

В.П. КЛАВДИЕНКО

доктор экономических наук, доцент, ведущий научный сотрудник
экономического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

СТРУКТУРНЫЕ СДВИГИ В ПЕРВИЧНОМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИИ КАК ФАКТОР ДЕКАРБОНИЗАЦИИ МИРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Проведен анализ масштабов и динамики потребления различных видов первичных источников энергии в мировой экономике за долговременный период. Исследованы объемы и динамика эмиссии диоксида углерода, генерируемого в результате потребления различного вида первичных источников энергии. Рассмотрено и количественно определено влияние изменения масштабов потребления различного вида ресурсов, их удельной углеродоемкости, а также структурных сдвигов в мирохозяйственном потреблении первичных энергоресурсов на объем эмиссии диоксида углерода в атмосферу. Представлены перспективы трансформации мировой структуры первичного энергопотребления в контексте глобальной климатической повестки и прогнозных сценариев развития мировой энергетики.

Ключевые слова: *энергопотребление, структурные изменения, декарбонизация, мировая экономика, устойчивое развитие.*

УДК: 338.012, 339.97

EDN: NEENKY

DOI: 10.52180/2073-6487_2025_1_129_151

Введение

Потребление энергии является фундаментальной основой жизнедеятельности общества и функционирования экономики, а неуклонное увеличение энергопотребления – ключевым императивом их поступательного развития. Показательно, что наиболее развитые страны (мировые лидеры по объему ВВП в расчете на душу населения или Индексу человеческого капитала) имеют и наиболее высокие показатели потребления первичной энергии в исчислении на жителя. Мировое потребление энергии увеличивается из года в год. Перманентный рост глобального энергопотребления, по сути, проявляется как закономерность, а редкие исключения лишь отражают ее устойчивый долговременный характер. За последние пять десятилетий лишь дважды имело место снижение глобального энергопотребления:

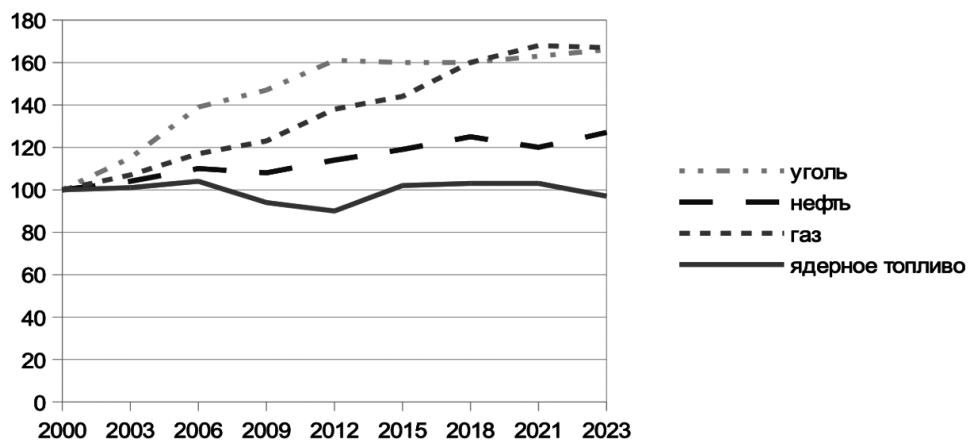
в 2009 г. (пик глобального финансового кризиса) и 2020 г. (пик глобальной пандемии). В 2023 г. мировое потребление первичных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) составило 620 эксаджоулей, превысив уровень 2000 г. более чем в 1,5 раза¹.

Динамика глобального потребления первичных ТЭР

Наиболее высокими темпами прирастало потребление возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В указанный период потребление возобновляемых источников, выраженное в энергетических единицах, увеличилось в 2,9 раза. При этом рекордную динамику потребления возобновляемой энергии продемонстрировали Китай, США, страны Европейского союза – главные потребители ВИЭ.

Бурное развитие возобновляемой энергетики проявилось и в крупномасштабных инвестициях, и в рекордном вводе новых мощностей, и в росте выработки «чистой» энергии. В 2000–2023 гг. глобальные инвестиции в отрасль увеличились более чем в 18 раз, общая установленная мощность – в 5,2 раза, а доля ВИЭ в глобальной выработке электроэнергии возросла с 18,7 до 30%.

Среди ископаемых источников энергии наиболее высокой динамикой в 2000–2023 гг. отличалось потребление природного газа, которое за этот период увеличилось на 167% (см. рис. 1).



Источник: рассчитано и составлено автором по: BP. Statistical Review of World Energy. 2022. 71-st Edition. London. UK. 2022; Energy Institute. Statistical Review of World Energy. 2024. 73-Edition; Our World in Data. GCDL. 2024.

Рис. 1. Динамика потребления ископаемых ТЭР, 2000 г.= 100%

¹ Рассчитано по: Energy Institute. Statistical Review of World Energy. 2024. 73- Edition.

Высокая динамика потребления природного газа привела к увеличению его доли в мировом энергопотреблении с 21,7 до 23,3% (см. табл. 1). Рост абсолютного объема и доли этого высокоэффективного энергоресурса в глобальном потреблении ТЭР стало устойчивой тенденцией в XXI веке. Этот положительный тренд вполне объясним и обусловлен рядом факторов: хорошей и успешно развивающейся ресурсной базой, удобством использования и транспортировки, относительно невысокими капитальными затратами при создании генерирующих мощностей. Капитальные затраты на строительство электростанций на газе почти вдвое меньше по сравнению с угольными станциями аналогичной мощности. Использование природного газа позволяет также рационально решать многие экологические проблемы, обеспечивая увеличение производства энергии с невысоким экологическим риском и меньшими выбросами парниковых газов в атмосферу. Так, интенсивность выделения углерода при использовании природного газа примерно в 1,7 раза меньше по сравнению с углем и в 1,3 раза по сравнению с нефтью². Все эти преимущества сделали природный газ исключительно конкурентоспособным топливом практически во всех секторах энергетического хозяйства многих стран мира.

Таблица 1

**Структура глобального потребления первичной энергии,
по видам источников энергии, %**

Виды источников энергии	2000 г.	2010 г.	2020 г.	2023 г.
Ископаемое топливо	85,6	86,9	82,3	81,5
в том числе:				
– нефть	39,0	33,1	31,0	31,7
– уголь	24,9	29,5	26,8	26,5
– газ	21,7	23,7	24,5	23,3
Возобновляемые источники*	7,8	7,9	13,6	14,5
Ядерное топливо	6,6	5,2	4,3	4,0
Всего	100,0	100,0	100,0	100,0

* включая ГЭС.

Источник: рассчитано и составлено автором по: BP. Statistical Review of World Energy. 2022. 71-st Edition. London. UK. 2022; Energy Institute. Statistical Review of World Energy. 2024. 73-Edition; Our World in Data. GCDL. 2024.

Что касается угля, то динамика его потребления ненамного уступала темпу роста потребления природного газа. В 2000–2023 гг. она составила 166% (см. рис. 1). Однако в последнее десятилетие темпы

² Внешнеэкономический бюллетень. 2023. № 5. С. 26.

