rreda.ru

info@rreda.ru
123610, Москва, Краснопресненская наб., д. 12,
подъезд 6, офис 1220

Сайт АРВЭ
rreda.ru

Телеграм-канал АРВЭ
t.me/rreda_official

СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Технологии и экономика применения

ОКТЯБРЬ 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3

ЧАСТЬ I. СОХРАНИТЬ ЭНЕРГИЮ 4

01 **Энергия до востребования. Зачем нужны накопители** 5

02 **Разные пути к одной цели. Какие существуют способы хранения энергии** 7

2.1 Механические накопители 8
2.2 Тепловые и химические накопители. Применение водорода 11
2.3 Электрические и магнитные накопители 14

03 **Внутри аккумулятора. Электрохимические технологии накопления** 16

3.1 Литий-ионные аккумуляторы: семейство технологий 17
3.2 Натрий-ионные аккумуляторы: другая сырьевая основа 21
3.3 Свинцово-кислотные аккумуляторы: освоенная технология с определённой областью применения 23
3.4 Никелевые аккумуляторы: устойчивость к сложным условиям эксплуатации 24
3.5 Высокотемпературные натриевые аккумуляторы 25
3.6 Проточные аккумуляторы: энергия в резервуарах 27
3.7 Что дальше: перспективные направления накопления энергии 29
3.8 Сравнение решений для хранения электроэнергии: почему сейчас выбирают литий-ионные технологии 30

04 **От ячейки до электростанции. Как устроена литий-ионная СНЭ** 34

4.1 Батарейная подсистема: от ячейки до контейнера 34
4.2 Силовая часть: преобразование энергии и подключение к сети 35
4.3 Управление и обмен данными: BMS, PCS, EMS и протоколы связи 38
4.4 Эксплуатация и безопасность литий-ионных СНЭ 40
4.5 СНЭ в составе энергетического комплекса 43
4.6 От устройства к внедрению: что определяет применение СНЭ 45

ЧАСТЬ II. ЭКОНОМИКА ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СНЭ 48

01 **От спроса к масштабу. Обзор мирового рынка СНЭ** 49

02 **Оценка стоимости проектов СНЭ в России** 56

03 **Перспективы развития рынка СНЭ в России** 58

Заключение 61

Команда проекта 62

ВВЕДЕНИЕ

Аккумуляторы электроэнергии стали одной из ключевых сквозных технологий современной экономики. Их развитие определяет возможности электротранспорта, портативной электроники, робототехники, беспилотных систем и целого ряда других высокотехнологичных отраслей. Совершенствование электрохимических материалов, рост энергетической плотности, увеличение ресурса и масштабирование производства сопровождаются последовательным снижением стоимости хранения энергии, расширяя границы экономически целесообразного применения аккумуляторов.

Электроэнергетика не стала исключением. Сегмент применения систем накопления энергии (СНЭ) переживает период стремительного взлёта — CAGR новых вводов составляет порядка 100%. По итогам 2025 года совокупная энергоёмкость электрохимических накопителей, применяемых в мировой электроэнергетике, приблизилась к 700 ГВт·ч.

Накопители находят применение на всех уровнях энергосистемы — от крупных генерирующих объектов и магистральных электрических сетей до распределённой энергетики и отдельных потребителей. Согласно прогнозам IRENA, потребности в ресурсах гибкости в энергосистеме будут только увеличиваться и превысят 11 ТВт·ч к 2042 году.

Достигнув доли порядка 15% в мировом спросе на литий-ионные ячейки, электроэнергетика на текущий момент всё ещё не является главным драйвером развития производства СНЭ. С учётом бума в сегменте электротранспорта развитые промышленные страны осуществляют масштабное развёртывание гигафабрик — только по итогам следующего года их совокупная мощность в Европе и США увеличится более чем вдвое: до 0,7 и 0,5 ТВт·ч в год соответственно. При этом медианная производительность новых заводов по выпуску литий-ионных аккумуляторов превышает 20 ГВт·ч.

Несмотря на некоторые различия устройства ячеек, применяемых в электроэнергетике и транспорте, лидирующие производители успешно комбинируют их выпуск для обоих секторов. Это является важным фактором удешевления стоимости хранения: только за 2025 год средняя стоимость ячейки уменьшилась примерно на 8%. Общий CAPEX СНЭ снизился ещё сильнее, на 11%, что отражает рост эффективности в смежных компонентах: контейнеры, инверторы, системы управления, климатические установки.

В России активно разворачивается строительство гигафабрик: ожидается рост их совокупной мощности с 8 до 12 ГВт·ч. Реализован пилотный проект сетевой СНЭ ёмкостью более 2,1 ГВт·ч.

Настоящий обзор ставит своей задачей формирование целостного представления о текущем статусе и перспективах развития разных типов технологий хранения электроэнергии и экономике решений на основе их применения в России и мире.

ЧАСТЬ I

СОХРАНИТЬ ЭНЕРГИЮ

от базовых физических принципов к современным решениям



01 **Энергия до востребования** — Зачем нужны накопители — 5

02 **Разные пути к одной цели** — Какие существуют способы хранения энергии — 7

03 **Внутри аккумулятора** — Электрохимические технологии накопления — 16

04 **От ячейки до электростанции** — Как устроена литий-ионная СНЭ — 34

01 ЭНЕРГИЯ ДО ВОСТРЕБОВАНИЯ

Зачем нужны накопители

Накопители энергии окружают человека повсюду. Аккумулятор смартфона позволяет пользоваться связью вдали от розетки, тяговая батарея электромобиля — проехать сотни километров без подзарядки, а резервный источник питания — сохранить работу оборудования при отключении сети. Во всех этих случаях решается одна задача: энергия, полученная в одном месте и в одно время, используется в другом месте или в другое время.

Требования к накопителю определяются условиями его применения. Для портативной техники главное — запасти как можно больше энергии в малом объёме и при малой массе. Для электротранспорта к этому добавляются высокая мощность, быстрая зарядка и устойчивость к тысячам циклов. Для стационарных установок масса и объём отходят на второй план, а на первый выходят стоимость хранимой энергии за весь срок службы, долговечность и безопасность. Поэтому одна и та же технология может применяться во всех сферах в разных исполнениях, а технология, неприемлемая для автомобиля, может оказаться оптимальной для энергосистемы.

В электроэнергетике потребность в хранении энергии связана с особенностью самого продукта: электроэнергия в сети не запасается, и генерация должна в каждый момент соответствовать потреблению. Потребление подчиняется ритму жизни — растёт утром и вечером, снижается ночью, меняется по сезонам. Для поддержания баланса традиционно используются регулирование мощности электростанций, перетоки между энергорайонами и управление спросом. Системы накопления энергии дополняют эти средства иным способом: они позволяют сохранить часть выработки и выдать её тогда, когда она необходима.

За словом «накопитель» скрываются разные физические процессы. Электроэнергия может расходоваться на подъём воды в верхний водоём, разгон маховика или изменение химического состояния аккумулятора; при разряде запасённая энергия вновь преобразуется в электрическую. Поэтому внешне несопоставимые объекты — гидроаккумулирующая электростанция, контейнер с батареями и аккумулятор электромобиля — выполняют сходную функцию, различаясь масштабом, быстродействием и продолжительностью работы.

Но сколько энергии нужно сохранить и насколько быстро её потребуется отдать? Ответ начинается с двух характеристик — мощности и энергоёмкости. Мощность характеризует скорость приёма или выдачи энергии. Энергоёмкость — величину её запаса. Для оценки продолжительности работы особенно важна полезная энергоёмкость: количество энергии, которое система способна фактически отдать потребителю.

Продолжительность разряда также следует отличать от времени отклика — промежутка между поступлением команды и требуемой реакцией системы. Для переноса дневной выработки на вечер важен запас энергии на несколько часов. Для быстрого реагирования на изменение частоты — способность оперативно изменить мощность. У отдельного потреби-

теля накопитель может обеспечивать резервное питание или уменьшать отбор мощности из сети в часы максимальной нагрузки. Каждая задача предъявляет своё сочетание требований к быстродействию, максимальной мощности и продолжительности работы.

Хранение энергии неизбежно сопровождается потерями. Для владельца объекта является существенным, учитываются ли потери энергии только в батарее или также в преобразователях и вспомогательном оборудовании. Часть запаса может теряться и во время ожидания: у аккумуляторов это явление называется саморазрядом. Показатель потерь наравне с использованием энергии накопителя на собственные нужды — для поддержания работы установки — существенно влияет на системы учёта и передачи электроэнергии.

Наконец, накопитель должен выполнять свою задачу многократно. Его ресурс характеризуется сроком службы и допустимым числом циклов заряда-разряда до установленного предела ухудшения характеристик. Для системы, работающей ежедневно, и резервной установки, включающейся изредка, условия использования будут различаться. Поэтому при выборе СНЭ важно заранее определить не только требуемую мощность и запас энергии, но и предполагаемый режим её работы.

РИС. 1 **Сопоставление накопителей энергии различного применения по энергоёмкости и мощности**

Объект	Энергоёмкость	Мощность	Главные требования
Смартфон	~15 Вт·ч	единицы Вт (зарядка — до десятков Вт)	Компактность и малая масса, безопасность, быстрая зарядка
Ноутбук	50–100 Вт·ч	10–100 Вт	Компактность, время автономной работы, безопасность
Электросамокат	~0,5 кВт·ч	0,3–1 кВт	Малая масса, запас хода, стойкость к вибрации и погоде
Домашний накопитель	5–15 кВт·ч	3–10 кВт	Безопасность в жилом помещении, стоимость, простота обслуживания
Электромобиль	60–100 кВт·ч	100–300 кВт (быстрая зарядка — до 150–350 кВт)	Удельная энергия, высокая мощность, быстрая зарядка, работа на морозе
Электробус	300–500 кВт·ч	150–300 кВт	Ресурс при ежедневной интенсивной работе, зарядка в парке или на конечных
Батарейный контейнер СНЭ	~5 МВт·ч	1,25–2,5 МВт	Стоимость хранения, ресурс в тысячах циклов, пожарная безопасность
Крупная сетевая СНЭ	сотни МВт·ч — единицы ГВт·ч	десятки — сотни МВт	Масштабируемость, стоимость за срок службы, быстродействие, надёжность
ГАЭС	единицы — десятки ГВт·ч	сотни — тысячи МВт	Большой запас энергии, длительный срок службы (десятки лет), подходящий рельеф

Источник: АРВЭ

Таким образом, за общей идеей энергетического запаса стоит множество инженерных решений. Одни рассчитаны на быструю реакцию, другие — на продолжительную выдачу энергии; одни удобно размещать рядом с потребителем, другим необходимы особые природные условия. Чтобы понять возможности этих решений, следует начать с их основы — физических способов хранения энергии.

02 РАЗНЫЕ ПУТИ К ОДНОЙ ЦЕЛИ

Какие существуют способы хранения энергии

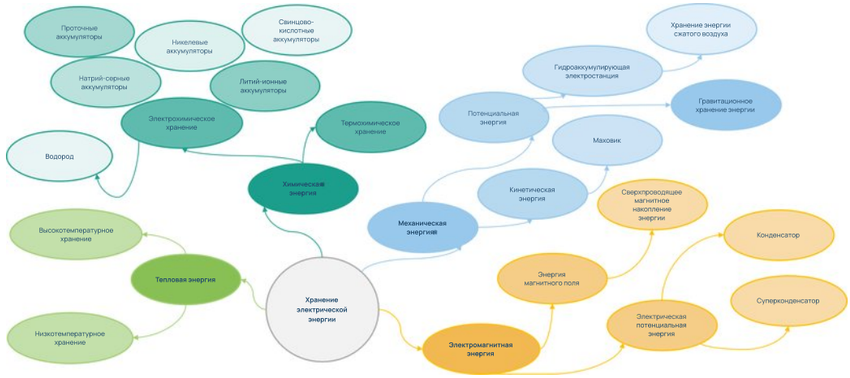
Существует множество технологий накопления энергии, которые различаются устройством, масштабом и возможностями применения. Чтобы разобраться в этом многообразии, начнём с формы, в которой удерживается энергия. Принцип работы механических накопителей связан с положением или движением тел, тепловых — с температурой и состоянием вещества, химических и электрохимических — с обратимыми превращениями. Ещё одна группа накопителей использует энергию электрического и магнитного полей. Некоторые технологии объединяют несколько процессов, поэтому границы между группами условны. Например, при хранении сжатого воздуха существенную роль играет и работа с теплотой.

в этой главе:

2.1 Механические накопители
2.2 Тепловые и химические накопители
2.3 Электрические и магнитные накопители

При этом хранение энергии не всегда предполагает её последующее возвращение в электрическую сеть. Накопленное тепло можно направить на отопление, а произведённый водород — использовать в промышленности. Для получения электроэнергии потребуются дополнительные преобразования и оборудование. Это различие определяет как устройство системы, так и её эффективность.

РИС. 2 **Классификация систем накопления энергии**

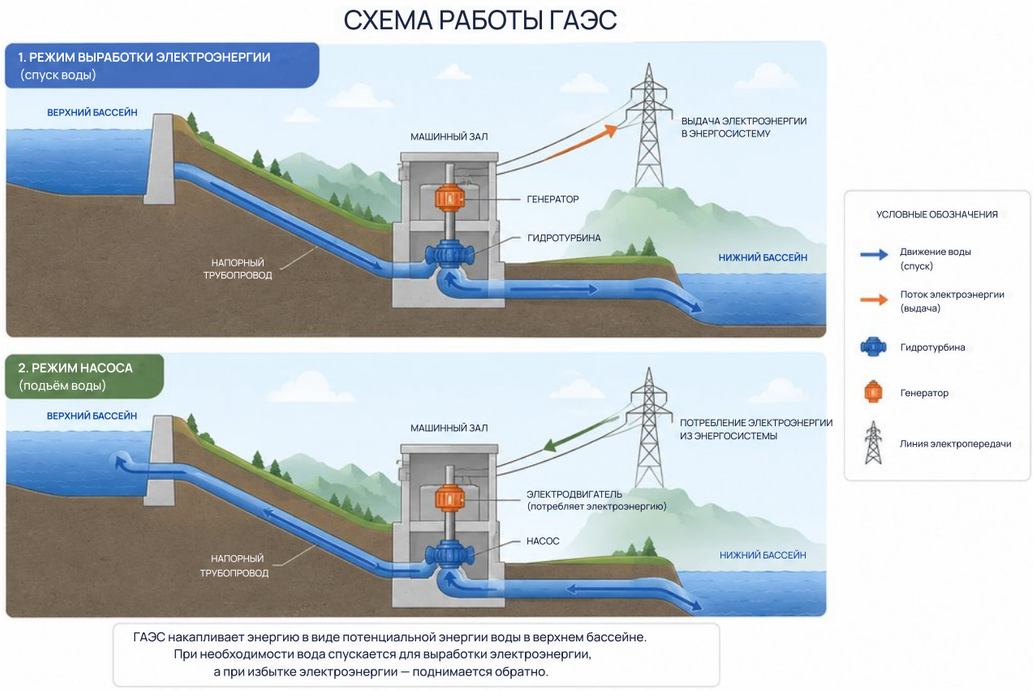


Источник: АРВЭ

2.1 Механические накопители

Один из самых наглядных способов создать энергетический запас — поднять массу на определённую высоту. Именно так работают гидроаккумулирующие электростанции — **ГАЭС**. При заряде насосы перекачивают воду из нижнего водоёма в верхний. Когда электроэнергия востребована, вода движется обратно через гидротурбины, приводящие во вращение генераторы. Во многих установках одни и те же гидротурбины способны работать в насосном и турбинном режимах.

РИС. 3 **Схема работы гидроаккумулирующей электростанции**



Источник: АРВЭ

Запас энергии определяется прежде всего объёмом воды и перепадом высот, а мощность — характеристиками гидроагрегатов и водопроводящего тракта. Это позволяет создавать крупные объекты для многочасовой работы. Однако возможности размещения ГАЭС зависят от рельефа, геологических и водохозяйственных условий. Строительство водоёмов и подземных сооружений требует значительных подготовительных работ. Даже замкнутая схема с двумя искусственными водоёмами, не включёнными непосредственно в русло реки, сохраняет зависимость от особенностей площадки.

Схожий принцип лежит в основе **гравитационных накопителей с твёрдым грузом**. Электропривод поднимает массивные блоки либо перемещает груз вверх по наклонному пути. При управляемом спуске привод работает как генератор. В подобных схемах могут использоваться специальные сооружения или шахтные стволы.

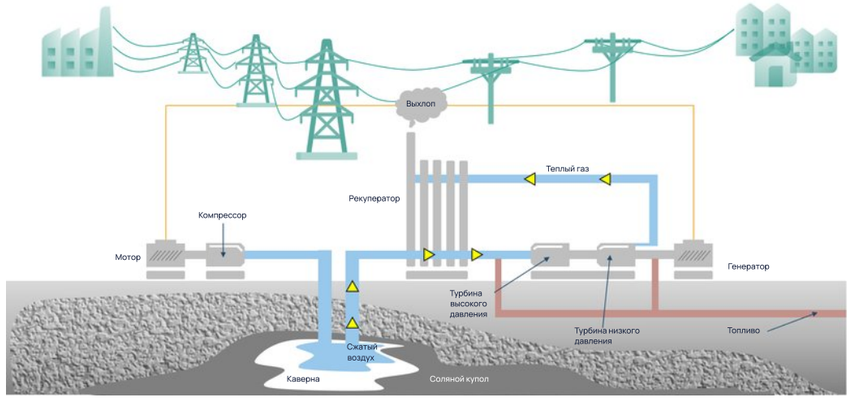
Простота идеи, однако, не отменяет требований к масштабу. Подъём груза массой 1000 тонн на высоту 100 метров создаёт запас около 0,27 МВт·ч без учёта потерь. Для накопления значительного количества энергии необходимы большие массы, существенный перепад высот или многократное перемещение отдельных грузов. Поэтому при оценке проекта важны размеры сооружений, механизмы подъёма и ресурс их работы.

≈0,27 МВт·ч
запас при подъёме груза массой 1000 т на высоту 100 м — без учёта потерь

Другой подход — **хранение энергии в сжатом воздухе**. Во время заряда электрический компрессор закачивает воздух в резервуар или подходящую подземную полость. При разряде воздух расширяется в специальной машине, которая приводит в действие генератор.

В этом процессе нельзя обойти вниманием температуру: при сжатии воздух нагревается, при расширении — охлаждается. Поэтому обращение с теплом во многом определяет эффективность установки. В одних схемах перед расширением воздух подогревают за счёт сжигания топлива; в других — стремятся сохранить тепло сжатия и использовать его при разряде. Эти варианты необходимо различать при сравнении затрат энергии и объёма выбросов. Для крупных систем существенным условием становится наличие подходящего хранилища воздуха.

РИС. 4 **Схема работы системы накопления энергии на сжатом воздухе**



Источник: АРВЭ

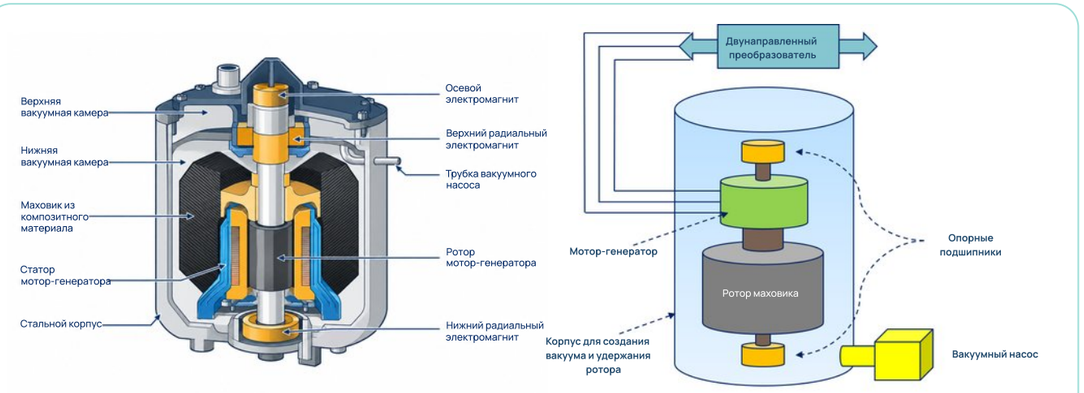
Воздух можно хранить и в жидком состоянии. В криогенной системе накопления электроэнергия расходуется на его подготовку, сжатие и глубокое охлаждение. Полученную жидкость помещают в теплоизолированные резервуары. При разряде её подают под давлением, нагревают и испаряют; расширяющийся газ совершает работу в турбине, связанной с генератором.

