

12. **Nautiyal A., Mishra A. K.** Machine learning approach for intelligent prediction of petroleum upstream stuck pipe challenge in oil and gas industry. *Environment, Development and Sustainability*. 2025. Vol. 27. P. 24167–24193. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02387-3>.
13. **D'Amicis S. et al.** Stuck pipe prediction from rare events in oil drilling operations. *Upstream Oil and Gas Technology*. 2023. Vol. 11. 100096. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.upstre.2023.100096>.
14. **George J. G., Okonkwo O., Akinfolarin A.** Successful Management of Wellbore Stability to Mitigate Stuck Pipe Incidents in a Brownfield Development Drilling Campaign: A Case Study of a Land Well in the Niger Delta. *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. 2025. P. D21S002R005. DOI: <https://doi.org/10.2118/228660-MS>.
15. **Rogovyi A. et al.** Reduction of Granular Material Losses in a Vortex Chamber Supercharger Drainage Channel. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V*. Cham : Springer International Publishing, 2022. P. 218–226.
16. **Andrenko P. et al.** Improving the Technical Level of Hydraulic Machines, Hydraulic Units and Hydraulic Devices using a Definitive Assessment Criterion at the Design Stage. *Journal of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 24, no. 1. P. 57–76. DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2021.01.057>.

УДК 621.313

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИЗМАТИЧНИХ LiFePO₄ АКУМУЛЯТОРІВ НА ОСНОВІ ЗВОРотної ЗАДАЧІ ТЕПЛОПЕРЕНОСУ

Плахотний Олександр Петрович, д. техн. наук, проф. каф. ЕТ,

Черкаський державний технологічний університет,
e-mail: o.plakhotny@chdtu.edu, ORCID ID 0000-0002-5045-6132

Йовченко Алла Василівна, канд. техн. наук, ст. викладач каф. АТЕ,

Черкаський державний технологічний університет,
e-mail: a.yovchenko@chdtu.edu.ua, ORCID ID 0000-0002-7069-1092

Костьян Наталія Леонідівна, канд. техн. наук, доц. каф. АТЕ,

Черкаський державний технологічний університет,
e-mail: n.kostian@chdtu.edu.ua, ORCID ID 0000-0002-1599-4007

Для транспортних систем, що працюють у режимах частих пусків і зупинок, високих пікових навантажень та обмеженого часу безперервної роботи, характерним є застосування енергоефективних і компактних джерел живлення. До таких систем належать міський електричний транспорт (електробуси, тролейбуси з автономним ходом), складська та промислова техніка, автономні логістичні платформи, безпілотні наземні транспортні засоби, спеціалізована військова техніка та ін. При їх роботі виникають короткі робочі цикли з інтенсивними режимами навантаження, що зумовлює доцільність використання призматичних акумуляторних батарей (АКБ) з огляду на їхню компактність, відносно низьку вартість, ефективне використання внутрішнього об'єму та достатні енергетичні характеристики за умов невеликого запасу енергії.

Термічний менеджмент є ключовим фактором продуктивності та безпеки АКБ. Призматичні елементи мають гірші умови тепловідведення порівняно з циліндричними через конструктивну неоднорідність і обмежену ефективність конвективного охолодження, що сприяє перегріву [1]. Зі зростанням потужності АКБ підвищуються температура та теплові градієнти, що зумовлює необхідність розроблення точних теплових моделей, зокрема з урахуванням теплоємності та теплопровідності [2, 3].

Літій-іонні акумулятори (LFP, NCA, NMC), попри високі енергетичні характеристики, потребують ефективного теплового контролю [4]. Відхилення температури від оптимального діапазону призводить до зниження ємності, ресурсу та безпеки, що обумовлює застосування систем терморегулювання (BTMS) [5–7].

Для проведення досліджень були обрані АКБ Westinghouse, 125 Ah. Їх активна частина складається з багатошарового електродного пакета типу «jelly-roll», розміщеного в алюмінієвому корпусі. Електродна структура включає катод (LiFePO_4 на Al-фользі), сепаратор та анод (графіт на Cu-фользі), просочені електролітом на основі LiPF_6 .

З огляду на складну багатошарову геометрію, для моделювання теплопереносу застосовано узагальнену (homogenized) макромодель, у якій активна зона представлена як однорідне пористе середовище з ефективними теплофізичними властивостями, тоді як корпус і клеми моделюються окремо. Такий підхід дозволяє адекватно відтворити теплові процеси без надмірного ускладнення скінчено-елементної сітки.

