

УДК 621.3+608+51.7

В.Ю. СКОСАР, С.В. БУРИЛОВ, В.О. ДЗЕНЗЕРСЬКИЙ
Інститут транспортних систем і технологій НАН України

МОДЕЛЮВАННЯ ВІНАХІДНИЦЬКОГО ПРОЦЕСУ НА ПРИКЛАДІ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ

Моделювання винахідницького процесу розробки літій-іонних акумуляторів є актуальним напрямком досліджень, оскільки таке моделювання дозволяє краще бачити шляхи пошуку сильних винахідницьких рішень. Крім того, таке моделювання допомагає винахіднику подолати психологічну інерцію, підвищити ефективність наукових досліджень і конструкторсько-технологічних розробок, дозволяє зменшити тривалість винахідницького процесу. У роботі проведено ретроспективний аналіз винахідницького процесу розробки літій-іонних акумуляторів з позиції теорії розв'язання винахідницьких завдань. Запропоновано якісні моделі досліджуваної технічної системи, а також процесу її модернізації. Виявлено технічні протиріччя, які стимулювали винахідницьку роботу розробників перших літій-іонних акумуляторів, а також способи подолання цих протиріч. Відзначено, що вибір літію в якості активного металу відповідав прагненню до ідеального кінцевого результату, відповідно до теорії розв'язання винахідницьких завдань. Отримані якісні математичні моделі представлені у вигляді традиційних діаграм, відповідно до теорії розв'язання винахідницьких завдань. На основі якісних моделей виділені технічні протиріччя в сучасних літій-іонних акумуляторах. Запропоновано спосіб подолання зазначених технічних протиріч, зокрема, запропоновано формальне рішення задачі підвищення безпеки літій-іонних акумуляторів і здатності їх швидко заряджатися. Зазначене формальне рішення помітно скоротило пошук конкретного технічного рішення - зміна структури сепаратора і модернізація активних мас анода і катода шляхом механоактивації вихідних порошкових матеріалів. Це дозволило підвищити безпеку лабораторних зразків літій-іонних акумуляторів, а також їх здатність швидко заряджатися. Зроблено висновок, що моделювання винахідницького процесу дозволяє направити творчий пошук в потрібне русло, скоротити тривалість винахідницького процесу, домогтися сильних винахідницьких рішень. При цьому, звичайно, формальне рішення, отримане за допомогою моделювання, не замінить конкретного технічного рішення, що передбачає використання конструкторсько-технологічних інновацій.

Ключові слова: якісна математична модель винахідницького процесу, теорія вирішення винахідницьких задач, розробка літій-іонного акумулятора.

В.Ю. СКОСАРЬ, С.В. БУРЫЛОВ, В.А. ДЗЕНЗЕРСКИЙ
Институт транспортных систем и технологий НАН Украины

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКОГО ПРОЦЕССА НА ПРИМЕРЕ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Моделирование изобретательского процесса разработки литий-ионных аккумуляторов является актуальным направлением исследований, поскольку такое моделирование позволяет лучше видеть пути поиска сильных изобретательских решений. Кроме того, такое моделирование помогает изобретателю преодолеть психологическую инерцию, повысит эффективность научных исследований и конструкторско-технологических разработок, позволяет сократить продолжительность изобретательского процесса. В работе проведен ретроспективный анализ изобретательского процесса разработки литий-ионных аккумуляторов с позиции теории решения изобретательских задач. Предложены качественные модели исследуемой технической системы, а также процесса ее модернизации. Выявлены технические противоречия, которые стимулировали изобретательскую работу разработчиков первых литий-ионных аккумуляторов, а также способы преодоления этих противоречий. Отмечено, что выбор лития в качестве активного металла соответствовал стремлению к идеальному конечному результату, согласно теории решения изобретательских задач. Полученные качественные математические модели представлены в виде традиционных диаграмм, согласно теории решения изобретательских задач. На основе качественных моделей выделены технические противоречия в современных литий-ионных аккумуляторах. Предложен способ преодоления указанных технических противоречий, в частности, предложено формальное решение задачи повышения безопасности литий-ионных аккумуляторов и способности их быстро заряжаться. Указанное формальное решение заметно сократило поиск конкретного технического решения – изменение структуры сепаратора и модернизация активных масс анода и катода путем

механоактивации исходных порошковых материалов. Это позволило повысить безопасность лабораторных образцов литий-ионных аккумуляторов, а также их способность быстро заряжаться. Сделан вывод, что моделирование изобретательского процесса позволяет направить творческий поиск в нужное русло, сократить продолжительность изобретательского процесса, добиться сильных изобретательских решений. При этом, конечно, формальное решение, полученное с помощью моделирования, не заменит конкретного технического решения, предусматривающего использование конструкторско-технологических инноваций.