роста углепотребления замедлились, а в ряде стран потребление угля уменьшилось абсолютно; в результате – несмотря на значительный рост объема потребления угля, его доля в мировом энергопотреблении упала с 29,5% в 2010 г. до 26,5% в 2023 г. Особенно отчетливо тенденция к сокращению потребления угля проявилась в Великобритании, странах Северной Европы, странах Балтии, в США и Канаде. О своем намерении свертывания угольного бизнеса заявили Мексика, Новая Зеландия, Ангола и ряд других государств.

Вместе с тем в странах Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР), а также Африки потребление угля продолжало нарастать (особенно в Индии, Китае, Индонезии, Бангладеш, Филиппинах, Малайзии, Вьетнаме, Марокко). В 2021–2023 гг. в связи с изменением геополитической ситуации и нарастанием турбулентности на глобальном энергетическом рынке возрос интерес к этому энергетическому сырью и в ряде стран Европы (Болгарии, Германии, Италии, Нидерландах, Турции, Чехии и др.). Правительства более 50 стран приняли меры по усилению государственного вмешательства в энергетический сектор, используя инструменты прямого и опосредованного стимулирования производителей и потребителей угля. Результатом взаимодействия этих разновекторных трендов стало увеличение мирового потребления угля в этот период на 2,2%, обеспеченное, в основном, странами АТР. Так, углепотребление в 2021–2023 гг. в Китае приросло на 5%, Индии – на 14, Вьетнаме – на 11, Индонезии – на 57%. В итоге в 2023 г. удельный вес угля в мировом потреблении первичной энергии увеличился до 26,5% по сравнению с 24,9% в 2000 г. При этом существенно увеличили свою долю в потреблении угля страны АТР за счет снижения углепотребления в странах Европы. Наряду с Китаем, доля которого в мировом потреблении угля составляет 56%, крупными потребителями этого энергоносителя стали Индия, Индонезия, Вьетнам. Одна только Индия сегодня потребляет втрое больше этого энергоносителя, чем все страны Европы вместе взятые. Следует отметить и то, что стремительный рост потребления угля в энергетическом хозяйстве развивающихся стран пока еще в недостаточной мере сопровождается заменой устаревшего оборудования и внедрением передовых технологий сжигания угля, и это не позволяет улучшить показатели эффективности его использования, в том числе снизить удельный объем выбросов CO₂ в расчете на единицу потребляемой первичной энергии.

Глобальное потребление нефти в 2000–2023 гг. также нарастало, хотя скромнее чем потребление газа и угля. Темп роста ее потребления составил 127% (см. рис. 1). В последние годы, однако, мировое потребление нефти и нефтепродуктов снижается. Происходит это главным образом в наиболее развитых постиндустриальных странах и, отчасти, связано с использованием альтернативного автомобильного

топлива, развитием электротранспорта, а также переносом экологически неблагоприятных производств в развивающиеся страны с менее строгими экологическими стандартами. В то же время в развивающихся странах, по мере повышения благосостояния населения, роста его мобильности, развития дорожного транспорта, увеличения грузоперевозок, наблюдается иная тенденция – рост потребления нефти и нефтепродуктов. В 2013–2023 гг. наибольший рост нефтепотребления был характерен для стран Африки (среднегодовой темп прироста 1,2%) и АТР (1,6%), особенно Китая, Индии, Вьетнама, а наиболее заметное снижение потребления нефти наблюдалось в странах ЕС (в среднем на 0,4% ежегодно), которые, однако, остаются крупнейшими после США и Китая потребителями нефти. Тем не менее, несмотря на значительный рост абсолютных объемов потребления нефти, ее доля в мировом энергопотреблении в 2000–2023 гг. упала с 39,0 до 31,7%.

Атомная энергетика занимает важное место в мировом энергетическом хозяйстве, особенно в обеспечении населения и экономики электрической энергией. В последние десятилетия количество вырабатываемой электроэнергии АЭС остается относительно стабильным, при этом ее доля в общей выработке электроэнергии уменьшилась почти вдвое (до 9,1%). С 2000 г. введено в строй 90 новых реакторов, столько же выведено из эксплуатации. В результате количество ядерных реакторов в мире за два с половиной десятилетия практически не изменилось. В 2023 г. насчитывалось 413 действующих атомных реактора в 32 странах мира. Мировыми лидерами по установленной мощности и выработке энергии АЭС являются США, Китай и Франция. Примечательно, что быстрее всех в наращивании мощности в ядерной энергетике шагает Китай: в период 2000–2023 г. из суммарной вновь введенной мощности в этой отрасли на него пришлось 60%.

Таким образом, динамика потребления первичных энергоресурсов в 2000–2023 гг. складывалась в странах и регионах мира по-разному. Результатом взаимодействия разнонаправленных трендов стали изменения не только в объемах, но и в структуре глобального потребления первичной энергии (см. табл. 1).

Данные табл. 1 отражают характерную тенденцию последних десятилетий в структуре глобального энергопотребления – снижение доли ископаемого топлива в пользу возобновляемых источников. Следует, однако, отметить, что эта тенденция, обусловленная общественной необходимостью и усилиями мирового сообщества по адаптации к изменениям глобального климата, разворачивается при одновременном наращивании абсолютных объемов потребления ископаемого углеводородного топлива. Данные табл. 1 показывают, что в настоящее время потребности мировой экономики в первичной энергии на 32% удовлетворяются за счет нефти, 26% – угля, 23% –

природного газа, 15% – возобновляемых источников, 4% – ядерного топлива. Таким образом, можно констатировать, что, несмотря на позитивные сдвиги в структуре мирового потребления первичных энергоресурсов в пользу возобновляемых источников, львиная доля по-прежнему приходится на углеводородное сырье (свыше 80%). При этом наибольшее количество энергии мировое сообщество получает от использования наиболее углеродоемких энергоресурсов – нефти и угля.

Что касается ядерного топлива, то доля этого углероднейтрального энергоносителя в структуре первичного энергопотребления стран и регионов мира менялась с различной интенсивностью, однако в глобальном энергопотреблении вектор этих изменений отчетливо показывает ее неуклонное уменьшение с 6,6% в 2000 г. до 4,0% в 2023 г.

Энергопотребление и эмиссия двуокиси углерода

Перманентный рост глобального энергопотребления выступает не только ключевым императивом мирохозяйственного развития, но и мощным источником выбросов в атмосферу парниковых газов, в том числе двуокиси углерода (CO_2). По данным Международного энергетического агентства (МЭА) до 85% всех антропогенных выбросов этого газа связано с сжиганием ископаемого топлива.