Важливою особливістю є врахування анізотропії теплопровідності. У площині шарів значення коефіцієнтів теплопровідності k_x , k_y значно вищі, ніж у поперечному до шарів напрямку k_z . Це обумовлено наявністю металевих струмозбірників і полімерних прошарків. Для бічних частин багатошарового електродного пакета типу «jelly-roll», що мають напівциліндричну форму, застосовано локальні циліндричні системи координат із різними значеннями коефіцієнтів теплопровідності по осям координат k_{rc} , k_{tc} , k_{zc} відповідно. Параметри анізотропії визначалися комбінуванням експериментальних даних та числового моделювання.

Експериментальні дослідження проведено на чотирьох призматичних комірках LiFePO_4 125 Ah із використанням BMS з функцією активного балансування. Температурний контроль здійснювався за допомогою тепловізора, пірометрів і термопар із реєстрацією даних у часі, а внутрішній опір вимірювався спеціалізованим приладом YAOREA YR1035+. Процес заряджання батарей здійснювався за допомогою регульованого імпульсного джерела живлення MS-1500-15 KNOA з вихідними параметрами 15 В, 100 А. Розряджання проводилося з використанням інвертора Houli 4000W. Величина струму контролювалася і логувалася за часом за допомогою електровимірювальних кліщів з функцією підключення до комп'ютера.

Розрахунок нагрівання АКБ проведено у нестационарній постановці задачі від 0 до 3600 с при струмі заряджання 100 А, що забезпечує досягнення 90 %

заряду. Подальше зарядження здійснювалося у режимі зниження струму та підтримання напруги. Внутрішній опір чотирьох послідовно з'єднаних комірок становив 5,6 мОм, температура навколишнього середовища – 20 °С, зовнішні стінки підлягали природній конвекції з коефіцієнтом тепловіддачі 20 Вт/(м²·К).

Для першої ітерації анізотропні коефіцієнти теплопровідності активного матеріалу комірок задавалися: радіально у бічних напівциліндричних частинах і перпендикулярно до шарів у прямокутних частинах $k_{rc}=k_z=1$ Вт/(м·К), інші складові – 10 Вт/(м·К), теплоємність $C_p=1000$ Дж/(кг·К).

Наступним етапом проведено інтеграцію експериментальних даних з чисельним моделюванням для калібрування теплофізичних параметрів активного матеріалу (коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності). Оптимальна збіжність між експериментальними та розрахованими температурами на шести контрольних точках становила 7–8 % на момент часу 3600 с. На ранніх етапах зарядження відхилення досягали 11 %, проте при калібруванні параметрів пріоритет надавався кінцевому моменту зарядження високим струмом, що відповідає критичному тепловому стану комірок.

