

Состояние топливно-энергетического комплекса России и пути развития в условиях четвертого энергетического перехода

М.Ю. Мокшин¹М.Г. Жабицкий¹О.Н. Римская²¹ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ (Москва, Россия)² Федеральный реестр экспертов научно-технической сферы РФ (Москва, Россия)

Аннотация

Мировое производство электроэнергии растет с ростом населения планеты, развития технологий и потребностями в электроэнергии населения и промышленности в условиях энергетического кризиса. Ускоренная электрификация стала основным трендом энергетического перехода в конечном потреблении энергоресурсов. Решая климатические задачи зеленой повестки, мировая энергетика подошла к четвертому энергетическому переходу, ориентируясь на приоритетную генерацию энергии из ВИЭ-источников. Перед странами мира встали наиболее актуальные задачи: аккумулирование и резервирование выработанной энергии для дальнейшего распределения и взвешенное планирование схемы размещения объектов выработки энергии в соответствии с территориальными особенностями, потребностями экономики и иными факторами с учетом нормированной себестоимости единицы энергии, получаемой из возобновляемых и невозобновляемых источников. В обзоре использованы результаты исследований российских и зарубежных ученых, в том числе авторов исследования. Рассмотрены мировая энергетическая система и энергосистема России с точки зрения стоимости энергии по видам источников.

Ключевые слова: мировая энергетика, топливно-энергетический комплекс России, четвертый энергетический переход, ископаемые источники энергии, возобновляемые источники энергии.

Для цитирования:

Мокшин М.Ю., Жабицкий М.Г., Римская О.Н. (2025). Состояние топливно-энергетического комплекса России и пути развития в условиях четвертого энергетического перехода. *Стратегические решения и риск-менеджмент*, 16(1): 55–68. DOI: 10.17747/2618-947X-2025-1-55-68.

The state of the Russian fuel and energy complex and development paths in the context of the fourth energy transition

M.Y. Mokshin¹M.G. Zhabitskii¹O.N. Rimskaya²¹ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russia)² Federal Register of the Scientific and Technical Sphere of the Russian Federation (Moscow, Russia)

Abstract

Global electricity production is increasing as a result of population growth, technological development and the demand for electricity by people and industry in the context of the energy crisis. Accelerated electrification has become the main energy transition trend in the final use of energy resources. In response to the climate challenges of the green agenda, the global energy industry has embarked on the fourth energy transition, focusing on prioritizing renewable energy generation. The countries of the world are faced with the most urgent tasks: accumulation and reservation of generated energy for further distribution, and balanced planning of the location of energy generation facilities, taking into account territorial features, economic needs and other factors, taking into account the normalised cost of a unit of energy obtained from renewable and non-renewable sources. The review used the research results of Russian and foreign scientists, including the authors of the study. The world energy system and the Russian energy system are considered in terms of the cost of energy by type of sources.

Keywords: world energy, fuel and energy complex of Russia, fourth energy transition, fossil energy sources, renewable energy sources.

For citation:

Mokshin M.Y., Zhabitskii M.G., Rimskaya O.N. (2025). The state of the Russian fuel and energy complex and development paths in the context of the fourth energy transition. *Strategic Decisions and Risk Management*, 16(1): 55-68. DOI: 10.17747/2618-947X-2025-1-55-68. (In Russ.)

Таблица 1
Баланс электроэнергетики ЕЭС России и объемы потребности и потребления, 2019–2025 годы
Table 1
Electricity balance of Russia's unified energy system, demand and consumption volumes, 2019–2025

Наименование	Единица измерения	Прогноз						
		2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Потребление электроэнергии	млрдкВт•ч	1032,8	1050,3	1081,5	1071,5	1081,3	1093,8	1097,2
в том числе заряд ГАЭС	млрдкВт•ч	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71
экспорт	млрдкВт•ч	11,63	11,68	11,82	11,85	11,98	11,98	11,08
импорт	млрдкВт•ч	1,19	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
Потребность в электроэнергии	млрдкВт•ч	1042,9	1060,6	1071,8	1081,9	1091,9	1104,4	1107,8
Производство электроэнергии, всего	млрдкВт•ч	1042,9	1060,6	1071,8	1081,9	1091,9	1104,4	1107,8
ГЭС	млрдкВт•ч	153,5	170,5	170,5	170,6	170,7	170,8	170,8
АЭС	млрдкВт•ч	202,8	198,5	199,8	197,2	196,5	201,3	198,9
ТЭС	млрдкВт•ч	685,12	687,33	695,3	706,2	715,4	722,2	727,99
ВЭС, СЭС	млрдкВт•ч	1,58	4,35	6,14	7,9	9,21	10,12	10,12
Установленная мощность, всего	МВт	236 828	235 879	234 320	235 400	237 031	237 246	235 803
ГЭС	МВт	45 304	45 394	45 475	45 525	45 576	45 591	45 598
АЭС	МВт	30 282	29 282	29 432	29 432	30 632	30 832	29 382
ТЭС	МВт	15 8840	157 866	155 175	155 518	155 401	155 401	155 401
ВЭС, СЭС	МВт	2401,5	3336,6	4237,4	4924,4	5422,1	5422,1	5422,1
Число часов использования установленной мощности								
АЭС	Час/год	6697	6777	6789	6700	6414	6529	6768
ТЭС	Час/год	4313	4354	4481	4541	4604	4647	4685
ВЭС, СЭС	Час/год	656	1302	1448	1605	1698	1867	1867

Источник: Схема и программа развития Единой энергетической системы России на 2019–2025 годы. <http://gost.gtsever.ru/cgi-bin/ecat/ecat.cgi?b=2&pid=1&i=4293727666&pr=1>.

При профиците производства возникает проблема хранения выработанной электроэнергии. Уместно напомнить, что на территории РФ с 1991 года действует федеральный закон об энергосбережении³, который имеет множество местных подзаконных правовых актов и помогает разумной экономии энергии и в целом сохранению природы.

Основной причиной применения альтернативных источников энергии является глобальное потепление климата из-за использования ископаемых видов топлива. Истощение запасов энергоресурсов и нефтяные кризисы, подорожание производства энергии заставили мир искать альтернативные источники энергии.

Под влиянием изменений в энергополитике мир входит в этап четвертого энергетического перехода к широкому использованию ВИЭ и вытеснению ископаемых видов топлива. Развитие генерации энергии из возобновляемых источников получило старт благодаря мировому энергетическому кризису, положившему конец длительной эпохи дешевого топлива. В 1973 году в мире были обозначены два направления выхода из энергетического кризиса⁴:

- интенсивное развитие энергосбережения и энергосберегающих технологий, использование вторичных энергоресурсов;
- использование ВИЭ.

С ростом населения Земли и его потребностей в электрической энергии, развитием промышленности в странах мира возникла сопутствующая проблема накопления и хранения произведенной энергии. Применение систем накопления электроэнергии (СНЭ) представляет собой интегрированное решение по накоплению электрической энергии, ее преобразованию и дальнейшему использованию [Мазуров, 2017]. В настоящее время отсутствуют технические решения и пригодные к эксплуатации в необходимом объеме накопители энергии на энергоемких предприятиях. Хотя именно эти предприятия должны быть наиболее заинтересованы в таких решениях, поскольку повышение энергоэффективности является одним из факторов снижения производственных затрат, что в итоге оборачивается увеличением чистой прибыли⁵.

Стоит упомянуть еще об одном недооцененном источнике получения энергии – биомассе. В экономически развитой

³ Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (последняя редакция) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». СПС «Консультант +». https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978.

⁴ Тенденции развития возобновляемых источников энергии в России и мире. http://www.bumprom.ru/im/files/305_fname.pdf.

⁵ Отчет о функционировании ЕЭС России в 2023 году (на основе оперативных данных). https://www.so-s.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2024/ups_rep2023.pdf.

Европе, по данным МАГАТЭ за 2019 год, доля совсем незеле-ных источников – биоэнергетики и мусора – в общем объеме используемых первичных ресурсов составляет 8%, что не-мало⁶. Российские аналитики подсчитали: «возобновляемые источники энергии в настоящее время обеспечивают около 15% мирового первичного энергопотребления, но при этом 13% – это гидроэнергия и биомасса. Доля новых видов ВИЭ пока составляет лишь 2%»⁷.

