

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

ЛУХАНІН ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСІЙОВИЧ

*Підпис*

УДК 004.94: 519.688: 621.354.34

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ  
ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ Li-ion БАТАРЕЙ  
ПОВІТРЯНИМ ПОТОКОМ

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Дисертація виконана у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» Національної Академії Наук України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор  
**Хажмурадов Манап Ахмадович**,  
Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України,  
начальник відділу математичного моделювання ядерно-фізичних процесів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Комяк Валентина Михайлівна**,  
Національний університет цивільного захисту України,  
професор кафедри фізико-математичних дисциплін;

доктор технічних наук, професор  
**Тевяшев Андрій Дмитрович**,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
завідувач кафедри прикладної математики.

Захист відбудеться «3» березня 2017 р. о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: Україна, 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

Автореферат розісланий «30» січня 2017 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

*Підпис*

Л. В. Колесник

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розробки, дослідження та впровадження Li-ion батарей в транспортних засобах здійснюють провідні лабораторії світу такі як NREL, TESLA (США), SANDIA (Канада), UFO (Китай), TOYOTA (Японія). В Україні ведуться дослідження, розробки та впровадження Li-ion батарей у багатьох дослідницьких інститутах та технічних університетах. Однак в даний час недостатньо уваги приділяється дослідженням процесів експлуатації Li-ion батарей в умовах підвищеного тепловиділення.

Одним із актуальних завдань сучасних досліджень Li-ion батарей є створення систем управління тепловими процесами батарей для забезпечення найкращих умов експлуатації, що дає можливість збільшити ресурс роботи, підвищити енергоємність, безпеку, зменшити вагу та вартість, як батарей, так і витрати на їхню експлуатацію. З цією метою необхідні відповідні дослідження ефективності охолодження із використанням різних способів, включаючи охолодження повітряним потоком.

Скорочення часу створення систем управління тепловими процесами батарей може бути досягнуто, зокрема, за рахунок використання математичного моделювання теплових процесів. Розробка математичних моделей Li-ion батарей з системами охолодження, моделювання теплових процесів, пошук рішень, що забезпечують найбільшу ефективність охолодження Li-ion батарей повітряним потоком, порівняння результатів моделювання з експериментальними даними є актуальними завданнями, які стали основою дисертаційної роботи.

Вирішенню завдань гідрогазодинаміки та моделюванню теплових процесів присвячені роботи Г.В. Логвиновича, С.К. Годунова, О.М. Богомоллова, К. Флетчера, Ч. Хірша та багатьох інших авторів. Створення високоефективних систем охолодження відноситься до завдань багатокритеріальної оптимізації. Методичні основи багатокритеріальної оптимізації були закладені А.А. Самарським, Е.Н. Богомолловим, У. Андерсоном, Р. Плетчером та іншими вченими. В Україні такі завдання вирішувалися В.М. Глушковим, В.Л. Рвачовим, Е.Г. Петровим, Ю.Г. Стояном, М.А. Хажмурадовим та іншими вченими. Завдання цього класу зводяться до вибору параметрів технічних систем, що забезпечують найкраще вирішення поставлених багатокритеріальних завдань. У зв'язку з цим основними науково-технічними завданнями є: моделювання теплових процесів при охолодженні Li-ion батарей; обчислення ефективності охолодження та проведення досліджень на стенді з наступним порівнянням результатів моделювання з експериментальними даними.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до планів держбюджетних та

конкурсних тем, що виконуються в Національному Науковому Центрі «Харківський фізико-технічний інститут» (ННЦ ХФТІ). Наукові результати, на яких базується дисертаційна робота, отримані при виконанні планових бюджетних програм, замовлень ННЦ ХФТІ та спільного проекту ННЦ ХФТІ з BNL (США): проект III-6-11 «Дослідження фізичних процесів та оптимізація параметрів дослідних установок методами математичного моделювання» (№ ДР 0111U009294); проект III-7-11 «Фундаментальні та прикладні дослідження з ядерної фізики для потреб медицини, народного господарства, екології та енергетики» (№ ДР 0111U009298); спільний проект ННЦ ХФТІ з BNL (США) «Розробка дослідного зразка системи термостабілізації Li-ion батарей» (BNL-T2-371-UA). Дисертант у вказаних вище роботах виступав як виконавець.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка математичних моделей теплових процесів у системах охолодження Li-ion батарей повітряним потоками повітря з малими швидкостями, на основі результатів чисельного моделювання процесів охолодження батарей визначити параметри імітаторів елементів Li-ion батарей та камери для дослідження ефективності охолодження Li-ion батарей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих моделей охолодження Li-ion батарей;
- розробити математичні моделі теплових процесів при охолодженні повітряним потоком Li-ion батарей, що мають на поверхнях елементів складну багатоканальну структуру;
- виконати математичне моделювання теплових процесів та повітряних потоків при охолодженні елементів Li-ion батареї та визначити вимоги до експериментальної системи охолодження Li-ion батареї;
- розробити математичну модель процесу охолодження Li-ion батарей за допомогою теплової трубки;
- розробити систему вимірювання та обробки даних для багатоканальної системи вимірювання температури на поверхнях імітаторів Li-ion батарей;
- виміряти ефективність охолодження Li-ion батарей на розробленому стенді, порівняти отримані результати з даними математичного моделювання.

*Об'єкт дослідження* – процес тривимірного поширення тепла в Li-ion батареї при охолодженні її повітряним потоком.

*Предмет дослідження* – математичні моделі та обчислювальні методи теплових процесів при охолодженні Li-ion батарей повітряним потоком, моделі охолоджуваних поверхонь Li-ion елементів, теплові процеси та теплові трубки.

**Методи дослідження.** У роботі використовуються методи математичного моделювання систем з розподіленими параметрами для розв'язання крайових задач аерогідродинаміки при охолодженні потоком повітря поверхонь, чисельний аналіз і методи оптимізації параметрів теплофізичних процесів в

системі охолодження Li-ion батарей повітряним потоком.

**Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна одержаних результатів.** У результаті виконання дисертаційної роботи запропоновано математичні моделі теплових процесів при охолодженні повітряним потоком Li-ion батарей, що мають на поверхнях елементів складну багатоканальну структуру; на основі результатів моделювання процесів охолодження батарей вибрані параметри імітаторів елементів Li-ion батарей та камери для дослідження ефективності охолодження Li-ion батарей.

При цьому отримані такі нові результати:

– вперше виконано комплексне дослідження просторових полів температури, тиску та швидкостей в повітряному потоці при охолодженні Li-ion батарей з багатоканальними структурами на поверхнях елементів (поверхні типу «полупіни з округленими крайками», «скручені стрічки» та «відкриті піраміди»). На основі усереднення температурних полів на поверхнях елементів батареї, для чисельного та експериментального досліджень розподілу температури, отримані ефективності системи охолодження Li-ion батарей;

– розроблена математична модель теплової трубки та запропонований метод обчислення питомої теплопровідності трубки, оснований на мінімізації середньоквадратичного відхилення обчислених і вимірних температур на поверхні елемента батареї, які забезпечили визначення ефективності охолодження Li-ion батареї тепловою трубкою та залежність питомої теплопровідності теплової трубки від середньої температури елемента батареї;

– вперше на основі математичного моделювання та використання комплексу проблемно-орієнтованого програмного продукту досліджені потоки в гелієвому осередку та показано, що швидкість конвективних потоків у гелієвому осередку близька до швидкості спінової дифузії;

– розроблені математичні моделі багатоканальних структур на поверхнях елементів Li-ion батареї та реалізовані у вигляді комплексу проблемно-орієнтованого програмного продукту для дослідження теплових процесів при охолодженні повітряними потоками з малою швидкістю;

– на основі математичного моделювання теплових процесів при охолодженні Li-ion батареї визначені та оптимізовані параметри повітряних потоків стенду для вимірювання ефективності охолодження окремих елементів та модулів Li-ion батареї. Вперше розроблено калориметричну камеру та імітатори Li-ion батареї з анізотропною теплопровідністю, аналогічною елементам батареї;

– виконано моделювання процесу охолодження Li-ion батарей, що основане на використанні психрометричної різниці температур (M-цикл). Одержані дані характеристик повітряного потоку та витрати води в залежності від навколишньої температури повітря.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що вони

можуть знайти широке застосування при розробці електромобілів, нового наукового і промислового устаткування.

