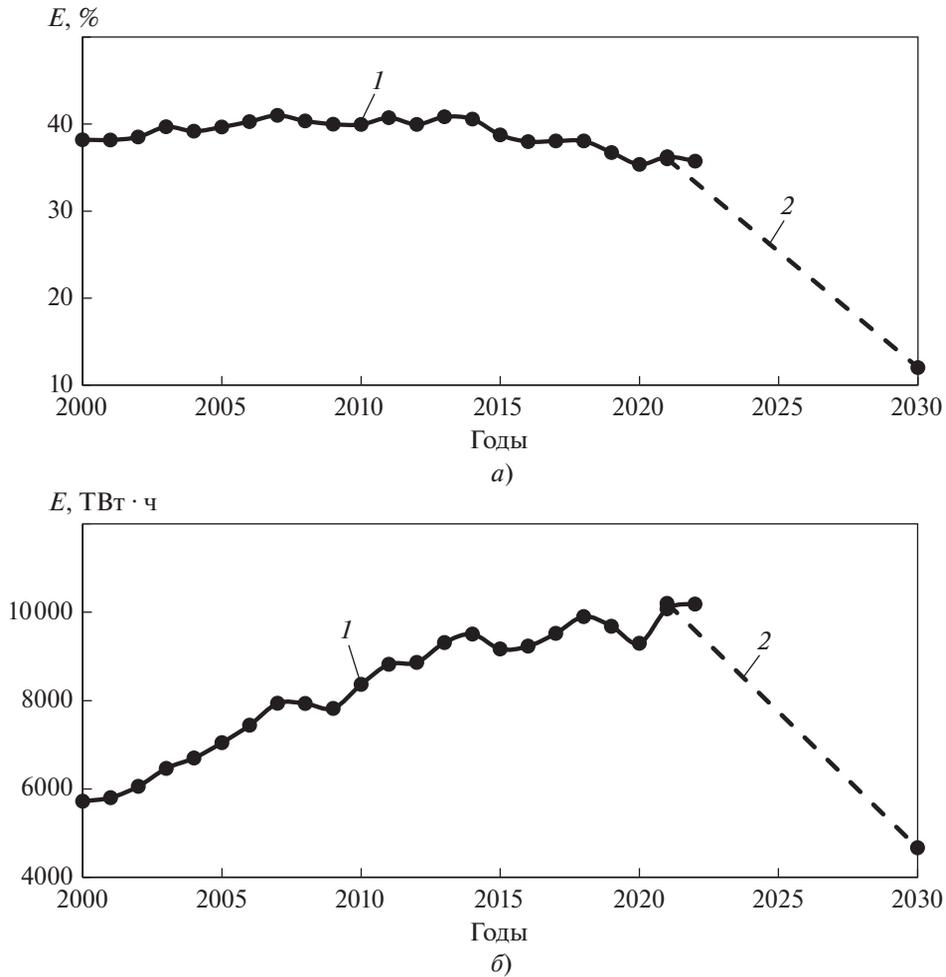


Рис. 6. Доля выработки электроэнергии (а) и общая ее выработка (б) на угольных ТЭС в мире. 1 – фактическое состояние; 2 – по сценарию МЭА [7]

Yangxi Power (провинция Гуандун) в 2020 г., – превышает 49.4% [10].

К увеличению КПД энергоблока приводит, в первую очередь, повышение параметров пара перед турбиной. На сегодняшний день в мировой энергетике достигнуты давление свежего пара 28–32 МПа и температуры пара: свежего 600–610°C, вторичного перегрева 600–630°C и третичного – 610–620°C. Так, например, энергоблок 1350 МВт ТЭС Shenergy Pingshan II (провинция Гуандун, Китай), запущенный в 2021 г., работает при следующих параметрах:

Давление пара, МПа	32.58
Температура пара, °С:	
свежего	610
вторичного перегрева	630
третичного перегрева	623
КПД, %	48.92
Удельный расход условного топлива, г/(кВт · ч)	251

Энергоблоки ССКП характеризуются также минимальным воздействием на окружающую среду. На энергоблоках ССКП № 3, 4 ТЭС Guodian Taizhou II с двойным промежуточным перегревом пара мощностью 1000 МВт выбросы, мг/м³, составляют: твердых частиц – 2.3, SO₂ – 15, NO_x – 31.

За счет вывода из эксплуатации устаревшего оборудования и ввода современного существенно поменялась структура угольной генерации в мире. Мощность ТЭС с энергоблоками ССКП и СКД составляет более 47% общей мощности угольных ТЭС, в Китае – 58%, в Японии – 76%, в Корею – 89% (рис. 9).

Наряду с широкомасштабным применением в угольной энергетике современных энергоблоков ССКП и СКД развиваются технологии, способствующие улавливанию CO₂: парогазовые с внутрцикловой газификацией, кислородное сжигание, использование связанных между собой реакторов с кипящим и циркулирующим кипящим слоем (полигенерирующие системы и химические циклы) [11, 12]. Однако такие техно-

