

РАЗВИТИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ
АККУМУЛЯТОРНЫХ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ
ЭНЕРГИИ В МИРОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

© МАСЛЕННИКОВ А.О., 2025

МАСЛЕННИКОВ Александр Оскарович, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник Центра энергетических исследований.

Национальный исследовательский институт мировой экономики и международных отношений им. Е.М. Примакова РАН, РФ, 117997 Москва, Профсоюзная, 23 (maslennikov@imemo.ru), ORCID: 0000-0001-5377-4702

Масленников А.О. Развитие крупномасштабных аккумуляторных систем накопления энергии в мировой электроэнергетике. *Анализ и прогноз. Журнал ИМЭМО РАН*, 2025, № 3, сс. 36-49. DOI: 10.20542/afij-2025-3-36-49 EDN: QRNGKN

DOI: 10.20542/afij-2025-3-36-49

EDN: QRNGKN

УДК: 33+339+621.35

Оригинальная статья

Поступила в редакцию 10.02.2025.

После доработки 05.05.2025.

Принята к публикации 10.06.2025.

В статье проанализировано развитие крупномасштабных систем накопления энергии (СНЭ) на базе аккумуляторных технологий как нового источника энергетической гибкости в мировой электроэнергетике. Оценен масштаб продвижения этих технологий в страновом разрезе, рассмотрены преимущества и недостатки аккумуляторных СНЭ в сравнении с другими традиционными и перспективными источниками энергетической гибкости. Выделены и проанализированы три главных фактора продвижения аккумуляторов в электроэнергетике: во-первых, рост доли переменных возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в генерации электроэнергии; во-вторых, значительное снижение себестоимости производства и цен литий-ионных аккумуляторов; в-третьих, целенаправленная государственная политика в ряде стран по стимулированию продвижения этих технологий, включающая как реформирование рынков мощности и электроэнергии, так и налоговые льготы и другие нерыночные механизмы. Показано, что в настоящее время аккумуляторные СНЭ уже стали рентабельными в странах с высоким уровнем распространения солнечной и ветровой энергетики, если регулятивная среда и механизмы работы рынка электроэнергии не препятствуют полноценной интеграции этих систем. Показано, что США, Великобритании и Ирландии за счет специального реформирования рынков электроэнергии удалось значительно повысить конкурентоспособность аккумуляторных СНЭ, как установленных в привязке к солнечным и ветровым электростанциям, так и отдельно стоящих, что позволило сократить их зависимость в электроэнергетике этих стран от мер господдержки и запустить процесс их массового внедрения. При этом продвижение литий-ионных аккумуляторных СНЭ в сегменте внутрисуточного хранения энергии продолжит укреплять позиции этой группы технологий за счет ввода новых производственных мощностей, оптимизации цепочек поставок, а также развития сектора их переработки и вторичного использования. Также в статье проанализирована проблема длительного хранения энергии и сделан вывод о том, что существующие технологии не способны обеспечить рентабельное сезонное хранение энергии, и для полной декарбонизации сектора электроэнергетики потребуется



Контент доступен под лицензией [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

достижение значительных технологических прорывов на этом направлении. При этом ожидаемое продвижение крупномасштабных систем хранения энергии на базе литий-ионных аккумуляторов не притормозит ни поиск альтернативных технологий хранения энергии, ни внедрение альтернативных источников энергетической гибкости.

Ключевые слова: аккумуляторные системы накопления энергии, литий-ионные аккумуляторы, электроэнергетика, переменные возобновляемые источники энергии, энергетическая гибкость, долгосрочное хранение энергии.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов финансового и нефинансового характера.

Финансирование: автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

DEVELOPMENT OF LARGE-SCALE BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS IN THE GLOBAL POWER INDUSTRY

Original article

Received 10.02.2025. Revised 05.05.2025. Accepted 10.06.2025.

Alexander O. MASLENNIKOV (maslennikov@imemo.ru), ORCID: 0000-0001-5377-4702, Primakov Institute of World Economy and International Relations, Russian Academy of Sciences (IMEMO), 23, Profsoyuznaya Str., Moscow 117997, Russian Federation.

The article analyzes the development of large-scale battery energy storage systems (BESS) as a new source of system flexibility in the global power sector. It assesses the scale of deployment of these technologies across countries and examines the advantages and disadvantages of BESS compared to other conventional and emerging flexibility resources. The study identifies and analyzes three key drivers of BESS adoption: first, the increasing share of variable renewable energy (VRE) in electricity generation; second, the significant decline in the production costs and prices of lithium-ion batteries; and third, targeted government policies in a number of countries aimed at supporting these technologies, including electricity market reforms, tax incentives and other non-market mechanisms. The findings demonstrate that BESS have already become cost-competitive in countries with high penetration of solar and wind power, provided that the regulatory environment and electricity market structures do not hinder their proper integration. The article highlights that in the United States, the United Kingdom and Ireland, targeted electricity market reforms have significantly improved the competitiveness of BESS—both colocated with solar and wind power plants and as standalone systems—thus reducing their dependence on government support and enabling large-scale deployment. The ongoing expansion of lithium-ion BESS for intraday energy storage is expected to further strengthen their position due to the commission of new manufacturing capacities, optimization of supply chains, and development of recycling and reusing sectors. The article also addresses the challenge of long-duration energy storage and the author concludes that existing technologies are not yet capable of delivering cost-effective seasonal storage. Achieving full decarbonization of the electricity sector will therefore require major technological breakthroughs in this area. At the same time, the expected growth of large-scale lithium-ion BESS is unlikely to impede the search for alternative storage technologies nor the development of other sources of energy flexibility.

Keywords: battery energy storage systems, lithium-ion batteries, power industry, variable renewable energy sources, energy flexibility, long-term energy storage.

About the author: Alexander O. MASLENNIKOV, Cand. Sci. (Econ. Sci.), Senior Researcher, Center for Energy Research.

Competing interests: no potential competing financial or non-financial interest was reported by the author.

Funding: the author declares no external funding.

For citation: Maslennikov A.O. Development of Large-Scale Battery Energy Storage Systems in the Global Power Industry. *Analysis and Forecasting. IMEMO Journal*, 2025, no. 3, pp. 36-49. DOI: 10.20542/afj-2025-3-36-49 EDN: QRNGKN

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в ряде стран наблюдается интенсивное внедрение крупномасштабных аккумуляторных систем накопления энергии (СНЭ) в электроэнергетике¹. Эти системы, в большинстве случаев основанные на литий-ионных аккумуляторах, используются для накопления электроэнергии из электросети в периоды низкого спроса на нее или высокой ее генерации, чаще всего – в периоды высокой загрузки солнечных и ветровых электростанций. В ситуации превышения спроса на электроэнергию над ее предложением накопленная в аккумуляторных СНЭ электроэнергия, напротив, направляется обратно в электросеть.