Такой подход позволяет разместить запас рабочего вещества в наземных резервуарах. Вместе с тем установка включает сложное компрессорное, криогенное и теплообменное оборудование. Энергетический результат зависит от организации всего цикла, включая использование тепла и холода.

Технология ориентирована на крупные стационарные объекты с продолжительной выдачей энергии. При оценке её характеристик необходимо учитывать весь технологический процесс: от затрат на сжижение до электроэнергии, возвращённой при разряде.

В **маховиковых накопителях** энергетический запас создаётся движением. Электродвигатель разгоняет ротор, а при разряде электрическая машина переходит в генераторный режим и постепенно замедляет его вращение. Для уменьшения потерь применяют вакуумированные корпуса и специальные подшипники.

РИС. 5 **Схема устройства и работы маховикового накопителя**



Источник: АРВЭ

Маховики подходят для частых циклов и быстрой выдачи мощности: например, для сглаживания кратковременных изменений нагрузки, регулирования частоты и поддержания питания до включения другого источника. Их возможности ограничиваются прочностью ротора, допустимой скоростью вращения и потерями в простое. Поэтому основная область их применения связана с относительно короткими интервалами работы, когда особенно важны быстродействие и многократное повторение циклов.

2.2 Тепловые и химические накопители. Применение водорода

Простейший тепловой накопитель знаком каждому — теплоизолированная ёмкость с горячей водой. Промышленные системы используют тот же принцип, но температура и химический состав определяются под конкретную задачу. Энергию можно запасать в воде, расплавах солей, камне, керамике и других материалах. Чем больше масса среды и допустимое изменение её температуры, тем больше запас.

Другой вариант использует фазовый переход. При плавлении вещество поглощает тепло, при затвердевании — отдаёт его. Это позволяет принимать и возвращать значительное количество энергии в сравнительно узком диапазоне температур. В термохимических системах подвод тепла вызывает обратимое превращение вещества; обратный процесс сопровождается выделением тепла.

Накопленная энергия может обеспечивать непосредственно отопление или технологический процесс. Если требуется электроэнергия, в состав системы включают тепловой двигатель и генератор. Поэтому тепловую энергоёмкость нельзя напрямую приравнивать к количеству электроэнергии на выходе. Преимущества таких решений связаны с возможностью использовать доступные материалы и создавать большие запасы, а ограничения — с теплопотерями, теплообменом, стойкостью оборудования и эффективностью обратного преобразования.

Электроэнергию можно использовать для получения вещества, которое впоследствии послужит топливом или промышленным сырьём. Один из примеров — водород, произведённый электролизом воды. В электролизёре под действием электрического тока вода разделяется на водород и кислород. Полученный водород направляется в хранилище, а затем используется по мере необходимости. Такая схема позволяет связать производство электроэнергии с потреблением топлива и сырья: например, направлять часть выработки ветровой или солнечной электростанции на получение водорода.

Водород получают и другими способами. Для их краткого обозначения используется цветовая классификация. Это условный цвет, зависящий от происхождения водорода и технологии его производства, — сам газ во всех случаях остаётся бесцветным.

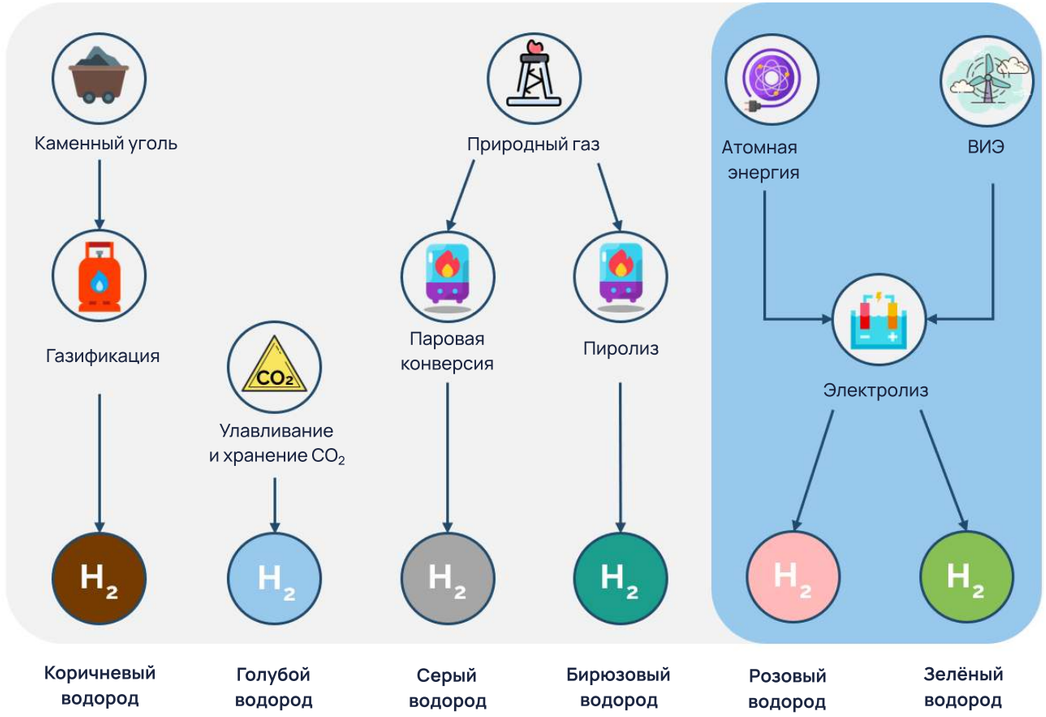
Коричневым обычно называют водород, полученный газификацией бурого угля без улавливания образующегося углекислого газа. Для каменного угля также используется обозначение «чёрный». **Серый водород** производят преимущественно из природного газа без улавливания CO_2. Если производство из ископаемого сырья дополняется улавливанием и долговременным хранением углекислого газа, водород принято называть **голубым**.

Бирюзовый водород получают пиролизом метана — его разложением на водород и твёрдый углерод. Климатические характеристики процесса зависят от источника энергии для нагрева, утечек метана и дальнейшего обращения с углеродом.

Зелёный водород производят электролизом воды с использованием электроэнергии возобновляемых источников. **Розовым** обычно называют водород, полученный электролизом за счёт электроэнергии АЭС. Цветовые обозначения не являются единой строгой системой — для сравнения проектов необходимо уточнять технологию и фактические выбросы по всей производственной цепочке.

Различия между этими маршрутами связаны с исходным сырьём и способом высвобождения водорода. Например, при паровой конверсии природного газа метан реагирует с водяным паром, образуя водород и оксид углерода. Последующая реакция оксида углерода с паром позволяет получить дополнительный

РИС. 6 **Схемы получения водорода**



Источник: АРВЭ

водород с одновременным выделением CO_2. При электролизе источником водорода служит вода, а необходимая энергия подводится в виде электричества. Поэтому экологические характеристики электролитического водорода зависят от того, как была произведена использованная электроэнергия.

Для задачи накопления электроэнергии принципиальным фактором является именно последовательность «электроэнергия — водород — хранение — электроэнергия». Хранение водорода требует отдельного технического решения. При обычных условиях газ обладает низкой плотностью, поэтому для уменьшения объёма его сжимают или сжижают. Сжижение требует охлаждения примерно до −253 °C. Возможно также хранить водород с использованием материалов, поглощающих или связывающих его. Выбор способа определяет размеры хранилища, состав оборудования и дополнительные энергозатраты.

Для обратного получения электроэнергии водород можно использовать в приспособленной для него двигательной или газотурбинной установке либо направить в топливный элемент, который содержит два электрода и расположенный между ними электролит.

ЦВЕТА ВОДОРОДА

- **Коричневый** — газификация бурого угля без улавливания CO_2
- **Чёрный** — газификация каменного угля без улавливания CO_2
- **Серый** — из природного газа без улавливания CO_2
- **Голубой** — из ископаемого сырья с улавливанием и хранением CO_2
- **Бирюзовый** — пиролиз метана
- **Зелёный** — электролиз на электроэнергии ВИЭ
- **Розовый** — электролиз на электроэнергии АЭС

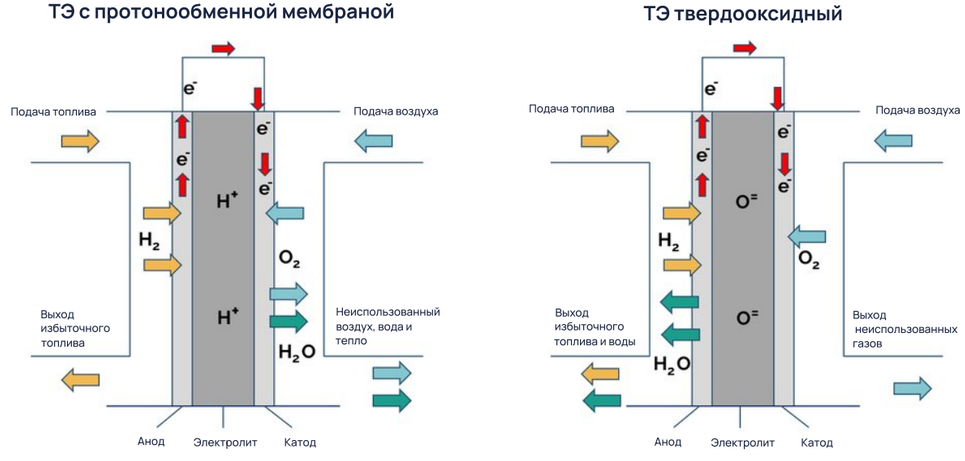
−253 °C

примерно до этой температуры охлаждают водород для сжижения

В топливном элементе с **протонообменной мембраной** на анод подаётся водород, молекулы которого под действием катализатора разделяются на протоны и электроны. Протоны проходят через мембрану, а электроны движутся по внешней цепи, обеспечивая питание нагрузки. На катоде они соединяются с кислородом и протонами с образованием воды. Кислород обычно поступает из воздуха. В классическом **твердооксидном элементе** ионы кислорода, наоборот, движутся от катода к аноду, поэтому вода образуется там же, куда подаётся водород (см. рис. 7).

При работе на чистом водороде продуктом реакции становится вода, одновременно выделяется тепло. Выработка продолжается, пока поступают реагенты. Сам топливный элемент выполняет функцию преобразователя, а запас энергии находится во внешнем хранилище водорода.

РИС. 7 **Схема топливного элемента с электролитом**



Источник: АРВЭ

Эти разновидности топливных элементов различаются прежде всего электролитом и рабочей температурой. Элементы с протонообменной мембраной — PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) — работают при сравнительно низких температурах, быстро запускаются и подходят для резервного питания и режимов с изменяющейся нагрузкой. Ограниченность их применения связана со стоимостью катализаторов и чувствительностью к примесям в топливе.

Твердооксидные элементы — SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) — используют керамический электролит и работают при высоких температурах. Они позволяют эффективно вырабатывать электроэнергию и использовать выделяемое тепло, что представляет интерес для стационарных установок с продолжительной работой. При этом прогрев занимает некоторое время, а высокие температуры предъявляют повышенные требования к материалам и тепловому режиму.

Существуют также щелочные, фосфорнокислотные и расплав-карбонатные топливные элементы. Выбор технологии определяется требованиями к топливу, графиком нагрузки, условиями запуска и возможностью полезного использования тепла.

При оценке водородного накопителя необходимо учитывать всю цепочку преобразований. Часть электроэнергии теряется при электролизе, дополнительная энергия расходуется на подготовку и хранение водорода, а при обратной выработке только часть его химической энергии превращается в электрическую.

Водородная схема позволяет отдельно выбирать мощность производства водорода, объём его запаса и мощность обратной выработки. Это создаёт возможности для продолжительного хранения и объединения электрических, тепловых и промышленных потребителей.

Другими химическими энергоносителями могут служить аммиак, синтетический метан и жидкие топлива. Их производство требует дополнительных процессов и исходных веществ.

2.3 Электрические и магнитные накопители

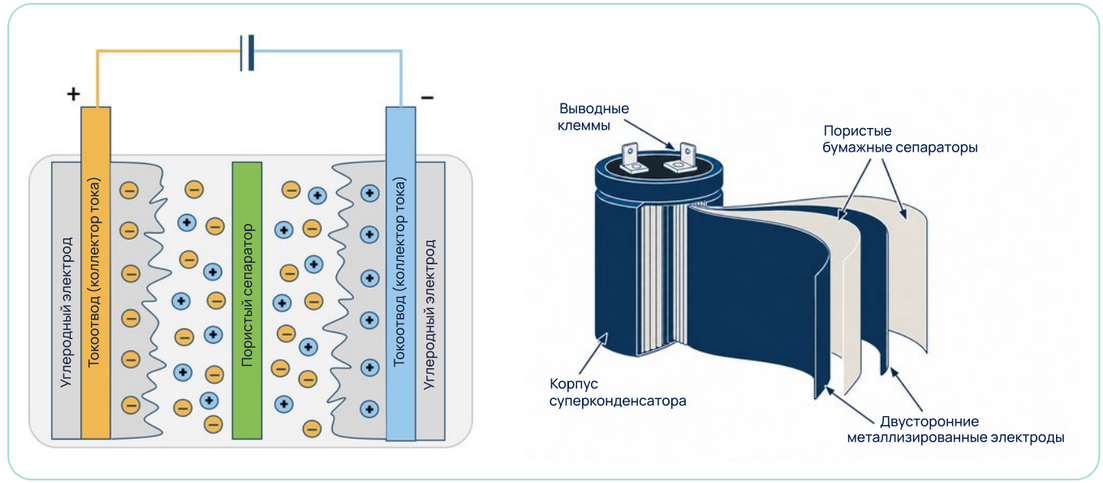
В **конденсаторе** энергия удерживается электрическим полем между разделёнными зарядами. У **суперконденсаторов** большая поверхность электродов и особенности их взаимодействия с электролитом позволяют существенно увеличить запас по сравнению с обычными конденсаторами. В зависимости от устройства в накоплении могут участвовать как электростатические процессы, так и быстрые обратимые реакции на электродах.

Сильная сторона суперконденсаторов — способность быстро принимать и отдавать большую мощность и выдерживать многочисленные циклы. Это востребовано при рекуперации энергии торможения, кратковременных пиках нагрузки и провалах питания. При этом запас энергии на единицу массы обычно меньше, чем у аккумуляторов. Поэтому суперконденсаторы часто выбирают для короткого интенсивного обмена энергией либо используют совместно с батареями.

В **сверхпроводниковом индуктивном накопителе** энергия запасается в магнитном поле катушки, по которой протекает ток. Чтобы поддерживать состояние сверхпроводимости, требуется охлаждение. Электронный преобразователь управляет обменом энергией между катушкой и сетью.

Такая схема обеспечивает быстрое изменение мощности, но требует сложной криогенной системы и специальной конструкции катушки. Отсутствие обычных резистивных потерь в сверхпроводнике

РИС. 8 **Принцип работы суперконденсатора**



Источник: АРВЭ

не означает отсутствия затрат во всей установке: охлаждение и преобразование электроэнергии также требуют энергии. Это специализированное решение прежде всего для кратковременных процессов.

Особый интерес представляют электрохимические накопители. За их общим названием «аккумулятор» скрываются существенно различающиеся свойства: одна технология лучше переносит частые циклы, другая позволяет увеличить продолжительность разряда или предъявляет особые требования к температуре. Чтобы понять, как эти различия влияют на выбор СНЭ, необходимо перейти от общей классификации к устройству самих аккумуляторов.

03

ВНУТРИ АККУМУЛЯТОРА

Электрохимические технологии накопления

Электрохимические накопители объединяет общий принцип: электрическая энергия запасается посредством изменения химического состояния веществ и высвобождается при обратном процессе. Однако за этим принципом стоит множество технических решений. Материалы электродов и электролита определяют, сколько энергии сможет накопить аккумулятор, насколько быстро он будет принимать и отдавать заряд, какие условия потребуются для его эксплуатации.

В этой главе:

3.1 Литий-ионные аккумуляторы
3.2 Натрий-ионные аккумуляторы
3.3 Свинцово-кислотные аккумуляторы
3.4 Никелевые аккумуляторы
3.5 Высокотемпературные натриевые аккумуляторы
3.6 Проточные аккумуляторы
3.7 Что дальше
3.8 Сравнение решений для хранения электроэнергии

Для энергетики эти различия имеют практическое значение. Накопитель, ежедневно переносящий выработку на более поздний период времени, и батарея аварийного питания работают в разных режимах. В первом случае существенную роль играют эффективность и ресурс при регулярном циклировании, во втором — готовность выдать необходимую мощность после длительного ожидания. Поэтому выбор электрохимической технологии начинается с понимания задачи и процессов, происходящих внутри аккумулятора.

Электрохимические накопители включают целое семейство технологий: литий-ионные, натриевые, свинцово-кислотные, никелевые, проточные и другие. Они различаются как материалами, так и конструкцией.

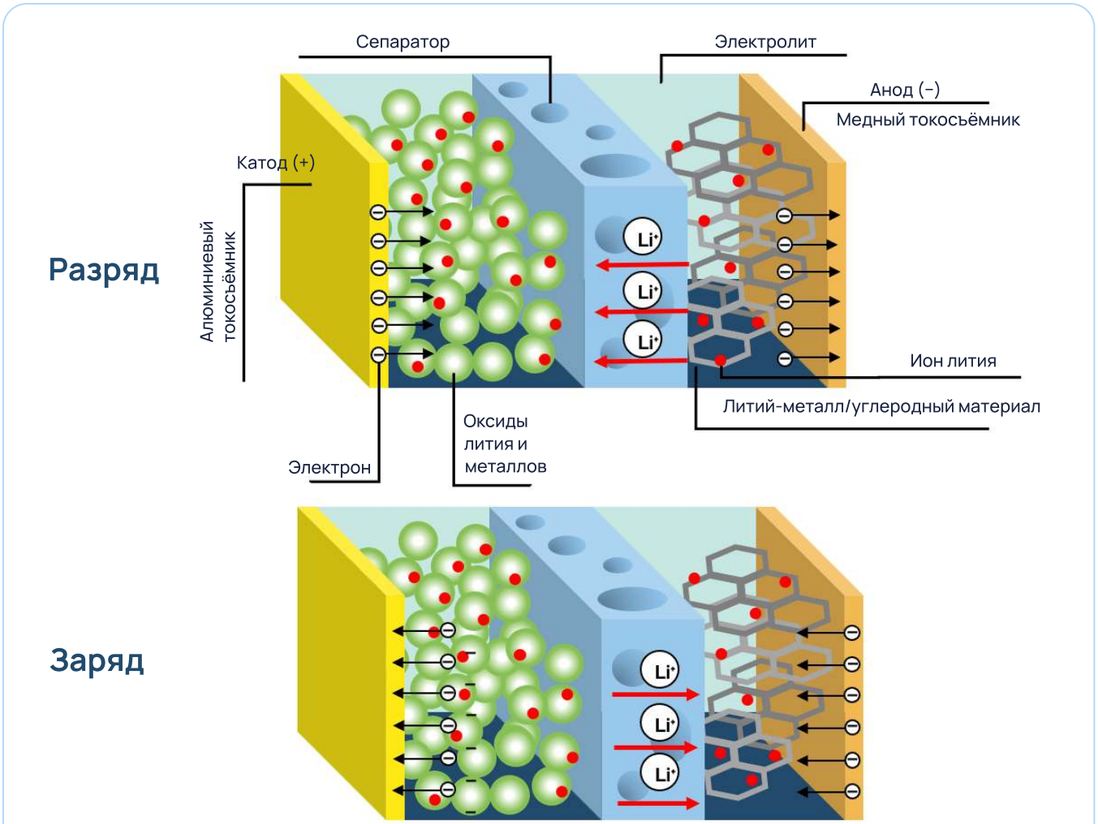
Основной элемент аккумулятора — электрохимическая ячейка. В ней находятся положительный и отрицательный электроды, а также электролит, обеспечивающий перемещение ионов. Электроды разделены материалом, который препятствует их непосредственному контакту, сохраняя возможность ионного переноса.

При разряде электрохимические реакции создают направленное движение электронов во внешней цепи: через подключённое оборудование они переходят от отрицательного электрода к положительному. Внутри ячейки перенос заряда обеспечивают ионы. При зарядке внешний источник энергии запускает обратный процесс, возвращая активные материалы в заряженное состояние.

