

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ЗМЕНШЕННЯ ШУМУ ОБЕРТОВИХ ПРОПЕЛЕРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БІОМІМІКРІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Анотація

Потенціал "акустичної шкіри метелика" як нового методу зменшення аероакустичного шуму для тихого пропелера було оцінено. Ця тема особливо актуальна через збільшення кількості пропелерів для цивільних та військових цілей з множинними експлуатаційними проблемами. Увага була спрямована на цю проблему спостереженням за пористими лусками лускокрилих та їх властивостями зменшення шуму: покриття метеликів дозволяє цим кохам відбивати напади кажанів вночі. Ці вирости дуже малі (розмір: 30 - 200 мкм) і мають різну пористу структуру. Хоча багато структур пористих лусок лускокрилих обговорювалися, тут обговорюються лише пористі луски метеликів *Papilio nireus* і *Delias nigrina*. Два дизайни "акустичної шкіри метелика" імітують порожні луски на крилах метелика *Papilio nireus* (порожнина) та метелика *Delias nigrina* (пориста область). Результати ілюструють вплив структури типу "акустичної шкіри метелика" на акустичні характеристики пропелера. Для числа Рейнольдса 200,000 зменшення шуму обертаючогося пропелера типу "акустична шкіра метелика" з пористою областю складає 4 дБ, коли пропелер типу "акустична шкіра метелика" з порожниною складає 2 дБ. Зміна акустичних ефектів на обертаючомуся пропелері з "акустичною шкірою метелика" була зумовлена як акустичним поглинанням, так і розсіянням турбулентної енергії, зменшенням впливу на генерований шум та зменшенням різниці тиску. В результаті якісних досліджень було визначено, що "акустична шкіра метелика" впливає на акустичні характеристики пропелера. Інші дослідження "шкіри метелика" показали, що шкіра збільшує підйомну силу і зменшує вібрацію крила. Експериментальне дослідження впливу акустична шкіра метелика на вібрацію та аеродинамічні характеристики пропелера не входило в рамки цього експерименту.

Ключові слова: біомімікрія, звукопоглинання, шорсткість поверхні, шум, метелик, аеродинаміка, лепідоптери, фотонічні кристали, акустичні властивості.

Вступ

Пропелер - це тип системи аеродинамічного приводу, яка передає потужність, перетворюючи обертовий рух в тягу. Історія аеродинамічного пропелера зазвичай починається з згадки про китайський літаючий вертушок (близько 400 до н.е.), який був палицею з пропелером на вершині, який обертася руками та випускався. Серед робіт да Вінчі (кінець XV століття) були нариси машини для вертикального польоту з використанням гвинтового пропелера. Брати Райт розробляли та випробовували аеродинамічні пропелери та здійснили перший збиток у 1903 році. Пропелери були першими засобами приводу літаків, передуючи всі інші засоби приводу приблизно на 40 років. Ця аеродинамічна система приводу широко використовувалася до 1940-х років.

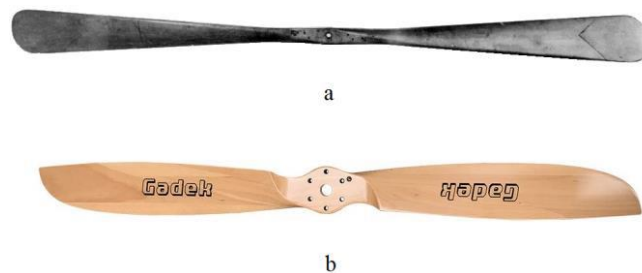


Рис 1: Пропелер братів Райт, б. Пропелер Гадека.

Хоча з часом було багато вдосконалень у пропелерах, загальний зовнішній вигляд пропелерів мало змінився (Рис. 1). Пропелер повітряного судна можна описати як відкрите, обертове і клинчасте пристрій. Сьогодні знову звертають увагу на перший аеродинамічний привід - пропелер. Це пов'язано зі зростанням використання безпілотних літальних апаратів, зростанням ринку загальної авіації,

збільшеним інтересом до категорій ультралегких або легких спортивних повітряних суден [4].