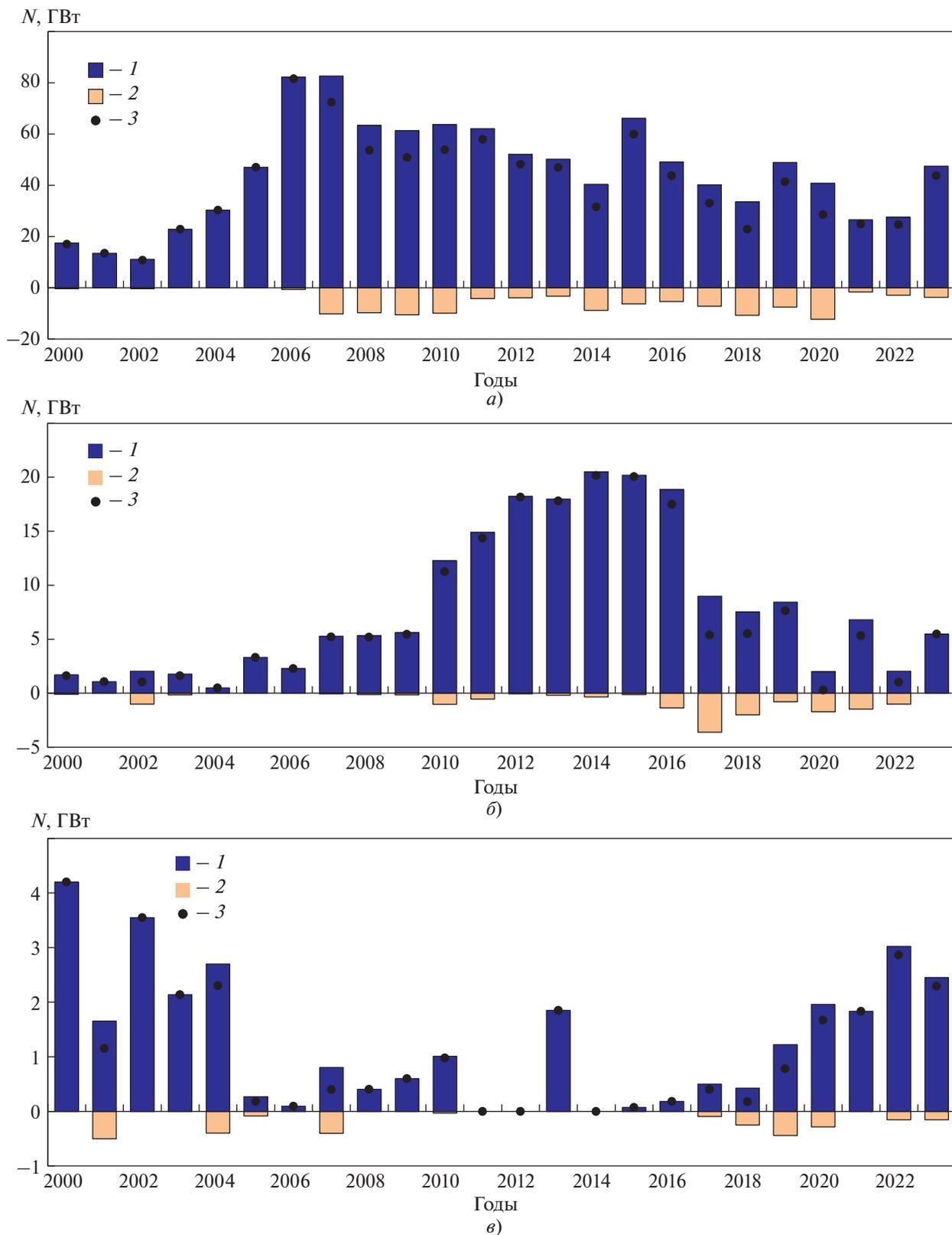


Рис. 7. Ввод (1) и вывод (2) мощностей и ввод мощностей-нетто (3) на угольных ТЭС в Китае (а), Индии (б) и Японии (в) [5].
Условные обозначения см. рис. 5

