УДК 629.735 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.33

І. М. СОЛОВЕЙ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електротехнологій та експлуатації енергообладнання
Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів
і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»
ORCID: 0000-0003-4715-3795

Р. М. ТРІЩ
доктор технічних наук,
професор кафедри мехатроніки та електротехніки
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0002-9503-8428

Е. А. ХОМ'ЯК
доктор філософії,
старший викладач кафедри мехатроніки та електротехніки
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0002-2579-2986

В. М. БУРДЕЙНА
кандидат технічних наук,
доцент кафедри мехатроніки та електротехніки
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»
ORCID: 0009-0005-5065-4007

О. М. КОСИЧЕНКО
старший викладач кафедри мехатроніки та електротехніки
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»
ORCID: 0009-0003-9140-4632

А. О. БОЯРКІН
старший викладач кафедри мехатроніки та електротехніки
Національний аерокосмічний «Харківський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0003-3210-1482

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ВОДОВІДШТОВХУВАЛЬНОГО ПОКРИТТЯ ЛОПАТЕЙ ПОВІТРЯНОГО ГВИНТА НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ І АЕРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

У статті розглянуто методи підвищення енергоефективності повітряних гвинтів фіксованого та змінного кроку шляхом нанесення інноваційного електростатичного водовідштовхувального покриття на поверхню лопатей. Задача дослідження полягала у розробці методів, що дозволяють зменшити лобовий опір гвинта, що сприяє зменшенню витрат енергії та покращенню енергоефективності роботи гвинтомоторної групи. Вивчено вплив водовідштовхувальних покриттів на зменшення опору повітря та покращення аеродинамічних характеристик, що безпосередньо впливає на економію палива та підвищення ефективності енергоспоживання. Для досягнення поставленої мети в статті запропоновано використовувати електростатичні покриття, що дозволяють мінімізувати негативний вплив вологості на поверхню лопатей і знижують тертя між лопаттю та потоком повітря. Проведено порівняльний аналіз ефективності різних способів підвищення енергоефективності гвинтів, а також оцінку економічної вигоди від застосування водовідштовхувальних покриттів. Результати досліджень підтвердили, що нанесення таких покриттів дозволяє зменшити лобовий опір гвинта, що у свою чергу сприяє підвищенню тяги та значному зниженню енергетичних витрат на роботу гвинта. Це також дозволяє досягти зниження витрати палива та поліпшити паливно-економічні характеристики гвинтомоторних установок, що має прямий вплив на енергетичну ефективність авіаційної техніки. Завдяки зменшенню опору й покращенню аеродинамічних властивостей, використання електростатичних водовідштовхувальних покриттів також має перспективи для зниження енергетичних витрат в умовах змінних погодних факторів, таких як високі рівні вологості. Отримані результати мають потенціал для значного вдосконалення ефективності авіаційних систем, зниження їх енергоспоживання та підвищення загальної енергетичної ефективності. Дослідження надають нові

можливості для розвитку енергоефективних технологій у галузі авіації та енергетики, що сприяє не лише підвищенню продуктивності, але й зниженню екологічного впливу завдяки економії енергії та зменшенню викидів CO_2.

Ключові слова: *повітряний гвинт, зниження енергетичних витрат, аеродинамічні характеристики, покриття, електростатичні сили, лобовий опір, енергоефективність.*

I. M. SOLOVEY
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Electrical Technologies
and Power Equipment Operation
of the Berezhany Agrotechnical Institute of Ukraine
ORCID: 0000-0003-4715-3795

R. M. TRISHCH
Doctor of Technical Sciences,
Professor at the Department of Mechatronics
and Electrical Engineering
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0002-9503-8428

E. A. KHOMIAK
Doctor of Philosophy,
Senior Lecturer at the Department of Mechatronics
and Electrical Engineering
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0002-2579-2986

V. M. BURDEINA
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Mechatronics
and Electrical Engineering
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
ORCID: 0009-0005-5065-4007

O. M. KOSYCHENKO
Senior Lecturer at the Department of Mechatronics
and Electrical Engineering
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
ORCID: 0009-0003-9140-4632

A. O. BOYARKIN
Senior Lecturer at the Department of Mechatronics
and Electrical Engineering
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0003-3210-1482

INFLUENCE OF ELECTROSTATIC WATER-REPELLENT COATING OF PROPELLER BLADES ON ENERGY EFFICIENCY AND AERODYNAMIC CHARACTERISTICS

The article discusses methods for improving the energy efficiency of fixed and variable pitch propellers by applying an innovative electrostatic water-repellent coating to the blade surface. The objective of the study was to develop methods to reduce the propeller drag, which helps to reduce energy consumption and improve the energy efficiency of the propeller group. The effect of water-repellent coatings on reducing air resistance and improving aerodynamic characteristics, which directly affects fuel economy and energy efficiency, has been studied.