Упровадження математичних моделей, чисельних методів, методів вимірювання та обробки даних підтвержені довідкою про їх використання в ННЦ ХФТІ в експериментальній установці «Мішень поляризованих ядер гелію-3» для моделювання теплових процесів у гелієвому осередку, в багатоканальній системі вимірювання температури мішені, системі вимірювання поляризації ядер гелію-3 та в системі управління адіабатичним реверсом поляризації.

Розроблені математичні моделі та метод обчислень з використанням комплексу проблемно-орієнтованого програмного продукту в якому інтегровані графічний редактор геометричної моделі, розрахункові модулі процесів аерогідродинаміки, теплопереносу та візуалізації результатів обчислень.

Результати дисертаційної роботи включені:

– у держбюджетну науково-дослідну роботу «Дослідження фізичних процесів та оптимізація параметрів дослідних установок методами математичного моделювання» (№ ДР 0111U009294);

– у звіт по спільному проекту ННЦ ХФТІ з BNL (США) «Розробка дослідного зразка системи термостабілізації Li-ion батарей».

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертації отримані автором самостійно та опубліковано у наукових роботах [1 – 12]. У роботах опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить такі результати: у [1] – математична модель теплових процесів при охолодженні Li-ion батарей; у [2] – метод обчислень для усереднення температурних полів на поверхнях елементів батареї; у [12] – оптимізація параметрів процесу охолодження акумуляторних батарей; у [7] – оптимізація параметрів повітряного потоку та обґрунтування вимог до нового обладнання для дослідження ефективності охолодження; у [8] – комплексне дослідження ефективності систем охолодження зі складними багатоканальними структурами на поверхнях елементів Li-ion батареї; у [3] – розробка фізичного проекту на виготовлення стенду для дослідження ефективності систем охолодження Li-ion батарей, калориметричних камер та імітаторів елементів батареї; у [4] – математична модель складного теплообміну при наявності природної конвекції в гелієвому осередку; у [5] – аналіз роботи охолоджувачів повітря з використанням методу психрометричної різниці температур (М-цикл); у [6] – математична модель теплової трубки та метод обчислення питомої теплопровідності трубки; у [9] – розробка технічного проекту на виготовлення теплової трубки та виконано аналіз одержаних експериментальних результатів; у [10] – розробка моделі 640-канальної системи вимірювання температури; у [11] – проаналізовані похибки вимірювання температури багатоканальною системою.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та отримали позитивну оцінку на міжнародних

конференціях:

- IV Міжнародно-технічній конференції «Інформаційні системи та технології» (Україна, Харків, 2015 р.) [10];
- ASTFE First Thermal and Fluids Engineering Summer Conference (TFESC), (USA, New York, 2015) [6];
- XIII Конференції з фізики високих енергій, ядерної фізики та ускорителів (Україна, Харків, 2015 р.) [11];
- ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE 2014), (Canada, Montreal, 2014) [9];
- ASME Heat Transfer and Thermal Engineering, (USA, San Diego, California, 2013) [8];
- Міжнародній науковій конференції «Питання оптимізації обчислень (ПОО-XL)», присвяченій 90-річчю від дня народження академіка В.М. Глушкова, (Україна, Крим, Велика Ялта, 2013 р.) [12];
- ASME Heat Transfer in Energy Systems, (USA, Rio Grande, Puerto Rico, 2012) [7].

**Публікації.** Основні результати, що становлять зміст дисертації, опубліковані у 12 наукових роботах: у тому числі, в 5 статтях [1 – 5] у фахових наукових виданнях, з яких статті [1, 2, 4] опубліковані в спеціалізованих фахових виданнях України, статті [3, 5] опубліковані в міжнародних фахових виданнях; 5 робіт опубліковані в іноземних виданнях [6 – 9, 12] та 2 тези доповідей на наукових конференціях [10, 11]. Публікації [2, 3, 5] включені до наукометричної бази SCOPUS. Робота [8] отримала сертифікат кращої статті 2013 року Американського Товариства Інженерів Машинобудування (ASME).

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та одного додатку. Повний обсяг дисертації становить 169 сторінок, і включає 152 сторінки основного тексту, 23 таблиці (загальним об'ємом 9 с.), 64 рисунки (загальним об'ємом 26 с.), з них, один рисунок на всю сторінку. Список використаних джерел містить 122 найменування (15 с.).

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами ННЦ ХФТІ НАН України, визначено мету та завдання дослідження, показана наукова новизна та практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про особистий внесок здобувача в опублікованих в співавторстві роботах, апробацію результатів досліджень.

У першому розділі «Управління тепловими процесами Li-ion батареї» проведено аналіз систем управління тепловими процесами батареї. Показано

необхідність створення ефективних систем охолодження батарей та обладнання для дослідження теплових процесів при охолодженні.

Повітряне охолодження/нагрів Li-іон батареї характеризується простотою та малою вартістю системи управління тепловими процесами. Для характеристики системи використовуються ефективність охолодження:

$$Q/ITD = W/\Delta T, \quad (1)$$

де  $W$  – теплова потужність, що виділяється в одному елементі батареї;  $\Delta T = T_{imitator} - T_{air}$ ,  $T_{air}$  – температура вхідного повітря в зазорі між елементами батареї;  $T_{imitator}$  – середня температура на поверхні елемента батареї.

У розділі сформульована задача розробки математичних моделей та обчислювальних методів для процесу охолодження повітряним потоком Li-іон батарей зі структурованими поверхнями елементів.

Результати першого розділу опубліковані в роботах [1, 7, 12].

У другому розділі «Математичне моделювання та оптимізація параметрів повітряного охолодження Li-іон батареї» розроблена математична модель процесу охолодження елементів Li-іон батареї повітряним потоком.

Геометрична модель елемента Li-іон батареї становить прямокутний паралелепіпед. Диференціальне рівняння теплопередачі всередині елемента батареї в стаціонарному режимі для тривимірного випадку:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q - q_{conv} = 0, \quad (2)$$

де  $T(x, y, z)$  – температура;  $k_x, k_y, k_z$  – компоненти анізотропної теплопровідності елементів;  $q$  – швидкість генерації тепла в одиниці об'єму акумулятора;  $q_{conv}$  – питома швидкість відтоку тепла через поверхні акумулятора шляхом конвекції;  $L_1, L_2, L_3$  – довжина, ширина і товщина акумулятора, відповідно.

Геометрична модель Li-іон батареї із двох елементів з плоскими поверхнями представлена на рис. 1.

Об'єми  $\Theta_1$  і  $\Theta_2$  відповідають половинним об'ємам елементів батареї та являють собою прямокутні паралелепіпеди з граничними умовами для поверхонь, що обдуваються повітрям:  $\Delta S_1$  та інших  $\Delta S_{cell}$ :

$$\begin{cases} (\vec{q} \vec{n}) |_{\Delta S_{cell}} = 0, \\ (\vec{q} \vec{n}) |_{\Delta S_1} = \alpha(T_{cell} - T_{air}), \end{cases} \quad (3)$$



де  $\vec{q} = -k\Delta T_{cell}$  – тепловий потік в елементі батареї;  $k$  – теплопровідність;  $\vec{n}$  – нормаль до зовнішньої поверхні елемента,  $\alpha$  – конвективний коефіцієнт тепловіддачі;  $T_{air}$  – температура повітря в зазорі;  $T_{cell}$  – температура батареї.

