

Алексєєнко Сергій¹, Сазанішвілі Зоя², Некрасов Валерій³

¹професор кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства, д.т.н., професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: aleksieienko.s.v@nmu.one

²доцент кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну, к.т.н., доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: sazanishvili.z.v@nmu.one

³асистент кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: nekrasov.v.ye@nmu.one

ВПЛИВ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ НА РОБОТУ МАЛИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Анотація. У дослідженні розглянуто вплив метеорологічних умов на обледеніння малих безпілотних літальних апаратів масою 15–150 кг. Аналізуються ризики утворення льоду на висотах до 1000 м, особливо в шаруватих і купчастих хмарах за температур від 0°C до -20°C. Оцінюються параметри LWC, MED та коригувальні коефіцієнти для прогнозування обмерзання й забезпечення надійності БПЛА під час польоту.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, обледеніння, метеорологічні умови, вологість, середній ефективний діаметр капель.

Вступ. Застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у гуманітарній, комерційній та військовій сферах зростає, що вимагає досліджень для підвищення їхньої ефективності та надійності. Особливо важливо забезпечити їхню стабільну роботу в складних метеоумовах, зокрема за низьких температур і високої вологості. Обледеніння аеродинамічних поверхонь і конструктивних елементів може негативно впливати на безпеку польоту, функціонування систем та ефективність виконання завдань.

Обледеніння літальних апаратів – складний процес, що виникає внаслідок утворення льоду на їхніх аеродинамічних поверхнях. Для великих літаків ця проблема частково вирішується шляхом використання потужних систем термозахисту та технологій проти обледеніння. Однак для малих БПЛА такі системи часто недоступні через обмежені енергетичні ресурси та конструктивні особливості. Це робить аналіз



умов обледеніння та розробку ефективних методів їхньої мінімізації особливо актуальними.

Матеріал і результати досліджень. Утворення льоду на аеродинамічних поверхнях знижує підйомну силу, збільшує опір і викликає вібрації – виникає необхідність у збільшенні кута атаки, що призводить до втрати швидкості, висоти та переводу БПЛА в неоптимальний режим. Обледеніння керуючих поверхонь може повністю позбавити апарат керованості, тоді як лід на гвинтах знижує тягу, а на сенсорах — точність навігації. Додаткова маса льоду та підвищене енергоспоживання критично впливають на малі БПЛА з обмеженими ресурсами.

Варто зазначити, що за однакових метеорологічних умов обледеніння має більш серйозний вплив на малі БПЛА, ніж на великі повітряні судна. Невеликий запас підйомної сили призводить до того, що навіть незначні зміни форми профілю крила через льодові нарости можуть суттєво погіршити аеродинамічні характеристики та керованість. Крім того, на менших за розміром профілях льодові утворення, за однакових умов, мають відносно більші розміри та значніше змінюють їхню форму, що ще більше впливає на аеродинаміку. Обмежені енергетичні ресурси малих БПЛА не дозволяють використовувати потужні системи термозахисту, а збільшення маси через утворення льоду може критично вплинути на балансування апарата та призвести до втрати керованості.

У цьому дослідженні основна увага зосереджена на малих БПЛА масою від 15 до 150 кг, які поєднують компактність і мобільність із достатньою вантажопідйомністю. Це робить їх оптимальними для виконання широкого спектра завдань, зокрема моніторингу, розвідки, картографування, пошуково-рятувальних операцій.

Залежно від конкретної місії та типу БПЛА, маршрут і умови польоту можуть змінюватися, однак у більшості випадків малі БПЛА працюють на висотах до 1000 м, де ризик обледеніння є найвищим за мінусових або близьких до нуля температур і високої вологості.

Обледеніння літальних апаратів і їхніх елементів найчастіше відбувається в температурному діапазоні від 0°C до -20°C. За вищих температур лід, як правило, не утворюється, а за нижчих переохолоджені краплі вже перебувають у кристалізованому стані. Згідно з International Cloud Atlas [0] виокремлюють три основні типи хмар: низькі, середні та високі. У контексті розглянутих місій БПЛА найбільшу небезпеку становлять низькі хмари, розташовані на висотах до 2000 м. Особливу увагу слід приділити шаруватим і купчастим хмарам, оскільки ймовірність утворення льоду в них найвища.



Дані про характеристики обледеніння містяться в Кодексі федеральних правил (CFR), розділ 14, частина 25, додатки С і О, а також у частині 29, додаток С [6].

Додаток С надає можливість аналізувати параметри рідкого водного вмісту (LWC), середнього ефективного діаметру крапель (MED), температури та протяжності зон обмерзання, характерних для шаруватих і купчастих хмар. Такий комплексний підхід дає змогу об'єктивно оцінювати ризики виникнення обмерзання БПЛА залежно від специфіки їхньої експлуатації.

LWC у шаруватих хмарах нижчий порівняно з купчастими, особливо за великих значень MED. У купчастих же хмарах LWC вищий, а його залежність від температури виражена більш яскраво, що вказує на складну структуру і динаміку цих хмар. За нижчих температур спостерігається зниження LWC для обох типів хмар, що пов'язано або з процесами замерзання крапель, або зі зменшенням LWC за нижчих температур.

Імовірність того, що LWC досягне максимального значення, встановленого для даної температури і еталонної протяжності хмарності, становить 99%. При цьому еталонна протяжність шаруватих хмар становить 32,2 км, а купчастих – 4,8 км. У реальних умовах ці значення можуть відрізнятися, тому для уточнення параметра LWC застосовують коригувальні коефіцієнти. Коригувальний коефіцієнт враховує протяжність зони короткочасного обмерзання. Для обох типів хмар збільшення відстані, на якій проводиться усереднення, призводить до зниження максимально можливого значення LWC, і навпаки, зменшення протяжності зони обмерзання підвищує його значення.

Додаток О враховує великі переохолоджені краплі, характерні для замерзаючої мряки і замерзаючого дощу. Ці умови становлять серйозну загрозу для малих БПЛА, оскільки можуть спричинити інтенсивне обмерзання, що призводить до значних змін аеродинамічних характеристик, відмов систем керування і зниження стійкості апарата в польоті.

Висновок. Малі БПЛА більш схильні до обмерзання порівняно з великими літальними апаратами. Обмежені енергоресурси, мала вантажопідйомність і специфічні умови експлуатації роблять їх особливо вразливими. Висока вологість і низькі температури на малих висотах сприяють швидкому утворенню криги, водночас традиційні антикригові системи часто не можуть бути застосовані через обмеження за вагою та енергоспоживанням.

Наявні метеорологічні дослідження і стандарти дають змогу прогнозувати ймовірність обмерзання малих БПЛА. Однак подальші дослідження в цій галузі



необхідні для створення спеціалізованих технологій захисту, які підвищують надійність і безпеку безпілотних систем у складних погодних умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

5. Home International Cloud Atlas. International Cloud Atlas. <https://cloudatlas.wmo.int>
6. Aircraft ice protection. Advisory Circular of Federal Aviation Administration 20-73A (2006).
7. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes CS-25, Amendment 17. European Aviation Safety Agency (2015).
8. Richard K. (2002) Jeck Icing Design Envelopes (14 CFR Parts 25 and 29, Appendix C). Converted to a Distance-Based Format.