Данная статистика несколько не совпадает с общеизвест-ной, однако биомасса имеет шансы занять определенную долю в выработке энергии, хотя и не является чистым источ-ником.

Цель настоящего исследования – определение оптималь-ного источника или комплекса источников производства электроэнергии в стране в условиях мирового энергетиче-ского перехода, исходя из анализа следующих факторов:

- характеристик жизненного цикла выработки энергии из различных источников;
- потребности населения и промышленности в электро-энергии;
- территориальной плотности населения [Мокшин, Реут, 2023];
- особенностей жизненного цикла производства энер-гии на разных источниках;
- нормированной стоимости произведенной энергии по видам топлива и энергии.

Объект исследования – Единая энергетическая система России.

Выдвигается гипотеза, что в ближайшей перспективе, в горизонте до 2050 года и позже, приоритет будет отдан выработке энергии из возобновляемых источников. Одним из ее главных преимуществ будет ее стоимость.

1. Методика, источники

Для достижения заявленной цели данного исследования требуется провести анализ текущего состояния и перспектив развития энергетики в мире и России, стадий жизненных ци-клов генерации энергии из различных источников, влияния на безопасность населения и окружающей среды, себестои-мости производимого киловатт-часа электроэнергии.

Многофакторный анализ при формировании затрат на производство электроэнергии из разных источников мо-жет включать следующие показатели:

- экономические – инвестиционные затраты и операци-онные затраты (постоянные и переменные). Например, для ВИЭ-станций характерны практически нулевые переменные затраты благодаря бесплатным источни-кам, а для тепловых электростанций (ТЭС) затраты на топливо составляют до 80% и выше от общей сум-мы операционных затрат [Дегтярев и др., 2016];
- утилизация оборудования – для объектов генерации на основе ВИЭ процесс утилизации оборудования тех-нически отработан и его запуск возможен в короткий срок [Дзедик и др., 2023];

- коэффициент использования установленной мощно-сти (КИУМ) – для ТЭС этот показатель составляет 80–90%, что в 4 раза больше, чем для станций на осно-ве ВИЭ (КИУМ для ветроэнергетических и солнечных станций может изменяться в широком диапазоне в за-висимости от географии и природных условий разме-щения) [Дегтярев и др., 2016];
- расчетный срок эксплуатации;
- затраты на строительство и ввод в эксплуатацию;
- территория размещения и выбор конкретного типа электростанции и др.

Таким образом, у каждого вида электростанции есть свои особенности, которые следует учитывать при планировании энергосистемы страны.

Для достижения цели работы авторы также опирались на данные, полученные в результате исследований мировой энергетической отрасли и российского ТЭК, проведенных другими учеными. Проведено сравнение жизненных циклов выработки энергии из различных источников: возобновляе-мых и невозобновляемых (Приложение 1).

Анализ показал преимущества и недостатки возобнов-ляемых и невозобновляемых источников получения энер-гии. Для реализации механизма поддержки возобновляемых источников энергии в России законодательно установлены индикаторы предельных величин генерирующих объектов ВИЭ, целевые показатели объемов ввода для каждого типа генерирующего объекта возобновляемой энергетики на пе-риод до 2035 года и степени локализации⁸. В странах мира также приняты законы о применении ВИЭ для генерации энергии. Важной характеристикой является нормированная стоимость единицы энергии для принятия решения о стро-ительстве конкретного типа электростанции в конкретной местности, наряду с другими условиями.

Аналитиками Института энергетических исследований (ИНЭИ) РАН РФ проведено исчерпывающее исследование [Макаров и др., 2024] о состоянии и развитии ТЭК России, в результате которого был сделан вывод: «В ближайшие 25 лет возобновляемые источники энергии и ископаемое то-пливо будут не столько конкурирующими, сколько взаимодо-полняющими элементами энергосистем большинства стран мира».

В исследовании ИНЭИ РАН РФ был применен комплекс экономико-математических моделей, а инструментами ис-следования стали экономико-демографические показатели и энергетические балансы. Расчет опирался на различные методики прогнозирования: эконометрический анализ, при-емы кластерного анализа, оптимизационное, имитационное и многокритериальное моделирование. Одной из обозначен-ных проблем в исследовании ИНЭИ РАН стала проблема комплексного подхода к сопоставлению себестоимости еди-ницы энергии, произведенной на базе ВИЭ и ископаемого топлива.

Исследователи из ИНЭИ РАН пришли к выводу, что «еже-годные приросты потребления электроэнергии во все боль-шей степени будут обеспечиваться ВИЭ, в частности в свя-

⁶ Отчет о функционировании ЕЭС России в 2023 году... https://www.so-s.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2024/ups_rep2023.pdf.

⁷ Одними ВИЭ чист не будешь. https://atomicexpert.com/res_will_be_used_more_widely.

⁸ Отчет о функционировании ЕЭС России в 2023 году... https://www.so-s.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2024/ups_rep2023.pdf.

зи с ростом их экономической эффективности: к 2050 году практически весь прирост электропотребления в мире будет приходиться на ветровую и солнечную генерацию: доля ВИЭ и атомной энергии достигнет по 57–70% (в 2021 году она была 38%). Вместе с ископаемыми источниками они будут составлять взаимодополняющие части будущей энергосистемы» [Кулагин и др., 2024].

Конечные затраты при переходе на безуглеродные источники энергии зависят от множества факторов: расположения региона, доступности энергоресурсов, возможностей импорта, динамики и уровня спроса, его платежеспособности, устойчивости экономики, требований к устойчивости электроснабжения, возможностей синхронизации с энергосистемами соседних регионов.

Роль газа и угля в качестве резервирующих топлив в электроэнергетике ожидаемо повысит волатильность цен на них. Наступила эпоха межтопливной конкуренции: на морском транспорте будет расти использование сжиженного газа, аммиака и метанола, в дорожных перевозках – электроэнергетики, газа и биотоплива, провоз пассажиров и грузов по железной дороге использует электричество или собственную мощность, производящую дизельными двигателями локомотива.

Очевидно, что с ростом потребления электроэнергии в России будет повышаться и прогнозируемая индексация регулируемых тарифов на электроэнергию: с 1 декабря 2022 года – на 9%, с 1 июля 2024 года – на 6%, с 1 июля 2025 г. – на 5%. В отдельных регионах РФ могут быть установлены иные тарифы по решению Правительства РФ или ФАС России⁹.

Возможности каждой страны компенсировать затраты, которые повлечет за собой выбор варианта комплексного решения задачи энергообеспечения, связанного с увеличением доли ВИЭ, определяют скорость достижения ею климатических целей зеленой повестки.

2. Атомная энергетика

В России использование атомной энергии для промышленности началось в 1954 году и регулируется федеральным законом «Об использовании атомной энергии»¹⁰. В 1956 и 1957 годах были введены в эксплуатацию атомные станции в Великобритании и США. Таким образом, с середины XX века мир начал промышленную выработку энергии на АЭС.

Доля атомной энергетики в мире на начало 2024 года осталась неизменной и держалась на уровне 9% от общего объема вырабатываемой энергии¹¹. В 2023 году атомная энергия была крупнейшим источником электроэнергии в Европе и на ее долю приходилось почти 23% вырабатываемого объема¹², что обеспечивалось вводом в строй новых атомных энергоблоков в Европе, Китае и США, а также перезапуском первого и второго энергоблоков АЭС «Такахама» в Японии.

Жизненный цикл энергоблоков атомных электростанций включает следующие стадии: размещение, проектирование, сооружение, эксплуатацию и вывод из эксплуатации [Альшрайх, Енговатов, 2023]. На каждой стадии цикла возникают определенные риски, которые связаны с объективными и с субъективными факторами и должны быть увязаны с жизненным циклом АЭС. Срок эксплуатации АЭС достигает 45 лет, с периодическими сертификациями после 30 лет работы.

Доля атомной генерации в мире, тем не менее, остается ниже уровня 2000 года (9,1% против 16,6%) [Альшрайх, Енговатов, 2023]. Причина – последствия катастрофы на АЭС «Фукусима-1», из-за которой доля атомной генерации в Японии до сих пор не вернулась к уровню 2010 года (7,6% против 25,3%), а также эффект отложенного ввода атомных реакторов в развитых странах¹³.