Крупномасштабные аккумуляторные СНЭ в электроэнергетике устанавливаются преимущественно в связке с солнечными и ветровыми электростанциями. Однако встречаются и автономные системы, расположенные отдельно от объектов генерации электроэнергии.

За период с 2019 по 2023 гг. совокупная установленная мощность крупномасштабных аккумуляторных СНЭ в электроэнергетике в мире увеличилась более чем в 13 раз – с 4.1 до 55.7 ГВт. Только в 2023 г. было введено в эксплуатацию свыше 30 ГВт таких систем, что сопоставимо с объемом аккумуляторных батарей, необходимым для производства около 2 млн электромобилей². Ключевым фактором, способствующим столь быстрому внедрению аккумуляторных СНЭ, выступает ускоренное развитие солнечной и ветровой электрогенерации, формирующее растущую потребность энергосистем в дополнительных источниках энергетической гибкости.

Под энергетической гибкостью, или гибкостью энергетической системы, принято понимать способность последней эффективно реагировать на колебания спроса и предложения электроэнергии, минимизируя риски энергетических дисбалансов, которые могут негативно сказаться на параметрах качества электроснабжения и привести к аварийным отключениям.

Традиционно энергосистемы во всех странах сталкиваются с изменчивостью спроса на электроэнергию. Однако увеличение доли солнечных и ветровых электростанций в структуре генерации формирует новый источник нестабильности – вариативность выработки. Поскольку фотоэлектрическая солнечная энергетика (фотовольтаика) и ветровая энергетика относятся к переменным возобновляемым источникам энергии (ВИЭ), для которых объемы производства в каждый момент времени зависят от текущих погодных условий, интеграция этих энергоресурсов в энергосистему требует от последней повышенного уровня адаптивности³.

Целью настоящей статьи является выявление факторов, обусловивших быстрое внедрение крупномасштабных аккумуляторных СНЭ в мире в последние годы, как характерных для отрасли в целом, так и специфичных для стран – лидеров этого процесса,

¹ В настоящей статье под крупномасштабными аккумуляторными системами накопления энергии в электроэнергетике понимаются исключительно СНЭ, установленные на стороне производства и транспортировки электроэнергии, то есть в сегменте "до счетчика" (*front of the meter*). В англоязычной литературе такие системы принято называть *large-scale battery energy storage system (BESS)*, СНЭ масштаба коммунальных служб (*utility-scale BESS*) или СНЭ масштаба электросети (*grid-scale BESS*), в русскоязычных источниках также встречается термин инфраструктурные СНЭ. При этом аккумуляторные СНЭ также активно используются и конечными потребителями электроэнергии – домохозяйствами, коммерческими и промышленными предприятиями, то есть "после счетчика" (*behind the meter*). В основном это относительно небольшие распределенные системы, устанавливаемые в дополнение к солнечным панелям на крышах зданий.

² Расчет выполнен исходя из средневзвешенной емкости аккумуляторов для электромобилей в августе 2023 г. 62.5 кВт·ч и коэффициента емкости к мощности на уровне 4 Вт·ч/Вт.

³ Помимо ветровой и фотоэлектрической солнечной энергетике к переменным ВИЭ также относят русловые ГЭС с небольшим объемом водохранилища, бесплотинные ГЭС и морскую энергетику – приливные и волновые электростанции.

а также определение перспектив дальнейшего продвижения аккумуляторных технологий хранения энергии как важного источника энергетической гибкости в электроэнергетике. Учитывая, что использование аккумуляторных СНЭ в электроэнергетике в значительных объемах – явление относительно новое, эта тема остается недостаточно изученной как в отечественной, так и в зарубежной литературе. При этом продолжающейся быстрый рост объемов и доли солнечной и ветровой электрогенерации в странах – лидерах энергоперехода в обозримой перспективе будет способствовать опережающему росту потребности этих стран в увеличении уровня гибкости в электроэнергетике, что делает изучение перспектив аккумуляторных СНЭ на этом направлении особенно актуальным.

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ АККУМУЛЯТОРНЫЕ СНЭ КАК НОВЫЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ГИБКОСТИ

Потребность в развитии крупномасштабных аккумуляторных СНЭ обусловлена в первую очередь тем, что альтернативных источников энергетической гибкости недостаточно для надежной и безопасной интеграции значительных объемов переменных возобновляемых источников энергии в энергосистему, не говоря уже о полной декарбонизации электроэнергетики. Однако, прежде чем перейти к исследованию перспектив аккумуляторных СНЭ как нового источника энергетической гибкости, необходимо кратко рассмотреть основные ее источники. В научной литературе и прикладных исследованиях принято выделять четыре группы таких источников: 1) диспетчеризуемая генерация, 2) технологии управления спросом на электроэнергию, 3) электросети и межсетевые связи и 4) системы накопления энергии, к которым относятся и анализируемые в настоящей статье аккумуляторные СНЭ⁴ [1].

Электростанции на ископаемом топливе, а также гидроэлектростанции (ГЭС) и электростанции на биотопливах повышают гибкость энергосистемы за счет резервных мощностей по генерации электроэнергии, которые можно задействовать для увеличения выработки в периоды снижения генерации на солнечных и ветровых электростанциях. Для этого в часы пикового спроса на электроэнергию часто используются газотурбинные установки открытого цикла, отличающиеся высокой скоростью отклика.

Однако использование ископаемых топлив для компенсации провалов в солнечной и ветровой генерации противоречит климатическим стратегиям стран, стремящихся к полной или практически полной декарбонизации своей электроэнергетики, в первую очередь государств Европейского союза и Великобритании. Кроме того, по мере увеличения доли возобновляемой энергетики в этих странах, электростанции на ископаемых топливах все большую часть времени будут простаивать, поэтому поддержание этих мощностей в работоспособном состоянии для использования исключительно в качестве источника энергетической гибкости потребует дополнительных затрат.

Технологии управления спросом также являются перспективным источником энергетической гибкости. Значительный потенциал на этом направлении связан с распространением “умных” (автоматизированных) электроприборов, включающихся в периоды снижения цен на электроэнергию, а также технологий двустороннего использования электромобилей (*vehicle-to-grid*). Эти решения позволяют сместить потребление электроэнергии в бытовом, коммерческом и промышленном секторах на периоды высокой выработки из солнечных и ветровых источников. Однако реализация данного потенциала потребует широкого внедрения дорогостоящей инфраструктуры, способной оперативно реагировать на ценовые сигналы, а также механизмов динамического ценообразования для конечных потребителей. К этой же группе источников энергетической гибкости относится и развитие распределенных аккумуляторных СНЭ в дополнение к объектам возобновляемой генерации на стороне конечных потребителей электроэнергии, что позволяет последним сократить объемы получения ее из электросети.

