

В.С. МАРКОВ, І.В. ПОЛЯКОВ, Н.В. КРЮКОВА

ПРОБЛЕМИ СУЧАСНИХ АКУМУЛЯТОРІВ ТА ЇХНІ ПЕРСПЕКТИВНІ РОЗРОБКИ

Суттєво важливими пристроями для зберігання та видачі електричної енергії в різних сферах життєдіяльності людини є акумулятори. Вони широко застосовуються, насамперед у побутових пристроях, таких як мобільні телефони, у автономних приладах освітлення та в різноманітних ручних електроінструментах, транспортних засобах та електронних пристроях. З розвитком техніки акумулятори безперервно вдосконалюються, чого вимагають зростаючі потреби та вимоги до ефективності, ємності, швидкості зарядки, щільності енергії, безпеки, довговічності та екологічності. У даний час найбільш поширеним типом акумуляторів є літій-іонні акумулятори, які мають високу щільність енергії, тривалий термін служби та відносно низьку вартість, але мають ряд недоліків, насамперед, вибухонебезпечність. Деякі з найбільш перспективних напрямків у розробці нових типів акумуляторів включають фторид-іонні, твердотільні, акумулятори на основі водню, які використовують водень як паливо та кисень як окислювач, а також акумулятори на основі алюмінію, які, відповідно, використовують алюміній як анодний матеріал і різні оксиди або гідроксиди як катодний матеріал, виділяючи електричну енергію та алюмінієвий гідроксид як продукт реакції. Однак ці акумулятори також мають недоліки, такі як низька швидкість зарядки, низька стабільність та низька енергетична ефективність. Серед перспективних розробок можна згадати акумулятори на основі органічних матеріалів, на основі наноматеріалів та на основі цементу. Найперспективніші напрями у виробництві акумуляторів, на нашу думку, це твердотільні акумулятори, кремнієві аноди та використання чистого металевого літію. Огляд різних методів зберігання енергії призводить до висновку, що будь-яка з розробок навряд чи буде універсальним рішенням. Може виявитися, що в майбутньому ми будемо використовувати різні типи акумуляторів накопичення та зберігання енергії для різних пристроїв та ситуацій.

Ключові слова: акумулятори, властивості та недоліки акумуляторів, перспективні розробки акумуляторів.

V.S. MARKOV, I.V. POLIAKOV, N.V. KRIUKOVA

PROBLEMS OF MODERN BATTERIES AND THEIR PERSPECTIVE DEVELOPMENTS

Batteries are essential devices for storing and delivering electric energy in various areas of human life. They are widely used, primarily in household appliances such as mobile phones, in autonomous lighting devices and in different hand-held power tools, vehicles and electronic devices. With the development of technology, batteries are constantly improved, which is required by the growing needs and requirements for efficiency, capacity, charging speed, energy density, safety, durability and environmental friendliness. Currently, the most common type of battery is lithium-ion batteries, which have high energy density, long service life and relatively low cost, but have a number of disadvantages, primarily explosiveness. Some of the most promising directions in the development of new types of batteries include fluoride-ion, solid-state, hydrogen-based batteries, which use hydrogen as a fuel and oxygen as an oxidant, and aluminum-based batteries, which, respectively, use aluminum as an anode material and various oxides or hydroxides as a cathode material, releasing electrical energy and aluminum hydroxide as a reaction product. However, these batteries also have disadvantages, such as low charging speed, low stability, and low energy efficiency. Among the promising developments, we can mention batteries based on organic materials, based on nanomaterials, and based on cement. The most promising directions in the production of batteries, in our opinion, are solid-state batteries, silicon anodes, and the use of pure lithium metal. A review of the various energy storage methods leads to the conclusion that any of the developments is unlikely to be a universal solution. It may turn out that in the future we will use different types of energy storage batteries for different devices and situations.

Keywords: batteries, properties and disadvantages of batteries, promising battery developments.

Актуальність. Суттєво важливими пристроями для зберігання та видачі електричної енергії в різних сферах життєдіяльності людини є акумулятори. Вони широко застосовуються в побутових пристроях, таких як мобільні телефони, у автономних приладах освітлення, у різноманітних ручних електроінструментах та електронних пристроях. Також без них неможливо існування не тільки електромобілів, але і автомобільного транспорту загалом. Таким чином, щодо актуальності акумуляторів для повсякденного життя сучасної людини немає жодних сумнівів, особливо зважаючи на ті складні та суворі обставини, в яких опинилась у теперішній час наша країна. З розвитком техніки акумулятори безперервно вдосконалюються, цього вимагають зростаючі потреби та вимоги до ефективності, ємності, швидкості зарядки, щільності енергії, безпеки, довговічності та екологічності.