Объем и динамика выбросов CO_2 , связанных с энергетикой, зависят от множества факторов, среди которых:

- количество потребленного топливо-энергетического ресурса (ТЭР). Наличие тесной, прямой корреляции между объемом энергопотребления и выбросами CO_2 на примере отдельных стран установлено в ряде исследований, выполненных отечественными и зарубежными учеными [5; 7; 9; 11; 12]. То есть, рост (снижение) объема потребления энергоресурсов при прочих равных условиях приводит к увеличению (уменьшению) выбросов углекислого газа;
- выход CO_2 на единицу потребленного энергоресурса (интенсивность выбросов углерода конкретным видом топлива). Выбросы CO_2 при сжигании топлива прямо пропорциональны содержанию в нем углерода. Содержание углерода в топливе является физико-химической характеристикой, присущей каждому конкретному виду топлива. Различные виды топлива имеют неодинаковое содержание углерода в расчете на единицу полезной энергии. Соответственно, и выход CO_2 на единицу потребленного ТЭР, выраженного в энергетических единицах, неодинаковый. Так, для угля этот показатель, рассчитанный в тоннах выбросов углерода на тонну условного топлива примерно в 1,3 раза больше, чем для нефти и в 1,7 больше, чем для природного газа; а для ядерного

- топлива и возобновляемых источников энергии он практически равен нулю. Можно говорить об индивидуальной интенсивности выбросов диоксида углерода (т. е. выход CO_2 на единицу потребления конкретного вида энергоресурса) и о совокупной интенсивности выбросов диоксида углерода (выход CO_2 на единицу полезной энергии от двух или более видов энергоресурсов);
- изменения в структуре энергопотребления. Структурные изменения, сопровождающие рост потребления энергоресурсов, сказываются на объеме выбросов CO_2 . Например, по мере расширения использования низкоуглеродного топлива или безуглеродных источников энергии может быть ослаблена связь между потреблением энергоресурсов и выбросами CO_2 , замедлена динамика и уменьшена валовая эмиссия двуокиси углерода в атмосферу. И, наоборот, повышение в структуре первичного энергопотребления доли энергоресурсов с высокой интенсивностью выбросов CO_2 генерирует тенденцию к увеличению прироста эмиссии этого парникового газа;
 - использование достижений науки и техники. Например, использование инновационных технологий сжигания угля позволяет повысить КПД электростанций на 10–12%, обеспечить более полное сжигание содержащегося в топливе углерода и уменьшить вредные выбросы. Внедрение технологий CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage – улавливания, использования и хранения углерода) на угольных ТЭС и заводах по переработке угля позволяет снизить выбросы CO_2 на этих объектах практически до нуля.

На объем и динамику выбросов CO_2 , связанных с энергетикой, воздействуют также такие факторы как: масштабы и темпы роста экономики, ее секторальная и отраслевая структура, численность населения и уровень его доходов, процессы урбанизации и развитие транспорта, экономическая политика и ее воплощение в энергетической и экологической политике, изменения цен на энергоносители, методы и инструменты глобального менеджмента по формированию условий для устойчивого развития мировой экономики [2; 3; 4; 6]. Эти и другие факторы оказывают различное, преимущественно опосредованное воздействие на выбросы CO_2 от использования углеводородов в энергетических целях. Главными же факторами прямого действия на эмиссию CO_2 от сжигания органического топлива являются масштабы потребления энергоресурсов и интенсивность выбросов углерода по каждому их виду.

В формализованном виде объем выбросов CO_2 (V) от использования в энергетических целях определенного вида ТЭР можно представить как произведение количества потребленного энергоресурса (q) на интенсивность выбросов CO_2 этого ресурса (y):

$$V = q * y$$

Сомножители в правой части уравнения рассматриваются как факторы, определяющие величину объема выбросов, а изменения последнего – как следствие изменений количества потребленных энергоносителей (количественный фактор) и интенсивности выбросов CO_2 по каждому их виду (качественный фактор). Суммарный годовой объем выбросов CO_2 , генерируемый всей совокупностью потребленных ТЭР, обозначим $\sum qy$. Обратимся к табл. 2.

Таблица 2

Первичное энергопотребление, удельная интенсивность выбросов CO_2 , годовая эмиссия CO_2 по видам энергоресурса

Энергоресурс	Первичное энергопотребление (тыс. ТВт·ч)*		Интенсивность выбросов CO_2 (кг CO_2 /кВт·ч)		Выбросы CO_2 (млрд т)	
	2000	2023	2000	2023	2000	2023
	q_0	q_1	y_0	y_1	V_0	V_1
Уголь	27,3	45,6	0,338	0,338	9,22	15,42
Нефть	43,1	54,6	0,239	0,235	10,28	12,83
Газ	24,0	40,1	0,197	0,195	4,72	7,86
Ядерное топливо	7,3	6,8	.....	.....	.....	.....
ВИЭ**	8,7	25,0	.....	.....	.....	.....
Всего	110,4	172,1	.....	.....	24,22	36,11

Примечание: 1ТВт·час = 1 млрд кВт·час

* Потребление первичных ТЭР включает все виды ископаемого топлива, которые используются для производства вторичной энергии (электрической и тепловой), либо затрачиваются в производственных процессах, а также энергию, выработанную ВИЭ; ** не включая традиционное биотопливо; *** интенсивность выбросов CO_2 рассматривается как количество CO_2 , выбрасываемого на единицу потребления первичной энергии (кг CO_2 /кВт·ч).

Источник: рассчитано и составлено автором по: BP. Statistical Review of World Energy. 2022. 71-st Edition. London. UK, 2022; Energy Institute. Statistical Review of World Energy. 2024. 73-Edition; Our World in Data GCDL. 2024.

Как показывают данные табл. 2, в 2000 г. глобальные выбросы CO_2 от энергетики составили 24,22 млрд т, из которых 38% (9,22 Гт) связаны с углем, 42% – с нефтью, 20% – являются результатом сжигания газа. В 2023 г. глобальные выбросы CO_2 от сжигания ископаемого топлива превысили 36 Гт (млрд т), при этом изменился вклад основных загрязнителей. Доля угля в глобальных выбросах CO_2 увеличилась до 43%,

доля нефти – уменьшилась до 36%, а вклад от сжигания газа изменился незначительно. Таким образом, в рассмотренный период (2000–2023 гг.) происходили изменения не только в количестве потребления первичных ТЭР, но менялась структура их потребления и интенсивность выбросов, что также оказывало влияние на динамику эмиссии CO_2 от энергетики.

Рассмотрим, как изменился объем валовой эмиссии CO_2 от использования всей совокупности первичных энергоресурсов в 2023 г. по сравнению с 2000 г. и определим влияние изменений количественного и качественного факторов на динамику и объем выбросов CO_2 . Для расчетов используем индексный метод статистического анализа и данные сводной табл. 2, составленной автором по обзорам и статистическим материалам Международного энергетического агентства (IEA), Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA), Лаборатории данных по глобальным изменениям (Our World in Data), компании British Petroleum и др.

Влияние изменений количественного фактора определим по формуле:

$$\Delta V_q = \Delta Q \bar{Y}_0, \quad (1)$$

где: ΔV_q – абсолютная величина изменения совокупного объема выбросов CO_2 под воздействием изменения суммарного количества потребленных ТЭР; ΔQ – прирост (снижение) суммарного количества потребленных ТЭР в 2023 г. по сравнению с 2000 г.; \bar{Y}_0 – средняя интенсивность выбросов CO_2 потребленными ТЭР в базисном (2000 г.) г.