3.1 Литий-ионные аккумуляторы: семейство технологий

В литий-ионном аккумуляторе при разряде ионы лития перемещаются от отрицательного электрода к положительному, а при заряде — обратно. Возможность многократно повторять этот процесс лежит в основе работы батареи. Реальная обратимость, однако, имеет пределы: побочные реакции постепенно изменяют материалы и внутреннюю структуру ячейки (рис. 9).

РИС. 9 **Принцип работы литий-ионного аккумулятора**



Источник: АРВЭ

Название «литий-ионный» описывает общий механизм переноса заряда, но не задаёт конкретный химический состав. Чаще всего отрицательный электрод в ячейках изготавливается преимущественно из графита, а положительный может содержать разные соединения лития.

Литий-железо-фосфатные аккумуляторы, или LFP (Lithium Iron Phosphate; $LiFePO_4$), используют фосфат железа и лития в положительном электроде. Этот материал отличается высокой термической устойчивостью и не требует никеля и кобальта, что отражается на безопасности и стоимости. Именно это сочетание сделало LFP основным выбором для стационарных СНЭ с ежедневным циклированием, а в последние годы — и для части электромобилей (например, у BYD и в базовых версиях Tesla), где длительный ресурс и безопасность батареи важнее минимальной массы. Ограничение технологии — меньшая удельная энергия по сравнению с рядом других литий-ионных составов: для хранения одинакового количества энергии требуется большая масса ячеек, поэтому там, где критичны масса и объём, LFP применяют реже.

В аккумуляторах NMC (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide; $LiNiMnCoO_2$) положительный электрод содержит сложный оксид лития, никеля, марганца и кобальта. Изменение соотношения этих компонентов позволяет варьировать энергетические характеристики, ресурс и термическую устойчивость. Высокая удельная энергия сделала NMC одним из основных составов для аккумуляторов электромобилей, электровелосипедов и электроинструмента — там, где ограничения по массе и объёму существенны, а умеренная цена важнее предельной долговечности. Одновременно требования к поддержанию безопасного режима и более высокая стоимость по сравнению с LFP ограничивают применение NMC там, где на первый план выходят именно ресурс и устойчивость к нагреву — в частности, в стационарных накопителях с интенсивным циклированием.

Близкое направление представляют аккумуляторы NCA (Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide; $LiNiCoAlO_2$), в которых положительный электрод содержит оксид лития, никеля, кобальта и алюминия. Высокая удельная энергия — одна из самых высоких среди литий-ионных составов — долгое время делала эту технологию основным выбором для аккумуляторов электромобилей: при ограниченных объёме и массе батареи она позволяет увеличить запас хода. Добавление кобальта и алюминия стабилизирует структуру никельсодержащего материала, который в чистом виде менее устойчив, однако высокая энергетическая плотность всё равно требует развитой системы охлаждения и точного контроля режимов заряда и разряда. По этой причине в стационарных накопителях, где масса и объём батареи менее критичны, предпочтение чаще отдают более устойчивым к нагреву составам.

В аккумуляторах LMO (Lithium Manganese Oxide; $LiMn_2O_4$) используется литий-марганцевый оксид со структурой шпинели — кристаллической решёткой, в которой ионы лития могут перемещаться по трёхмерной сети путей. Такое строение способствует работе аккумулятора при высоких токах заряда и разряда. Отсутствие никеля и кобальта снижает стоимость материала и обеспечивает высокую удельную мощность — способность быстро отдавать и принимать ток, поэтому LMO применяют в электроинструменте и ряде гибридных автомобильных решений, где важна не столько энергоёмкость, сколько способность кратковременно выдавать большую мощность. Сравнительно невысокая удельная ёмкость и ускоренная деградация при повышенной температуре ограничивают использование LMO в чистом виде для длительного автономного хранения, поэтому на практике эту технологию чаще сочетают с NMC в одном положительном электроде, подбирая соотношение материалов под конкретную задачу.

Литий-кобальт-оксидные аккумуляторы, или LCO (Lithium Cobalt Oxide; $LiCoO_2$), с положительным электродом на основе оксида лития и кобальта стали одной из первых промышленно освоенных литий-ионных систем и до сих пор остаются основой в батареях смартфонов, ноутбуков и камер: высокая удельная энергия позволяет уместить достаточный запас заряда в компактном корпусе портативного устройства. Для крупных стационарных накопителей это сочетание свойств теряет значение — там на первый план выходят стоимость при больших объёмах закупки и ресурс при ежедневном циклировании, а по этим параметрам LCO уступает LFP и NMC. Высокая стоимость кобальта и более низкая термическая устойчивость практически исключают эту технологию из проектов СНЭ.

Все перечисленные технологии описывают материал положительного электрода, и это общее основание объясняет, почему их можно сравнивать по единому набору параметров — энергоёмкости, мощности, ресурсу и стоимости. При этом само обозначение химического состава задаёт лишь общие свойства — характеристики конкретной ячейки зависят также от конструкции и качества изготовления.

ОБОЗНАЧЕНИЯ СОСТАВОВ

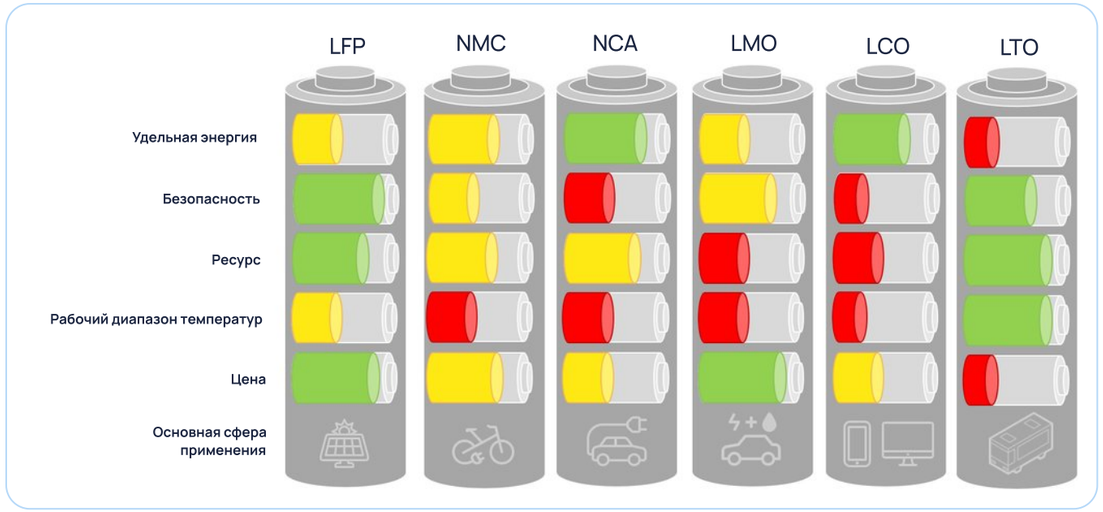
LFP	литий-железо-фосфат, $LiFePO_4$
NMC	оксид лития, никеля, марганца и кобальта
NCA	оксид лития, никеля, кобальта и алюминия
LMO	литий-марганцевый оксид, $LiMn_2O_4$
LCO	литий-кобальт-оксид, $LiCoO_2$
LTO	титанат лития — материал отрицательного электрода

Особое место занимают литий-титанатные аккумуляторы, или LTO (Lithium Titanate Oxide; $Li_4Ti_5O_{12}$). Здесь обозначение характеризует не положительный, а отрицательный электрод, — материал которого содержит титанат лития, поэтому LTO может сочетаться с разными материалами положительного электрода из описанных выше. Применение титаната лития позволяет создавать ячейки, рассчитанные на быстрый заряд, интенсивное циклирование и работу при низких температурах. Эти свойства востребованы там, где зарядка должна занимать минуты, а не часы: в электробусах и трамваях с подзарядкой на конечных остановках, а также в промышленных СНЭ с частыми циклами заряда-разряда. Обратная сторона — более низкая удельная энергия и, как правило, более высокая стоимость единицы запасаемой энергии, из-за чего LTO остаётся нишевым решением для задач, где скорость и ресурс важнее стоимости. Допустимые режимы определяются характеристиками конкретного изделия.

Различия между литий-ионными технологиями удобно рассмотреть по пяти критериям, которые в наибольшей степени определяют выбор ячейки для конкретной задачи: удельная энергия, безопасность, ресурс, рабочий диапазон температур и цена. По каждому критерию технологии ранжированы между собой: ранг 1 соответствует лучшему показателю среди шести составов, ранг 6 — худшему, знак «=» обозначает равные позиции. Ранги переданы цветом: зелёный — лучшие значения, жёлтый — средние, красный — слабые. Последняя строка показывает, в какой области применения сочетание свойств каждой технологии оказалось наиболее востребованным.

Для сетевых СНЭ — крупных стационарных накопителей, работающих в энергосистеме, — сочетание характеристик делает наиболее применимой именно технологию LFP. Масса и объём батареи здесь не являются критическим показателем, как в электромобиле или смартфоне, поэтому сравнительно невысокая удельная энергия не создаёт практических препятствий: значительные размеры компенсируются масштабом объекта. Напротив, для задачи, которую решает сетевой накопитель — ежедневное или более частое циклирование на протяжении многих лет, — определяющими становятся именно те параметры,

РИС. 10 **Сравнение различных литий-ионных технологий**



Источник: АРВЭ

РИС. 11 **Основные параметры различных литий-ионных технологий**

Технология	Удельная энергия, Вт·ч/кг	Безопасность	Ресурс, циклов	Рабочий диапазон температур	Цена	Основная сфера применения сейчас
LFP	90–160 (ранг 4=)	Высокая (ранг 1)	2000–6000+ (ранг 2)	Разряд −20..+60°C; заряд 0..+45°C (ранг 2)	Низкая (ранг 1=)	Стационарные СНЭ, часть EV (BYD, базовые Tesla), электробусы
NMC	150–220 (ранг 3)	Средняя (ранг 4)	1000–2000 (ранг 3=)	Разряд −20..+55°C; заряд 0..+45°C (ранг 3=)	Средняя (ранг 3)	Электромобили, электровелосипеды, электроинструмент
NCA	200–260 (ранг 1)	Ниже средней (ранг 5)	500–1000 (ранг 3=)	Разряд −20..+60°C; заряд 0..+45°C, чувствительна к перегреву (ранг 3=)	Выше средней (ранг 4=)	Электромобили с акцентом на запас хода, электроинструмент
LMO	100–150 (ранг 4=)	Средне-высокая (ранг 3)	300–700 (ранг 5=)	Разряд −20..+60°C; заряд 0..+45°C (ранг 3=)	Низкая (ранг 1=)	Электроинструмент, гибридные авто (в смеси с NMC)
LCO	150–200 (ранг 2)	Низкая (ранг 6)	500–1000 (ранг 5=)	Разряд −20..+60°C; заряд 0..+45°C, узкий допуск по перегреву (ранг 3=)	Выше средней (ранг 4=)	Портативная электроника: смартфоны, ноутбуки, камеры
LTO	50–80 (ранг 6)	Высокая (ранг 2)	10 000–20 000+ (ранг 1)	Разряд и заряд – −30..+60°C, включая заряд на холоде (ранг 1)	Высокая (ранг 6)	Быстрая зарядка: электробусы, трамваи; промышленные СНЭ с интенсивным циклированием

Источник: АРВЭ

где LFP лидирует: высокая безопасность при больших установленных мощностях, когда тепловой разгон одной ячейки может затронуть целый контейнер, и ресурс, позволяющий выдерживать тысячи циклов без существенной деградации. Низкая стоимость, обусловленная отсутствием никеля и кобальта, дополняет перечень преимуществ. Поэтому среди рассмотренных литий-ионных технологий LFP на сегодняшний день занимает основную долю именно в сегменте сетевых и промышленных СНЭ, тогда как остальные составы находят применение там, где на первый план выходят другие ограничения — масса, скорость заряда или компактность.

Среди рассмотренных литий-ионных технологий LFP на сегодняшний день занимает основную долю именно в сегменте сетевых и промышленных СНЭ.

3.2 Натрий-ионные аккумуляторы: другая сырьевая основа

Натрий-ионные аккумуляторы используют принцип, близкий к литий-ионному: между электродами перемещаются ионы натрия, а не лития. Но замена переносчика заряда требует использования других материалов. Для отрицательного электрода часто применяют твёрдый углерод, а для положительного разработано несколько семейств соединений, включая слоистые оксиды, полиан-ионные материалы и аналоги берлинской лазури. Ни один из этих составов пока не доминирует так однозначно, как LFP или NMC среди литий-ионных технологий — рынок здесь находится на более ранней стадии консолидации.

Сама идея накопления энергии через перемещение ионов щелочного металла изучалась ещё с 1970-х годов — для натрия и лития параллельно, однако практическое развитие двух этих направлений пошло разными темпами: литий-ионные ячейки вышли на коммерческий рынок в начале 1990-х и далее совершенствовались несколько десятилетий, тогда как натрий-ионные составы долго оставались областью исследований и начали приближаться к серийному производству заметно позже — в основном в последнее десятилетие, на фоне роста стоимости и спроса на никель, кобальт и литий. Поэтому натрий-ионные технологии — это не альтернатива литий-ионным, а более позднее направление, использующее опыт, накопленный при развитии литиевых ячеек.

Натрий распространён в природе существенно шире лития, а используемые положительные электроды, как правило, не требуют никеля и кобальта. В проекте, требующем большого объёма батарей на длительный срок, это снижает зависимость от конъюнктуры рынка нескольких дефицитных металлов и от конкуренции с автомобильной промышленностью за те же материалы. Прямого снижения цены готовой ячейки это не гарантирует: стоимость определяется всей цепочкой — сложностью производства электродов, выходом годной продукции и масштабом выпуска, который у производителей натрий-ионных аккумуляторов пока меньше, чем у LFP.

У ряда натрий-ионных составов ёмкость снижается на холоде медленнее, чем у литий-ионных аналогов, а некоторые продукты заявляют работоспособность при более низких отрицательных температурах без дополнительного обогрева. Для накопителя, расположенного на открытой площадке в холодном климате, это может означать экономию на обогреве кон-

I·03

РИС. 12 **Сравнение натрий-ионных и литий-ионных батарей по мере развития технологий**



Источник: АРВЭ

тейнера, что представляет особый интерес в климатических условиях с ярко выраженной сезонностью.

Для многих натрий-ионных решений характерна меньшая удельная энергия по сравнению с литий-ионными. Для электротранспорта и портативной электроники это существенное ограничение: оно напрямую сокращает запас хода или время работы устройства, поэтому здесь натрий-ионные ячейки применяются сегодня лишь в отдельных нишах. В стационарном хранении то же ограничение проявляется мягче: увеличение размеров контейнера для компенсации меньшей плотности энергии не является критичным.

Все эти особенности натрий-ионных аккумуляторов определяют их положение на рынке. Они не предлагаются как технология с более высокой энергоёмкостью или более длительным ресурсом — по этим параметрам они, как правило, не превосходят LFP. Их сильная сторона — иное сочетание свойств: независимость от дефицитных металлов, устойчивость к холоду и потенциально более низкая стоимость по мере развития производства, причём именно для стационарного хранения эти свойства совмещаются особенно удачно, поскольку меньшая удельная энергия здесь не создаёт серьёзных практических препятствий. Поэтому натрий-ионные решения рассматриваются не как технология, способная вытеснить LFP в ближайшей перспективе, а как направление развития сетевого хранения, способное занять в нём заметное место по мере роста производства — наравне с LFP, а не вместо неё.

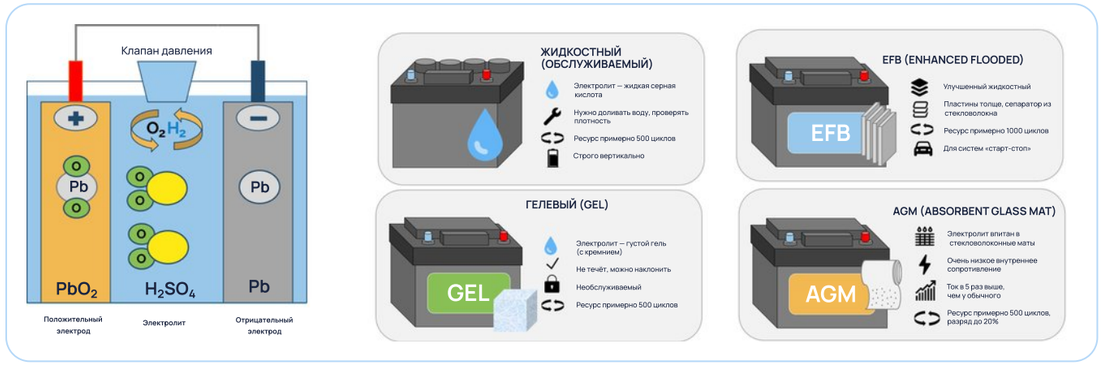
3.3 Свинцово-кислотные аккумуляторы: освоенная технология с определённой областью применения

В заряженном свинцово-кислотном аккумуляторе положительный электрод содержит диоксид свинца, отрицательный — металлический свинец, а электролитом служит водный раствор серной кислоты. При разряде на обоих электродах образуется сульфат свинца; зарядка обеспечивает обратное превращение. Этот принцип объединяет несколько вариантов исполнения батарей, которые различаются конструкцией электродов, способом удержания электролита и требованиями к эксплуатации.

Для ежедневного переноса энергии применяют батареи, специально спроектированные для циклической работы. Их электроды должны выдерживать многократные изменения состояния активных материалов. Стартёрная батарея, предназначенная для кратковременной выдачи большого тока, и стационарная батарея резервного питания имеют другие конструктивные приоритеты.

По устройству выделяют батареи со свободным жидким электролитом и клапанно-регулируемые с иммобилизованным электролитом. К первой группе относятся обычные жидкостные батареи и их усовершенствованная разновидность EFB. Во второй — наиболее распространены GEL и AGM. В штатном режиме внутренние процессы рекомбинации уменьшают потери воды, поэтому её долив не предусмотрен. При избыточном давлении клапан выпускает газ. Такая конструкция меньше нуждается в обслуживании, но сохраняет требования к вентиляции, температуре и правильной зарядке.

РИС. 13 **Принцип работы жидкостного свинцово-кислотного аккумулятора, виды свинцово-кислотного аккумулятора**



Источник: АРВЭ

В жидкостных батареях — FLA (Flooded) — электроды погружены в свободный раствор серной кислоты. Такая конструкция позволяет создавать как стартёрные, так и промышленные батареи для глубокого циклирования. Обслуживаемые варианты требуют контроля уровня электролита и периодического восполнения воды, расходуемой при работе, а также размещения с учётом газовыделения во время заряда и необходимости вентиляции. Эти батареи подходят для объектов, где можно обеспечить предусмотренное производителем обслуживание.

EFB (Enhanced Flooded Battery) представляет собой усовершенствованную жидкостную батарею. Повышение устойчивости к циклированию достигается изменениями в конструкции электродов, способствующими удержанию активной массы: например, дополнительный материал на поверхности положительной пластины уменьшает её разрушение. Такие решения улучшают приём заряда и работу при повторяющихся разрядах. EFB широко применяются в автомобилях с системой «старт-стоп».

В гелевых батареях — GEL — электролит загущён с помощью добавления диоксида кремния. Он сохраняет ионную проводимость, но перестаёт свободно перемещаться внутри корпуса. Гелевое исполнение используется, в частности, в батареях для продолжительной выдачи энергии и циклической работы.

В батареях AGM (Absorbent Glass Mat) жидкий электролит удерживается в порах стекловолоконного сепаратора между пластинами. Конструкция обеспечивает устойчивость к вибрации и возможность принимать и отдавать значительные токи. AGM применяются в резервном питании, а в специальном циклическом исполнении — в системах с регулярным разрядом.

Для применения свинцовых батарей в СНЭ имеет значение режим восстановления заряда. Длительное пребывание в разряженном состоянии и систематический недозаряд способствуют накоплению труднообратимого сульфата свинца и снижению доступной ёмкости. Это особенно важно в автономных системах, где выработка и время зарядки ограничены. Развитие свинцовых технологий продолжается: совершенствуются электроды, применяются углеродные добавки, улучшающие приём заряда и работу при неполном заряде.