У даний час найбільш поширеним типом акумуляторів є **літій-іонні акумулятори**, які мають високу щільність енергії 50-260 Вт·год/кг, тривалий термін служби та відносно низьку вартість. Літій-іонні акумулятори складаються з двох електродів, анода і катода, які зроблені з матеріалів, що містять літій, і з електроліту, який забезпечує передачу літійових іонів між електродами. Анод та катод літій-іонного акумулятора

розділені сепаратором із пористого полімеру. Катод має в собі активний матеріал, у якості якого найчастіше застосовують оксиди перехідних металів, у яких вбудовані іони літію. Анод, зазвичай, графітний (карбоновий). Органічний розчин солей літію використовується як електроліт (рис. 1).

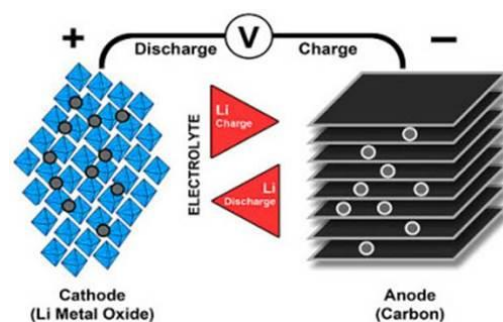


Рис. 1. До устрою літій-іонних акумуляторів із карбоновим анодом

Літій – це лужний метал, який має низку властивостей, що дозволяють використовувати його для створення сучасних джерел електричної енергії:

1) низька густина. Він найлегший зі всіх металів, його щільність становить 0,534 г/см³. Це робить його

© Марков В.С., Поляков І.В., Крюкова Н.В., 2026

ідеальним матеріалом для створення легких та компактних джерел електроенергії, які можуть використовуватись у портативній електроніці, електромобілях та інших пристроях;

2) висока електрохімічна активність. Літій легко віддає свій зовнішній електрон, утворюючи позитивно заряджений іон Li^+ . Це дозволяє літію брати участь в ефективних хімічних реакціях з іншими матеріалами, виділяючи велику кількість електричної енергії. У літій-іонних акумуляторах літій переміщується між анодом і катодом через електроліт, створюючи електричний струм;

3) відносно висока температура плавлення ($+180,5^\circ\text{C}$) та кипіння ($+1342^\circ\text{C}$) у порівнянні із іншими лужними металами. Це означає, що літій може працювати в широкому діапазоні температур, не втрачаючи своїх властивостей і не руйнуючись. Це важливо для забезпечення надійності та довговічності джерел струму, особливо в екстремальних умовах;

4) здатність реагувати із повітрям. При заряджанні літій окислюється, а при розряджанні кисень відновлюється, виділяючи електричну енергію. Літій легко реагує з киснем, азотом та водою, утворюючи різні сполуки, такі як оксиди, нітриди та гідроксиди. Ця властивість може використовуватися для створення джерел струму, які використовують повітря як один з реагентів. У **літій-повітряних акумуляторах** навпаки катод складається з пористого вуглецю (карбону), який поглинає кисень із повітря, а анод з літію і неводний електроліт. Електроди розділені твердою літій-провідною мембраною, мають потенціал для досягнення дуже високої щільності енергії (прототипи показують до $500 \text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{кг}$), але стикаються з низкою проблем, таких як, швидке старіння та низька стабільність.

Однак літій-іонні акумулятори також мають ряд недоліків, таких як висока вартість, обмежена доступність літію, досить швидка втрата заряду на холоді, ризик перегріву та вибуху, а також екологічні проблеми, пов'язані з видобутком, переробкою та утилізацією літію.

У зв'язку з цим, досліджуються різні способи покращення літій-іонних акумуляторів, такі як використання нових матеріалів для електродів та електроліту, збільшення ємності та щільності енергії, зниження вартості та підвищення безпеки. Наприклад, деякі з нових матеріалів, які використовуються для анода, включають графен, кремній, олово та інші наноструктуровані матеріали, які можуть збільшити ємність та зменшити її втрату. Для катода використовуються різні сполуки літію з іншими металами, такими як нікель, кобальт, марганець, залізо та інші, які можуть покращити стабільність та продуктивність. Для електроліту використовуються різні розчинники, солі та добавки, які можуть підвищити провідність, сумісність та безпеку.