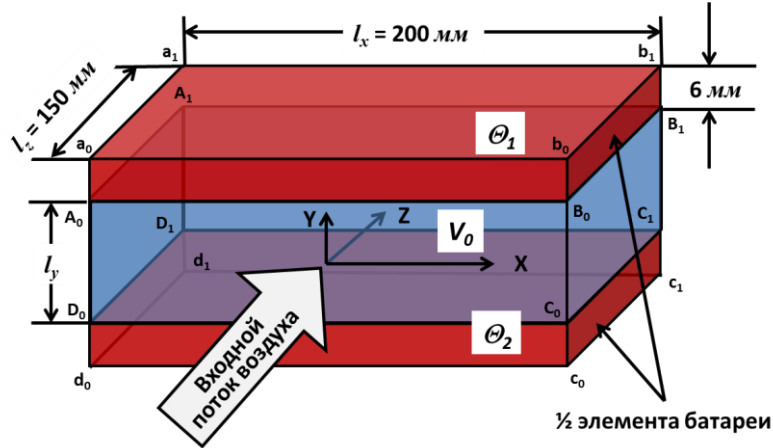


Рисунок 1 – Геометрична модель Li-іон батареї із двох елементів з плоскими поверхнями

Область повітряного зазору між елементами батареї являє собою прямокутний паралелепіпед з об'ємом –  $V_0$ . Система рівнянь стаціонарної просторової течії має наступний вигляд в декартовій системі координат:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\rho_i)}{\partial x_i} &= 0, \\ \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} &= 0, \\ \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i \varepsilon) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} u_j) &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{де } \tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right), \quad q_i = -k \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad \varepsilon = c_v T + \frac{u_k u_k}{2},$$

$$p = \rho RT, \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases}, \quad (i, j, k = 1, 2, 3), \quad u - \text{швидкість середовища; } p -$$

тиск;  $\rho$  – щільність середовища;  $T$  – температура середовища;  $R$  – газова постійна;  $q_i$  – дифузний тепловий потік;  $\varepsilon$  – повна енергія одиничної маси середовища;  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості;  $\tau_{ij}$  – тензор в'язких зсувних напружень;  $\delta_{ij}$  – дельта-функція Кронекера;  $c_v$  – питома теплоємність при постійному об'ємі.

Граничні умови для поверхонь повітряного зазору: на границі з елементами батареї  $\Delta S_1$  – конвективний теплообмін, на бокових границях –  $\Delta S_0$

ставилися адіабатичні граничні умови, на границі входу повітряного потоку –  $\Delta S_{in}$  температура та швидкість повітря, а на границі виходу  $\Delta S_{out}$  – тиск на виході.

Температура та граничні умови повітряного потоку будуть:

$$\begin{cases} (\vec{u}_{air} \vec{n})_{\Delta S_0} = 0, \\ (\vec{u}_{air} \vec{n})_{\Delta S_{in}} = -u_{in}, \\ (\vec{q} \vec{n})_{\Delta S_1} = \alpha(T_{air} - T_{cell}), \\ T_{air}|_{\Delta S_{in}} = -T_{in}, \\ P_{air}|_{\Delta S_{out}} = P_0, \end{cases} \quad (5)$$

де  $\vec{q} = -k\nabla T_{cell}$  – тепловий потік в елементі батареї;  $\vec{n}$  – нормаль до зовнішньої поверхні елемента;  $\alpha$  – конвективний коефіцієнт тепловіддачі;  $\vec{q}$  – питомий тепловий потік через поверхню елемента батареї  $S_1$ ;  $T_{air}$  – температура повітря в зазорі,  $T_{cell}$  – температура елемента батареї,  $u_{air}$  – швидкість повітря між елементами батареї –  $\Delta S_{in}$ ,  $P_0$  – атмосферний тиск на виході –  $\Delta S_{out}$ ,  $T_{in}$  та  $u_{in}$  – температура та швидкість потоку повітря на вході в зазор між елементами, відповідно.

Початкові умови та обмеження математичної моделі:

- геометричні розміри області моделювання –  $200\text{мм} \times 150\text{мм} \times (12\text{мм} + l_y)$ ,  $L_y = 2 \div 4 \text{ мм}$ ;
- швидкість вхідного потоку –  $u_{in} = 2 - 4 \text{ м/сек}$ ;
- температура вхідного потоку –  $T_{in} = 10 - 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- діапазон допустимої середньої температури елемента батареї  $T_{cell} = 25 \div 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- відхилення температури в елементі батареї від середньої  $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- сумарний тепловий потік через  $S_1$  –  $Q = 7.5 \text{ Вт}$ ,  $P_0 = 101325 \text{ Па}$ ;
- надлишковий тиск на вході в батарею до  $200 \text{ Па}$ ;
- ефективність охолодження  $Q/ITD \geq 1.5 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$  на один елемент;
- теплотехнічні властивості елементів батареї: теплопровідність в напрямку площини елемента –  $60 \text{ Вт/(м К)}$ , та  $1 \text{ Вт/(м К)}$  перпендикулярно площині.

Розподіл температури, тиску та швидкостей в об'ємі зазору між елементами батареї визначались з результатів чисельного моделювання за допомогою програмного пакета SolidWorks Flow Simulation:

$$\begin{cases} T_{ijk} = T(x_i, y_j, z_k, u_{in}, T_{in}, l, (q_{conv})_{ijk}), \\ p_{ijk} = p(x_i, y_j, z_k, u_{in}, T_{in}, l, (q_{conv})_{ijk}), \\ u_{ijk} = u(x_i, y_j, z_k, u_{in}, T_{in}, l, (q_{conv})_{ijk}), \end{cases} \quad (6)$$

де  $i = (1, 2, 3 \dots m)$ ,  $j = (1, 2, 3 \dots n)$ ,  $k = (1, 2, 3 \dots r)$ ;  $m, n, r$  – кількість осередків розбиття об'єму повітря між елементами батареї по координатам  $x, y, z$  – відповідно;  $(q_{conv})_{ijk}$  – щільність теплового потоку з поверхонь елементів в повітряний зазор.

Середня температура поверхні:

$$\overline{T}_{cell} = \frac{1}{S_1} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^r T_{ijk} (\Delta S_1)_{ijk}, \quad (y_j = l/2). \quad (7)$$

Тиск у вхідному потоці повітря:

$$\overline{P}_{in} = \frac{1}{S_{in}} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ijk} (\Delta S_{in})_{ijk}, \quad (z_k = 0). \quad (8)$$

Залежність ефективності охолодження Li-іон батареї та різниці вхідних і вихідних тисків від величини швидкості повітряного потоку та величини зазору між елементами батареї наведена на рис. 2 та рис. 3, відповідно.

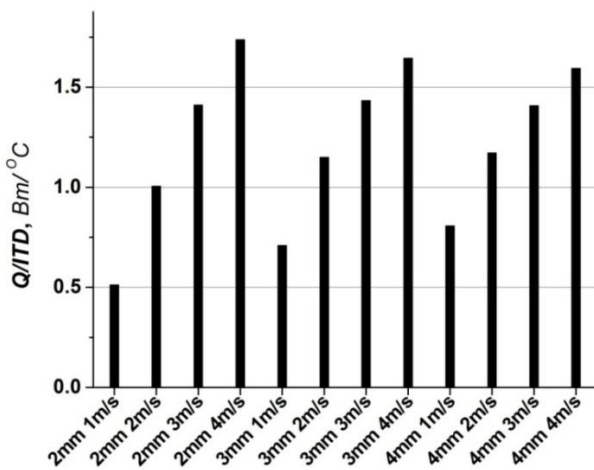


Рисунок 2 – Розрахункові значення  $Q/ITD$

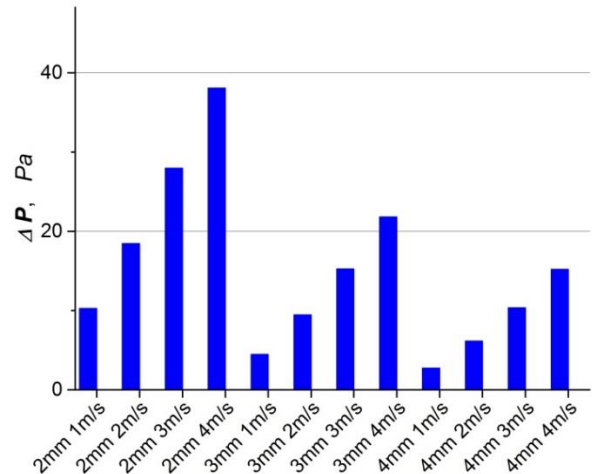


Рисунок 3 – Перепад тиску повітря на елементах батареї

Отримані дані показують, що:

– ефективність охолодження для потоку повітря із вхідною температурою  $25^\circ\text{C}$  зростає в залежності від швидкості потоку, і її максимум обмежений максимальною швидкістю потоку  $4 \text{ м/сек}$ ;

– ефективність охолодження, в залежності від розміру зазорів між

елементами батареї, зростає, при збільшенні зазору з 2 мм до 3 мм, та залишається на такому ж рівні при подальшому збільшенні зазору;

– максимальний перепад тиску в потоці повітря не перевищує 40 Pa.

На підставі результатів чисельного моделювання обрано зазор 3 мм, як оптимальний з точки зору найкращої ефективності охолодження.

Основні результати розділу наведені в роботах [3, 8, 12].

У третьому розділі «Математичне моделювання процесів теплообміну з високою ефективністю охолодження» розглянуті завдання математичного моделювання охолодження поверхонь з багатоелементною структурою. Геометричні моделі поверхонь а) «полупіни з округленими краївками», б) «скручені стрічки» та в) «відкриті піраміди» представлені на рис. 4.

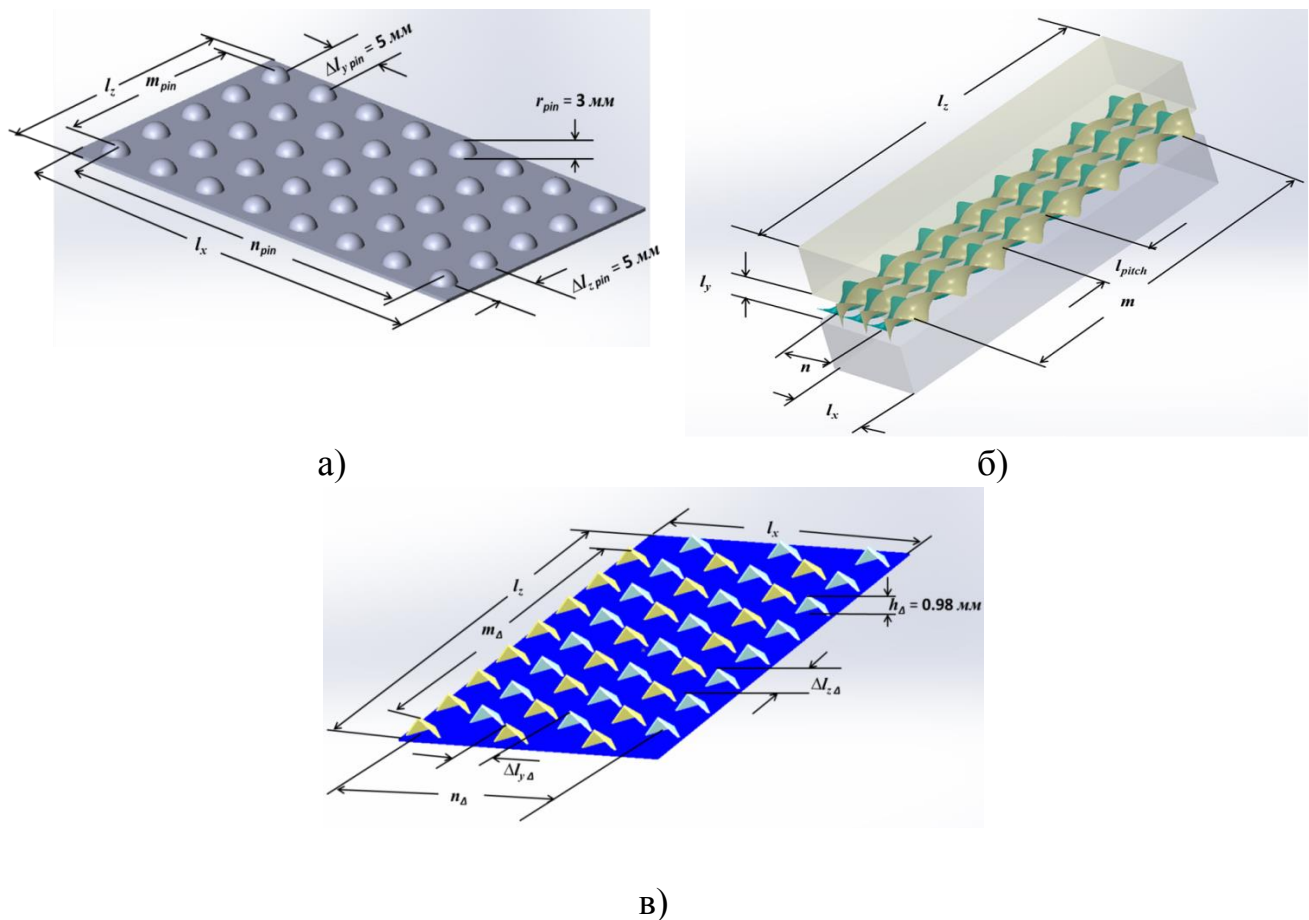


Рисунок 4 – Геометричні моделі поверхонь

Математичні рівняння поверхонь:

а) «полупіни з округленими краївками»:

$$(x - x_n)^2 + (y - 0.5l_y)^2 + (z - z_m)^2 = r_{pin}^2 \quad \text{при } y \leq 0, \quad (9)$$

де  $x_n = \pm \Delta l_{x pin} \left( \frac{n-1}{2} \right)$ ;  $(n = 1, 3, 5 \dots n_{pin})$ ;  $n_{pin}$  – кількість доріжок по  $x$ ;

$z_m = 0.5 \Delta l_{z pin} + (m-1) \Delta l_{z pin}$ ;  $m = (1, 2, 3, \dots, m_{pin})$ ;  $m_{pin}$  – кількість півсфер

по  $z$ ;  $m_{pin} \leq \frac{l_z - \Delta l_{z pin}}{\Delta l_{z pin}} < m_{pin} + 1$ ;  $m_{pin}$  – кількість півсфер по  $z$ ;

б) «скручені стрічки» (поверхня стрічок включає дві бічні поверхні та торцеву):

$$\begin{cases} x_2 = x_2(r, t) = r \cdot \cos t, \\ y_2 = y_2(r, t) = r \cdot \sin t, \\ z_2 = z_2(r, t) = t, \end{cases} \quad 0 \leq t \leq 2\pi m_h, \quad -\frac{l_y}{2} \leq r \leq \frac{l_y}{2}, \quad (10)$$

де  $m_h$  – кількість витків стрічки;  $m = \frac{l_z}{l_{pitch}}$ ;  $l_{pitch}$  – крок скручування;

в) «відкриті піраміди»:

Рівняння площини, що проходить через три точки з координатами  $X(x_0, y_0, z_0)$ ,  $Y(x_1, y_1, z_1)$ ,  $Z(x_2, y_2, z_2)$ :

$$\begin{vmatrix} x - x_0 & x_1 - x_0 & x_2 - x_0 \\ y - y_0 & y_1 - y_0 & y_2 - y_0 \\ z - z_0 & z_1 - z_0 & z_2 - z_0 \end{vmatrix} = Ax + By + Cz + D = 0. \quad (11)$$

Поверхня «відкриті піраміди» складається з п'яти площин. Торцева поверхня утворена з поверхні передньої грані, в якій зроблений виріз.

