

DOI: 10.23932/2542-0240-2022-15-1-5

Аккумуляторные системы хранения энергии как game changer в перестройке мировой электроэнергетики

Александр Оскарович Масленников

старший научный сотрудник, Центр энергетических исследований
Институт мировой экономики и международных отношений
имени Е.М. Примакова Российской академии наук
117997, Профсоюзная ул., д. 23, Москва, Российская Федерация
E-mail: maslennikov@imemo.ru
ORCID: 0000-0002-0320-7846

ЦИТИРОВАНИЕ: Масленников А.О. (2022). Аккумуляторные системы хранения энергии как game changer в перестройке мировой электроэнергетики // Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право. Т. 16. № 1. С. 102–127. DOI: 10.23932/2542-0240-2022-15-1-5

Статья поступила в редакцию 30.10.2021.
Исправленный текст представлен 14.12.2021.

АННОТАЦИЯ. За последнее десятилетие объем генерации солнечной и ветровой электроэнергии в мире увеличился более чем в 6 раз, при этом в отдельных странах доля этих энергоресурсов в производстве электроэнергии уже достигает 30% и выше. Переменный режим работы солнечных и ветровых электростанций в зависимости от погодных условий значительно повышает требования к уровню системной гибкости электроэнергетического комплекса, которые по мере продвижения низкоуглеродной парадигмы будут и дальше нарастать. В фокусе настоящей статьи – анализ перспектив развития аккумуляторных технологий хранения электроэнергии в качестве основного источника повышения возможности энергосистемы эффективно подстраиваться под изменения спроса и предложения на различных временных горизонтах. Автор пока-

зывает, что, во-первых, скачкообразное ускорение темпов ввода в эксплуатацию крупномасштабных аккумуляторных систем хранения электроэнергии в 2020–2021 гг. носит долговременный характер и обусловлено не только значительным снижением себестоимости литий-ионных батарей, но и мерами государственной поддержки и специальной настройки системы регулирования рынков электроэнергии в США, Китае и отдельных странах Европы. Во-вторых, конкуренция среди производителей на рынке литий-ионных батарей будет усиливаться. В-третьих, существующие технологии позволяют с приемлемыми издержками осуществлять только внутридневное хранение электроэнергии, при этом разработка низкостатратного способа длительного хранения электроэнергии могла бы коренным образом расширить границы продвижения переменных

возобновляемых источников энергии и открыть дорогу к достижению углеродной нейтральности. Активный поиск такой технологии осуществляют большое число крупных компаний и небольших стартапов, а также ведущих университетов и лабораторий при поддержке государственного финансирования и частного, в том числе венчурного, капитала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *хранение электроэнергии, стационарные системы хранения электроэнергии, распределенные системы хранения электроэнергии, электроэнергетика, аккумуляторы, НВИЭ, переменные источники энергии, ГАЭС, водород, углеродная нейтральность.*

Главной тенденцией мировой электроэнергетики в последнее десятилетие является значительное увеличение доли новых возобновляемых источников энергии (НВИЭ) в структуре генерации электроэнергии. Если в 2010 г. этот показатель составлял всего 3,5%, то в 2020 г. доля НВИЭ достигла 11,7% и превысила вклад атомных электростанций (см. рис. 1). Сектор возобновляемой энергетики продемонстрировал высокую устойчивость во время пандемии коронавирусной инфекции COVID-19. Объем генерации электроэнергии из НВИЭ в 2020 г. вырос на 13%, в то время как совокупная мировая электрогенерация снизилась на 0,7% из-за спада экономической активности.

Большинство исследователей сходятся во мнении, что долгосрочная тенденция продвижения НВИЭ в рам-

ках разворачивающегося нового энергетического перехода продолжится¹. Основным драйвером роста масштабов использования НВИЭ в электроэнергетике выступает низкоуглеродная климатическая политика в крупнейших мировых экономиках, направленная на снижение выбросов парниковых газов. Евросоюз в рамках «Зеленой сделки» взял на себя обязательство достичь углеродной нейтральности к 2050 г., США намерены свести к нулю чистые выбросы CO₂ к 2050 г., Китай – к 2060 г. Продвижению НВИЭ в последние годы также способствует значительное удешевление этих технологий вследствие технологического прогресса.

Однако по мере увеличения доли НВИЭ нарастают и проблемы их интеграции в существующую энергосистему. В частности, необходимы значительные инвестиции в строительство новой сетевой инфраструктуры (ЛЭП, трансформаторные подстанции и т.д.) для доставки электроэнергии из возобновляемых источников от электростанций до потребителей и доведения ее качественных характеристик до необходимых стандартов по уровню напряжения, частоте электрического тока и т.д. Немаловажное значение имеют и вопросы реформирования устройства рынков электроэнергии, в том числе с целью обеспечения возврата на инвестиции как в традиционной, так и в возобновляемой электроэнергетике. Однако одним из важнейших препятствий для значительного продвижения возобновляемой энергетики является проблема согласования объемов генерации электроэнергии с динами-

¹ В зависимости от подхода текущий энергопереход на НВИЭ является либо четвертым после продвижения соответственно угля, нефти и природного газа, либо третьим, если продвижение нефти и природного газа считать в рамках одного энергоперехода.

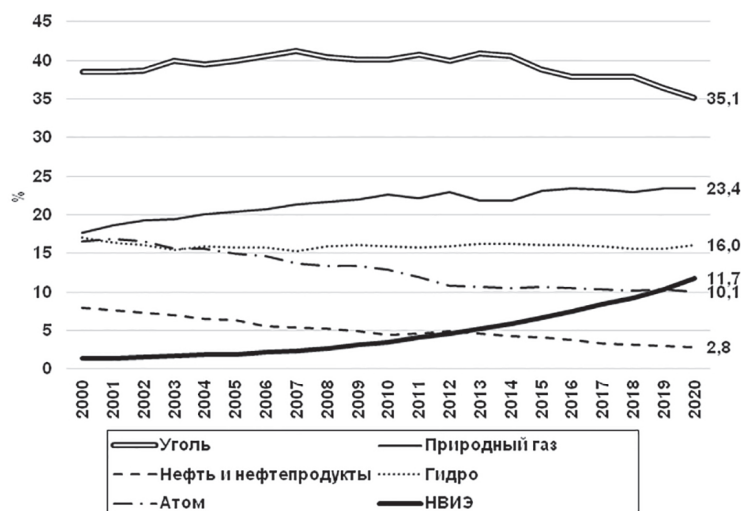


Рисунок 1. Динамика долей энергоресурсов в мировой генерации электроэнергии
Figure 1. Dynamics of shares of energy resources in global power generation

Источники: [BP Statistical Review of World Energy, 2021] и расчеты автора.

кой спроса на нее. Основную долю возобновляемой электроэнергетики занимают переменные возобновляемые источники энергии (ПВИЭ), главным образом солнечные и ветровые электростанции, загрузка которых недиспетчеризуема и зависит от погодных условий.

За последнее десятилетие объем генерации солнечной и ветровой электроэнергии увеличился более чем в 6 раз – с 380 ТВт/ч в 2010 г. до 2 445 ТВт/ч в 2020 г., что составило уже более 9% глобальной генерации электроэнергии (см. табл. 1). Наиболее быстрыми темпами солнечная и ветровая генерация растет в странах Евросоюза, где в 2020 г. она обеспечила 19,5% совокупного предложения электроэнергии. При этом в Греции и Германии доля ПВИЭ превысила 30%. В Великобритании этот показатель превысил 28%.

В США в целом по стране доля ПВИЭ составляет 11%, а в отдельных штатах – существенно выше. В Калифорнии солнечная и ветровая генерация в 2020 г. обеспечила 23% всей электроэнергии, при этом за счет высокой сезонности этот показатель в отдельные месяцы достигает 35%. В Китае доля ПВИЭ также увеличивается и в 2020 г. она достигла 9,4%.

Ввод в эксплуатацию все большего числа солнечных и ветровых электростанций требует повышения уровня гибкости энергосистемы, которая может быть обеспечена как на стороне предложения электроэнергии (резервные мощности электростанций на ископаемом топливе, избыточные мощности ПВИЭ, крупномасштабные системы хранения электроэнергии), так и на стороне ее потребления (технологии управления спросом, распределенные систе-

Таблица 1. Динамика доли солнечной и ветровой энергетики в совокупной генерации электроэнергии

Table 1. Dynamics of shares of solar and wind in total power generation

	2000	2005	2010	2015	2019	2020
Евросоюз (27 стран), в том числе:	0,8	2,4	5,4	12,5	16,9	19,5
Греция	0,8	2,1	5,0	16,4	25,7	33,3
Германия	1,7	4,6	7,9	18,4	28,3	31,7
Испания	2,1	7,2	16,9	22,5	25,5	28,9
Португалия	0,4	3,8	17,4	23,7	28,2	26,0
Бельгия	0,0	0,3	1,9	12,4	14,9	20,1
Великобритания	0,3	0,7	2,7	14,1	23,8	28,3
США	0,2	0,4	2,2	5,3	9,2	11,1
Китай	0,0	0,1	1,2	3,9	8,4	9,4
Мир	0,2	0,6	1,8	4,5	7,9	9,1

Источники: [BP Statistical Review of World Energy, 2021] и расчеты автора.

мы хранения электроэнергии). Сегодня основным источником такой гибкости выступает резервная мощность традиционных электростанций, прежде всего газовых и угольных, однако по мере продвижения ПВИЭ возможности традиционной энергетики компенсировать нестабильность возобновляемой генерации стремительно сокращаются.