Российские АЭС первых поколений имели существенные характерные недостатки: отсутствие герметичной оболочки реакторного отделения, использование принципа библочности, консервативный подход к проектному сроку службы (ориентировочно 30 лет), а самое важное – стадия вывода из эксплуатации не рассматривалась и не учитывалась при проектировании. В настоящее время Россия запускает проекты строительства АЭС уже четвертого поколения.

Первая (и единственная) российская плавучая атомная электростанция «Академик Ломоносов» была запущена в промышленную эксплуатацию в мае 2020 года, энергия генерируется на двух малых модульных реакторах (ММР) мощностью 35 МВт. Другие ММР находятся на этапе строительства или лицензирования в Аргентине, Канаде, Китае, России, США и Южной Корее.

Впервые в мировой практике в России реализуются технологии ядерных реакторов четвертого поколения. На одной площадке будут созданы АЭС с быстрым реактором и пристанционный замкнутый ядерный топливный цикл. Облученное топливо после переработки будет направляться на повторное изготовление свежего топлива. Таким образом, система рециклинга станет практически автономной и не зависимой от внешних поставок энергоресурсов. Инновационный ядерный реактор «БРЕСТ-ОД-300» возводится Росатомом в рамках проекта «Прорыв» в городе Северске Томской области и выдаст первую электроэнергию в 2028–2029 годах.

Перспективы мирового развития атомной энергетики впечатляют. К маю 2024 года в мире в дополнение к 416 действующим реакторам общей чистой мощностью 374,6 ГВт на стадии строительства находятся 59 энергоблоков на 61,6 ГВт, из них 40 реакторов на 40,6 ГВт приходятся на Китай, Индию, Турцию и Египет¹⁴. Атомные электростанции в 2022 году были включены в таксономию ЕС, ранжирующую отрасли энергетики в зависимости от их вклада в устойчивое развитие. Япония призывает к строительству

⁹ Энергетическая система России: прогноз на 2023–2028 годы. <https://economy.ru/analysis/articles/1020>.

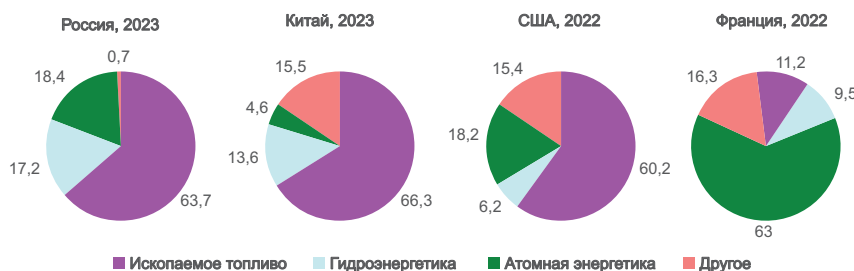
¹⁰ Федеральный закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» (последняя редакция). https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8450/?ysclid=m7t2gbjfa0327720229.

¹¹ Доля атомной генерации в мире превышает 9%. <https://www.atomic-energy.ru/news/2024/05/16/145868>.

¹² Ветроэнергетика в Европе впервые опередила газовые электростанции. <https://www.vedomosti.ru/esg/reports/news/2024/02/07/1019064-vetroenergetika-v-evrope-vpervie-operedila-gazovie-elektrostantsii>.

¹³ Доля атомной генерации в мире превышает 9%. <https://www.atomic-energy.ru/news/2024/05/16/145868>.

¹⁴ Там же.

Рис. 3. Структура мирового производства электроэнергии по видам энергии, 2023 год
Fig. 3. Electricity generation in selected countries by energy source, 2023

Источник: Электроэнергетика России и стран мира. <https://refru.ru/power7.html#g3>.

реакторов нового поколения с целью замещения выбывающих мощностей. Преимуществом АЭС также является отсутствие протяженных линий, возможность использования в качестве источника бесперебойного электроснабжения важных промышленных объектов, морских портов, оборонных объектов.

В настоящее время компания «Росатом» начала строительство пяти АЭС малой мощности в Арктике, территории стратегических интересов нескольких стран.

При таких радужных перспективах развития необходимо отметить сопутствующие проблемы при строительстве и эксплуатации АС: высокую стоимость и довольно долгий срок строительства, сложность и дороговизну утилизации отходов производства и вывод станции из эксплуатации [Путилов, Мокшин, 2023].

В ближайшие годы Россия начнет практическую реализацию проектов АЭС нового поколения малой и средней мощности (от 300 до 700 МВт). Проекты энергоблоков являются перспективными для регионов, где использование традиционных органических источников энергии невозможно или затруднено. В России к таковым относят Крайний Север, Чукотку, Камчатку, Дальний Восток и др. В России выполнены предварительные проекты блоков АЭС малой и средней мощности с реакторами СВБР-75/100, ВВЭР-600, СВБР-600 и другие.

На рис. 3 показаны доли разных источников в общей генерации электроэнергии в 2023 году в России, Китае, США и Франции¹⁵.

Несмотря на глобальную зеленую повестку, в странах – лидерах по добыче ископаемого топлива: России, США и Китае – именно газ, нефть и уголь обеспечивают в настоящее время основную долю электрогенерации.

Правительство России утвердило Генеральную схему размещения объектов электроэнергетики до 2042 года¹⁶, где основная роль отведена повышению генерации энергии на атомных электростанциях с 18,9 до 24%, солнечных и ветровых электростанций – с 0,8 до 3,3% на фоне снижения доли тепловых электростанций с 62,7 до 57,4%. В настоящее время большинство генерируемой энергии в стране произ-

водится на ископаемых источниках, за ними следуют ветро- и солнечная энергетика.

3. Энергия из возобновляемых источников

В 2023 году был установлен мировой рекорд по производству электроэнергии из ВИЭ: доля возобновляемых источников энергии в общем производстве электроэнергии увеличилась с 29 до 30%. Самый высокий вклад в 72% в ВИЭ был отмечен в Южной и Центральной Америке. Доля использования первичной энергии из возобновляемых источников составила 8,2%, или 14,6% с учетом гидроэнергетики¹⁷.

Наибольшая доля солнечных электростанций (СЭС) и ветроэлектростанций (ВЭС) в совокупном объеме выработки электрической энергии зафиксирована в странах Европы: в Дании – 61%, Литве – 50,9%, Греции – 43,9%. Мировыми лидерами по вырабатываемой мощности ВИЭ являются Китай, США, Бразилия, Индия и Германия, на долю которых приходится порядка 58,4% общей мировой электрической мощности ВИЭ¹⁸.

Производство электрической энергии в Единой электроэнергетической системе России в 2023 году составило 1149,984 млрд кВт·ч, из них 217,697 млрд кВт·ч (18,9%) – на атомных электростанциях, 202,618 млрд кВт·ч (17,6%) – на гидроэлектростанциях и гидроаккумулирующих электростанциях, 720,662 млрд кВт·ч (62,7%) – на тепловых электростанциях, 9,006 млрд кВт·ч (0,8%) – на солнечных и ветровых электростанциях¹⁹. Выработка электроэнергии на предприятиях ВИЭ России в 2023 году вдвое превысила уровень 2020 года, ведущая роль в производстве возобновляемой энергии в стране в настоящее время принадлежит ВЭС – 3,4 млрд кВт·ч и СЭС – 2,4 млрд кВт·ч. Геотермальные станции, установки на биогазе, биомассе и энергии сточных вод произвели 0,39 млрд кВт·ч²⁰.

Быстро развиваются инновационные технологии, применяемые для выработки чистой энергии. Так, российские ученые разработали компактный гидроагрегат, способный вырабатывать электроэнергию для отдаленных северных территорий, в частности Якутии. Устройство представляет

¹⁵ Электроэнергетика России и стран мира. <https://refru.ru/power7.html#g3>.

¹⁶ Распоряжение Правительства РФ от 30.12.2024 № 4153-р «Об утверждении Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2042 года». http://government.ru/dep_news/53923/.

¹⁷ В 2023 году мир обновил годовой рекорд по производству электроэнергии из ВИЭ. <https://qazaqgreen.com/news/world/2122/>.