⁴ Introduction to System Integration of Renewables. International Energy Agency (IEA). 2020. Available at: <https://www.iea.org/reports/introduction-to-system-integration-of-renewables> (accessed 24.12.2024).

Расширение инфраструктуры транспортировки электроэнергии также способствует повышению гибкости энергосистемы, позволяя перераспределять электропоток из регионов с профицитом генерации в регионы с временным дефицитом, вызванным в том числе неблагоприятными метеоусловиями. Вместе с тем развитие электросетей требует значительных капитальных вложений. Создание международных сетевых интерконнекторов также позволяет компенсировать внутренние дисбалансы за счет экспорта и импорта электроэнергии. Однако полагаться на трансграничные перетоки как на основной источник гибкости могут себе позволить лишь небольшие страны и только при наличии избыточной гибкости у соседних государств, что, к тому же, требует решения вопроса обеспечения энергетической безопасности.

В группе технологий хранения энергии существует множество различных инструментов, однако вплоть до конца 2010-х годов единственными широко используемыми были гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС), а затем началось быстрое внедрение крупномасштабных аккумуляторных СНЭ. Все остальные технологии этой группы пока находятся на стадиях разработки, тестирования или ограниченного практического применения. При этом в 2023 г. совокупная установленная мощность крупномасштабных аккумуляторных СНЭ в мире составляла уже почти треть от совокупной мощности ГАЭС, в то время как в 2019 г. этот показатель не превышал 3%⁵. По прогнозу Международного энергетического агентства (МЭА), в 2030 г. аккумуляторные СНЭ в мире в целом станут основной формой хранения энергии и по совокупной установленной мощности будут превосходить ГАЭС в 2.3–3.4 раза в зависимости от сценария⁶.

ГАЭС использует излишки электроэнергии для закачки воды в верхнее водохранилище с целью последующего ее сброса и генерации электроэнергии в периоды дефицита. Однако возможности ГАЭС недостаточны для обеспечения энергетической гибкости на уровне, необходимом для интеграции в энергосистему значительных объемов переменных ВИЭ. Новые ГАЭС могут быть построены только в подходящих для этого географических локациях, их возведение сопряжено с типичными для гидроэлектростанций экологическими рисками, а также требует значительных инвестиций. Более того, чем дальше располагается ГАЭС от магистральных ЛЭП, соединяющих основные центры производства и потребления электроэнергии, тем выше дополнительные потери при ее транспортировке.

Важным преимуществом аккумуляторных СНЭ перед ГАЭС являются их модульность и отсутствие жесткой привязки к подходящим геологическим условиям, поскольку они могут быть установлены в оптимальных для этого сегментах электросети и в необходимой конфигурации по совокупной мощности. Кроме того, аккумуляторные СНЭ характеризуются высокой скоростью переключения режимов работы между потреблением и отдачей электроэнергии, а также могут выполнять множество других технических услуг по повышению качества энергоснабжения, включая регулирование частоты электрического тока [3; 4]. С другой стороны, аккумуляторные СНЭ имеют и ряд недостатков, которые также зависят от типа используемых аккумуляторов. Они будут проанализированы ниже.

ДИНАМИКА И ФАКТОРЫ ПРОДВИЖЕНИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ СНЭ

Продвижение крупномасштабных аккумуляторных СНЭ пока сконцентрировано в ограниченном числе стран. В пятерку крупнейших государств по объему установленных мощностей в этом секторе по состоянию на конец 2023 г. вошли Китай (27.1 ГВт), США (15.8), Великобритания (3.6), Австралия (1.8) и Германия (1.7 ГВт) (табл. 1).

⁵ Рассчитано по данным *Statistical Review of World Energy 2024*. Energy Institute. Available at: <https://www.energyinst.org/statistical-review> (accessed 24.12.2024) и [2].

⁶ *Global Installed Energy Storage Capacity by Scenario, 2023 and 2030*. IEA. 25.04.2024. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-installed-energy-storage-capacity-by-scenario-2023-and-2030> (accessed 25.12.2024).

Таблица 1. Динамика накопленной мощности крупномасштабных аккумуляторных СНЭ в мировой электроэнергетике, ГВт

Table 1. Dynamics of Cumulative Large-Scale Battery Energy Storage Systems Capacity in the Global Power Sector, GW

	2015	2019	2020	2021	2022	2023
Китай	0.1	0.4	0.8	1.8	7.8	27.1
США	0.4	1.1	1.7	5.1	9.3	15.8
Великобритания	0.0	0.8	1.0	1.7	2.3	3.6
Австралия	0.0	0.3	0.4	0.7	0.9	1.8
Германия	0.0	0.5	0.6	0.7	1.3	1.7
Южная Корея	0.1	0.3	0.8	1.0	1.0	1.0
Япония	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.6
Ирландия	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.4
Канада	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.4
ЮАР	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
Чили	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
ОАЭ	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
прочие страны	0.1	0.2	0.3	0.7	1.6	2.7
мир	0.9	4.1	6.1	12.5	25.2	55.7

Источник: рассчитано автором по данным *Statistical Review of World Energy 2024*⁷.

Накопленные мощности крупномасштабных аккумуляторных СНЭ в странах-лидерах составляют уже значительную долю от совокупных генерирующих мощностей солнечных и ветровых электростанций. В 2023 г. этот показатель в Великобритании достиг 7.9%, в США – 5.5%, Китае – 2.6% (табл. 2). При этом в ближайшие годы процесс ускоренного внедрения аккумуляторов продолжится быстрыми темпами. По прогнозу МЭА, к 2030 г. накопленные мощности крупномасштабных аккумуляторных СНЭ в мире вырастут в зависимости от сценария на 531–947 ГВт относительно уровня 2023 г. Для сравнения, МЭА ожидает прирост мощностей ГАЭС за тот же период в диапазоне 68–112 ГВт⁸.

Таблица 2. Страновая структура установленной мощности крупномасштабных аккумуляторных СНЭ в мире в 2023 г.

Table 2. Country Breakdown of Installed Capacity of Large-Scale Battery Energy Storage Systems Worldwide in 2023

	Мощность крупномасштабных аккумуляторных СНЭ		Доля от совокупной мощности по генерации э/э, %	Доля от мощностей в ветровой и солнечной энергетике, %
	ГВт	% мирового показателя		
Китай	27.1	48.6	1.0	2.6
США	15.8	28.3	1.3	5.5
Великобритания	3.6	6.5	3.5	7.9
Австралия	1.8	3.2	1.7	4.0
Германия	1.7	3.1	0.7	1.1
Южная Корея	1.0	1.8	0.7	3.5
Япония	0.6	1.0	0.2	0.6
Ирландия	0.4	0.8	3.7	7.9
Канада	0.4	0.7	0.3	1.7

⁷ *Statistical Review of World Energy 2024*. Energy Institute. Available at: <https://www.energyinst.org/statistical-review> (accessed 24.12.2024).

