

## **ТРАНСФОРМАЦИЯ И РАЗНООБРАЗИЕ ВОЗМОЖНЫХ ПУТЕЙ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ**

**P.A. Кругликов**, гл. науч. сотр., ОАО «НПО ЦКТИ» им. И.И. Ползунова, д-р техн. наук, *pak47@mail.ru*

Рецензент: Г.В. Томаров, ООО «Геотерм-М», д-р техн. наук, *geotherm@gmail.com*

*Пути развития энергетики в России и в мире являются предметом серьезных дискуссий. Это определяется большим набором неоднозначных обстоятельств и причин. Устойчивое и эффективное развитие электроэнергетики будет определяться разнообразием источников сырья, потребителей, технологических достижений, климатическими условиями и даже политическими факторами.*

**Ключевые слова:** энергоблок, электрическая мощность, коэффициент использования электрической мощности, капитальные затраты, ядерная энергетика, возобновляемые источники энергии.

### **TRANSFORMATION AND VARIETY OF POSSIBLE WAYS OF ENERGY DEVELOPMENT**

**P.A. Kruglikov**, Chief Researcher, JSC I.I. Polzunov Scientific and Development Association on the Research and Design of Power Equipment, Ph.D., *pak47@mail.ru*

*The paths of energy development in Russia and in the world are the subject of serious discussions. This is determined by a large set of ambiguous circumstances and reasons. The sustainable and efficient development of the electric power industry will be determined by a variety of sources of raw materials, consumers, technological achievements, climatic conditions, and even political factors.*

**Keywords:** power unit, electric capacity, electric capacity utilization factor, capital costs, nuclear power, renewable energy sources.

Предметом бурных обсуждений и разнообразных прогнозов являются пути развития отечественной и мировой энергетики. Это определяется неоднозначным воздействием и влиянием развития возобновляемых источников энергии на нас и окружающий мир, определенным торможением и отчасти стагнацией развития ядерной энергетики, неопределенностью и долговременностью развития новых технологий (термоядерной, водородной и др.), нарастающим ощущением конечности минерально-сырьевых ресурсов, используемых в энергетике, возможным влиянием политических и военных конфликтов на энергогенерацию.

В 2017 г. генеральный директор Госкорпорации «Росатом» А. Лихачев в одном из своих выступлений заявил: «Солнце, ветер, вода и атом, дополняя и усиливая друг друга, должны образовать тот пресловутый «зеленый квадрат», который станет основой будущего мирового безуглеродного баланса» [1].

Этот тезис многократно повторялся и варьировался в выступлениях и заявлениях руководителей ГК «Росатом». Концепция «зеленого квадрата» для ГК «Росатом» реально воплотилась, кроме строительства АЭС, в создании специализированных подразделений «Росатома»: «ВетроОГК-1», «ВетроОГК-2» и «ВетроОГК-3», входящих в АО «Росатом Возобновляемая энергия». Этими подразделениями были пущены первые ветроэлектростанции (ВЭС) «Росатома»: Адыгейская (мощностью 150 МВт), Кармалиновская (60 МВт), Кочубеевская

(210 МВт). На октябрь 2023 г. «Росатом» ввел 9 ветропарков общей мощностью 1,03 ГВт. До 2027 г. планируется довести мощность ветроэлектростанций (ВЭС) до 1,7 ГВт.

С учетом ряда объективных факторов и дискуссионности некоторых положений и концепций попробуем вкратце проанализировать возможное будущее энергетических технологий.

Ориентировочная общая процентная доля различных источников в мире при производстве электроэнергии и ее динамика приведены в табл. 1.

Таблица 1  
**Производство электроэнергии в мире, %**

Год	Вид источника							
	Уголь, торф	Газ	Нефть	ГЭС	АЭС	Ветер (ВЭС)	Солнце (СЭС)	Прочие
1973	38,3	12,1	24,8	20,9	3,3	0,6 суммарно		
2018	38	23	2,9	16,2	10,1	4,8	2,1	2,9
2023	35	23	2,7	14	9,1	7,8	5,5	2,9

При этом суммарное производство электроэнергии в 1973 г. составляло 6131 ТВт·ч, в 2018 г. – 26615 ТВт·ч, а в 2023 г. – 29925 ТВт·ч. Установленная мощность различных типов электростанций на начало 2018 г. составляла 6892 ГВт, на конец 2023 г. – 8926,8 ГВт. Мощности приведены в табл. 2 по типам станций.