Відома проблема вибухонебезпечності літійових акумуляторів. Компанія Samsung зіткнулася з цією проблемою і була змушена відкликати першу серію Note 7, оскільки акумулятори вибухали безпосередньо в процесі зарядки. Компанія ІКАО навіть у 2016 році заборонила до перевезення у вантажних відсіках цивільного транспорту комерційні партії літійових

акумуляторів. Основна проблема, що призводить до вибуху акумуляторів – це надмірне розігрівання електродів через перевищення допустимої температури або внаслідок короткого замикання всередині акумуляторної комірки. Ланцюгова реакція легко ініціюється всередині комірки, що перегрілася, адже лужний метал літій дуже легко запалюється, внаслідок чого батарея набухає і в гіршому випадку вибухає. Тому в процесі заряду літійового акумулятора в мобільному пристрої за допомогою вбудованого в акумулятор мікроконтролера реалізується досить складний алгоритм здійснення цього процесу, щоб температура батареї не виходила б за межі прийнятної температурної діапазону. Контролер відстежує для цієї мети багато параметрів батареї в процесі її заряджання. Крім безпосередньо процесу заряджання, зберігання акумулятора також вимагає дотримання деяких правил, особливо щодо температури. Не можна перегрівати, ні переохолоджувати акумулятор.

І навіть незважаючи на наявність контролера, випадковий заводський брак (недостатня товщина ізолятора між осередками або нерівна нарізка електродів або попадання металевих частинок між катодом і анодом, які порушують цілісність шару сепаратора) може мати місце і призвести до сумних наслідків. Звичайно це і випадкові удари, пробої, проколи, перегрів на сонці. Навіть якщо батарея впала і злегка вдарилася, всередині може відбутися порушення ізолятора, і це може призвести до раптової неприємності, навіть без явного перегріву. При першій зарядці на заводі, літій вбудовується в анод і на електродах утворюється шар електроліту, що розклався, який тепер служить захистом від зайвих реакцій, залишаючись при цьому іон-провідним.

Ще одна причина замикання – проростання ланцюжків (дендритів) металевого літію через сепаратор, якщо іони літію ще на заводі не встигли до кінця вбудуватися в кристал анода через надмірно швидку зарядку або від переохолодження, або якщо ємність активного матеріалу катода більше ємності анода.

Якщо коротке замикання відбулося, то температура акумулятора починає підніматися, і при досягненні $+70-90^\circ\text{C}$ починається розкладання захисного шару іон-провідного анода. Літій анода реагує з електролітом, при цьому виділяються горючі вуглеводні, такі як етилен, метан, етан тощо. Але до займання ще рано, адже не вистачає кисню. Тим часом, екзотермічна реакція йде і температура зростає, тиск усередині корпусу акумулятора підвищується. При $+180-200^\circ\text{C}$ починається реакція диспропорціонування на катоді, де виділяється кисень. Відбувається займання, температура різко підвищується, а електроліт термічно розкладається, температура вже $+200 - 300^\circ\text{C}$.

Нарешті, настає черга графіту, і з досягненням температури $+660^\circ\text{C}$ починає плавитися алюміній струмоприймача. Максимальна температура в цьому процесі зазвичай не встигає перевищити $+900^\circ\text{C}$, оскільки все швидко закінчується повним розкладанням внутрішніх компонентів акумулятора.

Для вирішення цієї проблеми виробникам смартфонів можна посилити регулювання, зробити додаткові

запобіжники в апаратах та акумуляторах, ускладнити контролери, проте це призведе до подорожчання акумуляторів і всієї продукції, у комплекті з якою акумулятор продається.

А тим часом за безпеку літєвих акумуляторів борються фізики зі Стенфорда, які в 2015 році розробили спеціальний захисний механізм, що вбудовується в акумулятор вже на стадії виробництва. По суті йдеться про новий вид літєвих батарей, які автоматично відключаються при досягненні потенційно небезпечної температури (що і запобігає процесу, що призводить до подальшого займання), а через деякий час, після остигання, автоматично вмикаються знову. Автори розробки стверджують, що це перша літєва батарея, яка зможе багаторазово відключатися та відновлюватися без втрати своїх властивостей та робочих характеристик. У результаті виходить батарея, яка позбавлена двох головних недоліків – різкого зниження ємності акумулятора після кількох десятків циклів перезаряду і, що важливіше, схильності до спалахів і вибухів через перегрівання (ланцюгова реакція автоматично зупиняється).

Рішення дійшло вченим зовсім з іншої галузі фізики. Вони робили термометри, використовуючи наночастинки нікелю, вбудовані в тонкий аркуш із графену та пластику. То були незвичайні термометри. У спокої частки нікелю один з одним стикалися, тобто виходив добрий провідник струму. Але коли лист розігрівався, пластик починав трохи розширюватися, що призводило до послаблення контакту між нікелевими частинками, що проводять, і опір всього провідника зростав.

Ось цю властивість і застосували дослідники зі Стенфорда для миттєвого автоматичного захисту літєвих батарей і для автоматичного відновлення контакту після охолодження. Вони приклеїли лист такого пластику до одного з електродів батареї, щоб він втрачав провідність із зростанням температури. І коли температура досягає $+70^{\circ}\text{C}$, відбувається вимикання пристрою. Незважаючи на знайдене рішення, виробники мобільних пристроїв все одно не наважуються різко змінювати напрацьовану роками технологію виробництва своїх акумуляторів. Тому користувачам телефонів доведеться ще на деякий час змиритися з наявністю потенційної небезпеки літєвих батарей, і намагатися не кидати і не перегрівати свої мобільні пристрої, а тим більше акумулятори. Можливо, у найближчому майбутньому проблема буде повністю вирішена.