⁸ *Global Installed Energy Storage Capacity by Scenario, 2023 and 2030*. IEA. 25.04.2024. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-installed-energy-storage-capacity-by-scenario-2023-and-2030> (accessed 25.12.2024).

ЮАР	0.3	0.5	0.5	3.1
Чили	0.2	0.3	0.5	1.3
ОАЭ	0.1	0.2	0.2	1.9
прочие страны	2.7	4.9	0.1	0.4
мир	55.7	100	0.6	2.3

Источник: рассчитано автором по данным *Statistical Review of World Energy 2024*⁹.

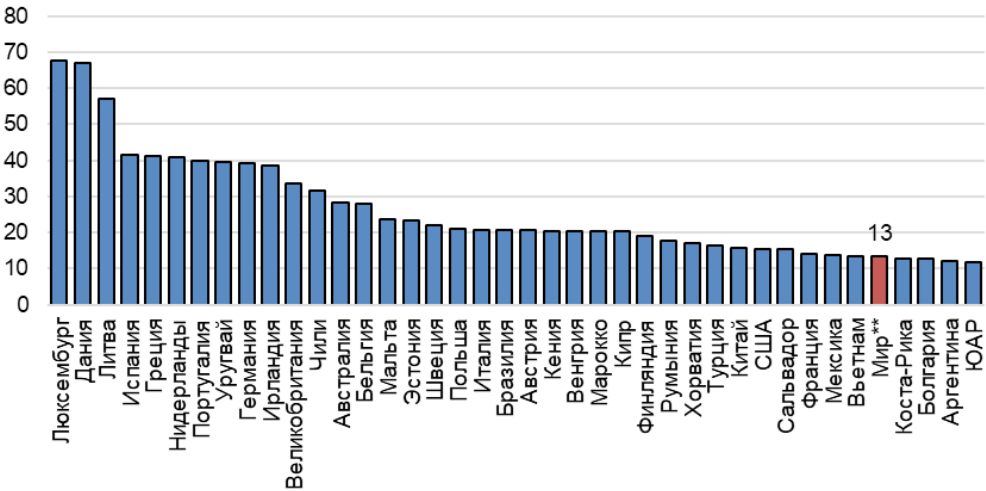
Продвижению крупномасштабных аккумуляторных СНЭ способствуют три основных фактора. Во-первых, рост доли переменных ВИЭ в генерации электроэнергии, во-вторых, значительное снижение себестоимости производства и цен литий-ионных аккумуляторов, в-третьих, целенаправленная государственная политика по поддержке внедрения этих технологий в электроэнергетике.

Развитие переменных ВИЭ

Наиболее высоких показателей по доле переменных ВИЭ в электроэнергетике достигли страны Европейского союза (рис. 1). В Люксембурге и Дании в 2023 г. доля солнечных и ветровых электростанций в совокупной электрогенерации составила 68% и 67% соответственно, в Литве – 57%. При этом основным источником энергетической гибкости в этих небольших по абсолютному объему потребления электроэнергии странах выступает внешняя торговля электроэнергией с соседними государствами. Дания в 2023 г. импортировала 54% объема потребления электроэнергии и экспортировала 45%. Литва и Люксембург в том же году импортировали 82% и 76% потребленной электроэнергии соответственно. Проведенный в работе [5] анализ по 11 государствам Северной Европы показал, что корреляция между периодами низкой генерации солнечной и ветровой энергии между странами невысокая (в диапазоне 0.3–0.4), что позволяет существенно повысить гибкость энергосистемы с большой долей переменных ВИЭ за счет объединения энергосетей.

Рисунок 1. Доля солнечных и ветровых электростанций в совокупной генерации электроэнергии в 2023 г., %*

Figure 1. Share of Solar and Wind in Total Electricity Generation in 2023, %*



Источник: рассчитано автором по данным *Yearly Electricity Data*¹⁰.

* – приведены данные по странам, где представленный показатель превышает 10% (39 из 85 стран и территорий, включенных в исходную базу данных EMBER).

** – расчет по 85 странам и территориям.

⁹ *Statistical Review of World Energy 2024*. Energy Institute. Available at: <https://www.energyinst.org/statistical-review> (accessed 24.12.2024).

¹⁰ *Yearly Electricity Data*. EMBER. Available at: <https://ember-energy.org/data/yearly-electricity-data/> (accessed 24.12.2024).

В Испании, Греции, Нидерландах, Португалии, Германии и Ирландии доля солнечных и ветровых электростанций в совокупной электрогенерации в 2023 г. находилась в диапазоне 39–41%, в Великобритании – 34%. При этом крупные страны не могут в значительной степени полагаться на внешнюю торговлю электроэнергией и вынуждены наращивать другие источники энергетической гибкости, в первую очередь аккумуляторные СНЭ. Например, в Германии объемы импорта и экспорта электроэнергии в 2023 г. составили 11% и 9% потребления соответственно, что значительно ниже показателей, наблюдаемых в небольших странах ЕС.

В США в целом доля переменных ВИЭ в совокупной генерации электроэнергии в 2023 г. составила 16%. Однако в ряде штатов уровень проникновения солнечной и ветровой генерации существенно превышает среднее значение по стране. В Калифорнии и Техасе – лидерах по продвижению систем накопления энергии – этот показатель в 2023 г. составил 38 и 28% соответственно¹¹.

Удешевление технологий литий-ионных аккумуляторов

По данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (*International Renewable Energy Agency, IRENA*), стоимость полностью установленного и введенного в эксплуатацию проекта по хранению энергии на основе аккумуляторов в глобальном масштабе снизилась на 89% с 2511 долл. за кВт·ч в 2010 г. до 273 долл. за кВт·ч в 2023 г., что было обусловлено значительным повышением эффективности процессов производства батарей за счет технологического прогресса и эффекта масштаба¹².