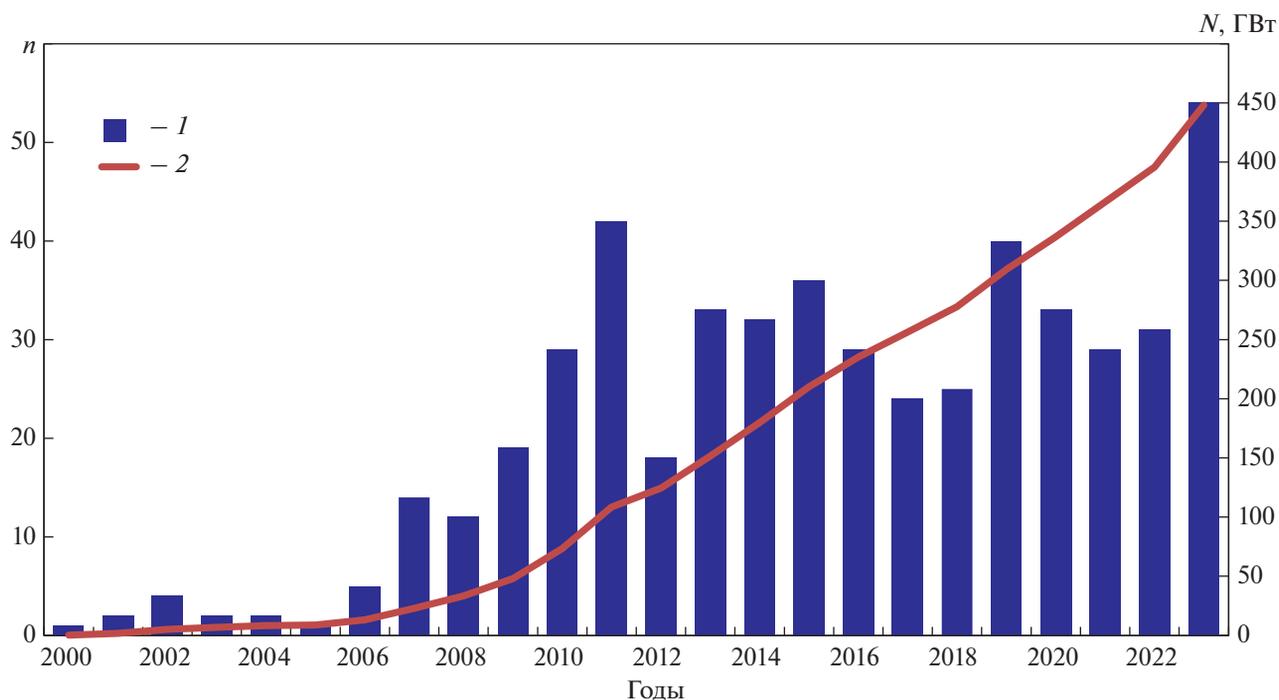


Рис. 8. Количество энергоблоков ССКП n (1), введенных в эксплуатацию в 2000–2023 гг., и их суммарная установленная мощность N (2)

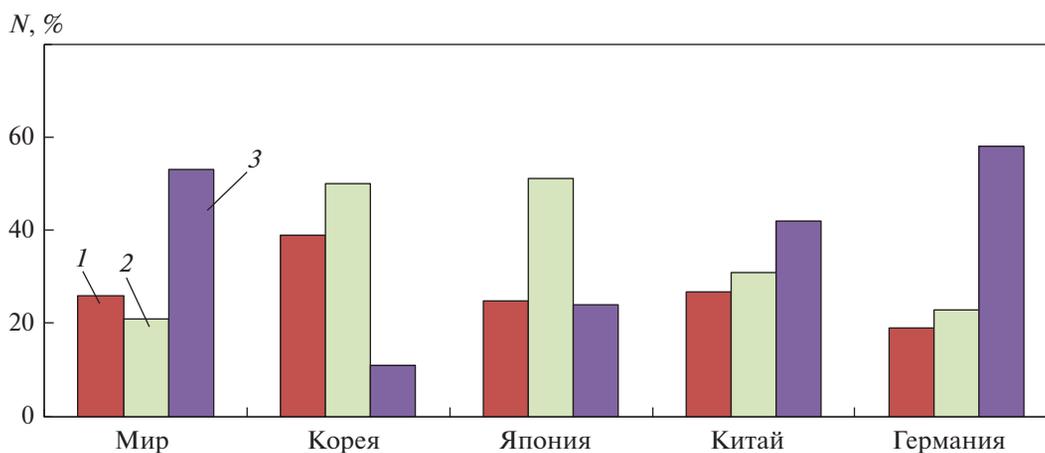


Рис. 9. Мощность N , % общей мощности угольных ТЭС, на январь 2024 г.
1, 2 – пылеугольные энергоблоки СКД и ССКП; 3 – другое оборудование ТЭС

логии либо находятся в стадии разработки пилотных проектов, либо, как, например, парогазовая установка с внутрицикловой газификацией (ПГУ-ВЦГ), пока себя экономически не оправдывают. Так, в [11] отмечается, что в начале века благодаря потенциальной возможности улавливания CO_2 усилился интерес к ПГУ-ВЦГ. Только в США предполагалось реализовать более 30 проектов общей мощностью почти 20 ГВт. Начались работы в этом направлении в Японии, Южной Корее, Китае и Австралии. Однако очень скоро

энергетические компании охладели к этому виду энергетического оборудования главным образом вследствие большой его удельной стоимости и, соответственно, повышенной себестоимости электроэнергии, вырабатываемой ПГУ-ВЦГ, а также низкой надежности при сопоставимой энергоэффективности. Коэффициент полезного действия современных ПГУ-ВЦГ на ТЭС Nakoso и Nipono, введенных в эксплуатацию в 2021 г., находится на уровне 48% (без учета затрат на улавливание CO_2), в то время как КПД упомянутых

ранее энергоблоков ССКП на ТЭС Shenergy Pingshan II и Yangxi Power составляет 48.92 и 49.4% соответственно.

Также следует отметить, что на улавливание, захоронение и использование CO₂ (CCUS – от англ. carbon capture, use, storage) будет приходиться не менее 15% совокупного сокращения выбросов парниковых газов [13]. Однако это кардинально не решает проблему глобального потепления, но является достаточно сложным и дорогостоящим способом достижения углеродной нейтральности.

СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ CO₂ НА УГОЛЬНЫХ ТЭС РОССИИ

В 2022 г. выбросы CO₂ на российских угольных ТЭС, связанные с производством электроэнергии, составляли 409 млн т CO₂, или 3.3% общих выбросов в мировой электроэнергетике [3]. Несмотря на то что годовой спрос на электроэнергию в нашей стране в XXI в. увеличился на 35% (с 819 ТВт·ч в 2000 г. до 1102 ТВт·ч в 2022 г.), выбросы в электроэнергетическом секторе России за это время выросли всего на 22% и последние пятнадцать лет находились примерно на одном и том же уровне (рис. 10).