Ключевые слова: качественная математическая модель изобретательского процесса, теория решения изобретательских задач, разработка литий-ионного аккумулятора.

V.Yu. SKOSAR, S.V. BURYLOV, V.O. DZENZERSKIY
Institute of Transport Systems and Technologies of the
National Academy of Sciences of Ukraine

SIMULATION OF THE INVENTION PROCESS ON THE EXAMPLE OF LITHIUM-ION BATTERIES

Modeling the inventive process of developing lithium-ion batteries is an urgent area of research. This kind of modeling allows you to better see the ways to find strong inventive solutions. In addition, such modeling helps the inventor to overcome psychological inertia, increase the efficiency of scientific research and design and technological development. Such modeling allows to reduce the duration of the inventive process. The paper presents a retrospective analysis of the inventive process of developing lithium-ion batteries from the standpoint of the theory of inventive problem solving. Qualitative models of the studied technical system, as well as the process of its modernization, are proposed. The article identifies the technical contradictions that stimulated the inventive work of the developers of the first lithium-ion batteries, as well as the ways to overcome these contradictions. It is noted that the choice of lithium as an active metal corresponded to the desire for an ideal final result, according to the theory of inventive problem solving. The obtained qualitative mathematical models are presented in the form of traditional diagrams, according to the theory of inventive problem solving. On the basis of qualitative models, technical contradictions in modern lithium-ion batteries are highlighted. A method for overcoming these technical contradictions is proposed, in particular, a formal solution to the problem of increasing the safety of lithium-ion batteries and their ability to quickly charge is proposed. This formal solution significantly reduced the search for a specific technical solution - changing the structure of the separator and modernizing the active masses of the anode and cathode by mechanically activating the original powder materials. This has improved the safety of laboratory samples of lithium-ion batteries, as well as their ability to quickly charge. It is concluded that the modeling of the inventive process allows you to direct the creative search in the right direction, reduce the duration of the inventive process, and achieve strong inventive solutions. At the same time, of course, a formal solution obtained with the help of modeling will not replace a specific technical solution involving the use of design and technological innovations.

Keywords: qualitative mathematical model of the inventive process, theory of inventive problem solving, development of a lithium-ion battery.

Постановка проблеми

Розробки літій-іонних акумуляторів інтенсивно ведуться кілька десятків років, але ще є чимало можливостей для удосконалення активних матеріалів електродів і електроліту. В активних матеріалах електродів можуть використовуватися такі хімічні елементи: літій, кобальт, нікель, залізо, марганець, кисень, фосфор, карбон. Так активний матеріал катоду містить оксиди літію-кобальту-нікелю-марганцю або фосфат літію-заліза. Активний матеріал аноду містить карбон спеціальної структури. Для електроліту можуть використовуватися розчини солей літію в органічних розчинниках. Інтеркаляція і деінтеркаляція іонів літію в активних матеріалах забезпечує високу питому енергію акумуляторів, тому літій-іонні акумулятори найбільш ефективні в багатьох галузях господарства. Але сучасна техніка потребує підвищення безпеки акумуляторів і їх здатності швидко заряджатися. Можливість швидкого заряджання дуже важлива для користувачів електромобілів, на яких розташовані літій-іонні акумулятори.

Процес розробки і вдосконалення літій-іонних акумуляторів дуже складний і потребує врахування багатьох факторів, тому такі роботи потребують багато інтелектуальних ресурсів і часу. Тем не менш ця винахідницька діяльність може бути інтенсифікована шляхом формалізації і моделювання в руслі теорії вирішення винахідницьких задач.