Практически все установленные аккумуляторные СНЭ используют литий-ионные аккумуляторы¹³. Главным драйвером развития этих технологий остается быстрорастущий спрос на литий-ионные батареи со стороны производителей электромобилей. По данным *Bloomberg NEF*, индикативная цена литий-ионных батарей в расчете на 1 кВт·ч емкости снизилась с 1100 долл. в 2011 г. до 189 долл. в 2019 г. и 115 долл. в 2024 г. При этом потенциал для дальнейшего снижения цен еще не исчерпан. *Bloomberg* ожидает, что в 2026 г. этот показатель опустится ниже 100 долл., а в 2030 г. – ниже 70 долл.¹⁴

Регулирование и меры финансовой поддержки

Важнейшую роль в продвижении крупномасштабных аккумуляторных СНЭ играет целенаправленная государственная политика в США, Европе и КНР, включая как специальное регулирование электроэнергетического сектора, так и меры финансовой поддержки на стороне потребления и производства таких систем.

Более того, в силу технической сложности и высоких требований к надежности и бесперебойности функционирования сектор электроэнергетики, как правило, сильно зарегулирован. Технические параметры энергоснабжения и режимы работы генерирующих электростанций и сетевой инфраструктуры должны быть детально прописаны в нормативных документах [6; 7]. Поэтому включение аккумуляторных систем хранения в электросеть без разработки или корректировки соответствующих правил и процедур в большинстве случаев невозможно.

Федеральная комиссия по регулированию энергетики **США** (*Federal Energy Regulatory Commission, FERC*) с конца 2010-х годов проводит последовательную реформу рынков электроэнергии с целью повышения их эффективности благодаря интеграции в него крупномасштабных аккумуляторных СНЭ и оптимальному использованию этих систем.

¹¹ Рассчитано по базе данных: *Electric Power Annual*. U.S. Energy Information Administration. Available at: <https://www.eia.gov/electricity/annual/> (accessed 25.12.2024).

¹² *Renewable Power Generation Costs in 2023*. International Renewable Energy Agency. 2024. Available at: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023.pdf (accessed 10.01.2025).

¹³ *A 2024 Update on Utility-Scale Energy Storage Procurements*. Morgan Lewis. 04.03.2024. Available at: <https://www.morganlewis.com/pubs/2024/03/an-update-on-utility-scale-energy-storage-procurements> (accessed 16.01.2025).

¹⁴ *Electric Vehicle Battery Packs See Biggest Price Drop Since 2017*. Bloomberg, 10.12.2024. Available at: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-12-10/electric-vehicle-battery-packs-see-biggest-price-drop-since-2017> (accessed 16.01.2025).

В 2018 г. FERC приняла Постановление № 841, направленное на устранение барьеров для участия систем накопления энергии мощностью более 100 кВт в оптовых рынках мощности, энергии и вспомогательных услуг, управляемых региональными операторами передачи электроэнергии. Это постановление обязало последних разработать модели для интеграции таких ресурсов в оптовые рынки электроэнергии с учетом физических и операционных особенностей работы аккумуляторов.

Принятие в 2022 г. масштабного Закона о снижении инфляции (*Inflation Reduction Act, IRA*) предоставило энергетическим компаниям США значительные финансовые стимулы для внедрения крупномасштабных аккумуляторных СНЭ. IRA распространил инвестиционные налоговые кредиты (*Investment Tax Credits, ITC*) на отдельно стоящие аккумуляторные СНЭ. Ранее компании могли получить налоговые кредиты только в отношении СНЭ, установленных непосредственно на солнечных и ветровых электростанциях в рамках ITC для этих электростанций. Базовая ставка ITC составляет 30% капитальных затрат. При этом ставка ITC увеличивается на 10% для проектов, использующих произведенные в США материалы и компоненты, и еще на 10% для проектов, расположенных в пострадавших от упадка угольной и других традиционных отраслей районах¹⁵.

Также значительные усилия в области продвижения технологий хранения энергии предприняты в США на уровне отдельных штатов. По состоянию на март 2024 г. количественные цели по внедрению крупномасштабных аккумуляторных СНЭ в электроэнергетике были установлены в 11 штатах, включая Калифорнию¹⁶. Кроме того, многие штаты обязали энергетические компании включить системы накопления энергии в свои долгосрочные планы развития.

Анализ планов американских электроэнергетических компаний по введению новых мощностей по генерации и хранению электроэнергии, о которых они обязаны регулярно отчитываться регуляторам, показывает, что по итогам 2024 г. совокупная мощность крупномасштабных аккумуляторных СНЭ увеличилась почти в два раза до 30 ГВт, а к концу 2027 г. вырастет минимум до 64 ГВт¹⁷.

В Европе к настоящему времени запустить процесс внедрения крупномасштабных аккумуляторных СНЭ удалось только Великобритании и Ирландии, при этом энергосистема последней интегрирована в единый межюрисдикционный рынок электроэнергии Ирландии и Северной Ирландии (Великобритания).

Великобритания уже в значительной степени реформировала свои рынки мощности и электроэнергии для устранения барьеров для интеграции СНЭ на базе аккумуляторов. По состоянию на конец 2023 г. портфель разрабатываемых проектов по установке новых крупномасштабных аккумуляторных СНЭ здесь насчитывал 22 ГВт (за исключением спекулятивных проектов), большинство из которых должны быть введены в эксплуатацию до 2030 г., что более чем в шесть раз превышает объем уже установленных мощностей¹⁸.

Продвижение аккумуляторных СНЭ в странах ЕС, за исключением Ирландии, пока идет медленными темпами, главным образом из-за отсутствия необходимого регулирования. С 2022 г. в ответ на энергетический кризис Евросоюз пытается реформировать свои рынки электроэнергии, в том числе с целью ускорить продвижение ВИЭ. Учитывая уже

¹⁵ The IRA at a Year and a Half: IRS Guidance and Impact on the Energy Storage Industry. Morgan Lewis. 04.03.2024. Available at: <https://www.morganlewis.com/pubs/2024/03/the-ira-at-a-year-and-a-half-irs-guidance-and-impact-on-the-energy-storage-industry> (accessed 14.01.2025).

¹⁶ State by State: A Roadmap Through the Current US Energy Storage Policy Landscape. Morgan Lewis. 04.03.2024. Available at: https://www.morganlewis.com/pubs/2024/03/state-by-state-a-roadmap-through-the-current-us-energy-storage-policy-landscape#_ftnref8 (accessed 14.01.2025).

¹⁷ Рассчитано по данным: Preliminary Monthly Electric Generator Inventory (Based on Form EIA-860M as a Supplement to Form EIA-860). Available at: <https://www.eia.gov/electricity/data/eia860m/> (accessed 25.12.2024).

¹⁸ McCorkindale M. Massive Growth Potential Continues for Battery Storage in UK and Ireland, Co-Location Emerging. *Energy Storage News*, 28.06.2024. Available at: <https://www.energy-storage.news/massive-growth-potential-continues-for-battery-storage-in-uk-and-ireland-co-location-emerging/> (accessed 25.12.2024).