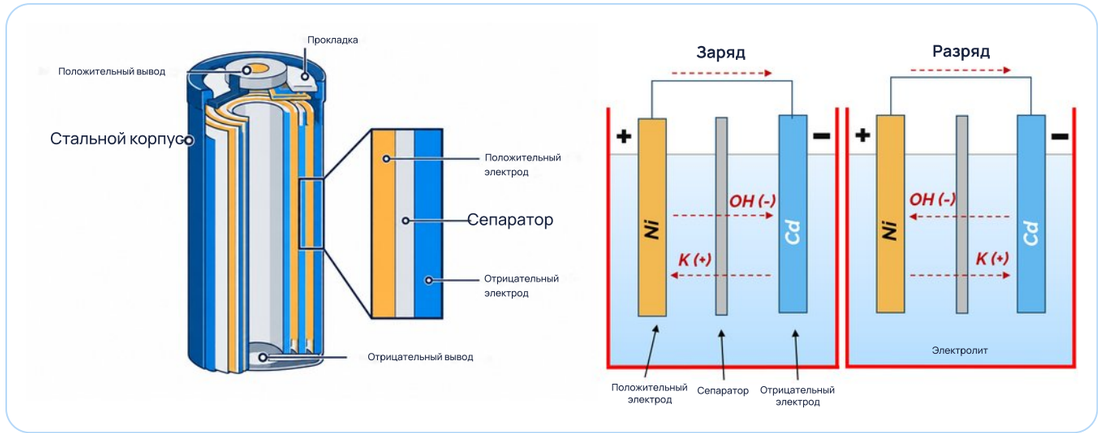
3.4 Никелевые аккумуляторы: устойчивость к сложным условиям эксплуатации

К никелевым относятся несколько электрохимических систем, в которых положительный электрод использует соединения никеля. Среди них никель-кадмиевые и никель-металлгидридные аккумуляторы. Обе технологии используют водный щелочной электролит, обычно на основе гидроксида калия, но различаются материалом отрицательного электрода. Эта разница определяет особенности накопления энергии и влияет на характеристики батареи.

В никель-кадмиевом аккумуляторе — Ni-Cd — отрицательный электрод в заряженном состоянии содержит металлический кадмий. При разряде он превращается в гидроксид кадмия, а оксигидроксид никеля на положительном электроде — в гидроксид никеля. Зарядка обеспечивает обратные превращения. Минусы технологии связаны с относительно невысокой удельной энергией и использованием токсичного кадмия. Поэтому при выборе Ni-Cd-батарей учитывают их массу и размеры, а также организацию сбора и переработки после завершения службы.

В никель-металлгидридном аккумуляторе — Ni-MH — кадмий в электроде заменён металлическим сплавом, способным обратимо поглощать водород, что позволяет повысить запас энергии при сопоставимых массе и объёме и исключить использование кадмия. Это делает никель-металлгидридные технологии привлекательными для оборудования, которому требуется более компактная батарея. При этом отсутствие кадмия не отменяет необходимости особой переработки: аккумулятор содержит другие металлы и щелочной электролит.

РИС. 14 **Принцип работы никель-кадмиевого аккумулятора**



Источник: АРВЭ

Их применение определяется устойчивостью к тяжёлым условиям эксплуатации, широким рабочим температурным диапазоном и продолжительным сроком службы. Эти качества востребованы в системах, где батарея должна сохранять готовность к работе при изменении температуры и длительном нахождении в резерве.

Ограничения связаны с относительно невысокой удельной энергией и использованием материалов, требующих ответственного обращения и переработки. Для таких батарей определяющим преимуществом становится эксплуатационная надёжность в конкретных условиях объекта.

3.5 Высокотемпературные натриевые аккумуляторы

Натрий также находит применение в накопителях, принципиально отличающихся от натрий-ионных. К ним относятся натрий-серные и натрий-никель-хлоридные аккумуляторы. В натрий-серной ячейке отрицательный электрод представляет собой расплавленный натрий, положительный — расплавленную серу, а разделяет их твёрдый керамический электролит на основе β-оксида алюминия, через который переносятся ионы натрия. В натрий-никель-хлоридной ячейке на положительном электроде вместо серы используется хлорид никеля, но прин-

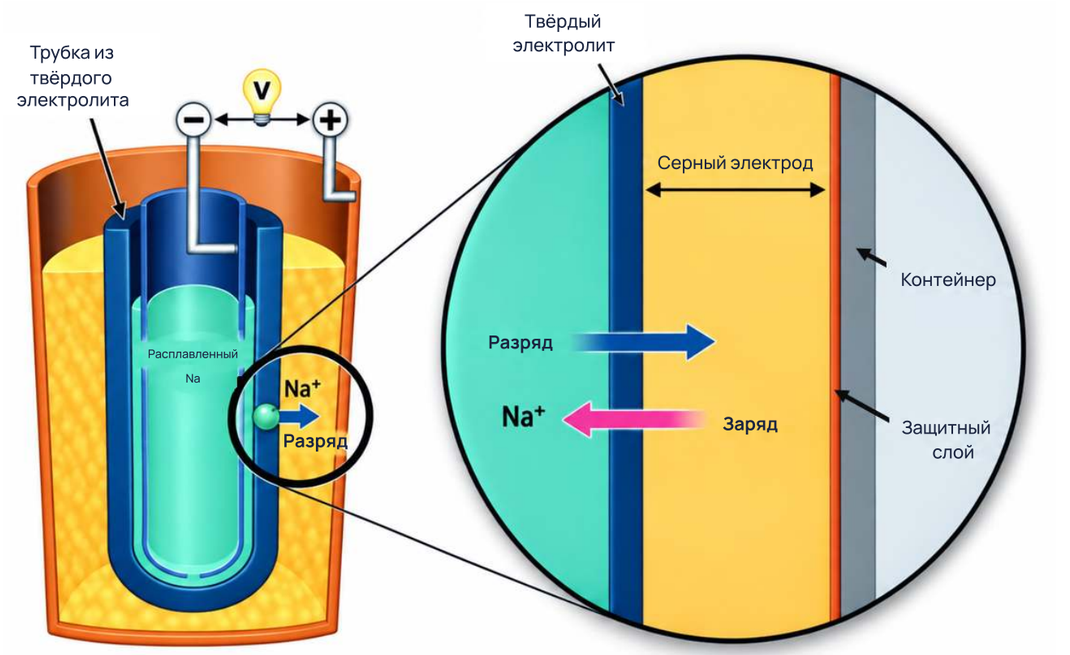
цип переноса заряда через керамический электролит сохраняется.

Для поддержания необходимого состояния веществ и проводимости электролита батарея работает при температуре около 300 °C. Высокая температура здесь является условием электрохимического процесса; энергия запасается в изменении химического состояния материалов.

≈300 °C

рабочая температура высокотемпературных натриевых батарей

РИС. 15 **Принцип работы натрий-серных накопителей**



Источник: АРВЭ

Имеется опыт промышленного применения таких аккумуляторов, в том числе для стационарного хранения с многочасовой выдачей энергии. Однако необходимость сохранять рабочую температуру определяет особенности всей установки: требуются теплоизоляция, управление нагревом и учёт энергозатрат на поддержание режима.

При выборе технологии приходится учитывать график работы объекта. Режим, предполагающий продолжительное отключение с охлаждением батареи и последующий выход на рабочую температуру, отличается от повседневного циклирования уже прогретой установки. На практике это предопределяет разные ниши применения двух технологий: натрий-серные аккумуляторы чаще используют там, где установка работает в относительно устойчивом режиме с продолжительным разрядом — на крупных сетевых объектах, рассчитанных на многочасовую выдачу энергии, тогда как натрий-никель-хлоридные ячейки лучше переносят механические воздействия и повторяющиеся циклы охлаждения и повторного разогрева, что делает их более подходящими для компактных и мобильных систем, например резервного питания телекоммуникационного оборудования.

Сырьевая основа у этих технологий тоже является практическим преимуществом. Сера и натрий — распространённые и недорогие материалы, что снижает зависимость от дефицитных металлов и конкуренции за них с другими отраслями. Для технологии, рассчитанной на продолжительное стационарное хранение, где стоимость активных материалов накапливается пропорционально запасаемой энергии, сырьевое преимущество имеет такое же значение, как и в случае с натрий-ионными ячейками.

3.6 Проточные аккумуляторы: энергия в резервуарах

В проточном аккумуляторе энергетический запас и устройство, преобразующее его в электрическую энергию, пространственно разделены. Активные вещества находятся в электролитах, которые хранятся во внешних резервуарах. Насосы обеспечивают их циркуляцию через электрохимический блок, где происходят реакции заряда и разряда. Такая архитектура позволяет подбирать объём хранения и мощность установки под задачу энергетического объекта.

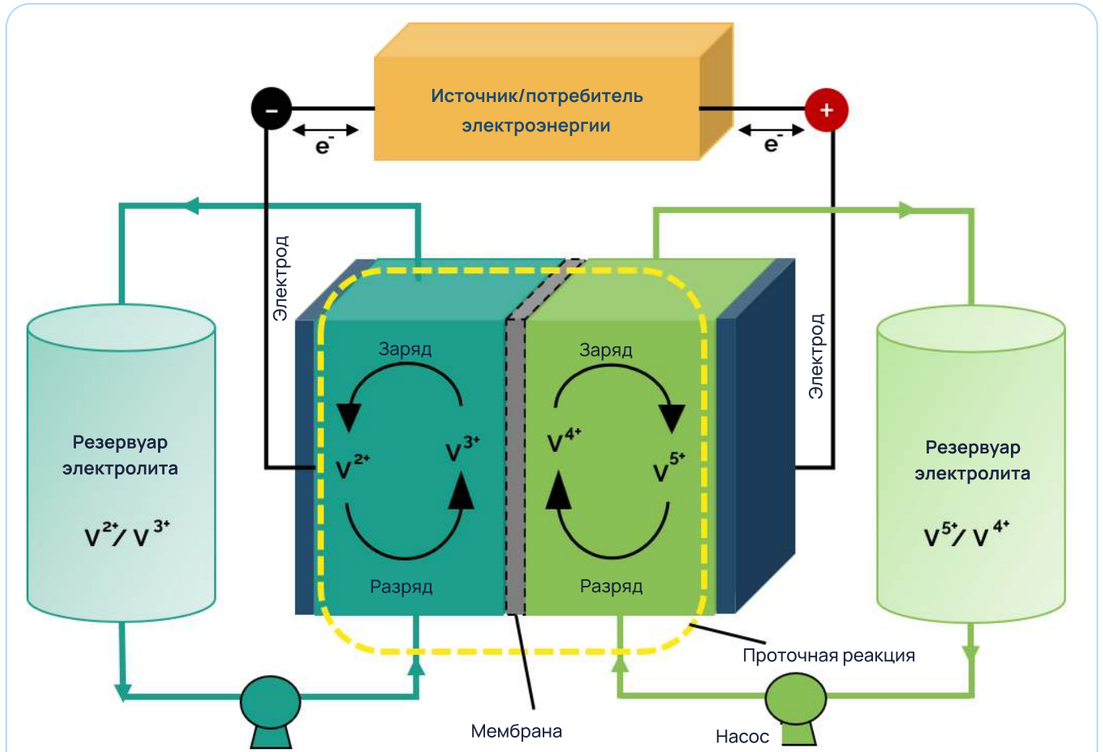
К проточным относятся ванадиевые, железо-хромовые, железные и цинк-бромные аккумуляторы, а также системы на основе органических электроактивных соединений. Названия отражают состав активных веществ, участвующих в реакциях заряда и разряда. Различия в составе и конструкции определяют напряжение ячейки, энергетическую плотность, рабочий температурный диапазон и ресурс, сохраняя общий принцип — циркуляцию электролита между резервуарами и электрохимическим блоком.

Рассмотрим принцип работы проточного накопителя на примере ванадиевой системы. В двух отдельных резервуарах находятся электролиты, содержащие ванадий в разной степени окисления. Насосы подают их в электрохимический блок, где растворы взаимодействуют с электродами, а затем возвращаются в резервуары. Мембрана между электродами препятствует смешению электролитов и обеспечивает перенос ионов для поддержания электрического баланса. Степень окисления схематично показывает химическое состояние ванадия: при отдаче электрона степень окисления повышается, при его принятии — снижается.

При заряде ванадий в отрицательном контуре переходит в состояние с более низкой степенью окисления (с +3 до +2), принимая электрон, а в положительном — с более высокой (с +4 до +5), отдавая его. Подведённая электроэнергия таким образом запасается в изменённом химическом состоянии электролитов. При разряде происходят обратные процессы. Электроны проходят через внешнюю цепь и питают нагрузку. Именно возможность многократно повторять эти взаимосвязанные превращения позволяет системе накапливать и возвращать энергию.

Для получения необходимого напряжения и мощности отдельные электрохимические ячейки объеди-

РИС. 16 **Принцип работы проточных накопителей**



Источник: АРВЭ

няют в блок — стек. Его характеристики определяются количеством и размерами ячеек, свойствами материалов и условиями подачи электролита. Энергоёмкость зависит прежде всего от объёма электролитов, концентрации активных веществ и допустимого диапазона их использования.

Это позволяет относительно независимо выбирать мощность и продолжительность разряда. Если накопитель должен дольше обеспечивать заданную нагрузку, можно увеличить запас электролита без пропорционального увеличения электрохимического блока. Для повышения мощности потребуется расширить возможности самого блока и обеспечить соответствующую циркуляцию.

Для стационарных СНЭ такая архитектура представляет интерес прежде всего при многочасовой выдаче энергии и регулярном циклировании. Накопитель может переносить выработку электростанции на другой период, поддерживать питание автономного энергокомплекса или обеспечивать продолжительную нагрузку. Возможность увеличивать запас электролита позволяет адаптировать продолжительность работы к этим задачам.

При выборе проточной СНЭ необходимо оценивать полный энергетический цикл — с учётом преобразователей, насосов и других собственных нужд. Существенными факторами будут также площадь размещения, рабочая температура, стоимость электролита и оборудования. Преимущество раздельного выбора мощности и энергоёмкости приобретает практическое значение тогда, когда требуемая продолжительность разряда, интенсивность использования и условия площадки позволяют реализовать его на уровне всей системы.

3.7 Что дальше: перспективные направления накопления энергии

Развитие систем накопления энергии продолжается по нескольким направлениям. Наряду с совершенствованием существующих литий-ионных технологий научные центры и промышленность активно исследуют альтернативные подходы, которые могут обеспечить дополнительные преимущества: более высокую плотность энергии, упрощение производственных процессов, снижение зависимости от редких материалов или улучшение показателей безопасности. Среди наиболее перспективных направлений можно выделить несколько технологий, находящихся на разных стадиях готовности — от лабораторных прототипов до предсерийных образцов.

Твердотельные аккумуляторы заменяют жидкий органический электролит твёрдым: керамическим, полимерным или композитным. Это позволяет использовать литиевый металл вместо графита на аноде и поднять удельную энергию до 500 Вт·ч/кг — почти вдвое против современных ячеек. Отсутствие горючего электролита снижает риск теплового разгона, упрощённая конструкция уменьшает массу упаковки. Низкая ионная проводимость твёрдых электролитов при комнатной температуре, образование дендритов лития на границе «электрод — электролит», сложность создания плотного контакта между слоями и высокая стоимость материалов обуславливают более высокую стоимость таких аккумуляторов на фоне аналогов, использующих жидкий электролит. Главный спрос на такие накопители ожидается со стороны производителей электромобилей.

Металл-воздушные аккумуляторы используют кислород из окружающего воздуха в качестве активного материала катода, что радикально увеличивает удельную энергию: для литий-воздушной системы — до 3500 Вт·ч/кг, для цинк-воздушной — около 1300 Вт·ч/кг. В процессе разряда металлический анод окисляется, соединяясь с кислородом; при заряде происходит обратная реакция. На практике эти системы сталкиваются с фундаментальными трудностями: образование нерастворимых продуктов реакции блокирует катод, побочные процессы с участием воды и углекислого газа снижают обратимость, требуется катализатор для управления кислородными реакциями. Для стационарных СНЭ интерес представляют скорее цинк-воздушные схемы в сочетании с проточной архитектурой, где металлический анод периодически заменяется.

Среди других направлений стоит отметить **алюминий-ионные** и **магниевые аккумуляторы**. Перспективные системы обещают существенный выигрыш в одной или нескольких характеристиках, но ни одна из них не готова заменить существующие электрохимические решения в ближайшие пять лет.

3.8 Сравнение решений для хранения электроэнергии: почему сейчас выбирают литий-ионные технологии

Все рассмотренные в предыдущих разделах технологии накопления энергии — механические, тепловые, химические, магнитные, электрические и электрохимические — обладают различными техническими характеристиками, определяющими их применимость в тех или иных условиях. Удельная энергия, мощность, КПД цикла, срок службы, время отклика, температурный диапазон работы, масштабируемость и стоимость у разных систем могут различаться на порядки. Для комплексной оценки и выявления наиболее универсальных решений полезно сопоставить упомянутые технологии по единому набору критериев.

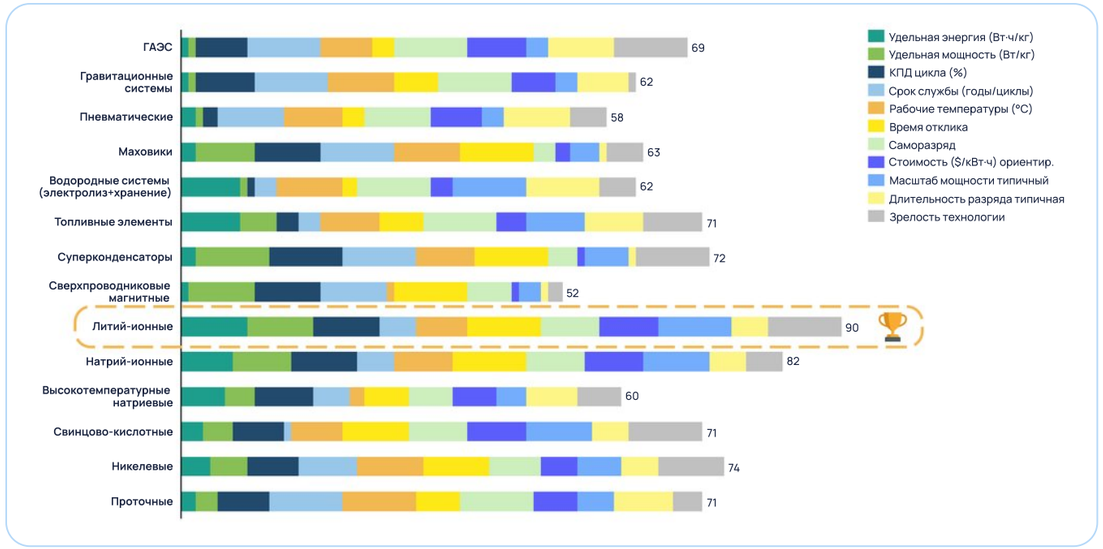
Для сопоставления технологий накопления энергии использована балльная оценка по одиннадцати критериям: КПД полного цикла, срок службы (в годах и циклах), удельная стоимость запасаемой энергии, время отклика, удельная энергия, удельная мощность, саморазряд, допустимый диапазон рабочих температур, масштабируемость, технологическая зрелость и характерная продолжительность разряда. По каждому критерию технологии оценивались по шкале от 1 до 10, причём оценка носит относительный характер: 10 баллов получала технология с наилучшим показателем среди рассматриваемых, 1 балл — с наихудшим, остальные распределялись между ними пропорционально своим характеристикам. Так, по КПД максимальная оценка соответствует значениям выше 90 %, минимальная — 30–40 %; по стоимости — менее 100 и более 5000 долл./кВт·ч соответственно; по времени отклика — миллисекундам и часам; по температурному диапазону — работе от −40 до +60 °C без дополнительных систем и необходимости криогенного охлаждения или нагрева выше 250 °C. Масштабируемость оценивалась не по абсолютной мощности, а по ширине диапазона применения — от единиц киловатт до гигаватт; зрелость — от пилотных проектов до массового промышленного производства. Все критерии принимались равнозначными, итоговая оценка определялась суммой баллов при максимально возможном значении 110.

По результатам комплексной оценки литий-ионные аккумуляторы являются однозначным лидером. Литий-ионные батареи стали стандартом де-факто в трёх крупнейших сегментах накопления энергии: портативной электронике (смартфоны, ноутбуки, камеры), электротранспорте (электромобили, электробусы, электровелосипеды, электроинструмент) и стационарном сетевом хранении (выравнивание пиков нагрузки, интеграция возобновляемых источников, резервное питание).

Натрий-ионные аккумуляторы в ближайшие годы могут стать серьёзным конкурентом литий-ионным. Они обладают близкими техническими характеристиками, при этом натрий-ионные системы имеют два стратегических преимущества: более низкую прогнозную стоимость благодаря доступности сырья и лучшую работу при отрицательных температурах. Сегодня они ещё уступают литий-ионным по степени коммерциализации: серийное производство начато лишь несколько лет назад, совокупная установленная мощность измеряется десятками МВт, а не сотнями ГВт, как у литиевых систем. Однако по мере масштабирования производства натрий-ионные батареи способны занять значительную долю рынка СНЭ.