В результате электроэнергетика становится все более уязвимой не только к экстремальным погодным явлениям, как, например, период аномально низких температур в штате Техас (США) в феврале 2021 г., но также и к более вероятным событиям. Масштабный европейский энергетический кризис в конце 2021 г., сопровождавшийся многократным ростом цен на природный газ и электроэнергию, был вызван сочетанием ряда факторов, которые сами по себе не носили экстремального характера.

Очевидно, что поддержание достаточного объема резервных угольных и газовых электростанций для компен-

сации периодов низкой солнечной и ветровой генерации неэффективно не только из-за дороговизны этой стратегии, но и в силу невозможности гарантировать наличие предложения традиционных энергоресурсов в эти моменты времени.

Многие исследователи рассматривают развитие и внедрение систем хранения электроэнергии (СХЭ) в качестве важнейшего механизма интеграции возобновляемой энергетики. Существует огромное количество различных технологий СХЭ, как уже применяемых на практике, так и находящихся на этапе разработок. При этом наибольшим потенциалом для кардинальной трансформации сектора электроэнергетики с точки зрения повышения надежности энергосистем с высокой доли ПВИЭ обладает группа аккумуляторных технологий. Однако прежде чем перейти к последним, следует рассмотреть гидроаккумуляторные электростанции (ГАЭС), которые в настоящее время являются круп-

нейшей технологией хранения электроэнергии по объему установленных мощностей и обеспечивают более 93% всех мировых СХЭ в электроэнергетике.

ГАЭС используют излишки электроэнергии для закачки воды из нижнего водохранилища в верхнее водохранилище. В периоды повышенного спроса накопленная вода сбрасывается для генерации электроэнергии, как на классических ГЭС. По состоянию на ноябрь 2020 г. в мире функционировало 315 ГАЭС совокупной мощностью 163 ГВт (см. табл. 2).

В структуре ГАЭС в мире преобладают достаточно старые электростанции, пик их строительства пришелся на 1970-е годы и был связан с необходимостью обеспечивать стабильную загрузку атомных электростанций. Сегодня ГАЭС перепрофилируются под балансировку перебоев в объемах генерации солнечной и ветровой электроэнергии, но для обеспечения высокой доли последних в энергобалансе существующих мощностей ГАЭС недостаточно. В Китае, который лидирует по со-

Таблица 2. Мощности ГАЭС и совокупные мощности по электрогенерации в 2020 г.
Table 2. Pumped Hydro and total power generation capacity, 2020

	ГАЭС		Мощность всех электростанций, ГВт	Доля ГАЭС в совокупной мощности, %
	Число	Мощность, ГВт		
Китай	31	29,4	2 201	1,3
Япония	41	27,4	352	7,8
США	38	22,6	1 150	2,0
Италия	18	7,1	116	6,1
Испания	21	7,0	110	6,3
Индия	10	6,8	450	1,5
Германия	25	6,1	234	2,6
Франция	10	5,8	137	4,2
Южная Корея	7	4,7	138	3,4
Австрия	17	4,5	27	16,6
Швейцария	14	4,2	23	18,7
Португалия	12	3,5	22	16,4
Остальные страны	71	33,7	2 676	1,3
Мир	315	162,8	7 635	2,1
Справочно: Евросоюз и Великобритания	149	50,9	1 088	4,7

Источники: [DOE Global Energy Storage Database, n/y; Installed electricity capacity by country/area (MW) by Country/area, Technology, Grid connection and Year, n/y; Pumped Storage Tracking Tool, n/y] и расчеты автора.

вокупной мощности ГАЭС, последние в 2020 г. составляли всего 1,3% от совокупной мощности китайских электростанций, в США – 2%. Хотя в отдельных странах ЕС – в Австрии

и Португалии – доля ГАЭС в совокупных генерирующих мощностях составляет 16–17%, в среднем в Евросоюзе и Великобритании этот показатель не превышает 5%.

Более того, серьезным недостатком ГАЭС является их жесткая привязка к подходящим географическим локациям – чем дальше расположена ГАЭС от пунктов генерации и потребления электроэнергии, тем выше нагрузка на магистральные электросети и выше потери электроэнергии на ее транспортировку. Как и в случае с традиционными гидроэлектростанциями, строительство ГАЭС предполагает затопление значительных участков земли, которые могли бы использоваться с другими целями, сопровождается рисками катастрофического наводнения в случае аварийного разрушения плотины и т.д. [Nautiyal, Goel, 2020].

Также ГАЭС отличаются высокой капиталоемкостью и требуют значительных инвестиций, что дополнительно осложняет их продвижение. В США около трети действующих ГАЭС реализованы в рамках долевого участия нескольких энергетических компаний, что уступает только аналогичному показателю для АЭС (37%), а в секторе газовой генерации на совместные предприятия приходится лишь 6% установленных мощностей². Высокая капиталоемкость ГАЭС приводит к длительным срокам окупаемости этих проектов, и как следствие – к более высоким финансовым рискам и повышенной требуемой нормой доходности для инвесторов.

МЭА ожидает, что в 2021–2030 гг. в мире будет введено в эксплуатацию 65 ГВт мощностей ГАЭС, что составит около 40% от текущего объема гидроаккумулирующих мощностей. Более половины этого прироста обеспечит Китай, где до 2030 г. ожидается ввод в экс-

плуатацию 37 ГВт мощностей ГАЭС [Hydropower Special Market Report..., 2021]. Хотя по объему установленных мощностей ГАЭС еще длительное время будут оставаться крупнейшей технологией хранения электроэнергии и играть значительную роль в интеграции солнечных и ветровых электростанций, эту технологию нельзя назвать прорывной.

Наибольший прирост установленной мощности СХЭ в ближайшее десятилетие будет обеспечен за счет электрохимических технологий, т.е. аккумуляторов, главным образом литий-ионных. Сегодня более 90% установленных стационарных аккумуляторов в электроэнергетике в мире являются литий-ионными [Energy Storage Industry White Paper..., 2021], они же обеспечат и практически весь ожидаемый рост этого сектора в среднесрочной перспективе.

В сравнении с ГАЭС, аккумуляторные системы хранения электроэнергии обладают целым рядом преимуществ, включая высокую плотность энергии, высокую скорость реакции, возможность гибко варьировать размер и место расположения установки и др. При этом область применения аккумуляторов не ограничивается задачей временного хранения излишков электроэнергии. Аккумуляторы позволяют также стабилизировать ряд технических параметров электросети, в т.ч. частоту электрического тока, снизить потребность в передаче электроэнергии и нагрузку на ЛЭП, могут использоваться для обеспечения эффективного режима работы зарядных станций для электромобилей и др. Тем не менее до не-

2 Nuclear, pumped storage, and coal power plants are more likely to have multiple owners // U.S. Energy Information Administration. – 2021. – February 22. – URL: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=46816> (дата обращения: 28.10.2021).

давнего времени дороговизна литий-ионных аккумуляторов препятствовала их проникновению в электроэнергетику: по состоянию на 2019 г. аккумуляторы занимали только около 5% совокупной мощности рынка хранения электроэнергии.

В 2020–2021 гг. темпы внедрения стационарных аккумуляторных СХЭ в ряде стран многократно возросли, в первую очередь в США, Китае и некоторых странах ЕС. Ускоренное внедрение аккумуляторов в электроэнергетике в этих странах стало результатом двух главных факторов: значительного снижения издержек

производства литий-ионных батарей и целенаправленной государственной политики по стимулированию их продвижения.

По данным МАЭ, себестоимость производства литий-ионных батарей в 2011–2021 гг. снизилась более чем в 7 раз: с 925 долл. до 126 долл. за 1 кВт/ч (см. рис. 2). Основными драйверами снижения себестоимости литий-ионных батарей выступили технологический прогресс и растущий спрос на аккумуляторы со стороны производителей электромобилей, обеспечивший многократный рост мощностей по их производству и эффект масштаба.

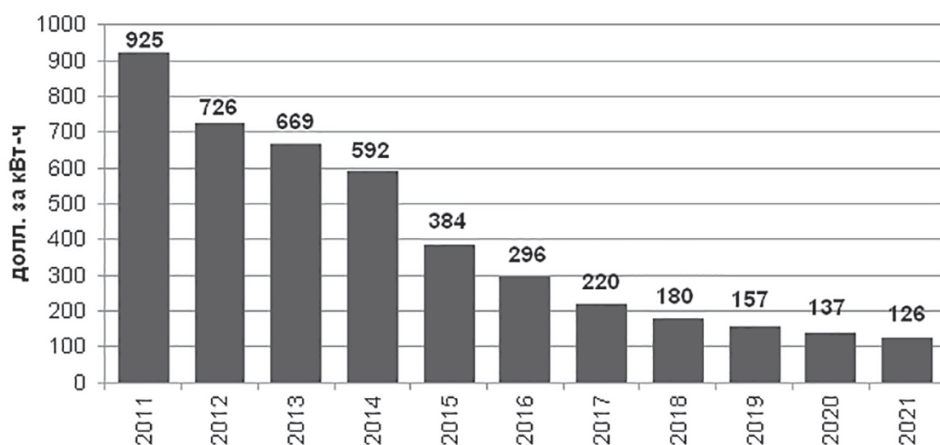


Рисунок 2. Динамика себестоимости производства литий-ионных аккумуляторов
Figure 2. Dynamics of li-ion batteries production costs

Источник: [World Energy Outlook, 2021].