Таблица 2  
**Установленная мощность электрических станций в мире**

Тип эл. станции		ТЭС	ГЭС	АЭС	ВЭС	СЭС	Прочие
Установленная мощность, 2018 г.	ГВт	4279	1267	399	520	393	34
	%	62,1	18,4	5,8	7,5	5,7	0,5
Установленная мощность, 2023 г.	ГВт	4679,5	1260	399,5	1016,5	1416	155,3
	%	52,4	14,1	4,6	11,4	15,8	1,7

Обращает на себя внимание разительное несоответствие доли установленной мощности АЭС и суммарной доли ветровых (ВЭС) и солнечных (СЭС) станций с количеством вырабатываемой ими электроэнергии. К этому вопросу мы еще вернемся.

Нужно отметить, что уже к концу 2019 г. мощность СЭС составляла 663 ГВт, а ВЭС – 980 ГВт, что демонстрирует высокую динамику роста [2].

Двадцатью крупнейшими электростанциями в мире по установленной мощности (на начало 2022 г.) являлись следующие.

- ГЭС Three Gorges (Китай) – 22 500 МВт
- ГЭС «Байхэтань» (Китай) – 16 000 МВт
- ГЭС Itaipu (Бразилия – Парагвай) – 14 000 МВт
- ГЭС «Силоду» (Китай) – 13 860 МВт
- ГЭС «Белу-Монти» (Бразилия) – 11 230 МВт
- ГЭС «Гури» (Венесуэла) – 10 235 МВт
- ГЭС «Удундэ» (Китай) – 10 200 МВт
- ТЭС на газе «Джебель Али» (ОАЭ) – 8690 МВт
- ГЭС «Тукуруи» (Бразилия) – 8370 МВт
- АЭС «Касивадзаки-Карива» (Япония) – 8212 МВт; остановлена в 2012 г.

ВЭС «Цзюцюань» (Китай) – 7960 МВт  
 ГЭС «Сянцзяба» (Китай) – 7800 МВт  
 АЭС «Кори» (Южная Корея) – 7490 МВт  
 АЭС «Ханул» (Южная Корея) – 7270 МВт  
 ГЭС «Гранд-Кули» (США) – 6810 МВт  
 ТЭС на угле «Туокетоу» (Китай) – 6720 МВт  
 АЭС «Брюс» (Канада) -6610 МВт  
 ГЭС «Лонгтан» (Китай) – 6425 МВт  
 ГЭС «Саяно-Шушенская» (Россия) – 6400 МВт  
 АЭС «Хунъянхэ» (Китай) – 6366 МВт

Обращает на себя внимание, что в этом списке из 20 объектов 12 мест занимают крупнейшие ГЭС (причем они занимают первые 7 мест) и 5 АЭС.

Состояние и динамика установленных мощностей электрических станций и производства электроэнергии в РФ отражены в табл. 3.

Таблица 3

**Установленная мощность и производство электрической энергии  
электростанциями России на январь 2025 г. [3]**

Показатель		Всего ЕЭС РФ	ТЭС	ГЭС	АЭС	Ветровые (ВЭС)	Солнечные (СЭС)
Установленная мощность	ГВт	263,7	172	50,3	34,55	3,85	3,0
	%	100	65,2	19,1	13,1	1,5	1,1
Производство эл. энергии	млрд кВт·ч	1180,7	676,5	204,26	214,9	8,26	3,54
	%	100	57,3	17,3	18,2	0,7	0,3

Небольшая разница в суммарном производстве электроэнергии и производстве по типам станций определяется неучетом в таблице электростанций промышленных предприятий, доля которых в общей выработке составляет около 6%.

Нужно отметить, что в РФ установленная мощность СЭС составляла на 2017 г. 0,57 ГВт, т.е. за 7 лет мощность этого типа станций выросла в 5 раз. А ВЭС увеличили свою установленную мощность за 6 лет (с 2018 г.) практически в 4 раза. На ТЭС относительная выработка электроэнергии за последний год имела небольшую тенденцию к снижению, что может быть объяснено погодными условиями и реализацией соглашения с ОПЕК по снижению добычи нефти.

Экспорт электроэнергии Россией осуществляется в энергосистемы Беларуси, Грузии, Абхазии, Азербайджана, Казахстана, Киргизии, Монголии, Китая, Турции. Однако общий экспорт электроэнергии за 2024 г. сократился на 17,6% и составил 8,53 млрд кВт·ч.

По суммарной выработке электроэнергии в последние 2–3 года Россия входит в первую четверку стран мира, уступая по выработке электроэнергии только Китаю (более 9 ТВт·ч), США (более 4,4 ТВт·ч) и Индии (более 1,9 ТВт·ч) [4]. При этом, по заявлению министра энергетики РФ, российская структура топливно-энергетического баланса – одна из самых «зеленых» в мире, так как на угле вырабатывается примерно 15% электроэнергии. В Китае этот показатель – на уровне 70%, в США и ФРГ – около 40% [5].