Дополнительный спрос на электроэнергию в этот период был удовлетворен главным образом благодаря увеличению ее производства на 37% (129 ТВт·ч) при использовании газа в качестве топлива. Общее количество выработанной на угольных ТЭС электроэнергии сохранилось на уровне 160–200 ТВт·ч, поэтому удельные выбросы CO₂ в 2022 г. по сравнению с 2000 г. сни-

зились с 402 до 367 г/(кВт·ч). Это ниже среднемирового показателя, который в 2022 г. составил 436 г CO₂/(кВт·ч), хотя в России доля электроэнергии, производимой с использованием ископаемого топлива, находится на уровне среднемировой (чуть более 61%) (рис. 11).

Данное обстоятельство объясняется меньшей долей электроэнергии, выработанной угольными ТЭС России, в общем объеме ее производства на тепловых электростанциях по сравнению с мировым показателем: 29% в России и 59% в мире. Соответственно и доля выбросов CO₂ угольной генерацией, приходящихся на электроэнергетический сектор, в мире больше, чем в России: 35–45% в России и примерно 75% в мире.

Чтобы определить возможность дальнейшего снижения удельных и абсолютных показателей по выбросам CO₂, связанных с производством электроэнергии на российских угольных ТЭС, далее представлено текущее состояние угольной электроэнергетики в нашей стране.

В России уголь как основное топливо используется, по крайней мере, на 89 ТЭС (без учета электростанций мощностью 12 МВт и менее и котельных). Суммарная мощность этих электростанций оценивается на уровне 38 ГВт, что составляет примерно 16% всей установленной электрической мощности в России. Угольные электростанции располагаются главным образом в Сибири и на Дальнем Востоке, где отсутствует газоснабжение или использование газа в промышленных масштабах экономически нецелесообразно (себестоимость электроэнергии, вырабатываемой на угле, ниже, чем на газе). Только на пяти ТЭС установлено оборудование со сверх-

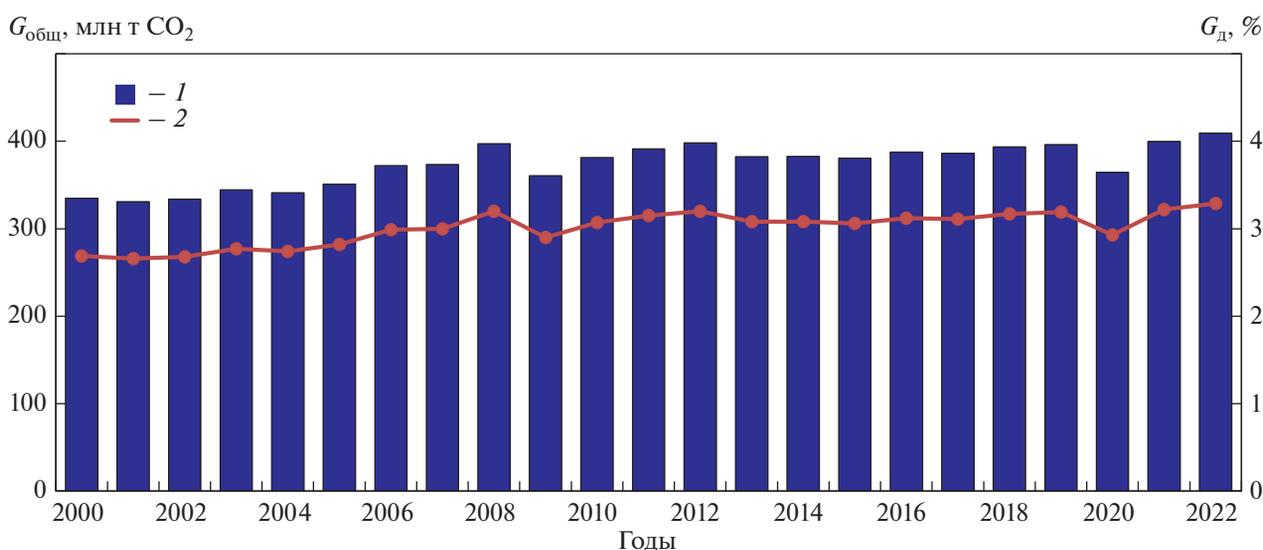


Рис. 10. Общие выбросы CO₂ $G_{общ}$ (1), связанные с выработкой электроэнергии на российских ТЭС, и их доля в общемировых выбросах G_d (2) [3]

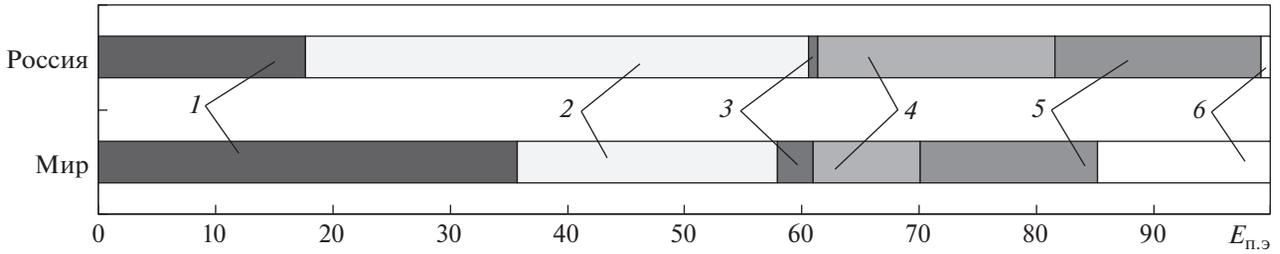


Рис. 11. Доля первичных энергоносителей $E_{п.э.}$ в общей выработке электроэнергии в 2022 г. [3].
1 – уголь; 2 – газ; 3 – другое ископаемое топливо; 4 – АЭС; 5 – ГЭС; 6 – возобновляемые источники энергии