Исследование [Projecting the Future..., 2019] показало, что если в 2015 г. ГАЭС характеризовались наименьшей нормированной стоимостью хранения электроэнергии (LCOS) на краткосрочном временном интер-

вале, то в 2020 г. это было справедливо только в 60% рассмотренных сценариев. При этом, основываясь на проведенном моделировании перспективной динамики издержек четырех групп технологий хранения электро-

энергии, авторы пришли к выводу, что в 2030 г. вероятность того, что ГАЭС будут обладать наименьшим *LCOS* для краткосрочного хранения электроэнергии, не превышает 7%.

Ожидается, что в ближайшее десятилетие продвижение стационарных аккумуляторных систем хранения электроэнергии значительно ускорится. При этом имеющиеся прогнозы темпов внедрения стационарных аккумуляторов в электроэнергетике очень быстро устаревают. Прогноз МЭА (опубликован в ноябре 2020 г.), согласно которому совокупная мощность систем хранения электроэнергии на электростанциях в 2030 г. в США и Китае составит 23 и 26 ГВт соответственно [World Energy Outlook, 2020], существенно недооценивает скорость внедрения СХЭ в этих странах. Опираясь на фактические данные за первую половину 2021 г., можно ожидать, что прогнозируемые МЭА на 2030 г. уровни продвижения аккумуляторов в США и Китае будут превышены уже в 2025 г.

Более оптимистичен в отношении перспектив СХЭ прогноз *Wood Mackenzie* (сделан в сентябре 2021 г.) [Global Energy Storage Outlook H2, 2021], согласно которому совокупная установленная мощность стационарных аккумуляторных систем хранения электроэнергии в мире в 2030 г. вырастет более чем в 25 раз к уровню 2020 г. и достигнет 360 ГВт, при этом 73% этого показателя будет приходиться на электростанции и сети (системы хранения «до счетчика»). Оставшиеся 27% мощности обеспечат домохозяйства, коммерческий сектор и промышленные предприятия.

В географическом разрезе большая часть прогнозируемой *Wood Mackenzie* установленной мощности стационарных систем хранения электроэнергии будет сконцентрирована в США (40%), Китае (33%) и в странах Европы (11%), в то время как на все остальные страны придется лишь 16% совокупного показателя (см. рис. 3).

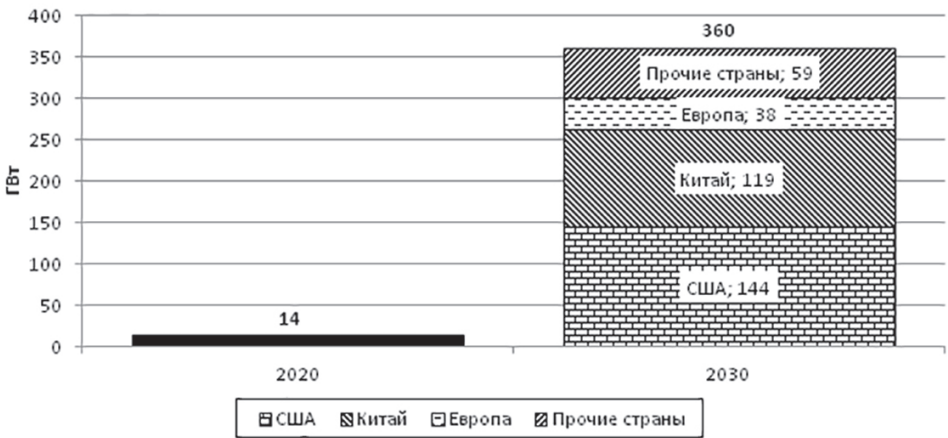


Рисунок 3. Прогноз кумулятивной установленной мощности систем хранения электроэнергии

Figure 3. Cumulative energy storage system's installed capacity forecast

Источники: [Global Energy Storage Outlook H2, 2021] и расчеты автора.

Продвижение аккумуляторных систем хранения электроэнергии «до счетчика»

Ведущую роль в интеграции ПВИЭ будут играть крупные системы хранения электроэнергии в сегменте «до счетчика», которые устанавливаются либо рядом с солнечной или ветровой электростанцией, либо отдельно для обмена электроэнергией с электросетью. Лидером по продвижению аккумуляторных систем хранения электроэнергии в этом сегменте выступают США. В 2020 г. здесь было введено в эксплуатацию 490 МВт крупных

(более 1 МВт) аккумуляторных хранилищ, в результате чего их совокупная установленная мощность выросла в 1,5 раза – с 1 ГВт в 2019 г. до 1,5 ГВт в 2020 г. (см. рис. 4). При этом ожидается, что в 2021 г. будет установлено еще 4,5 ГВт мощности, т.е. в 3 раза больше, чем было установлено в сумме за все предыдущие годы. К концу 2023 г. американские электроэнергетические компании, согласно своей официальной отчетности [Inventory of Operating Generators as of July 2021, 2021], планируют довести совокупную мощность крупных аккумуляторных хранилищ электроэнергии до 15 ГВт.

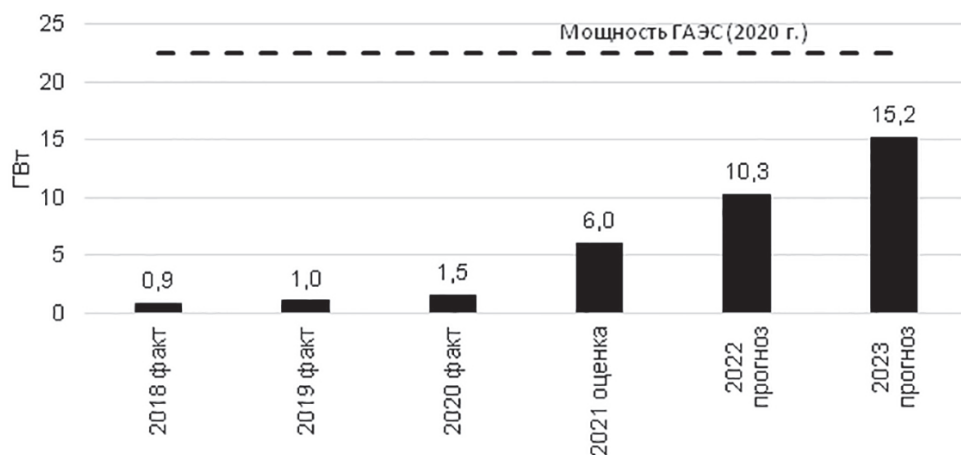


Рисунок 4. Совокупная установленная мощность аккумуляторных систем хранения электроэнергии на электростанциях в США

Figure 4. Total battery electricity storage system installed capacity in US power sector

Источники: [Inventory of Operating Generators as of July 2021, 2021; DOE Global Energy Storage Database, n/y; Pumped Storage Tracking Tool, n/y] и расчеты автора.

Быстрому продвижению аккумуляторов в США способствует активная государственная политика как на федеральном уровне, так и на уровне отдельных штатов. В 2011 г. Федеральная комиссия по регулированию в области энергетики (FERC) разрешила операторам СХЭ участвовать в оптовом рынке электроэнергии, а также оказывать системные услуги в электросети.

Важным направлением продвижения СХЭ в электроэнергетике является реформирование рынков электроэнергии таким образом, чтобы повысить возможности электроэнергетических компаний по извлечению прибыли от установки систем хранения электроэнергии за счет комбинирования источников выручки (*revenue stacking*). Определенные схемы организации рынков электроэнергии и тарифного регулирования могут давать участникам рынка возможность использовать одну и ту же мощность СХЭ для оказания и получения оплаты за несколько системных услуг.

Помимо сохранения временно неиспользуемой электроэнергии от солнечных и ветровых электростанций, системы хранения электроэнергии могут оказывать целый спектр системных услуг для электросетей и электроэнергетики в целом. Всего выделяют около двух десятков различных применений СХЭ в электроэнергетике, включая арбитраж электроэнергии, удовлетворение пикового спроса, поддержание частоты электрического тока, стабилизация напряжения, предоставление резервной мощности при аварийных отключениях, холодный старт электростанций на ископаемом топливе и др. [Castillo, Dennice, 2014; Shaqsi, Sopian, Al-Hinai, 2020; Electricity Storage Handbook..., 2013]. Набор этих услуг зависит от места установки системы хранения электроэнергии (рядом с электростанцией, в магистральной сети, в распределительной сети или в точке конечного потребления) и ее режима работы.

В 2018 г. FERC ввела дифференциацию в системе оплаты системной услуги по поддержанию частоты электрического тока в зависимости от качества ее оказания. Поскольку аккумуляторы СХЭ обладают высокой скоростью реакции, это нововведение позволило им получать более высокую оплату за услугу поддержания частоты электрического тока, чем газовые электростанции.

Частично стоимость внедрения систем хранения электроэнергии в США дотируется из бюджета путем предоставления налоговых вычетов. В сентябре 2021 г. налоговый комитет Палаты представителей в США одобрил введение налогового вычета для отдельно стоящих систем хранения электроэнергии, которые будут введены в эксплуатацию до 2032 г. в размере 30% от объема инвестиций [Zaifman, Schaff, Combest, 2021]. Ранее инвесторы в системы хранения электроэнергии могли получить налоговый вычет только при строительстве аккумуляторов в привязке к солнечным или ветровым электростанциям в рамках соответствующих программ налоговых вычетов для солнечной и ветровой энергетики.