Если рассматривать технологии накопления исключительно с точки зрения стационарного сетевого применения, на первый план выходит другой критерий выбора — соотношение мощности установки и длительности разряда. Эти два параметра определяют экономическую нишу каждой технологии: одни оптимальны для кратковременных, но мощных импульсов, другие — для многочасового или многодневного хранения больших объёмов энергии.

РИС. 17 Сравнение накопителей энергии разного типа



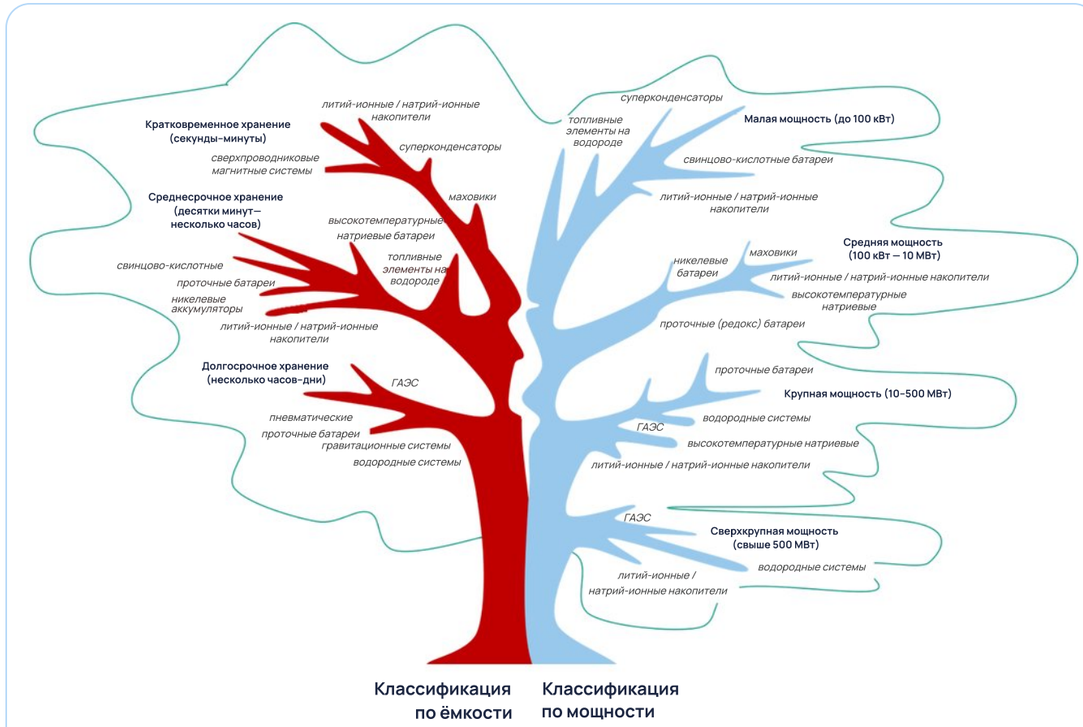
Источник: АРВЭ

Литий-ионные и натрий-ионные батареи выделяются среди технологий накопления энергии уникальной способностью эффективно масштабироваться на различные объёмы мощности — от домашних систем в несколько киловатт до сетевых установок в гигаватты. Эта универсальность по масштабу в сочетании с универсальностью по длительности (от секунд до часов) объясняет доминирующее положение литий-ионных технологий на современном рынке.

Однако это не означает, что литий-ионные батареи оптимальны для всех задач. При кратковременном регулировании суперконденсаторы и маховики обеспечивают лучшие показатели по циклическому ресурсу и времени отклика. При долгосрочном хранении (свыше 6 часов) проточные батареи, ГАЭС и высокотемпературные натриевые системы предлагают более низкую удельную стоимость энергии. При сезонном хранении водородные системы остаются единственной зрелой технологией, способной переносить энергию на недели и месяцы в масштабах энергосистемы.

При сезонном хранении водородные системы остаются единственной зрелой технологией, способной переносить энергию на недели и месяцы в масштабах энергосистемы.

РИС. 18 **Классификация технологий накопителей по мощности и ёмкости**



Источник: АРВЭ

При комплексном сопоставлении всех технологий накопления энергии по совокупности технических, экономических и практических критериев литий-ионные аккумуляторы занимают лидирующее положение благодаря оптимальному сочетанию характеристик и отсутствию критических ограничений. Высокий КПД цикла (85–95%), мгновенный отклик, приемлемый срок службы (3 000–10 000 циклов, 10–20 лет), широкий температурный диапазон работы, неограниченная масштабируемость (от ватт до гигаватт), максимальная зрелость технологии и продолжающееся снижение стоимости делают их универсальным решением для большинства задач накопления энергии.

ЛИТИЙ-ИОННЫЕ СНЭ

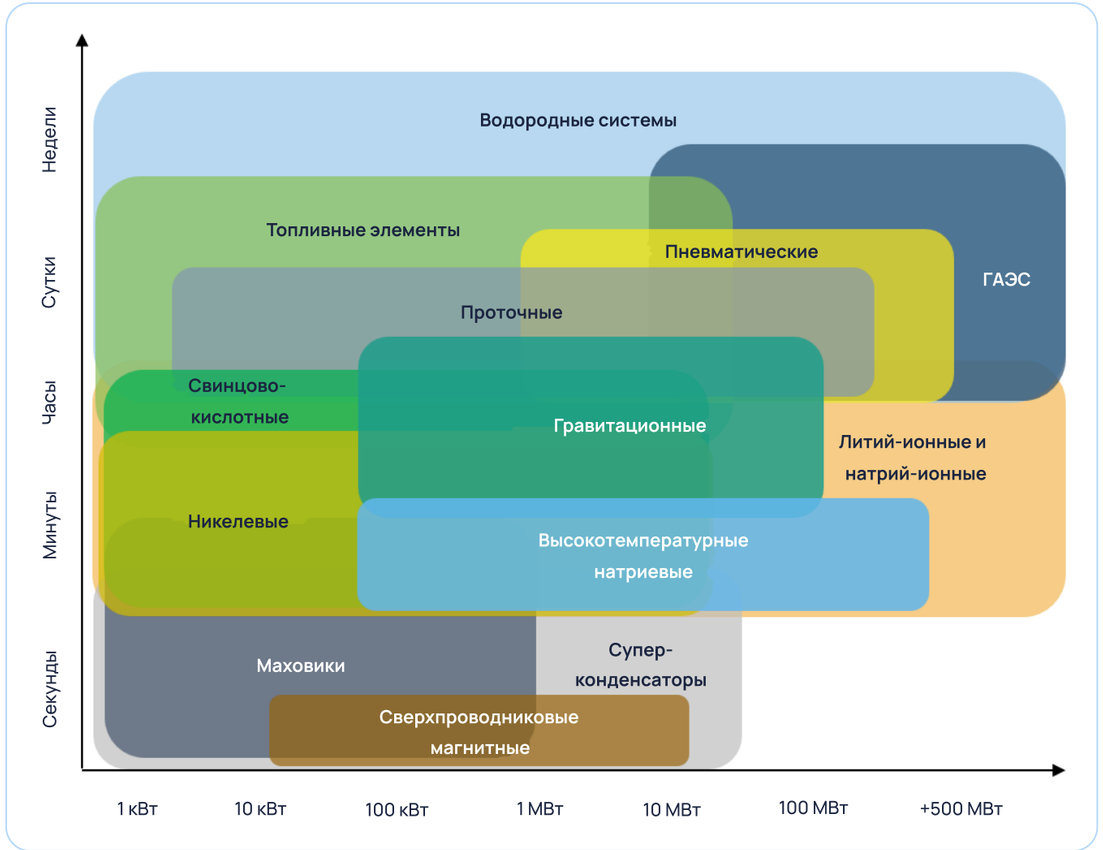
85–95 % КПД цикла

3 000–10 000 циклов ресурс

10–20 лет срок службы

Именно широкое развитие производства и непрерывное улучшение характеристик литий-ионных батарей в последние два десятилетия сделали их ключевой технологией энергетического перехода. Установленная мощность литий-ионных СНЭ в мире измеряется сотнями гигаватт и продолжает расти высокими темпами. Стоимость литий-ионных ячеек значительно снизилась в последние годы, что открыло возможности для массового применения в сетевом хранении. Дальнейшее развитие технологии закрепляет позицию электрохимических накопителей как основы современных систем хранения энергии.

РИС. 19 **Применение разных видов накопителей в зависимости от их мощности и времени разряда накопленной энергии**



Источник: АРВЭ

04

ОТ ЯЧЕЙКИ ДО ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Как устроена литий-ионная СНЭ

Сравнение различных технологий накопления энергии показывает, что литий-ионные аккумуляторы остаются наиболее эффективным техническим и экономическим решением для широкого круга задач стационарного хранения электроэнергии.

В этой главе:

4.1 Батарейная подсистема
4.2 Силовая часть
4.3 Управление и обмен данными
4.4 Эксплуатация и безопасность литий-ионных СНЭ
4.5 СНЭ в составе энергетического комплекса
4.6 От устройства к внедрению

Рассмотрим последовательно устройство литий-ионной сетевой СНЭ — от батарейной подсистемы до точки присоединения. Особое внимание уделим взаимодействию оборудования, обмену данными, безопасности и изменению характеристик в течение срока службы. Таким образом, проследим, как свойства отдельных компонентов определяют возможности, эксплуатационную надёжность и затраты на работу всей системы.

4.1 Батарейная подсистема: от ячейки до контейнера

Батарейная подсистема обеспечивает накопление и отдачу энергии. Её основой служит аккумуляторная ячейка — отдельный электрохимический элемент со своими выводами, напряжением, ёмкостью и допустимыми режимами заряда и разряда. Чтобы получить необходимые электрические характеристики и запас энергии сетевой СНЭ, ячейки объединяют в сборки.

При последовательном соединении одинаковых ячеек их напряжения складываются, а ёмкость в ампер-часах остаётся равной ёмкости одной ячейки. Через все элементы такой цепи проходит одинаковый ток. При параллельном соединении напряжение сохраняется, а ёмкости складываются; при согласованных характеристиках ячеек увеличивается и допустимый суммарный ток. Сочетание этих способов позволяет сформировать батарею с требуемым напряжением, ёмкостью и возможностями по току.

Ёмкость в ампер-часах характеризует количество электрического заряда, которое может отдать батарея, а энергоёмкость в киловатт-часах — запас энергии. Для приближённой оценки энергии аккумулятора номинальную ёмкость умножают на номинальное напряжение. Например, типичная для сетевых СНЭ ячейка LFP с напряжением 3,2 В и ёмкостью 314 А·ч запасает около 1 кВт·ч. Поэтому для установки энергоёмкостью в несколько мегаватт-часов требуются тысячи таких ячеек. Фактически отдаваемая энергия зависит от состояния батареи, температуры, режима разряда и допустимого диапазона заряда.

≈1 кВт·ч

запасает типичная для сетевых СНЭ ячейка LFP: 3,2 В × 314 А·ч

Первым конструктивным уровнем объединения ячеек обычно становится батарейный модуль. В нём ячейки закреплены в общей механической конструкции и соединены электрически. Здесь же располагаются датчики, элементы контроля и предусмотренные конструкцией средства отвода тепла. Модуль упрощает изготовление, монтаж и обслуживание батареи.

Модули размещают в батарейных стойках и соединяют в электрические цепочки — батарейные ветви, или стринги. Последовательное соединение модулей позволяет получить напряжение в рабочем диапазоне преобразователя мощности. При этом стойка обозначает конструкцию для размещения оборудования, а стринг — электрическую цепочку; их границы не обязательно совпадают.

Несколько ветвей формируют общий запас энергии установки. Они могут подключаться к общей шине постоянного тока либо работать через отдельные каналы преобразования. Схема подключения определяет распределение нагрузки и возможности независимого управления ветвями. Поэтому наращивание батарейной подсистемы требует согласования с характеристиками преобразователей, электрических соединений и вспомогательных систем.

Батарейное оборудование размещают в шкафах, контейнерах или специально подготовленных помещениях. Контейнерное исполнение позволяет объединить батареи, управление, охлаждение и средства защиты в заводской сборке. Современный 20-футовый батарейный контейнер вмещает около 5 МВт·ч и более. Номинальная энергоёмкость и мощность контейнерного блока СНЭ определяются составом и характеристиками установленных компонентов.

≈5 МВт·ч

и более вмещает современный 20-футовый батарейный контейнер

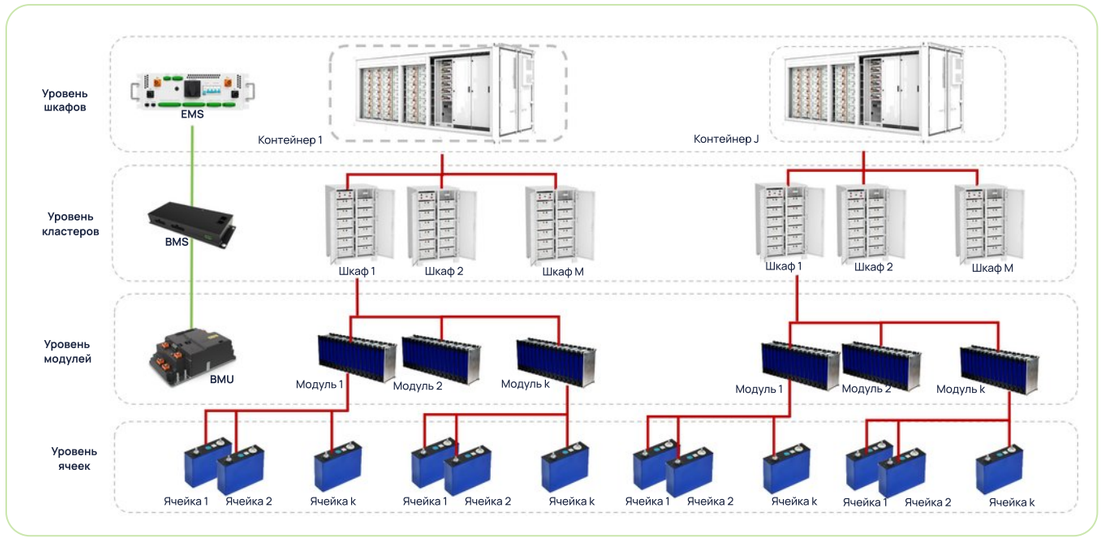
Батарейная подсистема формирует запас энергии и параметры цепей постоянного тока. Обмен электроэнергией с сетью обеспечивает силовая часть СНЭ, устройство которой рассматривается далее.

4.2 Силовая часть: преобразование энергии и подключение к сети

Батарея запасает энергию в виде постоянного тока, а энергосистема работает на переменном токе частотой 50/60 Гц. Поэтому между ними нужен посредник, без которого накопитель не может ни зарядиться из сети, ни вернуть в неё энергию. Эту роль выполняет силовой преобразователь — PCS (*Power Conversion System*). При разряде он преобразует постоянный ток батареи в переменный и передаёт энергию в сеть. При заряде поток меняет направление: PCS получает энергию из сети и заряжает батарею постоянным током. Один комплекс силового оборудования обслуживает оба режима, поэтому его называют двунаправленным.

Основу PCS составляют силовые полупроводниковые ключи. Они переключаются тысячи раз в секунду и формируют на выходе ток нужной формы, а фильтры сглаживают высокочастотные составляющие этих переключений. При работе с сетью преобразователь непрерывно отслеживает её напряжение и ча-

РИС. 20 **Принципиальная схема аккумуляторного блока — «от ячейки к контейнеру»**



Источник: АРВЭ

стоту и задаёт ток так, чтобы получить требуемые направление и величину мощности. На стороне батареи он учитывает, что её напряжение меняется по мере заряда и разряда. В части конструкций для согласования батареи с преобразователем добавляют промежуточную ступень преобразования постоянного напряжения — DC/DC.

Мощность и энергоёмкость задают разными узлами СНЭ. Мощность PCS определяет, как быстро накопитель принимает и отдаёт энергию, а энергоёмкость батареи — как долго он может поддерживать этот режим. Установка мощностью 1 МВт с полезной энергоёмкостью 4 МВт·ч обеспечивает номинальную выдачу около четырёх часов. Если удвоить батарею при том же PCS, время работы вырастет примерно до восьми часов, а мощность останется прежней. Чтобы поднять мощность, одного более мощного преобразователя недостаточно: допустимые токи батареи, кабели и защита тоже должны быть рассчитаны на возросшую нагрузку.

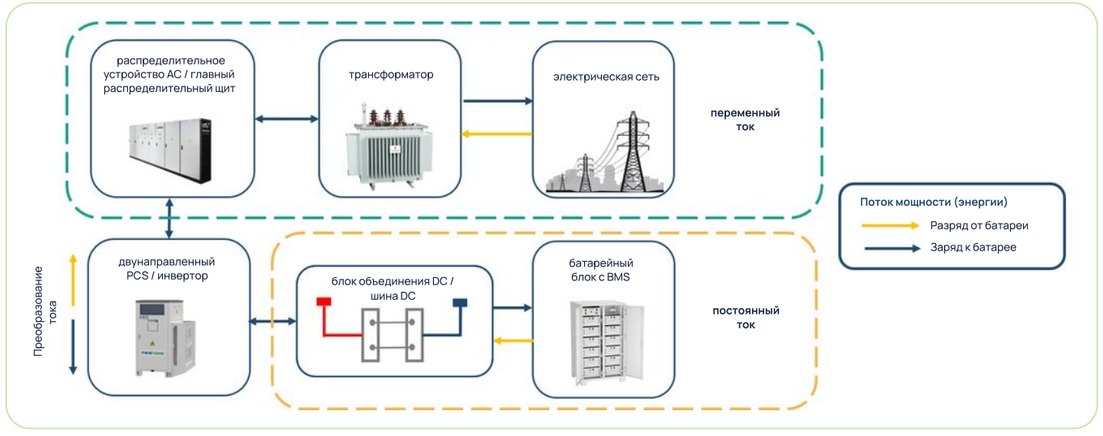
Кроме активной мощности, связанной с зарядом и разрядом, PCS может выдавать или потреблять реактивную мощность и тем самым участвовать в поддержании напряжения сети. Обе составляющие нагружают одно и то же оборудование. Например, при одновременной выдаче реактивной мощности преобразователь на 1 МВА отдаёт в сеть меньше 1 МВт активной мощности. Насколько оборудование способно совмещать эти режимы, учитывают при выборе PCS.

Компоновка силовой части бывает двух основных видов. В централизованной схеме один крупный преобразователь обслуживает несколько батарейных ветвей, объединённых на общей шине постоянного тока. В распределённой схеме ветви или их группы получают собственные преобразователи меньшей мощности. Такое решение позволяет управлять нагрузкой ветвей раздельно и компенсировать различия между ними. Кроме того, отказ одного блока выводит из работы лишь часть установки. Преобразователи размещают в отдельных шкафах или встраивают в батарейные контейнеры. От компоновки зависят длина электрических соединений, порядок обслуживания и надёжность установки в целом.

Напряжение на выходе PCS обычно составляет менее 1 кВ, а сетевые СНЭ присоединяются к распределительным сетям 6–35 кВ или к сетям 110 кВ и выше. Поэтому следующим звеном цепи становится повышающий трансформатор. Он работает в обоих направлениях: при разряде передаёт энергию от преобразователя к сети, при заряде — обратно. Один трансформатор может обслуживать отдельный преобразователь или группу силовых блоков. Производители выпускают и комплектные станции заводской сборки, объединяющие преобразователи, трансформатор и распределительное оборудование. Для крупных объектов дополнительно сооружают собственную подстанцию с трансформатором на напряжение сети присоединения.

Все звенья — батареи, PCS, трансформаторы и сеть — связаны кабелями и шинами. Распределительное и коммутационное оборудование объединяет блоки, подключает их к общим цепям и отключает отдельные участки для обслуживания или при повреждении. Измерительные устройства и релейная защита контролируют электрические режимы. Таким образом, силовая часть СНЭ — это вся цепочка оборудования, через которую энергия проходит от батареи до сети.

