

ВИБІР ТЯГОВОЇ БАТАРЕЇ ДЛЯ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

Харламов С.А., Національний транспортний університет, Київ, Україна,
stanyslav.kharlamov@gmail.com, orcid.org/0009-0005-2358-850X

TRACTION BATTERY CHOICE FO ELECTRIC TRANSPORT

Kharlamov S.A., National Transport University (Kyiv), Ukraine, stanyslav.kharlamov@gmail.com,
orcid.org/orcid.org/0009-0005-2358-850X

Постановка проблеми. Нинішня енергетична економіка, заснована на викопному паливі, знаходиться під серйозною загрозою через ряд факторів, включаючи постійне зростання попиту на нафту, виснаження невідновлюваних ресурсів і залежність від політично нестабільних нафтовидобувних країн. Інший тривожний аспект сучасної економіки енергії, яка використовує викопне паливо, пов'язаний з викидами CO₂, які збільшуються з постійною швидкістю, що призводить до підвищення глобальної температури з пов'язаною серією різких змін клімату. Терміновість енергетичного оновлення вимагає використання чистих джерел енергії на набагато вищому рівні, ніж той, який зараз діє.

Проблему CO₂ та, як наслідок, забруднення повітря у великих містах можна вирішити лише шляхом заміни автомобілів з двигуном внутрішнього згорання (ДВЗ) транспортними засобами з нульовим рівнем викидів, тобто електромобілями (EV) або транспортними засобами з контрольованими викидами, тобто повністю гібридні електричні транспортні засоби (HEV) та/або електричні транспортні засоби (PHEV).

Для вирішення проблем щодо заборони використання автобусів з дизельними та бензиновими двигунами внутрішнього згорання на маршрутах громадського транспорту з 2036 року та подальшого забезпечення розвитку електромобілів, 24.02.2023 року Верховна Рада України прийняла Закон № 8172 «Про деякі питання використання транспортних засобів, оснащених електричними двигунами та внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо подолання паливної залежності і розвитку електрозарядної інфраструктури та електричних транспортних засобів».[1]

У всьому світі зростають інвестиції в використання відновлюваних джерел енергії, приділяючи особливу увагу вітровим і сонячним електростанціям (ВЕЕ), які є найбільш зрілими технологіями. Переривчастість цих ресурсів вимагає вискоєфективних систем зберігання енергії. Електрохімічні системи, такі як батареї та суперконденсатори, які можуть ефективно накопичувати та доставляти енергію за потребою в автономних електростанціях, а також забезпечувати якість електроенергії та вирівнювання навантаження електричної мережі в інтегрованих системах, відіграють вирішальну роль у цьому. Дійсно, переваги використання електрохімічних систем зберігання були продемонстровані як для вітрових, так і для фотоелектричних REP[2]. Ефективність батарей у REP безпосередньо пов'язана з їх енергоефективністю та терміном служби. Насправді, завдяки високому значенню енергоефективності літєві батареї забезпечуватимуть коефіцієнт повернення енергії, вищий, ніж той, що забезпечується звичайними батареями, наприклад, свинцево-кислотні акумулятори [3]. На додаток до REP, літій-іонні батареї також розглядаються як джерела енергії вибору для сталого транспорту, оскільки вони вважаються найкращими варіантами, які можуть ефективно гарантувати прогресивне поширення HEV, PHEV та BEV на високих рівнях [4]. У HEV синергетичне поєднання ДВС з електрохімічною батареєю забезпечує високе використання палива з доведеними перевагами для економії палива, а отже, для контролю викидів, а також сприяє їздовим характеристикам, подібним, якщо не кращим, до характеристик автомобілів, що працюють на чистому бензині. Однак проблеми різного характеру все ще перешкоджають широкомасштабному розповсюдженню літій-іонних батарей для застосувань REP та EV. Кілька країн, включаючи Японію, Сполучені Штати та Європу, виділяють значні інвестиції для підтримки науково-дослідних програм,

спрямованих на вирішення цих проблем і, таким чином, сприяють розробці вдосконалених, ефективних літєвих батарей [5].

Перешкоди різного характеру все ще заважають цьому важливому кроку. Вони включають безпеку, термін служби, вартість, широкий діапазон робочих температур і доступність матеріалів.

З іншого боку, внутрішня перевага літєвої технології та її використання на цих ключових ринках, що розвиваються, спонукали світові зусилля вирішити ці проблеми.

Масштабування хімічного складу звичайних літій-іонних акумуляторів з огляду на їх застосування для екологічних транспортних засобів або для заводів, що використовують відновлювані джерела енергії, є проблематичним.

Аналіз відомих публікацій. Ранні роботи з LIB більше зосереджені на фізиці твердого тіла, тоді як ближче до кінця 20-го століття дослідники почали більше зосереджуватися на морфологічних аспектах (покриття поверхні, пористість, розмір і форма) електродних матеріалів.