Однією з найбільш тривожних проблем літаків з приводом від пропелера був і залишається їхній шум, який може обмежувати експлуатацію літака. Загалом, діапазон частот для слуху людини, який зазвичай називають аудіочастотами, зазвичай вказується приблизно як 20 Гц - 20 кГц. І хоча людське вухо чутливе до звуків від 0 до 140 дБ, рівень звуку (140 дБ) є надто болісним для слухача. У привідних системах на основі пропелера основними джерелами шуму є двигун та пропелер. Зменшення шуму від пропелера літака вивчалось з ранніх часів авіації. Спочатку потреба у зменшенні шуму була пов'язана з необхідністю зменшення виявності військових операцій. Шум, що генерується літаками, може поширюватися в район аеропорту та в салон літака, спричиняючи дратування та незручності мешканців і пасажирів.

Одним із найбільш відомих методів зменшення аероакустичного шуму є модифікація геометрії лопатей. Відомо, що різні параметри у деталях різних конструкцій, такі як кількість лопатей, форма лопаті, діаметр пропелера, кут нахилу лопаті, геометричні модифікації торцевого краю та фінішування пропелера, мають вплив на аероакустичний шум. Шум від пропелера може бути зменшений за рахунок збільшення кута захоплення, зменшення товщини лопаті та зменшення швидкості кінця лопаті.

Мета роботи: полягає в дослідженні впливу структурних особливостей крил метеликів на акустичні характеристики обертових пропелерів. Конкретно, досліджується ефективність використання біомімікрійних підходів для створення акустично ефективного матеріалу для оболонки пропелера. Це включає аналіз акустичного поглинання та зменшення шуму за допомогою використання певних структур крил метеликів, що може вплинути на рівень шуму, генерованого обертовим пропелером. В результаті роботи буде зроблено висновки про ефективність та перспективи використання таких матеріалів для зменшення шуму в авіаційних та інших технологіях.

Постановка задачі: Провести аналіз структурних особливостей крил метеликів (Lepidoptera) з метою виявлення потенційно ефективних характеристик для зменшення акустичного шуму.

Розробити математичну модель взаємодії звукової хвилі з структурою крил метеликів та пропелерів.

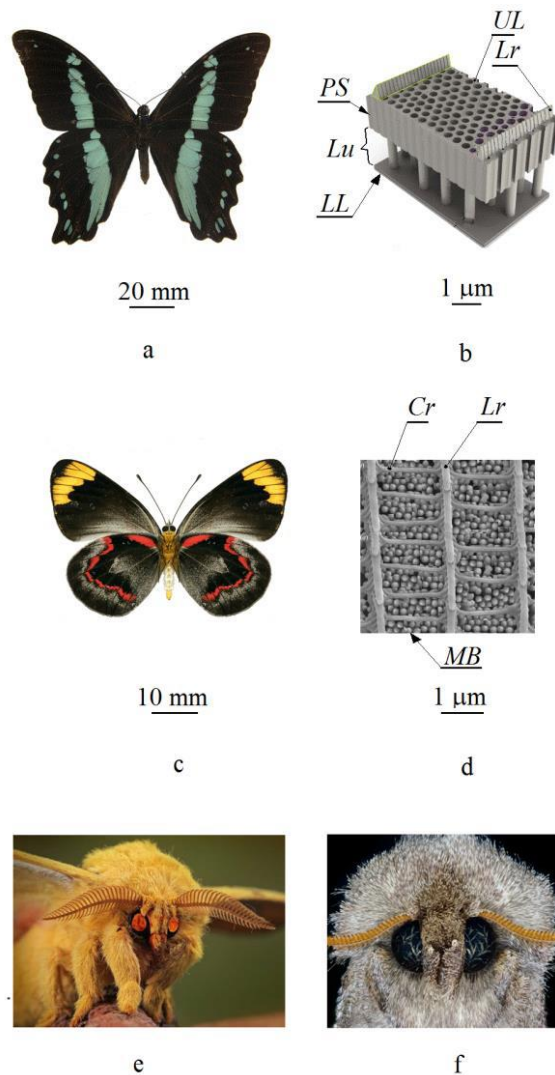
Експериментально дослідити акустичні характеристики обертових пропелерів з використанням різних типів біомімікрійних матеріалів для оболонки пропелера.

