

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Луханіна Олександра Олексійовича  
«Математичні моделі та обчислювальні методи аналізу ефективності  
систем охолодження Li-ion батарей повітряним потоком»,  
що представлена на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук за спеціальністю  
01.05.02 — математичне моделювання та обчислювальні методи

**1. Актуальність теми дисертації.** Дисертаційна робота Луханіна О. О. присвячена питанням розробки математичних моделей теплових процесів в системах охолодження Li-ion батарей повітряним потоком та охолодженню батарей за допомогою теплової трубки. У дисертаційній роботі ставиться основна задача пошуку раціональних параметрів повітряного потоку — джерела збудження температурного поля на поверхнях елементів Li-ion батареї за відповідними обмеженнями для забезпечення найбільш ефективного Li-ion батареї при експлуатації.

Така постановка основної задачі характерна для: створення ефективних систем управління тепловими процесами Li-ion батарей; розробки обладнання для дослідження теплових процесів при охолодженні батареї; використання при розробці та дослідженні нового наукового та промислового устаткування. Отже, розробка математичних моделей теплових процесів в системах охолодження Li-ion батарей повітряним потоком та обчислювальних методів на основі комплексу проблемно-орієнтованого програмного продукту є актуальною науковою задачею.

**2. 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 Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» та спільного проекту ННЦ ХФТІ з BNL (США): проект III-6-11 «Дослідження фізичних процесів та оптимізація параметрів дослідних установок методами математичного моделювання» —



державний реєстраційний номер 0111U009294; проект III-7-11 «Фундаментальні та прикладні дослідження з ядерної фізики для потреб медицини, народного господарства, екології та енергетики» – державний реєстраційний номер 0111U009298; спільний проект ННЦ ХФТІ з BNL (США) – BNL-T2-371-UA «Розробка дослідного зразка системи термостабілізації Li-ion батарей». Дисертант в перерахованих вище роботах виступав в якості виконавця.

**3. Наукова новизна, обґрунтованість і вірогідність отриманих результатів.** Аналіз матеріалів дисертаційної роботи, ксерокопій публікацій автора та відповідність підрозділу «**особистий внесок здобувача**» у авторефераті, дозволив зробити наступні висновки.

1. Отримали подальший розвиток методи геометричного та математичного моделювання багатоканальних структур на поверхнях елементів Li-ion батареї для дослідження теплових процесів при охолодженні повітряними потоками з малою швидкістю, що дало можливість розширити типи (види) Li-ion батарей.

2. Вперше комплексно досліджені просторові поля 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»), що дає можливість збільшити ефективність систем охолодження Li-ion батарей.

3. Вперше розроблені математична модель охолодження Li-ion батареї за допомогою теплової трубки та метод обчислення її питомої теплопровідності, оснований на мінімізації середньоквадратичного відхилення обчислених і вимірних температур на поверхні елемента батареї, що дає можливість спростити конструкцію батареї.

4. На основі результатів математичного моделювання визначені та оптимізовані параметри повітряних потоків стенду для експериментального вимірювання ефективності охолодження елементів та модулів Li-ion батареї. Вперше розроблені калориметрична камера та імітатори Li-ion батареї з теплопровідністю, аналогічною елементам батарей. Показано, що помилка

вимірювання ефективності охолодження імітаторів та теплової трубки не перевищує 5% для усього діапазону температур та величин потоків повітря.

5. Вперше досліджені конвективні потоки в гелієвому осередку та на основі математичного моделювання теплових процесів показано, що їх швидкість близька до швидкості спінової дифузії.

6. Запропоновано застосування охолоджувачів вхідного потоку повітря, робота яких базується на використанні психрометричної різниці температур (М-цикл) в системах охолодження Li-ion батарей, що дає можливість покращити екологічну складову приборів, що проектуються.

**Обґрунтованість** наведених в роботі положень базується на застосуванні методів математичного моделювання систем з розподіленими параметрами для формалізації задачі оптимізації параметрів повітряних потоків при охолодженні Li-ion батарей з багатоканальними структурами на поверхнях елементів. Достовірність положень, висновків і результатів забезпечується коректною постановкою задачі з обґрунтованими припущеннями і обмеженнями, підкріплюється практичним впровадженням з перевіркою працездатності моделей, методів та програмних засобів, а також збігом результатів чисельного моделювання теплових процесів охолодження Li-ion батарей повітряним потоком з експериментальними дослідженнями.