Питанням розробки потужних, довговічних та безпечних літій-іонних акумуляторів присвячено багато робіт закордонних науковців, а саме: «30 років літій-іонним акумуляторам», Matthew Li, Jun Lu, Zhongwei Chen, Khalil Amine, 14.06.2018 р., «Літєві батареї: від ранніх стадій до майбутнього», Bruno Scrosati, K. M. Abraham, Walter Van Schalkwijk, Jusef Hassoun 20.06. 2013 р., «Літій-СО з тривалим терміном служби» Батарея з вуглецевою нейтральністю», Alireza Ahmadiparidari, Robert E. Warburton, Leila Majidi, Mohammad Asadi, Amir Chamaani, Jacob R. Jokisaari 08.22.2019 р.

У 2019 році лауреатами Нобелівської премії з хімії стали Джон Гуденаф, Стенлі Вітінгем та Акіра Йосіно, які винайшли літій-іонні акумулятори. [6]

Українські вчені також займалися вивченням енергетичної ємності тягових акумуляторних батарей, а саме: Дембіцький Валерій «Дослідження енергетичних показників транспортних засобів з електричним приводом» Академія технічних наук України, Андрусенко С.І. «Математична модель енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї», Абрамов Д.В., Тарасов Ю.В., Ефимчук В.М., НТУ«ХП» «Автомобілебудування» та ін.

Метою даного дослідження є визначити найбільш перспективні аспекти для досягнення важливого рівня розвитку технології літєвих батарей. Проаналізувати переваги та недоліки типових матеріалів LIB, запропонувати оптимальні властивості матеріалу та рівня електродів для швидкої зарядки.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Літєві батареї є одним із великих успіхів сучасної електрохімії. Безсумнівно, вони відіграють відому роль на ринку споживчої електроніки без ризику заміни будь-яким іншим суперником, і завдяки інтелектуальній модифікації компонентів електрода та електроліту вони незабаром домінуватимуть на ринках електричного автомобільного транспорту та зберігання відновлюваної енергії.

Літєві батареї сьогодні є джерелом живлення для ринку портативної електроніки і вважаються найперспективнішою системою живлення для стійкого електричного автомобільного транспорту через їх унікальний енергетичний вміст.

Дійсно, літій-іонні акумулятори є найперспективнішими для використання як тягові батареї для електротранспорту. Визначимо їх переваги та недоліки:

Переваги: найбільша щільність енергії з усіх різновидів акумуляторів – як об'ємна, так і вагова, напруга живлення на елементі – 3,6В, що в 3 рази вище, ніж у NiMH і NiCd акумуляторів і майже в 2 рази вище, ніж для свинцево-кислотних акумуляторів, швидкий процес заряду батарей – до 90% ємності за 30-40 хвилин, високий показник ресурсу – понад 1000 циклів розряду/заряду, низький показник саморозряду – до 5% на місяць, дружність навколишнього середовища – можуть утилізуватися без попередньої переробки.

Недоліки: можливість вибуху при механічному пошкодженні або перезарядженні акумулятора, досить швидке старіння акумулятора – більшість акумуляторів різко знижують свої характеристики при зберіганні або використанні більше 5 років, висока вартість.

За останні 30 років було досягнуто значного комерційного та наукового прогресу в технологіях акумуляторів на основі літію. Від перших ітерацій літій-металевих анодів до поточних комерційних літій-іонних акумуляторів (LIB), історія літій-батарей сповнена проривів і кроків відстеження.

Науковці Дослідницького інституту Honda спільно з вченими з Каліфорнійського технологічного інституту та Лабораторії реактивного руху NASA розробили новий тип електроліту, який дозволить створювати батареї із високою щільністю зберігання заряду та низькою робочою температурою. Результати дослідження опубліковані у журналі Science. [7]

Головний науковий співробітник Інституту досліджень Honda та співавтор роботи Крістофер Брукс, визначили, що фторид-іонні акумулятори (FIB) пропонують новий хімічний склад із щільністю зберігання заряду вдсятеро більше, ніж у нинішніх літій-іонних батареях. Вони не схильні до перегріву, а видобуток сировини для таких батарей не такий руйнівний для навколишнього середовища, як екстракція літію або кобальту. [7] Батареї з твердим електролітом, що проводить іони фтору, існують давно, але вони працюють тільки за високої температури і, по суті, є проміжним етапом розвитку технології. Рідкий електроліт, розроблений Honda, дозволить робити більш безпечні та екологічні акумулятори. У своєму нинішньому розвитку твердотільних фторид-іонних акумуляторів для нормальної роботи потрібна висока температура – понад 150 градусів за Цельсієм.