Оцінити ефективність використання біомімікрійних матеріалів на основі результатів аналізу та експериментів.

Сформулювати висновки та рекомендації щодо подальшого використання біомімікрійних підходів для зменшення акустичного шуму в авіаційних та інших технологіях.

Результати дослідження

Біомімікрія, іноді називана біонікою, - це застосування біологічних процесів і форм, які знайдені в природі, до дослідження та проектування інженерних систем. Метелики та молі належать до ряду комах лускокрилих. Цих комах зазвичай називають лепідоптерами. Поверхня крил лепідоптерів покрита мільйонами маленьких рухливих додатків - лусок (розміром 30-200 мкм). На відміну від метеликів, всі частини тіла молей (голова, груди та черево) покриті обильними додатками (луски та мікросхилини). Відомо, що покриття лусок лепідоптерів зменшує потенціал відображення ультразвукового сигналу від літаючої молі, мінімізує шум та вібрацію в літаючих комах. Коли ультразвукова хвиля вдаряється в поверхню лепідоптерів, значна частина викликів кажанів та шуму літаючої комашки перетворюється в тепло в порах покриття лусок. Таким чином, властивість покриття дозволяє комахам подолати напад хижаків вночі. Мікро- та наноструктура лусок крил лепідоптерів є справжнім дивом природи. Кожна луска метелика *Papilio pikeus* нагадує дорсо-вентрально сплющені мішечки з верхньою (UL) та нижньою (LL) ламінами. Регіон між верхньою UL та нижньою LL ламінами називається просвіт Lu. Структура зворотної ламіни, як правило, недиференційована. Обидва поверхні цієї ламіни гладкі, тоді як передня ламіна має складну архітектуру, яка зазвичай складається з серії продольних гребенів та пористої структури. Пориста структура UL має значення пористості понад 60-70 відсотків; діаметр пор 240 нм, товщина луски (без гребенів) - 3 мкм.

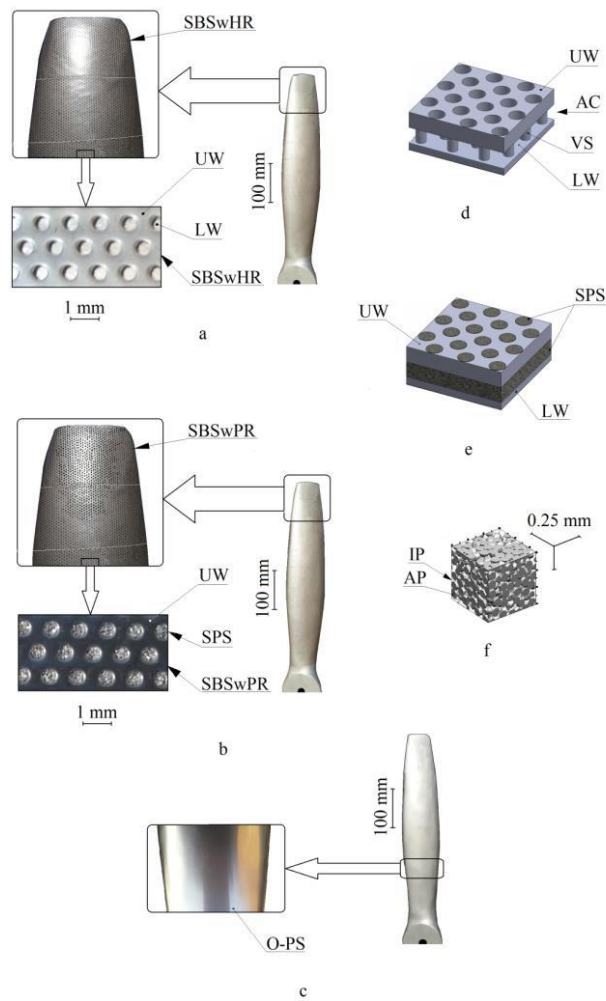


Cr - поперечні гребені; LL - нижня (зворотна) ламіна; Lr - продольні гребені; UL - верхня (передня) ламіна; Lu - просвіт; MB - мікрокульки; PS - пориста структура.