Дополнительные меры по продвижению СХЭ в США действуют на уровне отдельных штатов. В штате Калифорния, лидирующем по объему установленных мощностей как ПВИЭ, так и систем хранения электроэнергии, еще в 2013 г. регуляторы обязали частные электроэнергетические компании установить 1,3 ГВт систем хранения электроэнергии к 2024 г. В 2018 г. Калифорния на законодательном уровне поставила цель по достижению углеродной нейтральности к 2045 г., при этом прорабатываются возможности сдвинуть

этот дедлайн уже на 2035 г. Помимо Калифорнии, целевые показатели по внедрению СХЭ установлены еще в пяти штатах, включая Нью-Йорк и Массачусетс [Battery Storage in the United States: An Update on Market Trends, 2021, p. 26].

Среди стран Европы лидером по продвижению стационарных СХЭ в сегменте «до счетчика» выступает Великобритания. По состоянию на начало 2021 г. здесь функционировало 1,3 ГВт мощности таких систем, а к концу 2022 г. ожидается рост этого показателя до 4,5 ГВт [UK Battery Storage Project Database Report, n/y]. При этом совокупный портфель разрабатываемых проектов по установке СХЭ в электроэнергетике во II квартале 2021 г. превысил 20 ГВт [McCorkindale, 2021]. Можно ожидать, что энергетический кризис 2021 г. значительно ускорит темпы внедрения систем хранения электроэнергии как в Великобритании, так и в Евросоюзе. Как и в США, регуляторы рынка электроэнергии в Великобритании проводят реформы, направленные на повышение доходности от установки систем хранения электроэнергии и расширение возможностей энергетических компаний по комбинированию источников выручки [Profit From Dynamic Containment in the UK, 2021].

В Китае также наблюдается кратный рост мощности аккумуляторных СХЭ в сегменте «до счетчика». В 2020 г. здесь было установлено 880 МВт новых мощностей таких систем, что почти в 2,5 раза больше, чем в 2019 г. Накопленный объем установленных мощностей аккумуляторных СХЭ в этом сегменте в 2020 г. достиг 1,8 ГВт, и можно ожидать продолжения его быстрого роста. В апреле 2021 г. китайские ре-

гуляторы впервые поставили цель нарастить совокупную мощность систем хранения электроэнергии, отличных от ГАЭС, до 30 ГВт к 2025 г., при этом аккумуляторные системы хранения в сегменте «до счетчика» обеспечат не менее половины этого показателя.

Продвижение аккумуляторных СХЭ в электроэнергетике идет и в ряде других стран, хотя и менее высокими темпами. В Австралии на конец 2020 г. в разработке находилось около 50 проектов аккумуляторных СХЭ в электроэнергетике совокупной мощностью 7 ГВт³. Именно Австралия в 2017 г. выступила пионером по продвижению крупномасштабных аккумуляторных СХЭ в электроэнергетике после завершения компанией *Tesla* крупнейшего в то время проекта *Hornsdale Power Reserve* мощностью 100 МВт.

Аккумуляторы «после счетчика»

Важную роль в продвижении ПВИЭ будут играть системы хранения электроэнергии «после счетчика», т.е. устанавливаемые у потребителей электроэнергии. Существует два вида таких систем: в привязке к солнечным батареям на крыше и отдельно стоящие системы, накапливающие электроэнергию из электросети в периоды низких цен.

В США в 2019 г. совокупная мощность систем хранения электроэнергии в этом сегменте составляла 400 МВт, из которых 82% пришлось на домохозяйства и коммерческие предприятия, 14% – на промышленность. Продвижению распределенных систем хранения электроэнергии в секторе домохо-

3 Colthorpe A. Australia has a 7GW pipeline of large-scale battery storage projects // Energy Storage News. – 2020. – December 10. – URL: <https://www.energy-storage.news/australia-has-a-7gw-pipeline-of-large-scale-battery-storage-projects/> (дата обращения: 28.10.2021).

зайств способствуют программы поддержки на уровне штатов. В частности, в штате Калифорния по состоянию на октябрь 2021 г. на эти цели было выделено более 1 млрд долл., в штате Мэриленд для домохозяйств и коммерческих предприятий с 2018 г. действует налоговый вычет в размере 30%.

В Европе лидером в сегменте СХЭ «после счетчика» является Германия: 70% солнечных панелей в секторе домохозяйств в этой стране установлено совместно с системами хранения электроэнергии, число которых в 2020 г. превысило 300 тыс., а их совокупная емкость достигла 2,3 ГВт/ч⁴.

Большое число систем хранения электроэнергии в сегменте «после счетчика» установлено и в Китае: в 2020 г. их совокупная мощность достигла 1,5 ГВт (расчеты автора на основе [CNESA White Papers, n/y]), при этом значительную часть этого показателя обеспечивают промышленные предприятия.

Установка аккумуляторов в сегменте «после счетчика» относится к технологиям управления потреблением электроэнергии, что облегчают интеграцию переменных возобновляемых источников энергии в электросеть. Однако в основном такие системы будут обеспечивать использование накопленной электроэнергии внутри самого домохозяйства в другие промежутки времени. Хотя в некоторых сетях уже сформированы так называемые просьюмеры – распределенные потребители, способные еще и поставлять электроэнергию в сеть, это достаточно дорогостоящий формат организации рынка, предъявляющий высокие требования к качеству электросети и требующий больших вложений в электросе-

товое оборудование. Такая схема организации рынка будет иметь достаточно ограниченное применение, учитывая, что энергопереход и без того значительно увеличит потребности в инвестициях в электросети. В частности, значительной модернизации электросети потребует развитие сети зарядных станций для электромобилей.

Согласно прогнозу МЭА, среднегодовые инвестиции в трансмиссионные и распределительные электросети в сценарии достижения странами объявленных целевых установок по снижению выбросов парниковых газов вырастут в 2021–2030 гг. до 420 млрд долл., в 2031–2050 гг. – до 600 млрд долл. по сравнению с 300 млрд долл. в 2016–2020 гг. В сценарии углеродной нейтральности к 2050 г. эти затраты после 2030 г. составят 1 трлн долл. в год.

Сеть из аккумуляторов припаркованных электромобилей также рассматривается в качестве потенциального СХЭ после достижения электромобилями значительной доли совокупного автопарка. Однако потенциал у этой технологии весьма ограничен: во-первых, как и в случае с просьюмерами, потребуются значительные инвестиции в электросеть на организацию соответствующего режима ее работы; во-вторых, это может создавать неудобства собственникам электромобилей, а также приводить к сокращению срока службы их аккумуляторов; в-третьих, может потребоваться использование технологий прогнозирования транспортных потоков, хотя это решаемая задача; в-четвертых, это не решает проблему хранения электроэнергии на длительный срок, которая будет рассмотрена ниже.

4 Colthorpe A. More than 300,000 battery storage systems installed in German households // Energy Storage News. – 2021. – March 23. – URL: <https://www.energy-storage.news/more-than-300000-battery-storage-systems-installed-in-german-households/> (дата обращения: 28.10.2021).

Также необходимо отметить, что в сегменте «после счетчика» важную, а возможно, и основную роль будут играть прочие технологии управления спросом, включая динамическое ценообразование, «Интернет вещей» и др.

Глобальная конкуренция за рынок литий-ионных аккумуляторов

Быстрое продвижение стационарных аккумуляторов в электроэнергетике создает масштабный рынок соответствующих систем, в первую очередь литий-ионных батарей. При этом основой рынка литий-ионных батарей и главным драйвером его роста являются аккумуляторы для электромобилей. В настоящее время для производства стационарных литий-ионных СХЭ и аккумуляторов для автомобилей используются одни и те же технологии и даже производственные мощности. Однако, учитывая меньшие требования стационарных систем к плотности электроэнергии, в будущем эти рынки будут все более расходиться. Компания *Tesla* в октябре 2021 г. объявила о строительстве гигантского завода мощностью 40 ГВт/ч в год, заточенного исключительно под стационарные СХЭ.

МЭА в достаточно консервативном сценарии «объявленные политики» прогнозирует, что ежегодный объем рынка литий-ионных аккумуляторов (стационарные системы и электромобили) вырастет с 25 млрд долл. в 2020 г. до 120 млрд долл. в 2030 г. и 170 млрд долл. в 2050 г. (в реальных ценах 2020 г.). В сценарии «нулевые чистые выбросы 2050» продажи аккумуляторов

в 2030 и 2050 гг. достигнут 450 и 830 млрд долл. соответственно. Неудивительно, что среди производителей батарей, стремящихся утвердиться на фактически только формирующемся рынке, уже развернулась активная конкуренция.

По прогнозу *Bloomberg*, в 2025 г. Китай, Южная Корея и Япония сохраняют свои позиции в качестве трех крупнейших производителей литий-ионных аккумуляторов, как и в 2021 г. При этом США и Польша, занимающие в рейтинге 2021 г. четвертое и пятое места соответственно, в 2025 г. сократят свое отставание от Японии и разделят с ней третью строчку списка.

В последние годы США значительно нарастили усилия по повышению своей конкурентоспособности на рынке литий-ионных аккумуляторов и технологий хранения электроэнергии в целом. В январе 2020 г. Министерство энергетики США запустило специальную программу «Большой вызов хранения энергии», цель которой сформулирована в виде слогана «разрабатывай здесь, производи здесь, устанавливай везде». Таким образом, программа направлена не только на стимулирование разработки технологий в области систем хранения электроэнергии, но также на локализацию их производства в масштабе, превосходящем внутренние потребности, и на наращивание экспорта. По объему импорта литий-ионных аккумуляторов США в 2020 г. незначительно уступали лишь Германии – обе страны обеспечивали по 15% мирового импорта каждая, – однако в списке мировых экспортеров литий-ионных аккумуляторов США заняли лишь восьмую строчку с долей рынка 4,4% (см. табл. 3).

