

УДК 681.11

**МЕТОДЫ ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ: КЛАССИЧЕСКИЕ
И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Погонин И.С., студент гр. бЭС-241, I курс,
Якубханов В.Т., студент гр. бЭС-241, I курс,
Кабаргин И.П., студент гр. бЭС-241, I курс
Научный руководитель: Черных Т.Е., старший преподаватель
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»
г. Воронеж

Аннотация: В статье рассматриваются современные и перспективные технологии хранения энергии, включая классические решения (химические аккумуляторы, суперконденсаторы) и инновационные подходы (водородные системы, термальные накопители, кинетические системы). Проведен сравнительный анализ ключевых параметров: плотность энергии, коэффициент полезного действия (КПД), срок службы и стоимость. Особое внимание уделено перспективным разработкам, таким как твердотельные аккумуляторы и суперконденсаторы. Результаты исследования позволяют оценить потенциал различных технологий для применения в энергетике, транспорте и промышленности.

Ключевые слова: хранение энергии, аккумуляторы, суперконденсаторы, водородные накопители, термальные системы, плотность энергии, КПД.

Введение. Современная энергетика сталкивается с вызовами, связанными с ростом потребления энергии, необходимостью интеграции возобновляемых источников (ВИЭ) и повышением эффективности энергосистем. Одним из ключевых аспектов решения этих задач является развитие технологий хранения энергии. Традиционные методы, такие как свинцово-кислотные и литий-ионные аккумуляторы, широко применяются, но имеют ограничения по сроку службы, скорости заряда и экологичности [1]. В то же время появляются новые технологии, способные преодолеть эти барьеры.

Целью работы является проведение сравнительного анализа классических и перспективных технологий хранения энергии, оценить их преимущества, недостатки и возможные области применения.

Результаты исследования. Рассмотрим классические технологии хранения энергии. К ним можно отнести в первую очередь химические аккумуляторы, которые подразделяются на три группы: свинцово-кислотные (Pb-Acid) принцип работы которых заключается в электрохимической реакции между свинцовыми электродами и серной кислотой. К плюсам свинцово-кислотных аккумуляторов относится низкая стоимость, надежность, простота утилизации. К минусам можно отнести низкую энергоемкость, медленный заряд, токсичность свинца.

Ко второй группе относятся литий-ионные (Li-ion) аккумуляторы. Принцип работы которых заключается в движении ионов лития между катодом (LiCoO_2 , LiFePO_4) и анодом (графит). Достоинствами этого типа аккумулятора является высокая плотность энергии, умеренный саморазряд. К недостаткам деградация при высоких температурах, риск возгорания.

Третья группа химических аккумуляторов – литий-полимерные (Li-Po), которые отличаются от Li-ion использованием гелевого электролита. Применение преимущественно в дронах [2] и портативной электронике.

В ходе исследований был проведен сравнительный анализ химических аккумуляторов, результаты которого представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение химических аккумуляторов

Параметр	Свинцово-кислотные	Li-ion (NMC)	LiFePO ₄	Li-Po
Плотность энергии (Вт·ч/кг)	30–50	150–250	90–120	180–220
КПД (%)	70–80	85–95	90–95	85–90
Срок службы (циклы)	500–1000	500–2000	2000–5000	300–800
Скорость заряда	Медленная (2–6 ч)	Средняя (1–3 ч)	Средняя (1–2 ч)	Быстрая (0.5–1 ч)
Стоимость (\$/кВт·ч)	100–200	200–400	300–600	400–800
(NMC – литий-никель-марганец-кобальт-оксид)				

По результатам сравнительного анализа, можно сделать выводы, что Li-ion (NMC) лидирует по плотности энергии (150–250 Вт·ч/кг), что делает их оптимальными для устройств, где важны малый вес и долгая работа (электромобили, ноутбуки), LiFePO₄ и Li-Po уступают в энергоемкости, но безопаснее классических Li-ion. Свинцово-кислотные аккумуляторы проигрывают в 4–5 раз по этому параметру.