Рис 2: а. Дорсальні поверхні крил метелика *Papilio nireus*. б. Наноструктура (вертикальний переріз) пористої луски крила метелика *Papilio nireus*, намальований у 30° ізометрії. в. Дорсальні поверхні крил метелика *Delias nigrina*. г. СКЕМ, що показує плоский вид пористої луски крила метелика *Delias nigrina*. Луски вкриті пігментними гранулами MB. е. Моль з родини Saturniidae. ж. Передній вид голови моли (родина Noctuoidea).

Ця ламіна складається з серії продольних гребенів і серії поперечних гребенів (CR). Продольні гребені та поперечні гребені утворюють рамки відкритих пор до внутрішньої частини луски. Передня ламіна (рисунок 2. d) має пористість від 40 до 50 відсотків; середній розмір відкритих пор становить 1×1 мкм. Простір Lu пористих додатків обильно вкритий мікрокульками (MB) (рисунок 2. d). Цей тип пористої структури був класифікований як "пігментні зерна". Кожна мікрокулька є витягнутим мікроовідом з розмірами 100-500 нм. Ця пориста структура має значення пористості понад 30-40 відсотків, товщина луски (без гребенів Lr) становить 1,5 мкм.

Шкіра другого пропелера імітувала покрити пористу луску крила метелика *Pieris gaeae* та пористу луску крила метелика *Delias nigrina* (рисунок 2. с). Ця шкіра, звана гладкою шкірою метелика з пористою областю (SBSwPR) (рисунок 3. б), була збільшена у 800 разів (товщина становила 1,2 мм).



SBSwHR: UW - верхня металева стінка; AC - повітряна порожнина; VS - вертикальна опора; LW - нижня металева стінка; SPS - спінений порошковий наповнювач; SBSwPR: гладка шкіра метелика з пористою областю; AP - алюмінієвий порошок; IP - міжчастинна пористість; O-PS - однокомпонентна шкіра.

Рис 3: Передній вид трьох пропелерів. а. пропелер із SBSwHR, б. пропелер із SBSwPR, в. пропелер із однокомпонентною шкірою, г. вертикальний переріз гладкої шкіри метелика з порожнистою областю у аксонометричному плані, е. вертикальний переріз гладкої шкіри метелика з пористою областю у аксонометричному плані, є. 3D комп'ютерна томографія спіненого порошкового наповнювача у аксонометричному плані.

SBSwPR складалася зі вільних шарів. Верхня металева стінка UW SBSwPR була геометрично схожа на UW SBSwHR. Нижня металева стінка LW була схожа на тонкий лист. Повітряна порожнина між UW та LW та круглі отвори на UW були заповнені пористим матеріалом. Спінений порошковий наповнювач SPS виготовлено компанією ZMBDB. Товщина UW становила 0,5 мм, товщина SPS становила 0,5 мм, а товщина LW становила 0,2 мм. Розміри алюмінієвого порошку AP були в діапазоні від 50 мкм до 65 мкм, а міжчастинна пористість IP становила 35%.

Лицева поверхня UW була розташована рівно зовнішньою поверхнею порошкового наповнювача (рисунок 3. 1). Процес спікання порошку детально описаний у роботі [28]. Надаємо короткий опис цього процесу.

Спочатку була виготовлена гідравлічна прес-матриця для холодного пресування. Потім у матрицю був вливаний алюмінієвий порошок з вміщеною кількістю фенольного зв'язувача. Далі матриця була