Команді дослідників вдалося знайти метод отримання фторид-іонного електрохімічного осередку, здатного працювати при значно нижчій температурі. Це стало можливим завдяки створенню хімічно стабільного рідкого електроліту з високою провідністю іонів фтору і широкою робочою напругою. Об'єднавши його з композитним катодом, що використовує осердя з наноструктурою з міді, лантану та фтору, дослідники змогли запустити оборотний електрохімічний цикл при кімнатній температурі. У Honda розраховують, що в майбутньому батареї, створені на основі цього дослідження, можна буде використовуватися в автомобілях. [7]

Більше енергії за більш короткий час за менших витрат і підвищеної безпеки – дослідження батарей завжди прагнули покращити. Значного прогресу було досягнуто в області літій-іонних батарей (LIB) з моменту їх комерціалізації в 1991 році. [8, 9] LIB накопичують більше енергії, що означає, що їхня питома енергія може бути значно збільшена альтернативними катодними матеріалами, досягаючи, наприклад, 421 Вт/кг.–1 використання LiNixCoуMn1–x–yO2 (NCM) порівняно з 279 Вт/кг.–1 оригінального LiCoO2 (LCO).[10]

Крім того, використання твердотільних батарей (SSB), що складаються виключно з твердих компонентів, може дозволити застосовувати літій-металеві аноди (LMA), які можуть запропонувати більш високу густину енергії в порівнянні з батареями з графітовими анодами.[11]

Дійсно, SSB можуть також покращувати механічну стабільність осередку, [12] що робить його більш безпечним, особливо при використанні гнучких полімерних електролітів (ПЕ). Тим не менш, основною проблемою для широкого впровадження електромобілів є швидкість зарядки батарей, тобто LIB займають занадто багато часу для заправки в порівнянні з традиційними транспортними засобами з двигуном внутрішнього згорання. Виходячи з цього досвіду заправки (500-800 км) дальності на заправці всього за п'ять хвилин, очікують подібної практики від електромобілів.[13]

Отже, зарядка до 80% стану заряду (SOC) протягом 15 хвилин є метою Консорціуму передових батарей США (USABC).[14] Для досягнення можливостей швидкої зарядки щільність потужності PV акумуляторних батарей, що використовуються, повинно бути збільшено, що відбувається за рахунок зниження щільності енергії ВтV. Тому завжди є компроміси між широким діапазоном та швидкою зарядкою. Кінетичні моделі акумуляторних елементів показують, що надмірні можливості існують у кожній частині елемента батареї. Від перенесення іонів літію та електронів в електродах, перенесення заряду через межі фаз для транспортування через електроліт, поляризаційні ефекти, що обмежують швидкість зарядки, призводять до покриття металу Li, обмеженого використання активного матеріалу та підвищення температури.[15] Високовольтні зарядні пристрої постійного струму можуть забезпечувати пікову потужність до 350 кВт.[16, 17]. Porsche Taycan з акумулятором потужністю 93,4 кВт-год забезпечує максимальну потужність заряджання 270 кВт, тоді як середній показник під час заряджання становить 187 кВт. [18].

Насправді, підзарядка від 5% до 80% SOC займає 23 хв. Для порівняння, Tesla Model 3 з батареєю потужністю 75 кВт-год заряджається до 80% SOC за 27 хвилин за допомогою власного нагнітача Tesla, що забезпечує пікову потужність 250 кВт у третьому поколінні.

Отже, середня потужність зарядки становить близько 130 кВт, у своїй максимальне значення досягається лише протягом п'яти хвилин протягом початкових 20%.[19]

Звичайно, великі акумуляторні батареї заряджатимуться довше при заданій потужності зарядки. Значить, зарядний пристрій має бути покращено, а також для далеких транспортних засобів з великими акумуляторними батареями. [20]

Ці сучасні параметри, як і раніше, значно нижчі від того, що потрібно для досягнення мети USABC для екстремально швидкої зарядки (XFC): підзарядка протягом 15 хвилин.[14]

Нижче ми докладніше розглянемо матеріали, які застосовуються для досягнення цих значень, щоб визначити кроки з обмеження швидкості.

Розглядаючи приклад Tesla, $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Al}_{0.1}\text{O}_2$ використовуються катода (NCA)[21] у поєднанні з графітовими анодами. Ми припускаємо акумуляторну батарею потужністю 100 кВт-год, що забезпечує дальність руху 500 км. З об'ємом 400 л на системному рівні і 200 л на рівні комірки цей пакет досягає щільності енергії $500 \text{ Вт} \cdot \text{л}^{-1}$ на клітинному рівні. Використовуючи середню напругу 3,7, щільність заряду QV таким чином, становить $135 \text{ А} \cdot \text{ч} \cdot \text{л}^{-1}$.

Якщо припустити товщину електрода 200 мкм (нехтуючи струмознімачами і сепаратором), вийде QA виникає як $2,7 \text{ MA} \cdot \text{h} \cdot \text{cm}^{-2}$, таким чином, приблизно $3 \text{ MA} \cdot \text{h} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Таким чином, необхідна щільність струму для заряджання становить $3 \text{ MA} \cdot \text{cm}^{-2}$ при 1C або $12 \text{ MA} \cdot \text{cm}^{-2}$ (4C), який буде потрібно для досягнення мети XFC в 15 хвилин зарядки.