**Вірогідність** викладених в роботі досліджень забезпечується коректністю постановки математичних задач дослідження та використанням відповідних математичних методів, відповідністю математичних моделей фізичній суті процесів, що описуються в роботі і оцінкам меж їх застосування. Розроблені в дисертації математичні моделі ґрунтуються на фундаментальних законах рівноваги та збереження, на методах системного аналізу і теорії систем, математичній теорії диференціальних рівнянь, методах математичного моделювання. Результати чисельного моделювання теплових процесів охолодження Li-ion батарей повітряним потоком та тепловою трубкою підтверджуються експериментальними даними.

**4. Оцінка змісту дисертації та автореферату.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків по розділам, загальних висновків, списку використаних літературних джерел, та додатку про

впровадження основних результатів дисертаційної роботи.

У першому розділі здійснено огляд факторів від яких залежить безпека та довговічність експлуатації Li-ion батарей. В приведеному порівнянні ефективності використання ємності батарей на теперішній час з планованими показниками показано наявність проблеми забезпечення найбільш ефективного теплового режиму батарей. Розглянуто основні теплові процеси та теплові потоки в елементах Li-ion батареї. Формулюється змістовна постановка основної оптимізаційної задачі: необхідно знайти параметри вихідного потоку повітря (температуру та швидкість), параметри конструкції батарей (відстані між її елементами) та вид поверхні трубки з багатоканальною періодичною структурою поверхонь, які б забезпечували максимальне значення функції мети (ефективності використання Li-ion батареї) з області допустимих розв'язків, що визначається з обмежень шуканих параметрів.

Другий розділ присвячено питанням математичного моделювання процесів теплообміну та гідрогазодинаміки, використанню комплексу проблемно-орієнтованого програмного продукту SolidWorks Flow Simulation, розробці геометричної моделі Li-ion батареї з плоскими поверхнями елементів та математичної моделі теплових процесів при охолодженні батареї потоком повітря. Необхідність цього дослідження обумовлена метою оптимізації параметрів повітряного потоку з точки зору найбільшої ефективності охолодження та вибору основних параметрів вихідних повітряних потоків стенду для дослідження систем охолодження Li-ion батарей.

У третьому розділі запропоновані геометричні та математичні моделі з багатоканальною періодичною структурою поверхонь елементів батареї, що збільшують ефективність систем охолодження. Виконані числові розрахунки розподілення температури на поверхнях елементів та тиску в зазорі між елементами батареї. На основі розрахунків одержані ефективності системи охолодження та перепади тиску в повітряному потоці при проходженні повітря через батарею. Оптимізовані величини — вхідна температура та швидкість потоку повітря для найбільш ефективної роботи системи

охолодження. Запропонована математична модель теплової трубки та метод обчислення питомої теплопровідності трубки. Визначена ефективність охолодження Li-ion батареї з тепловою трубкою.

Четвертий розділ присвячено розробці стенда для експериментального дослідження систем охолодження Li-ion батареї. Виконано розробки експериментальних калориметричних камер, імітаторів елементів Li-ion батареї та теплової трубки. Приведено розробки поверхонь елементів батареї з багатоканальною періодичною структурою. Розроблена багатоканальна система виміру температури та виконані розрахунки похибок вимірювання.

У п'ятому розділі описані комплексні дослідження роботи стенду, результати дослідження ефективності охолодження батарей з деякими видами поверхонь та ефективність охолодження батарей з допомогою теплової трубки. Показано, що результати математичного моделювання погоджуються з даними експериментального дослідження.

За структурою та оформленням дисертація та автореферат відповідають установленим вимогам. Автореферат повністю висвітлює основні положення та результати дисертації.

**5. Практична цінність результатів роботи.** Запропоновані в роботі математичні моделі та методи числового розрахунку ефективності систем охолодження Li-ion батарей дозволяють здійснювати ефективне математичне моделювання для різних систем теплообміну при проектуванні у науково-дослідних установах, конструкторських бюро в галузі автомобілебудування, авіації та для використання нетрадиційних джерел енергії.