Таблица 3. Структура мировой торговли литий-ионными аккумуляторами* в 2020 г.

Table 3. Structure of world trade in li-ion batteries* in 2020

Страны	Импорт, млрд долл.	Доля в мировом импорте, %	Страны	Экспорт, млрд долл.	Доля в мировом экспорте, %
Германия	7,0	14,8	Китай	16,3	34,3
США	6,9	14,5	Южная Корея	5,0	10,5
Китай	3,5	7,3	Польша	4,7	9,9
Гонконг	2,7	5,8	Гонконг	3,7	7,7
Вьетнам	2,3	4,9	Германия	3,6	7,6
Нидерланды	1,8	3,8	Венгрия	2,7	5,8
Южная Корея	1,8	3,7	Япония	2,6	5,6
Франция	1,7	3,5	США	2,1	4,4
Япония	1,5	3,1	Сингапур	1,0	2,1
Польша	1,4	2,9	Малайзия	0,9	2,0
Мир	47,5	100	Мир	47,5	100
Справочно: ЕС и Великобритания	20,6	43,4	Справочно: ЕС и Великобритания	13,8	29,1

* – товарные позиции 850650 и 850760 в стандартизированной классификации HS.

Источники: [UN Comtrade Database, n/y] и расчеты автора.

В декабре 2020 г. Министерство энергетики США выпустило дорожную карту по имплементации этой программы по пяти направлениям: «развитие технологий», «производство и цепочки поставок», «внедрение технологий», «регулирование и оценка» и «развитие рабочей силы». Был создан Федеральный консорциум в области продвинутых батарей (*Federal Consortium for Advanced Batteries, FCAB*) с целью ускорить формирование внутренней производственной базы для выпуска передовых аккумуляторов. FCAB включает представителей Министерства энергетики, Министерства торговли, Мини-

стерства обороны и Государственного департамента США.

Крупные компании уже инвестируют значительные средства в производство литий-ионных аккумуляторов на территории США, в первую очередь с прицелом на рынок электромобилей. В частности, *Ford* объявила об инвестициях 11,4 млрд долл. в строительство трех заводов по производству электромобилей и аккумуляторов мощностью 129 ГВт/ч батарей в год⁵; *GM* в партнерстве с *LG* строит аккумуляторный завод стоимостью 2,3 млрд долл. и планирует строительство еще одного завода [Wayland, 2021]; *Toyota* объявила о пла-

5 Ford to Lead America's Shift to Electric Vehicles with New Mega Campus in Tennessee and Twin Battery Plants in Kentucky; \$11.4B Investment to Create 11,000 Jobs and Power New Lineup of Advanced EVs // Ford. – 2021. – URL: <https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2021/09/27/ford-to-lead-americas-shift-to-electric-vehicles.html> (дата обращения: 28.10.2021).

нах вложить 3,4 млрд долл. в производство батарей на территории США до 2030 г. [Shepardson, 2021].

Евросоюз также пытается занять свою нишу на рынке СХЭ. В 2017 г. Еврокомиссия сформировала Европейский альянс по аккумуляторам (*European Battery Alliance*), в 2018 г. приняла Стратегический план действий в сфере батарей⁶. В январе 2021 г. Еврокомиссия одобрила выделение 2,9 млрд евро двенадцатью странами ЕС на финансирование проектов в секторе производства и переработки батарей и необходимых материалов. Финансирование получают 42 компании – как стартапы, так и крупные игроки, в том числе *Tesla* (за размещение своего завода в Германии). Ранее, в декабре 2019 г., в рамках аналогичного пакета в размере 3,2 млрд евро семь стран ЕС объявили о финансировании 17 компаний в сфере аккумуляторов до 2031 г.⁷ Показателен также пример Польши, которая за пять лет нарастила экспорт литий-ионных аккумуляторов почти в 40 раз – со 120 млн долл. в 2015 г. до 4,7 млрд долл. в 2020 г. – и стала третьим крупнейшим мировым экспортером этих товарных позиций после Китая и Южной Кореи (см. табл. 3) [UN Comtrade Database, n/y].

Длительное хранение электроэнергии

Несмотря на начавшееся ускоренное внедрение литий-ионных аккумуляторов в странах – лидерах по про-

движению солнечной и ветровой генерации, использование этих систем экономически оправдано только для краткосрочного хранения электроэнергии – как правило, до 4 часов. Такой режим работы накопителей электроэнергии эффективен в первую очередь для солнечных электростанций и позволяет сдвинуть момент потребления электроэнергии на несколько часов вперед в вечерние периоды. Однако уже для ветровых электростанций, характеризующихся более длительными циклами загрузки, краткосрочный режим хранения не так эффективен. Не случайно около 63% ожидаемого прироста новых аккумуляторных СХЭ в 2021–2024 гг. в США будут совмещены с солнечными электростанциями и только 2,5% – с ветровыми⁸. Оставшаяся мощность СХЭ будет установлена без привязки к электростанциям (28%) и в паре с электростанциями на ископаемом топливе (6,5%).

Применение литий-ионных аккумуляторов для более длительного хранения электроэнергии требует установки избыточной мощности таких систем в кратном размере, что слишком затратно. Таким образом, современные литий-ионные аккумуляторы, хотя и будут способствовать повышению эффективности энергосистем со значительной долей ПВИЭ за счет предоставления внутрисуточной гибкости, не способны принципиально трансформировать эту отрасль. Иными словами, существующие технологии СХЭ не смогут не только предотвратить, но и

6 State aid: Commission approves €2.9 billion public support by twelve Member States for a second pan-European research and innovation project along the entire battery value chain // European Commission. – 2021. – January 26. – URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_226 (дата обращения: 28.10.2021).

7 State aid: Commission approves €3.2 billion public support by seven Member States for a pan-European research and innovation project in all segments of the battery value chain // European Commission. – 2019. – December 9. – URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_19_6705 (дата обращения: 28.10.2021).

8 Most planned U.S. battery storage additions in next three years to be paired with solar // U.S. Energy Information Administration. – 2021. – September 29. – URL: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=49756> (дата обращения: 28.10.2021).

существенно снизить вероятность возникновения масштабных энергетических кризисов, аналогичных европейскому газовому кризису 2021 г.

Именно появление дешевого и безопасного способа хранить электроэнергию на протяжении нескольких дней и недель способно было бы кардинальным образом облегчить интеграцию солнечных и ветровых электростанций, превратив последние в диспетчеризуемые источники энергии, однако такая технология до сих пор не найдена. В частности, в настоящее время на повестке дня стоит необходимость низкочастотного хранения электроэнергии на протяжении хотя бы 100 часов. Согласно исследованию исторического профиля загрузки возобновляемой энергетики в штате Калифорния, периоды низкой солнечной и ветровой генерации длительностью более 100 часов встречаются достаточно редко – раз в 10 лет [Ferrara, Burger, Rodden, 2021].

Разработки в области длительного хранения электроэнергии осуществляются не только крупными компаниями, но и в многочисленных стартапах с привлечением государственного финансирования и венчурного капитала. В частности, Министерство энергетики США инвестируют значительные средства в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в этой сфере – в 2017–2020 гг. на эти цели было направлено 1,6 млрд долл. [Energy Storage Grand Challenge Roadmap, 2020, p. 11]. При этом инвестиции осуществляются в широкий спектр технологий по принципу «технологической нейтральности», т.е. финансирование может получить любая технология, потенциально способная достичь низких издержек в ключевых областях применения систем хранения электроэнергии. Большинство таких технологий находятся на ранних стадиях разработки и поэтому не способ-

ны привлечь необходимые инвестиции на рынке частного капитала. При этом к разработке новых технологий хранения энергии подключены ведущие американские университеты и национальные научные лаборатории. США уже успешно применяли подобную стратегию финансирования фундаментальных исследований, в частности, в области добычи сланцевого газа [Жуков, Золотина, 2016] и производства солнечных панелей [O'Connor, Loomis, Braun, 2010].

Можно ожидать, что если прорывная технология длительного хранения электроэнергии все-таки будет найдена, то она будет принадлежать к группе аккумуляторных систем, поскольку такие установки относительно безопасны, легко масштабируемы и могут устанавливаться распределенно. Среди перспективных направлений в сфере длительного хранения электроэнергии следует выделить технологии железо-воздушных аккумуляторов. В частности, компания *Form Energy* утверждает, что уже разработала технологию железо-воздушных аккумуляторов для хранения электроэнергии в течение 100 часов стоимостью менее 20 долл. за кВт/ч, хотя пока речь идет исключительно о тестовых образцах, а детали этой технологии не раскрываются [Clifford, 2021]. В августе 2021 г. *Form Energy* привлекла на рынке венчурного капитала 240 млн долл., инвесторами выступили глобальный производитель стали *ArcelorMittal*, венчурный фонд Б. Гейтса *Breakthrough Energy Ventures* и др. Ранее *Form Energy* получала гранты от Министерства энергетики США и правительства штата Калифорния.

Помимо аккумуляторных систем, в качестве потенциальных технологий длительного хранения электроэнергии рассматриваются также системы на сжатом воздухе и водород. Однако системы хранения на сжатом воздухе пока очень дорогие и требуют подходящей географической локации.