Тому моделювання винахідницького процесу розробки літій-іонних акумуляторів задля підвищення ефективності розробки і покращення конкретних технічних характеристик акумуляторів є актуальною науково-практичною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідники вже давно робили спроби розробити акумулятори на основі активного лужного металу літію, тому що літій характеризується високою хімічною активністю і дає можливість акумулювати значну кількість електричної енергії. Перші фундаментальні дослідження в галузі літій-іонних акумуляторів (1912 р.) зв'язані з ім'ям відомого американського фізико-хіміка Гілберта Л'юїса [1-2]. Перші працюючі літій-іонні акумулятори були розроблені на початку 1970-х років британсько-американським хіміком Стенлі Віттінгхемом. Анод – металевий літій, катод – сульфід титану, електроліт – перхлорат літію (розчинник – диоксолан). Акумулятори характеризувалися напругою 2 В і питомою енергією 45 Вт·год/кг. Було розпочато серійне виробництво таких акумуляторів, але потім воно було зупинено, оскільки акумулятори були небезпечні, стали відомі випадки загорянь і вибухів. Це зумовлено нестійкістю хімічно активного металевого літію, ростом дендритів металевого літію, що провокувало короткі замикання і вибухи. В 1980 р. германсько-американський хімік Джон Гуденаф розробив літій-іонний акумулятор, в якому на катоді сульфід титану замінив на оксид літію-кобальту. Це дозволило підвищити напругу на акумуляторі до більш 4 В і, відповідно, підвищити питому енергію (більш 90 Вт·год/кг). Але металевий літійовий анод остався недоліком літій-іонного акумулятору, тому що не вирішено проблему безпеки [2-3]. І тільки в 1985 р. японський дослідник в галузі матеріалознавства і хімії Акіра Єсіно розробив перший комерційний літій-іонний акумулятор, котрий стала виробляти компанія Sony. Він замінив на аноді металевий літій на графітоподібний кокс, котрий є продуктом термічної обробки нафти. В результаті літій-іонні акумулятори Sony характеризувалися напругою 4,1 В і питомою енергією 80 Вт·год/кг або 200 Вт·год/літр. Ще до Акіри Єсіно хіміки робили спроби зробити графітовий анод, але графіт зменшував питому енергію і довговічність акумулятора, оскільки він руйнувався в розчинах електроліту. Пізніше Джон Гуденаф розробив літій-залізо-фосфатний катод, як альтернативу оксиду літію-кобальту [2-3]. Як відомо, за розробку літій-іонних акумуляторів в 2019 р. було присуджено нобелівську премію по хімії Джону Гуденафу, Стенлі Віттінгхему і Акіри Єсіно. Це є скорочена історія розробки літій-іонного акумулятора. Але історія розробки і вдосконалення цього акумулятора ще не закінчена. Продовжуються дослідження з метою вдосконалення літій-залізо-фосфатного катода [4-5], продовжуються розробки катода з оксиду літію-марганцю [6]. Крім того, ведуться активні розробки електролітних систем для літій-іонних акумуляторів – сюди включаються солі літію, органічні розчинники і добавки. В зв'язку з цим можна сподіватися на нові досягнення в покращенні технічних характеристик літій-іонних акумуляторів [7]. Сучасні літій-іонні акумулятори характеризуються питомою енергією 110-250 Вт·год/кг, що є фактично максимальною зі всіх акумуляторів, які серійно виробляються [1]. Але, не зважаючи на всі досягнення, до сьогоднішнього часу існує необхідність в підвищенні безпеки літій-іонних акумуляторів і їх здатності швидко заряджатися.

Процес розробки і вдосконалення літій-іонних акумуляторів дуже складний і реалізується завдяки наявності в розвинених країнах сучасних науково-дослідних лабораторій, які оснащені найкращим обладнанням, і наявності високо кваліфікованого наукового та інженерного персоналу. І при цьому дослідні та конструкторські роботи потребують багато інтелектуальних ресурсів і часу. Тем не менш, ця винахідницька діяльність може бути інтенсифікована шляхом формалізації і моделювання згідно теорії вирішення винахідницьких задач [8]. При цьому винахідницький процес може бути представлено у вигляді діаграм, котрі відображають якісну модель, яка досліджує об'єкт-систему, згідно класифікації математичних моделей, наведеної в [9].

Мета дослідження

Метою даного дослідження є моделювання винахідницького процесу розробки літій-іонних акумуляторів, а також, за допомогою моделювання, вирішення завдання підвищення безпеки акумуляторів і їх здатності швидко заряджатися.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розглянемо процес розробки Стенлі Віттінгхемом перших працюючих літій-іонних акумуляторів. На рис.1 проілюструємо якісну модель акумулятора, наприклад, свинцево-кислотного.