У світі йде активний пошук та розробка нових типів акумуляторів, які можуть перевершити літій-іонні за своїми характеристиками та вирішити їхні проблеми. Деякі з найбільш перспективних напрямків у цій галузі включають фторид-іонні, твердотільні акумулятори, а також акумулятори на основі органічних матеріалів.

Фторид-іонні акумулятори – це новий тип акумуляторів, який використовує фтор як заряджений іон, що передає електричний струм між анодом та катодом. Фтор має найвищий питомий заряд серед усіх елементів, що теоретично дозволяє фторид-іонним акумуляторам зберігати в 10 разів більше енергії, ніж літій-іонні. Крім того, фторид-іонні акумулятори не вибухають, тому що фторид-іон F^- не реагує із водою і

повітрям на відміну від молекулярного фтора F_2 , і в них використовують більш дешеві та доступні матеріали, такі як мідь, залізо та лантан. Однак, ці акумулятори вимагають високих температур (близько $+150^{\circ}\text{C}$) для роботи, що є серйозною перешкодою для їх практичного застосування. Дослідники з NASA та Honda працюють над вирішенням цієї проблеми, використовуючи спеціальні електроліти на основі фторидів (рис. 2).



Рис.2. Виробництво фторид-іонних акумуляторів

Твердотільні акумулятори – це тип акумуляторів, який використовує твердий електроліт замість рідкого або гелевого, як у традиційних акумуляторах (рис.3). Твердотільні акумулятори мають ряд переваг над літій-іонними, таких як більш висока щільність енергії, швидкість заряджання та розряджання, довговічність, безпека та стабільність. Твердотільні акумулятори дозволяють використовувати літій-металевий анод, який має найвищу теоретичну ємність серед усіх відомих матеріалів для анодів. Однак ці акумулятори стикаються з рядом технічних проблем, таких як низька іонна провідність твердого електроліту, несумісність між електродами та електролітом, складність виготовлення та масштабування.



Рис.3. Твердотільні акумулятори

Акумулятори на основі органічних матеріалів. Це тип акумуляторів, який використовує органічні сполуки, такі як полімери, вуглецеві нанотрубки, графен та інші, як електроди або електроліти. Акумулятори на основі органічних матеріалів мають потенціал для створення більш дешевих, екологічних, гнучких та легких акумуляторів. Органічні матеріали також можуть мати різноманітні хімічні та фізичні властивості, що

дозволяє налаштувати та оптимізувати акумулятори для різних програм. Однак акумулятори на основі органічних матеріалів страждають від низької щільності енергії, низької швидкості зарядки та стрімкої розрядки, стабільності та довговічності. Дослідження в цій галузі спрямовані на покращення продуктивності та надійності органічних акумуляторів, використовуючи нові синтетичні методи, наноструктурування, гібридизацію та інші підходи.

Акумулятори нового покоління. Зі зростанням числа пристроїв та транспортних засобів, що залежать від електрики, виникає потреба в батареях з ще більшою ємністю та більш коротким часом зарядки. Важливу роль також відіграє ціна та загальна вага акумуляторної батареї.

Різні нові типи акумуляторних батарей були розроблені для заміни літій-іонних батарей протягом тривалого часу. Останнім часом найбільш перспективними, безпечними, ефективними та ємними вважаються, як вже було зазначено, напівпровідникові рішення із використанням твердого електроліту. Крім фторид-іонних, твердотільних та органічних акумуляторів, існують інші перспективні технології акумуляторів у майбутньому, які можуть запропонувати нові пристрої для зберігання та використання енергії.

Деякі з них:

- **акумулятори на основі водню**, які використовують водень як паливо та кисень як окислювач, виробляючи електричну енергію та воду як продукт реакції (рис. 4). Ці акумулятори мають дуже високу щільність енергії, не забруднюють довкілля та можуть працювати у широкому діапазоні температур. Однак акумулятори на основі водню також стикаються з низкою проблем, таких як висока вартість, низька ефективність, складність зберігання та транспортування водню, ризик витоку та вибуху.