На сегодняшний день глобально установлено лишь несколько таких установок, причем первая из них мощностью 321 МВт была построена в Германии еще в 1978 г. и до сих пор является крупнейшей в мире.

Системы хранения электроэнергии на водороде на современном уровне развития этих технологий характеризуются очень низким КПД – менее 40% [Energy Storage Grand Challenge Roadmap, 2020]. Также в число основных препятствий для их продвижения входят вопросы обеспечения безопасности процессов получения, хранения и использования водорода с учетом его высокой взрывоопасности и летучести, значительная стоимость оборудования для электролиза, потребность в чистой воде и другие факторы [Zell, Langer, 2019; Critical review..., 2021]. Уровень неопределенности относительно перспектив использования водородных СХЭ очень высокий – для их массового применения должны быть решены многочисленные технологические проблемы. На наш взгляд, в группе аккумуляторных технологий значительно больше шансов на появление недорогого и безопасного средства хранения электроэнергии, чем в группе водородных технологий.

Проблемы продвижения аккумуляторных систем хранения электроэнергии

Как уже было отмечено выше, главным препятствием для продвижения аккумуляторных технологий хранения электроэнергии является короткое время работы на полной мощности, в то время как технология длительного хранения электроэнергии, которая была бы достаточно дешевой и безопасной для масштабного применения, до сих пор не найдена.

Если же говорить о внутридневном хранении электроэнергии, то необходимо отметить, что основные препятствия для продвижения аккумуляторных СХЭ в электроэнергетике имеют экономическую, а не технологическую природу. Массовое внедрение литий-ионных аккумуляторов для внутридневного хранения электроэнергии уже началась, но только в странах, где электроэнергетические компании имеют возможность переложить стоимость их внедрения на потребителей или установка таких систем субсидируется или регулируется государством.

Также по мере увеличения производства литий-ионных аккумуляторов все более важным становится вопрос их утилизации и вторичной переработки [Challenges ..., 2021]. В настоящее время уровень вторичного использования литий-ионных аккумуляторов низкий из-за дороговизны этого процесса. Для этого также необходимо, чтобы технологии производства аккумуляторов заранее облегчали их вторичную переработку и/или утилизацию.

Существует также ряд технических сложностей по интеграции систем хранения электроэнергии в электросети различного уровня, особенно если они работают в двустороннем режиме, т.е. не только потребляют, но и поставляют электроэнергию обратно в сеть. Как правило, интеграция систем хранения требует установки специального оборудования, обеспечивающего согласование напряжения, фазы и частоты электрического тока, предотвращение резонансов в электрической цепи и т.д. Требуют решения и вопросы безопасности и пожароустойчивости таких систем.

Важным вопросом продвижения аккумуляторных СХЭ в электроэнергетике со стороны предложения является доступность необходимых ма-

териалов. Сегодня большинство стационарных систем хранения электроэнергии используют литий-ионные NMC-аккумуляторы, содержащие никель, марганец и кобальт. Однако в последнее время наблюдается переход к литий-железо-фосфатным LFP-аккумуляторам, которые дешевле в производстве, используют более доступные компоненты и не содержат не только кобальт, но и никель. В частности, *Tesla* в начале 2021 г. объявила о переходе на LFP-батареи в производстве своих стационарных систем хранения электроэнергии *Megapack* [Plautz, 2021].

Хотя LFP-батареи характеризуются меньшей плотностью энергии, чем NMC-аккумуляторы, ее вполне достаточно для промышленных систем хранения электроэнергии. Помимо более низкой себестоимости производства, LFP-аккумуляторы характеризуются большим сроком службы и выдерживают большее число циклов заряда-разряда без существенной потери емкости, чем NMC-аккумуляторы [Degradation of Commercial Lithium-Ion Cells..., 2020].

Некоторым ограничением для продвижения стационарных аккумуляторов может выступить предложение лития, но только со стороны мощностей по его добыче, а не объема извлекаемых запасов этого металла. На конец 2020 г. мировые запасы лития, по данным BP, оценивались в 19 млн тонн, что в 220 раз превышает объем его добычи [BP Statistical Review of World Energy, 2021]. При этом вероятно, что эта оценка в будущем может быть существенно повышена – на конец 2018 г. запасы лития оценивались в 13,9 млн тонн [BP

Statistical Review of World Energy, 2019], то есть за 2 года глобальные запасы лития были переоценены в сторону повышения более чем на треть.

При этом потребность в литии для стационарных СХЭ будет существенно меньше ожидаемого роста спроса на этот металл со стороны электромобилей. Так, объем внедрения стационарных систем хранения электроэнергии в 2030 г., согласно прогнозу *Wood Mackenzie*, составит 0,2 ТВт/ч [Global Energy Storage Outlook H2, 2021], что в 20 раз меньше ожидаемого объема производства аккумуляторов для электромобилей, которое в том же году, по прогнозу *Rystad Energy*, превысит 4 ТВт/ч⁹.

Быстрый рост спроса на литий может привести к значительному увеличению его цены, однако этот процесс, скорее всего, продолжит носить волнообразный характер, и периоды роста цен будут чередоваться с периодами ее снижения. Так, цена на карбонат лития на мировом рынке в 2018–2020 гг. снизилась почти в 3 раза, главным образом из-за значительного роста мощностей по его добыче [Treadgold, 2021], однако в октябре 2021 г. она вновь достигла своего исторического максимума [Li, 2021]. Учитывая, что стоимость трех ключевых компонент LFP-батарей – лития, железа и фосфора – составляет всего 2,5% от совокупных капитальных затрат на установку аккумуляторной системы хранения электроэнергии [World Energy Outlook, 2021, р. 276], влияние даже кратного роста цены лития на себестоимость таких аккумуляторов может оказаться незначительным.

9 Electric vehicle market share set to exceed 50% from 2033, battery demand to plateau at 20 TWh in mid-2040s // Rystad Energy. – 2021. – March 31. – URL: <https://www.rystadenergy.com/newsevents/news/press-releases/electric-vehicle-market-share-set-to-exceed-50pct-from-2033-battery-demand-to-plateau-at-20-twh-in-mid-2040s/> (дата обращения: 28.10.2021).

Заключение

Среди стационарных систем хранения электроэнергии наиболее распространенными по объему установленной мощности являются гидроаккумуляторные электростанции, однако по объему устанавливаемых новых мощностей в последние годы лидируют установки на литий-ионных аккумуляторах. Стоимость последних уже снизилась до уровня, достаточного для их массового внедрения в электроэнергетике в странах – лидерах по продвижению солнечных и ветровых электростанций и формирования нового многомиллиардного рынка стационарных СХЭ, а существующие препятствия не являются непреодолимыми и могут лишь временно затормозить, но не остановить этот процесс.

Внедрение литий-ионных аккумуляторов в электроэнергетику существенно повысит эффективность работы ПВИЭ, в первую очередь солнечных электростанций, но все же будет недостаточным для кардинальной трансформации электроэнергетики и не сможет существенно снизить ни стоимость энергоперехода, ни вероятность наступления серьезных энергетических кризисов.

Для достижения целей по углеродной нейтральности необходима масштабная установка стационарных СХЭ, способных безопасно и с невысокими издержками сохранять электроэнергию в течение длительного периода времени: нескольких дней, недель и даже месяцев. Хотя в настоящее время такие технологии отсутствуют, большое число компаний, как лидеров отрасли, так и небольших стартапов, а также ведущих университетов и лабораторий при поддержке государственного финансирования и частного, в том числе венчурного, капитала разрабатывают широкий спектр различных тех-

нологий хранения электроэнергии, которые теоретически способны решить эту задачу. На настоящий момент наиболее перспективными на этом направлении являются аккумуляторные технологии. В случае если способ длительного хранения электроэнергии будет найден и подтвердит свою эффективность и безопасность в условиях массового производства и внедрения, скорость и масштабы продвижения возобновляемой энергетики в мире кардинально возрастут.

В России потенциальные выгоды от внедрения СХЭ в электроэнергетику пока существенно ограничены низким проникновением солнечной и ветровой энергетики. Тем не менее создание благоприятных условий для производства литий-ионных аккумуляторов на территории России позволило бы отечественным компаниям (или совместным предприятиям с ведущими международными игроками) выйти на быстрорастущий глобальный рынок, что также позволило бы увеличить объем и уровень диверсификации российского экспорта. Россия является крупным производителем ряда необходимых для изготовления литий-ионных аккумуляторов ресурсов, в том числе никеля. Этот вопрос требует отдельного подробного изучения.

Список литературы

Жуков С.В., Золина С.А. США: финансовые рынки и развитие сектора неконвенциональной нефти // Мировая экономика и международные отношения. – 2016. – Т. 60, № 11. – С. 14–24.

Battery Storage in the United States: An Update on Market Trends // U.S. Energy Information Administration, August. – 2021. – URL: <https://www.eia.gov/analysis/studies/electricity/battery->

storage/pdf/battery_storage_2021.pdf (дата обращения: 28.10.2021).

BP Statistical Review of World Energy // British Petroleum. – 2019. – June 2019. – URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf> (дата обращения: 28.10.2021).

BP Statistical Review of World Energy // British Petroleum. – 2021. – July 2021. – URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf> (дата обращения: 28.10.2021).

Castillo A., Dennice F. G. Grid-scale energy storage applications in renewable energy integration: A survey // Energy Conversion and Management. – 2014. – Vol. 87. – P. 885–894. – DOI: 10.1016/j.enconman.2014.07.063.