Початкові умови і обмеження для параметрів повітряного каналу та елементів батареї для таких поверхонь, як і у випадку для гладких поверхонь елементів батареї. Граничні умови поверхонь «скручені стрічки» – адіабатичні.

На рис. 5 та рис. 6 наведені ефективності охолодження Li-ion батареї та перепад тиску в потоці повітря.

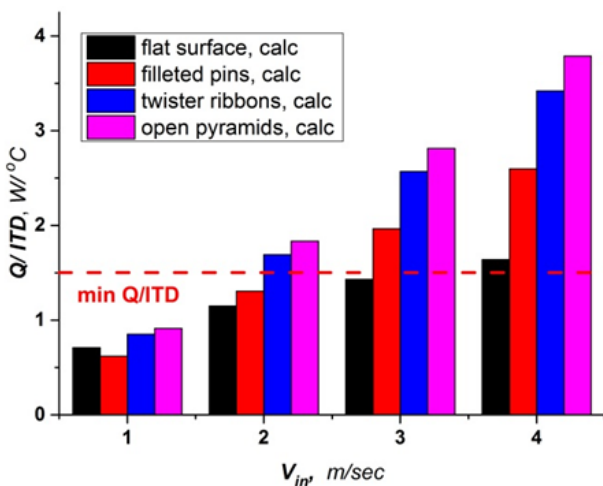


Рисунок 5 – Розрахункові значення  $Q/ITD$

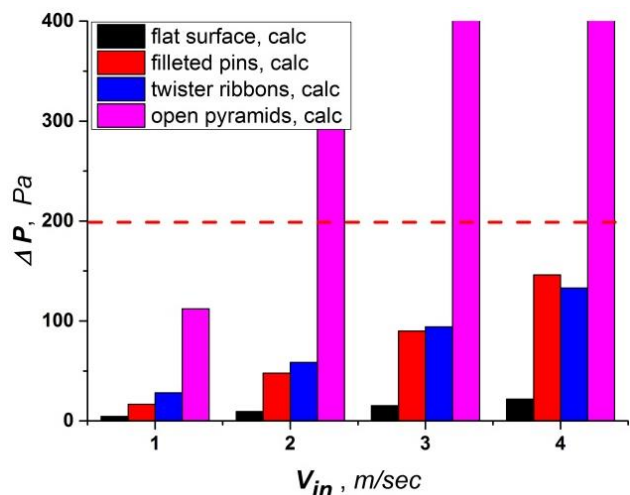


Рисунок 6 – Перепад тиску в потоці повітря

Одним із завдань досліджень є вивчення ефективності охолодження Li-ion батарей з допомогою теплової трубки. На рис. 7 показана геометрична

модель теплової трубки. Математична модель теплової трубки містить три частини: теплопередача в елементах батареї та теплової трубки і охолодження радіатора теплової трубки потоком повітря.

Рівняння теплопровідності (дифузії) без джерел генерації тепла в області теплової трубки:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \omega^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (12)$$

де  $\omega = \sqrt{\frac{k}{\gamma\rho}}$ ;  $k$  – теплопровідність;  $\rho$  – питома вага та  $\gamma$  – теплоємність.

Теплові потоки на границях теплової трубки з елементами батареї:

$$\vec{q}_{cell} = \begin{cases} Q(x, y, z, W, V) = \frac{W}{V}, & (x, y, z) \in S_{cell}, \\ 0, & (x, y, z) \notin S_{cell}, \end{cases} \quad (13)$$

та радіатора охолодження:

$$\vec{q}_{rad} = \begin{cases} Q(x, y, z, W, V) = \frac{W}{V}, & (x, y, z) \in S_{rad}, \\ 0, & (x, y, z) \notin S_{rad}, \end{cases} \quad (14)$$

На інших границях ставилися адіабатичні умови. Всі параметри елементів батареї, повітряного потоку, початкові умови та обмеження були аналогічні попереднім моделям.

Для обчислення величини теплопровідності теплової трубки вона була замінена суцільним матеріалом з високою теплопровідністю. Підбиралася теплопровідність цього матеріалу так, щоб розрахункові та експериментально виміряні значення середніх температур поверхонь елементів батареї були рівними для однакових температур вхідного потоку повітря. У табл. 1 приведені обчислені температури поверхні елементів батареї та теплопровідність трубки.

Таблиця 1 – Теплові характеристики теплової трубки.

$T(\text{возд}), ^\circ\text{C}$	$q, \text{Вт}/(\text{мК})$	$T(\text{мин}), ^\circ\text{C}$	$T(\text{макс}), ^\circ\text{C}$	$T(\text{серед}), ^\circ\text{C}$
9.0	1100	17.1	21.8	20.3
20.0	1450	27.6	31.9	30.4
30.2	2400	37.0	40.5	39.2
38.6	2600	45.4	48.8	47.6

Ефективність охолодження батареї залежить від теплопровідності теплової трубки та ефективності охолодження радіатора потоком повітря і може бути записана як:

$$(Q/ITD)^{-1} = (Q/ITD_{\text{radiator}})^{-1} + q^{-1}, \quad (15)$$

де  $(Q/ITD_{\text{radiator}}) = \frac{Q}{T_{\text{radiator}} - T_{\text{air}}}$ ;  $T_{\text{radiator}}$  – середня температура поверхні радіатора, одержана в результаті моделювання.

Другий член в правій частині рівняння (15) відповідає середній теплової провідності вздовж теплової трубки:

$$q = \frac{Q}{\Delta T}, \quad (16)$$

де  $\Delta T$  різниця середньої температури поверхні елемента батареї та середньої температури радіатора.

Величина  $q$  була обчислена з рівняння (15) на підставі раніше отриманих значень  $Q/ITD$  та  $Q/ITD_{\text{radiator}}$ . На рис. 8 показана температурна залежність  $Q/ITD$ ,  $Q/ITD_{\text{radiator}}$  та  $q$ .

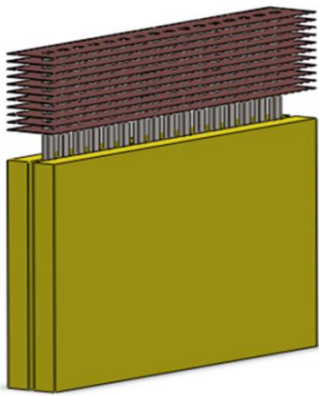


Рисунок 7 – Геометрична модель теплової трубки

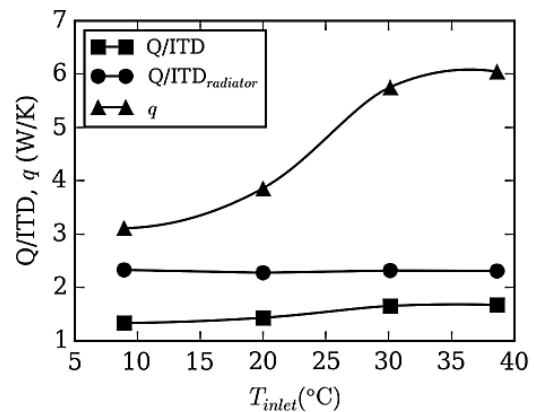


Рисунок 8 – Температурна залежність  $Q/ITD$ ,  $Q/ITD_{\text{radiator}}$  та  $q$

Моделювання теплового режиму охолодження Li-ion батареї за допомогою теплової трубки показує, що найбільший перехідний тепловий опір виникає на ділянці охолодження радіатора теплової трубки потоком повітря.

Обчислювальний метод на основі комплексу проблемно-орієнтованого програмного продукту був використаний для прикладної задачі математичного моделювання теплових процесів і природної конвекції в оптичному осередку гелію-3. Характер конвекції гелію сильно відрізняється від довжини області поглинання потужності. Відсутність нульових компонентів швидкості

конвективних потоків у всьому об'ємі камери свідчить про ефективне перемішування гелію.

