

**А. О. Красноручий, В. А. Хлоп'ячий, Р. В. Древенчук, В. С. Матвєєва**

## **АНАЛІЗ НЕБЕЗПЕЧНИХ МЕТЕОУТВОРЕНЬ ЯКІ СТАНОВЛЯТЬ ЗАГРОЗУ НОРМАЛЬНОМУ ФУНКЦІОНУВАННЮ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ БАУРАКТАР TB2 ПІД ЧАС ПОЛЬОТУ**

***Анотація:** розвідувально-ударний безпілотник Bayraktar TB2, наданий Туреччиною Збройним Силам України, продемонстрував свою ефективність у боротьбі з російськими окупаційними військами. Завдяки своїм характеристикам, безпілотник став надзвичайно небезпечним для ворожих сил. Але є безліч зовнішніх факторів, які впливають на результативність роботи безпілотника. Деякі, навіть, несуть летальні наслідки. Існуючі комплектації БпЛА мають у своєму складі лише систему попередження оператора про обледеніння апарату під час польоту. Досвід застосування БпЛА даного типу свідчить про його вразливість до обледеніння. Саме тому проведення аналізу небезпечних метеорологічних факторів є основною передумовою при розробці пропозицій щодо захисту БпЛА в ході його застосування в складних метеорологічних умовах.*

***Ключові слова:** літальний апарат, Bayraktar TB2, система противообледеніння, кристалізація.*

*The Bayraktar TB2 reconnaissance and strike drone provided by Turkey to the Armed Forces of Ukraine has demonstrated its effectiveness in the fight against Russian occupation forces. Due to its characteristics, the drone has become extremely dangerous for enemy forces. But there are many external factors that affect the performance of a drone. Some of them are even fatal. Existing UAV configurations have only a system to warn the operator about icing during flight. The experience of using this type of UAV shows that it is vulnerable to icing. That is why the analysis of hazardous meteorological factors is the main prerequisite for developing proposals for the protection of UAVs during their use in difficult meteorological conditions*

***Keywords:** aircraft, Bayraktar TB2, de-icing system, crystallization.*

В ході застосування Bayraktar проявилися не тільки позитивні сторони його конструктивного виконання, а також ряд конструктивно-виробничих недоліків. Однією з слабких сторін безпілотника є відсутність системи противообледеніння, що в екстремальних умовах агресивного середовища низьких температур може вплинути на результати його застосування. Саме тому проведення аналізу небезпечних метеорологічних факторів з метою подальшої розробки системи противообледеніння безпілотника є актуальною науково-прекладною задачею розглянутою в даній роботі.

Усі видимі метеорологічні явища погоди, зокрема й умови, за яких виникає обледеніння безпілотного літального апарату, формуються головним чином у нижньому шарі атмосфери – тропосфері. Як відомо, її висота біля полюсів і на екваторі коливається від 7 до 16-18 км. У ній зосереджено приблизно 7-10 усієї маси повітря. У тропосфері повітря складається з суміші газів, води в трьох станах: рідкій, пароподібній, кристалічній і різних домішок: найдрібнішого пилу, продуктів горіння, спор рослин, солей тощо. На відміну від основного складу повітря, кількість домішок, що є ядрами конденсації та кристалізації води, істотно змінюється, по висоті та вздовж поверхні землі. Потужні теплові вертикальні потоки повітря, безперервне перемішування повітряних мас із різною температурою та тиском, зниження температури та тиску повітря з висотою-обумовлюють також зміну концентрації води в повітрі, сприяють конденсації водяної пари та формуванню хмар, туману, дощу, снігу або граду. За певних умов вода може перебувати в переохолодженому стані.

Обледеніння безпілотних літальних апаратів здебільшого відбувається під час польоту в цьому середовищі, яке містить краплі води за від'ємної температури навколишнього повітря, здебільшого в хмарах або в умовах переохолодженого дощу.

Відомо, що вода в рідкому стані може зберігатися тривалий час за порівняно низької температури, за  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$  і нижче. Причини цього, а також швидкої її кристалізації під час зіткнення з поверхнею літального апарата поки що вивчені ще недостатньо.

Для кристалізації переохолоджених крапель необхідна певна сукупність умов. Процес переходу з одного стану в інший описується кінетичним рівнянням фазових рівноваг, яке в загальному вигляді може бути записане у вигляді експоненціальної функції:

$$V = k_1 e^{-k_2 T \tau}$$

де  $V$  – швидкість зміни основного визначального параметра;  $k_1$  – передекспоненціальний множник, що залежить від умов переходу системи в термодинамічно рівноважний стан (наприклад, густина центрів зародків кристалізації);  $k_2$  – енергетичний критерій переходу системи в рівноважний стан;  $T$  – абсолютна критична температура при фазовому переході;  $\tau$  – час фазового переходу.