По параметру эффективности (КПД) все технологии, кроме свинцово-кислотных, имеют КПД более 85%. LiFePO₄ (90–95%) и суперконденсаторы (до 98%) – лучший выбор для систем с частыми циклами заряда/разряда.

Относительно срока службы LiFePO₄ – рекордсмен по долговечности (2000–5000 циклов), что оправдывает их высокую стоимость. Свинцово-кислотные и Li-Po требуют частой замены (500–1000 циклов).

По скорости заряда лидируют Li-Po, которые заряжаются быстрее всех (0.5–1 ч), но их срок службы минимален. Свинцово-кислотные – самые медленные (2–6 ч).

Свинцово-кислотные – самые дешевые (\$100–200/кВт·ч) [3], но их применение ограничено из-за низкой энергоемкости. Li-ion (NMC) – лучший компромисс цены (\$200–400/кВт·ч) и производительности.

Таким образом для бюджетных решений (источник бесперебойного питания, стационарные накопители) рекомендуется использовать свинцово-кислотные аккумуляторные батареи (АКБ).

Для транспорта и электроники Li-ion (NMC) или LiFePO₄ (если нужна долговечность). Для экстремально быстрого заряда Li-Po (дроны, спецтехника).

Второй классической технологией хранения энергии являются суперконденсаторы (ионисторы) [4]. Принцип работы суперконденсаторов – накопление заряда в двойном электрическом слое (EDLC). К достоинствам можно отнести крайне быстрый заряд/разряд (секунды), высокий КПД (до 98%), долговечность (свыше 100000 циклов). К недостаткам – низкую плотность энергии (5–10 Вт·ч/кг) и высокую стоимость (\$500–2000/кВт·ч).

На рис. 1 представлена комбинированная диаграмма сравнения срока службы и скорости заряда для различных технологий хранения энергии.

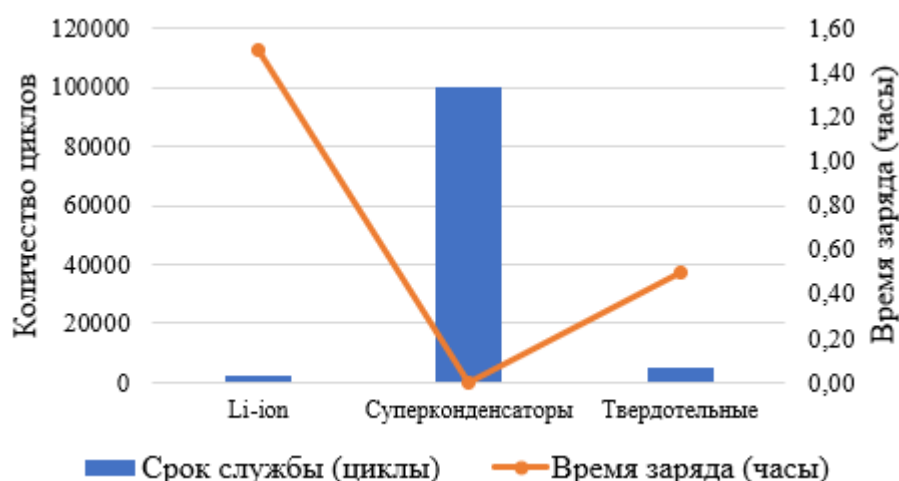


Рис.1. Зависимость количества циклов от скорости заряда для различных типов накопителей

Анализируя данные, представленные на рисунке суперконденсаторы резко выделяются на фоне других технологий: минимум 100000 циклов и заряд за секунды. Однако их низкая энергоемкость ограничивает применение. Твердотельные аккумуляторы потенциально могут совместить высокую скорость заряда (0,5 ч) и долговечность (5000 циклов). Суперконденсаторы идеальны для рекуперативного торможения в транспорте, а твердотельные АКБ – для быстрой зарядки гаджетов.