¹⁸ <https://energy.hse.ru/Wiie>.

¹⁹ Распоряжение Правительства РФ от 30.12.2024 № 4153-р... http://government.ru/dep_news/53923/.

²⁰ Альтернативная энергетика в России. <https://www.tadviser.ru/index.php>.

собой турбину со встроенным насосом, работа которого обеспечивается за счет энергии течения воды.

Во многих отдаленных населенных пунктах на севере России нет центрального энергоснабжения, поэтому электричество там вырабатывают дорогие в эксплуатации дизельные электростанции. Для решения проблемы ученые разработали мини-гидроэлектростанцию, которая производит энергию экологичнее и дешевле. Она представляет собой гидротурбину со встроенным гидронасосом и работает благодаря речному потоку.

Природный потенциал гидро-, атомной, солнечной и ветровой энергетики значителен и практически неиссякаем. В России государственная программа поддержки возобновляемой энергетики продлена до 2035 года с объемом финансирования около 350 млрд руб. В перспективе применение ВИЭ существенно снизит потребление доли угля и газа в энергетическом балансе страны и мира.

Себестоимость производства электроэнергии на базе ВИЭ имеет тренд к снижению в сравнении с генерацией энергии на ископаемом топливе. Увеличение доли вырабатываемой энергии на базе ВИЭ в энергосистеме повлечет за собой рост системных затрат на энергию, вырабатываемую на ископаемом топливе. Готовность достижения разумного баланса правительствами стран в стоимости электроэнергии из разных источников во многом определит скорость достижения странами целей зеленой повестки.

По прогнозам Международного энергетического агентства, в 2025 году возобновляемые источники энергии преобладают угольную энергетику, а к 2026-му ВИЭ-энергия вместе с ядерной энергией будут источниками почти половины мировой выработки электроэнергии [Plautz, 2024].

4. Солнечная энергетика

Мировым лидером выработки энергии из СЭС и ВЭС в 2023 году был Китай: за счет энергии ветра и солнца выработано 486,1 млрд кВт·ч. Далее следуют США – 226,9 млрд кВт·ч, Германия – 66,5 млрд кВт·ч, Индия – 56,2 млрд кВт·ч и Бразилия – 36,8 млрд кВт·ч²¹.

В 2023 году общая доля возобновляемых источников энергии в странах Евросоюза в совокупности выросла до 44%²², таким образом, страны Европы наращивают производство электроэнергии из ВИЭ в рамках достижения цели по нулевым выбросам к 2050 году.

Первые солнечные батареи были предложены на рынок американцами в 1956 году, а уже в 1967-м СССР был запущен в космос космический корабль «Союз-1» – первый пилотируемый человеком космический корабль на солнечных батареях.

В условиях глобального перехода стран к устойчивым источникам энергии ветровая и солнечная энергетика приобретают особую актуальность. Экономическая эффективность каждого энергоносителя зависит от ряда факторов и является интегральным показателем.

5. Энергия ветра

В 2023 году мощность введенных в эксплуатацию ветроэнергетических установок (ВЭУ) в мире составила 116 616 МВт, что на 50% больше, чем в 2022 году. Объем ввода достиг рекордного значения и впервые превысил отметку 100 тыс. МВт.

В пятерку крупнейших мировых рынков новых установок в 2023 году вошли Китай, США, Бразилия, Германия и Индия (эта страна вернулась в группу лидеров после длительного перерыва).

В России по состоянию на начало 2024 года доля ВИЭ в общем объеме выработки электроэнергии составляет всего 1,1%²³, однако потенциал роста ВЭУ огромен, в том числе ввиду низкой по сравнению с другими источниками (ВИЭ и ископаемыми) стоимости получаемой единицы энергии.

В конце 2023 года учеными и исследователями Московского энергетического института (МЭИ) был создан программно-аппаратный комплекс для встраивания возобновляемых источников энергии в традиционные энергосистемы²⁴. Разработка представляет собой микроконтроллер для управления конвертерами на генерирующих объектах на базе ВИЭ. Микроконтроллер реализует алгоритм, который симулирует работу синхронного генератора с заданным моментом инерции.

6. Энергия воды

В структуре мировой энергетической системы по видам энергии, полученной в 2023 году, доля гидроэнергетики составила от 14 до 18,4%, по разным оценкам, и занимает второе место после генерации энергии из ископаемых источников и примерно равна доле солнечной генерации энергии.

Глобальное производство гидроэнергии переживает падение, в первой половине 2023 года наблюдалось историческое снижение производства мировой гидроэнергетики на 8,5%, причем падение за полгода было больше, чем зафиксированное за целый год за последние два десятилетия. Причина тому – засухи, вызванные глобальным потеплением от выброса в атмосферу парниковых газов от переработки ископаемых видов топлива.

В связи с этим в Министерстве энергетики РФ в 2023 году было подготовлено решение о поддержке объектов малой гидрогенерации, которое позволит строить в среднем около 70 МВт новых малых ГЭС в год. В Генеральной схеме распределения объектов электроэнергии отмечено, что по итогам объемов 2023 года 17,6% энергии получено на гидроэлектростанциях и гидроаккумулирующих электростанциях, а перспективное развитие гидроэнергетики предполагает освоение гидропотенциала регионов Сибири и Дальнего Востока с прогнозным объемом гидроэлектростанций и ввода в эксплуатацию гидроаккумулирующих новых электростанций до 2042 года в 7,756 млн кВт²⁵.

²¹ Ветроэнергетика в Европе в 2023 году впервые опередила газовые электростанции. <https://www.vedomosti.ru/esg/reports/news/2024/02/07/1019064-vetroenergetika-v-evrope-vpervie-operedila-gazovie-elektrostantsii>.

²² Там же.

²³ Ветроэнергетика в Европе в 2023 году... <https://www.vedomosti.ru/esg/reports/news/2024/02/07/1019064-vetroenergetika-v-evrope-vpervie-operedila-gazovie-elektrostantsii>.

²⁴ Альтернативная энергетика в России. <https://www.tadviser.ru/index.php>.

²⁵ Минэнерго намерено увеличить субсидии на строительство малых ГЭС. <https://itek.ru/news/minenergo-namereno-uvelichit-subsidii-na-stroitelstvo-malyh-ges/>.

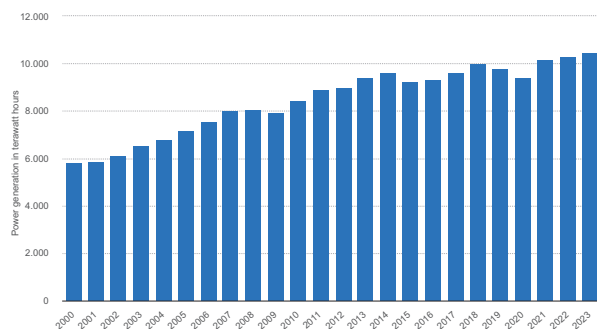
7. Тепловые электростанции на угле

Мировое производство электроэнергии на угле продолжает плавную тенденцию к росту и достигло пика в 2023 году (рис. 4). Например, в Китае на выработку электроэнергии на угле приходится более половины общемирового объема со значением 5742 ТВт·ч в 2023 году.

Ожидается, что к 2030 году количество стран ЕС, в которых не будет угольной генерации, превысит двадцать. Мировая тенденция декарбонизации электроэнергетики будет продолжаться, согласно реализации зеленой повестки.

Рис. 4. Мировое производство электроэнергии на угле, 2020–2023 годы

Fig. 4. Global coal-fired power generation, 2020–2023



Источник: Производство электроэнергии на угле во всем мире с 2000 по 2023 год. <https://www.statista.com/statistics/1082201/coal-fired-electricity-generation-globally/>

Россия занимает второе место в мире по запасам угля (15% мировых запасов) после США (23%), однако в России уголь оказывается дороже газа и не может найти широкого применения на внутреннем рынке. Причина этому – лоббирующая свои ведомственные интересы политика компании «Газпром».

