УДК 629.735.33:629.7.064

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЕКТУ ПЕРСПЕКТИВНОЇ ПРОТИЗЛЕДЕНІЛЬНОЇ СИСТЕМИ УДАРНОГО БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ BAYRAKTAR TB2

Анотація. *Розглянуто методичний підхід до оцінювання ефективності перспективної електротеплової протизледенільної системи Bayraktar TB2 за тепловими, енергетичними та експлуатаційними критеріями. Запропоновано програму порівняльних стендових досліджень, що дає змогу обґрунтувати придатність системи до інтеграції без приписування непідтверджених експериментальних результатів.*

Ключові слова: *Bayraktar TB2, обледеніння, електротепловий захист, тепловий баланс, енергоефективність, випробування.*

Abstract. A methodological approach to evaluating an electrothermal ice-protection system for the Bayraktar TB2 is presented. Thermal, electrical and operational performance criteria and a comparative laboratory test programme are proposed. Experimental performance is not claimed without validation.

Key words: *Bayraktar TB2, aircraft icing, electrothermal protection, heat balance, energy efficiency, testing.*

Обледеніння передніх кромок аеродинамічних поверхонь, елементів повітрозабірників і датчиків здатне змінювати характеристики обтікання та створювати передумови для порушення штатної роботи бортових систем. Для безпілотних літальних апаратів тривалого польоту особливо важливо забезпечити захист за обмежених резервів електричної потужності й маси. Тому вибір протизледенільної системи доцільно здійснювати не лише за здатністю нагрівати поверхню, а й за сукупністю показників ефективності та сумісності з бортовим обладнанням.

Мета дослідження – сформувати методику оцінювання ефективності запропонованої електротеплової протизледенільної системи Bayraktar TB2 та визначити критерії, за якими можна обґрунтувати її подальшу інтеграцію. Об’єктом є процес льодоутворення на конструктивних елементах БпЛА; предметом – технології й показники результативності захисту поверхонь від льодоутворення.

Попередній аналіз технічних рішень передбачає зіставлення електротеплових, повітряно-теплових, механічних і хімічних систем. Для подальшої перевірки обрано концепцію зонального електрорезистивного нагрівання з температурним контролем. Перевагою такої концепції є можливість адресного керування нагрівальними зонами; водночас вона потребує перевірки теплової рівномірності, електричного навантаження, стійкості матеріалів і безпечної роботи в разі відмов.

Як вихідні умови для дослідницького моделювання розглядалися наступні параметри: температура повітря від 0 до −40 °C, водність до 2,5 г/м³, характерний радіус переохолоджених крапель 10 мкм, орієнтовна площа локального захисту 0,6 м² і тривалість впливу до 15 хв [1]. Ці величини є сценарними припущеннями, а не підтвердженою експлуатаційною областю конкретної модифікації БпЛА; перед випробуваннями вони потребують уточнення відповідно до фактичних метеорологічних умов і геометрії дослідного зразка.

Ефективність системи пропонується досліджувати за трьома групами критеріїв: теплотехнічними (температура поверхні, час виходу на режим, нерівномірність нагрівання та залишкова маса льоду), енергетичними (середня і пікова потужність, витрачена енергія, питоме енергоспоживання), експлуатаційними (маса обладнання, стійкість до циклів нагрівання, відмовобезпечність та вплив на суміжні системи). Застосування єдиного набору критеріїв дозволяє коректно порівнювати варіанти захисту.

Тепловий баланс контрольної зони може бути представлений співвідношенням $P_{ел} \cdot \eta = \dot{Q}_{конв} + \dot{Q}_{випр} + \dot{Q}_{констр} + \dot{Q}_{води} + \dot{Q}_{акум}$, де $P_{ел}$ – споживана електрична потужність; η – коефіцієнт перетворення та передавання теплоти до захищеної поверхні; складові правої частини характеризують конвективні, радіаційні, конструкційні втрати, тепловий вплив води та накопичення теплоти. Для режиму видалення вже утвореного льоду додатково враховують теплоту фазового переходу $Q_{пл} = m_л \cdot \lambda$, де $m_л$ – маса льоду, $\lambda \approx 334$ кДж/кг — питома теплота плавлення. Лише за $Q_{пл}$ не можна визначити необхідну електричну потужність: потрібно врахувати час, теплообмін, температуру й умови обтікання [2].