Пик мировой выработки электроэнергии угольными станциями был достигнут в 2014 г.: 41% мирового производства при генерирующей мощности около 2000 ГВт. Угольную энергетику используют 77 стран мира. Вместе с тем в 2018 г. 27 стран присоединились к Альянсу поэтапного отказа от угольной генерации. Для сравнения – доля некоторых стран в мировой угольной генерации на 2018 г.: Китай – 47%; США – 14%; Индия – 11%; РФ – 2% [5].

Политические реалии и события, несомненно, накладывают свой отпечаток на развитие мировой и национальной энергетики. После начала СВО в феврале 2022 г. и введения экономических санкций против России стратегия импортозамещения стала ключевым направлением развития экономики. Энергетический сектор России столкнулся с серьезными проблемами и новой энергопотребностью. Основной удар был нанесен по нефтегазовому комплексу. Нужно отметить, что РФ до начала СВО занимала более трети газового рынка Европы. С введением санкций и подрывом газопроводов произошло запрещение поставок оборудования и технологий для нефтегазовой отрасли. Ряд стран с декабря 2022 г. ввели полный запрет на импорт российских нефти и газа. Евросоюз принял решение о снижении поставок энергоносителей из России. В 2024 г. экспорт нефти и газа в страны ЕС сократился на 50 %. Несмотря на сокращение экспорта в Европу, Россия смогла перенаправить часть поставок в Азию. Доходы от экспорта нефти и газа в 2024 г. на 10 % превысили доходы 2023 г. А с февраля 2023 г. РФ перестала поставлять нефть в страны, использующие фиксированные предельные цены.

Несмотря на постоянный рост генерации электроэнергии и установленной мощности различного типа электростанций, по ряду оценок, около 1 млрд человек на планете не имеют доступа к электричеству, а в наименее развитых странах потребление электроэнергии на душу населения примерно в 30 раз меньше, чем в США.

Одно из наиболее спорных и дискутируемых направлений развития электроэнергетики – будущее и перспективы атомной энергетики. На январь 2023 г. в 33 странах работало 413 реакторов (не включая остановленных на длительный срок) общей мощностью около 380 ГВт, и 57 реакторов находились в стадии сооружения. Страны-лидеры по количеству блоков и их мощностям указаны в табл. 4 [6].

Таблица 4

**Количество и мощность АЭС по странам**

Страна	США	Франция	Китай	Россия	Япония
Кол-во блоков АЭС	98	58	56	39	33
Мощность АЭС, ГВт	102,7	65,8	45,5	28,5	36,5*

\* Без учета остановленных после аварии на Фукусиме.

В планах развития АЭС в мире на 2020–2025 гг. – строительство 49 новых блоков общей мощностью 53,5 ГВт. Четверть этих плановых мощностей приходится на Китай. Активно наращивать мощности АЭС планируют Индия, ОАЭ, Южная Корея. Вместе с тем существует и обратная тенденция. Если, например, в 2020 г. в мире было扑щено 5 новых блоков АЭС (2 – в Китае, по одному – в РФ, Беларуси и ОАЭ), то 6 блоков АЭС было остановлено.

Отказ от использования АЭС продекларирован Германией, Швейцарией, Италией, Испанией, Бельгией. Приостановлены по различным политическим, экономическим или техническим причинам программы атомной энергетики Литвы, Австрии, Кубы, КНДР, Польши. Отказались от создания программ атомной энергетики Норвегия, Португалия, Австралия, Греция, Дания, Латвия и ряд других стран. Основными мотивами провозглашаются: опасность аварий и их последствия, проблемы хранения отработанного ядерного топлива (ОЯТ), высокая стоимость строительства и демонтажа.

Первая крупная авария на АЭС произошла 28 марта 1979 г. в США на АЭС «Три-Майл-Айленд». Из-за ошибок персонала произошел расплав 53 % активного отсека реактора; 185 м<sup>3</sup> радиоактивной жидкости ушло в реку; 200 тыс. человек было эвакуировано; для восстановления разрушенного блока потребовалось 12 лет и 1 млрд долларов.

В СССР 25 апреля 1986 г. произошел взрыв 4-го блока Чернобыльской АЭС. В воздухе оказалось 190 тонн радиоактивных частиц, дозы облучения были превышены в радиусе 30 км,

загрязнение затронуло 19 регионов с населением 2,6 млн чел.; проект «Укрытие» (саркофаг) стоил 2 млрд евро.

Авария на АЭС Фукусима (Япония) произошла 11 марта 2011 г. В результате цунами произошли отказ систем энергоснабжения и охлаждения, расплав топлива в трех реакторах, затем – взрыв водорода с гибелью людей; из зараженных районов в 2012 г. более 100 тыс. жителей было эвакуировано. Работы по извлечению отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) были отложены до 2023 г. из-за задержки разработки роботизированного манипулятора, так как апробированной технологии в тот момент не было. Полное завершение вывода блоков рассчитывают реализовать после 2041 г. Общие расходы на демонтаж оцениваются ориентировочно в 75 млрд долл., на полный демонтаж потребуется не менее 40 лет [7].