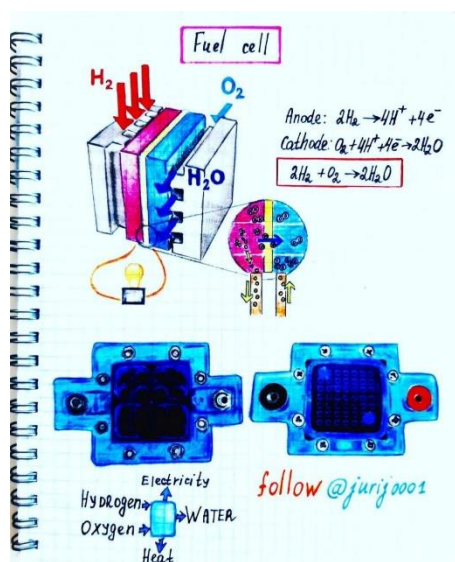


Рис. 4. Концепція роботи акумулятора на основі водню

- **акумулятори на основі алюмінію**, відповідно, використовують алюміній як анодний матеріал і різні оксиди або гідроксиди як катодний матеріал,

виділяючи електричну енергію та алюмінієвий гідроксид як продукт реакції. Акумулятори на основі алюмінію мають низьку вартість, високу щільність енергії, тривалий термін служби та гарну безпеку. Однак ці акумулятори також мають недоліки, такі як низька швидкість зарядки, низька стабільність та низька енергетична ефективність.

- **акумулятори на основі наноматеріалів**, такі як наночастинки, нанодропи, нанотрубки, нанолісти та інші, як електроди або електроліти. Акумулятори на основі наноматеріалів мають потенціал для покращення продуктивності та характеристик акумуляторів, таких як щільність енергії, швидкість зарядки та розрядки, довговічність, безпека та гнучкість. Однак акумулятори на основі наноматеріалів також стикаються з викликами, такими як висока вартість, складність синтезу та масштабування, нестабільність та токсичність.

Вже існують передові конструкції, що поєднують відому технологію з новою, наприклад, батареєю Джина Бердичевського від Sila Nanotechnologies, що базується на традиційній літій-іонній технології з поступовим введенням кремнію (рис.5). Solid Power, ще один стартап, який розробляє літій-металеві аноди, планує розпочати виробництво своїх акумуляторів у 2026 році.



Рис. 5. Зліва кремнієвий, праворуч літій-іонний акумулятор

У даний час існує два провідні напрямки досліджень. Найперспективніші напрями у виробництві акумуляторів, на нашу думку, це твердотільні акумулятори та кремнієві аноди – аноди, виготовлені в основному з кремнію, та конструкції з використанням чистого металевого літію. Вчені розраховують, що вони підвищать щільність енергії в акумуляторі, знизивши цим його ціну і збільшивши запас ходу після однієї зарядки.

У сучасній техніці графітові аноди зберігають невелику кількість літію. З фізичного погляду шість атомів вуглецю зберігають один атом літію, який є енергоносієм батареї – що більше літію, то більше енергії. Атом кремнію може зберігати в середньому до 4,4 атомів літію. Використання чистого металевого літію може зберігати більше енергії.

До цих пір обидва ці матеріали не використовувалися в батареях, тому що кремній сильно розширюється, а металевий літій може викликати коротке замикання батареї та викликати пожежу. Однак Sila, QuantumScape та Solid Power стверджують, що

подолали ці проблеми. До цих пір єдині комерційні батареї, що містять кремній, такі як батареї Panasonic для Tesla, містять близько 5% кремнію. Джин Бердичевський заявляє, що аноди Sila становитимуть до 50 відсотків у споживчих пристроях.

QuantumScare повідомляє, що його літій-металевий акумулятор витримує 800 циклів при кімнатній температурі і може бути повністю заряджений менш ніж за 15 хвилин.

Solid Power оголосила, що вона досягне щільності енергії 330 (у перспективі до 500) Вт·год/кг у своїх елементах, що перевищує будь-який відомий комерційний літій-іонний акумулятор. Завдання, яке вирішує не тільки Solid Power, – збереження параметрів за різних температур, характерних для умов роботи від прохолодних до гарячих.

Звичайно, є й інші шляхи, для покращення акумуляторів. Нещодавно засоби масової інформації повідомили, серед іншого, що стало можливим побудувати нові хлорно-лужні батареї, що перезаряджаються. Вони мають у шість разів більше ємності, ніж звичайні акумулятори в наших телефонах та ноутбуках. На жаль, незважаючи на непогані показники в зберіганні та вивільненні електричного заряду, порівняно з багатьма його сусідами з таблиці Менделєєва, хлор може швидко реагувати і надто нестабільний. Тому він розглядається в контексті не перезаряджуваних, а одноразових батарей.

Проте нещодавно дослідники зі Стенфордського університету виявили, що у деяких процесах він стабільний навіть у батареях. А в Китаї в Національному університеті Чунг Ченг розробили вуглецевий пористий матеріал, що контролює конверсію хлору. Коли акумулятор заряджається, хлорид натрію перетворюється на хлор та натрій. Натрій осідає, а хлор залишається в порах вугільного електрода. Коли батарея розряджена, хлор може з'єднатися тільки з молекулами натрію, що відбувається. Це відновлює хлорид натрію і робить батарею такою, яка перезаряджається. Ці процеси повторювані та дуже ефективні. Вченим вдалося сконструювати прототип, який досягає ємності 1200 мА·год позитивного електрода за 200 циклів заряду/розряду. Зазвичай літій-іонні акумулятори можуть містити лише 200 мА·год позитивного електрода.