высокий уровень проникновения переменных ВИЭ во многих странах ЕС, а также их значительные климатические обязательства и планы по дальнейшей декарбонизации электроэнергетики, в ближайшие годы можно ожидать расширения использования систем накопления энергии в электроэнергетике, в первую очередь аккумуляторных СНЭ. В 2022 г. Еврокомиссия выделила 3 млрд евро из Фонда инноваций для финансирования крупных проектов в области декарбонизации, и часть этих средств может быть направлена на внедрение аккумуляторных СНЭ¹⁹.

В марте 2023 г. Еврокомиссия выпустила “Рекомендации по хранению энергии”, в числе которых: 1) устранение имеющейся на части европейских энергетических рынков практики двойного налогообложения для СНЭ, когда покупка электроэнергии и ее продажа рассматриваются как отдельные виды деятельности; 2) упрощение и ускорение процессов получения разрешений на ввод новых СНЭ в эксплуатацию; 3) идентификация пробелов в финансировании и создание механизмов для предсказуемости доходов; 4) увеличение возможностей для СНЭ по извлечению прибыли за счет оказания набора услуг; 5) обеспечение прозрачности данных о ценах на электроэнергию, перегрузках сетей и текущих мощностей по хранению энергии; 6) обязательная оценка странами ЕС будущих потребностей в уровне гибкости энергосистемы в кратко-, средне- и долгосрочном периодах²⁰. Имплементация этих рекомендаций будет стимулировать внедрение аккумуляторов в энергетике стран ЕС.

Китай активно развивает аккумуляторные СНЭ, рассматривая их как ключевую технологию для поддержки растущего сектора возобновляемой энергетики. При этом он продолжит наращивать мощности солнечных и ветровых электростанций для сокращения своей зависимости от импорта энергоресурсов и поддержания локальных производителей соответствующего оборудования. Дополнительным фактором продвижения крупномасштабных аккумуляторных СНЭ в электроэнергетике КНР является стремление удерживать ведущие позиции на мировом рынке литий-ионных батарей. Более того, строительство аккумуляторных СНЭ в КНР обходится дешевле, чем в США и ЕС, которые в значительной степени используют импортируемые из КНР аккумуляторы²¹.

Внедрение систем накопления энергии в Китае происходит в первую очередь за счет государственных инициатив. В июле 2021 г. Национальная комиссия по развитию и реформам (*National Development and Reform Commission, NDRC*) и Национальное энергетическое управление (*National Energy Administration, NEA*) совместно опубликовали “Руководство по ускорению развития новых типов накопления энергии”, согласно которому к 2025 г. планировалось установить 30 ГВт новых мощностей по хранению энергии (исключая ГАЭС). При этом региональные власти, вдохновленные центральной политикой, также разработали планы по внедрению таких систем в сумме на 60 ГВт мощности к 2025 г., что вдвое больше национальной цели.

По состоянию на конец сентября 2024 г. в Китае было установлено 55.2 ГВт крупномасштабных систем накопления энергии нового типа, из которых 53.4 ГВт приходится на литий-ионные аккумуляторы, что вплотную приблизилось к установленной мощности ГАЭС (55.4 ГВт)²².

¹⁹ Commission Invests €3 Billion in Innovative Clean Tech Projects to Deliver on REPowerEU and Accelerate Europe's Energy Independence from Russian Fossil Fuels. European Commission. 03.11.2022. Available at: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/%20en/ip_22_6489 (accessed 25.12.2024).

²⁰ Hyung-Ja de Zeeuw. A Big Push for Energy Storage in Europe. Rabobank. 23.03.2023. Available at: <https://www.rabobank.com/knowledge/d011356059-a-big-push-for-energy-storage-in-europe> (accessed 25.12.2024).

²¹ Renewable Power Generation Costs in 2023. International Renewable Energy Agency. 2024. Available at: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023.pdf (accessed 10.01.2025).

²² Summary of Global Energy Storage Market Tracking (Q3 2024). China's Energy Storage Alliance. 16.11.2024. Available at: <https://en.cnesa.org/latest-news/2024/11/15/cnesa-officially-released-2024-q3-energy-storage-market-data> (accessed 10.01.2025).

ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

В настоящее время аккумуляторные СНЭ уже стали конкурентоспособными в странах с высоким уровнем проникновения солнечной и ветровой энергетики, где регулятивная среда и механизмы работы рынка электроэнергии не препятствуют или прямо способствуют полноценной интеграции этих систем. Так, в Великобритании это справедливо не только для СНЭ, привязанных к солнечным и ветровым электростанциям, но и для отдельно стоящих систем, зарабатывающих на ценовом арбитраже и оказании услуг по балансировке и регулированию частоты электрического тока и других технических параметров электросети.

Технология литий-ионных аккумуляторов среди аккумуляторных СНЭ является доминирующей, и ее закрепление будет усиливаться по мере дальнейшего внедрения этих систем и развития методов их вторичной переработки и переиспользования. При этом параллельное развитие нескольких вариантов химической структуры этих аккумуляторов повышает устойчивость технологий аккумуляторных СНЭ к рискам перебоев в поставке и значительного роста цен на используемые при их производстве сырьевые товары. В последние годы все большую долю рынка завоевывают железифосфатные (LFP) литий-ионные аккумуляторы, производство которых не требует кобальта, никеля и марганца.

Однако литий-ионные аккумуляторы имеют и ряд ограничений. Одна из ключевых проблем – сложность переработки и вторичного использования этих систем. Кроме того, деградация аккумуляторов после определенного числа циклов заряда приводит к снижению их производительности. Производство аккумуляторов, включая добычу и переработку необходимых ресурсов, сопряжено с высоким уровнем выбросов парниковых газов и иными экологическими последствиями и рисками, включая загрязнение водных ресурсов [8]. Эксплуатация литий-ионных аккумуляторных СНЭ осложняется угрозами взрывов и пожаров [9], а также требует специальных мер по обеспечению кибербезопасности [10]. В 2021–2024 гг. на крупномасштабных аккумуляторных СНЭ по всему миру произошло 45 значительных аварий, оказавших широкое воздействие на общественное здоровье и безопасность, из них девять имели место в крупнейших системах мощностью 100 МВт и более²³.

В декабре 2024 г. КНР ввела запрет на экспорт в США ряда критически важных материалов, включая галлий, германий, сурьму и сверхтвердые материалы. Для графита, необходимого компонента литий-ионных аккумуляторов, были установлены более строгие процедуры оценки конечных пользователей. При этом доля Китая в мировой добыче природного графита в 2023 г. составила 74%. Однако эти действия Пекина нацелены скорее на усиление собственных переговорных позиций в более широком торгово-экономическом противостоянии с Вашингтоном, основное поле которого находится в области технологий и оборудования для производства продвинутой полупроводниковой продукции [11]. Более того, КНР не заинтересована во введении полного запрета экспорта графита в США, поскольку это приведет к поиску альтернативных источников этого сырья и более устойчивых и независимых цепочек поставок.

