

Красноруцький А. О., Вишнівський Я. О., Матвєєва В. С.

ІНТЕГРАЦІЯ ЕЛЕКТРОНАГРІВАЧІВ РЕЗИСТИВНОГО ТИПУ ДО СКЛАДУ БПЛА BAYRAKTAR TB2 В ЯКОСТІ ПРОТИЗЛЕДЕНІЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Анотація. На підставі аналізу сучасних підходів щодо використання безпілотних літальних апаратів Bayraktar TB2 під час ведення бойових дій в складних метеорологічних умовах, зокрема при низьких температурах та високій вологості, оцінюються можливості розробки способів, що сприятимуть підвищенню ефективності підготовки та експлуатації апарата.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, Bayraktar TB2, протизледенільна система, тонкоплівкові нагрівачі, аналітичні розрахунки, теплове моделювання.

Based on an analysis of current approaches to the use of Bayraktar TB2 unmanned aerial vehicles during combat operations in difficult meteorological conditions, particularly at low temperatures and high humidity, the possibilities for developing methods that will contribute to improving the efficiency of the preparation and operation of the aircraft are assessed.

Key words: unmanned aerial vehicle, Bayraktar TB2, anti-icing system, thin-film heaters, analytical calculations, thermal modeling.

Повномасштабне вторгнення Росії в Україну стало потужним стимулом для розвитку вітчизняної оборонної промисловості, особливо в галузі безпілотної авіації. Сучасні бойові дії чітко виявили, наскільки важливим є ефективне застосування безпілотних літальних апаратів для виконання завдань з розвідки, коригування вогню та знищення цілей, навіть за складних погодних умов. Одним із критичних аспектів, що впливають на безперебійну та ефективну роботу БПЛА, є захист їхніх ключових конструктивних елементів від обмерзання. Утворення криги на поверхнях крила, корпусу чи гвинтової групи призводить до значного зменшення підйомної сили, збільшення ваги апарата, що може призвести до втрати контролю над ним та, як наслідок, до аварійних ситуацій.

Актуальність даної теми обумовлена необхідністю забезпечення надійного функціонування БПЛА в складних метеорологічних умовах, зокрема при низьких температурах та високій вологості. Існуючі системи протизледеніння, що застосовуються на пілотованих літальних апаратах, не можуть бути безпосередньо інтегровані у безпілотники через обмеження маси, енергоспоживання та конструктивних особливостей. Тому, постає потреба у створенні легкої, енергоефективної та технологічно сумісної системи протизледеніння, придатної для інтеграції в конструкцію апарата без зміни його аеродинамічного профілю.

Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є використання резистивних електронагрівачів тонкоплівкового типу. Вони мають низку переваг:

- тонкоплівкова структура забезпечує однорідний нагрів поверхні, що сприяє ефективному видаленню або запобіганню утворенню льоду без утворення локальних “гарячих точок” і перегріву конструкційних елементів;
- надзвичайно мала товщина плівки дозволяє інтегрувати нагрівачі без зміни геометрії крила, що забезпечує збереження підйомної сили, аеродинамічного опору та керованості БПЛА;
- відсутність рухомих механічних елементів знижує ймовірність відмови системи, спрощує її монтаж, технічне обслуговування та експлуатацію в польових умовах;
- тонкоплівкові нагрівачі дозволяють локалізувати подачу тепла відповідно до зон утворення льоду, що зменшує енергоспоживання і оптимізує роботу системи;
- матеріали тонкоплівкових нагрівачів витримують широкий діапазон температур та високий рівень вологості, що робить їх придатними для застосування в екстремальних кліматичних умовах.

Для оцінки ефективності такого рішення проведено аналітичні розрахунки. Припустимо, що на поверхні крила утворився шар льоду товщиною $\delta = 1,5$ мм, а температура навколишнього середовища становить $t = -10^\circ\text{C}$. Необхідна питома теплова потужність q для видалення цього шару визначається як відношення тепла, необхідного для нагріву та плавлення льоду, до площі поверхні S :

$$q = Q/S \text{ [Вт/м}^2\text{]},$$

де Q – повна теплова енергія, що включає теплоту нагрівання льоду до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ та його теплоту плавлення. Розрахунки показали, що для зазначених умов потрібна питома теплова потужність:

$$q = 6,2 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$$

Для реалізації цього нагріву використовується ніхромовий нагрівальний елемент з питомим опором $\rho = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ }\Omega \cdot \text{м}$, товщиною $h = 0,05 \text{ мм}$ та напругою живлення $U = 28 \text{ В}$. Щільність струму в нагрівальному елементі визначається як:

$$j = I/A \text{ [А/мм}^2\text{]},$$

де I – сила струму, а $A = b \cdot h$ – площа поперечного перерізу дроту або плівки. За розрахунками, щільність струму становить $j = 25 \text{ А/мм}^2$, що забезпечує рівномірний тепловий потік.