Одним з перспективних методів охолодження повітря до температури  $20^{\circ}\text{C}$  та подальшого використання для відводу тепла від акумуляторної батареї є теплообмінники з використанням М-циклу. Охолодження відбувається при випаровуванні води в структурах з розділеними потоками повітря на два потоки: перший – для підтримки процесу випаровування води, другий – для охолодження. Робочий цикл теплообмінника наведено на рис. 9.

Лінія 1-2-3 є ідеальним М-циклом. Для потужності охолодження  $1500\text{ Вт}$  від  $50^{\circ}\text{C}$  до  $20^{\circ}\text{C}$  повітря необхідно  $10.8\text{ л}$  води. Така витрата води дещо обмежує застосування теплообмінника в рухомих пристроях, але може бути використана в стаціонарних станціях підзарядки батарей.

Наукові результати третього розділу опубліковані в роботах [2, 4 – 7, 9].

У четвертому розділі «Стенд для дослідження ефективності охолодження Li-іон батарей повітряним потоком» розглянуті питання, пов'язані з розробкою стенда для дослідження статичних та динамічних теплових характеристик Li-іон батарей при охолодженні їх повітряним потоком. У табл. 2 наведені основні характеристики стенду. Блок-схема стенду представлена на рис. 10.

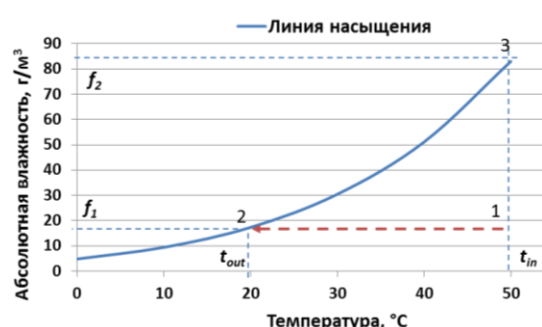


Рисунок 9 – Психрометрична діаграма робочого циклу теплообмінника

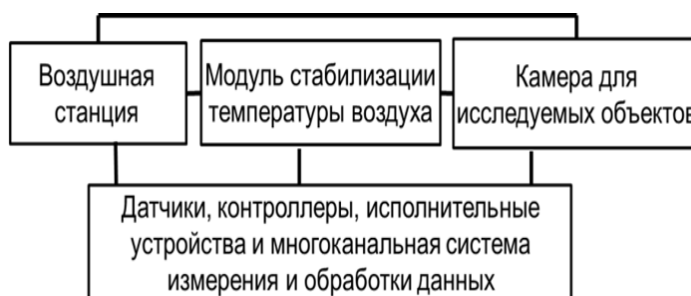


Рисунок 10 – Блок-схема стенду для дослідження характеристик охолодження Li-іон батареї повітряним потоком

Таблиця 2 – Основні характеристики стенду

Вихідний повітряний потік	до $80\text{ м}^3/\text{год}$
Температура потоку повітря на виході стенду	$-20^{\circ} \div +50^{\circ}\text{C}$
Нестабільність температури вихідного потоку повітря	не більше $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$
Найбільший тиск повітря на виході стенду	до $7000\text{ Па}$
Нестабільність величини потоку повітря	не більше 3%
Максимальна кількість датчиків температури	640
Точність вимірювання температури	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$

Результати четвертого розділу опубліковані в роботах [3, 6, 7, 10, 11].



У п'ятому розділі «Результати математичного моделювання та експериментального дослідження» описані комплексні дослідження роботи стенду та результати дослідження ефективності охолодження батарей.

Відносні відхилення ефективності охолодження імітаторів для експериментальних даних і результатів моделювання наведені на рис. 11.

Відносна різниця тиску у вхідному потоці повітря, отриманого за результатами моделювання і експериментальних даних:

$$\gamma = \frac{|p_{calc}^{in} - p_{exp}^{in}|}{p_0}, \quad (17)$$

де  $p_0$  – тиск у вихідному потоці повітря;  $p_{calc}^{in}$  – розрахунковий тиск у вхідному потоці повітря;  $p_{exp}^{in}$  – виміряний тиск у вхідному потоці повітря  $p_{exp}^{in} = p_0 + \Delta p_{exp}$ .

На рис. 12 наведені відносні різниці розрахункових тисків у вхідному потоці повітря та експериментальними даних в залежності від швидкості потоку повітря.

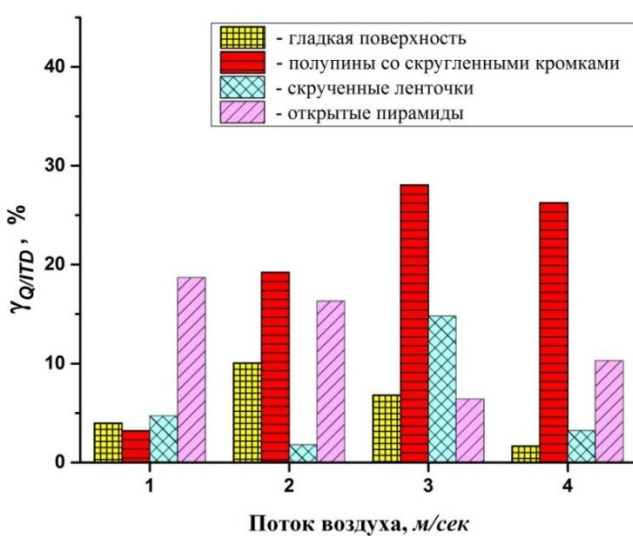


Рисунок 11 – Відносні відхилення ефективності охолодження імітаторів для експериментальних даних та результатів моделювання

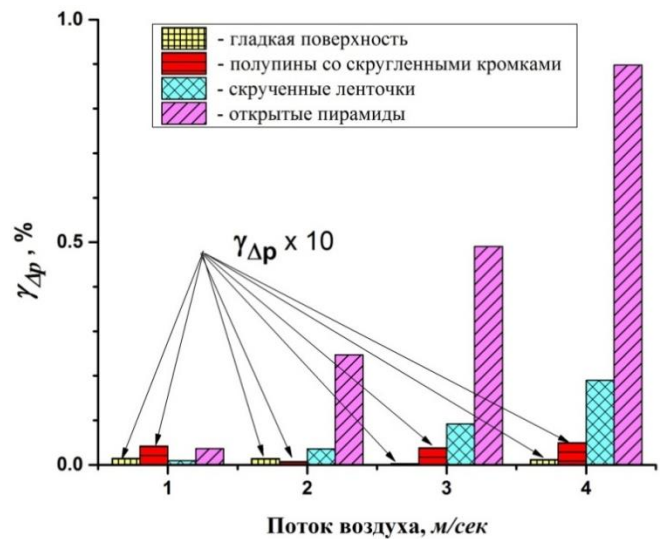


Рисунок 12 – Відносна різниця тиску у вхідному потоці повітря, отриманого з результатів моделювання і експериментальних даних

Наукові результати четвертого розділу опубліковані в роботах [2, 6 – 9].

У додатку А представлено документи, що підтверджують впровадження результатів дисертаційної роботи.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримано нове рішення науково-технічних завдань моделювання теплових процесів при охолодженні Li-ion батарей; обчислення ефективності охолодження та проведення досліджень на стенді з наступним порівнянням результатів моделювання з експериментальними даними.

На підставі отриманих результатів дисертаційної роботи можна зробити такі висновки.