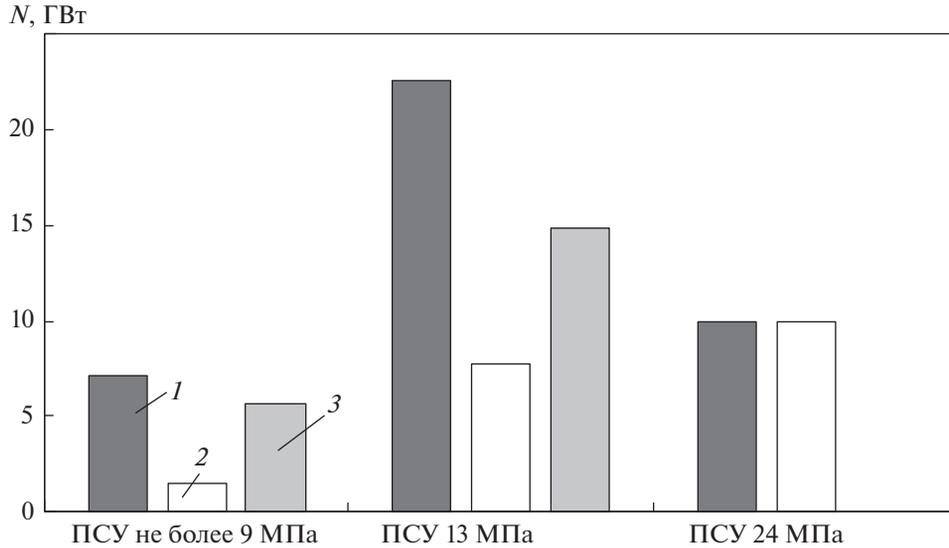


Рис. 12. Установленная электрическая мощность угольных ТЭС России N в зависимости от типа оборудования.
1 – ТЭС, всего; 2 – КЭС; 3 – ТЭС

критическим давлением свежего пара 23.5 МПа [паросиловые установки (ПСУ) давлением 24 МПа]. На остальных ТЭС давление свежего пара составляет 12.7 и 8.8 МПа (ПСУ давлением 13 МПа и ПСУ давлением не более 9 МПа) (рис. 12). Энергоблоки ССКП вообще отсутствуют.

Все оборудование угольных ТЭС (примерно половина суммарной электрической мощности всех угольных электростанций) работает на докритических параметрах. С 90-х годов прошлого века в России было построено только четыре угольных энергоблока СКД: № 3 Каширской ГРЭС (330 МВт, выведен из эксплуатации), № 9 Новочеркасской ГРЭС (330 МВт), № 10 Троицкой ГРЭС (660 МВт) и № 3 Березовской ГРЭС (800 МВт). Их технико-экономические показатели хотя и значительно выше, чем таковые на других действующих российских угольных ТЭС, но все же уступают мировым. Так, на энергоблоке № 10 Троицкой ГРЭС с параметрами пара 25 МПа и 566°C удельный расход условного топлива равен 292 г/(кВт · ч), в то время как для новых энергоблоков аналогичной мощности в Китае этот показатель не превышает 280 г/(кВт · ч).

На угольных ТЭС России количество теплового оборудования, проработавшего более 40 лет, составляет почти 60%, генерирующих мощностей моложе 10 лет – чуть больше 11% (рис. 13).

Оборудование для очистки дымовых газов от оксидов серы и азота отсутствует, а доля установленных за котлами современных золоулавливающих устройств (электрофильтров или рукавных фильтров) – менее 30% [14]. Таким образом, на угольных ТЭС России работает главным образом низкоэффективное оборудование со сроком службы, превышающим парковый ресурс, и значительными выбросами загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферу.

В настоящее время актуальной задачей для российской энергетики является снижение негативного влияния ТЭС на окружающую среду путем уменьшения выбросов загрязняющих веществ. С 1 марта 2023 г. вступил в действие информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 38-2022 [15]. Минприроды Российской Федерации утвердило с 1 сентября 2023 г. предложенные в ИТС 38-2022 технологические показатели выбросов маркер-

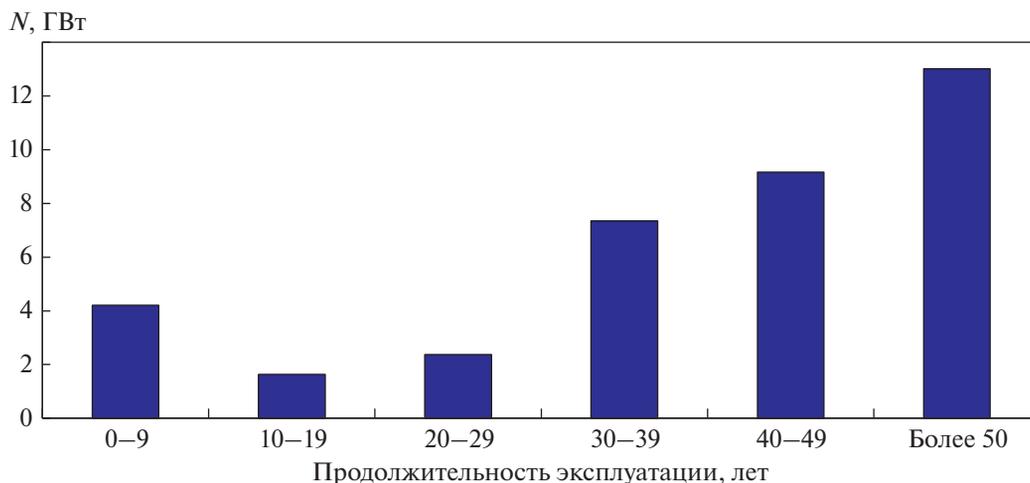


Рис. 13. Распределение угольных электрогенерирующих мощностей в России N по продолжительности эксплуатации (на январь 2024 г.)