піддана встромленню для ущільнення порошку та випікана при 230 °С для відвердження фенольного зв'язувача. Нарешті, наповнювач був видалений з матриці у виготовленій і відвердженій формі, готовій до спікання. Наповнювач був спіканий при 560 °С протягом чотирьох годин в вакуумі від 1×10^{-6} до 1×10^{-7} Торр. Цей процес спікання використовував алюмінієві порошки, виготовлені компанією Valimet Inc. Аналогічно першому пропелеру з SBSwHS, лопатка другого пропелера була виготовлена з одинадцятьох сегментів SBSwPR. Подібно до цих сегментів шкіри метелика були сформовані навколо лопаті, і кожен сегмент кріпився на гладкій зовнішній поверхні другої лопаті пропелера, розміщався дуже близько один до одного і утворював мастильний стик. Для структурного проектування SBSwPR не існує еквівалентів у сучасних пористих середовищах. Оскільки SBSwHR та SBSwPR імітували покриті крила луски одного порядку – *Lepidoptera*. Головною метою цього дослідження є якісна визначення впливу метеликової шкіри на акустичні характеристики обертового пропелера. Тому металева шкіра (O-PS) третього пропелера була однокомпонентною, гладкою і повітрянозапірною. Товщина шкіри становила 1,2 мм. Лопатки третього пропелера були відшліфовані вручну до дуже гладких і полірованих поверхонь за допомогою піску з 12000 - гранністю. Шкіра була формована навколо лопаті та кріпилася на гладкій зовнішній поверхні лопаті третього пропелера. Усі три пропелера мали однакові геометричні параметри: профіль аеродинамічної ділянки (NACA 2415), діаметр (1200 мм), товщину, хорду та крок. Акустичні властивості третього пропелера порівнювалися з властивостями першого і другого пропелерів.

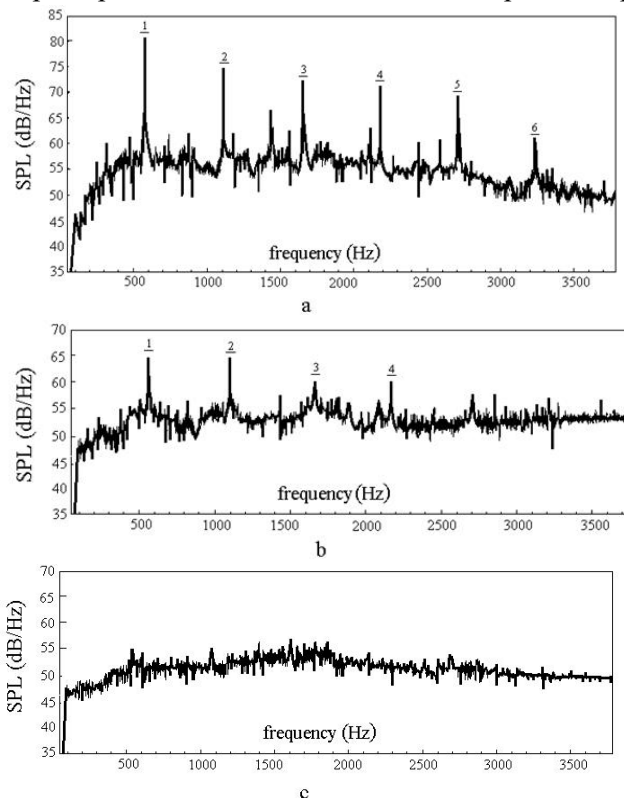


Рис 4: Спектри близькопольового рівня звукового тиску для обертаючогося пропелера з гладкою шкірою (а), порожньою шкірою (б) та пористою порожньою шкірою (в).

У цьому розділі наведені акустичні результати для трьох пропелерів. Обговорення спрямоване на тони частоти проходження лопаті (BPF) цих пропелерів. Рис. 4. а, б та в відповідають шкірі лопаті, показаній на Рис. 4 для обертової швидкості 1780 об/хв. Частота по горизонтальній вісі змінюється від 0 до 3800 Гц, охоплюючи як узкосмугову, так і широкосмугову частини загального шуму. Гармонічна частина показана в нижньому частотному діапазоні (наприклад, від 0 до приблизно 3250 Гц для гладкої шкіри на Рис. 4. а, та від 0 до приблизно 2200 Гц для порожнистої шкіри на Рис. 4. б).