Японська компанія Azul Energy застосувала дещо інший підхід, ніж інші, до проблеми збільшення ємності при мініатюризації батарей. Стартап під керівництвом Хіросі Ябу, професора Університету Тохоку працює над новими каталізаторами для використання в батареях. Дослідження зосереджені на використанні повітря для цієї мети, що, як очікується, збільшить щільність енергії, що зберігається, від 3 до 10 разів.

Компанія Connexx Systems поблизу Кіото працює над підключенням батареї до водневого паливного елемента. Батарея виробляє водень із порошку заліза та води та подає його в паливний елемент.

Прототипи дозволили досягти вп'ятеро більшої ефективності, ніж літій-іонні батареї, за низьких виробничих витрат. Однак пристрій важкий, що обмежує його використання стаціонарними пристроями.

Існують інші ідеї зберігання енергії. Деякі дослідники хочуть, наприклад, використовувати властивості суперконденсаторів для розробки дешевого та екологічно чистого рішення. Вчені з Австралійського технологічного університету в Квінсленді у співпраці з індійським ІТ Jammu та німецьким TU Munich розробили пристрій зберігання енергії на основі суперконденсатора, який забезпечує щільність енергії, аналогічну щільності нікель-металогідридних (NiMH) акумуляторів, тобто, 60 - 120 Вт·год/кг.

На відміну від літій-іонних акумуляторів, суперконденсатори накопичують енергію статично - вони заряджаються і розряджаються набагато швидше, не руйнуючи внутрішню структуру. У результаті вони мають дуже високу питому потужність, хоч і набагато нижчі, ніж їхні хімічні аналоги.

Розроблений прототип має негативний електрод конденсатора на основі карбиду титану та позитивний електрод з графену. Команда описує його як гібридний конденсатор із зарядною ємністю (питома потужності, Вт/кг) приблизно в десять разів більшою, ніж у літійових батарей, і можна порівняти з нікель-металогідридними батареями.

Протестований пристрій показав щільність енергії до 73 Вт год/кг – близько 28%, що пропонують сьогоднішні сучасні акумулятори, при цьому питома потужність зросла до 1600 Вт/кг – набагато більше за 250 - 340 Вт/кг, які можуть запропонувати сучасні літійові акумулятори. Однак у новому рішенні є одна проблема. Щоб зарядити такий пристрій швидше, ніж традиційні акумулятори, знадобиться високотехнологічна інфраструктура, яка зараз недоступна.

Ідея створення квантової батареї нанометрових розмірів виникла у вчених із канадських університетів, Університету Альберти та Торонто. Робота квантових батарей ґрунтується на зовсім інших принципах, ніж звичайні. Наноструктури змусять електрони поглинати фотони, накопичуючи енергію та вивільняючи її у квантових процесах. Квантові осередки повинні бути повністю ізольовані від навколишнього середовища, у тому числі від світла, щоб не виникала декогеренція. Поки що вони існують лише в теорії. Крім збільшення ємності, щільності та швидкості зарядки елементів, перед вченими та дослідницькими центрами стоять й інші завдання.

Корейським вченим з Корейського інституту науки і технологій (KIST) під керівництвом Джуна Кі Лі вдалося зменшити зростання дендритів, розгалужених кристалів, що викликають спалах акумуляторів електромобілів, шляхом створення захисних напівпровідникових пасивуючих шарів на поверхні літійових електродів. Щоб запобігти утворенню дендритів, дослідницька група піддала фулерен (C₆₀) впливу плазми, що призвело до утворення напівпровідних пасивуючих вуглецевих шарів між літійовим електродом та електролітом. Напівпровідні вуглецеві шари, що пасивують, пропускають іони літію, блокуючи електрони завдяки утворенню бар'єрів Шоттки. Запобігання взаємодії електронів та іонів літію на поверхні електрода та всередині гальмує утворення кристалів та зростання дендритів.

Нещодавно розроблені електроди показали помітно підвищену стабільність, при цьому зростання літєвих дендритів пригнічувалося до 1200 циклів. Крім того, при використанні катоду з оксиду літію-кобальту (LiCoO_2) як добавку до розробленого електрода після 500 циклів зберігається близько 81 відсотка початкової ємності батареї, покращення становить близько 60% порівняно із звичайними літєвими електродами.