Кроме указанных крупнейших аварий, регулярные инциденты на АЭС не являются исключениями. Так, 03.02.2021 на исследовательском тяжеловодном реакторе NIST в США при пуске был превышен радиационный фон в здании. Несколько работников подверглись воздействию повышенного уровня радиации. Реактор был заглушен.

Внутри станции «Олкилуото» (Финляндия) 19.12.2020 произошло повышение уровня радиации, последовала экстренная остановка реактора [8].

Было бы несправедливо упрекать в крупных техногенных катастрофах только атомную отрасль. Например, крупнейшая в современной истории техногенная авария на американском химическом заводе в Бхопале (Индия) в 1984 г. унесла жизни не менее 18 тыс. человек.

К сожалению, настороженное отношение к развитию атомной энергетики вызвано не только крупными, хотя и единичными, авариями. Перечислим еще несколько факторов, препятствующих широкому внедрению АЭС как основной энерготехнологии. АЭС весьма дороги, особенно с учетом наращивания дорогостоящих систем безопасности: их окупаемость в лучшем случае составляет не менее 20 лет. Такая прибыльность, как правило, не устраивает финансистов. Развитие АЭС в странах, не обладающих исторически развитыми ядерными технологиями, весьма проблематично. Такие страны не обладают соответствующими научными школами, отсутствует задел НИР и ОКР, нет механизма воспроизведения компетентных кадров. Ядерная энергетика в этих странах становится «сателлитной», т. е. основные компетенции остаются у разработчиков и поставщиков технологий. Настораживающим фактором остается зависимость развития ядерных технологий от политической ситуации. Развитие атомной энергетики связано с оружием, и передача новому государству ядерных технологий всегда таит опасность возникновения военной ядерной программы. Упования на то, что АЭС улучшают ситуацию с декарбонизацией на планете, утопичны, так как их роль в декарбонизации Африки или Латинской Америки, мягко говоря, несостоятельна. Ко всему прочему, остаются проблемы с захоронением ОЯТ и радиоактивных отходов (РАО) и серьезные протестные настроения населения в ряде стран.

Россия в 2025 г. отмечает 80-летний юбилей атомной отрасли и остается одной из ведущих стран в развитии и продвижении атомной энергетики. Госкорпорация «Росатом» занимает более 80 % рынка строительства АЭС в мире и ведет 22 экспортных проекта.

В 2020 г. пущена первая в мире атомная электростанция на базе плавучего энергоблока «Академик Ломоносов» (ПАТЭС). Идет строительство АЭС в Турции, КНР, Индии, Бангладеш, Венгрии, Египте, Иране. Планируется пуск 11 новых блоков в России до 2042 г. На различных стадиях находится оформление документации для строительства АЭС в Бразилии, Киргизии, Мьянме, Нигерии, Саудовской Аравии, Узбекистане, Казахстане и Шри-Ланке. В 2020 г. в РФ АЭС выработали 20 % всей производимой в стране электроэнергии, а в 2024 г. – более 18 %. В 2021 г. «Росатом» попросил у Правительства России государственной поддержки в вопросе приравнивания атомной энергетики к «зеленой» генерации на международном уровне и получения «зеленого» сертификата для АЭС, вследствие того что они делят первое место с ветрогенерацией по удельным выбросам CO<sub>2</sub>.

Вместе с тем в целом активная и целенаправленная позиция «Росатома» по развитию атомной энергетики вызывает ряд дискуссионных вопросов. Одним из главных являются условия контрактов на зарубежное строительство. В частности, по строительству АЭС «Аккую» в Турции (4 блока по 1,2 ГВт) предусматривается финансирование строительства исключительно за счет средств РФ, без финансовых обязательств Турции; схема возврата средств предусматривает продажу электроэнергии турецким потребителям по фиксированной цене (12,35 цента США за 1 кВт·ч) по 2037 г. без учета инфляции и эскалации цен; РФ несет ответственность за вывод АЭС из эксплуатации и обращение с ОЯТ; все страхование рисков по физической защите АЭС, надежности и обучению персонала, ответственности за возможный ядерный ущерб ложится на РФ; кредитование – беспроцентное [9].

Ориентировочно на похожих условиях, получивших название «строй, владей, эксплуатируй», строятся взаимоотношения с Египтом, получившим от РФ государственный кредит в 30 млрд долларов, покрывающий 85 % общих расходов на строительство АЭС. В проект АЭС в Бангладеш «Росатомом» вложено 12 млрд долларов, которые покрывают 90 % общей стоимости строительства [10].