Стоимость угля на мировом рынке энергоресурсов в несколько раз ниже стоимости нефти и газа. В условиях нефтегазового кризиса, наблюдаемого в мире в последние десятилетия, уголь пока находит свою энергетическую нишу, в частности этому помогает привлекаемая стоимость киловатт-часа вырабатываемой энергии на ТЭЦ. Поэтапный отказ от угля может продолжаться несколько десятилетий, и причины этого следующие: промышленное использование угля трудно заменить другими источниками энергии; угольные электростанции представляют собой долгосрочные активы с проектным сроком службы не менее 30–40 лет; убытки горнодобывающей промышленности; безработица занятых в отрасли рабочих; политическое лоббирование интересов; сложность перестройки промышленности и экономики и др.

В настоящее время на страны с формирующимся рынком приходится 76,8% мирового потребления угля; при этом доля Китая составляет примерно 50%.

8. Электростанции на газе

Традиционно лидирующее положение в мировой добыче газа много лет занимают Россия и США. Электростанции, работающие на газе, подразделяют на газотурбинные и газопоршневые.

Газотурбинные электростанции представляют собой высокотехнологичные энергетические комплексы, которые для генерации тепла и электрической энергии используют теплоноситель, нагретый до высокой температуры. Мощность газотурбинного агрегата может составлять до нескольких мегаватт.

В зависимости от способа установки и конструктивных особенностей различают несколько разновидностей газотурбинных станций: стационарные, передвижные, мини-формата. Все установки требуют тщательного сервисного обслуживания. Системы окупаются за небольшой промежуток времени, но проигрывают газопоршневым станциям, в том числе за счет стоимости вырабатываемой энергии.

Газопоршневые электростанции (ГПЭС) находят широкое применение как в промышленности, так и в коммунальном секторе благодаря высокой эффективности и возможности работы на различных типах газов. Это эффективное и экологически чистое решение для производства электроэнергии в условиях высоких цен на традиционные виды топлива и строгих экологических норм. ГПЭС имеют высокие первоначальные затраты и зависимость от качества газа, но их преимущества делают электростанции на газе привлекательным выбором для многих отраслей.

Глобальная выработка электроэнергии из газа в 2023 году достигла 6634 ТВт·ч, что является историческим максимумом²⁶. В настоящее время газ остается вторым по популярности источником электроэнергии, уступая углю (35,5% против 14,3% у ГЭС, 9,1% – у АЭС, 7,8% – у ветровых генераторов, 5,5% – у солнечных панелей и 10,8% – у всех прочих источников)²⁷. Мировыми лидерами по газовой генерации энергии остаются США и Китай. В ближайшей перспективе газ сохранит в мировом энергобалансе первенство, а доли угля и нефти будут сокращаться.

9. Сравнение стоимости единицы вырабатываемой электроэнергии по видам энергии

Сложилось различные подходы в определении экономической эффективности энергетики между электростанциями, работающими на ископаемых и возобновляемых источниках. Между ними существует принципиальная разница в структуре затрат, а экономическая эффективность производства электроэнергии – по сути, интегральный показатель. Сравнение экономической эффективности энергетики, получаемой на возобновляемых источниках, требует детального рассмотрения структуры затрат для каждого типа источника производства энергии с учетом прогнозных цен на энергоносители. Группа российских исследователей изучила технические особенности жизненного цикла электростанций, работающих на различных видах источников, и рассчитала себестоимость единицы производимой ими энергии (табл. 2), сделав следующие выводы в результате исследования [Дегтярев и др., 2016].

1. ВИЭ-электростанциям присущ низкий коэффициент использования мощности. Преимуществом является

²⁶ Электрогенерация из газа достигла исторического максимума. <https://globalenergyprize.org/ru/2024/05/10/jelektrogeneracija-iz-gaza-dostigla-istoricheskogo-maksimuma/>.

²⁷ Там же.

Таблица 2
Затраты на строительство и обеспечение работы электростанций, необходимые для выработки заданного количества электроэнергии (17 613 ГВт•ч/год)
Table 2
Cost of building and operating the power plants needed to generate a given amount of electricity (17,613 GWh/year)

Тип ЭС	Инвестиционные затраты (млн долл.)	Накопленные затраты (инвестиционные и операционные) за данный промежуток времени					Доли инвестиционных затрат в общей структуре за 25 лет (%)
		5 лет	10 лет	15 лет	20 лет	25 лет	
Угольная обычная	3246	10767	12856	16945	20034	23 123	15
Угольная комбинированная схема с газификацией угля, улавливанием и удержанием углерода	15 609	19993	24377	28760	33 144	37 527	42
ТЭС на газе обычная	2119	6675	11231	15786	20342	24 898	9
ТЭС на газе усовершенствованная с улавливанием и удержанием углерода	4842	10493	16144	21795	27446	33 098	15
Атомные	12354	14435	16516	18597	20678	22 754	54
ГеоТЭС	9533	10626	11718	12811	13904	14 996	64
На биомассе	19815	27650	35486	43321	51 157	58 992	34
ВЭС на суше	12713	13849	14985	16121	17257	18 388	69
ВЭС на море	34017	36028	38038	40049	42060	44 070	77
Солнечные тепловые	50893	54319	57700	61081	64462	67 843	75
Солнечные PV	31 148	32 141	33 134	34 127	35 120	36 112	86
ГЭС	11 138	11 407	11 675	11 944	12 212	12 481	89

Источник: [Дегтярев и др., 2016].

- отсутствие переменных затрат, но существуют высокие затраты на этапе инвестирования проекта. Следовательно, электростанции на ВИЭ будут экономически выгоднее при длительных сроках эксплуатации.
- Инвестиционные вложения в газовые ТЭС (даже в экологически усовершенствованном варианте) остаются самыми низкими.
 - В срок от 5 до 15 лет с момента ввода станции в эксплуатацию из-за высоких переменных операционных затрат общие накопленные затраты становятся выше затрат на ГЭС, геотермальные, атомные и ВЭС на суше.
 - Конкурентоспособными с точки зрения инвестиционных и общих затрат в срок от 5 до 25 лет оказались гидравлические, геотермальные, атомные электростанции и ВЭС на суше.
 - Модернизированные угольные станции характеризуются средней величиной инвестиционных затрат, но уступают большинству других типов станций при сроке эксплуатации более 15 лет.
 - Электростанции на биомассе, солнечные, ветровые на море и солнечные тепловые электростанции будут дорогими в эксплуатации на 25-летнем и более длительных горизонтах.
 - Ветровые станции на суше оказались более дешевыми по сравнению с АЭС и усовершенствованными ТЭС при сроке эксплуатации от 5 до 10 лет.

Таким образом, электростанции на основе ВИЭ выходят на уровень ценовой конкурентоспособности с технологически и экологически усовершенствованными станциями, ра-

ботающими на ископаемом топливе. Расширение использования ВИЭ с нестабильной выработкой в электроэнергетике приведет к росту волатильности цен на газ и уголь и повышению потребности в системах резервирования и накопления электроэнергии.

Расчеты по себестоимости единицы энергии, полученные исследователями из ИНЭИ РАН [Кулагин и др., 2024], показали следующие результаты.

Средневзвешенная себестоимость производства электроэнергии за 2010–2022 годы на солнечных станциях сократилась с 0,43 до 0,08 долл./кВт•ч, и к 2050 году прогнозируется возможность снижения затрат еще на 30%.

На береговых ветровых станциях после сокращения затрат с 0,11 до 0,07 долл./кВт•ч за 2010–2022 годы ожидается снижение еще на 10% к 2050 году; на шельфовых ветровых станциях удешевление произошло с 0,20 до 0,11 долл./кВт•ч, прогнозируется снижение еще на 30%.

Стоимость производства электроэнергии на крупных ГЭС является одной из самых низких среди альтернативных источников энергии и начинается от 0,01 долл./кВт•ч. Нужно принимать во внимание факт, что природный потенциал использования гидроэнергии в мире достаточно ограничен, а затраты на малые, средние и микрогидроэлектростанции довольно высоки.

Потенциал сокращения производственных затрат есть также у атомной энергетики. АЭС в большинстве стран мира оказываются дороже газа и угля при генерации электроэнергии. Однако атомные станции, в отличие от ВИЭ, обеспечивают устойчивую и равномерную выработку электроэнергии.