ных загрязняющих веществ с уходящими газами ТЭС. Больше всего маркерных загрязняющих веществ установлено для угольных электростанций (NO_x, SO₂, CO, твердые частицы), и достижение их нормируемого содержания сопряжено со значительными трудностями [14]. Поэтому вопросы снижения выбросов парниковых газов на угольных ТЭС в России ушли на второй план. К тому же эти выбросы составляют менее 0.5% общемировых, обусловленных использованием ископаемых топлив.

Применительно к вопросу снижения выбросов парниковых газов угольными ТЭС России необходимо также отметить следующее. Замещение существующего оборудования более высокоэффективным (например, энергоблоками ССКП) или реализация технологий, способствующих улавливанию CO₂ (ПГУ-ВЦГ), не даст ощутимого эффекта валового снижения выбросов парниковых газов в глобальном масштабе. Для сравнения: доля выбросов парниковых газов на угольных ТЭС мира составляет около 28%, поэтому в странах с высокой долей угольной генерации внедрение таких технологий, безусловно, целесообразно. Следует также иметь в виду, что потенциал сокращения выбросов CO₂ за счет технологического обновления угольных ТЭС России оценивается всего лишь на уровне 24.6 Мт/год [16] (менее 6% всех выбросов в электроэнергетическом секторе России). К тому же существуют и технические трудности, препятствующие практическому достижению этого потенциала. Большинство угольных ТЭС России задействовано в теплофикации, а установленная электрическая мощность большей части КЭС меньше единичной мощности современных энергоблоков ССКП (660–1000 МВт), что делает невозможным замещение существующего оборудования на этих

ТЭС подобными энергоблоками. Отечественное теплосиловое оборудование (котел, турбина) на суперсверхкритические параметры пара отсутствует, а для его разработки потребуются длительный период времени и значительные финансовые вложения. Учитывая это, необходимо провести детальное технико-экономическое обоснование целесообразности снижения выбросов CO₂ на российских угольных ТЭС путем внедрения на них высокоэффективного оборудования.

В настоящее время по всей стране интенсивно идет процесс газификации, в том числе в населенных пунктах Сибири и Дальнего Востока, в которых расположены угольные ТЭС. В результате появляется возможность использовать природный газ в топливном балансе электростанции, а в ряде случаев вообще перевести его в разряд основного топлива. Это, безусловно, поможет существенно сократить выбросы парниковых газов. При производстве одного и того же количества электроэнергии при сжигании газа образуется примерно в 2 раза меньше CO₂, чем при сжигании угля. В масштабах страны в соответствии со сценариями Энергетической стратегии России до 2035 г. и ИНЭИ РАН [17] замещение угля природным газом на ТЭС является наиболее реальным путем снижения выбросов парниковых газов. В секторе электроэнергетики замещение угля природным газом теоретически позволит сократить выбросы CO₂ на 92.0–107.9 Мт/год (в зависимости от варианта перевода угольной ТЭС на сжигание газа: с сохранением паротурбинного цикла или замещением ПГУ) [16].

Однако следует иметь в виду, что по разведанным месторождениям угля Россия занимает второе место в мире (с долей около 15% мировых запасов) после США (их доля – более 23%). Запасы

угля в России превышают 162 млрд т. Доля России в мировой его добыче составляет примерно 5.5% (шестое место после Китая, Индии, США, Индонезии и Австралии). В абсолютном значении этот показатель равняется 440 млн т/год. По объемам потребления угля Россия находится на четвертом месте в мире с долей 3%, и основными потребителями угля в нашей стране являются именно ТЭС (более 50%). Замещение угля природным газом породит ряд негативных последствий [16]. В частности, это приведет к стагнации и последующей ликвидации угольной промышленности, создаст проблемы для надежного энергообеспечения многих регионов страны, станет причиной снижения стратегической устойчивости энергетики страны.

Еще одним направлением снижения выбросов CO_2 в России могут быть повышение эффективности существующих ТЭС и более масштабное внедрение комбинированной выработки электроэнергии и тепла в городах, в жилищно-коммунальных хозяйствах которых по-прежнему широко используются угольные котельные. В нашей стране для замещения устаревших теплофикационных угольных электростанций уже разработана экологически безопасная ТЭС нового поколения [18], при эксплуатации которой возможно не только обеспечивать регламентируемые выбросы основных загрязняющих веществ, но и за счет более высокого КПД уменьшать выбросы парниковых газов. Дополнительный вклад в снижение выбросов парниковых газов дает перевод жилого сектора на центральное отопление, что позволяет ликвидировать выбросы парниковых газов от локального угольного теплоснабжения (до 35 Мт CO_2 /год [16]).

Снизить выбросы CO_2 с помощью технологий улавливания и хранения углерода (CCS – от англ. carbon capture and storage) в нашей стране маловероятно. В [17] сообщается, что для обеспечения углеродной нейтральности к 2060 г. необходимо вводить установки CCS мощностью 18–20 Мт CO_2 ежегодно на протяжении четырех ближайших десятилетий, при том что располагаемая мощность всех установок CCS в мире составляет сегодня 42 Мт CO_2 (экв.), а Россия пока не располагает ни одной установкой CCS промышленного масштаба и до 2030 г. их ввод не планируется.