Рівні тонового шуму представляють більшу частину внеску в загальний шум (Рис. 4. а та б), тоді як широкопальовий шум представляє лише невелику частину. Рис 4. а показує близькопальові узкоспальові спектри SPS у рівні ротора. У цьому рівні фундаментальний тон BPF 1 та його вищі гармоніки до тона 6 домінують. Пік тона 1 перевищує широкопальовий шум на 25 дБ. Рис. 4. а показує, що обертаючийся пропелер генерує тона на гармоніках 567 Гц на високих рівнях понад 65 дБ, що поширюються від низьких частот до приблизно 2700 Гц. Ці тона обертаючогося пропелера починаються з 82,6 дБ та знижуються до приблизно 63 дБ при 3250 Гц. Загальний рівень звукового тиску OSPL обертаючогося пропелера з гладкою шкірою, який враховує весь частотний діапазон (0...100 кГц), становить 56,5 дБ.

На Рис. 4. б побудовані спектри близькопальового шуму у вузькоспальовій та широкопальовій частини для обертаючогося пропелера з порожньою шкірою у рівні ротора. На спектрі спостерігається кілька піків. Розглядаючи спектр, чітко відрізняє тона 1, 2, 3 та 4. Спостерігається помірний вміст тона, з основними, позначеними. Фундаментальні тона BPF 1 і 2 домінують і мають подібний рівень амплітуди. Наступні більш потужні тона 3 і 4 приблизно на 3 дБ нижче за основні тона. Вищі гармоніки 5 і 6 затонули в широкопальовому шумі. Максимальний рівень піка спектра приблизно на 18.6 дБ нижче, ніж у вищій гармоніці 1 пропелера з гладкою шкірою при 567 Гц. Отже, ця шкіра ефективно зменшує тоновий шум від обертаючогося пропелера. З іншого боку, широкопальовий шум трохи збільшується від 2300 Гц до 3800 Гц для обертаючогося пропелера з порожньою шкірою. Одним із основних механізмів генерації широкопальового шуму вищої амплітуди є турбулентний пограничний шар, що розвивається над пористою зовнішньою поверхнею порожньої шкіри. Шкіра збільшує розлад швидкості в пограничному шарі на пористій зовнішній поверхні обертаючогося пропелера, та збільшує турбулентний шум. Загальний рівень звукового тиску OSPL обертаючогося пропелера з порожньою шкірою становить 54.2 дБ. Кількісне порівняння рівнів звукового тиску показує, що загальний рівень звуку обертаючогося пропелера з порожньою шкірою на більш ніж 2 дБ нижче, ніж у пропелера з гладкою шкірою. Цей результат порівнюється добре зі зменшенням шуму лопатки статора за допомогою пасивної пористості.

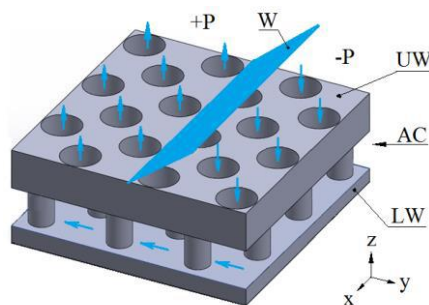
Вплив пористої порожньої шкіри на акустику обертаючого пропелера. Рис. 4. с відображає шум у близькопальовій області від обертаючогося пропелера з пористою порожньою шкірою у рівні ротора. В спектрах не виникають піків - всі гармоніки затонули в широкопальовому шумі. Широкопальова частина переважає над іншими внесками в рівні ротора. На основі результатів спектрів (Рис. 4. с) здається, що найбільш ефективним механізмом зменшення акустичних хвиль в гармонічній частині спектру шуму є обертаючийся пропелер з пористою порожньою шкірою. Більше того, Рис. 4. с показує невелике зменшення рівня широкопальового шуму від 2300 Гц до 3800 Гц для пропелера. Чітко, що пориста порожня шкіра ефективніша в зменшенні широкопальового шуму, ніж порожня шкіра. Це свідчить про те, що діаметр порів пористої порожньої шкіри (0,1 мм) менш ефективний у спричиненні турбулентного шуму, ніж діаметр пори порожньої шкіри (0,5 мм). Загальний рівень звукового тиску OSPL обертаючогося пропелера з пористою порожньою шкірою становить 52,5 дБ. Кількісне порівняння рівнів звукового тиску показує, що загальний рівень звуку обертаючогося пропелера з пористою порожньою шкірою на більш ніж 1,5 дБ нижче, ніж у пропелера з порожньою шкірою, і на більш ніж 4 дБ нижче, ніж у пропелера з гладкою шкірою. Останній результат порівнюється добре зі зменшенням шуму вентилятора з пористими лопатками, наведеним у роботі Chanaud et al.