По данным табл. 2 рассчитаем \bar{Y}_0 :

$$\begin{aligned} \bar{Y}_0 &= \sum q_0 y_0 : \sum q_0 = 24,22 : 110,4 = \\ &= 0,000219 \text{ т } \text{CO}_2 / \text{кВт}\cdot\text{ч} = 0,219 \text{ кг } \text{CO}_2 / \text{кВт}\cdot\text{ч}. \end{aligned} \quad (2)$$

Подставив полученные данные в формулу (1) и выполнив соответствующие расчеты получим:

$$\Delta V_q = (172,1 - 110,4) * 0,219 = 13,52 \text{ млрд т } \text{CO}_2. \quad (3)$$

Влияние изменений удельной интенсивности выбросов ТЭР (y) на объем совокупных выбросов двуокиси углерода в анализируемом периоде определим с помощью агрегатного индекса интенсивности выбросов (I_y), рассчитанному по правилам Пааше для качественных показателей:

$$I_y = \sum y_1 q_1 : \sum y_0 q_1. \quad (4)$$

Подставив в уравнение (4) данные из табл. 2 и выполнив соответствующие расчеты получим:

$$I_y = 36,11 : 36,23 = 0,997 \text{ или } 99,7\%. \quad (5)$$

Разность между числителем и знаменателем этого индекса даст нам абсолютную величину прироста (или уменьшения) суммарного объема выбросов CO_2 за счет изменения интенсивности выбросов углекислого газа потребленными ТЭР (ΔV_y):

$$\Delta V_y = 36,11 - 36,23 = -0,12 \text{ млрд т } \text{CO}_2. \quad (6)$$

Полученные результаты позволяют заключить, что в мировой экономике в последние два с половиной десятилетия интенсивность выбросов двуокиси углерода в сфере первичного энергопотребления снизилась на 0,3%. Это оказало позитивное влияние на формирование валовой эмиссии диоксида углерода в 2023 г., обеспечив уменьшение суммарной годовой эмиссии CO_2 от энергетики на 0,12 млрд т (120 млн т).

Влияние структурных изменений в потреблении первичных ТЭР на объем эмиссии CO_2 от энергетики определим с помощью индекса структурных сдвигов (I_s). Этот расчетный показатель может быть исчислен путем сопоставления объема выбросов, генерированных в результате потребления совокупного количества ТЭР в структуре их потребления 2023 г. при интенсивности выбросов от разных видов ресурсов на уровне 2000 г. ($\sum q_1 y_0$), с условным объемом выбросов, который был бы генерирован при потреблении суммарного объема ТЭР 2023 г. ($Q_1 = \sum q_1$), но в структуре потребления и интенсивности выбросов базисного (2000 г.) года. При сравнении этих двух величин мы элиминируем влияние изменений фактора масштаба (как такового) потребления первичных ресурсов и фактора изменений интенсивности выбросов. Таким образом, исчисленный показатель будет отражать «чистое» воздействие структурных сдвигов на изменение совокупного объема выбросов CO_2 от использования ТЭР в энергетических целях. В формализованном виде этот расчетный показатель можно записать:

$$I_s = \sum q_1 y_0 : \sum Q_1 s_0 y_0. \quad (7)$$

Выполнив соответствующие расчеты (см. табл. 3) получим: $I_s = 36,23 : 37,80 = 0,958$. Разница между числителем и знаменателем дроби отразит влияние структурных сдвигов в первичном энергопотреблении на формирование суммарного объема эмиссии CO_2 энергетическим сектором: $\Delta V_s = 36,23 - 37,80 = -1,57$ млрд т. То есть, структурные изменения в первичном энергопотреблении, происходившие в 2000–

**Исходные показатели для расчета индекса структурных сдвигов
в первичном энергопотреблении**

Вид источника	Структура первичного энергопотребления, 2000 г., %	Первичное энергопотребление 2023 г. в структуре 2000 г., тыс. ТВт·ч	Удельная интенсивность выбросов CO ₂ , 2000 г.	Выбросы CO ₂ в 2023 г., в структуре потребления ТЭР 2000 г., интенсивности выбросов 2000 г., млрд т
1	2	3	4	5
Уголь	24,9	42,7	0,338	14,43
Нефть	39,0	67,1	0,239	16,02
Газ	21,7	37,3	0,197	7,35
Ядерное топливо	6,6	11,4	...	...
ВИЭ	7,8	13,5	...	...
Всего	100,0	172,0 *	...	37,80

* отклонение этого суммарного показателя от соответствующего суммарного показателя в табл. 2 объясняется необходимыми округлениями расчетных величин.

Источник: рассчитано и составлено автором по: BP. Statistical Review of World Energy. 2022. 71-st Edition. London. UK.2022; Energy Institute. Statistical Review of World Energy. 2024. 73-Edition; Our World in Data GCDL. 2024.

2023 гг. в мировой энергетике, оказывали сдерживающее влияние на формирование суммарного объема выбросов CO₂. В абсолютном исчислении влияние это было невелико и составило 1, 57 млрд т.

Актуальным направлением декарбонизации мировой энергетики становится внедрение технологий CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage – улавливания, использования и хранения углерода) на угольных ТЭС и заводах по переработке угля в химикаты. Эти инновационные технологии включают улавливание углекислого газа при сжигании топлива стационарными источниками, очистку и транспортировку уловленного газа, использование его для производства полезных продуктов или захоронение в геологических пластах. Технологии CCUS, по мнению авторитетных специалистов, позволяют снизить выбросы CO₂ на предприятиях, работающих на угле, практически до нуля. Однако разработка, установка и обслуживание этих технологий требуют больших затрат. В цементной промышленности, например, инвесторам это обойдется в 200 долл./т CO₂, в энергетическом секторе – до 270–290 долл./т CO₂ [1]. Высокая стоимость строительства и эксплуатации являются главным препятствием для широкого распространения этих технологий.

К 2024 г. в мире CCUS-технологии были установлены на 45 объектах, суммарная мощность улавливания CO₂ этих установок составляла около 50 млн т CO₂ в год. Это вдвое больше уровня 2013 г., однако говорить о существенном вкладе CCUS-технологий в декарбонизацию мировой энергетики пока преждевременно. Нетрудно подсчитать, что даже при полной нагрузке установленные мощности CCUS -технологий могут захватить не более 0,14% годового объема выбросов CO₂ от сжигания ископаемого топлива (ΔV_c).

Более 80% установленной мощности CCUS-технологий сосредоточены всего в пяти странах, в том числе: 40,9% в США; 19,3 – Бразилии; по 7,3% в Канаде и Австралии; 6,4% в Китае. Примечательно, что наибольший вклад в декарбонизацию энергетики эти технологии вносят в Бразилии, обеспечивая улавливание и нейтрализацию 2,35% суммарных выбросов CO₂ от сжигания ископаемого топлива. В США доля уловленного этими инновационными технологиями углекислого газа от сжигания ископаемого топлива в 2023 г. составила 0,48% суммарного объема выбросов CO₂ связанного с энергетикой, в Китае – 0,03%, а в странах ЕС (вместе взятых) – всего 0,028%³.