Как уже отмечалось, одной из наиболее бурно развивающихся технологий электроэнергетики сегодня являются возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Их несомненные плюсы: экологическая чистота, в частности отсутствие выбросов CO<sub>2</sub>, отсутствие затрат на топливо, сохранение ископаемого потенциала Земли, кажущаяся доступность для любых стран и объединений при отсутствии собственных месторождений ископаемого сырья.

Наиболее бурно идет развитие ветроэлектростанций (ВЭС). В 2020 г. в Европе на основе ВИЭ, включая и гидроэлектростанции (ГЭС), выработано электроэнергии больше, чем на основе ископаемого топлива (38 % против 37 %). В том же 2020 г. в Великобритании доля ВИЭ и ГЭС по выработке электроэнергии составила 44,6 % [11]. Наибольшее распространение получают оффшорные или шельфовые ВЭС, чье основание жестко крепится к морскому дну на небольшой глубине шельфовых зон. В 2018 г. в Великобритании было введено почти 3 ГВт ВЭС. Одна из крупнейших – Moray Firth East мощностью 950 МВт и стоимостью 3,3 млрд долларов. На конец 2024 г. мощность ВЭС в Европе составляла примерно 285 ГВт.

Вместе с тем развитие ВИЭ порождает зачастую и ряд нерешаемых вопросов. Одной из самых слабых, экономически уязвимых сторон ВИЭ является низкий коэффициент использования установленной мощности (КИУМ). Этот коэффициент является отношением фактической выработки электроэнергии станцией за определенный период эксплуатации к теоретически возможной выработке за этот же период при работе без остановов на номинальной мощности. Зачастую его используют как отношение числа часов работы в году, эквивалентное работе на номинальной мощности, к 8760 ч, т. е. годовой продолжительности в часах. Для станций с ВИЭ ограничениями КИУМ являются неравномерность и нерегулируемость источника (ветра, солнца).

Средняя расчетная себестоимость производства электроэнергии на протяжении жизненного цикла электростанции – LCOE (Levelized cost of energy) – включает все инвестиции, затраты и доходы.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{K_t + I_t + C_t}{(1+E)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{W_t}{(1+E)^t}},$$

где:  $K$  – капиталовложения;  $I$  – издержки производства;  $C$  – затраты топлива;  $W$  – производство электроэнергии;  $t$  – текущий год;  $n$  – количество лет полного жизненного цикла станции;  $E$  – ставка дисконтирования.

Станции с ВИЭ, выигрывая по показателю  $C_t$ , становятся убыточными при корректном учете  $W_t$ , т.е. чем меньше КИУМ, тем выше тариф на электроэнергию. В России в 2016 г. КИУМ ВЭС составлял 5 %, СЭС – 13 %. По данным за 2018 г. КИУМ ВЭС возрос до 18 %, а СЭС до 14 %, при этом КИУМ ТЭС составил 46,5 % [12]. Для сопоставления можно указать, что для АЭС России КИУМ в 2020 г. составил 81,5 %. Успешным внедрение ВИЭ может быть только при учете индивидуальных климатических особенностей страны. КИУМ ВИЭ в России значительно ниже, чем в некоторых зарубежных странах, и соответственно стоимость электроэнергии на отечественных энергообъектах ВИЭ кратно выше. Кроме того, использование нестабильных источников энергии требует дополнительных затрат для надежности энергосистемы: резервирования мощностей, создания дорогостоящих систем аккумуляции. В подавляющем большинстве стран ВИЭ, по сути, выведены из зоны действия законов рыночной экономики, что создает иллюзию их низкой стоимости.

Как правило, для ВИЭ гарантируется сбыт производимой электроэнергии в любых объемах и в любое время по заранее установленной цене. В ряде стран существуют дополнительные стимуляторы для развития ВИЭ. Введение платы за выбросы  $\text{CO}_2$  – это также мера по повышению конкурентности ВИЭ.

Так как ВИЭ зависят от условий окружающей среды и не могут поставлять потребителям гарантированную мощность, то их субсидирование идет через специвестконтракты, налоговые льготы и льготные банковские кредиты. Сейчас в РФ поддержка ВИЭ осуществляется за счет повышенных выплат с оптового энергорынка, так как договоры на поставку «зеленой» мощности (ДПМ ВИЭ) гарантируют возврат инвестиций за 15 лет. Эта программа закончилась в 2024 г., и инвесторы в ВИЭ активно лоббируют ее продолжение. При этом тарифы ВИЭ в РФ в 2–3 раза выше, чем в ЕС; КИУМ на лучших ВЭС не выше 27 %, а на СЭС – не выше 14 %, LCOE ВИЭ выше оптовых цен в 3–5 раз, а достигаемое снижение выбросов  $\text{CO}_2$  составляет 0,2 % эмиссии в РФ. Достижение «сетевого паритета», т.е. равной цены электроэнергии от ВИЭ и покупки от сети, оценивается, по данным «Совета рынка», в 15 лет. И все же сторонники ВИЭ, признавая, что они во всем мире сегодня неокупаемы и для их развития нужно внедрение различных механизмов поддержки, лоббируют внедрение 2-го этапа поддержки «зеленой» энергетики с 2025 по 2035 г. [13].