Challenges in Ecofriendly Battery Recycling and Closed Material Cycles: A Perspective on Future Lithium Battery Generations / S. Doose, J.K. Mayer, P. Michalowski, A. Kwade // Metals. – 2021. – Vol. 11, issue 291. – DOI: 10.3390/met11020291.

Clifford C. Stealthy battery company backed by Bill Gates, Jeff Bezos has a lot to prove // CNBC. – 2021. – August 25. – URL: <https://www.cnbc.com/2021/08/25/form-energy-raises-240-million-on-iron-air-battery-promise.html> (дата обращения: 28.10.2021).

CNESA White Papers // China Energy Storage Alliance. – n/y. – URL: <http://en.cnesa.org/white-paper-access-multyear> (дата обращения: 28.10.2021).

Critical review of energy storage systems / A.G. Olabi [et al.] // Energy. – 2021. – Vol. 214. – DOI: 10.1016/j.energy.2020.118987.

DOE Global Energy Storage Database // U.S. Department of Energy. – n/y. – URL: <https://www.sandia.gov/ess-ssl/doe-global-energy-storage-database/> (дата обращения: 28.10.2021).

Degradation of Commercial Lithium-Ion Cells as a Function of Chemistry and Cycling Conditions / Y. Preger [et al.] // Journal of The Electrochemical Society. – 2020. – Vol. 167, N 12. – DOI: 10.1149/1945-7111/abae37.

Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA / A. Akhil [et al.] // Sandia National Laboratories, DOE/EPRI. – 2013. – July 2013. – URL: <https://www.sandia.gov/ess-ssl/publications/SAND2013-5131.pdf> (дата обращения: 28.10.2021).

Energy Storage Grand Challenge Roadmap // U.S. Department of Energy. – 2020. – December 2020. – URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/12/f81/Energy%20Storage%20Grand%20Challenge%20Roadmap.pdf> (дата обращения: 28.10.2021).

Energy Storage Industry White Paper 2021 (Summary Version) // China Energy Storage Alliance. – 2021. – URL: <https://static1.squarespace.com/static/55826ab6e4b0a6d2b0f53e3d/t/60d2ff-f40aec596dc9e5cd65/1624440841870/CNESA+White+Paper+2021-PDF> (дата обращения: 28.10.2021).

Ferrara M., Burger S., Rodden J. A clean grid requires firm power. Here's what that means for energy storage // Form Energy. – 2021. – April 19. – URL: <https://formenergy.com/insights/a-clean-grid-requires-firm-power-heres-what-that-means-for-energy-storage/> (дата обращения: 28.10.2021).

Global Energy Storage Outlook H2 2021 // Wood Mackenzie. – 2021. – September 2021. – URL: <https://www.woodmac.com/reports/power-markets-global-energy-storage-outlook-h2-2021-532298> (дата обращения: 28.10.2021).

Hydropower Special Market Report. Analysis and forecast to 2030 // International Energy Agency. – 2021. – July 2021. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4d2d4365-08c6-4171-9ea2-8549fabd1c8d/HydropowerSpecial->

MarketReport_corr.pdf (дата обращения: 28.10.2021).

Installed electricity capacity by country/area (MW) by Country/area, Technology, Grid connection and Year // International Renewable Energy Agency. – n/y. – URL: http://pxweb.irena.org/pxweb/en/IRENASTAT/IRENASTAT__Power%20Capacity%20and%20Generation/ELECCAP_2021_cycle2.px/ (дата обращения: 28.10.2021).

Inventory of Operating Generators as of July 2021 // U.S. Energy Information Administration. – 2021. – September 2021. – URL: https://www.eia.gov/electricity/data/eia860m/archive/xls/july_generator2021.xlsx (дата обращения: 28.10.2021).

Li Y. Lithium Prices Are Soaring, Sparking More Deals for Key Battery Metal // Bloomberg. – 2021. – October 7. – URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-10-06/lithium-s-shining-moment-brings-record-prices-and-surge-in-deals?sref=EtqQfjch> (дата обращения: 28.10.2021).

McCorkindale M. UK sees record-breaking submitted battery storage capacity under planning in Q2 2021 // Energy Storage News. – 2021. – August 4. – URL: <https://www.energy-storage.news/uk-sees-record-breaking-submitted-battery-storage-capacity-under-planning-in-q2-2021/> (дата обращения: 28.10.2021).

Nautiyal H., Goel V. Sustainability assessment of hydropower projects // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 265. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121661.

O'Connor A., Loomis R., Braun F. Retrospective Benefit-Cost Evaluation of DOE Investment in Photovoltaic Energy Systems // U.S. Department of Energy. – 2010. – URL: https://www1.eere.energy.gov/analysis/pdfs/solar_pv.pdf (дата обращения: 28.10.2021).

Plautz J. Tesla shifts battery chemistry for utility-scale storage Megapack // Utility Dive. – 2021. – May 18. – URL: <https://www.utilitydive.com/news/tesla-shifts-battery-chemistry-for-utility-scale-storage-megapack/>

www.utilitydive.com/news/tesla-shifts-battery-chemistry-for-utility-scale-storage-megapack/600315/ (дата обращения: 28.10.2021).

Profit From Dynamic Containment in the UK // Inaccess. – 2021. – June 11. – URL: <https://www.inaccess.com/about-us/> (дата обращения: 28.10.2021).

Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies / O. Schmidt, S. Melchior, A. Hawkes, I. Staffell // Joule. – 2019. – Vol. 3, issue 1. – P. 81–100. – DOI: 10.1016/j.joule.2018.12.008.

Pumped Storage Tracking Tool // International Hydropower Association. – n/y. – URL: <https://www.hydropower.org/hydropower-pumped-storage-tool> (дата обращения: 28.10.2021).

Shaqsi A., Sopian K., Al-Hinai A. Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits // Energy Reports. – 2020. – Vol. 6, suppl. 7. – P. 288–306. – DOI: 10.1016/j.egyr.2020.07.028.

Shepardson D. Toyota to invest \$3.4 billion on U.S. automotive batteries through 2030 // Reuters. – 2021. – October 18. – URL: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/toyota-invest-34-billion-us-automotive-batteries-through-2030-2021-10-18/> (дата обращения: 28.10.2021).

Treadgold T. Lithium Price Tipped To Rise After Warning Of 'Perpetual Deficit' // Forbes. – 2021. – July 2. – URL: <https://www.forbes.com/sites/timtreadgold/2021/07/02/lithium-price-tipped-to-rise-after-warning-of-perpetual-deficit/?sh=2b912734ab73> (дата обращения: 28.10.2021).

UK Battery Storage Project Database Report // Solar Media. – n/y. – URL: <https://marketresearch.solarmedia.co.uk/products/uk-battery-storage-project-database-report> (дата обращения: 28.10.2021).

UN Comtrade Database // United Nations. – n/y. – URL: <https://comtrade.un.org/> (дата обращения: 28.10.2021).

Wayland M. Ford and SK Innovation to spend \$11 billion, create 11,000 jobs on new U.S. EV and battery plants // CNBC. – 2021. – September 27. – URL: <https://www.cnbc.com/2021/09/27/ford-battery-supplier-to-spend-11point4-billion-to-build-new-us-plants.html> (дата обращения: 28.10.2021).

World Energy Outlook // International Energy Agency. – 2020. – 462 p. – URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021> (дата обращения: 28.10.2021).

World Energy Outlook // International Energy Agency. – 2021. – 384 p. – URL: [https://www.iea.org/reports/world-](https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021)

[energy-outlook-2021](https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021) (дата обращения: 28.10.2021).

Zaifman H., Schaff J., Combest T. One Step Forward: Ways and Means Committee Approves Expanded Renewable Energy Tax Credits. – 2021. – Sidley, October 5. – URL: <https://www.sidley.com/en/insights/newsupdates/2021/09/one-step-forward-ways-and-means-committee-approves-expanded-renewable-energy-tax-credits> (дата обращения: 28.10.2021).

Zell T., Langer R. Introduction: hydrogen storage as solution for a changing energy landscape // Physical Sciences Reviews. – 2019. – Vol. 4, N 1. – P. 20170009.

DOI: 10.23932/2542-0240-2022-15-1-5

Battery Energy Storage Systems as a Game Changer in the Transformation of Global Power Industry

Alexander O. Maslennikov

Senior Researcher, Center for Energy Research, Primakov National Research Institute of World Economy and International Relations, Russian Academy of Sciences (23, Profsoyuznaya Str., Moscow, 117997, Russian Federation)

CITATION: Maslennikov A.O. (2022). Battery Energy Storage Systems as a Game Changer in the Transformation of Global Power Industry// Outlines of Global Transformations: Politics, Economics, Law, vol. 15, no. 1, pp. 102–127 (in Russian). DOI: 10.23932/2542-0240-2022-15-1-5

Received: 30.10.2021.

Revised: 14.12.2021.