У зв'язку з дослідженнями швидкої зарядки кілька ключових етапів були визначені як такі, що обмежують швидкість: а) дифузія іонів літію в активному матеріалі анода; б) дифузія іонів літію в активному матеріалі катода (CAM); в) літій-іонний транспорт в електролітній фазі твердої та д) кінетика переносу заряду на межах фаз. У цьому випадку ми визначаємо перенесення заряду як весь процес перенесення між електролітом і електродом, таким чином, він включає дезінсервацію у разі рідких електролітів, фактичне перенесення заряду через кордон розділу електроліт-електрод і, для наявності інтерфазу, також перенесення іонів через цю інтерфазу, що йде разом з двома процесами перенесення заряду через електроліт-інтерфазу та міжфазно-електродний кордон, відповідно.

Вплив літій-іонного транспорту в електроліті досить мало всередині сепаратора, але всередині пористих електродів воно відіграє важливу роль у швидкій зарядній здатності акумуляторного елемента.

З погляду матеріалів, покриття літію на графітовому аноді та дифузія літію в CAM в першу чергу обмежують швидкість. По суті, повільна дифузія літію в рідкому електроліті та активних матеріалах викликає справжні стадії обмеження швидкості. Морфологія, форма та орієнтація частинок активного матеріалу можуть покращити граничний вплив дифузії літію у твердому тілі, що пояснює, наприклад, недавню тенденцію до монокристалічного CAM.[22]

На рівні електродів важливе значення мають розподіл активних частинок за розміром, звивистість і пористість, оскільки перенесення літію на основі дифузії в масштабі електрода сильно залежить від цих параметрів в анодах і меншою мірою в катодах.[16-22] літій-іонна рухливість багато в чому залежить від SOC, [28-32] оскільки кристалічна структура і послідовність дифузійних стрибків зазвичай змінюються із вмістом літію. Хоча висока іонна провідність на матеріальному рівні не обов'язково призводить до швидкозаряджуваного електрода, якщо, наприклад, звивистість висока. Переходячи далі за шкалою розмірів на клітинний рівень, актуальність інженерних аспектів, наприклад, управління тепловими режимами та прикладного протоколу зарядки, має пріоритет над фізико-хімічними властивостями задіяних матеріалів.

$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ може запропонувати значну перевагу у безпеці порівняно з графітовим анодом. Багато дослідників намагаються розробити високу потужність, тривалий термін служби та надзвичайно безпечні літій-іонні хімікати з $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ аноди для гібридних електромобілів (HEV). Літій- CO_2 батареї є привабливими системами зберігання енергії для задоволення потреб майбутніх великомасштабних застосувань, таких як електромобілі, через їх високу питому щільність енергії.

Тим не менш, серйозна проблема з $\text{Li}-\text{CO}_2$ батареї повинні досягти оборотного утворення та розкладання Li_2CO_3 та продукти викиду вуглецю. Повністю оборотний $\text{Li}-\text{CO}_2$ батарея розроблена із загальною вуглецевою нейтральністю з використанням MoS_2 нанопластів як катодного каталізатора у поєднанні з іонним рідким/диметилсульфоксидним електролітом. Ця комбінація матеріалів виробляє багатокомпонентний композит ($\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{C}$) продукт. Батарея показує чудовий тривалий термін

служби 500 для фіксованого 500 мАч g–1 продуктивність на цикл, що набагато перевищує кращу стійкість до циклу, зареєстровану в Li-CO₂ батареї.[32]

Висновки. Літій-іонні акумулятори є найперспективнішими для використання як тягові батареї для електротранспорту. Переваги: найбільша щільність енергії з усіх різновидів акумуляторів – як об'ємна, так і вагова, напруга живлення на елементі – 3,6В, що в 3 рази вище, ніж у NiMH і NiCd акумуляторів і майже в 2 рази вище, ніж для свинцево-кислотних акумуляторів, швидкий процес заряду батареї – до 90% ємності за 30-40 хвилин, високий показник ресурсу – понад 1000 циклів розряду/заряду, низький показник саморозряду – до 5% на місяць, дружність навколишнього середовища – можуть утилізуватися без попередньої переробки. Швидка зарядка вважається ключовою вимогою широкого економічного успіху електромобілів.

Сучасні літій-іонні акумулятори (LIB) забезпечують високу щільність енергії, що забезпечує достатній запас ходу, але для заряджання потрібно значно більше часу, ніж у традиційних транспортних засобів. Численні властивості анодних, катодних і електролітних матеріалів, що застосовуються, впливають на швидку зарядку акумуляторного елемента.

Розглянуто фізико-хімічні основи різних комбінацій матеріалів, що визначають транспорт літію всередині електродів як найважливіші кроки обмеження швидкості швидкої зарядки. Дифузія літію в активних матеріалах за своєю природою уповільнює процес заряджання та викликає високі надлишкові можливості.

Крім того, поляризація концентрації повільним перенесенням літій-іонів у фазі електроліту в пористих електродах також обмежує швидкість заряджання. Обидва кінетичні ефекти відповідальні за покриття літію, що спостерігається на графітових анодах.