Впровадження методів математичного моделювання, чисельних методів та методів вимірювання і обробки даних підтверджені довідкою про їх використання в ННЦ ХФТІ в експериментальній установці «Мішень поляризованих ядер гелію 3» для моделювання теплових процесів в гелієвому осередку, в багатоканальній системі вимірювання температури мішені, в системі вимірювання поляризації ядер гелію 3 та в системі управління адіабатичним реверсом поляризації.

**6. Повнота викладення основних результатів дисертації.** Отримані у дисертаційній роботі результати достатньо повно відображені у 12 наукових

працях, серед яких: 3 статті в спеціалізованих виданнях України за технічними науками, 2 статті в міжнародних фахових виданнях, 7 публікацій - матеріали і тези доповідей на міжнародних науково - практичних конференціях, з них 1 стаття опублікована в міжнародній електронній бібліотеці, 3 публікацій в матеріалах доповідей та 2 в тезах міжнародних наукових конференціях, 1 стаття опублікована у вигляді електронного препринту BNL (Brookhaven National Laboratory, USA). 3 публікації входять в наукометричну базу SCOPUS.

Публікації розкривають основний зміст дисертації та відповідають основним положенням і висновкам. В опублікованих працях викладено в повному обсязі основні отримані результати. Особистий внесок здобувача в сумісних публікаціях є підтвердженим. Рівень та кількість публікацій, рівень апробації відповідають вимогам, що ставляться до кандидатських дисертацій в Україні.

#### **7. Зауваження до змісту дисертації та автореферату.**

1. У першому розділі надано частину характеристик Li-ion батарей, яка не використовується при розробці математичних моделей батареї.

2. У третьому розділі (формула 3.4) не наведено оцінки кількості ітерацій для одержання необхідної точності в залежності від типу поверхні.

3. Не зрозуміло, за допомогою якого методу розв'язувалась задача оптимізації розмірів періодичних структур на поверхнях елементів Li-ion батареї.

4. Замало уваги виділено в роботі питанню обґрунтування вибору (критерію вибору та за якими характеристиками) програмного комплексу для числових розрахунків температурних полів та тиску в повітряному потоці.

5. У роботі оптимізація здійснюється за критерієм середньої інтегральної температури на поверхні (за одним критерієм), цікаво було б розглянути результати оптимізації за багатьма критеріями одночасно.

6. У списку використаних джерел посилання здійснюються ні за алфавітом, ні за порядком цитування, роботи 62 та 63 ідентичні.

7. В текстах автореферату та дисертації наявні стилістичні недоліки: перший пункт новизни на стор. 10; перший абзац розділу 1.4.; четвертий

абзац на стор.58. Незрозумілий вираз:”Идеальный вариант – это, когда все характеристики приближаются или выше 100%” (стор.20) і т.і.

**8. Висновки по дисертаційній роботі.** Зазначені недоліки не впливають на загальний рівень роботи. Вважаю, що дисертаційна робота «Математичні моделі та обчислювальні методи аналізу ефективності систем охолодження Li-ion батарей повітряним потоком» є завершеною актуальною науковою працею, в якій одержані нові науково обґрунтовані результати, що представляють вагомий внесок в методи математичного моделювання теплових процесів і які можуть бути поширені на інші фізико-технічні системи з розподіленими джерелами відповідних полів.

На підставі вищезазначеного вважаю, що кандидатська дисертаційна робота Луханіна Олександра Олексійовича «Математичні моделі та обчислювальні методи аналізу ефективності систем охолодження Li-ion батарей повітряним потоком» є завершеним науковим дослідженням, тема, об’єкт, предмет дослідження, зміст роботи, та основні результати відповідають пунктам 1, 2 і 4 паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи та всім вимогам чинних нормативних документів, у тому числі пунктам 9, 11 і 12 «Порядком присудження наукових ступенів», а її автор, Луханін Олександр Олексійович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент,

професор кафедри фізико-математичних дисциплін

Національного університету цивільного захисту України

д. т. н., проф.

В.М. Комяк