При этом параллельно развиваются и альтернативные литий-ионным аккумуляторные технологии. В частности, находятся на достаточно продвинутой стадии разработки натрий-ионные батареи, демонстрирующие потенциал для применения в сегменте внутридневного хранения энергии. Перспективы их широкого внедрения будут определяться соотношением стоимости и эффективности по сравнению с существующими технологиями.

ПРОБЛЕМА ДОЛГОСРОЧНОГО ХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Современные литий-ионные аккумуляторы, работая на полной мощности, способны накапливать электроэнергию на срок до четырех часов и могут обеспечить только

²³ Insights from EPRI's Battery Energy Storage Systems (BESS) Failure Incident Database. Analysis of Failure Root Cause. EPRI. 2024. Available at: <https://www.epri.com/research/products/000000003002030360> (accessed 10.01.2025).

внутридневное ее хранение. Однако по мере увеличения доли переменных ВИЭ в структуре электрогенерации будут требоваться системы, способные обеспечить более длительное хранение энергии на срок от 10 часов, вплоть до межсезонного [12; 13].

В настоящее время еще не найдена коммерчески окупаемая технология, способная обеспечить длительное безопасное хранение электроэнергии. У СНЭ аккумуляторного типа, но на базе технологий, отличных от литий-ионных, есть значительный потенциал на промежутке от 10 до 150 часов. В частности, уже хорошо исследованы и апробированы ванадиевые окислительно-восстановительные проточные батареи, которые могут хранить значительные объемы заряженного электролита. Однако высокая стоимость ванадиевого электролита сдерживает их распространение [14]. Разрабатываются также и технологии проточных батарей с электролитами других типов, включая органический, но они еще далеки от стадии коммерческого использования [15].

Альтернативные технологии длительного хранения энергии, в том числе гравитационных систем и систем на сжатом воздухе, все еще находятся на стадии разработки и демонстрационных проектов [16] и в силу своей специфики будут, по всей видимости, иметь лишь ограниченное применение.

Для сроков хранения в течение 150 часов и более, которые характеризуются как очень длительные, аккумуляторные СНЭ значительно уступают системам на базе водорода и синтетического метана, которым пока нет альтернатив²⁴. Однако сегодня эти технологии не являются коммерчески окупаемыми, и их разработка опирается на государственное финансирование [17].

Основным драйвером поиска и разработки новых технологий длительного хранения энергии выступает государственная поддержка, которая оказывается частным компаниям и научным институтам. При этом в этот процесс все больше вовлекается частный венчурный капитал [4].

Министерство энергетики США в 2017–2020 гг. направило 1.6 млрд долл. на финансирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в сфере систем накопления энергии²⁵. В 2020 г. в США стартовала программа *Energy Storage Grand Challenge*, направленная на усиление позиций американских компаний в широком спектре технологий хранения энергии. В 2022 г. была объявлена инициатива *Storage Innovations 2030*, цель которой – поиск дешевых технологий долгосрочного хранения энергии.

В октябре 2024 г. правительство Великобритании объявило о введении программы поддержки для систем длительного хранения энергии с механизмом “ограничение сверху и снизу” (*cap-and-floor*)²⁶. Цель программы – стимулировать строительство и ввод в эксплуатацию новых систем длительного хранения для поддержки возобновляемой энергетики и повышения энергетической безопасности страны. Компаниям будет гарантирован минимальный доход в обмен на ограничение максимальной выручки, что призвано привлечь частные инвестиции, обеспечив покрытие базовых расходов таких проектов. Программа будет иметь два направления: одно для “зрелых” технологий (ГАЭС), другое – для инновационных, таких как криогенные системы хранения энергии, системы на сжатом воздухе и проточные батареи.

Китай в течение 13-й пятилетки (2016–2020 гг.) направил на финансирование исследований и разработок в области аккумуляторных технологий 1.8 млрд юаней (250 млн долл. США), в том числе 450 млрд (60 млн долл.) в области аккумуляторов для

²⁴ Bettoli A., Linder M., Nauder T., Noffsinger J., Sengupta S., Tai H., van Gendt G. *Net-Zero Power: Long-Duration Energy Storage for a Renewable Grid*. McKinsey & Company. 2021. Available at: <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/net-zero-power-long-duration-energy-storage-for-a-renewable-grid> (accessed 17.01.2025).

²⁵ *Energy Storage Grand Challenge Roadmap*. U.S. Department of Energy. 2020. Available at: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/12/f81/Energy%20Storage%20Grand%20Challenge%20Roadmap.pdf> (accessed 17.01.2025).

²⁶ *UK Launches Effort for First New Long-Duration Energy Storage in 40 Years*. 10.10.2024. Available at: <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/energy-transition/101024-uk-launches-effort-for-first-new-long-duration-energy-storage-in-40-years> (accessed 17.01.2025).

электроэнергетики. В 14-м пятилетнем плане на 2021–2025 гг. было заявлено об увеличении поддержки развития аккумуляторных СНЭ с целью достижения целей по пиковым выбросам углерода и углеродной нейтральности [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что в обозримом будущем в сегменте внутридневного хранения электроэнергии будут доминировать аккумуляторные СНЭ на базе литий-ионных батарей, хотя установленные мощности ГАЭС как традиционного источника гибкости энергосистем также будут расти, но значительно меньшими темпами. США, Великобритании и Ирландии в силу специального реформирования рынков электроэнергии уже удалось запустить быстрый рост мощностей аккумуляторных СНЭ в электроэнергетике. Китай за счет государственных программ также активно внедряет эти технологии. В ближайшие годы можно ожидать развитие этого процесса и в других странах Европы с высоким проникновением солнечной и ветровой электрогенерации.

Сегодня СНЭ на базе литий-ионных аккумуляторов во многих случаях являются наиболее конкурентоспособным источником энергетической гибкости на внутридневном временном интервале по сравнению с доступными альтернативами. Более того, ожидаемое дальнейшее их продвижение продолжит укреплять позиции технологий литий-ионных аккумуляторов за счет ввода новых производственных мощностей, оптимизации цепочек поставок, а также развития сектора их переработки и вторичного использования.