Проаналізовано переваги та недоліки типових матеріалів LIB, в результаті чого було запропоновано оптимальні властивості матеріалу та рівня електродів для швидкої зарядки.

Перспективи подальшого дослідження. В статті зазначено, що дослідження технологій зберігання енергії для транспортних засобів, що мають тягову установку з електричним двигуном потребують подальших досліджень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/157-2019-п#Text>
2. Matthew Li, Jun Lu, Zhongwei Chen, Khalil Amine, *30 Years of Lithium-Ion Batteries*, 14.06.2018 <https://doi.org/10.1002/adma.201800561>
3. Bruno Scrosati, K. M. Abraham, *Walter Van Schalkwijk, Jusef Hassoun, Lithium Batteries: From Early Stages to the Future*, 20.06.2013 <https://doi.org/10.1002/9781118615515.ch2>
4. *Li₄Ti₅O₁₂ for powerful, long-lasting and safe Li-ion batteries* Zonghai Chen, I. Belharouac, Yang-Kook Sun, Khalil Amin Book editor(s): Bruno Scrosati, K. M. Abraham, Walter Van Schalkwijk, Youssef Hassoun First published: 20 June 2013
5. *Lithium-CO with a long service life² Carbon neutral battery*. Alireza Ahmadiparidari, Robert E. Warburton, Leila Majidi, Mohammad Asadi, Amir Chamaani, Jacob R. Jokisaari 08/22/2019
6. https://24tv.ua/tech/istoriya_stvorenniya_litiiy_ionnih_batarey_chim_troye_naukovtsiv_zasluzhili_nobelivsku_premiyu_z_himiyi_n1217263
7. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aat7070>
8. a) J. M. Tarascon, M. Armand, *Nature* 2001, 414, 359; b) A. Yoshino, K. Sanekika, T. Nakajima (Asahi Kasei Corp), US 4668595, 1986.
9. J. B. Goodenough, K.-S. Park, *J. Am. Chem. Soc.* 2013, 135, 1167.
10. A. Eftekhari, *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2019, 7, 3684.
11. a) J. Janek, W. G. Zeier, *Nat. Energy* 2016, 1, 16141; b) A. Manthiram, X. Yu, S. Wang, *Nat. Rev. Mater.* 2017, 2, 16103.
12. H. J. Gores, J. Barthel, S. Zugmann, D. Moosbauer, M. Amereller, R. Hartl, A. Maurer, in *Handbook of Battery Materials* (Eds: C. Daniel, J. O. Besenhard), Wiley-VCH, Weinheim, Germany 2011, pp. 525–626.
13. A. Adam, J. Wandt, E. Knobbe, G. Bauer, A. Kwade, *J. Electrochem. Soc.* 2020, 167, 130503.