Несомненно, существует и политическая составляющая в тенденции к пропагандированию ВИЭ и осуждению использования минерально-сырьевых источников энергии, а точнее – стран, имеющих и использующих эти источники, прежде всего РФ. Эти страны являются виновниками экологически неблагоприятных тенденций планеты. Есть еще ряд аспектов, которые отнюдь не благоприятствуют бурному развитию ВИЭ.

ВИЭ не смогут заменить углеродную энергетику по причинам земельным и пространственным. Для обеспечения всех жителей Земли таким же количеством энергии, которая составляет половину потребления жителя США, ВЭС и СЭС должны покрыть территорию площадью с Южную Америку [14].

Существуют негативные экологические последствия применения ВИЭ: гибель птиц и насекомых, угрожающая биоразнообразию. Инфраструктура вокруг них может серьезно нарушить естественную среду обитания животного мира.

Параметры наиболее крупных ВЭС достигают циклопических размеров. При единичной мощности ветроустановки, приближающейся к 8 МВт, диаметр ротора приближается к 180 м, а длина лопасти доходит до 80 м, масса лопасти – до 35 т, высота башни – до 90 м. Для РФ степень локализации производства оборудования ВЭС, как правило, не превышает 60 %.

Существуют проблемы и с выводом ВИЭ, в частности ВЭС, из эксплуатации. К 2025 г. в Европе в выводе из эксплуатации будут нуждаться более 14 тыс. лопастей ВЭС. Процесс их утилизации затруднен тем, что изготовлены они из сложных композитных материалов, обеспечивающих долговечность и меньший вес. Набор технологий их утилизации в промышленных масштабах недостаточно проработан: включает механическое измельчение,

расщепление ионами растворителя и пиролиз. Этот процесс весьма энергоемок, затратен и неэкологичен.

И еще об экономике ВИЭ в мировых тенденциях. В 2023 г. на ВИЭ приходилось около 30% мировой выработки электроэнергии. Из них 47% производили ГЭС, 26% – ВЭС, 18% – СЭС, около 9 % приходилось на геотермальную и биоэнергетику. Китай произвел 32% мирового объема электроэнергии из ВИЭ, США – 11%, Бразилия – 7%, Канада – 4,7%, Индия – 4,3%.

За десятилетие 2011–2020 гг. крупнейшим инвестором в ВИЭ стал Китай, выделив 758 млрд долларов. На втором месте были США с инвестициями в 356 млрд долларов, на третьем – Япония, 200 млрд долларов. За этот же период европейские страны инвестировали в «зеленую» энергетику 698 млрд долларов [15].

Существуют оценки, сделанные в 2014 г. применительно к отечественной энергетике по стоимости 1 кВт установленной мощности электрических станций с учетом потенциала ВИЭ по КИУМ и необходимым системам аккумуляции и резервирования [16]. Эти данные сведены в табл. 5.

Таблица 5

**КИУМ и стоимость установленного кВт мощности различных электрических станций**

Тип электростанции	ТЭС	АЭС	Малые ГЭС	ВЭС с аккумуляцией	СЭС (фотоэлектрические)
КИУМ, %	50–60	80–90	30	25	13
Стоимость 1 кВт установленной мощности с учетом КИУМ, долл.	2000–3000	5000	5000	10 000	38 500

Удельные выбросы CO<sub>2</sub> (г/кВт·ч) в целом по энергосистеме РФ значительно ниже, чем в США, Китае и среднемировые. КИУМ ВИЭ в России также ниже, чем за рубежом. Стоимость электрической энергии ВИЭ в РФ превышает ее стоимость за рубежом, и завышенные «зеленые» тарифы могут сделать нашу промышленность неконкурентоспособной. Очевидно, понимание этого обстоятельства привело к тому, что в марте 2021 г. было принято решение Правительства РФ о 22%-ном снижении объемов финансирования и поддержки ВЭС и СЭС.