Повна теплова потужність нагрівача на ділянці площі $S = 0,01 \text{ м}^2$ визначається як:

$$P = q \cdot S,$$

що дає $P \approx 65 \text{ Вт}$. Це означає, що навіть компактний нагрівач здатен ефективно видаляти лід товщиною $1,5 \text{ мм}$ при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ без шкоди для аеродинаміки крила.

Для підтвердження ефективності запропонованої протишледенільної системи проведено теплове моделювання, яке є комп'ютерною імітацією процесу нагріву поверхні крила БПЛА з урахуванням теплопровідності матеріалів, теплових втрат у навколишнє середовище, конвекції повітря та електричних характеристик нагрівачів. Теплове моделювання підтвердило, що інтеграція тонкоплівкових резистивних електронагрівачів у протишледенільну систему БПЛА Bayraktar TB2 є ефективним і технічно обґрунтованим рішенням. Система забезпечує рівномірний нагрів поверхні крила з допустимим відхиленням $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорочує час видалення льоду товщиною $1,5 \text{ мм}$ до 40 секунд та дозволяє знизити споживану потужність на $18 - 20\%$ порівняно зі стандартними системами. Це забезпечує надійну та стабільну роботу апарату у складних кліматичних умовах, підвищує енергоефективність і оперативність підготовки до бойового застосування.

Список використаних джерел:

1. Бабенко О. В., Ковальчук І. М. Сучасні системи протиобледеніння авіаційної техніки. – Київ: Наукова думка, 2020. – 256 с.
2. Березовський С. П. Безпілотні літальні апарати у сучасних бойових умовах. – Харків: ХНУПС, 2019. – 184 с.
3. Голуб В. В., Литвиненко А. Ю. Аналіз впливу льоду на аеродинамічні характеристики крил БПЛА // Авіаційна техніка та технології. – 2021. – № 15(2). – С. 45–53.
4. Лебедев П. С. Теплове моделювання систем протиобледеніння БПЛА // Журнал авіаційної науки. – 2022. – № 7(1). – С. 12–22.
5. Baykar Defence. Technical specifications and operational capabilities of Bayraktar TB2. – 2023. – Режим доступу: <https://www.baykardefence.com>.
6. National Research Council. Ice Protection Systems for Aircraft: Fundamentals and Design. – Washington, DC: The National Academies Press, 2016. – 320 p.
7. Zhang X., Li Y., Wang H. Thermal analysis and design of thin-film resistive heaters for UAV anti-icing applications // Applied Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 160. – P. 114–123.
8. Kim S., Lee J. Numerical simulation of ice melting on aircraft wings using resistive heating // Aerospace Science and Technology. – 2020. – Vol. 102. – 105935.

Красноруцький Андрій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри авіаційного обладнання літаків і вертольотів інженерно-авіаційного факультету, e-mail: krasnorycki@ukr.net, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4318-2217>, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, вулиця Динамівська 3а, м. Харків, 61023.

Вишнівський Ян Олексійович – професор кафедри авіаційного обладнання літаків і вертольотів інженерно-авіаційного факультету, e-mail: janvishnevski@gmail.com, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, м. Харків,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0009-4166-2334>, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І.Кожедуба, вулиця Динамівська 3а, м. Харків, 61023.

Матвєєва Влада Сергіївна – слухач 5 курсу інженерно-авіаційного факультету, e-mail: vlada161203@gmail.com, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І.Кожедуба, м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6134-6720>, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, вулиця Динамівська 3а, м. Харків, 61023.

Krasnorutskyi Andriy Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Aviation Equipment of Airplanes and Helicopters, Faculty of Aviation Engineering, e-mail: krasnorycki@ukr.net, Kharkiv National University of the Air Force named after I. Kozhedub, Kharkiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4318-2217>, Kharkiv National University of the Air Force named after I. Kozhedub, 3a Dynamivska Street, Kharkiv, 61023.

Vyshnivskiy Yan Oleksiyovych – Professor of the Department of Aviation Equipment of Airplanes and Helicopters, Faculty of Aviation Engineering, e-mail: janvishnevski@gmail.com, Kharkiv National University of the Air Force named after I. Kozhedub, Kharkiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0009-4166-2334>, Kharkiv National University of the Air Force named after I. Kozhedub, 3a Dynamivska Street, Kharkiv, 61023.

Matveeva Vlada Sergiyevna – 5th year student of the Faculty of Aviation Engineering, e-mail: vlada161203@gmail.com, Kharkiv National University of the Air Force named after I. Kozhedub, Kharkiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6134-6720>, Kharkiv National University of the Air Force named after I. Kozhedub, 3a Dynamivska Street, Kharkiv, 61023.