1. Отримав подальший розвиток метод математичного моделювання теплових процесів при охолодженні Li-ion батарей повітряним потоком з малою швидкістю, який забезпечує обчислення ефективності систем охолодження батарей на основі усереднення температурних полів поверхонь елементів батареї, оптимізовані параметри моделей. Виконано оптимізацію параметрів моделей охолоджуючих поверхонь, визначені вимоги до обладнання для дослідження ефективності охолодження батарей. Розроблено стенд для дослідження ефективності охолодження Li-ion батарей однорідним та стабільним потоком повітря з малою швидкістю потоку. Конструктивно стенд включає в себе:

– повітряну станцію, що забезпечує реверсний повітряний потік до  $80 \text{ м}^3/\text{час}$  з нестабільністю потоку не більше 3%;

– модуль стабілізації температури вихідного потоку повітря в діапазоні від  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+50 \text{ }^\circ\text{C}$  та довготривалою нестабільністю температури потоку не більше  $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

– калориметричні камери для вимірювання теплових характеристик збірки імітаторів, що складається від 2 до 10 імітаторів;

– 640-канальну систему вимірювання температури на поверхнях збірки імітаторів з точністю  $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  для діапазону температур від  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+125 \text{ }^\circ\text{C}$ .

2. Розроблено метод розрахунку ефективності систем охолодження на основі вимірювання температурних полів на поверхнях елементів батареї та вперше виміряні ефективності систем охолодження для складних багатоканальних структур на поверхнях елементів Li-ion батарей поверхні типу «полупіни з округленими крайками», «скручені стрічки» та «відкриті піраміди». Виміряні ефективності охолодження збірок імітаторів з такими поверхнями для зазору між імітаторами 3 мм, діапазону температур вхідного потоку повітря  $10 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$  та швидкості потоку  $1 - 4 \text{ м/сек}$ . Ефективності охолодження для двох останніх видів поверхонь більші, в порівнянні з іншими поверхнями, однак, перепад тиску, при використанні поверхонь типу «скручені стрічки», менше, ніж у випадку «відкриті піраміди», що робить більш привабливим використання поверхонь типу «скручені стрічки». Результати вимірювань порівнюються з результатами моделювання. Деяка відмінність розрахункових

значень з експериментально виміряними для поверхонь з великим числом елементів може мати пояснення не абсолютністю форми реальних та заданих для розрахунків поверхонь.

3. Методом математичного моделювання отримані оптимальні параметри для модуля з імітаторами Li-іон батарей, вперше розроблені та виготовлені імітатори Li-іон батареї з теплопровідністю в площині імітатора рівної  $60 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$  та теплопровідністю по товщині імітатора –  $1 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ . Робочий режим імітатора відповідає найбільш важкому режиму експлуатації батарей. При роботі він виділяє до  $15 \text{ Вт}$  тепла на обидві поверхні.

4. На основі математичного моделювання теплових процесів охолодження Li-іон батареї визначені й оптимізовані параметри повітряних потоків, що охолоджують модулі Li-іон батарей, та вперше розроблена калориметрична камера для вимірювання ефективності охолодження окремих елементів та модулів Li-іон батареї однорідним повітряним потоком.

5. Уперше виконано моделювання процесу охолодження Li-іон батареї багатосекційною тепловою трубкою, розроблена багатосекційна теплова трубка, виміряна ефективність охолодження Li-іон батареї тепловою трубкою, запропонований метод обчислення і визначена питома теплопровідність теплової трубки.

6. Збільшено кількість каналів вимірювання температури для аналого-цифрової карти NI PCI-6225. Розроблено 20-канальні аналогові комутатори для 640-канальної системи вимірювання температури та програмне забезпечення в середовищі LabView. Виконано розрахунок похибок вимірювання ефективності охолодження імітаторів, вимірюваного на стенді. Похибка вимірювань ефективності охолодження імітаторів (з різними видами поверхонь) або тепловою трубкою не перевищує 5% для всього діапазону температур та величин потоків вхідного повітря.

7. Результати цієї роботи використовуються в розробках нового наукового обладнання в ННЦ ХФТІ. Так, наприклад, методи математичного моделювання моделювання процесів охолодження/нагрівання та 640-канальна система вимірювання температури використовуються в експериментальній установці «Мішень поляризованих ядер гелію-3».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Fedorchenko D. V. Mathematical Simulation of Conjugate Heat Transfer for Accumulator Batteries / D. V. Fedorchenko, M. A. Khazhmuradov, A. A. Lukhanin, Y. V. Rudychev // *Radioelectronics & informatics*. – 2012. – No. 4(59). – P. 78 – 81.

2. Byelyayev A. A. Measurement of air cooling characteristics for the several surface types of Li-ion battery / Andrey A. Byelyayev, Dmitriy V. Fedorchenko, Manap A. Khazhmuradov, Aleksandr A. Lukhanin, Oleksiy A. Lukhanin,

Sergey O. Martynov, Yegor V. Rudychev, Eugen O. Sporov, Upendra S. Rohatgi // Problems of atomic science and technology. – 2013. – No. 3(85). Series: Nuclear Physics Investigations (60). – P. 247–252.

3. Belyaev A. A. Air-Cooled Stand for Li-ion Battery Research / Andrey A. Belyaev, A. A. Lukhanin, Alexey A. Lukhanin, Viktor F. Popov, Yegor V. Rudychev, Evgenij A. Sporov, Dmitriy V. Fedorchenko, Manap A. Khazhmuradov // Telecommunications and Radio Engineering – 2015. – Vol. 74, – No. 17. – P. 1581–1592.

4. Беляев А. А. Расчет и моделирование температурного режима в гелиевой ячейке / А. А. Беляев, Александр А. Луханин, Алексей А. Луханин, Е. А. Споров, Д. В. Федорченко, М. А. Хажмурадов // Радиоелектроніка та інформатика. – 2013. – № 4(63). С. 3–8.

5. Khazhmuradov M. Analysis of the Maisotsenko cycle-based cooling system for accumulator batteries / Manap Khazhmuradov, Dmitriy Fedorchenko, Yegor Rudychev, Sergej Martynov, Alexander Zakharchenko, Svetlana Prokhorets, Anna Skrupnyk, Mikhail Krugol, Anatoliy Yurkin, Alexei Lukhanin, Alexander Lukhanin, Andrej Belyaev, Evgenij Sporov, Viktor Popov // International Journal of Energy for a Clean Environment. – 2011. – Vol. 12(2–4) –P. 95–99.

6. Belyaev A. Investigation of heat pipe cooling of Li-ion batteries [Електронний ресурс]/ Andrey Belyaev, Dmitriy Fedorchenko, Manap Khazhmuradov, Alexey Lukhanin1, Oleksandr Lukhanin, Yegor Rudychev, Bahram Khalighi, Taeyoung Han, Erik Yen, Upendra S. Rohatgi //ASTFE, Digital Library. Proceedings of the First Thermal and Fluids Engineering Summer Conference: Engineering Equipment and Processes. TFESC1. August 9–12. New York: Begell House. USA. – 2015. P. 13029 (12 pages.). – Режим доступу: www. URL: <http://dl.astfe.org/>

7. Lukhanin A. Thermal Characteristics of Air Flow Cooling in the Lithium Ion Batteries Experimental Chamber / Alexey Lukhanin, Andrey Belyaev, Dmitriy Fedorchenko, Manap Khazhmuradov, Oleksandr Lukhanin, Yegor Rudychev, Upendra S. Rohatgi // Proc. ASME 44779. Volume 1: Heat Transfer in Energy Systems. Rio Grande. Puerto Rico. USA. July 8–12. – 2012. – P. 129–133.

8. Lukhanin A. Investigation of Air Flow Cooling of Li-Ion Batteries / Alexey Lukhanin, Andrey Byelyayev; Dmitriy Fedorchenko, Manap Khazhmuradov, Oleksandr Lukhanin, Sergey Martynov, Yegor Rudychev, Eugene Sporov, Upendra S Rohatgi // Proc. ASME 56352. – Vol. 8B: Heat Transfer and Thermal Engineering. San Diego. California. USA. November 15–21. – 2013. – P. V08BT09A006 (6 pages).