Однако по мере дальнейшего наращивания доли переменных ВИЭ в совокупной генерации электроэнергии потребность в энергетической гибкости будет быстро возрастать. Поэтому ожидаемое продвижение крупномасштабных систем накопления энергии на базе литий-ионных аккумуляторов не притормозит ни поиск альтернативных технологий хранения энергии, ни внедрение альтернативных источников энергетической гибкости. Более того, для полной декарбонизации сектора электроэнергетики потребуется достижение значительных технологических прорывов в технологиях длительного хранения энергии, включая сезонное.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Холкин Д., Чаусов И., Баркин О. Управление энергетической гибкостью в России и мире. *Энергетическая политика*, 2022, № 11(177), сс. 42-55. [Kholkin D., Chausov I., Barkin O. Managing Energy Flexibility in Russia and the World. *Energy Policy*, 2022, no. 11(177), pp. 42-55. (In Russ.)] DOI: 10.46920/2409-5516_2022_11177_42
2. Маслеников А.О. Аккумуляторные системы хранения энергии как game changer в перестройке мировой электроэнергетики. *Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право*, 2022, т. 16, № 1, сс. 102-127. [Maslennikov A.O. Battery Energy Storage Systems as a Game Changer in the Transformation of Global Power Industry. *Outlines of Global Transformations: Politics, Economics, Law*, 2022, vol. 15, no. 1, pp. 102-127. (In Russ.)] DOI: 10.23932/2542-0240-2022-15-1-5
3. Бушуев В., Новиков Н. Инфраструктурные накопители в энергетике. *Энергетическая политика*, 2020, № 10(152), сс. 74-89. [Bushuev V., Novikov N. Infrastructure Storage in the Energy Sector. *Energy Policy*, 2020, no. 10 (152), pp. 74-89. (In Russ.)] DOI: 10.46920/2409-5516_2020_10152_74
4. Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Коротков И.Ю., Нестеренко Г.Б., Пранкевич Г.А. Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт. *Энергетическая политика*, 2020, № 6(148), сс. 76-87. [Zyryanov V.M., Kir'yanova N.G., Korotkov I.Yu., Nesterenko G.B., Prankevich G.A. Energy Storage Systems: Russian and International Experience. *Energy Policy*, 2020, no. 6(148), pp. 76-87. (In Russ.)]. Available at: <https://energypolicy.ru/sistemy-nakopleniya-energii-rossijsk/energetika/2020/16/18/> (accessed 10.01.2025).
5. Li B., Basu S., Watson S.J., Russchenberg H.W.J. A Brief Climatology of Dunkelflaute Events over and Surrounding the North and Baltic Sea Areas. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 20, 6508. DOI: 10.3390/en14206508
6. Faunce T.A., Prest J., Su D., Hearne S.J., Iacopi F. On-Grid Batteries for Large-Scale Energy Storage: Challenges and Opportunities for Policy and Technology. *MRS Energy & Sustainability*, 2018, vol. 5, no. 10. DOI: 10.1557/mre.2018.11
7. Hesse H.C., Schimpe M., Kucevic D., Jossen A. Lithium-Ion Battery Storage for the Grid. A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids. *Energies*, 2017, vol. 10, no. 12. DOI: 10.3390/en10122107
8. Abdelkareem M.A., Ayoub M., Khuri S., Alami A.H., Sayed E.T., Deepa T.D., Olabi A.G. Environmental Aspects of Batteries. *Sustainable Horizons*, 2023, vol. 8. DOI: 10.1016/j.horiz.2023.100074

9. Conzen J., Lakshmipathy S., Kapahi A., Kraft S., DiDomizio M. Lithium Ion Battery Energy Storage Systems (BESS) Hazards. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2023, vol. 81, 104932. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104932
10. Гарифуллина Н.А. Интеграция аккумуляторных систем хранения энергии в распределенные энергосети. *Экономика и управление: проблемы, решения*, 2024, № 11, т. 9, сс. 18-24. [Garifullina N.A. Integration of Battery Energy Storage Systems into Distributed Energy Networks. *Economics and Management: Problems, Solutions*, 2024, no. 11, vol. 9, pp. 18-24. (In Russ.)] DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2024.11.09.003
11. Жуков С.В., Масленников А.О., Резникова О.Б., Синицын М.В. Протекционизм США против меркантилизма Китая. *Мировая экономика и международные отношения*, 2024, т. 68, № 11, сс. 15-28. [Zhukov S.V., Maslennikov A.O., Reznikova O.B., Sinitsyn M.V. U.S. Protectionism Against China's Mercantilism. *World Economy and International Relations*, 2024, vol. 68, no. 11, pp. 15-28. (In Russ.)] DOI: 10.20542/0131-2227-2024-68-11-15-28
12. Selänniemi A., Hellström M., Björklund-Sänkiahö M. Long-Duration Energy Storage Technology Adoption: Insights from U.S. Energy Industry Experts. *Energy Reports*, 2025, vol. 13, pp. 378-396. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.12.027>
13. De Carne G., Maroufi S., Beiranvand H., De Angelis V., D'Arco S., Gevorgian V., Waczowicz S., Mather B., Liserre M., Hagenmeyer V. The Role of Energy Storage Systems for a Secure Energy Supply: A Comprehensive Review of System Needs and Technology Solutions. *Electric Power Systems Research*, 2024, vol. 236. DOI: 10.1016/j.epsr.2024.110963
14. Olabi A.G., Allam M.A., Abdelkareem M.A., et al. Redox Flow Batteries: Recent Development in Main Components, Emerging Technologies, Diagnostic Techniques, Large-Scale Applications, and Challenges and Barriers. *Batteries*, 2023, vol. 8, no. 9, 409. DOI: 10.3390/batteries9080409
15. Годяева М.В., Казаринов И.А., Воронков Д.Е., Олискевич В.В., Остроумов И.Г. Проточные батареи на основе органических редокс-систем для крупномасштабного хранения электрической энергии. *Электрохимическая энергетика*, 2021, т. 21, № 2, сс. 59-85. [Godyaeva M.V., Kazarinov I.A., Voronkov D.E., Olskevich V.V., Ostroumov I.G. Flow Batteries Based on Organic Redox-Systems for Large-Scale Electric Energy Storage. *Electrochemical Energy*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 59-85. (In Russ.)] DOI: 10.18500/1608-4039-2021-21-2-59-85
16. Zhang X., Gao Z., Zhou B., et al. Advanced Compressed Air Energy Storage Systems: Fundamentals and Applications. *Engineering*, 2024, vol. 34, no. 3, pp. 246-269. DOI: 10.1016/j.eng.2023.12.008
17. Barbaresi A., Morini M., Gambarotta A. Review on the Status of the Research on Power-to-Gas Experimental Activities. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 16, 5942. DOI: 10.3390/en15165942
18. Quan L., Xiqian Y., Hong L. Batteries: From China's 13th to 14th Five-Year Plan. *eTransportation*, 2022, vol. 14. DOI: 10.1016/j.etrans.2022.100201