Перехід системи в термодинамічний рівноважний стан визначається умовами появи центрів утворення осередків нової фази. Ядрами кристалізації можуть бути перелічені вище домішки. На великих висотах за низьких температур повітря ядра кристалізації можуть виникати мимовільно, випадковим угрупованням молекул води. Чим нижча температура, тим швидше виникає початковий кістяк кристалічної решітки, який служить ядром кристалізації, і чим менший об'єм переохолодженої води, тим менш імовірним є виникнення ядер кристалізації. Через малий розмір переохолоджених крапель (кілька десятків мкм) мимовільна кристалізація їх може відбуватися за дуже низьких температур повітря.

Кристалізації переохолоджених крапель в атмосфері перешкоджає недостатнє відведення тепла з поверхні крапель в навколишнє розріджене середовище, наявність певного протитиску, що створюється силами поверхневого натягу, який стримує збільшення об'єму води під час замерзання, вплив сонячної радіації тощо. Як показують дослідження, у хмарних краплях завжди є розчинені речовини, такі як солі, іони хлору. При зменшенні діаметра крапель концентрація цих речовин збільшується. Відповідно до закону Рауля, вміст у рідині сторонніх речовин знижує температуру її замерзання. Не виключена можливість і того, що хмари можуть містити краплі аномальної та сверханомальної води (що утворюється в результаті випаровування з численних капілярів поверхні землі), що має низьку температуру замерзання (близько  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Найімовірнішими причинами швидкої кристалізації переохолоджених крапель під час зіткнення з поверхнею літальних апаратів вочевидь слід вважати:

- наявність на поверхні найдрібніших кристалів льоду і пилу, які є ядрами кристалізації;
- можливість утворення під час зіткнення крапель із поверхнею ультразвукових хвиль, що значно прискорюють процес мимовільного утворення ядер кристалізації.

Вплив механічного фактора під час удару крапель об поверхню на кристалізацію крапель сумнівний. Як показують експерименти, переохолоджена вода проявляє велику стійкість до різних механічних впливів. Остаточні висновки можуть бути зроблені тільки після того, як повністю буде розкрито фізику механізму кристалізації переохолоджених крапель на поверхні літального апарата.

Надалі вважатимемо, що якщо умови теплообміну на поверхні, що обмерзає, забезпечують відведення прихованої теплоти кристалізації та водночас рівноважна температура поверхні за своїм значенням нижча за  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то вся вода при цьому досить швидко, практично миттєво, кристалізується.

Поряд з обледенінням, зумовленим наявністю в навколишньому середовищі переохолоджених крапель води, так званим "крапельним" обледенінням, існує якісно відмінний вид обледеніння літальних апаратів – сублімаційне обледеніння. Сублімаційне обледеніння

відбувається внаслідок переходу водяної пари, що міститься в повітрі, безпосередньо в твердий стан, міняючи рідку фазу.

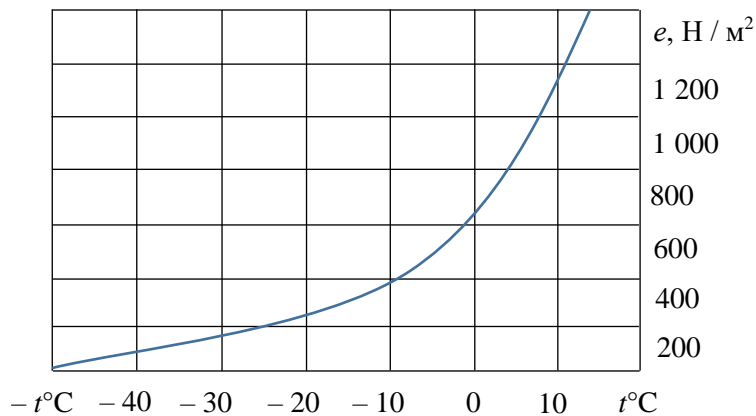


Рисунок 1 . – Залежність пружності водяної пари від температури середовища

Як відомо, кількість водяної пари, що перебуває у повітрі, характеризується його абсолютною або відносною вологістю. Абсолютна вологість - кількість (маса) водяної пари в 1 м<sup>3</sup> вологого повітря. За даної температури повітря може містити цілком певну максимальну (насичену) кількість водяної пари.

Найчастіше для характеристики вмісту водяної пари в повітрі використовують параметр – пружність (парціальний тиск) водяної пари –  $e$ . Максимальна пружність водяної пари значною мірою змінюється залежно від температури повітря.

Значення пружності водяної пари за різних температур повітря над водною поверхнею і поверхнею льоду (Н/м<sup>2</sup>) наведено нижче в табл. 1.