- 14.A. Tomaszewska, Z. Chu, X. Feng, S. O’Kane, X. Liu, J. Chen, C. Ji, E. Endler, R. Li, L. Liu, Y. Li, S. Zheng, S. Vetterlein, M. Gao, J. Du, M. Parkes, M. Ouyang, M. Marinescu, G. Offer, B. Wu, *eTransportation* 2019, 1, 100011.
- 15.Y. Liu, Y. Zhu, Y. Cui, *Nat. Energy* 2019, 4, 540.
- 16.P. Entwistle, B. Schaper, *Porsche Taycans use IONITY High-Power Charging Stations on International Media Ride and Drive Event*, 2019, http://ionity.eu/_Resources/Persistent/cffc5959e6c98afcbca7d0abe575502911a3b26c/20190911_IONITY_Porsche_Taycan_EN.pdf (accessed: March 2021).
- 17.L. Ulrich, *IEEE Spectrum* 2020, 57, 30.
- 18.C. Kim, A. Lennon, World Premiere of the Porsche Taycan: The Sports Car for a Sustainable Future. PR No. 73/19, 2019, http://press.porsche.com/prod/presse_pag/PressResources.nsf/Content?ReadForm&languageversionid=1021391 (accessed: March 2021).
- 19.a) M. Holland, *Supercharger V3. Shocking Power & Smart Strategy By Tesla* (Charts!), cleantechnica.com/2019/03/08/superchargerv3-shocking-power-smart-strategy-by-tesla-charts/ (accessed: November 2020); b) M. Holland, *Tesla Model 3 On SuperCharger V3. Adds 50% Range In Under 12 Minutes!* (Charts!), cleantechnica.com/2019/06/24/tesla-model-3-on-supercharger-v3-adds-50-range-in-under-12-minutes-charts/ (accessed: November 2020).
- 20.S. Ahmed, I. Bloom, A. N. Jansen, T. Tanim, E. J. Dufek, A. Pesaran, A. Burnham, R. B. Carlson, F. Dias, K. Hardy, M. Keyser, C. Kreuzer, A. Markel, A. Meintz, C. Michelbacher, M. Mohanpurkar, P. A. Nelson, D. C. Robertson, D. Scofield, M. Shirk, T. Stephens, R. Vijayagopal, J. Zhang, *J. Power Sources* 2017, 367, 250.
- 21.K. Du, H. Xie, G. Hu, Z. Peng, Y. Cao, F. Yu, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2016, 8, 17713.
- 22.a) J. Li, A. R. Cameron, H. Li, S. Glazier, D. Xiong, M. Chatzidakis, J. Allen, G. A. Botton, J. R. Dahn, *J. Electrochem. Soc.* 2017, 164, A1534; b) J. E. Harlow, X. Ma, J. Li, E. Logan, Y. Liu, N. Zhang, L. Ma, S. L. Glazier, M. M. E. Cormier, M. Genovese, S. Buteau, A. Cameron, J. E. Stark, J. R. Dahn, *J. Electrochem. Soc.* 2019, 166, A3031; c) Y. Liu, J. Harlow, J. Dahn, *J. Electrochem. Soc.* 2020, 167, 020512.
- 23.J. Landesfeind, J. Hattendorff, A. Ehrl, W. A. Wall, H. A. Gasteiger, *J. Electrochem. Soc.* 2016, 163, A1373.
- 24.S. Malifarge, B. Delobel, C. Delacourt, *J. Electrochem. Soc.* 2017, 164, E3329. [18] I. V. Thorat, D. E. Stephenson, N. A. Zacharias, K. Zaghbi, J. N. Harb, D. R. Wheeler, *J. Power Sources* 2009, 188, 592.
- 25.A. M. Colclasure, A. R. Dunlop, S. E. Trask, B. J. Polzin, A. N. Jansen, K. Smith, *J. Electrochem. Soc.* 2019, 166, A1412.
- 26.H. Zheng, G. Liu, X. Song, P. Ridgway, S. Xun, V. S. Battaglia, *J. Power Sources* 2010, 157, A1060.
- 27.H. Zheng, L. Tan, G. Liu, X. Song, V. S. Battaglia, *J. Power Sources* 2012, 208, 52.
- 28.J. Kasnatscheew, U. Rodehorst, B. Streipert, S. Wiemers-Meyer, R. Jakelski, R. Wagner, I. C. Laskovic, M. Winter, *J. Electrochem. Soc.* 2016, 163, A2943.
- 29.M. S. Whittingham, *Chem. Rev.* 2004, 104, 4271.
- 30.B. L. Ellis, K. T. Lee, L. F. Nazar, *Chem. Mater.* 2010, 22, 691.
- 31.J. K. Ngala, N. A. Chernova, M. Ma, M. Mamak, P. Y. Zavalij, M. S. Whittingham, *J. Mater. Chem.* 2004, 14, 214.
- 32.J.-M. Kim, H.-T. Chung, *Electrochim. Acta* 2004, 49, 937

REFERENCES

1. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/157-2019-п#Text>
2. Matthew Li, Jun Lu, Zhongwei Chen, Khalil Amine, *30 Years of Lithium-Ion Batteries*, 14.06.2018 <https://doi.org/10.1002/adma.201800561>
3. Bruno Scrosati, K. M. Abraham, *Walter Van Schalkwijk, Jusef Hassoun, Lithium Batteries: From Early Stages to the Future*, 20.06.2013 <https://doi.org/10.1002/9781118615515.ch2>