Резюмируя, можно отметить, что объем эмиссии двуокиси углерода от энергетической деятельности формируется под влиянием различных факторов. Среди факторов прямого воздействия на динамику и объем эмиссии доминантой выступает количество потребления первичной энергии. Сдерживающее влияние на выбросы оказывают изменения в структуре потребляемых ТЭР (проявлением которых является опережающий рост и увеличение доли низкоуглеродных и безуглеродных энергоносителей в мировом потреблении первичной энергии), а также снижение интенсивности выбросов потребляемых ТЭР. Свой вклад в уменьшение эмиссии диоксида углерода от энергетики вносят технологии CCUS. Однако сдерживающее влияние структурного фактора, фактора интенсивности и технологий CCUS на формирование выбросов CO₂ в глобальной энергетике недостаточно велико. Совокупное позитивное влияние изменений этих факторов (при неизменности прочих) сдержало гипотетический прирост выбросов CO₂, обусловленный ростом потребления первичных ТЭР (13,52 млрд т) на 1,70 млрд т ($\Delta V_s + \Delta V_y + \Delta V_c$) или на 13%.

³ Рассчитано автором по: Energy Institute. Statistical Review of World Energy. 2024. 73-Edition; Our World in Data. GCDL. 2024.

Перспективы декарбонизации мировой энергетики

В настоящее время нет недостатка в прогнозах развития мировой энергетики в XXI в. Международными организациями, коллективами ведущих ученых и экспертов разных стран разработано и обнародовано около сотни прогнозных сценариев трансформации мировой энергетики с учетом глобальной климатической повестки и согласованных странами мира мер по ее реализации.

В октябре 2024 г. Международное энергетическое агентство опубликовало новый обзор мировой энергетики, в котором представлены три сценария развития отрасли⁴. В первом из предложенных сценариев, получившем название сценария заявленных политик (Stated Policies Scenario – STEPS), дана развернутая картина развития энергетического сектора на основе анализа современного состояния мирового энергетического рынка, программ по развитию энергетики и мер, принимаемых в странах мира для реализации сформулированных в этих документах целей и задач.

Второй, так называемый сценарий объявленных обязательств (Announced Pledges Scenario – APS), построен на основе прогнозов развития отрасли с учетом намерений и обязательств стран по трансформации энергетического сектора и исходя из того, что все обязательства будут выполнены в полном объеме и в установленные сроки. Третий вариант прогноза – сценарий нулевых выбросов (Net Zero Emissions – NZE), разработан с учетом мер и затрат, необходимых, по мнению составителей прогноза, для сдерживания повышения температуры на планете в рамках 1,5°C.

По сценарию STEPS рост мирового потребления первичной энергии к 2050 г. составит 112,4%, согласно сценарию APS к 2050 г. объем глобального потребления первичной энергии существенно не изменится, по сценарию NZE в 2050 г. совокупное потребление первичной энергии составит 0,879 от уровня 2023 г. (то есть уменьшится на 12,1%).

Во всех трех сценариях предполагается сохранение опережающего роста потребления ВИЭ. В результате доля ВИЭ в первичном энергопотреблении возрастет до 33–71%, в зависимости от сценария. Доля ядерного топлива в глобальном потреблении первичных ТЭР, согласно прогнозам, составит от 7% (в сценарии STEPS) до 14% (по сценарию NZE). Удельный вес ископаемых углеводородов в структуре первичного энергопотребления уменьшится с нынешних 80 до 58% в сценарии STEPS, а в сценарии NZE до 15% (см. табл. 4). Выбросы CO₂ от мировой энергетики, по расчетам составителей прогнозов МЭА,

⁴ World Energy Outlook 2024. IEA. 2024.

**Прогнозные варианты структуры потребления первичной энергии
на 2050 г., разработанные МЭА и компанией BP, %**

Вид энергоресурса	Международное энергетическое агентство			Компания BP	
	STEPS	APS	NZE	Current Trajectory	NZE
ВИЭ	33	53	71	30	63
Ядерное топливо	7	11	14	2	5
Газ	21	14	5	27	15
Нефть	24	16	7	23	12
Уголь	13	6	3	17	5
Прочие	2	0	0	1	0
Всего	100	100	100	100	100

Источник: составлено автором по: World Energy Outlook. 2024. IEA. 2024; BP Energy Outlook. 2024.

к 2030 г. уменьшатся в зависимости от сценария на 6–12 мегатонн по сравнению с 2023 г., и к 2050 г. могут быть сведены на нет.

В 2024 г. компания British Petroleum представила обновленный вариант прогноза развития мировой энергетики до 2050 г., включающий два сценария: Current Trajectory и NZE⁵. Развитие по первому сценарию предполагает прирост потребления первичной энергии к 2050 г. на 6 %, развитие мировой энергетики по второму сценарию позволит снизить потребление энергоресурсов на 28% по сравнению с сегодняшним уровнем. Структура потребления ТЭР к 2050 г. в зависимости от сценария будет иметь существенные различия. Согласно первому сценарию, сложится следующая структура потребления первичных энергоресурсов: ВИЭ – 30%, ядерное топливо – 2, нефть – 23, газ – 27, уголь – 17%. Развитие по сценарию NZE приведет к формированию структуры первичного энергопотребления, где доля углеводородов будет вдвое меньше, а ВИЭ – вдвое больше: ВИЭ – 63%, ядерное топливо – 5, нефть – 12, газ – 15, уголь – 5% (см. табл. 4). По расчетам составителей прогноза, реализация сценария Current Trajectory позволит сократить выбросы CO₂ к 2050 г. не более чем на 25%; тогда как реализация сценария NZE даст возможность сократить выбросы CO₂ от энергетики на 95%.

⁵ BP Energy Outlook.2024.

В трех прогнозных сценариях, представленных в 2024 г. учеными Института энергетических исследований РАН, об отказе использования ископаемого топлива и речи не идет. В ближайшие десятилетия ископаемые энергоресурсы, по мнению ученых, останутся одними из наиболее экономически доступных источников энергоснабжения. Доля ископаемых углеводородных ТЭР (нефти, угля и газа) в структуре мирового энергопотребления к 2050 г. определена в пределах 65–73%, а доля ВИЭ и ядерного топлива составит, по расчетам ученых, 35–27% в зависимости от варианта развития [6].