ABSTRACT. *Solar and wind electricity generation has increased more than 6 times during the past decade and the share of these energy sources in electricity production in some countries has already reached 30% or more. The dependents of solar and wind power plants on weather conditions significantly increases the requirements for the level of system flexibility in the electric power industry, which are going to grow as the low-carbon paradigm advances. The article focuses at the analysis of the prospects for the development of battery energy storage technologies as the main source of increasing the ability of the power system to effectively adapt to the changes in demand and supply over different time horizons. The author shows that, firstly, the abrupt acceleration in the rate of commissioning of large-scale stationary electricity storage systems in 2020–2021 is of a long-term nature and is due not only to a significant reduction in the cost of lithium-ion batteries, but also to state sup-*

port and special tuning of electricity markets regulation in the United States, China and some European countries. Secondly, the competition among manufacturers in the lithium-ion battery market is bound to intensify. Thirdly, existing technologies allow only intraday storage of electricity with acceptable costs. The development of a low-cost method for long-term storage of electricity could radically expand the boundaries of variable renewable energy sources and open the way to achieving carbon neutrality. Many large companies and small start-ups, as well as leading universities and laboratories, are actively searching for such a technology with the support of government funding and private financing, including venture capital.

KEYWORDS: *energy storage, stationary energy storage, distributed energy storage, power, batteries, renewables, variable energy sources, pumped hydro, hydrogen, carbon neutrality.*

References

- Battery Storage in the United States: An Update on Market Trends (2021). *U.S. Energy Information Administration*, August. Available at: https://www.eia.gov/analysis/studies/electricity/batterystorage/pdf/battery_storage_2021.pdf, accessed 28.10.2021.
- BP Statistical Review of World Energy (2019). *British Petroleum*, June. Available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>, accessed 28.10.2021.
- BP Statistical Review of World Energy (2021). *British Petroleum*, July. Available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>, accessed 28.10.2021.
- Castillo A., Dennice F.G. (2014). Grid-scale energy storage applications in renewable energy integration: A survey. *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 885-894. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.07.063.
- Challenges... (2021). Doose S., Mayer J.K., Michalowski P., Kwade A. Challenges in Ecofriendly Battery Recycling and Closed Material Cycles: A Perspective on Future Lithium Battery Generations. *Metals*, vol. 11, issue 291. DOI: 10.3390/met11020291.
- Clifford C. (2021). Stealthy battery company backed by Bill Gates, Jeff Bezos has a lot to prove. *CNBC*, August 25. Available at: <https://www.cnbc.com/2021/08/25/form-energy-raises-240-million-on-iron-air-battery-promise.html>, accessed 28.10.2021.
- CNESA White Papers (n/y). *China Energy Storage Alliance*. Available at: <http://en.cnesa.org/white-paper-access-multi-year>, accessed 28.10.2021.
- Critical review... (2021). Olabi A.G., Onumaegbu C., Wilberforce T., Ramadan M., Abdelkareem M., Al – Alami A. Critical review of energy storage systems. *Energy*, vol. 214. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118987.
- Degradation... (2020). Preger Y, Barkholtz H., Fresquez A., Campbell D., Juba B., Romàn-Kustas J., Ferreira S., Chalamala B. Degradation of Commercial Lithium-Ion Cells as a Function of Chemistry and Cycling Conditions. *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 167, no. 12. DOI: 10.1149/1945-7111/abae37.
- DOE Global Energy Storage Database (n/y). *U.S. Department of Energy*. Available at: <https://www.sandia.gov/ess-ssl/doe-global-energy-storage-database/>, accessed 28.10.2021.
- Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA (2013). *Sandia National Laboratories*, July. Available at: <https://www.sandia.gov/ess-ssl/publications/SAND2013-5131.pdf>, accessed 28.10.2021.
- Energy Storage Grand Challenge Roadmap (2020). *U.S. Department of Energy*, December. Available at: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/12/f81/Energy%20Storage%20Grand%20Challenge%20Roadmap.pdf>, accessed 28.10.2021.
- Energy Storage Industry White Paper 2021 (Summary Version) (2021). *China Energy Storage Alliance*. Available at: <https://static1.squarespace.com/static/55826ab6e4b0a6d2b0f53e3d/t/60d2ff-f40aec596dc9e5cd65/1624440841870/CNESA+White+Paper+2021-PDF>, accessed 28.10.2021.
- Ferrara M., Burger S., Rodden J. (2021). A clean grid requires firm power. Here's what that means for energy storage. *Form Energy*, April 19. Available at: <https://formenergy.com/insights/a-clean-grid-requires-firm-power-heres-what-that-means-for-energy-storage/>, accessed 28.10.2021.

Global Energy Storage Outlook H2 2021 (2021). *Wood Mackenzie*, September. Available at: <https://www.woodmac.com/reports/power-markets-global-energy-storage-outlook-h2-2021-532298>, accessed 28.10.2021.

Hydropower Special Market Report. Analysis and forecast to 2030 (2021). *International Energy Agency*, July. Available at: https://iea.blob.core.windows.net/assets/4d2d4365-08c6-4171-9ea2-8549fab-d1c8d/HydropowerSpecialMarketReport_corr.pdf, accessed 28.10.2021.

Installed electricity capacity by country/area (MW) by Country/area, Technology, Grid connection and Year (n/y). *International Renewable Energy Agency*. Available at: http://pxweb.irena.org/pxweb/en/IRENASTAT/IRENASTAT__Power%20Capacity%20and%20Generation/ELECCAP_2021_cycle2.px/, accessed 28.10.2021.

Inventory of Operating Generators as of July 2021 (2021). *U.S. Energy Information Administration*, September. Available at: https://www.eia.gov/electricity/data/eia860m/archive/xls/july_generator2021.xlsx, accessed 28.10.2021.

Li Y. (2021). Lithium Prices Are Soaring, Sparking More Deals for Key Battery Metal. *Bloomberg*, October 7. Available at: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-10-06/lithium-s-shining-moment-brings-record-prices-and-surge-in-deals?sref=EtqQfch>, accessed 28.10.2021.

McCorkindale M. (2021). UK sees record-breaking submitted battery storage capacity under planning in Q2 2021. *Energy Storage News*, August 4. Available at: <https://www.energy-storage.news/uk-sees-record-breaking-submitted-battery-storage-capacity-under-planning-in-q2-2021/>, accessed 28.10.2021.

Nautiyal H., Goel V. (2020). Sustainability assessment of hydropower projects. *Journal of Cleaner Production*, vol. 265. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121661.

O'Connor A., Loomis R., Braun F. (2010). Retrospective Benefit-Cost Evaluation of DOE Investment in Photovoltaic Energy Systems. *U.S. Department of Energy*. Available at: https://www1.eere.energy.gov/analysis/pdfs/solar_pv.pdf, accessed 28.10.2021.

Plautz J. (2021). Tesla shifts battery chemistry for utility-scale storage Megapack. *Utility Dive*, May 18. Available at: <https://www.utilitydive.com/news/tesla-shifts-battery-chemistry-for-utility-scale-storage-megawall/600315/>, accessed 28.10.2021.

Profit From Dynamic Containment in the UK (2021). *Inaccess*, June 11, 2021. Available at: <https://www.inaccess.com/about-us/>, accessed 28.10.2021.

Projecting the Future... (2019). Schmidt O., Melchior S., Hawkes A., Staffell I. Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies. *Joule*, vol. 3, issue 1, pp. 81–100. DOI: 10.1016/j.joule.2018.12.008.

Pumped Storage Tracking Tool (n/y). *International Hydropower Association*. Available at: <https://www.hydropower.org/hydropower-pumped-storage-tool>, accessed 28.10.2021.

Shaqsi A., Sopian K., Al-Hinai A. (2020). Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits. *Energy Reports*, vol. 6, suppl. 7, pp. 288–306. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.07.028.

Shepardson D. (2021). Toyota to invest \$3.4 billion on U.S. automotive batteries through 2030. *Reuters*, October 18. Available at: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/toyota-invest-34-billion-us-automotive-batteries-through-2030-2021-10-18/>, accessed 28.10.2021.

Treadgold T. (2021). Lithium Price Tipped To Rise After Warning Of 'Perpetual Deficit'. *Forbes*, July 2. Available at: <https://www.forbes.com/sites/timtreadgold/2021/07/02/lithium-price->

tipped-to-rise-after-warning-of-perpetual-deficit/?sh=2b912734ab73, accessed 28.10.2021.

UK Battery Storage Project Database Report (n/y). *Solar Media*. Available at: <https://marketresearch.solarmedia.co.uk/products/uk-battery-storage-project-database-report>, accessed 28.10.2021.

UN Comtrade Database (n/y). *United Nations*. Available at: <https://comtrade.un.org/>, accessed 28.10.2021.

Wayland M. (2021). Ford and SK Innovation to spend \$11 billion, create 11,000 jobs on new U.S. EV and battery plants. *CNBC*, September 27. Available at: <https://www.cnbc.com/2021/09/27/ford-battery-supplier-to-spend-11point4-billion-to-build-new-us-plants.html>, accessed 28.10.2021.

World Energy Outlook (2020). *International Energy Agency*. 462 pp. Available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>, accessed 28.10.2021.

World Energy Outlook (2021). *International Energy Agency*. 384 pp. Available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>, accessed 28.10.2021.

Zaifman H., Schaff J., Combet T. (2021). One Step Forward: Ways and Means Committee Approves Expanded Renewable Energy Tax Credits. *Sidley*, October 5. Available at: <https://www.sidley.com/en/insights/newsupdates/2021/09/one-step-forward-ways-and-means-committee-approves-expanded-renewable-energy-tax-credits>, accessed 28.10.2021.

Zell T., Langer R. (2019). Introduction: hydrogen storage as solution for a changing energy landscape. *Physical Sciences Reviews*, vol. 4, no. 1, pp. 20170009.

Zhukov S.V., Zolina S.A. (2016). USA: Financial Markets and the Development of Unconventional Oil Sector. *World Economy and International Relations*, vol. 60, no. 11, pp. 14–24 (in Russian).