Таблиця 1.1 – Характерні залежності значень пружності водяної пари за різних температур повітря над водною поверхнею і поверхнею льоду

Температура навколишнього середовища (°C)	- 50	- 40	- 30	- 20	- 10	- 5	0	10
Парціальний тиск водяної пари над водою	6,66	18,7	52	133	286	421,3	610	1228
Парціальний тиск водяної пари над льодом	4	12,9	38,2	103,5	260	402	610	–

З порівняння значень пружності водяної пари над поверхнею води та льоду випливає, що пружність насичених водяних пар поблизу поверхні льоду менший, ніж над поверхнею води. Тому за досить низьких від’ємних температур, незважаючи на те, що повітря не досягає стану насичення щодо води (відносна вологість його менша за 100%), воно може виявитися перенасиченим над поверхнею льоду, а отже, виникне сублімація водяної пари.

Таке сублімаційне обледеніння літальних апаратів може мати місце під час польоту в безхмарній атмосфері в тому разі, якщо поверхні попередньо вкрилися тонким і несподіваним шаром льоду, або в разі різкого зниження літального апарата, коли його поверхня зберігає температуру нижчу за температуру довкілля (за значення її, що відповідає точці інею).

Таким чином можна зробити висновок, що із двох основних, якісно відмінних один від одного видів обледеніння (крапельного і сублімаційного) найбільшу небезпеку в польоті становить перший вид. Сублімаційне обледеніння не може бути значним. Зрідка спостерігається так зване сухе обледеніння – осідання на поверхні кристалів льоду під час польоту в кристалічних хмарах найчастіше в тропічних районах. Особливої небезпеки цей вид обледеніння також не становить.

#### Список використаних джерел

1. Т.П. Мещерякова “Проектирование систем защиты самолётов и вертолетов”.
2. BAYKAR, <https://baykartech.com/en/uav/bayraktar-tb2/>
3. [Bayraktar TB2 Armed Unmanned Aerial Vehicle](https://www.turkishdefencenews.com/bayraktar-tb2-armed-unmanned-aerial-vehicle/),  
<https://www.turkishdefencenews.com/bayraktar-tb2-armed-unmanned-aerial-vehicle/>
4. DeepL Translate, <https://www.deepl.com/ru/translator>.

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

**Хлоп'ячий Вячеслав Анатолійович** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри авіаційного обладнання літаків і вертольотів інженерно-авіаційного факультету, e-mail: [0674648530@ukr.net](mailto:0674648530@ukr.net), Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4038-9551>, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, вулиця Динамівська 3а, м. Харків, 61023.

**Древенчук Роман Васильович** – викладач кафедри авіаційного обладнання літаків і вертольотів інженерно-авіаційного факультету, e-mail: [mailboy@gmail.com](mailto:mailboy@gmail.com), Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8935-0923>, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, вулиця Динамівська 3а, м. Харків, 61023.

**Матвєєва Влада Сергіївна** – курсант 4 курсу інженерно-авіаційного факультету, e-mail: [vlada161203@gmail.com](mailto:vlada161203@gmail.com), Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6134-6720>, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, вулиця Динамівська 3а, м. Харків, 61023.

**Andrii Oleksandrovych Krasnorycki** – candidate of technical sciences, associate professor, head of the department of aircraft and helicopter aviation equipment of the aviation engineering faculty, e-mail: [krasnorycki@ukr.net](mailto:krasnorycki@ukr.net), Ivan Kozhedub Kharkiv National University of the Air Force, Kharkiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4318-2217>, Ivan Kozhedub Kharkiv National University of the Air Force, 3a Dynamivska Street, Kharkiv, 61023.

**Vyacheslav Anatoliyovych Khlopyachiy** – candidate of technical sciences, associate professor, professor of the Department of Aircraft and Helicopter Aviation Equipment of the Aviation Engineering Faculty, e-mail: [0674648530@ukr.net](mailto:0674648530@ukr.net), Ivan Kozhedub Kharkiv National University of the Air Force, Kharkiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4038-9551>, Ivan Kozhedub Kharkiv National University of the Air Force, 3a Dynamivska Street, Kharkiv, 61023.

**Drevenchuk Roman Vasyliovych** – lecturer at the Department of Aircraft and Helicopter Aviation Equipment of the Aviation Engineering Faculty, e-mail: [mailboy@gmail.com](mailto:mailboy@gmail.com), Ivan

*Kozhedub Kharkiv National University of the Air Force, Kharkiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8935-0923>, Ivan Kozhedub Kharkiv National University of the Air Force, 3a Dynamivska Street, Kharkiv, 61023.*

***Matveeva Vlada Serhiyivna** – cadet of the 4th year of the aviation engineering faculty, e-mail: [vlada161203@gmail.com](mailto:vlada161203@gmail.com), Kharkiv National University of the Air Forces named after Ivan Kozhedub, Kharkiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6134-6720>, Kharkiv National University of the Air Force named after Ivan Kozhedub, 3a Dynamivska Street, m. Kharkiv, 61023.*