Затраты на угольных и газовых электростанциях имеют тенденцию к сокращению за счет повышения КПД станций, но будут зависеть от цен на поставку угля и газа, которые имеют тенденцию к росту. В результате объемы производства электроэнергии из газа и угля будут повышаться, а во второй половине прогнозного периода сокращаются и абсолютные объемы генерации на этих электростанциях, все более распространяется их использование в режиме резервирования ввиду неравномерности выработки на ВИЭ-электростанциях.

В 2023 году, по сведениям агентства Renewable Energy Agency (IRENA), 81% добавленных мощностей на основе ВИЭ был дешевле альтернатив на основе ископаемых видов топлива, обеспечивая убедительное экономическое и инвестиционное обоснование для трехкратного наращивания мощностей на основе ВИЭ к 2030 году.

Энергетики мира наблюдают тенденцию к снижению средневзвешенной стоимости электроэнергии, вырабатываемой введенными в эксплуатацию станциями на основе ВИЭ, для следующих типов станций:

- солнечной фотоэлектрической энергетики – на 12%;
- наземной ветроэнергетики – на 3%;
- морской ветроэнергетики – на 7%;
- концентрированной солнечной энергии – на 4%;
- гидроэнергетики – на 7%²⁸.

Опираясь на приведенные результаты исследований, выразим соотношение нормированной стоимости единицы энергии (Levelized Energy Cost, LEC)²⁹, произведенной из различных источников, следующей зависимостью:

$$LEC_{\text{тэк}} > LEC_{\text{аэс}} > LEC_{\text{вэс}}. \quad (1)$$

Таким образом, гипотеза, выдвинутая авторами исследования в настоящей статье, подтвердилась.

Развитие ЕЭС России утверждено до 2029 года, в том числе согласована стоимость строительства новой генерации на 15,7 ГВт³⁰. Основным источником выработки энергии останутся теплоэлектростанции с прогнозируемым объемом выработки электроэнергии в 65% от планируемого общего объема генерации. Серьезной задачей, требующей безотлагательного решения, является энергодефицит в районах Сибири, Дальнего Востока и юга России.

РЭА Министерства энергетики России представило свой отчет о прогнозе развития мировой энергетики до 2050 года³¹, в котором, наряду с тремя предложенными сценариями, отметило определенные на сегодняшний день опасения.

При наличии многих сценариев развития мировой энергетики разных исследователей и их различиях некоторые выводы исследователей и ученых гармонируют друг с другом и представляются достаточно определенными, а именно:

- четвертый энергетический переход состоится, и все предпосылки к этому сложились;

- для достижения к 2050 году уровня заявленной углеродной нейтральности необходимые инвестиции превосходят имеющиеся возможности мировой экономики;
- доля электроэнергии в мировом потреблении резко вырастет;
- станет особо важной роль водорода и современных типов биотоплива;
- доля ВИЭ-электроэнергии будет расти при сохраняющейся потребности в традиционных способах выработки электроэнергии;
- в связи с экономической нецелесообразностью радикального замещения традиционных углеродных источников энергии на безуглеродные необходимо развитие поглощающей способности экосистем и соответствующих технологий;
- снижение общей потребности в ископаемых углеводородных ресурсах приведет к сокращению мировой торговли на фоне уже заметной стагнации мировой экономики.

Следовательно, мир и Россию на горизонте планирования до 2050 года ожидает трансформация энергетической отрасли государств на фоне энергетического перехода и существенного замедления роста объемов потребления первичной энергии, связанного с общим долгосрочным прогнозом замедления роста мировой экономики³².

Заключение

Результаты исследований российских ученых показали, что зеленая энергетика имеет низкую стоимость, не сопровождается выбросом парниковых газов, однако характеризуется нестабильностью производства электроэнергии (зависимость от розы ветров, необходимость поиска оптимальных мест для строительства ветряных электростанций), низким уровнем солнечной инсоляции в северных регионах. Развитие зеленой энергетики должно поддерживаться государством в целенаправленной технико-экономической политике, предоставлением налоговых льгот и субсидирования НИОКР.

Атомная энергетика обладает высокой плотностью энергии, относительно стабильным ее производством, но при этом существуют проблемы с утилизацией ядерных отходов, риски возникновения аварий, высокие затраты на строительство и эксплуатацию АЭС.

Прогнозы развития мировой энергетики до 2050 года исследователями рассматриваются на фоне существенного замедления роста мировой экономики и, соответственно, потребления первичной энергии и имеет несколько сценариев развития. Приrost мирового потребления электроэнергии будет обеспечен преимущественно энергией из ВИЭ в связи с ростом их экономической эффективности: к 2050 году практически весь приrost электропотребления в мире будет приходиться на ветровую и солнечную генерацию [Кулагин и др., 2024].

²⁸ Рекордный рост обеспечивает ценовое преимущество возобновляемой электроэнергии. <https://www.irena.org/News/pressreleases/2024/Sep/Record-Growth-Drives-Cost-Advantage-of-Renewable-Power-RU>.

²⁹ Levelized Energy Cost – нормированная стоимость – показывает, на сколько изменится целевая функция после принудительного включения единицы этой продукции в оптимальный план. Если продукт рентабелен, то нормированная стоимость будет равна 0. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723010569>.

³⁰ Энергосистеме составили планы. <https://www.kommersant.ru/doc/6413256#:~:text=%D0%9D%D0%B0%20%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B0%D0%BB%D0%BE%2023%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0%20%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%B2%D1%88%D0%B8%D0%B5%D1%81%D1%8F%201%2C9%25%20%E2%80>.

³¹ Сценарии развития мировой энергетики до 2050 года. <https://www.imemo.ru/files/File/ru/seminars/EnergyDialogue/2024/Drebentsov-26012024.pdf>.

³² Темпы роста мировой экономики в 2024 году замедлятся до 2,4%. <https://news.un.org/ru/story/2024/01/1448302>.

В мире назрела проблема не только генерации зеленой электроэнергии, но и ее хранения, передачи и распределения, и она требует серьезных исследований и поиска решений.

В современных реалиях функционирование транспорта и систем отопления зависят от ископаемого топлива, а не от производства электроэнергии. Полный отказ от нефти, угля и газа на данном этапе невозможен. Ископаемые ресурсы в ближайшие десятилетия останутся наиболее доступными для производства энергии.

В идеале основным направлением цифровизации в энергетических системах стран должно стать распространение умных сетей и умных устройств – потребителей электроэнергии, которые сами смогут становиться генераторами и распределять электроэнергию в сети.

Баланс в использовании ископаемого топлива и ВИЭ в энергосистемах стран определяется совокупностью многих факторов [Макаров и др., 2024]: природных условий, доступности ископаемых ресурсов, возможности синхронизации энергосистем с соседними государствами, приемлемости ценовых решений для потребителей, а также наличия установленных показателей по сокращению выбросов в окружающую среду и развитости экономики страны.

В настоящее время одним из эффективных вариантов генерации электроэнергии для конкретной территории долж-

на быть взаимодополняющая модель совокупности разных источников энергии в энергосистеме страны, в конкретном регионе и даже населенном пункте. С целью достижения эффективности стоит рассматривать электростанции комбинированного типа с учетом потребности в электроэнергии, увязанной с ростом и плотностью населения, развитием промышленности и экономики, природным ландшафтом местности, эффективным планированием расположения электростанций.

Заявленная авторами исследования гипотеза о глобальном приоритете использования ВИЭ-источников для генерации энергии в мировом масштабе на данном отрезке времени не оправдала себя, но органично вписывается в развитие российского ТЭК. В странах Запада и некоторых странах Евросоюза (например, во Франции) в настоящее время наблюдается активное лоббирование бизнес-интересов в пользу развития атомной энергетики.

Обобщая итоги, можно с уверенностью утверждать, что мировая энергетика будет сильно зависеть от геополитики, которая определит возможности в трансфере технологий, наличия ограничений в торговых потоках, способности вырабатывать совместные подходы к регулированию внешнеэкономической деятельности и преодолению барьеров в мировой торговле.