В обнародованных прогнозах даются различные оценки темпов трансформации мировой энергетики и адаптации ее к изменениям глобального климата. Значительный разброс показателей наблюдается и в оценке структурных сдвигов в потреблении первичных энергоресурсов. В то же время представления основных направлений и ключевых тенденций формирования низкоуглеродной энергетики в большинстве опубликованных прогнозов схожие:

- темпы потребления углеводородных ТЭР будут неуклонно снижаться. В результате к 2050 г. их доля в глобальной структуре первичного энергопотребления существенно уменьшится (по нефти и газу вдвое, по углю более чем втрое);
- тенденция опережающего роста возобновляемой энергетики в мировом энергетическом хозяйстве сохранится. Соответственно, удельный вес ВИЭ в мировом энергобалансе будет увеличиваться;
- суммарная установленная мощность возобновляемой энергетики в мире возрастет втрое;
- рост генерирующего потенциала в отрасли будет опираться на инвестиции частного бизнеса, поддержанные государственными субсидиями, налоговыми льготами и преференциями;
- выполнение намеченных ориентиров по трансформации структуры энергопотребления потребует масштабных инвестиций. По оценкам экспертов Международного агентства по возобновляемым источникам энергии, для решения задач, позволяющих ограничить рост температуры на планете на уровне 1,5° С, потребуется инвестировать в 2024–2030 гг. в глобальный энергетический сектор 47 трлн долл., в том числе на ВИЭ-генерацию 10,7 трлн долл.⁶ Это значит, что ежегодный приток инвестиций в глобальный энергетический сектор должен возрасти вдвое, а в сектор ВИЭ – в 2,5 раза;
- составители прогнозов единодушны и в том, что высокие затраты капитала на освоение ВИЭ сдерживают инвестиционные проекты по развитию соответствующей инфраструктуры во многих разви-

⁶ World Energy Transition Outlook 2024. IRENA. 2024.

вающихся государствах, которым необходимо оказать значительную финансовую и технологическую помощь.

При схожести в оценках разработчиками прогнозов основных направлений развития мировой энергетики на грядущие десятилетия, можно отметить и некоторые нюансы в видении общей картины ее будущей структуры.

В сценариях, разработанных зарубежными специалистами, как правило, дается более оптимистичная картина замещения углеводородов возобновляемыми источниками. В результате в структуре первичного энергопотребления к 2050 г. роль ВИЭ в мировой энергетике представляется более значительной, а доля нефтегазовых ресурсов и угля более скромной, чем в прогнозах российских исследователей. Согласно прогнозным сценариям МЭА, например, доля ВИЭ в структуре мирового потребления первичных энергоресурсов к 2050 г. составит от 31 до 73%. Такое прогнозное видение места ВИЭ в структуре мирового потребления первичных энергоресурсов вызывает определенные сомнения. Они возникают не только потому, что разброс значений в оценке ключевого структурного показателя свидетельствует о неопределенности прогноза, который в данной части скорее можно рассматривать как научное обрамление собственных пожеланий разработчиков. И не только потому, что замещение традиционных источников энергии возобновляемыми во многих странах наталкивается на целый ряд технических, административных, экономических барьеров. Но и потому, что отнюдь не все звенья производственной цепочки «зеленой» энергетики являются дружелюбными к окружающей среде [2; 3; 10].

Трудно также безоговорочно согласиться с незначительной ролью атомной энергетики в прогнозах западных экспертов. Действительно, сегодня атомная энергетика не считается главным инструментом адаптации к климатическим изменениям, однако она остается важным компонентом энергетической политики многих стран мира на пути к низкоуглеродной инновационной энергетике. И хотя немало стран по-прежнему придерживаются курса на отказ от ядерной энергетики, ссылаясь на масштабные капиталовложения, необходимые для строительства АЭС, длительные сроки окупаемости затрат, высокие технологические риски, возросшие угрозы террористических актов, проблемы хранения отработанного топлива и демонтажа отслуживших свой срок АЭС и др., тем не менее отношение к АЭС меняется.

В последние годы ряд стран (в том числе США, Канада, Великобритания, Франция, Нидерланды, Польша, Китай, Индия) инициировали новые меры по организационной и финансовой поддержке ядерной энергетики, некоторые из них начали осуществлять программы развития ядерной энергетики. Так, президент Франции Э. Макрон

в феврале 2022 г. объявил о планах строительства с 2028 г. шести новых больших реакторов (с финансированием 50 млрд евро) и возможном увеличении этого количества до восьми реакторов к 2050 г. В Польше, согласно вновь разработанной программе развития атомной энергетики страны на 2020–2033 гг., предполагается строительство и ввод в эксплуатацию атомных электростанций мощностью от 6 до 9 ГВт⁷.

Что касается угля, то он остается основой энергетики многих развивающихся стран, прежде всего государств АТР и Африки. Благодаря этому энергетическому сырью многие крупные страны мира (Китай, Индия, Индонезия, Вьетнам, Бангладеш, Филиппины и др.) обеспечивают свою независимость от конъюнктурных колебаний мирового рынка, решают насущные проблемы занятости, образования, здравоохранения, продовольственной безопасности и другие задачи по формированию предпосылок для устойчивого развития. Мировые залежи угля намного превышают запасы нефти и газа, и в этом смысле потенциал рынка угля не уступает мировому рынку нефти и газа в качестве ресурса рациональной диверсификации глобального потребления первичных ТЭР. Важно заметить и то, что в энергетической политике не только развивающихся государств, но и многих постиндустриальных стран соображения безопасности приобретают все больший удельный вес [8], и, как показала 29 конференция ООН по климату (ноябрь 2024 г., Баку), берут верх над обязательствами по адаптации к изменениям глобального климата. В связи с этим представляется, что перспективы развития мирового рынка угля во многом будут зависеть от политических решений в отношении потребления этого энергоресурса в КНР и Индии, на которые приходится 70% мирового потребления угля.

Контуры будущего нефтегазового сектора в сценариях западных и российских аналитиков также представляются различными. Например, пик потребления нефти в сценариях российских исследователей прогнозируется не ранее 2035 г. или даже 2050 г. Сценарии западных экспертов на этот счет менее оптимистичные. Так, прогнозные оценки МЭА предполагают пик потребления нефти в самые ближайшие годы. Послелепиковое снижение потребления нефти связывают с модернизацией транспорта (распространением электротранспорта), совершенствованием отраслевой и секторальной структуры в развивающихся странах по мере формирования постиндустриального общества.

Действительно, в некоторых развитых странах с постиндустриальной структурой экономики в последние годы наблюдается уменьшение нефтепотребления. Однако эти страны неизменно остаются крупнейшими потребителями нефти в расчете на душу населения. Показа-

⁷ Monitor Polski. 2.10. 2020.

тельно, что в наиболее развитых странах процесс воспроизводства совокупного капитала основан на крупномасштабном потреблении такого первичного энергоресурса как нефть. Так, инновационная экономика США и благосостояние американских граждан основывается, в частности, на максимальных объемах потребления нефти – свыше 21 барреля в год в расчете на одного жителя. Аналогичная картина в Канаде, где ежегодное потребление нефти составляет 25 баррелей в расчете на жителя. В странах ЕС-27 ежегодное потребление нефти составляет 10–20 баррелей в расчете на каждого жителя. Примечательно, что в одной из самых инновационных экономик мира – Сингапуре, потребление нефти превышает 88 баррелей в год в расчете на душу населения. Это в 50 больше чем во Вьетнаме, в 75 раз больше чем в Индии, в 150 раз больше чем в Узбекистане или Зимбабве. Таким образом, мировой опыт показывает, что переход к постиндустриальному обществу существенно не умаляет роль нефти в первичном энергопотреблении. Если при этом учесть, что доля электромобилей в «мировом автопарке» весьма невелика (2,1%), то утверждения о пике нефтепотребления в ближайшие годы представляются несколько опрометчивыми.