Как одна из перспективных технологий будущего развития энергетики рекламируется и исследуется водородная энергетика. Сегодня огромный спрос на потребление водорода обеспечивают химическая и нефтеперерабатывающая промышленность. Используется водород частично и на транспорте – как правило, на экспериментальных образцах. Основное преимущество водородной энергетики – отсутствие вредных выбросов в атмосферу, так как при электрохимических реакциях с H<sub>2</sub> выделяется только вода. Это является основным аргументом в пользу масштабного внедрения водородной энергетики. Однако в этой технологии есть свои минусы и нерешенные проблемы. Одна из важнейших проблем – безопасность использования и хранения водорода. Отсутствуют надежные технологии и инфраструктура масштабного и безопасного хранения и транспортировки водорода на ТЭС.

Водород – чрезвычайно активный элемент, делающий металлоконструкции более хрупкими и способствующий их постепенному разрушению. Так называемая стресс-коррозия разрушает системы трубопроводов, и особенно сварные швы, при транспортировке водорода. Сам процесс электролиза при производстве водорода требует объемов электроэнергии, которые превышают объемы электроэнергии, получаемые при использовании водорода на ТЭС, а также зачастую могут быть получены далеко не экологически чистым способом.

Если используется технология производства водорода из метана, то все равно происходит образование CO<sub>2</sub>. Существующие сегодня способы производства водорода гораздо дороже, чем добыча нефти или газа, в пересчете на необходимую выработку электроэнергии.

Нельзя не упомянуть еще одну энергетическую технологию будущего – термоядерный синтез. Вопрос управляемого термоядерного синтеза на мировом уровне возник в середине XX века. Несомненными аргументами в его пользу являлись: неисчерпаемые запасы топлива (смесь изотопов водорода,дейтерия и трития), минимальная вероятность аварийного взрыва, отсутствие продуктов сгорания; образующиеся радиоактивные отходы имеют короткий период полураспада и не требуют долговременных хранилищ; не используются материалы, которые могут быть применены для создания ядерных взрывных устройств.

Вместе с тем возникли существенные препятствия между пониманием процессов ядерного синтеза, его практическим использованием и технологическими возможностями. Показательна в этом плане история Международного термоядерного экспериментального реактора (ITER). Участниками этого интернационального проекта являлись страны ЕС (как единый участник), Индия, Китай, Россия, Республика Корея, США, Япония. Была поставлена задача демонстрации возможностей коммерческого использования термоядерного реактора и решения технологических проблем при его реализации. Был выбран реактор типа «токамак» (от русскоязычного сокращения «тороидальная камера с магнитными катушками»). Определено место строительства – исследовательский центр Кадараш на юге Франции. Разработка проекта началась с середины 1980-х годов. Инженерный проект был завершен разработчиками (ЕС, Россия, США, Япония) в 2001 г. В 2007 г. началась подготовка площадки, а в 2010 г. началось строительство. В июле 2020 г. началась сборка реактора. Еще в период проектирования первоначальный пуск планировался на 2016 г., затем последовали сдвиги этой даты на 2019 г. и на 2025 г. Первоначальная стоимость установки оценивалась в 5 млрд евро, в 2015 г. предполагаемая сумма выросла до 19 млрд евро. Ожидается, что ITER, потребляя электрическую мощность 110 МВт, будет производить тепловую энергию мощностью примерно 500 МВт как минимум в течение 500 с.

По последним сообщениям Совета ITER (2024 г.), меняется программа тестирования установки, что приведет к научно обоснованному старту полноценной эксплуатации в 2035 г. О рентабельности установки речь не идет, но в случае успешной реализации проекта после ввода ITER планируется создание электростанции на термоядерном синтезе – ДЕМО (Demonstration Power Plant), с непрерывной генерацией электроэнергии мощностью 2 ГВт, проект которой должен быть закончен к 2030 г., строительство – в 2031–2043 гг., пуск первой очереди – не позднее 2048 г.

В различных направлениях исследования термоядерного синтеза и создания экспериментальных установок типа «токамак» ведутся в России, США, Великобритании, Китае, Японии.

В своем стремлении овладеть энергетическим потенциалом человечество идет на самые неожиданные и смелые эксперименты. В 2000 г. в США произвели попытку передачи энергии из космоса на Землю, используя модуль с солнечной панелью на космическом корабле и передатчик микроволновой энергии.

## **Выводы**

1. Ядерная энергетика продолжает занимать существенную нишу в мировом энергопроизводстве. Несмотря на ряд факторов, замедляющих ее рост в общем энергобалансе планеты, на ближайшие десятилетия АЭС продолжат оставаться одним из важнейших производителей электроэнергии. В России доля АЭС в выработке электроэнергии превышает 18 % и имеет перспективы роста.

2. Возобновляемые источники энергии, в первую очередь ветровые и солнечные электростанции, в силу ряда климатических, экономических и технологических причин не смогут стать основой производства электроэнергии для населения Земли, и в частности для

Российской Федерации. Отдельно следует рассматривать перспективы развития гидроэлектростанций, являющихся крупнейшими единичными источниками энергии.