РИС. 21 **Схема расположения основного силового оборудования СНЭ**



Источник: АРВЭ

На каждом звене этой цепочки часть энергии теряется в виде тепла, а вспомогательное оборудование потребляет электроэнергию на собственные нужды. Поэтому мощность на выводах батареи, на выходе PCS и в точке присоединения к сети различаются. Кроме того, кратковременная мощность установки может быть выше длительной, а возможности заряда и разряда — неодинаковыми. Для практического применения важны характеристики объекта в целом, то есть измеренные в точке присоединения, где учитывается фактический обмен электроэнергией с сетью. Поэтому любой заявленный показатель СНЭ — мощность, полезная энергоёмкость или КПД — имеет смысл только с указанием, где и при каких условиях он измерен.

Силовое оборудование создаёт физический путь для энергии. Но направление и величину потока на этом пути, а также пределы, за которые нельзя выходить, задают системы управления. Их устройство и обмен данными между ними рассматриваются в следующем подразделе.

4.3 Управление и обмен данными: BMS, PCS, EMS и протоколы связи

В крупной СНЭ работают тысячи ячеек, десятки батарейных ветвей и несколько преобразователей. Всё это оборудование должно действовать как единая установка: точно выполнять задание диспетчера и при этом не выходить за безопасные пределы ни в одной ячейке. Поэтому управление строится по уровням, и каждый уровень работает в своём масштабе времени. Система управления батареей — BMS (Battery Management System) — следит за состоянием аккумуляторов. Контроллер PCS за доли секунды формирует нужный электрический режим. Система управления энергией — EMS (Energy Management System) — на интервалах от секунд до часов решает, когда и с какой мощностью накопителю заряжаться или разряжаться. Между уровнями непрерывно передаются измерения, команды, ограничения и аварийные сообщения.

BMS измеряет напряжение каждой ячейки, температуру в модулях и ток батарейных ветвей. По этим данным она оценивает степень заряженности — SOC (State of Charge), то есть сколько энергии осталось в батарее. Кроме того, она оценивает состояние батареи — SOH (State of Health), то есть насколько свойства батареи изменились по сравнению с новой. На основе этих оценок BMS рассчитывает допустимые токи заряда и разряда и передаёт их вышестоящим уровням. Если параметры выходят за опасные границы, BMS сама размыкает цепь соответствующей ветви, не дожидаясь команды извне.

В крупных установках BMS имеет собственную иерархию. Контроллеры модулей собирают измерения ячеек, контроллеры ветвей обобщают данные и управляют коммутацией, а верхний уровень формирует общую картину батарейной подсистемы. Число уровней и их названия зависят от производителя. К задачам BMS относится и балансировка — выравнивание заряженности ячеек. Она нужна потому, что последовательную цепочку ограничивает самая слабая ячейка: цепочка прекращает заряд, когда заполнена первая ячейка, и разряд, когда опустошена первая. Без балансировки часть ёмкости остальных ячеек остаётся неиспользованной.

Контроллер PCS отвечает за электрический режим. Он получает задание по мощности, измеряет токи и напряжения и управляет переключением полупроводниковых ключей. Именно здесь выполняются самые быстрые процессы регулирования: реакция на изменение напряжения и частоты сети занимает миллисекунды. При этом преобразователь соблюдает два набора ограничений — переданные BMS и свои собственные по току, напряжению, температуре и мощности.

EMS решает задачу установки в целом. Она учитывает назначение СНЭ, доступный запас энергии, состояние оборудования и ограничения в точке присоединения. В зависимости от применения EMS опирается на график нагрузки, прогноз выработки или команды диспетчера. В установке с несколькими силовыми блоками EMS распределяет общее задание между ними с учётом возможностей каждого.

Взаимодействие уровней хорошо видно на примере вечернего разряда. EMS задаёт выдачу 10 МВт, и контроллеры PCS выводят установку на этот режим. К концу разряда напряжение ячеек снижается, и BMS уменьшает допустимый ток. Преобразователи сразу ограничивают мощность, а EMS получает сведения о новых возможностях. Если задание по-прежнему нужно выполнить, EMS перераспределяет нагрузку между блоками. Если это невозможно, она сообщает диспетчеру, что располагаемая мощность снизилась. Так требуемый режим постоянно согласуется с фактически допустимым.

Для наблюдения за установкой и действий персонала служит SCADA — система диспетчерского управления и сбора данных. Она отображает состояние оборудования и измерения, сигнализирует об отклонениях, ведёт архив и позволяет оператору отдавать команды в пределах его полномочий. EMS и SCADA часто объединяют в одном программно-аппаратном комплексе: EMS координирует энергетический режим, SCADA обеспечивает наблюдение и связь с человеком.

КТО УПРАВЛЯЕТ СНЭ

BMS	система управления батареей
PCS	силовой преобразователь
EMS	система управления энергией
SCADA	диспетчерское управление и сбор данных

Обмен данными между всеми участниками идёт по протоколам связи — согласованным правилам формирования и передачи сообщений. Внутри батарейной подсистемы обычно применяют шину CAN и собственные интерфейсы производителя. Для связи контроллеров, преобразователей и измерительных устройств широко распространён Modbus. Для интеграции с системами автоматизации подстанций и диспетчерскими центрами применяют МЭК 60870-5-104 и стандарты семейства МЭК 61850. Конкретный набор протоколов определяется архитектурой объекта и требованиями сетевой компании и системного оператора.

Общий протокол ещё не гарантирует, что оборудование разных производителей «поймёт» друг друга. Устройства должны одинаково трактовать единицы измерения, масштаб чисел, знак мощности при заряде и разряде, коды команд и аварий. Поэтому при интеграции заранее согласуют перечень и формат передаваемых данных. Унифицировать эту работу помогают стандартизованные информационные модели, такие как SunSpec и модели МЭК 61850.

К каналам связи предъявляют требования по частоте обновления данных и по реакции на потерю связи. Особенно важна связь BMS и PCS: работать по устаревшим ограничениям батареи опасно. Поэтому при обрыве обмена заранее предусматривают безопасное действие, обычно прекращение передачи мощности и переход в режим ожидания. Поскольку СНЭ подключена к диспетчерским сетям, систему управления защищают и от несанкционированного доступа. Для этого применяют разделение сетей, контроль подключений и защищённые варианты протоколов.

Даже идеально согласованное управление не может выйти за пределы физических возможностей оборудования. А они во многом зависят от температуры: при перегреве или переохлаждении BMS сужает допустимые режимы. Как поддерживается тепловой режим, во что обходится это поддержание и как обеспечивается безопасность установки, рассматривается в следующем подразделе.

РИС. 22 **Уровни управления СНЭ и обмен данными между ними**

Участники обмена	Что передаётся	Масштаб времени	Примеры протоколов
Ячейки и модули → BMS	Напряжения ячеек, температуры	Доли секунды	CAN, интерфейсы производителя
BMS → PCS / EMS	SOC, SOH, допустимые токи заряда и разряда, аварии	Доли секунды — секунды	CAN, Modbus
EMS → PCS	Задание активной и реактивной мощности, режим работы	Секунды	Modbus TCP, МЭК 61850
EMS ↔ SCADA ↔ оператор	Измерения, состояния, команды, архив	Секунды — минуты	Modbus TCP, МЭК 61850
EMS / SCADA ↔ диспетчерский центр	Располагаемая мощность, команды диспетчера	Секунды — минуты	МЭК 60870-5-104, МЭК 61850

Источник: АРВЭ

4.4 Эксплуатация и безопасность литий-ионных СНЭ

Характеристики СНЭ определяются не только конструкцией, но и тем, как поддерживаются условия её работы, как предотвращаются аварии и как учитывается старение оборудования за многие годы эксплуатации.

Наиболее благоприятный для литий-ионных ячеек диапазон — примерно 15–35 °C. При более высокой температуре ускоряются побочные реакции в электродах и электролите, и батарея быстрее теряет ёмкость. При низкой температуре затрудняется движение ионов: снижается доступная мощность, а заряд на морозе может повредить ячейки. Важна и равномерность: если одни ячейки работают теплее других, они стареют быстрее, а вся цепочка ограничивается самой слабой из них. Поэтому система терморегулирования должна не только поддерживать нужную температуру, но и выравнивать её по всей батарее.

Тепло выделяется в ячейках, соединениях и преобразователях, и его отводят воздухом или жидкостью. При воздушном охлаждении вентиляторы прогоняют воздух между модулями, а климатическая установка при необходимости его охлаждает. При жидкостном охлаждении тепло через охлаждающие пластины передаётся теплоносителю и выводится наружу через теплообменник или чиллер. Жидкостное охлаждение точнее выравнивает температуру: производители заявляют разброс между ячейками в несколько градусов. Поэтому оно стало основным решением для современных контейнеров высокой энергоёмкости, хотя требует насосов, трубопроводов и контроля герметичности.

Для российских условий не менее важен обогрев. При отрицательных температурах батарею прогревают перед выходом на режим — электрическими нагревателями или через тот же контур теплоносителя. Пока ячейки не прогреты, BMS ограничивает токи. Рабочий диапазон температур наружного воздуха для контейнера, который указывает производитель, следует отличать от температуры самих ячеек: первый показывает, при каких внешних условиях климатическая система ещё способна удерживать ячейки в допустимых пределах.

Охлаждение, обогрев, контроллеры, связь и освещение потребляют электроэнергию, в том числе, когда батарея простаивает. Эти собственные нужды зависят от климата и режима работы. Летом основную долю потребляет охлаждение, зимой — обогрев. При редком использовании накопителя их доля в энергобалансе заметно растёт. Поэтому, сравнивая КПД разных установок, нужно уточнять, учтены ли в нём собственные нужды и для каких условий он указан. Для комплектной СНЭ, измеренной в точке присоединения, КПД полного цикла обычно составляет порядка 85–90%, тогда как у отдельной ячейки он выше.

Безопасность СНЭ строится по уровням — от ячейки до площадки — и решает три задачи: не допустить опасный режим, вовремя обнаружить отклонение и не дать аварии распространиться. Первый рубеж — контроль напряжений, токов и температур. BMS ограничивает режимы и отключает ветви, предохранители и автоматические выключатели защищают цепи от сверхтоков, а контроль изоляции выявляет повреждения, опасные для оборудования и людей.

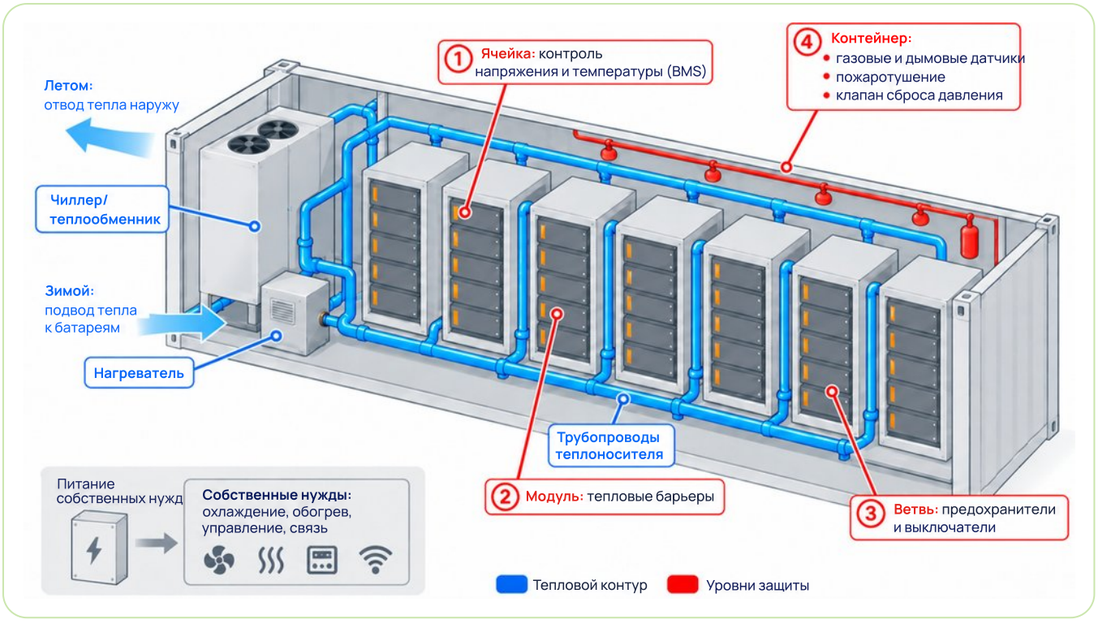
Главная опасность — тепловой разгон, самоускоряющийся рост температуры в ячейке. Когда процесс начался, отключение цепи его уже не остановит. Поэтому защита направлена прежде всего на то, чтобы не дать разгону перейти на соседние ячейки и модули. Газовые, дымовые и температурные датчики обнаруживают аварию на ранней стадии. Перегородки, тепловые барьеры и расстояния между блоками сдерживают распространение. Системы пожаротушения и охлаждения подбирают с учётом конструкции, а вентиляция и сброс давления снижают опасность накопления горючих газов. Выбор катодов LFP, которые разлагаются при более высокой температуре и выделяют меньше кислорода, сам по себе снижает вероятность и тяжесть аварий. Это одна из неочевидных причин, которая даёт преимущество LFP в исполнении стационарных сетевых СНЭ.

С годами батарея теряет ёмкость и её внутреннее сопротивление растёт. Различают календарное старение, идущее даже без работы, и циклическое, связанное с зарядом и разрядом. Скорость обоих процессов зависит от температуры, глубины и диапазона разряда и токовой нагрузки. Поэтому одинаковые батареи в разных условиях служат разный срок. Рост сопротивления увеличивает тепловыделение и ограничивает мощность, что замыкает связь между терморегулированием, безопасностью и долговечностью.

Ресурс накопителя в циклах, который заявляет производитель (для современных ячеек LFP — порядка 6 000–10 000 циклов), имеет смысл только вместе с условиями его определения. Это глубина разряда, температура, мощность и критерий окончания службы — обычно снижение ёмкости до 70–80% от исходной. Чтобы установка сохраняла заданную продолжительность работы весь срок службы, в проекте закладывают начальный запас ёмкости или последующее добавление батарей.

Эксплуатация СНЭ опирается на непрерывный мониторинг. Данные BMS, PCS и климатической системы позволяют замечать изменения до того, как они приведут к отказу. Плановое обслуживание включает проверку соединений, систем охлаждения и пожаротушения, фильтров, средств защиты и периодические контрольные измерения ёмкости. Неисправные

РИС. 23 **Внутренние системы, влияющие на собственные нужды и безопасность блока СНЭ**



Источник: АРВЭ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ

15–35 °C
наиболее благоприятный диапазон для литий-ионных ячеек

85–90 %
КПД полного цикла комплектной СНЭ в точке присоединения

6 000–10 000 циклов
ресурс современных ячеек LFP

модули или блоки заменяют, а программное обеспечение обновляют. По окончании срока службы батареи оценивают: пригодные модули могут использоваться в менее требовательных применениях, а остальные направляют на переработку для извлечения лития, меди, алюминия и других материалов.

Рассмотренные условия эксплуатации относятся к самостоятельной СНЭ с собственной силовой частью, системой управления и точкой присоединения. В составе энергетического комплекса батарейная подсистема сохраняется, а состав силового и управляющего оборудования определяется схемой объединения с генерирующим объектом или потребителем.

4.5 СНЭ в составе энергетического комплекса

Накопитель часто размещают рядом с другим объектом — электростанцией любого типа или потребителем — и объединяют с ним электрически и через управление. Тогда комплекс работает как одно целое, и состав оборудования меняется.

Изменения бывают трёх видов. Часть оборудования становится общей: накопитель и соседний объект используют одну подстанцию, одно распределительное устройство и одну точку присоединения. Часть добавляется: дополнительные преобразователи, коммутационные аппараты для перехода в автономный режим, контроллер верхнего уровня, объединяющий управление всем комплексом. Часть становится ненужной: например, при объединении с солнечной станцией на стороне постоянного тока накопителю не требуется собственный инвертор. Выбранная конфигурация определяет путь энергии, число её преобразований, общие ограничения по мощности и распределение функций управления. Следует рассмотреть последовательно основные сочетания СНЭ: с солнечной и ветровой генерацией, с традиционной генерацией, у потребителя и в автономном энергокомплексе.

При объединении по переменному току (AC-coupling) солнечная станция подключается к общим шинам через собственные инверторы, а накопитель — через свой двунаправленный PCS. По сравнению с самостоятельной СНЭ накопитель сохраняет собственный преобразователь, но использует общую с СЭС подстанцию и точку присоединения. С общих шин энергия СЭС может уходить во внешнюю сеть или на заряд батареи. В последнем случае она проходит двойное преобразование: инверторы СЭС превращают постоянный ток модулей в переменный, а PCS накопителя — обратно в постоянный. При разряде добавляется третье преобразование, и каждое из них уносит около 1–2% энергии. Зато оборудование СЭС и СНЭ выбирают независимо, накопитель может заряжаться и из сети, а к работающей станции его можно добавить без переделки её силовой части.

При объединении по постоянному току (DC-coupling) солнечные модули и батарея сходятся на общей шине постоянного тока до инвертора. Собственный PCS накопителя и его трансформатор становятся не нужны. Их заменяет двунаправленный DC/DC-преобразователь, согласующий напряжение батареи с шиной, а выдачу в сеть берёт на себя общий инвертор. Солнечная энергия попадает в батарею без промежуточного перевода в переменный ток, поэтому потерь меньше и силового оборудования требуется меньше. Есть и дополнительная возможность. Мощность солнечных модулей обычно выбирают на 10–20% больше мощности инверторов, и в часы максимальной выработки часть энергии приходится ограничивать. В этой схеме излишек можно направить в батарею и выдать позже. Обратная сторона — зависимость от общего инвертора: суммарная выдача СЭС и батареи не может превысить его мощность, а заряд из сети возможен, только если инвертор поддерживает работу в обратном направлении.

Универсального превосходства у какой-либо из схем нет: выбор определяют условия проекта. Если накопитель добавляют к существующей станции, обычно удобнее связь по переменному току. В новых проектах, где важно сократить потери и использовать ограничиваемую выработку, рассматривают связь по постоянному току.

Ветровые установки выдают энергию на переменном токе, поэтому накопитель может быть присоединён к шинам ветровой станции или её подстанции через собственный PCS. Схема аналогична связи СЭС по переменному току: накопитель сохраняет свой преобразователь, а общими становятся подстанция ВЭС и точка присоединения. Часть потока ветровой

станции может направляться на заряд батареи, а при разряде накопитель добавляет мощность на те же шины. Контроллер комплекса согласует задания ВЭС и СНЭ так, чтобы их суммарная выдача не превышала пропускную способность трансформаторов, линий и точки присоединения.

На тепловой или гидроэлектростанции накопитель присоединяют к распределительному устройству станции через собственный PCS и трансформатор. Общими становятся распределительное устройство и точка присоединения к сети. Главное, что добавляется, — интеграция с системой управления станцией. Накопитель должен получать задания согласованно с энергоблоками и учитывать работу их автоматики. В такой связке он берёт на себя быстрые изменения мощности, которые агрегатам с инерционными котлами, турбинами или гидроагрегатами даются тяжелее. Энергоблоки при этом работают в более ровном режиме.

На промышленном или коммерческом объекте PCS накопителя подключается к шинам внутренней сети. Общими становятся внутренняя сеть и ввод от внешней сети, а отдельная точка присоединения накопителю не нужна. При подключении на напряжении 0,4 кВ может отпасть необходимость и в повышающем трансформаторе. Добавляются измерения на вводе от внешней сети: по ним контроллер видит итоговый приём мощности объектом и управляет накопителем. Если СНЭ должна обеспечивать резервное питание, к этому добавляются коммутационный аппарат, отделяющий объект от внешней сети при аварии, и способность PCS работать в сетеобразующем режиме (grid-forming). Место подключения накопителя выбирают с учётом уровня напряжения, пропускной способности оборудования и состава потребителей, которых он должен обслуживать.

В изолированных энергорайонах внешней сети нет, и накопитель объединяют на общих шинах переменного тока с дизельными или газопоршневыми генераторами, а нередко и с СЭС или ВЭС. Добавляются два ключевых элемента: контроллер микросети и PCS, способный работать в сетеобразующем режиме (задаёт параметры сети, а не следует за ними). Контроллер решает, когда включать и останавливать генераторы, держит их в экономичном диапазоне загрузки и поручает батарее покрывать колебания нагрузки и выработки. При этом учитываются минимально допустимая загрузка агрегатов, скорость изменения их мощности и запас энергии в батарее. Поскольку накопитель берёт на себя пиковые нагрузки, часть генераторов может работать реже или вовсе не потребоваться.