Основними компонентами шуму пропелера є товщинний шум (зумовлений об'ємним переміщенням лопатей), шум сталого завантаження (внаслідок постійних сил на лопатках), нестабільний завантаження (внаслідок нерівномірного обтічання по колу), квадрупольний (нелінійний) шум та широкопальовий шум. Кожен з цих компонентів впливає на поверхні лопаток.

Саррадж Е. та Гейєр [29] продемонстрували механізм зменшення шуму за допомогою пористих аеродинамічних профілів. Розроблено механізм зменшення шуму пропелера з SBSwPR на основі

механізму Сарраджа та Гейера. Поглинання шуму пропелера з SBSwPR має три аспекти. Перший з них - це акустичне поглинання. Порошкове наповнення SBSwPR містить канали та мікроканали, що дозволяють звуковим хвилям легко проникати через них. Коли звук потрапляє в наповнення, завдяки звуковому тиску, молекули повітря коливаються в міжпов'язаних порожнинах, які розділяють мікрогранули з частотою виходящої звукової хвилі. Ці коливання призводять до тертя. Зміна напрямку руху звукових хвиль, разом із явищем розширення та скорочення потоку через нерівні пори, призводить до втрат кінетичної енергії. Внаслідок звукового збудження молекули повітря в порах періодично стискаються і розширюються. Це призводить до зміни температури. Завдяки довгому часу, великому відношенню поверхні до об'єму та високій теплопровідності порошкового наповнення, теплообмін відбувається ізотермічно при низьких частотах. Водночас у високочастотному діапазоні стиснення відбувається адіабатично. У частотному діапазоні між цими режимами теплообмін призводить до втрат звукової енергії. Таким чином, причинами втрат звукової енергії при проходженні звуку через звукопоглинаючі матеріали є тертя, втрати кінетичної енергії та коливання температури. Ще одним можливим аспектом є розподіл турбулентної енергії зі шару межі на поверхню пористості. Це також призводить до меншої генерації ширококутового шуму на задньому краї. Третій аспект - це зменшення впливу на шум, створений турбуленцією на передньому краї та інші компоненти генерації шуму. Крім того, розсіювання мікрогранул також впливає на поглинання звукової енергії всередині порошкового наповнення.

Загальновідомо, що зменшення шуму вентилятора можна досягти як шляхом конструювання, спрямованого на це в джерелі, так і шляхом включення акустичної обробки для поглинання шуму, що виникає від джерела [35]. Підходи до зменшення шуму в джерелі базуються на тому, що будь-який із значущих механізмів генерації шуму пов'язаний з нерівномірними, періодичними силами, що діють на поверхні обертового вентилятора, і спричинені поривами типу вітру. Ці нерівномірні сили породжують акустичні коливання, які поширюються через канали вентилятора і випромінюються як шум. Рівень шуму, що генерується з цього джерела, прямо пропорційний величині змінної сили підйому. Таким чином, будь-яке зменшення цієї змінної сили призведе до зменшення шуму.



AC – повітряна порожнина; W – звукова хвиля; UW – верхня стінка; LW – нижня стінка; +P – область високого тиску; -P – область низького тиску

Рис. 5: Вплив звукової хвилі W на SBSwHR, намальований у аксонометрії.

Tinetti A.F. та ін. [35] показує механізм зменшення взаємодії шуму в турбоагрегатах за допомогою пасивної пористості на направляючому лопаті. Розроблено механізм зменшення шуму пропелера за допомогою SBSwHR на основі механізму Тінетті. На рисунку 5 показана схематична малюнок того, що, можна вважати, відбувається. На рисунку 5 намальована місцева звукова хвиля W у площині (Y-Z-X) навколо фрагменту SBSwHR у аксонометричному вигляді. Ротуючий пропелер створює нестійкі і періодичні сили, які діють на пористу зовнішню поверхню SBSwHR, що призводить до

випромінювання звукової хвилі. Звукова хвиля утворює область високого тиску +P та область низького тиску -P на верхній стінці (UW). Області з різницею тиску з'єднані пористістю UW та повітряною порожниною AC. Отже, повітря передається через AC у напрямку від області високого тиску +P до області низького тиску -P. Таким чином, різниця тиску між двома областями перерозподіляється та зменшується. З цієї причини шум від пропелера зменшується.