Литература

- Алышрайдах М., Енговатов И.А. (2023). Классификация рисков на стадиях жизненного цикла атомной электростанции. *Вестник евразийской науки*, 15(2). <https://esj.today/PDF/28SAVN223.pdf>.
- Бучнев А.О. (2021). Экологические особенности использования возобновляемой энергии в свете достижения Целей устойчивого развития. *Государственная служба*, 4: 51–58.
- Дегтярев К.С., Залиханов А.М., Соловьев А.А., Соловьев Д.А. (2016). К вопросу об экономике возобновляемых источников энергии. *Энергия: экономика, техника, экология*, 10: 10–20.
- Дзедик В., Усачева И., Моткова А. (2023). Анализ эффективности применения накопителей энергии в различных типах электроэнергетических систем. *Энергетическая политика*, 3 апреля. <https://energypolicy.ru/analiz-effektivnosti-primeneniya-nakopitelej-energii-v-razlichnyh-tipah-elektroenergeticheskikh-sistem/energoperehod/2023/10/03/>.
- Ефимцева Т.В., Дьяконова А.А., Михайлова Е.С., Рахматуллина О.В., Салиева Р.Н. (2019). Возобновляемая энергетика в России и в других государствах ЕАЭС и СНГ: проблемы и перспективы правового регулирования. *Вопросы российского и международного права*, 9(12А): 90–110. DOI: 10.34670/AR.2020.92.12.009.
- Кулагин В.А., Грушевенко Д.А., Галкина А.А. (2024). Прогноз развития энергетики мира и России до 2050 года. *Современная мировая экономика*, 2(1).
- Мазуров А.Ю. (2017). Накопители электрической энергии. В: *Актуальные проблемы энергетики: материалы научно-технической конференции студентов и аспирантов БНТУ*. Минск. <http://electro.bntu.by/content/view/321/1>.
- Макаров А.А., Кулагин В.А., Грушевенко Д.А., Галкина А.А. (ред.) (2024). *Прогноз развития энергетики мира и России*. Москва, ИНЭИ РАН.
- Мокшин М.Ю., Реут Д.В. (2023). Перспективы и стратегии пространственного планирования российской экономики как крупномасштабной системы в современных условиях. *International Journal of Open Information Technologies*, 11(5): 119–127.
- Путилов А.В., Мокшин М.Ю. (2023). Предиктивный анализ устойчивого развития двухкомпонентной атомной энергетики. *Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление*, 19(2): 27–31.
- Спадарио Дж.В., Ланглуа Л., Гамильтон Б. (2020). Выбросы парниковых газов от цепочек выработки электричества. Оценка различий. *Бюллетень МАГАТЭ*, 42(2). https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull42-2/42204981924_ru.pdf.
- Тищенко Н.И. (2018). Достоинства и недостатки газотурбинных электростанций. *Аллея науки*, 2(18). https://alley-science.ru/domains_data/files/February2-18/DOSTOINSTVA%20I%20NEDOSTATKI%20GAZOTURBINNYH%20ELEKTROSTANCIY.pdf.
- Plautz J. (2024). Renewable power set to surpass coal globally by 2025. *Scientificamerican*, January 25. <https://www.scientificamerican.com/author/e-e-news/>.

Состояние топливно-энергетического комплекса России и пути развития в условиях четвертого энергетического перехода
The state of the Russian fuel and energy complex and development paths in the context of the fourth energy transition
俄罗斯燃料和能源综合体的现状以及在第四次能源转型条件下的发展途径

Мокшин М.Ю., Жабицкий М.Г., Римская О.Н.
Mokshin M.Y., Zhabitskiy M.G., Rimskaia O.N.

Приложение 1
Appendix 1
Сравнение жизненных циклов объектов выработки энергии из возобновляемых и невозобновляемых источников
Life cycle comparison of renewable and non-renewable energy production facilities

Вид энергии	Возобновляемые источники энергии					Невозобновляемые источники	
	Ветер	Атом	Солнце	Вода	Приливы/отливы	Уголь, газ, нефть	Биомасса
Преимущества	Самый перспективный источник энергии. Экологически чистый. Условно возобновляемый. Низкие эксплуатационные расходы, низкая начальная стоимость для производства энергии. Возможность размещения на пустырях и загрязненных территориях. Снижение безработицы для регионов работы ВЭС	Возобновляемый источник при работе в замкнутом топливном цикле. Экономичность расходов топлива. Безвредность для окружающей среды (при строгой эксплуатации). Низкие эксплуатационные расходы после запуска	Один из перспективных источников энергии. Экологически чистый. Батареи не требуют особого обслуживания. Надежность в работе. Легкая установка коллекторов	Экологически чистый источник. Условно возобновляемый. Высокая эффективность ГЭС – от 80 до 90%. Возможность быстрой остановки и запуска электростанции. Отработавшая система и незначительная эксплуатация ГЭС. Возможность создания искусственных озер для строительства ГЭС. Удерживает водные ресурсы для сельского хозяйства	Экологически чистый источник. Условно возобновляемый	Электростанции на угле: уголь имеет более высокую плотность энергии (по сравнению с ВИЭ). На производство электроэнергии приходится 72,8% использования угля, 21,6% используется в промышленности современных установок может достигать 40–45% при производстве электроэнергии. Гибкость в выборе топлива. Низкие выбросы вредных веществ. Быстрый запуск и простота конструкции. Экономическая эффективность	Нулевой баланс выбросов углекислого газа при сжигании биомассы. Более низкие, чем у ископаемого топлива, выбросы диоксида серы, оксидов азота и окиси углерода
Недостатки	ВЭС портят ландшафт. Зависимость от погоды и силы ветра. Высокая стоимость строительства и обслуживания. Занимают обширные площади, потерянные для сельского хозяйства. Шум турбин. Помехи приему радио- и телевизионных волн. КПД ВЭС не превышает 40%	Опасность техногенной катастрофы при авариях на АЭС. Проблемы с хранением отработанного топлива. Высокие затраты на строительство и вывод из эксплуатации	Технологические препятствия – нужна большая площадь для установки. Ограничение в использовании (домохозяйства, небольшие фермы, теплицы). Непостоянство источника – зависимость от погоды. В фотоэлектрических элементах батареи используются токсичные элементы. Низкая суточная плотность потока энергии солнечного излучения	Зависимость от осадков и необходимость затопления больших площадей и переселения людей, что разрушает естественную наземную среду обитания для растений и животных. Дороговизна строительства ГЭС	Низкая рентабельность. Ограничение территорий использования. Непостоянство генерации энергии	Электростанции на угле: истощение источников на планете; загрязнение окружающей среды вредными выбросами; сложность и трудоемкость добычи (особенно угля), высокий риск аварий в шахтах с человеческими потерями. Потатный отказ от угля продлится несколько десятилетий. При сжигании углеродоемкость угля в 2,2 раза превышает углеродоемкость природного газа. Методы добычи топлива, влияющие на потребности в перевозках и выбросы метана. Потери природного газа в процессе его передачи	Относительно низкая плотность сырья, затрудняющая его транспортировку, хранение и дозирование. Высокая влажность биомассы, затрудняющая ее подготовку к использованию в энергетических целях. Низкая энергетическая ценность сырья. Некоторые отходы доступны только сезонно

Источники: составлено авторами по данным: [Тищенко, 2018; Ефимцева и др., 2019; Бунчев, 2021]; Возобновляемые источники энергии. <https://energy.hse.ru/Wiic>; Кривонос А. (2023). Альтернативные источники энергии: плюсы и минусы. <https://bezreka-shop.com/blog/poleznye-sovety/alternativnye-istochniki-energiy-plusy-i-minusy/>?srsltid=AfmBOormUIZksWPUQg-ohZQVe9DX_UjPSnsMZCgMeLNYEuxcoP9ndyDv; Ботманс К., Манджи Л.К. (2020). Более экологичное будущее начинается с перехода от угля к альтернативным источникам энергии. <https://www.imf.org/ru/Blogs/Articles/2020/12/08/blog-a-greener-future-begins-with-a-shift-to-coal-alternatives>; Преимущества и недостатки газопоршневых электростанций: что нужно знать? <https://aet-spb.ru/posti/primushchestva-i-nedostatki-gazoporsnevyykh-elektrostantsiy-cto-nuzhno-znat/>?ysclid=m5pnrdmna894702992; Газотурбинная электростанция (ГТЭС): что такое, преимущества и недостатки. <https://gkrex.ru/info/gazoturbinaya-elektrostantsiya/>?ysclid=m5pnrdmna894702992; Газотурбинная электростанция (ГТЭС): что такое, преимущества и недостатки. <https://gkrex.ru/info/gazoturbinaya-elektrostantsiya/>?ysclid=m5pnrdmna894702992.