Рассмотрим перспективные технологии хранения энергии. К ним можно отнести твердотельные аккумуляторы, которые отличаются от Li-ion твердым керамическим/полимерным электролитом вместо жидкого. Основными преимуществами являются безопасность (нет риска утечки или возгорания), потенциальная плотность энергии более 400 Вт·ч/кг. Но существуют и определенные проблемы рассматриваемых твердотельных аккумуляторов – это низкая проводимость при комнатной температуре и высокая стоимость (более \$500/кВт·ч).

Также, помимо твердотельных аккумуляторов, к перспективным технологиям хранения энергии относятся водородные системы [5]. Достоинствами этого метода является очень высокая удельная энергия (33000 Вт·ч/кг для водорода), экологичность (выхлоп – вода). К недостаткам можно отнести низкий КПД (40–60%) и сложность хранения (высокое давление/криогенные температуры).

Распределение значений коэффициента преобразования энергии по типам накопителей представлено на рис. 2.

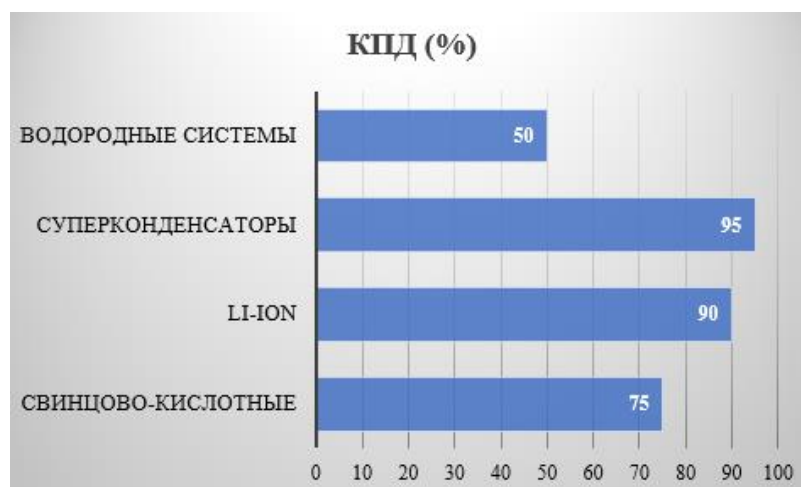


Рис.2. Коэффициент полезного действия различных систем аккумулирования энергии

Исходя из данных, представленных на рисунке можно сделать вывод, что суперконденсаторы и Li-ion АКБ имеют КПД >90%, что делает их эффективными для частых циклов заряда/разряда.

Водородные системы (КПД 40–60%) теряют большую часть энергии при конверсии, но незаменимы для долгосрочного хранения. Водород целесообразно использовать в сочетании с ВИЭ (солнечные/ветровые станции), где потери компенсируются дешевизной исходной энергии.

Еще одной перспективной технологией хранения энергии можно считать термальные накопители [6]. Они бывают двух типов: расплавленные соли (до 600°C) – используются в СЭС и фазовые материалы (парафин, гидраты солей) – для зданий.

Преимущества третьего вида перспективных технологий – долгий срок хранения (недели/месяцы) и экономия (\$10–50/кВт·ч). К недостаткам можно отнести низкую эффективность для электроэнергии (только нагрев).

На рис. 3 представлен график зависимости плотности энергии от ее стоимости, в зависимости от используемых технологий хранения энергии.