Висновки

У даній роботі було досліджено ефективність використання біомімікрійних матеріалів для зменшення акустичного шуму, що виникає від обертових пропелерів у повітряній техніці. Аналіз впливу різних типів біомімікрійних оболонок, імітуючих структуру крил метеликів, показав значний потенціал у зменшенні шуму, який може бути досягнутий за допомогою таких матеріалів. Дослідження показали, що використання структур з пористим наповнювачем у пропелерах може значно знизити рівень акустичного шуму, забезпечуючи кращі акустичні характеристики без втрати продуктивності. Такі рішення мають потенціал покращити якість польоту, забезпечити безпеку та комфорт пасажирів, а також зменшити виявлення військової авіації за допомогою пасивних акустичних систем. В цілому, результати цього дослідження вказують на велике значення використання біомімікрійних матеріалів у сучасних авіаційних технологіях для зменшення акустичного забруднення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лейшман, Дж. Г. Принципи аеродинаміки вертольотів (Серія аерокосмічної науки Кембриджу). 2006, с. 817.
2. Габбард, Х. Х. Аероакустичні властивості повітряних суден: теорія та практика. NASA. 1991, 1, с. 610.
3. Холмс, Дж. Б.; Дарем, Г. М. та Террі, Є. С. Концепція та технології малої авіаційної транспортної системи. Журнал Авіації. 2004, 41 (1), 26 – 35.
4. Сміт, С. У. Науковець та інженерний посібник з цифрової обробки сигналів. (Технічне видавництво Каліфорнії). 1997, с. 643.
5. Теодорсен, Т. та Реглер, А. А. Проблема зменшення шуму з посиленням на легкі літаки. NASA 1145, 1946.
6. Мецгер, Ф. Б. Оцінка зменшення шуму від пропелерів літаків. Технологія NASA. 1995, 198237.
7. Міксон, Дж.; Грін, Г. та Демпсі, Т. Дж. Джерела, контроль та ефекти шуму від пропелерів та роторів повітряних суден. NASA. 1981, 81971.
8. Хоене, В. О. та Люс, Р. Г. Приглушений літак як військовий інструмент. AIAA. 1969, Доповідь 792.
9. Фулгум, А. Д. Теперішність невидимості. Авіаційний тиждень і космічна техніка. 2005, 162, 13, с. 38.
10. Собешчанський-Собеський, Я. та Хафтка, Р. Т. Багатодисциплінарна оптимізація проектування аерокосмічних конструкцій: огляд останніх досягнень. Оптимізація конструкцій. 1997, 14, 1 – 23.
11. Бенюс, Дж. М. Біомімікрія: Інновації, натхненні природою (Нью-Йорк: Вільям Морроу); 1997; с. 320.
12. Капінера, Джон Л. Енциклопедія ентомології. Метелики та молі. 4, 2-ге вид.: Springer, 2008; с. 626–672.
13. Ntelezos, A., Guarato, F., та Windmill, J. F. C. (2017). Антикрилова стратегія поглинання ультразвуку: крила нічних метеликів (Bombycoidea: Saturniidae) поглинають більше ультразвуку, ніж крила денних метеликів (Chalcosiinae: Zygaenoidea: Zygaenidae). *Biology Open*, 6, 109–117.
14. Zeng, J., Xiang, N., Jiang, L., Jones, G., Zheng, Y., Liu, B., та Zhang, S. (2017). Луска крил метеликів трохи збільшує поглинання викликів ехолокації кажанів. *PloS One*, 6, e27190.
15. Shen, Z., Neil, T. R., Robert, D., Drinkwater, B. W., та Holderied, M. W. (2018). Біомеханіка луски метелика на ультразвукових частотах. *Протоколи Національної академії наук*, 115:48, 12200–12205.