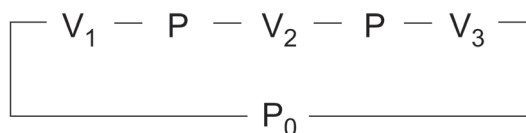


Рис. 1. Якісна модель акумулятора, яка відображає його структуру

На діаграмі (рис. 1) «речовина» V_1 взаємодіє з «полем» P , ця взаємодія зображено лінією. «Поле» P взаємодіє з «речовиною» V_2 , що також зображено лінією. «Поле» P взаємодіє також з «речовиною» V_3 . Якщо акумулятор підключено до зовнішньої навантаженні, то «речовини» V_1 і V_3 взаємодіють також з «полем» P_0 . Розшифруємо. Згідно [8], під «речовинами» V_1 , V_2 і V_3 в даному випадку означені анод, сепаратор і катод. «Речовиною» може бути любий об'єкт, або елемент технічної системи. «Поле» може бути як фізичне поле (електромагнітне, гравітаційне), так і поле фізичних параметрів речовини (акустичне поле, теплове поле, поле деформацій та інше). В даному випадку ми розповсюджуємо поняття «поле» на електроліт акумулятора, оскільки в ньому проходять потоки іонів і других частинок, що аналогічно потоку тепла в тепловому полі. До речі, в електроліті також проходять потоки тепла. Поняття «поле» треба також приложити до потоку електричних зарядів крізь зовнішнє навантаження. Тому P , P_0 в даному випадку означені електроліт акумулятора і електричний струм крізь зовнішнє навантаження.

Якщо ми розглядаємо свинцево-кислотний акумулятор, котрий гарно відомий, то треба розуміти, що ключовим металом в ньому є свинець. Атом свинцю на одному електроді може віддати два електрона, а на другому електроді ці два електрона прийняти, забезпечивши протікання струму [10]. Але свинець характеризується великою молярною масою – 207 г/моль. Протікання електричного заряду $2e$ забезпечено наявністю двох атомів свинцю в акумуляторі, тобто маємо відношення заряду до маси – $2e/207$. На практиці це означає, що свинцево-кислотні акумулятори мають велику вагу, тобто на одиницю маси мають малу енергію (25-40 Вт·год/кг), яка є практично мінімальною зі всіх серійних акумуляторів [1].

Для підвищення питомої енергії акумулятора необхідно вирішити «технічне протиріччя», згідно [8]: між здатністю металу свинцю віддавати і прийняти електрони і

великою молярною масою свинцю. Якщо довести наше протиріччя до крайнього ступеню, то ми отримаємо «фізичне протиріччя», згідно [8]: метал повинен бути в акумуляторі і... не повинен бути, щоб не добавляти ваги. Тобто винахіднику треба досягти «ідеального кінцевого результату», згідно [8], коли метал здатен віддавати і приймати електрони, причому такої метал не має маси (ваги). Зі всіх металів найкращий, який наближається до «ідеального кінцевого результату», є літій. Тому що іон літію здатен забезпечити протікання електричного заряду e , але має мінімальну молярну масу зі всіх металів – 7 г, тобто маємо відношення заряду до маси – $e/7$. Як бачимо, це відношення для літію приблизно в 15 разів більше, ніж для свинцю ($2e/207$).

Тому Стенлі Віттінгхем зробив те, що схематично зображено на рис. 2, і отримав перший літій-іонний акумулятор, в котрому свинець замінено на літій, а також зроблені інші важливі зміни.

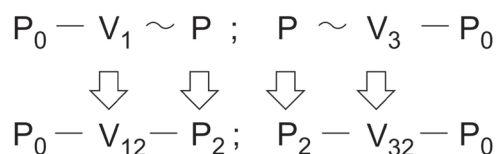


Рис. 2. Якісна модель розробки літій-іонного акумулятора, згідно принципам «вепольного аналізу»