3. Развитие новых технологий (термоядерной, водородной и др.) получения электроэнергии и сроки их выхода на промышленные объемы производства зачастую непредсказуемы. Вместе с тем, наряду с традиционными источниками, основанными на ископаемом сырье, а также ядерными технологиями, они, несомненно, могут занять свой сегмент в энергообеспечении Земли в XXI веке.

4. Стабильное, надежное и эффективное развитие и функционирование электроэнергетики могут быть обеспечены определенным разнообразием составляющих ее частей, зависящим от наличия сырьевых источников, вида потребителей, климатических условий, технологической базы, международной обстановки и ряда других факторов.

### ***Список литературы***

1. Regnum News. Ru. 06.10.2017.
2. EES EAEC: Мировая энергетика. URL: [www.sites.google.com](http://www.sites.google.com) (дата обращения: 29.04.2025).
3. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2024 г.
4. BP Statistical Review. 2023.
5. Bigpower News. 28.02.2023, 03.07.2018.
6. Эксперт Ру. 01.02.2024.
7. Atominfo.Ru. 26.12.2024; Российское атомное сообщество. 12.04.2022; ТАСС. 26.02.2022.
8. Atominfo.Ru. 04.02.2023.
9. Соглашение между Правительством РФ и Правительством Турецкой Республики о сотрудничестве в сфере строительства и эксплуатации АЭС на площадке «Аккую» от 29.11.2010 № 322-ФЗ.
10. Ино ТВ. 01.11.2022.
11. Agora Energie wende Ember EC. URL: <http://renen.ru> (дата обращения: 29.04.2025).
12. Белобородов С.С. Снижение эмиссии CO<sub>2</sub>: развитие когенерации или строительство ВИЭ // Энергосовет. 2018. № 1 (51).
13. URL: [www.proatom.ru](http://www.proatom.ru) (дата обращения: 29.04.2025). Big power News 28.05; 09.10; 24.10; 30.10; 13.12.2023
14. URL: <http://next75.ru> (дата обращения: 29.04.2025).
15. О проблемах развития мировой энергетики и ВИЭ // Энергетика за рубежом. 2020. № 4.
16. Осадчий Г.Б. Использование солнечной энергии для бесперебойного электроснабжения децентрализованных потребителей России // Энергетик. 2014. № 3.

### ***References***

1. Regnum News. Ru. 06.10.2017.
2. EES EAEC: *Mirovaya energetika [Global energy]*. Available at: [www.sites.google.com](http://www.sites.google.com) (date of access: 29.04.2025).
3. *Otchet o funktsionirovaniyu EES Rossii v 2024 g.* [Report on the functioning of the UES of Russia in 2024].
4. BP Statistical Review. 2023.
5. Bigpower News. 28.02.2023, 03.07.2018.
6. Ekspert Ru [Expert.ru]. 01.02.2024.
7. Atominfo.Ru, 26.12.2024; *Rossiyskoe atomnoe soobshchestvo* [Russian Atomic Community], 12.04.2022; ТАСС, 26.02.2022.
8. Atominfo.Ru. 04.02.2023.

9. *Soglashenie mezhdu Pravitel'stvom RF i Pravitel'stvom Turetskoy Respubliki o sotrudничестве в сфере строительства и эксплуатации АЭС на площадке «Аккую» от 29.11.2010 №. 322-ФЗ* [Agreement between the Government of the Russian Federation and the Government of the Republic of Turkey on Cooperation in the construction and Operation of nuclear power Plants at the «Akkuyu» No. 322-FZ dated 29.11.2010].

10. *Ino TV* [Ino Tv] 01.11.2022.
11. Agora Energie wende Ember EC. Available at: <http://renen.ru> (date of access: 29.04.2025).
12. Beloborodov S.S. (2018) *Snizhenie emissii SO<sub>2</sub>: razvitiye kogeneratsii ili stroitel'stvo VIE* [Reduction of CO<sub>2</sub> emissions: development of cogeneration or construction of renewable energy sources] *Energosovet* [Power supply system]. No. 1 (51).
13. Available at: [www.proatom.ru](http://www.proatom.ru) (date of access: 29.04.2025). Big power News 28.05; 09.10; 24.10; 30.10; 13.12.2023
14. Available at: <http://next75.ru> (date of access: 29.04.2025).
15. *O problemakh razvitiya mirovoy energetiki i VIE* [On the problems of global energy and renewable energy development] *Energetika za rubezhom* [Energy industry abroad]. 2020. No. 4.
16. Osadchiy G.B. (2014) *Ispol'zovanie solnechnoy energii dlya bespereboynogo elektronnabzheniya detsentrailizovannykh potrebitelye Rossii* [Use of solar energy for uninterrupted power supply of decentralized consumers in Russia] *Energetik* [Power engineer]. No. 3.