Во всех комбинациях работу комплекса связывает контроллер верхнего уровня или EMS. Он получает данные о генерации, потреблении, зарядке батареи и доступной мощности оборудования и распределяет задания. Локальные контроллеры инверторов, PCS и генераторов выполняют их в пределах собственных ограничений. Управлять приходится сразу в двух масштабах времени. Сейчас нужно соблюдать баланс мощности, а на будущее нужно сохранить запас энергии: если батарея заполнена, избыток придётся отдать в сеть или ограничить, а если она пуста, нагрузку должны покрыть другие источники.

Таким образом, в каждой комбинации накопитель сохраняет батарейную подсистему и систему управления батареей, а остальной состав оборудования подстраивается под соседний объект. Схема подключения и принципы управления определяют, что комплекс способен сделать технически. Что из этого определяет переход от устройства к реальному применению, подытоживается в завершающем подразделе.

РИС. 24 **Варианты состава оборудования при различных комбинациях строительства СНЭ**



Источник: АРВЭ

4.6 От устройства к внедрению: что определяет применение СНЭ

Возможности сетевой СНЭ формируются на нескольких уровнях. Батарейная подсистема определяет запас энергии, силовая часть — мощность и условия обмена энергией с сетью. Система управления согласует требуемый режим с фактически допустимым, а терморегулирование и средства защиты обеспечивают сохранение характеристик и безопасность в течение срока службы. Схема объединения с генерирующим объектом или потребителем определяет, какие из этих возможностей доступны в составе комплекса. Итоговые характеристики — мощность, полезная энергоёмкость, быстродействие, КПД и ресурс — относятся к установке в целом и определяются в точке присоединения при заданных условиях.

Эти характеристики взаимосвязаны, и их оптимальное сочетание не может быть определено вне конкретной задачи. Для регулирования частоты определяющими являются быстродействие и способность выдерживать частые изменения направления мощности, тогда как запас энергии может быть относительно небольшим. Для переноса выработки на другое время суток, напротив, решающее значе-

ние имеют полезная энергоёмкость и продолжительность разряда. Режим использования влияет и на ресурс: интенсивное циклирование и работа в широком диапазоне заряда ускоряют старение батареи. Требования к сетеобразующей способности и схеме подключения также задаются назначением объекта. Поэтому выбор технического решения начинается с определения задачи: требуемой мощности и продолжительности работы, частоты циклов, времени отклика и места размещения накопителя.

Так, на горизонте до 2030 года литий-ионные аккумуляторы сохранят своё лидерство по стоимостным показателям в сегменте внутрисуточного регулирования. При этом в сегменте хранения продолжительностью несколько суток на сегодняшний день наиболее эффективны крупные объекты, функционирующие на основе сжатого воздуха, а также ГАЭС. Для обеспечения межсезонного хранения энергии водородные технологии на сегодня практически безальтернативны.

РИС. 25 **Сравнение прогнозных удельных капитальных затрат на строительство СНЭ различных типов**

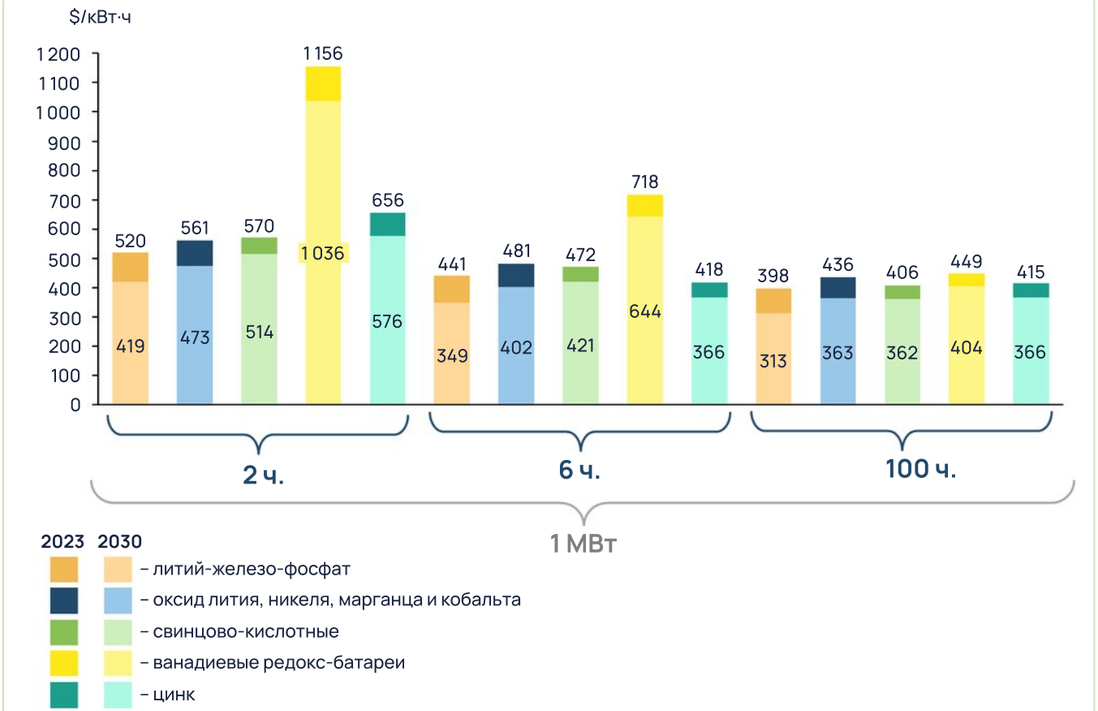
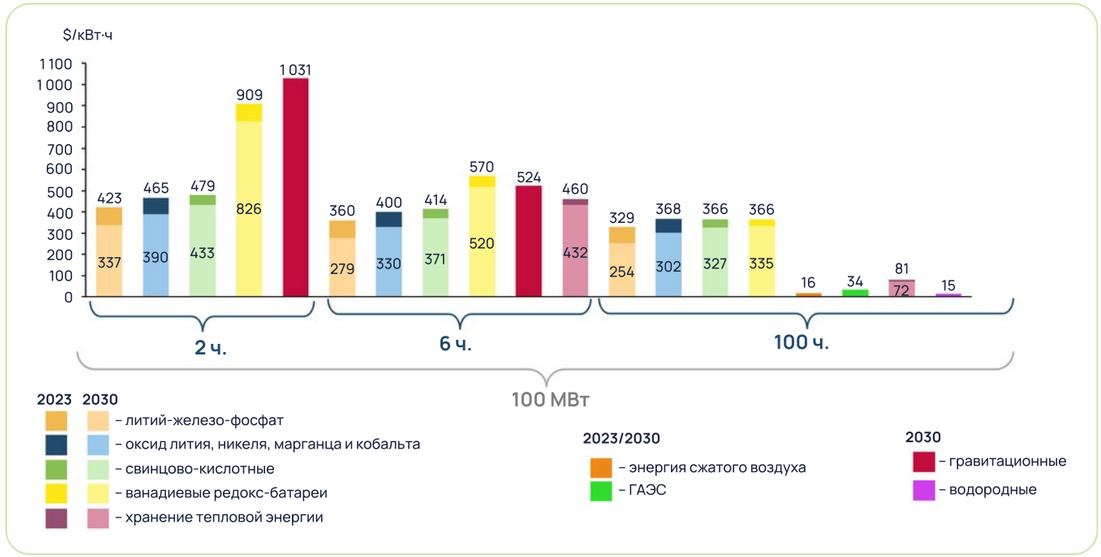


РИС. 25 окончание



Источник: US Department of Energy

Задачи СНЭ определяются её местом в энергосистеме. Каждому из направлений соответствует собственный набор требований к оборудованию, режиму работы и условиям присоединения. Поэтому полноценное использование возможностей СНЭ требует её интеграции в единую энергосистему одновременно со стороны генерации, сетей, системного управления и потребления.

ЧАСТЬ II

ЭКОНОМИКА ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СНЭ



01 **От спроса к масштабу**
Обзор мирового рынка СНЭ — 49

02 **Оценка стоимости проектов СНЭ в России** — 56

03 **Перспективы развития рынка СНЭ в России** — 58

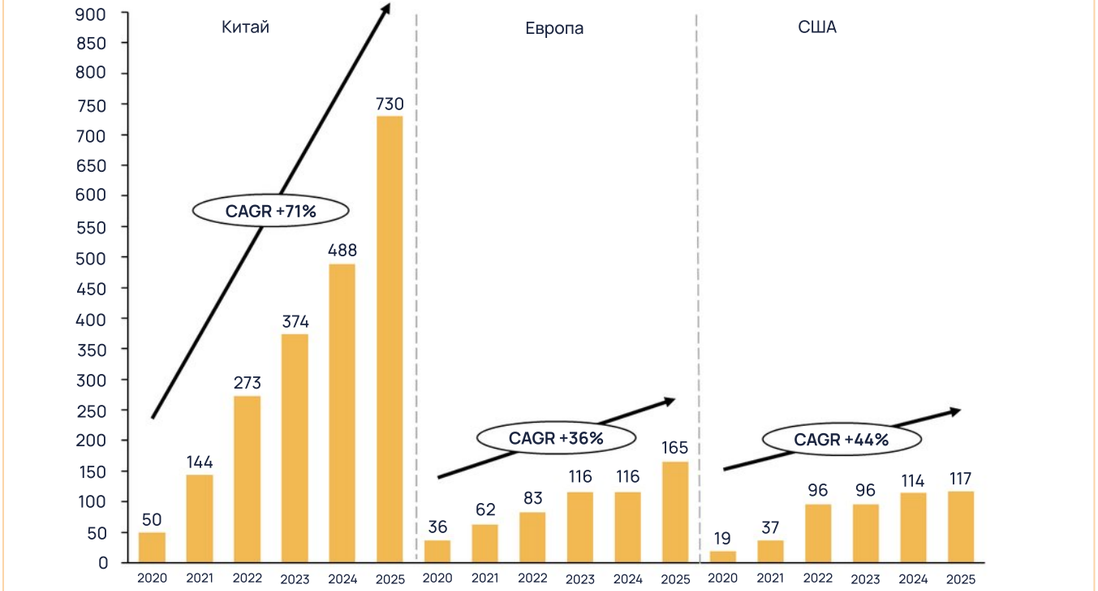
01 ОТ СПРОСА К МАСШТАБУ

Обзор мирового рынка СНЭ

Мировой рынок систем накопления энергии находится в фазе стремительного роста. В течение последних пяти лет объём ежегодно вводимых проектов СНЭ в электроэнергетике удваивается. В основе этого тренда лежит не только повышение потребности энергосистем в гибкости, но и радикальное изменение экономики самой технологии.

Развитие электротранспорта обеспечило кратное расширение производственной базы, ускорило технологическое совершенствование батарей и сформировало выраженный эффект масштаба (рис. 26).

РИС. 26 **Динамика спроса на аккумуляторные батареи со стороны электротранспорта**

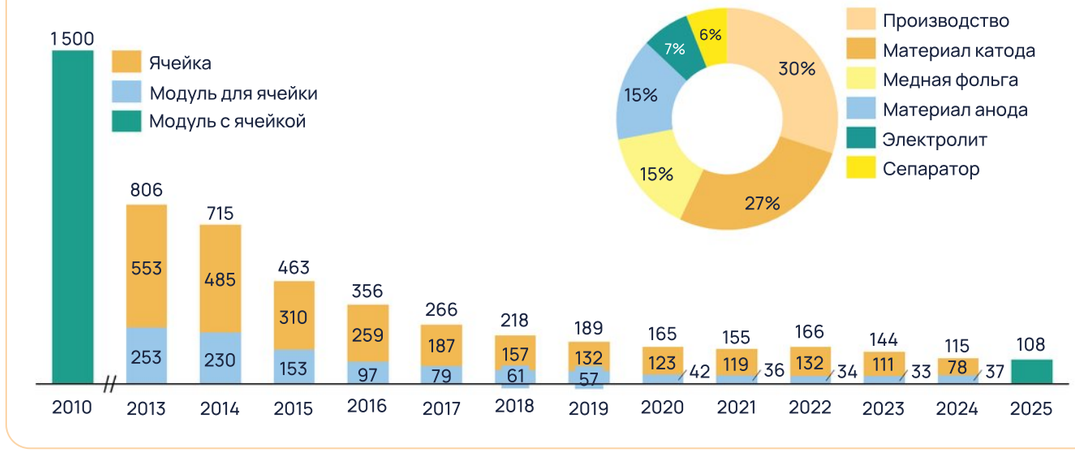


Источник: МЭА

Результатом стало снижение стоимости модулей аккумуляторных батарей в 14 раз с максимумов начала прошлого десятилетия (рис. 27).

в 14 раз
снизилась стоимость модулей аккумуляторных батарей с максимумов начала прошлого десятилетия

РИС. 27 **Динамика среднемировой цены аккумуляторных ячеек и модулей, а также структура её текущей себестоимости, $/кВт·ч**



Источник: BNEF, Frost & Sullivan

С учётом данных тенденций изменилась и отраслевая структура спроса на аккумуляторные батареи. На сегодня электротранспорт и электроэнергетика формируют порядка 95% спроса на аккумуляторные ячейки.

≈95 %
спроса на аккумуляторные ячейки формируют электротранспорт и электроэнергетика

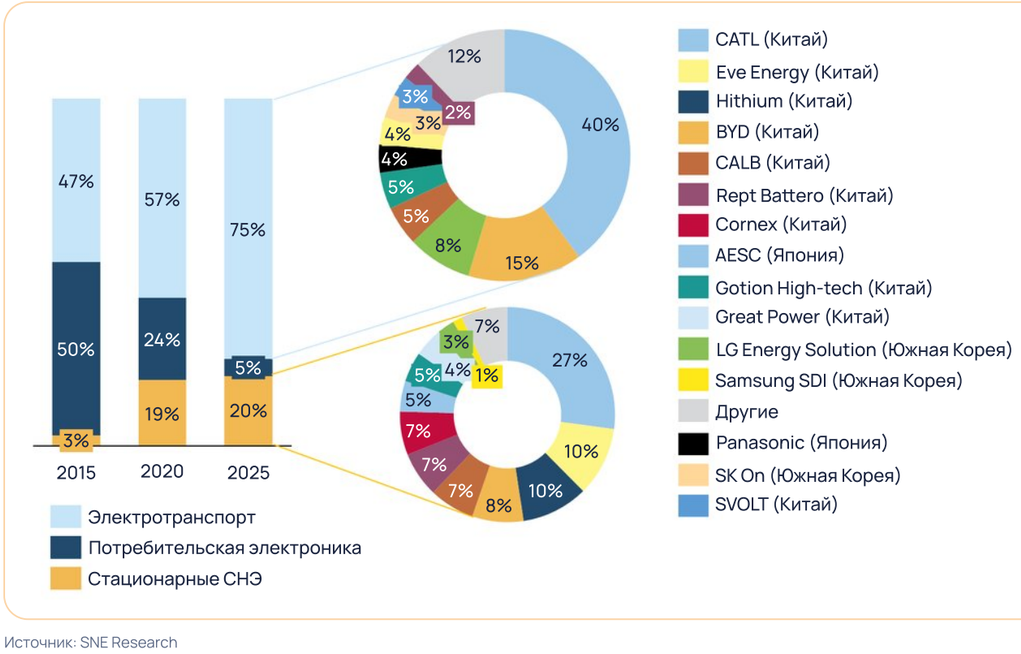
Становится всё более выраженной и специализация ключевых игроков мирового рынка производителей батарей (рис. 28).

Сегмент применения литий-ионных СНЭ в электроэнергетике демонстрирует наибольшую динамику развития: на фоне почти десятикратного снижения удельных капитальных затрат за последнее десятилетие объём ежегодных вводов ёмкости растёт с CAGR порядка 100% (рис. 29).

Впечатляющая динамика снижения стоимости проектов СНЭ связана не только с удешевлением литий-ионных ячеек, но и со стандартизацией и масштабированием производства непосредственно СНЭ, снижением стоимости силовой электроники, а также ростом единичного масштаба проектов.

Как итог — среднемировой удельный CAPEX строительства СНЭ в 2025 году, по оценке IRENA, снизился

РИС. 28 **Отраслевая структура спроса на аккумуляторные батареи и специализация основных игроков мирового рынка производителей ячеек**



Источник: SNE Research

до 140 долл./кВт·ч. Аккумуляторные ячейки при этом остаются важным драйвером снижения стоимости: по данным BloombergNEF, в 2025 году средняя стоимость литий-ионных батарей уменьшилась примерно на 8%, или на 10 долл./кВт·ч.

СТОИМОСТЬ И ТЕМПЫ

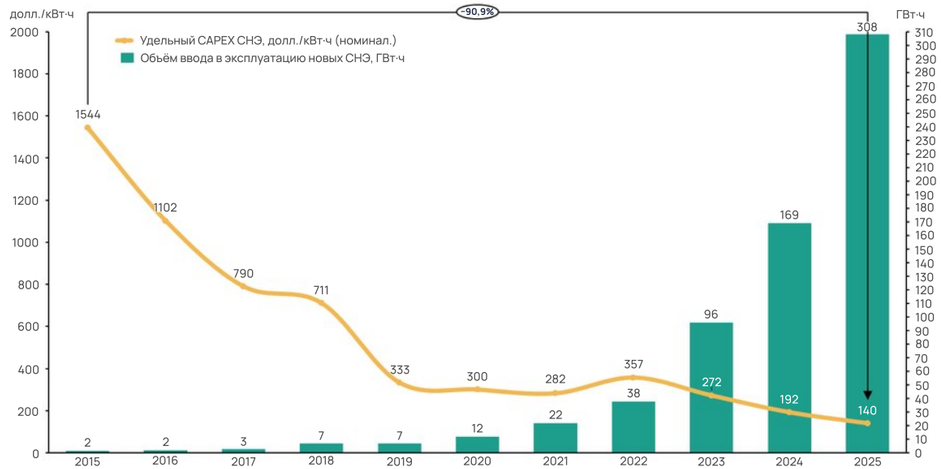
140 долл./кВт·ч
среднемировой удельный CAPEX СНЭ в 2025 году, IRENA

≈8 %
снижение средней стоимости литий-ионных батарей в 2025 году, BloombergNEF

≈100 %
CAGR ежегодных вводов ёмкости СНЭ в электроэнергетике

Сочетание снижающегося CAPEX, высокой модульности и короткого инвестиционного цикла — строительство крупного электрохимического накопителя может занимать менее года — существенно расширило область экономически эффективного применения СНЭ. В ряде энергосистем накопители уже конкурируют с традиционной пиковой генерацией и становятся полноценным ресурсом покрытия пикового спроса, регулирования мощности и управления внутрисуточными дисбалансами. В результате совокуп-

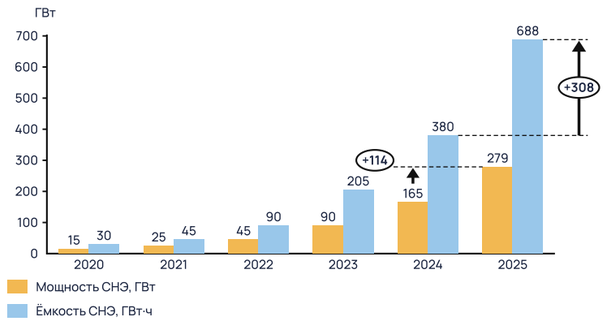
РИС. 29 **Динамика ёмкости вводимых СНЭ на фоне снижения удельного CAPEX**



Источник: IRENA

ная мощность и ёмкость электрохимических СНЭ, применяемых в электроэнергетике, по данным CNESA, в 2025 году достигла соответственно 279 ГВт и 688 ГВт·ч, что соответствует средней длительности непрерывной разгрузки порядка 2,5 ч (рис. 30). Стоит отметить, что около 20% из указанного объёма, по данным IRENA, размещается на стороне потребителя, то есть «за счётчиком».