ВЫВОДЫ

1. Выбросы CO_2 в электроэнергетическом секторе мира составляют примерно 40% всех выбросов CO_2 , связанных с энергетическим использованием ископаемых топлив, и в 2022 г. превысили 12.4 млрд т, что в 1.8 раза больше, чем в 2000 г. Причиной такого роста является глобальный спрос на электроэнергию, который увеличился за этот период в 1.9 раза и в 2022 г. достиг нового ре-

кордного максимума 28 510 ТВт · ч, а также значительное количество электроэнергии, выработанной угольными ТЭС. Их доля в общемировом производстве электроэнергии в XXI в. оставалась стабильной (36–40%) и преобладающей над другими первичными источниками энергии. Доля выбросов CO_2 угольной электрогенерацией оценивается на уровне 75% всех выбросов CO_2 в электроэнергетическом секторе.

2. Ожидать снижения выбросов CO_2 угольными ТЭС из-за сокращения угольных мощностей не приходится: в мире наблюдается их устойчивое увеличение. В XXI в. суммарная мощность угольных ТЭС возросла примерно в 1.9 раза. Сокращение объемов угольной электрогенерации в одних странах компенсируется ростом в других. В 2022–2023 гг. было закрыто меньше угольных электростанций, чем в любой другой год после 2014 г. Наиболее реальным путем снижения выбросов CO_2 на угольных ТЭС являются повышение их эффективности и внедрение оборудования для улавливания углекислого газа.

3. В последние годы сокращению выбросов CO_2 от угольных ТЭС способствовало то обстоятельство, что ввод новых угольных мощностей осуществлялся главным образом благодаря строительству современных энергоблоков СКД и ССКП, которые характеризуются высокой экономичностью и, следовательно, пониженными выбросами CO_2 в окружающую среду. Сейчас в мире работает более 520 энергоблоков ССКП общей электрической мощностью примерно 448 ГВт. Благодаря выводу из эксплуатации устаревшего оборудования и вводу современного существенно поменялась структура угольной генерации в мире. Мощность ТЭС с энергоблоками ССКП и СКД составляет уже более 47% общей мощности угольных ТЭС, в некоторых странах – более 60%. Это способствовало снижению удельных выбросов углекислого газа с 466 в 2000 г. до 436 г CO_2 /(кВт · ч) в 2022 г.

4. В мире развиваются технологии по улавливанию CO_2 для его последующего захоронения: парогазовые с внутрицикловой газификацией, кислородное сжигание, установка связанных между собой реакторов с кипящим и циркулирующим кипящим слоем (полигенерирующие системы и химические циклы). Однако эти технологии пока себя экономически не оправдывают, либо находятся в стадии пилотных проектов. В перспективе планируется с помощью технологий улавливания, захоронения и использования CO_2 (CCUS) снизить общие выбросы от производства электроэнергии только на 15%.

5. В электроэнергетическом секторе России выбросы CO_2 в 2022 г. составили примерно 0.41 млрд т. С 2000 г. они выросли всего на 22%, несмотря на то что годовой спрос на электро-

энергию в нашей стране за этот период увеличился на 34%. Удельные выбросы CO₂ в 2022 г. находились на уровне 367 г/(кВт · ч), что ниже мирового показателя 436 г CO₂/(кВт · ч). В России доля выбросов CO₂ угольными ТЭС оценивается на уровне 35–45% общего количества парниковых газов, связанных с производством электроэнергии, а абсолютные выбросы CO₂ российскими угольными ТЭС не превышают 0.5% общемировых, обусловленных использованием ископаемых топлив.

6. В России примерно 17% электроэнергии производится на угольных ТЭС. Суммарная мощность этих электростанций оценивается на уровне 38 ГВт, что составляет примерно 16% всей установленной электрической мощности в РФ. На угольных ТЭС России работает главным образом низкоэффективное оборудование со сроком службы больше паркового ресурса и значительными выбросами загрязняющих веществ в окружающую среду, что обуславливает необходимость их реконструкции и модернизации.