Для зіставлення режимів пропонується застосовувати питому витрату енергії $e = E/A_з$, де $E = \int P_{ел}(t)dt$, $A_з$ – площа захищеної зони, а також коефіцієнт зменшення льодоутворення $K_л = (m_0 - m_з)/m_0$, де m_0 і $m_з$ – маси льоду на незахищеному та захищеному зразках за однакових умов. Показник $K_л$ має сенс лише за відтворюваного експерименту та однакового часу експозиції. Додатково оцінюється максимальне відхилення температури поверхні від заданого режиму.

Програма дослідження має включати випробування фрагментів поверхні з нагрівальними елементами та контрольних зразків без нагрівання. На кожному етапі реєструються температура повітря й поверхні, швидкість потоку, водність, електричні параметри та маса накопиченого льоду. Для забезпечення достовірності результати порівнюють за повторними дослідами, однаковими початковими умовами та з оцінюванням невизначеності вимірювань. Окремо перевіряють режими вмикання, регулювання й вимикання нагріву.

Під час оцінювання інтеграційної придатності необхідно встановити, чи не спричиняє робота нагрівачів неприпустимого зростання температури композитних елементів, перевантаження джерел електроживлення або електромагнітних завад. Результатом цього етапу повинна стати матриця відповідності: для кожного критерію визначають граничне допустиме значення, метод перевірки, фактичний результат і висновок щодо відповідності. Числові пороги мають встановлюватися на підставі конструкторської документації та окремо погоджених технічних вимог.

Висновки. Запропонований підхід дозволяє перейти від загального обґрунтування електротеплового захисту до кількісного порівняння його ефективності. Визначальними показниками є зменшення маси льоду, стабільність температури захищеної поверхні та енергетична ціна досягнутого результату. Напрямки подальшого дослідження – проведення стендових випробувань і верифікація теплової моделі, обґрунтоване твердження про ефективність та доцільність інтеграції системи.

Список використаних джерел:

1. Матвєєва В. Вдосконалення протизледенільної системи ударного безпілотного літального апарату Bayraktar TB2 : кваліфікаційна робота бакалавра. Харків : ХНУПС, 2025.

2. Бабенко О. В., Ковальчук І. М. Сучасні системи протиобледеніння авіаційної техніки. – Київ: Наукова думка, 2020. – 256 с.

3. Березовський С. П. Безпілотні літальні апарати у сучасних бойових умовах. – Харків: ХНУПС, 2019. – 184 с.

4. Голуб В. В., Литвиненко А. Ю. Аналіз впливу льоду на аеродинамічні характеристики крил БПЛА // Авіаційна техніка та технології. – 2021. – № 15(2). – С. 45–53.

5. Лебедєв П. С. Теплове моделювання систем протиобледеніння БПЛА // Журнал авіаційної науки. – 2022. – № 7(1). – С. 12–22.

6. Baykar Defence. Technical specifications and operational capabilities of Bayraktar TB2. – 2023. – Режим доступу: https://www.baykardefence.com.

7. National Research Council. Ice Protection Systems for Aircraft: Fundamentals and Design. – Washington, DC: The National Academies Press, 2016. – 320 p.

8. 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.

9. 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. Івана Кожедуба, м. Харків, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4318-2217, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана 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. Івана Кожедуба, м. Харків, ORCID: https://orcid.org/0000-0009-4166-2334, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, вулиця Динамівська 3а, м. Харків, 61023.*

Матвєєва Влада Сергіївна – *слухач 6 курсу інженерно-авіаційного факультету, e-mail: vlada161203@gmail.com, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, м. Харків, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6134-6720, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана 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.*

Vyshnivskyi 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 *– 6th year student of the Faculty of Aviation Engineering, email: 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.*