В настоящее время почти $\frac{3}{4}$ стран мира являются чистыми импортерами энергетического сырья. Так, страны ЕС испытывают дефицит нефти и газа с 80-х годов XX в. И сегодня они покрывают свои потребности в нефти за счет собственной добычи лишь на 23%, в газе на 44%. Многие десятилетия чистым импортером ископаемого топлива являются страны Азиатско-Тихоокеанского региона, покрывая за счет импорта свои потребности в нефти на 80%, в газе – на 25%. Успешное функционирование крупнейших экономик этого региона во многом зависит от поставок продукции нефтегазового сектора из-за рубежа. И зависимость эта неуклонно растет. Так, для Китая коэффициент зависимости от нефти, определяемый как отношение чистого импорта к объему потребляемой нефти, в 2000 г. составлял менее 30%, в 2007 г. он увеличился до 50%, а в 2023 г. Китай импортировал 75% потребляемой нефти. Зависимость индийской экономики от импорта нефти еще больше (коэффициент зависимости превышает 90%)⁸.

Отмеченную тенденцию роста импорта в потреблении можно наблюдать и в отношении других товарных групп, однако есть принципиальная разница. Если та или иная страна является нетто-импортером каких-то средств производства или предметов потребления, то существует шанс, что со временем она может стать производителем этих товаров или их заменителей. В случае же с первичными источниками энергии такого шанса большинство стран не имеет. В сло-

⁸ Внешнеэкономический бюллетень. 2003. № 5. С. 28; Energy Institute. Statistical Review of World Energy. 2024. 73 – Edition.

жившейся глобальной энергетической системе (с доминированием ископаемого топлива) эта проблема решается путем международной торговли энергетическим сырьем. В глобальной энергетической системе, базирующейся на ВИЭ, отсутствие в стране потенциала для развития ВЭИ (энергии ветра, солнечного излучения, больших земельных площадей для солнечных или ветровых электростанций и др.) является более сложной проблемой, чем отсутствие ископаемых энергоресурсов.

Развитие мирового энергетического хозяйства в контексте глобальной климатической повестки, наращивание доли ВИЭ в условиях «свертывания» традиционной энергетики и маргинализации АЭС генерирует новые вызовы, связанные, в том числе, с усилением зависимости от ВИЭ-технологий и редкоземельных металлов (РЗМ), уникальные свойства которых делают их незаменимыми в производстве оборудования и комплектующих для ветроэнергетики, солнечной энергетики, атомной энергетики, аккумуляторов для электромобилей, электросберегающих ламп, жидкокристаллических дисплеев телевизоров, ноутбуков и целого ряда других высокотехнологичных продуктов. Примечательно, что добыча руд и производство РЗМ концентрированы в большей степени, чем традиционные энергоресурсы (нефть, газ, уголь). Так, в 10 странах-крупнейших производителях нефти концентрировано 67% производства этого энергоресурса, топ-10 стран – производителей природного газа концентрируют 72% его добычи. Тогда как 80% мировой добычи редкоземельных металлов сконцентрировано всего в двух странах – Китае (68%) и США (12%).

В связи с этим можно констатировать, что ускоренное развитие «зеленой» энергетики, замещение ископаемого топлива возобновляемыми источниками энергии оказывает позитивное (пока незначительное) влияние на выбросы CO₂, сдерживая их валовой объем; содействует росту «домашнего» энергопроизводства; дает возможность уменьшить зависимость от импорта ископаемых энергоресурсов. Вместе с тем, углубление и нарастание этой тенденции сужает возможности диверсификации энергопотребления и географической структуры импорта энергоносителей, содействует ослаблению энергобезопасности для многих стран, усиливает их зависимость от «зеленых» технологий генерации и высококонцентрированных рынков соответствующих компонентов и сырья.

Заключение

Глобальное потребление первичной энергии демонстрирует долговременную положительную динамику, формируя условия для поступательного развития мировой экономики и роста благососто-

яния населения, выступая при этом мощным источником выбросов в атмосферу диоксида углерода, концентрация которого ведет к нежелательным изменениям глобального климата и снижению качества жизни людей, несмотря на рост благосостояния.

Ключевым направлением разрешения противоречий между позитивными и негативными эффектами роста глобального энергопотребления стала трансформация энергетического сектора, осуществляемая за счет перехода к широкому использованию ВИЭ и замещению традиционных ТЭР безуглеродными энергоносителями.

Поддержка государства и щедрые инвестиции бизнеса обеспечили в истекшую четверть века ускоренное развитие возобновляемой энергетики и структурные сдвиги в глобальном энергопотреблении в пользу ВИЭ. Снизилась интенсивность выбросов от использования ТЭР в энергетических целях.

Структурные сдвиги в энергопотреблении и сокращение выбросов двуоксида углерода на единицу потребляемой энергии (удельной интенсивности выбросов) оказывают позитивное влияние на переход к экологически дружелюбной мировой энергетике, сдерживая динамику эмиссии двуоксида углерода от использования ТЭР в энергетических целях. Свой вклад в уменьшение эмиссии углерода от энергетики вносят технологии CCUS.

Однако общее позитивное влияние структурного фактора, CCUS-технологий и фактора интенсивности выбросов на формирование объема выбросов CO₂ недостаточно велико, чтобы существенно снизить эмиссию этого газа, генерируемого мировой энергетикой.

Несмотря на определенный прогресс в направлении к декарбонизации, мировая энергетика по-прежнему имеет структуру потребления ТЭР, не отвечающую требованиям устойчивого развития, о чем свидетельствует продолжающийся рост выбросов CO₂ от энергетики.

Ситуация осложняется глобальной тенденцией перераспределения потребления первичной энергии между регионами мира в пользу развивающихся стран. Если в 1950 г. на развивающиеся страны приходилось всего 6% мирового потребления первичной энергии, в 2000 г. – 34%, то сегодня – более 50%.⁹ При этом в развивающихся странах, которые в предстоящие десятилетия в основном и будут обеспечивать мировой экономический рост, структура энергопотребления еще долго будет оставаться наименее эффективной и неблагоприятной с экологической точки зрения. При всей важности проблема изменения глобального климата не является для большинства развивающихся стран главной и решается в этих государствах последовательно наряду с комплексом других не менее насущных

⁹ Там же. С. 26.