Новий захисний бар'єр, який значно збільшує термін служби та безпеку літєвих батарей, також був розроблений японськими вченими з Інституту передових наук та технологій (JAIST). У доступних на ринку батареях використовуються графітові аноди, для яких також потрібний сполучний матеріал, інакше графіт просто зруйнується всередині батареї.

У даний час полівініліденфторид (ПВДФ) використовується як сполучний матеріал. Однак його продуктивність не найкраща. Усього після п'ятисот циклів зарядки та розрядки ємність елементів ПВДФ падає до 65% від вихідного значення. Як повідомляє EurekaAlert, команда JAIST виявила новий сполучний матеріал під назвою сополімер біс-іміноаенафтінохінон-парафенілен, який дозволяє акумулятору зберігати ємність в 95% протягом понад 1700 циклів заряду-розряду. Останнім часом технологія матеріалів дедалі активніше займається пошуком ефективних та дешевих рішень для зберігання енергії.

Вчені з університету Ланкастера виявили кристалічний матеріал, який може не тільки вловлювати сонячну енергію протягом декількох місяців при кімнатній температурі, а потім на вимогу віддавати її у вигляді тепла. Це може бути особливо корисним у районах, де багато сонячного світла в літні місяці, але недостатньо світла в зимові місяці. Цей трюк робить матеріал на основі «металоорганічних каркасів», пористі властивості якого дозволяють створювати композиційні матеріали за рахунок включення до їх структури інших малих молекул. При цьому туди розміщуються молекули азобензолу (сильні поглиначі світла), які можуть змінювати свою форму під впливом світла чи тепла. Ці спеціальні молекули діють як фотоперемикачі – своєрідна «молекулярна машина», яка змінює форму при впливі зовнішнього подразника, як то світло чи тепло. Згідно з дослідженнями, цей процес накопичує енергію подібно до того, як запасається потенційна енергія в пружині.

Випробування показали, що матеріал здатний зберігати енергію понад чотири місяці, тобто при зміні пір року. Тим не менш, щільність накопиченої енергії невелика, і її необхідно поліпшити, якщо ми хочемо розглянути можливість застосування цієї технології на практиці, наприклад, екологічно чистого доповнення до опалення будинків і офісів або для захисту від зледеніння вікон. Опис дослідження з'явився в *Journal of Chemistry of Materials*. Системи «структурних батарей», які використовують всю структуру, наприклад, будинки як сховища енергії, відходять від класичних підходів розробки рішень для зберігання енергії.

У березні 2021 року з'явилася інформація про те, що вчені зі шведських університетів Chalmers University of Technology та KTH Royal Institute of Technology покращили характеристики такої системи вдєсятеро

порівняно з тим, що було відомо досі. Основне застосування цього типу системи накопичення енергії знаходиться в електромобілях, де батареї зазвичай займають багато місця. Що, якщо сама рама основної конструкції автомобіля містила енергію? Щоб створити свою структуровану батарею, дослідники помістили скляну «тканину» між позитивним та негативним електродами, потім заповнили її полімерним електролітом, а потім затвердили в печі. В результаті виходить міцний плоский елемент батареї, який добре проводить електрику та витримує випробування на розтяг у всіх напрямках.

Університет Чалмерса пише в прес-релізі: «Акумулятор має щільність енергії 24 Вт·год/кг, або близько 20% ємності літій-іонних акумуляторів на ринку сьогодні. Однак, оскільки при використанні структурованої батареї автомобіль може бути значно легшим, то йому потрібно менше енергії. Низька щільність енергії також приводить до більшої безпеки елемента. А завдяки своїй жорсткості 25 ГПа структурована батарея може конкурувати з багатьма іншими конструкційними матеріалами, що широко використовуються».

Вчені хочуть замінити алюмінієву фольгу в електроді матеріалом із вуглецевого волокна та зробити сепаратор тоншим. У результаті може вийти батарея, що виробляє 75 Вт·год/кг енергії і має жорсткість 75 ГПа.

Одним з найбільш перспективних потенційних застосувань для цього типу елементів є літаки, де використання електричного двигуна утруднене через вагу батарей. Замість «мертвої» маси акумулятора ми маємо конструктивні елементи, які одночасно виконують дві функції. Винахідники замальовують у перспективі цілі величезні бетонні будинки, здатні накопичувати енергію, як гігантські батареї.

Концепції акумуляторних батарей із цементу вже відомі. Одна з концепцій – додавання до бетонної суміші провідних вуглецевих волокон, що також збільшує механічну міцність (рис.6). Потім суміш поміщали сітку з вуглецевого волокна, покриту металом – залізо в якості анода і нікель в якості катода. Лупін Танг та Емма Чжан з Університету Чалмерса створили прототип із середньою щільністю енергії 7 ват-год/м² (0,8 ват-годин на літр об'єму). Щільність енергії, як і раніше, низька в порівнянні з комерційними батареями, але будівлі масштабні, тому в цілому рахунок виглядає непогано. Такі батареї могли б успішно жити світлодіоди у освітленні, телекомунікаційну інфраструктуру, передавачі та приймачі, особливо у віддалених районах, або забезпечувати катодний захист від корозії у бетонних конструкціях.