7. Актуальной задачей для российской энергетики является снижение негативного влияния ТЭС на окружающую среду. Вследствие низкого вклада выбросов парниковых газов российскими угольными электростанциями в общемировые выбросы, вопросы снижения эмиссии CO₂ угольной электрогенерацией не столь актуальны и решаются замещением угля природным газом на существующих ТЭС. Необходимость внедрения на угольных ТЭС высокоэффективного, но дорогостоящего оборудования (например, энергоблоков ССКП) для сокращения выбросов парниковых газов не столь очевидна, как за рубежом. К тому же его осуществление вряд ли даст ощутимый эффект в глобальном мировом масштабе. Для России наиболее целесообразным путем сокращения выбросов парниковых газов в секторе электроэнергетики могут быть повышение эффективности работы существующих угольных ТЭС и более масштабное внедрение комбинированной выработки электроэнергии и тепла в городах, в жилищно-коммунальном хозяйстве которых по-прежнему широко используют угольные котельные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CO₂ emissions from fuel combustion. [Электрон. ресурс.] Режим доступа: <https://yearbook.enerdata.net/co2/emissions-co2-data-from-fuel-combustion.html>
2. Coal and lignite production [Электрон. ресурс.] Режим доступа: <https://yearbook.enerdata.net/coal-lignite/coal-production-data.html>
3. Global electricity review 2023. [Электрон. ресурс.] Режим доступа: <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/>
4. Global coal power generation 2022/Statista (statista.com). [Электрон. ресурс.] Режим доступа: <https://www.statista.com/statistics/1082201/coal-fired-electricity-generation-globally/>
5. Global energy monitor. [Электрон. ресурс.] Режим доступа: <https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/dashboard/>
6. Global installed coal power capacity 2050 / Statista (statista.com). [Электрон. ресурс.] Режим доступа: <https://www.statista.com/statistics/217256/global-installed-coal-power-generation-capacity/>
7. World energy outlook 2022. [Электрон. ресурс.] Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
8. China's new coal power spree continues as more provinces jump on the bandwagon. [Электрон. ресурс.] Режим доступа: https://energyandcleanair.org/wp/wp-content/uploads/2023/08/CREA_GEM_China-coal-power-briefing-2023H1_08.2023.pdf
9. <https://beyond-coal.jp/en/map-and-data/#tab3>
10. Сомова Е.В., Тугов А.Н., Тумановский А.Г. Современные угольные энергоблоки на суперсверхкритические параметры пара (обзор) // Теплоэнергетика. 2023. № 2. С. 5–23. <https://doi.org/10.56304/S0040363623020066>
11. Баторшин В.А., Сучков С.И., Тугов А.Н. Парогазовые установки с внутрицикловой газификацией: история, современное состояние и перспективы развития (обзор) // Теплоэнергетика. 2023. № 6. С. 26–40. <https://doi.org/10.56304/S0040363623060012>
12. Рябов Г.А., Тумановский А.Г., Епихин А.Н. Декарбонизация при производстве электроэнергии и тепла на твердотопливных электростанциях // Теплоэнергетика. 2023. № 1. С. 5–20. <https://doi.org/10.56304/S004036362301006X>
13. Energy technology perspectives 2020. Special report on carbon capture utilisation and storage. CCUS in clean energy transitions. Paris: International Energy Agency. [Электрон. ресурс.] Режим доступа: <https://webstore.iea.org/ccus-in-clean-energy-transitions>
14. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Гусева Т.В. Проблемы адаптации действующего оборудования ТЭС к технологическим показателям выбросов ИТС 38-2022 “Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии” // Теплоэнергетика. 2023. № 10. С. 115–123. <https://doi.org/10.56304/S0040363623100077>
15. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 38-2022 “Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии”. М.: Бюро НДТ, 2022.
16. 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>
17. Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г. На пути к климатической нейтральности: выстоит ли русский лес против энергетики? // Теплоэнергетика. 2024. № 1. С. 5–20. <https://doi.org/10.56304/S0040363624010053>
18. Профиль энергоблока угольной ТЭС нового поколения / Г.А. Рябов, Г.Д. Авруцкий, А.М. Зыков, И.Н. Шмиголь, М.В. Лазарев, И.А. Долгушин, В.И. Щелоков, А.В. Кудрявцев, Л.А. Жученко // Изв. РАН. Энергетика. 2014. № 1. С. 29–37.

Contribution of Coal Electricity to Global CO₂ Emissions: The Existing Situation and Current Trends of Their Reduction

A. N. Tugov*

All-Russia Thermal Engineering Institute, Moscow, 115280 Russia

**e-mail: ANTugov@vti.ru*

Abstract—CO₂ emissions into the atmosphere in the electricity sector in 2022 exceeded 12.4 billion t, which is 1.8 times more than in 2000. The reasons for this growth are analyzed. It is noted that a significant contribution to these emissions (75%) is made by electricity generation using coal as fuel. It has been shown that it cannot be expected that CO₂ emissions will decrease in the near future as a result of the reduction in coal capacity; there is a steady increase in the world. In the 21st century, the total capacity of coal-fired thermal power plants increased approximately 1.9 times. Alternative ways to reduce greenhouse gas emissions are being considered, primarily through the construction of new, highly efficient power units with increased steam parameters and the decommissioning of obsolete equipment. Thanks to this, the structure of coal generation in the world is changing significantly: Thermal power plants with power units for super-supercritical (SSCP) steam parameters and supercritical pressure (SCP) already account for more than 47% of the total capacity of coal-fired thermal power plants. Such changes contributed to a reduction in specific greenhouse gas emissions from 466 g CO₂/(kW h) in 2000 to 436 g CO₂/(kW h) in 2022. In the Russian electricity sector, CO₂ emissions in 2022 amounted to approximately 4.1 million t. Since 2000, they have grown by only 22%. The share of CO₂ emissions from coal thermal power plants in Russia are estimated at 35–45% of the total amount of greenhouse gases associated with electricity production and does not exceed 0.5% of the global total due to the use of fossil fuels. Due to the low contribution of CO₂ emissions by Russian coal-fired thermal power plants, reducing greenhouse gas emissions from coal-fired power generation is not so relevant in the global problem and are solved mainly by replacing coal with natural gas. The need to introduce highly efficient but expensive equipment (for example, SSCP power units) at coal-fired thermal power plants to reduce emissions greenhouse gases is not as obvious as abroad, and its implementation requires a detailed feasibility study.

Keywords: economic growth, coal-fired power generation, electric power, thermal power plant, increased steam parameters, greenhouse gas emissions, natural gas, CO₂ capture and disposal technologies, in-cycle gasification