4. *Li4Ti5O12 for powerful, long-lasting and safe Li-ion batteries* Zonghai Chen, I. Belharouac, Yang-Kook Sun, Khalil Amin Book editor(s): Bruno Scrosati, K. M. Abraham, Walter Van Schalkwijk, Youssef Hassoun First published: 20 June 2013
5. *Lithium-CO with a long service life2 Carbon neutral battery.* Alireza Ahmadiparidari, Robert E. Warburton, Leila Majidi, Mohammad Asadi, Amir Chamaani, Jacob R. Jokisaari 08/22/2019
6. https://24tv.ua/tech/istoriya_stvorennaya_litii_ionnih_batarey_chim_troye_naukovtsiv_zasluzhili_nobelivsku_premiyu_z_himiyi_n1217263
7. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aat7070>
8. a) J. M. Tarascon, M. Armand, *Nature* 2001, 414, 359; b) A. Yoshino, K. Sanekika, T. Nakajima (Asahi Kasei Corp), US 4668595, 1986.
9. J. B. Goodenough, K.-S. Park, *J. Am. Chem. Soc.* 2013, 135, 1167.
10. A. Eftekhari, *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2019, 7, 3684.
11. a) J. Janek, W. G. Zeier, *Nat. Energy* 2016, 1, 16141; b) A. Manthiram, X. Yu, S. Wang, *Nat. Rev. Mater.* 2017, 2, 16103.
12. H. J. Gores, J. Barthel, S. Zugmann, D. Moosbauer, M. Amereller, R. Hartl, A. Maurer, in *Handbook of Battery Materials* (Eds: C. Daniel, J. O. Besenhard), Wiley-VCH, Weinheim, Germany 2011, pp. 525–626.
13. A. Adam, J. Wandt, E. Knobbe, G. Bauer, A. Kwade, *J. Electrochem. Soc.* 2020, 167, 130503.
14. A. Tomaszewska, Z. Chu, X. Feng, S. O’Kane, X. Liu, J. Chen, C. Ji, E. Endler, R. Li, L. Liu, Y. Li, S. Zheng, S. Vetterlein, M. Gao, J. Du, M. Parkes, M. Ouyang, M. Marinescu, G. Offer, B. Wu, *eTransportation* 2019, 1, 100011.
15. Y. Liu, Y. Zhu, Y. Cui, *Nat. Energy* 2019, 4, 540.
16. P. Entwistle, B. Schaper, *Porsche Taycans use IONITY High-Power Charging Stations on International Media Ride and Drive Event*, 2019, http://ionity.eu/_Resources/Persistent/cffc5959e6c98afcbca7d0abe575502911a3b26c/20190911_IONITY_Porsche_Taycan_EN.pdf (accessed: March 2021).
17. L. Ulrich, *IEEE Spectrum* 2020, 57, 30.
18. C. Kim, A. Lennon, World Premiere of the Porsche Taycan: The Sports Car for a Sustainable Future. PR No. 73/19, 2019, http://press.porsche.com/prod/presse_pag/PressResources.nsf/Content?ReadForm&languageversionid=1021391 (accessed: March 2021).
19. a) M. Holland, *Supercharger V3. Shocking Power & Smart Strategy By Tesla* (Charts!), cleantechnica.com/2019/03/08/superchargerv3-shocking-power-smart-strategy-by-tesla-charts/ (accessed: November 2020); b) M. Holland, *Tesla Model 3 On SuperCharger V3. Adds 50% Range In Under 12 Minutes!* (Charts!), cleantechnica.com/2019/06/24/tesla-model-3-on-supercharger-v3-adds-50-range-in-under-12-minutes-charts/ (accessed: November 2020).
20. S. Ahmed, I. Bloom, A. N. Jansen, T. Tanim, E. J. Dufek, A. Pesaran, A. Burnham, R. B. Carlson, F. Dias, K. Hardy, M. Keyser, C. Kreuzer, A. Markel, A. Meintz, C. Michelbacher, M. Mohanpurkar, P. A. Nelson, D. C. Robertson, D. Scofield, M. Shirk, T. Stephens, R. Vijayagopal, J. Zhang, *J. Power Sources* 2017, 367, 250.
21. K. Du, H. Xie, G. Hu, Z. Peng, Y. Cao, F. Yu, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2016, 8, 17713.
22. a) J. Li, A. R. Cameron, H. Li, S. Glazier, D. Xiong, M. Chatzidakis, J. Allen, G. A. Botton, J. R. Dahn, *J. Electrochem. Soc.* 2017, 164, A1534; b) J. E. Harlow, X. Ma, J. Li, E. Logan, Y. Liu, N. Zhang, L. Ma, S. L. Glazier, M. M. E. Cormier, M. Genovese, S. Buteau, A. Cameron, J. E. Stark, J. R. Dahn, *J. Electrochem. Soc.* 2019, 166, A3031; c) Y. Liu, J. Harlow, J. Dahn, *J. Electrochem. Soc.* 2020, 167, 020512.
23. J. Landesfeind, J. Hattendorff, A. Ehrl, W. A. Wall, H. A. Gasteiger, *J. Electrochem. Soc.* 2016, 163, A1373.
24. S. Malifarge, B. Delobel, C. Delacourt, *J. Electrochem. Soc.* 2017, 164, E3329. [18] I. V. Thorat, D. E. Stephenson, N. A. Zacharias, K. Zaghbi, J. N. Harb, D. R. Wheeler, *J. Power Sources* 2009, 188, 592.
25. A. M. Colclasure, A. R. Dunlop, S. E. Trask, B. J. Polzin, A. N. Jansen, K. Smith, *J. Electrochem. Soc.* 2019, 166, A1412.
26. H. Zheng, G. Liu, X. Song, P. Ridgway, S. Xun, V. S. Battaglia, *J. Power Sources* 2010, 157, A1060.

27. H. Zheng, L. Tan, G. Liu, X. Song, V. S. Battaglia, J. Power Sources 2012, 208, 52.
28. J. Kasnatscheew, U. Rodehorst, B. Streipert, S. Wiemers-Meyer, R. Jakelski, R. Wagner, I. C. Laskovic, M. Winter, J. Electrochem. Soc. 2016, 163, A2943.
29. M. S. Whittingham, Chem. Rev. 2004, 104, 4271.
30. B. L. Ellis, K. T. Lee, L. F. Nazar, Chem. Mater. 2010, 22, 691.
31. J. K. Ngala, N. A. Chernova, M. Ma, M. Mamak, P. Y. Zavalij, M. S. Whittingham, J. Mater. Chem. 2004, 14, 214.
32. J.-M. Kim, H.-T. Chung, Electrochim. Acta 2004, 49, 937

РЕФЕРАТ

Харламов С.А. Вибір тягової акумуляторної батареї для електротранспорту / С.А. Харламов // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий журнал. – К.: НТУ, 2023. – Вип. 1 (55).