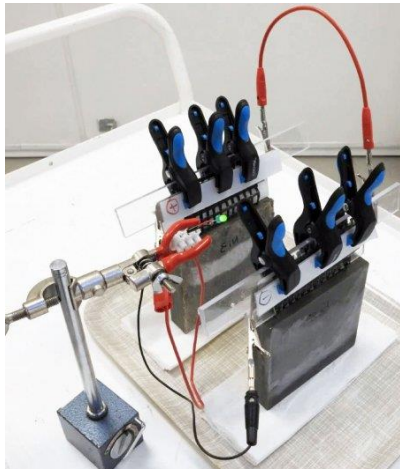


Рис. 6. Прототип батареї з університету Чалмерса на цементній основі

Хіміки Вашингтонського університету в Сент-Луїсі показали, як вони можуть перетворити звичайну червону цеглу на свого роду суперконденсатор, що накопичує енергію. Їхня «розумна цегла» покрита провідним полімером під назвою PEDOT, що складається з нановолокон, які вбираються в пористу структуру цегли, зрештою перетворюючи всю цеглу на «іонну губку», яка проводить і зберігає енергію. У рамках випробувань вчені зарядили шматок цегли до 3 В за 10 секунд, потім на 10 хвилин увімкнули зелений світлодіод, що живиться від своєї цегли (рис.7). Вони вважають, що стіни, зроблені з цих енергоакмулюючих цеглин, можуть зберігати дуже велику кількість енергії. Більше того, діючи як суперконденсатор, ці цеглини можуть заряджатися сотні тисяч разів на годину.



Рис. 7. «Розумні» цеглини та світлодіод

Відомості про авторів / About the authors

Марков Владислав Сергійович (Markov Vladyslav Sergiyovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної електротехніки.

Поляков Ігор Володимирович (Poliakov Ihor Volodymyrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної електротехніки

Крюкова Наталія Валеріївна (Kriukova Nataliya Valeriivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри загальної електротехніки; м. Харків

Висновки. Поки літій-іонні батареї і досі залишаються домінуючими, але може виявитися, що у майбутньому ми будемо використовувати різні типи акумуляторів накопичення та зберігання енергії для різних пристроїв та ситуацій. Огляд різних методів зберігання енергії, над якими в даний час розробляються у світі, призводить до висновку, що будь-яка з розробок напевно не буде універсальним рішенням. Основні проблеми акумуляторів – це безпека та ресурс. Найперспективніші напрями у виробництві акумуляторів, на нашу думку, це твердотільні акумулятори, кремнієві аноди та використання чистого металевого літію.

Список літератури

1. Перетворення та акумулювання енергії відновлюваних джерел: Курс лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ./ КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. І. Будько., М. О. Будько, О. В. Козачук – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 150 с.
2. Електричні мережі з відновлювальними джерелами енергії: навчальний посібник / Добровольська Л.Н., Волинець В.І., Собчук Д.С., Черкашина В.В. // Під редакцією Добровольської Л.Н.– Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2016. – 352 с.
3. <https://electrik.info/main/fakty/1245-pochemu-vzryvayutsya-akkumulyatory.html>
4. <https://electricalschool.info/power/2950-novye-razrabotki-i-issledovaniya-v-oblasti-akkumulyatorov.html>
5. <https://electricalschool.info/guides/2683-novye-akkumulyatory-buduschego.html>

References (transliterated):

1. Peretvorennia ta akumuliuvannia enerhii vidnovliuvanykh dzhерel: Kurs lektsii [Elektronnyi resurs] : navch. posib. dlia stud. KPI im. Ihoria Sikorskoho ; uklad.: V. I. Budko., M. O. Budko, O. V. Kozachuk. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2023. 150 p.
2. Dobrovol'ska L.N., Volynets V.I, Sobchuk D.S., Cherkashyna V.V. Elektrichni merezhi z vidnovliuvalnymy dzhерelamy enerhii: navchalnyi posibnyk. Pid redaktsiieiu Dobrovol'skoi L.N. Lutsk: RVV Lutskoho NTU, 2016. 352 p.
3. <https://electrik.info/main/fakty/1245-pochemu-vzryvayutsya-akkumulyatory.html>
4. <https://electricalschool.info/power/2950-novye-razrabotki-i-issledovaniya-v-oblasti-akkumulyatorov.html>
5. <https://electricalschool.info/guides/2683-novye-akkumulyatory-buduschego.html>

Надійшла (Received) 25.02.2026

Прийнята (Accepted) 04.03.2026

Опублікована (Published) 30.04.2026