9. Belyaev A. Investigation of Heat Pipe Cooling of Li-ion Batteries [Електронний ресурс] / Andrey Belyaev, Dmitriy Fedorchenko, Manap Khazhmuradov, Alexey Lukhanin, Oleksandr Lukhanin, Yegor Rudychev,

Bahram Khalighi, Taeyoung Han, Erik Yen, Upendra S. Rohatgi // Preprint Brookhaven National Laboratory. BNL-105291-2014- CP. – 2014. – 5 p. – Режим доступу: [www. URL: https://www.bnl.gov/isd/documents/86095.pdf](http://www.bnl.gov/isd/documents/86095.pdf)

10. Беляев А. А. 640-канальная система регистрации температуры / А. А. Беляев, А. А. Луханин, М. А. Хажмурадов // Информационные системы и технологии: тезисы докладов. IV международная научно-техническая конференция. 21-27 сентября 2015 г. – Х.: НТМТ. – 2015. – С. 28 – 29.

11. Беляев А. А. Многоканальная система измерения температуры и On-Line обработка данных / А. А. Беляев, Александр А. Луханин, Алексей А. Луханин, В. Ф. Попов, Е. А. Споров // XIII Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: тезисы докладов. 16–20 марта. Харьков. – 2015. – С. 22.

12. Луханин О. О. Оптимізація процесу охолодження акумуляторних батарей / О. О. Луханин, С. І. Прохорець, Є. В. Рудичев, Д. В. Федорченко, М. А. Хажмурадов // Міжнародна наукова конференція «Питання оптимізації обчислень (ПОО-XL)»: тези доповідей. Київ: Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. – 2013. – С. 154–155.

## АНОТАЦІЯ

**Луханин О.О. Математичні моделі та обчислювальні методи аналізу ефективності систем охолодження Li-ion батарей повітряним потоком.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, Харків, 2017.

Дисертація присвячена розробці методів математичного моделювання та дослідження теплових процесів в Li-ion батареях з великою накопленою енергією для підвищення ефективності, надійності та терміну використання їх в автомобілебудуванні та інших областях.

Виконано математичне моделювання теплових процесів при повітряному охолодженні об'єктів з великою кількістю елементів періодичної структури на поверхнях з використанням програмного пакету SolidWorks Flow Simulation.

Проведено розрахунки та досліджено ефективності охолодження батареї з поверхнями в вигляді «полупіни з округленими кромками», «скручені стрічки» «відкриті піраміди». Експериментальні результати близькі до розрахункових.

Розглянута математична модель теплової трубки, одержані ефективність охолодження Li-ion батареї тепловою трубкою та залежність питомої теплопровідності теплової трубки від температури елемента батареї.

Виконано моделювання процесу охолодження Li-ion батарей, основаному на використанні психрометричної різниці температур (М-цикл).

**Ключові слова:** математичне моделювання, Li-ion батареї, повітряний потік, температура, тиск, ефективність охолодження, обладнання, камера, датчики, теплова трубка.

## АННОТАЦІЯ

**Луханин А.А. Математические модели и вычислительные методы анализа эффективности систем охлаждения Li-ion батарей воздушным потоком.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. Харьковский национальный университет радиоэлектроники Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2017.

Диссертация посвящена развитию методов математического моделирования и исследованию тепловых процессов в Li-ion батареях с большой запасенной энергией для повышения эффективности, надежности и срока использования в автомобилестроении, и других областях.

Проведено математическое моделирование тепловых процессов при воздушном охлаждении для объектов с большим количеством элементов периодической структуры на поверхностях, перемешивающих воздушные слои в потоке. В работе использовался CFD пакет SolidWorks Flow Simulation.

Одной из задач исследований является изучение эффективности охлаждения Li-ion батарей с помощью тепловой трубки. Моделирование работы тепловой трубки и процессов охлаждения Li-ion батареи с помощью тепловой трубки осуществлялось при помощи пакета SolidWorks Flow Simulation. Тепловая трубка, работает по принципу термосифона. Для вычисления теплопроводности тепловой трубки она была заменена сплошным материалом с высокой теплопроводностью. Подбиралась величина теплопроводности этого материала так, чтоб расчетные и экспериментально измеренные значения средних температур поверхностей элементов батареи были равны для одинаковых температур входного потока воздуха. В этом случае, теплопроводность тепловой трубки соответствует теплопроводности сплошного материала. Теплопроводность тепловой трубки в диапазоне температуры потока охлаждающего воздуха  $9 - 40^{\circ}\text{C}$  растет с  $1100 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$  до  $2500 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ , а эффективность охлаждения батареи – с  $1.3 \text{ Вт}/^{\circ}\text{C}$  до  $1.7 \text{ Вт}/^{\circ}\text{C}$ . Показано что основной вклад в ограничение эффективности охлаждения батареи вносит эффективность охлаждения радиатора тепловой трубки.

Для исследования процессов охлаждения и нагрева Li-ion батареи

воздушным потоком была проведена оптимизация требований к оборудованию и разработан испытательный стенд. Стенд включает в себя воздушную станцию с потоком до  $80 \text{ м}^3/\text{час}$ , модуль стабилизации температуры воздуха в диапазоне от  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , 640-канальную систему измерения температуры и камеры для исследуемых батарей. Предложен метод измерения эффективности охлаждения с использованием имитаторов элементов Li-ion батареи с теплотехническими характеристиками, соответствующими элементам Li-ion батареи. Имитаторы имеют вид прямоугольного параллелепипеда со сторонами  $150 \times 200 \times 12 \text{ мм}$ . Теплопроводность  $60 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$  в продольных направлениях,  $1 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$  в поперечном направлении. Теплоемкость  $0,8 \text{ кДж}/\text{кг}$ . Тепловыделение в каждом имитаторе  $15 \text{ Вт}$ . Применение такого метода позволяет проводить измерение эффективности охлаждения с точностью  $\pm 5\%$ .

Для проверки работы стенда и получения данных об эффективности охлаждения батареи были разработаны и изготовлены имитаторы с поверхностями из алюминиевые фольги в виде «полупины со скругленными кромками», «скрученные ленточки» и «открытые пирамиды».

Экспериментальные значения эффективностей охлаждения имитаторов с разными видами поверхностей и перепады давления на имитаторах, близки к расчетным.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, Li-ion батареи, воздушный поток, температура, давление, эффективность охлаждения, оборудование, камера, датчики, тепловая трубка.

## ABSTRACT

**Lukhanin O.O. Mathematical models and computational methods for the analysis of the air cooling system efficiency inside Li-ion batteries package. – Manuscript.**

The thesis for the candidate's degree of technical science in a speciality 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. Kharkiv National University of Radioelectronics, Ministry of Education and Science of Ukraine Kharkiv, 2017.

Dissertation describes the development of modeling and research methods of thermal processes in Li-ion batteries and aimed to improve the efficiency and reliability of its use in the large stored energy automotive industry, and other fields. Using the efficient management of thermal processes allows up to 20% increase in usage of battery capacity, reduce the weight and increase the service life.

Mathematical modeling of thermal processes, with air cooling technique of objects with a large number of elements and periodic structure on the surfaces, use

SolidWorks Flow Simulation software package.

Efficiency calculations and battery cooling surfaces studies in the form of "half pins with rounded edges," "twisted ribbon" and "open pyramid" were numerically modeling. The experimental results are in the good agreement with the calculations.

**Key words:** mathematical modeling, Li-ion batteries, air flow, temperature, pressure, cooling efficiency, equipment, chamber, sensor, heat pipe.



Підп. до друку 13.12.16  
Формат 60×84 1/16.  
Спосіб друку – ризографія.  
Умов. друк. арк. 0,9  
Тираж 100 прим.  
Зам. № 2-92.  
Ціна договірна.

ХНУРЕ 61166, Харків, пр. Науки, 14  
Віддруковано в навчально-науковому  
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ  
61166, Харків, пр. Науки, 14