References

- Alshraideh M., Engovatov I.A. (2023). Classification of risks at the stages of the life cycle of a nuclear power plant. *Bulletin of Eurasian Science*, 15(2). <https://esj.today/PDF/28SAVN223.pdf>. (In Russ.)
- Buchnev A.O. (2021). Environmental features of the use of renewable energy in the light of achieving the Sustainable Development Goals. *Public Administration*, 4: 51-58. (In Russ.)
- Degtyarev K.S., Zalikhanov A.M., Solovyov A.A., Solovyov D.A. (2016). On the economics of renewable energy sources. *Energy: Economics, Technology, Ecology*, 10: 10-20. (In Russ.)
- Dzedik V., Usacheva I., Motkova A. (2023). Analysis of the efficiency of energy storage devices in various types of electric power systems. *Energy Policy*, April 3. <https://energypolicy.ru/analiz-effektivnosti-primeneniya-nakopitelej-energii-v-razlichnyh-tipah-elektroenergeticheskikh-sistem/energoperehod/2023/10/03/>. (In Russ.)
- Efimtseva T.V., Dyakonova A.A., Mikhailova E.S., Rakhmatullina O.V., Salieva R.N. (2019). Renewable energy in Russia and other EAEU and CIS countries: Problems and prospects of legal regulation. *Issues of Russian and International Law*, 9(12A): 90-110. DOI: 10.34670/AR.2020.92.12.009. (In Russ.)
- Kulagin V.A., Grushevenko D.A., Galkina A.A. (2024). World and Russian energy development forecast up to 2050. *The Modern World Economy*, 2(1). (In Russ.)
- Mazurov A.Yu. (2017). Electric energy storage devices. In: *Actual problems of energy: Proceedings of the Scientific and Technical Conference of students and postgraduates of BNTU. Minsk*. <http://electro.bntu.by/content/view/321/1>. (In Russ.)
- Makarov A.A., Kulagin V.A., Grushevenko D.A., Galkina A.A. (eds.) (2024). *World and Russian energy development forecast*. Moscow, INEI RAS. (In Russ.)
- Mokshin M.Yu., Reut D.V. (2023). Prospects and strategies of spatial planning of the Russian economy as a large-scale system in modern conditions. *International Journal of Open Information Technologies*, 11(5): 119-127. (In Russ.)
- Putilov A.V., Mokshin M.Y. (2023). Predictive analysis of the sustainable development of two-component nuclear energy. *Sustainable Innovation Development: Design and Management*, 19(2): 27-31. (In Russ.)
- Spadaro J.V., Langlois L., Hamilton B. (2020). Greenhouse gas emissions from electricity generation chains. Assessment of differences. *IAEA Bulletin*, 42(2). https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull42-2/42204981924_ru.pdf. (In Russ.)
- Tishchenko N.I. (2018). Advantages and disadvantages of gas turbine power plants. *Alley of Science*, 2(18). https://alley-science.ru/domains_data/files/February2-18/DOSTOINSTVA%20I%20NEDOSTATKI%20GAZOTURBINNYH%20ELEKTROSTANCIY.pdf. (In Russ.)
- Plautz J. (2024). Renewable power set to surpass coal globally by 2025. *Scientificamerican*, January 25. <https://www.scientificamerican.com/author/e-e-news/>.

Информация об авторах

Михаил Юрьевич Мокшин

Аспирант факультета бизнес-информатики и управления комплексными системами, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия). ORCID: 0000-0002-0985-2192; Web of Science Researcher ID: LRC-2876-2024; SPIN: 8914-1453; Author ID: 1230549.

Область научных интересов: ветроэнергетика, зеленая энергетика, управление энергетическими затратами в промышленности и энергетике.

mokshin.my@mail.ru

Михаил Георгиевич Жабицкий

Заместитель директора Высшей инженерной школы Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Москва, Россия). ORCID: 0000-0002-8243-0041; Scopus Author ID: 57223083851; SPIN: 6628-9530; Author ID: 1097980.

Область научных интересов: ядерная физика, информатика, виртуальная реальность, методы и модели предиктивной диагностики, программно-аппаратные комплексы, цифровые модели.

MGZhabitskii@mephi.ru

Ольга Николаевна Римская

Кандидат экономических наук, доцент, эксперт Федерального реестра научно-технической сферы РФ (Москва, Россия). ORCID: 0000-0002-1548-0815; Scopus Author ID: 5581148210; Researcher ID: 583440; SPIN: 4185 4532; Author ID: 583440.

Область научных интересов: мировая экономика, цифровая экономика, инновации, экономика труда, непрерывное образование, европейские системы и модели образования, управление человеческими ресурсами, мотивация и стимулирование труда, проблемы гуманитарного кризиса.

olgarim@mail.ru

About the authors

Mikhail Y. Mokshin

Postgraduate student, Faculty of Business Informatics and Integrated Systems Management, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) (Moscow, Russia). ORCID: 0000-0002-0985-2192; Web of Science Researcher ID: LRC-2876-2024; SPIN: 8914-1453; Author ID: 1230549.

Research interests: wind energy, green energy, energy cost management in industry and energy.
mokshin.my@mail.ru

Mikhail G. Zhabitskii

Deputy director of the Higher Engineering School of the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russia). ORCID: 0000-0002-1548-0815; Scopus Author ID: 5581148210; Researcher ID: 583440; SPIN: 4185 4532; Author ID: 583440.

Research interests: nuclear physics, computer science, virtual reality, methods and models of predictive diagnostics, hardware and software systems, digital models.
MGZhabitskii@mephi.ru

Olga N. Rimskaya

Candidate of economic sciences, associate professor, expert of the Federal Register of the Scientific and Technical Sphere of the Russian Federation (Moscow, Russia). ORCID: 0000-0002-1548-0815; Scopus Author ID: 5581148210; Researcher ID: 583440; SPIN: 4185 4532; Author ID: 583440.

Research interests: global economy, digital economy, innovation, labour economics, continuous education, European systems and models of education, human resource management, motivation and incentives for labor, problems of humanitarian crisis.
olgarim@mail.ru

作者信息

Mikhail Y. Mokshin

商业信息学和综合系统管理学院研究生, 国立核能研究大学莫斯科工程物理学院 (俄罗斯·莫斯科)。 ORCID: 0000-0002-0985-2192; Web of Science Researcher ID: LRC-2876-2024; SPIN: 8914-1453; Author ID: 1230549.

科学兴趣领域: 风能、绿色能源、工业能源成本管理和电力工程。
mokshin.my@mail.ru

Mikhail G. Zhabitskii

俄罗斯国立核研究大学(MEPhI)高等工程学院副院长 (俄罗斯·莫斯科)。 ORCID: 0000-0002-8243-0041; Scopus Author ID: 57223083851; SPIN: 6628-9530; Author ID: 1097980.

研究兴趣: 核物理、计算机科学、虚拟现实、预测诊断方法和模型、软件和硬件综合体、数字模型。
MGZhabitskii@mephi.ru

Olga N. Rimskaya

经济学博士·副教授, 俄罗斯联邦科技领域联邦登记册专家 (俄罗斯莫斯科)。 ORCID: 0000-0002-1548-0815; Scopus Author ID: 5581148210; Researcher ID: 583440; SPIN: 4185 4532; Author ID: 583440.

科学兴趣领域: 世界经济、数字经济、创新、劳动经济、继续教育、欧洲教育体系和模式、人力资源管理、劳动动机和激励、人道主义危机问题。
olgarim@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.01.2025; после рецензирования 22.02.2025 принята к публикации 05.03.2025. Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The article was submitted on 20.01.2025; revised on 22.02.2025 and accepted for publication on 05.03.2025. The authors read and approved the final version of the manuscript.

文章于 20.01.2025 提交给编辑。文章于 22.02.2025 已审稿。之后于 05.03.2025 接受发表。作者已经阅读并批准了手稿的最终版本。