У статті визначені найбільш перспективні аспекти для досягнення важливого рівня розвитку технології літєвих батарей.

Метою дослідження є визначення найбільш перспективних аспектів для досягнення важливого рівня розвитку технології літєвих батарей.

Мета роботи – запропонувати оптимальні властивості матеріалу та рівня електродів для швидкої зарядки літєвих батарей.

Об'єкт роботи – фізико-хімічні основи різних комбінацій матеріалів, що визначають транспорт літію всередині електродів.

Метод дослідження – аналіз оптимальних властивостей матеріалу та рівня електродів для швидкої зарядки.

В статті проведено аналіз результатів наукових досліджень українських та закордонних науковців, роботи яких присвячені питанням розробки потужних, довговічних та безпечних літій-іонних акумуляторів з новим типом електроліту.

У статті на основі проведеного аналізу пропонується вибір тягової батареї для використання в електротранспорті.

Важливо, що розглянуто переваги та недоліки типових матеріалів літій-іонних батарей.

Очевидно, що результати дослідження дозволять створювати батареї із високою щільністю зберігання заряду та низькою робочою температурою.

Таким чином, вирішення проблеми забруднення повітря у великих містах можливо шляхом заміни автомобілів з двигуном внутрішнього згорання електричними транспортними засобами з літій-іонними акумуляторами.

Стаття рекомендована для фахівців з електротранспорту та профільного машинобудування, які займаються проблемами екологічної безпеки транспорту, зокрема електромобілів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТ, ТЯГОВА БАТАРЕЯ, ЕНЕРГЕТИЧНА ЕМНІСТЬ, ЗАРЯДНІ ПРИСТРОЇ, ЛІТІЙ-ІОННІ АКУМУЛЯТОРИ, РІДКИЙ ЕЛЕКТРОЛІТ.

ABSTRACT

Kharlamov S.A. Traction battery choice for electric transport. Visnyk National Transport University. Series «Technical Sciences». Scientific journal. – Kyiv: National Transport University, 2022. – Issue 1 (55).

The article identifies the most promising aspects for achieving an important level of development of lithium battery technology.

The main objective goal of the article is to determine the most promising aspects for achieving an important level of development of lithium battery technology.

The purpose of the work is to propose optimal properties of the material and the level of electrodes for fast charging of lithium batteries.

The object of the work is the physical and chemical basis of various combinations of materials that determine the transport of lithium inside the electrodes.

The research method is an analysis of optimal material properties and the level of electrodes for fast charging.

The article analyzes the results of scientific research by Ukrainian and foreign scientists, whose work is devoted to the development of powerful, durable and safe lithium-ion batteries with a new type of electrolyte.

Based on the analysis, the article proposes the choice of a traction battery for use in electric transport. Importantly, the advantages and disadvantages of typical lithium-ion battery materials are discussed.

Obviously, the research results will allow creating batteries with high charge storage density and low operating temperature.

Thus, solving the problem of air pollution in large cities is possible by replacing cars with an internal combustion engine with electric vehicles with lithium-ion batteries.

The article is recommended for specialists in electric transport and specialized mechanical engineering, who deal with the problems of environmental safety of transport, in particular, electric cars.

The article identifies the most promising aspects for achieving an important level of development of lithium battery technology.

The advantages and disadvantages of typical LIB materials are analyzed, the optimal properties of the material and the level of electrodes for fast charging are proposed.

KEYWORDS: ELECTRIC TRANSPORT, TRACTION BATTERY, ENERGY CAPACITY, CHARGING DEVICES, LITHIUM-ION BATTERIES, LIQUID ELECTROLYTE

АВТОР:

Харламов Станіслав Анатолійович, аспірант, наукова спеціальність 274 «Автомобільний транспорт» Національний транспортний університет, e-mail: stanyslav.kharlamov@gmail.com, тел. +380992281768, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича -Павленка, 1, к. 306, <http://orcid.org/0009-0005-2358-850X>.

AUTHOR:

Kharlamov Stanyslav, postgraduate of scientific specialty 274 «Automotive transport», National Transport University, e-mail: stanyslav.kharlamov@gmail.com, tel. +380992281768, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, of. 306, <http://orcid.org/0009-0005-2358-850X>.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Дембицкий В.М., кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету, м. Луцьк, Україна.

Поляков В.М., професор кафедри автомобілів, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна.

REVIEWERS:

Dembitsky V.M., PhD in Technical Science, candidate of technical sciences, associate professor of the department of automobiles and transport technologies of the Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine.

Poljakov V.M., Professor of the Department of Automobiles, PhD in Technical Science, associate professor, National Transport University, Kyiv, Ukraine.