На діаграмі (рис. 2) у верхньому рядку наведені «веполі», згідно [8], які відповідають головним елементам технічної системи, які потребують модернізації. Ми беремо першу діаграму (рис. 1) і переносимо на рис. 2 наступні елементи: «веполь» - електричний струм (P_0) від аноду, анод (V_1), електроліт (P), а також «веполь» - електроліт (P), катод (V_3), електричний струм (P_0) до катоду. Тоді як інші елементи з першої діаграми (рис. 1) нас не цікавлять, оскільки сепаратор (V_2) виконує в даному випадку другорядну функцію. Згідно принципам «вепольного аналізу» треба призвести, наприклад, заміну тих «речовин» і «полів», які не забезпечують задовільну взаємодію. Така взаємодія означено хвилястими лініями. «Поле» P_0 , яке означає перенос електричних зарядів назовні від акумулятора, в першому приближенні задовільно взаємодіє з анодом (V_1) і катодом (V_3) акумулятора. Зміни проведено для аноду (V_1), катоду (V_3) і електроліту (P). Результат змін наведено у нижньому рядку діаграми (рис. 2), де хвилясті лінії тепер змінено на прямі лінії. Новий анод, електроліт і катод означено, як V_{12} , P_2 і V_{32} . Як відомо, в акумуляторі Стенлі Віттінггема анод був у вигляді металевого літію, а катод – сульфиду титану, котрий здатен забезпечити інтеркаляцію і деінтеркаляцію іонів літію (прийом і віддачу) в пустоти своєї кристалічної структури.

Аналогічно були зроблені зміни в матеріалах катоду і аноду другими винахідниками - Джон Гуденафом і Акіра Єсіно, відповідно. В результаті карбоновий анод сучасного літій-іонного акумулятору, як і катод, також здатен забезпечити інтеркаляцію і деінтеркаляцію іонів літію в пустоти своєї кристалічної структури.

Але потреби сучасної техніки диктують нові вдосконалення літій-іонного акумулятору. Рівень безпеки літій-іонних акумуляторів ще не задовольняє користувачів, також не задовольняє повільна зарядка акумуляторів, що погіршує умови експлуатації електромобілів, де розміщено такі акумулятори. Тому автори цієї роботи проводили дослідження в напрямку, який означено на третьої діаграмі (рис. 3). Ми беремо за основу першу діаграму (рис. 1) і переносимо на рис. 3 практично всю якісну модель літій-іонного акумулятора, за винятком зовнішнього навантаження і взаємодії з «полем» P_0 , які нам зараз не цікаві. Верхній рядок рис. 3 демонструє наступне: анод і катод акумулятора є «речовини» V_1 і V_3 , сепаратор акумулятора – «речовина» V_2 , електроліт акумулятора «поле» P , тому що він забезпечує потік іонів літію і других

частинок. Взаємодія між анодом V_1 і електролітом P означено, як хвиляста лінія, бо така взаємодія нас не задовольняє. Аналогічна ситуація з V_3 і P . Взаємодія, з боку аноду, між електролітом P і сепаратором V_2 також нас не задовольняє, тому означено, як хвиляста лінія. І тільки взаємодія, з боку катода, між електролітом P і сепаратором V_2 є задовільною, тому означено, як пряма лінія (див. рис 3, верхній рядок).

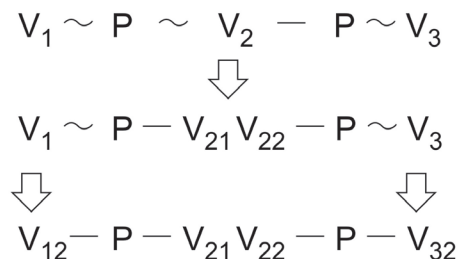


Рис. 3. Якісна модель вдосконалення літій-іонного акумулятора

В нас є перше технічне протиріччя: «речовина» V_2 повинна бути «прозорою» для «поля» P і, одночасно, не повинна бути «прозорою». Вся згадана термінологія, згідно теорії вирішення винахідницьких задач.

Розшифруємо. Сепаратор (V_2) повинен задовільно пропускати іони літію, але не повинен пропускати групи атомів літію з боку аноду, інакше від анода крізь сепаратор ростуть дендрити металевого літію, що веде до короткого замикання і, навіть, до спалаху і вибуху акумулятора. Якісна модель на діаграмі (рис. 3) підказує, що ми можемо зробити задовільною взаємодію, з боку аноду, електроліту (P) з сепаратором (V_2). Це можливо зробити, згідно [8], шляхом заміни «речовини» V_2 за структурою на дві «речовини» $V_{21} V_{22}$ (див. рис 3, середній рядок). Вкажемо конкретно. Сепаратор (V_2) буде виконано з двох шарів (V_{21} і V_{22}), в даному випадку пористість одного шару (V_{21}) буде меншою (30-40%), а пористість другого шару (V_{22}) буде більшою (60-80%). Причому товщина першого шару (V_{21}) буде, як правило, меншою (30-50 мкм), а товщина другого шару (V_{22}), відповідно, буде більшою (40-70 мкм), а сумарна товщина двох шарів сепаратору ($V_{21} V_{22}$) повинна бути в конкретному діапазоні (90-100 мкм). Завдяки зменшеній пористості першого шару (V_{21}), котрий розташовано щільно до аноду (V_1), сепаратор практично не пропускає групи атомів літію від аноду, тобто не дає росту металевим дендритам. Але, завдяки зменшеній товщині першого шару (V_{21}), сепаратор задовільно пропускає іони літію.