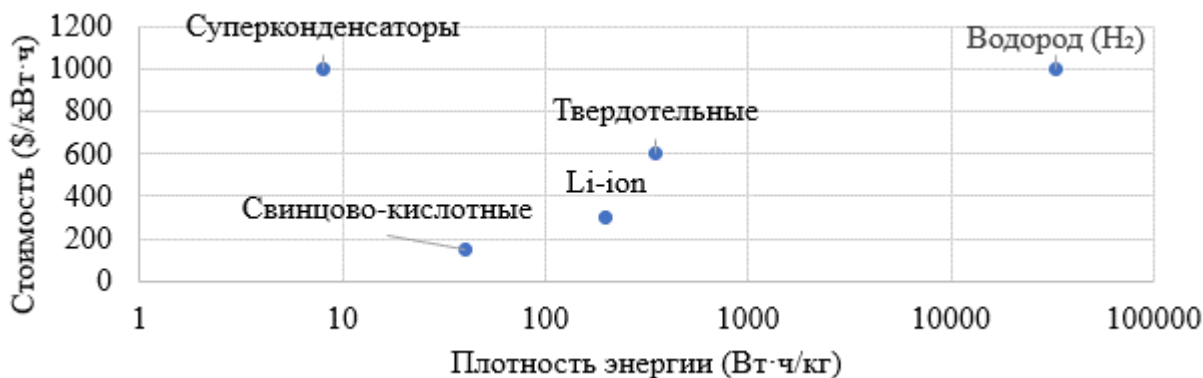


Рис.3 Зависимость плотности энергии от стоимости

Исходя из графика, представленного на рисунке можно сделать вывод, что литий-ионные аккумуляторы демонстрируют оптимальный баланс плотности энергии (200 Вт·ч/кг) и стоимости (\$200–400/кВт·ч), что объясняет их доминирование на рынке. Водород имеет аномально высокую плотность энергии (33 000 Вт·ч/кг), но его применение ограничено из-за высокой стоимости и низкого КПД. Суперконденсаторы и свинцово-кислотные АКБ занимают ниши, где важны, соответственно, скорость заряда и дешевизна. Таким образом, для электромобилей и портативной электроники предпочтительны Li-ion, тогда как водород перспективен для авиации и долгосрочного хранения.

Выводы. Классические технологии, такие как Li-ion, свинцово-кислотные аккумуляторы, остаются основой рынка, но имеют ограничения по сроку службы и плотности энергии. Суперконденсаторы эффективны для кратковременного хранения и высокомошных применений. Перспективные решения (твердотельные аккумуляторы, водород) могут значительно улучшить параметры хранения, но требуют доработки и снижения стоимости.

Выбор технологии хранения энергии зависит от применения. Так, для электромобилей подходят Li-ion / твердотельные накопители, для импульсных систем целесообразно использовать суперконденсаторы.

Будущее энергохранения лежит в создании адаптивных, многоуровневых систем, интегрирующих преимущества каждой технологии при минимизации их недостатков. Это потребует междисциплинарного подхода, сочетающего достижения материаловедения, силовой электроники и искусственного интеллекта.

Список литературы

1. Зубков М.А. Системы накопления электроэнергии / Россия молодая Сборник материалов XVI Всероссийской, научно-практической конференции молодых ученых с международным участием. Кемерово, 2024 с. 21407.1-21407.4
2. Сугак В.В. Анализ выбора аккумуляторной батареи для беспилотного летательного аппарата / Прикладные задачи энергетики, электротехники и автоматики. Труды Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Воронеж, 2024, с.57-63
3. Аккумуляторы из Китая – Электронные данные – Режим доступа: https://ru.made-in-china.com/?pv_id=1inbd15vj90d&faw_id=1inbd0al0188
4. Суперконденсаторы – Электронные данные – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/547310/>
5. Водород против лития – Электронные данные – Режим доступа: <https://reads.alibaba.com/ru/lithium-batteries-vs-hydrogen-fuel-cells-which-is-better-for-you/>
6. Как хранить энергию – Электронные данные – Режим доступа: <https://www.forbes.ru/biznes/353097-kak-hranit-energiyu-rasplavlennaya-sol-szhatyy-vozduh-i-supermahovik>