социально-экономических проблем: продовольственной, здравоохранения, образования, энергетической безопасности и др. Возобновляемые источники не могут в полной мере обеспечить растущие энергетические потребности стран для решения этих проблем. Без использования ископаемых энергоресурсов здесь не обойтись. В этих условиях трансформация глобального энергетического сектора в направлении декарбонизации требует более полного использования достижений науки и техники, в том числе в традиционной энергетике, расширения качественного многоуровневого сотрудничества между странами, повышения значимости взаимных консультаций и договоренностей в области энергетики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ветрова М.А. CCUS – технологии: потенциал и ограничения формирования сектора улавливания, хранения и использования CO₂ в РФ // *Инновации*. 2022. № 5. С. 16–25. DOI: 10.26310/2071-3010.2022.284.5.003.
2. Иктисанов В., Шкруднев Ф. Декарбонизация: взгляд со стороны // *Энергетическая политика*. 2021. № 8. С. 42–52.
3. Клавдиенко В.П. Возобновляемая энергетика Китая: тенденции, новации, перспективы // *Вестник Института экономики Российской академии наук*. № 4. 2023. С. 134–156. DOI: 10.52180/2073-6487_2023_4_134_156. EDN: MSKMFO.
4. Коданева С.И. Энергетический переход: мировые тренды и их последствия для России // *Контурсы глобальных трансформаций: политика, экономика, право*. 2022. Т. 15. № 1. С. 167–185. DOI: 10.23932/2542-0240-2022-15-1-8.
5. Колб О. Д., Ван Цян. Энергопотребление в Китае: динамика, основные драйверы и последствия // *Белорусский экономический журнал*. 2023. № 4. С. 44–60. DOI: 10.46782/1818-4510-2023-4-44-60.
6. Кулагин В.А., Грушевенко Д.А., Галкина А.А. Прогноз развития энергетики мира и России до 2050 г. // *Современная мировая экономика*. Т. 2. 2024. № 1 (5). С. 6–22. DOI: 10.17323/2949-5776-2024-2-1-6-22.
7. Маркелов К.А., Зволинский В.П., Половых С.О. Взаимодействие энергетики и экономики в условиях глобализации // *Каспийский регион: политика, экономика, культура*. 2014. № 3. С. 145–155.
8. Kim J., Pantan A. J., Schwerhoff G. Energy Security and the Green Transition // *IMF*. Jan. 2024. P. 34.
9. Rauf A., Zhang J., Li J., Amin W. Structural Changes, Energy Consumption and Carbon Emission in China // *Structural change and Economic Dynamics*. Vol. 47. December 2018. Pp. 194–206. DOI: 10.1016/j.strueco.2018.08.010.
10. Sobolewski A., Czaplicki A. CO₂ emission – civilization’s progress or investment inhibiting factor // *Chemik*. 2013. Vol. 67. No. 5. Pp. 387–398.
11. Tol R. The economic effects of climate change // *Journal of economic perspectives*. 2009. Vol. 23. No. 2. Pp. 29–51. DOI: 10.1257/jep. 23.2.29.
12. Zhang X., Cheng X.-M. Energy Consumption, Carbon Emissions and Economic Growth in China // *Ecological Economics*. 2009. Vol. 68. Iss. 10. Pp. 2706–2712. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2009.05.011.

REFERENCES

1. *Vetrova M.A.* CCUS-technologies: potential and Limitations of the Formation of the CO₂ Captures, Storage and Use Sector in the Russian Federation // *Innovation*. 2022. No. 5. Pp. 16–25. DOI: 10.26310/2071-3010.2022.284.5.003. (In Russ.).
2. *Iktisanov V., Shkrudnev F.* Decarbonization: outside view // *Energy Policy*. 2021. No. 8. Pp. 42–52. (In Russ.).
3. *Klavdienko V.P.* Renewable energy in China: Trends, Innovations, Prospects // *Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*. 2023. No. 4. Pp. 134–156. DOI: 10.52180/2073-6487_2023_4_134_156; EDN: MSKMFO. (In Russ.).
4. *Kodaneva S.* Global Trends in the Transition to a Carbon-free Economy // *Outlines of Global Transformations: politics, economics, law*. 2022. Vol. 15. No. 1. Pp. 167–185. DOI: 10.23932/2542-0240-2022-15-1-8. (In Russ.).
5. *Kolb O., Wang Qiang.* 2023. Energy Consumption in China: Dynamics, Main Drivers and Consequences // *Belarusian Economic Journal*. 2023. 4. Pp. 44–60. DOI: 10.46782/1818-4510-2023-4-44-60. (In Russ.).
6. *Kulagin V., Grushevenko D., Galkina A.* (2024), Global and Russian Energy Outlook up to 2050 // *Contemporary world economy*. Vol. 2. No. 1. Pp. 6–22. DOI: 10.17323/2949-5776-2024-2-1-6-22. (In Russ.).
7. *Markelov K., Zvolinskij V. Polovykh S.* International Energy and Economy in the Context of the Globalization // *The Caspian Region: Politics, Economics, Culture*. Iss. 2014. No. 3. Pp. 145–155. (In Russ.).
8. *Kim J., Panton A. J., Schwerhoff G.* Energy Security and the Green Transition // *IMF*. Jan. 2024. P. 34.
9. *Rauf A., Zhang J., Li J., Amin W.* Structural Changes, Energy Consumption and Carbon Emission in China // *Structural change and Economic Dynamics*. 2018. December. Vol. 47. Pp. 194–206. DOI: 10.1016/j.strueco.2018.08.010.
10. *Sobolewski A., Czaplinski A.* CO₂ emission- civilization`s progress or investment inhibiting factor // *Chemik*. 2013. Vol. 67. No. 5. Pp. 387–398.
11. *Tol R.* The economic effects of climate change // *Journal of economic perspectives*. 2009. Vol. 23. No. 2. Pp. 29–51. DOI: 10.1257/jep.23.2.29.
12. *Zhang X., Cheng X.-M.* Energy Consumption, Carbon Emissions and Economic Growth in China // *Ecological Economics*. 2009. Vol. 68. Iss. 10. Pp. 2706–2712. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2009.05.011.

Дата поступления рукописи: 09.01.2025 г.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Клавдиенко Виктор Петрович – доктор экономических наук, доцент, ведущий научный сотрудник экономического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

ORCID: 0000-0001-5929-2755

viklav8@mail.ru

ABOUT THE AUTHOR

Viktor P. Klavdienko – Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor, Leading Researcher, Faculty of Economics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0001-5929-2755

viklav8@mail.ru

STRUCTURAL CHANGES IN PRIMARY ENERGY CONSUMPTION
AS A FACTOR IN DECARBONIZATION OF THE GLOBAL ENERGY

The analysis of the scale and dynamics of consumption of various types of primary energy sources in the global economy over a long-term period is carried out. The volumes and dynamics of carbon dioxide emissions generated as a result of consumption of various types of primary energy sources are studied. The influence of changes in the scale of consumption of various types of resources, their specific carbon intensity, as well as structural shifts in the global economic consumption of primary energy resources on the volume of carbon dioxide emissions into the atmosphere is considered and quantified. The prospects for the transformation of the global structure of primary energy consumption are presented in the context of the global climate agenda and forecast scenarios for the development of global energy.

Keywords: *energy consumption, structural changes, decarbonization, global economy, sustainable development.*

JEL: F01, F63, Q48, Q52.