В нас є друге технічне протиріччя: «речовини» V_1 і V_3 повинні активно взаємодіяти з «полем» P задля забезпечення швидкого заряджання, і, одночасно, не повинні активно взаємодіяти, щоб призупинити деградацію електродів. Розшифруємо. Анод (V_1) і катод (V_3) акумулятора повинні забезпечити інтеркаляцію і деінтеркаляцію іонів літію з електроліту (P) в активних матеріалах, але анод і катод не повинні піддаватися деградації в електроліті P . Якісна модель на діаграмі (рис. 3) підказує, що ми можемо зробити задовільною взаємодію аноду (V_1) з електролітом (P) і катода (V_3) з електролітом (P). Це можливо зробити, згідно [8], шляхом заміни «речовин» V_1 і V_3 на «речовини» V_{12} і V_{32} , відповідно (див. рис 3, нижній рядок). Вкажемо конкретно. Активні матеріали аноду і катода будуть модифіковані шляхом змін в технологіях виготовлення активних матеріалів. З метою спрощення ми не будемо тут розглядати подробиці технологічних змін. Скажемо лише, що модифікації активних матеріалів для аноду (V_1) і катода (V_3) зроблені шляхом механоактивації порошоків активних матеріалів у розмельних пристроях.

Попередні випробування літій-іонних комірок, які виготовлено за новою технологією і конструкцією, демонструють перспективність означеної вище розробки.

Нові літій-іонні акумулятори повинні характеризуватися підвищенням безпеки експлуатації і здатністю акумуляторів швидко заряджатися, наприклад, на електротранспорті: електромобілях, гібридних автомобілях, метрополітені, тролейбусах, трамваях, електропоїздах. Такий результат винахідницького процесу, можливо, може бути досягнуто інтуїтивним пошуком і перебором багатьох варіантів, але використання якісної математичної моделі в даному випадку суттєво спростило дослідження і скоротило їх час.

Висновки

Запропонована математична модель винахідницького процесу скоротила час пошуку винахідницького рішення, яке зняло низку технічних протиріч (в даному випадку для спрощення вказано лише два технічних протиріччя). Це продемонстровано на прикладі літій-іонних акумуляторів, на яких вдалося досягти підвищення безпеки експлуатації і швидкості заряджання (згідно попереднім випробуванням).

Моделювання винахідницького процесу направляє творчий пошук в таке русло, де діяльність винахідника стає більш ефективною. Використання методів теорії вирішення винахідницьких задач допомагає подолати психологічну інерцію. Це не означає, що формальні моделі можуть повністю замінити собою діяльність живих людей, котрі вирішують складні конструкторські та технологічні завдання. Також це не означає, що формальні методи зняття технічних протиріч можуть повністю замінити пошук реальних конструктивних і технологічних рішень. Але користь такого моделювання не повинна визивати сумнівів. Математична модель винахідницького процесу в перспективі може застосовуватися в системах штучного інтелекту.