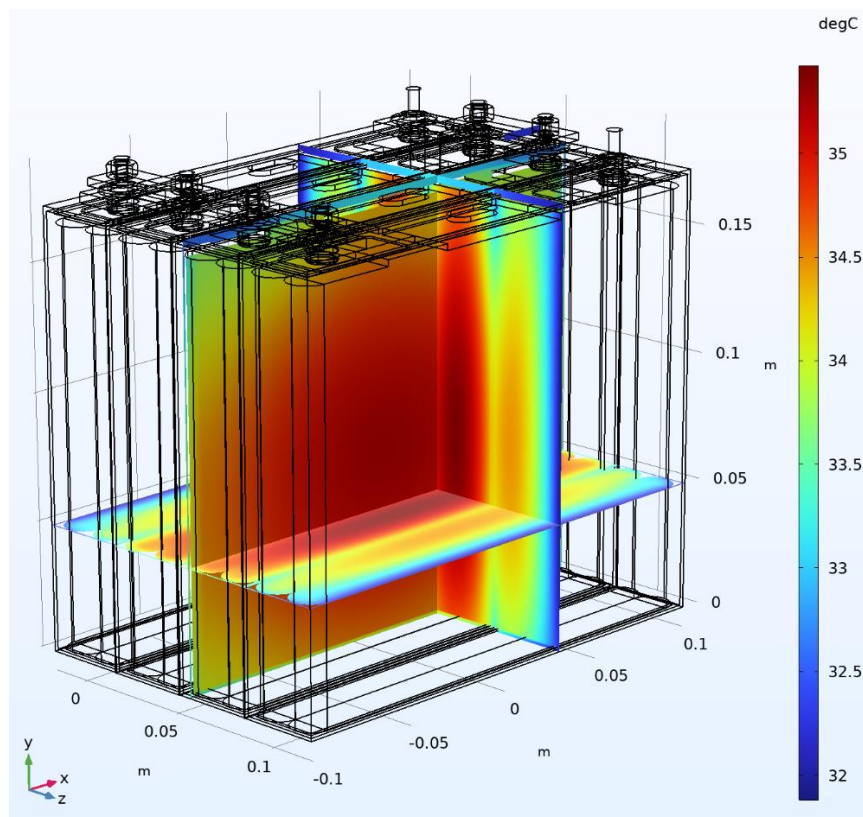


Рисунок 1 – Результати розрахунку теплових полів всередині акумуляторних батарей на момент часу 3600 с за каліброваних значень теплофізичних параметрів активного матеріалу комірок

Найкращі теплофізичні параметри активного матеріалу: $k_x=k_y=24$, $k_z=0,5$, $k_{rc}=0,5$, $k_{tc}=24$, $k_{zc}=24$ Вт/(м·К), $C_p=650$ Дж/(кг·К), де індекси відповідають напрямкам осей загальної та місцевих систем координат. Значення параметрів узгоджуються з літературними даними для Li-ion комірок NMC і LFP ємністю

20–44 Ah, хоча геометричні та ємнісні характеристики можуть відрізнятися. Наприклад, у [1] для pouch-батарей 44 Ah коефіцієнт теплопровідності в площині шарів становив 15,6 Вт/(м·К), перпендикулярно до шарів – 0,376 Вт/(м·К), теплоємність – 1250–1290 Дж/(кг·К); для АКБ 20 Ah – 25,8–27,9 Вт/(м·К) та 0,503–0,544 Вт/(м·К), теплоємність 541 Дж/(кг·К).

З уточненими параметрами розраховано температурні поля всередині батареї (рис. 1). Максимальна температура в центральних комірках досягла 35,5 °С, що трохи перевищує рекомендовану межу 35 °С для запобігання деградації, тоді як різниця температур між центральними та крайніми комірками не перевищує 2–3 °С, укладаючись у допустимі межі. Результати демонструють, що при заряджанні струмом 100 А (0,8 С) відбувається локальне перевищення критичної температури, але нерівномірність теплового поля залишається мінімальною.

Висновки

Запропоновано ефективний метод дослідження динаміки теплових полів у призматичних літій-іонних АКБ під час заряджання та розряджання. Показано, що поєднання чисельного моделювання з експериментальними вимірюваннями дозволяє визначати електрохімічні та теплофізичні параметри активного матеріалу з точністю, достатньою для інженерних розрахунків. Встановлено, що анізотропія теплофізичних характеристик внутрішніх елементів комірок істотно впливає на розподіл теплових полів при швидкій зарядці та високих струмах розряджання. Кількісно підтверджено, що теплопровідність у площині шарів та через площину відрізняється більш ніж на порядок.

Література

1. Al-Zareer M., Da Silva C., Amon C. H. Predicting anisotropic thermophysical properties and spatially distributed heat generation rates in pouch lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*. 2021. Vol. 510. 230362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230362>.
2. Steinhardt M. et al. Meta-analysis of experimental results for heat capacity and thermal conductivity in lithium-ion batteries: A critical review. *Journal of Power Sources*. 2022. Vol. 522. 230829. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230829>.
3. Fan H., Zhao Y. Identification of thermo-physical parameters of square batteries based on the lumped thermal model. *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Precision Mechanical Measurements (Proc. SPIE 13178)*. 2024. P. 259–265. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3032521>.
4. Giammichele L. et al. Evaluation of the influence of lithium-ion battery composition on thermal power generation. *Sustainable Energy & Fuels*. 2024. Vol. 8. P. 1566–1576. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3SE01452A>.
5. Ali H. M. Thermal management systems for batteries in electric vehicles: A recent review. *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. P. 5545–5564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.04.359>.
6. Lin J. et al. A review on recent progress, challenges and perspective of battery thermal management system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 167. 120834. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120834>.
7. Tete P. R., Gupta M. M., Joshi S. S. Developments in battery thermal management systems for electric vehicles: A technical review. *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 35. 102255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102255>.