РИС. 30 **Динамика объёма мощности и ёмкости электрохимических накопителей в мире по годам (нарастающим итогом), по данным CNESA**



Источник: CNESA

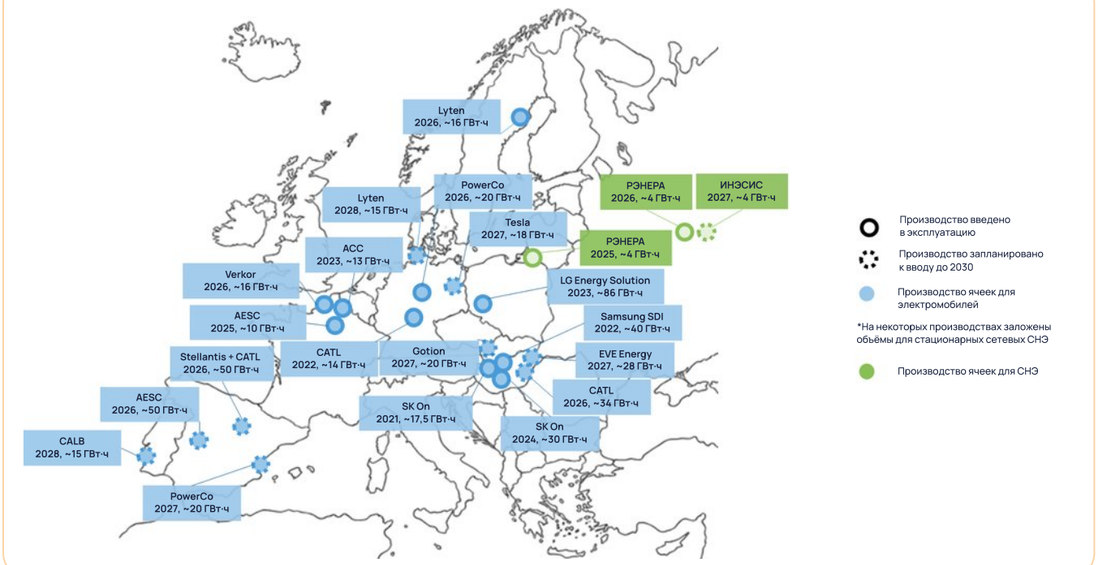
При этом мировой рынок остаётся неоднородным. Сегодня Китай удерживает порядка 80% от 2,1–2,3 ТВт·ч совокупного мирового производства аккумуляторных батарей. Несмотря на очевидное технологическое лидерство Китая в области производства аккумуляторов, а также относительно низкую загрузку мощностей по их производству (на уровне около 50%), в развитых странах осуществляется масштабное развёртывание новых мощностей по производству СНЭ.

Так, в США на текущий момент уже введены в эксплуатацию гигафабрики совокупной мощностью свыше 325 ГВт·ч в год. При этом до конца следующего года указанная цифра увеличится более чем вдвое и превысит 665 ГВт·ч. Медианная мощность новых гигафабрик в США составляет 27 ГВт·ч.

В странах Евросоюза наблюдаются схожие тенденции: ожидается рост мощности гигафабрик с 257 до 507 ГВт·ч в год при медианной мощности новых объектов порядка 20 ГВт·ч.

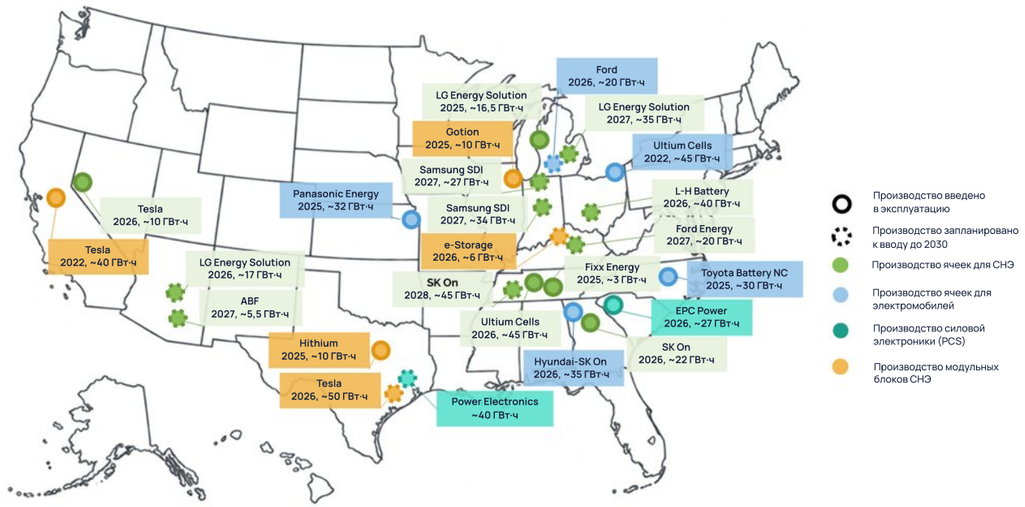
В России тем временем введены в эксплуатацию 2 гигафабрики мощностью по 4 ГВт·ч и запланировано строительство ещё по меньшей мере одной, аналогичной мощности. Тем самым отечественная отрасль производства электрохимических аккумуляторов отстаёт от ЕС и США в 42 и 55 раз, соответственно, при соотношении размера экономик по паритету покупательной способности около 4:1.

РИС. 31 **Развёртывание мощностей по производству аккумуляторов в Европе, США и России**



Около 15–20% мирового производства литий-ионных ячеек востребовано в электроэнергетике для строительства СНЭ. При этом стоимость реализации проектов заметно различается между регионами: в Китае она на 43% ниже среднемирового уровня, тогда как в США и Европе — соответственно на 58%

РИС. 31 окончание



Источник: АРВЭ

и 74% выше. Однако различия в стоимости пока не меняют общего направления развития: объёмы строительства СНЭ быстро растут во всех крупнейших макрорегионах.

СТОИМОСТЬ ПРОЕКТОВ К СРЕДНЕМИРОВОЙ

−43 %
Китай

+58 %
США

+74 %
Европа

Таким образом, масштабирование рынка определяется взаимодействием двух групп факторов.

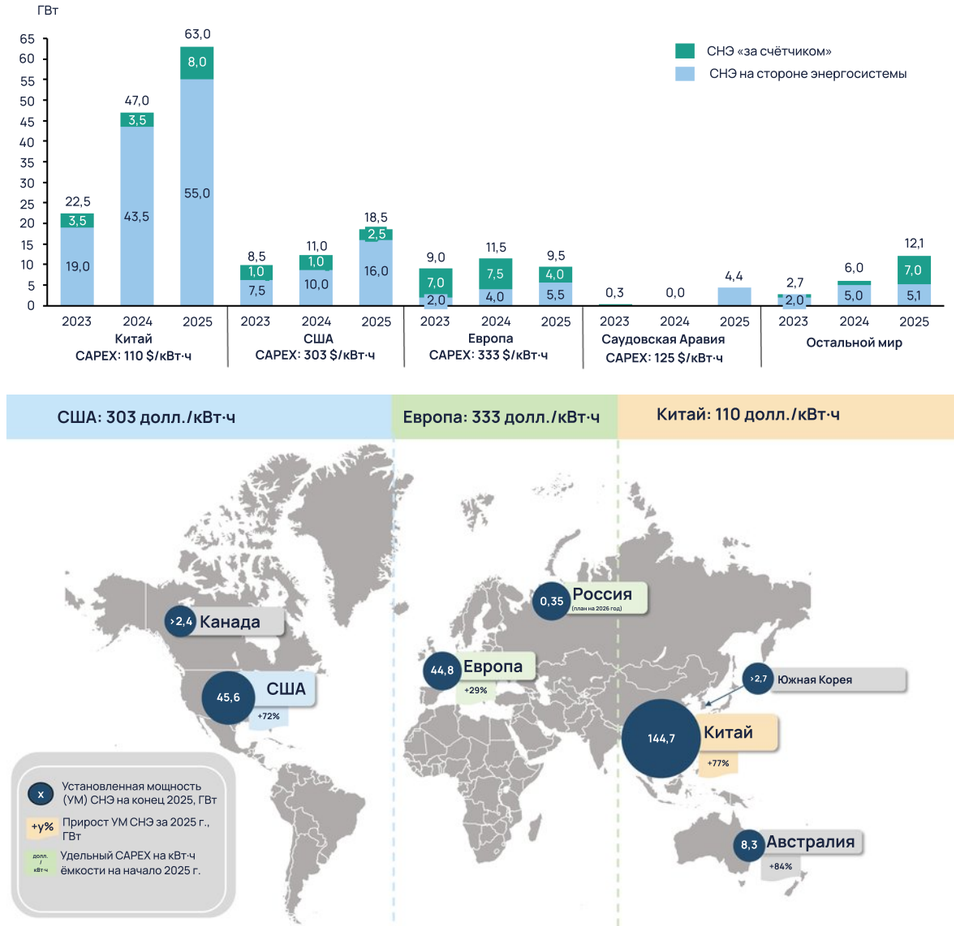
С одной стороны, растёт потребность энергосистем в накопителях. Её формируют увеличение доли ВИЭ, рост внутрисуточной волатильности цен, необходимость покрытия пиков нагрузки и развитие механизмов оплаты системных услуг.

Согласно актуализированному сценарию «1,5 °C» от IRENA, потребность в ресурсах гибкости, прежде всего СНЭ (включая ГАЭС), вырастет с 0,4 ТВт до 2,5 ТВт к 2035 году (в 6 раз) и до 6,9 ТВт к 2050 году (в 16,5 раз).

С другой стороны, повышается доступность самой технологии. Расширение аккумуляторного производства, технологические улучшения, стандартизация оборудования и усиление конкуренции последовательно снижают стоимость проектов и сокращают сроки их реализации.

Именно одновременное действие этих факторов переводит СНЭ из категории специализированного оборудования для отдельных задач в один из базовых элементов современных электроэнергетических систем.

РИС. 32 **Распределение совокупной мощности, динамики вводов и стоимости СНЭ, применяемых в электроэнергетике, по основным макрорегионам**



Источник: IRENA, CNESA, АРВЭ

02 ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ПРОЕКТОВ СНЭ В РОССИИ

Оценка структуры CAPEX крупных сетевых СНЭ в России с длительностью непрерывной работы в 6 часов составляет порядка 318 $/кВт·ч, что ниже референсных значений для Европы и США.

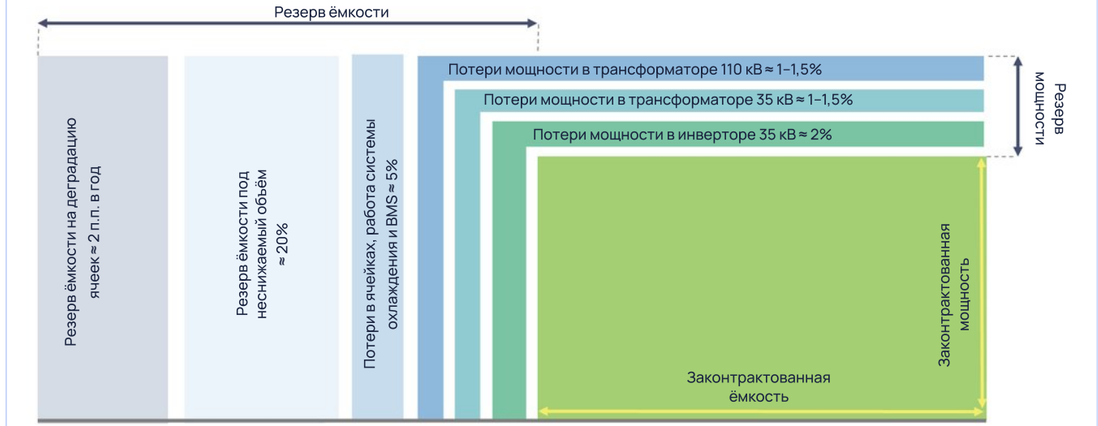
РИС. 33 **Структура CAPEX СНЭ**



Источник: АРВЭ, инвестиционная программа ПАО «Россети»

Стоит отметить, что в отношении крупных сетевых СНЭ предъявляются требования по поддержанию объёма и длительности выдачи электрической энергии на заданном уровне. В связи с этим соответствующие проекты, как правило, сформированы с учётом наличия резерва мощности и ёмкости СНЭ для компенсации возникающих потерь мощности в инверторе и при повышении напряжения, а также потерь электрической энергии в ячейках и на работу систем охлаждения и BMS. Формирование запаса ёмкости СНЭ для обеспечения неснижаемого объёма заряда электроэнергии, который определяется рекомендуемым режимом технической эксплуатации, также требуется учитывать при проектировании таких объектов. В совокупности обеспечение указанных резервов приводит к росту CAPEX проекта примерно на 30%. Кроме того, необходимость на регулярной основе компенсировать деградацию ячеек также может приводить к увеличению оценки CAPEX проекта (рис. 34).

РИС. 34 **Необходимость резервирования ёмкости**



Источник: АРВЭ

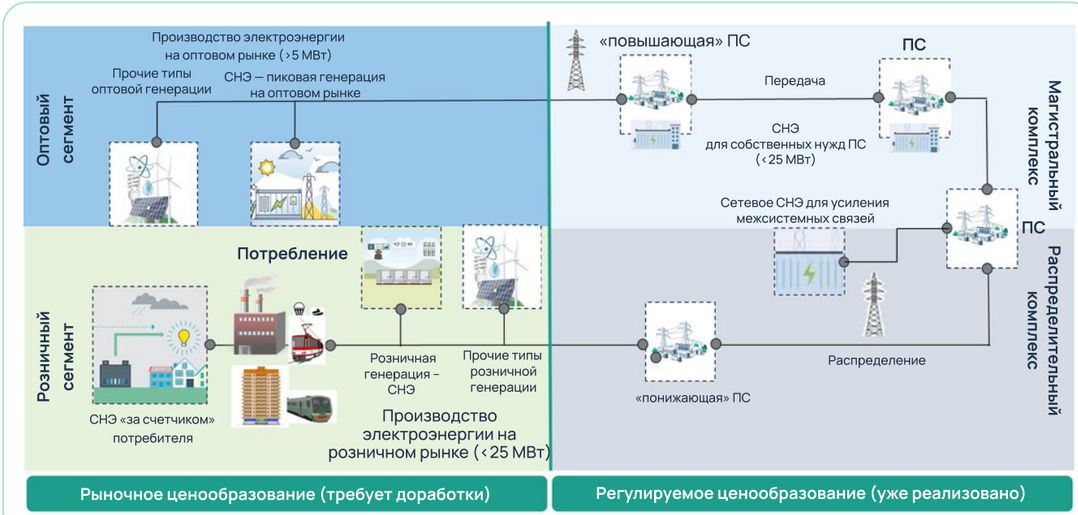
Значение CAPEX проектов СНЭ «за счётчиком» потребителей, как правило, ниже уровней, релевантных для крупных сетевых СНЭ, в силу наличия экономии на расходах на подготовку площадки в силу отсутствия дополнительных затрат на подготовку земельного участка и новой схемы выдачи мощности, а также на строительно-монтажных работах (СМР). Вместе с тем к стоимости оборудования от поставщика всё же придётся добавить расходы на проектирование и пусконаладочные работы (ПНР). Итоговая экономия CAPEX для таких проектов может превышать 30%.

03 ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РЫНКА СНЭ В РОССИИ

Сравнивая указанные выше стоимостные показатели проектов строительства СНЭ и новой тепловой генерации в терминах стоимости мощности, принимая во внимание особенности отдельных региональных энергосистем, становится очевидным преимущество первых. Это формирует хорошие предпосылки для дальнейшего роста рынка СНЭ в электроэнергетическом секторе России.

Действующее законодательство определяет возможность интеграции СНЭ одновременно в регулируемом и конкурентном сегменте, как на оптовом, так и на розничном уровне (рис. 35).

РИС. 35 **Основные сегменты применения СНЭ в электроэнергетике**



Источник: АРВЭ

В 2026 году был реализован пилотный проект компенсации рисков возникновения дефицита мощности посредством строительства литий-ионных СНЭ совокупной мощностью 350 МВт, с длительностью работы 6 часов. Правительством Российской Федерации было принято решение об увеличении совокупной мощности пилотного проекта на 100 МВт.

В настоящее время регуляторами и отраслевым сообществом прорабатываются возможные направления развития сектора СНЭ в российской электроэнергетике, в частности:

- Включение СНЭ в механизм конкурентных отборов проектов строительства новой генерации на территориях прогнозируемых энергодефицитов.
- Интеграция долгосрочных технологически нейтральных отборов для целей обеспечения перспективного спроса на электроэнергию и мощность.
- Совершенствование механизма управления изменением режима потребления электроэнергии (Demand Response) с целью компенсации возможных дефицитов мощности в энергосистеме (в том числе в период строительства и пуско-наладки объектов новой генерации).
- Создание федерального мобильного резерва для целей обеспечения повышения надежности энергоснабжения.

ПИЛОТНЫЙ ПРОЕКТ

350 МВт
литий-ионные СНЭ с длительностью работы 6 часов, 2026 год

+100 МВт
решение Правительства РФ об увеличении мощности проекта

В случае реализации указанных планов потенциальный ежегодный спрос на электрохимические СНЭ в электроэнергетике, по оценкам АРВЭ, может составить 4–8 ГВт·ч в год в оптовом сегменте энергорынка и 1–1,5 ГВт·ч в год — в розничном.

ПОТЕНЦИАЛ СПРОСА, ОЦЕНКА АРВЭ

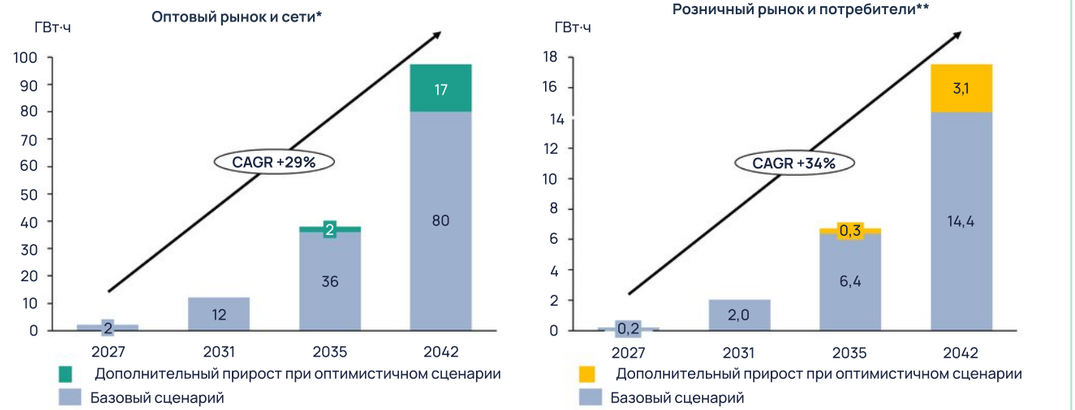
4–8 ГВт·ч в год
оптовый сегмент энергорынка

1–1,5 ГВт·ч в год
розничный сегмент

Указанный объём спроса формирует уверенный сигнал для развития развёртываемых в настоящее время производств компонентов для этого сектора в России, а также обуславливает востребованность деятельности в области НИОКР и стандартизации.

Вместе с тем без специальных программ стимулирования инвестиций доля России в мировом объёме применения СНЭ в электроэнергетике не превысит 0,1 процента.

РИС. 36 **Прогноз совокупной ёмкости применения СНЭ в электроэнергетике**



Источник: АРВЭ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системы накопления энергии стали зрелой технологией, которая меняет подход к регулированию энергорынка. Они эффективно дополняют комплекс технических решений не только по обеспечению гибкости энергосистемы за счёт возможности быстрого реагирования на изменения режима, но и становятся источником мощности в часы пикового потребления, перенося энергию во времени.

В мире параллельно развиваются разные технологии хранения энергии, и универсального решения пока нет. Механические, тепловые, водородные, электрические и электрохимические решения различаются по целому ряду критериев, поэтому выбор всегда начинается с определения задачи. Для кратковременного регулирования лучше подходят маховики и суперконденсаторы, для многочасового и сезонного хранения — механические системы, проточные аккумуляторы и водород. Вместе с тем, по совокупности характеристик (КПД, масштабируемость, зрелость, стоимость) наибольшим потенциалом применения в электроэнергетике сегодня обладают литий-ионные аккумуляторы. Натрий-ионные технологии могут стать их заметным дополнением по мере роста объёмов производства.

Мировым лидером как по производству аккумуляторов, так и по объёмам внедрения СНЭ в электроэнергетику, является Китай с долей рынка свыше 80% и 60%, соответственно. Вместе с тем, имея в виду сквозной характер технологии хранения энергии, развитые страны проводят осознанную политику по локализации производства аккумуляторных батарей.

Если масштабные программы стимулирования инвестиций в СНЭ в электроэнергетике будут своевременно запущены, потенциальный спрос, по оценкам АРВЭ, составит 5–10 ГВт·ч в год. Прозрачные для участников рынка, устойчивые долгосрочные рыночные механизмы, а также прогнозируемые, основанные на конкурентных принципах правила игры станут определяющим фактором дальнейшего укрепления технологического суверенитета.

КОМАНДА ПРОЕКТА



Алексей Жихарев
Директор АРВЭ



Ян Черепанов
Руководитель аналитического отдела



Иван Калмыков
Менеджер по международным связям



Елизавета Шергова
Аналитик



Полина Сазонова
Аналитик



Роман Фомин
Аналитик