Список використаної літератури

1. Кулова Т.Л., Николаев И.И., Фатеев В.Н., Алиев А.Ш. Современные электрохимические системы аккумулярования энергии. *Kimya Problemleri (Chemical Problems)*, 2018. №1. С. 9-34
2. Жданова Е. Зарядились до «Нобеля». Сайт «За науку». URL: <https://zanauku.mipt.ru/2019/12/12/zaryadilis-do-nobelya>. (дата звернення: 31.05.2021).
3. Королев В. Заряженный «Нобель». Долгожданная премия за аккумуляторы, которые есть в каждом доме. URL: <https://nplus1.ru/material/2019/10/09/nobelch>. (дата звернення: 31.05.2021).
4. Бурмистрова Н.А., Сычева В.О., Чуриков А.В., Иванищева И.А. Фосфат лития-железа LiFePO_4 как катодный материал для литий-ионного аккумулятора. *Электрохимическая энергетика*, 2009. Т.9, №4. С. 188-198.
5. Потапенко А.В., Панов Э.В., Диамант В.А. Синтез и электрохимические характеристики композита LiFePO_4/C в электролите на основе LiBOB . *Укр. Хим. Журн.*, 2014. Т.80, №7. С. 52-56.
6. Сычева В.О., Чуриков А.В.. Литий-марганцевые шпинели: пути повышения стабильности и энергоемкости. *Электрохимическая энергетика*, 2009. Т.9, №4. С. 175-187.
7. Ярмоленко О.В., Юдина А.В., Игнатова А.А. Современное состояние и перспективы развития жидких электролитных систем для литий-ионных аккумуляторов. *Электрохимическая энергетика*, 2016. Т.16, №4. С. 155-195.
8. Альтшуллер Г.С. Творчество как точная наука. 2 изд., дополн. Петрозаводск: Скандинавия, 2004. 208 с.
9. Звонарев С.В. Основы математического моделирования. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 112 с.

10. Багоцкий В.С., Скундин А.М. Химические источники тока. Москва: Энергоиздат, 1981. 360 с.

References

1. Kulova, T.L., Nikolaev, I.I., Fateev, V.N. & Aliev, A.Sh. (2018). Sovremennyye elektrohimiicheskie sistemyi akkumulirovaniya energii. *Kimya Problemleri (Chemical Problems)*. **1**, 9-34.
2. Zhdanova, E. (2021). Zaryadilis do «Nobelya». Sayt «Za nauku». URL: <https://zanauku.mipt.ru/2019/12/12/zaryadilis-do-nobelya>. (data zvernennya: 31.05.2021).
3. Korolev, V. (2021). Zaryazhennyiy «Nobel». Dolgozhdannaya premiya za akkumulyatoryi, kotoryie est v kazhdom dome. URL: <https://nplsl1.ru/material/2019/10/09/nobelch>. (data zvernennya: 31.05.2021).
4. Burmistrova, N.A., Syicheva, V.O., Churikov, A.V. & Ivanischeva, I.A. (2009). Fosfat litiya-zheleza LiFePO_4 kak katodnyiy material dlya litiy-ionnogo akkumulyatora. *Elektrohimiicheskaya energetika*. **9**, 4, 188-198.
5. Potapenko, A.V., Panov, E.V. & Diamant, V.A. (2014). Sintez i elektrohimiicheskie harakteristiki kompozita LiFePO_4/C v elektrolite na osnove LiBOB. *Ukr. Him. Zhurn.* **80**, 7, 52-56.
6. Syicheva, V.O. & Churikov, A.V. (2009). Litiy-margantsevyie shpineli: puti povyisheniya stabilnosti i energoemkosti. *Elektrohimiicheskaya energetika*. **9**, 4, 175-187.
7. Yarmolenko, O.V., Yudina, A.V. & Ignatova, A.A. (2016). Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya zhidkih elektrolitnyih sistem dlya litiy-ionnyih akkumulyatorov. *Elektrohimiicheskaya energetika*. **16**, 4, 155-195.
8. Altshuller, G.S. (2004). Tvorchestvo kak tochnaya nauka. 2 izd., dopoln. Petrozavodsk: Skandnaviya.
9. Zvonarev, S.V. (2019). Osnovy matematicheskogo modelirovaniya. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta.
10. Bagotskiy, V.S. & Skundin, A.M. (1981). Himicheskie istochniki toka. Moskva: Energoizdat.

Скосар Вячеслав Юрійович – к.ф.-м.н., с.н.с. відділу №6 «Електротехнічних комплексів і хімічних джерел струму транспортного призначення» Інституту транспортних систем і технологій НАН України, e-mail: skosarslava@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2151-3417.

Бурилов Сергій Володимирович - к.ф.-м.н., с.н.с., завідувач відділом №6 «Електротехнічних комплексів і хімічних джерел струму транспортного призначення» Інституту транспортних систем і технологій НАН України, e-mail: S.Burylov@nas.gov.ua, ORCID: 0000-0001-8070-6764.

Дзензерський Віктор Олександрович – д.т.н., директор Інституту транспортних систем і технологій НАН України, e-mail: itst@westa-inter.com, ORCID: 0000-0002-5504-4524.