To achieve this goal, the article proposes to use electrostatic coatings that minimize the negative impact of humidity on the blade surface and reduce friction between the blade and air flow. A comparative analysis of the effectiveness of various methods of improving the energy efficiency of propellers was carried out, as well as an assessment of the economic benefits of using water-repellent coatings.

The results of the research confirmed that the application of such coatings can reduce the drag of the propeller, which in turn contributes to increased thrust and a significant reduction in energy costs for the operation of the propeller. It also helps to reduce fuel consumption and improve the fuel and economic characteristics of propeller systems, which has a direct impact on the energy efficiency of aircraft.

By reducing drag and improving aerodynamic properties, the use of electrostatic water-repellent coatings also has the potential to reduce energy costs in conditions of variable weather factors, such as high humidity levels. The results obtained have the potential to significantly improve the efficiency of aviation systems, reduce their energy consumption and increase overall energy efficiency.

The research provides new opportunities for the development of energy-efficient technologies in the aviation and energy sectors, which contributes not only to increased productivity but also to reduced environmental impact through energy savings and reduced CO_2 *emissions.*

Key words: *propeller, energy cost reduction, aerodynamic characteristics, coating, electrostatic forces, drag, energy efficiency.*

Постановка проблеми

Покриття повітряних гвинтів (пропелерів) є важливим аспектом в авіаційній промисловості та має великий вплив на ефективність, довговічність та безпеку авіаційної техніки. Пропелери працюють в складних умовах і при цьому піддаються впливу екстремальних температур, високих навантажень, вібрацій і корозії. Тому покриття, яке наноситься на їх поверхню, має забезпечити захист і зниження зносу та підвищити ефективність їх роботи. Ефективність роботи повітряного гвинта, в значній мірі, залежить від правильного підбору його параметрів, конструктивного виконання, а також від покриття поверхні його лопатей [1–5].

Незалежно від типу повітряних гвинтів (металеві, композитні, або з інших матеріалів) покриття завжди відіграє ключову роль у забезпеченні їх тривалого використання та безпеки польотів. Правильно підібране та нанесене покриття може значно покращити продуктивність авіаційної техніки.

Від якості покриття поверхні повітряного гвинта залежить степінь захисту від корозії, оскільки гвинт часто піддається впливу вологи та інших агресивних середовищ. Покриття поверхні повітряного гвинта захищає також від ерозії, при дії частинок пилу та піску, які вдаряються об поверхню лопаті під час польоту і поступово зношують його поверхню [6, 7]. Нанесене покриття з низьким коефіцієнтом тертя знижує лобовий опір гвинта, покращуючи при цьому його аеродинамічні властивості. А теплостійкі покриття дозволяють витримувати високі температури не втрачаючи своїх властивостей [8]. Інноваційним технологічним рішенням є нанопокриття, які завдяки новим технологіям дозволяють наносити ультратонкі шари нанопокриттів, які завдяки покращеним аеродинамічним властивостям не тільки забезпечують захист від ерозії та корозії, але й зменшують опір повітряному потоку.

Правильно підібране та нанесене покриття може значно покращити продуктивність гвинтомоторної установки. Наприклад, зниження лобового опору і зменшення ерозії сприяють збереженню оптимальної форми лопатей, що забезпечує стабільність польоту та знижує навантаження на двигун, а також підвищує економічні показники гвинтомоторної установки.

Сучасні методи підходу до підбору та нанесення покриття на поверхню повітряного гвинта можуть значно покращити продуктивність авіаційної техніки, що зумовлює необхідність проведення порівняльного аналізу останніх досягнень у цій важливій сфері та проведення всебічного огляду існуючих методик обробки поверхні повітряних гвинтів. Отже, виникає необхідність обґрунтування використання електростатичного водовідштовхувального покриття поверхні повітряного гвинта.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи полягає в дослідженні впливу електростатичного водовідштовхувального покриття на аеродинамічні характеристики та ефективність роботи повітряних гвинтів, а також в оцінці можливості підвищення їх продуктивності за рахунок зменшення лобового опору, покращення захисту від ерозії та корозії, збереження оптимальної форми лопатей і підвищення економічних показників гвинтомоторних установок.

Викладення основного матеріалу дослідження

На даний час проводиться багато наукових досліджень з проблем підвищення ефективності та надійності повітряних гвинтів [9–10]. Інноваціями в галузі є використання наноматеріалів, композитних сплавів та більш екологічно чистих покриттів які відкривають нові можливості для покращення ефективності та надійності авіаційних компонентів.

Нанопокриття, як правило, є одно- або багатофазними твердими структурами, нанесеними на поверхню, що накладається товщиною близько 100 нм або менше, додаючи певні властивості або функції матеріалу. Різні матеріали демонструють унікальні властивості на нанорозмірі, такі як температура плавлення, електропровідність, магнітна проникність, гідрофобність і хімічна реактивність до ерозії та корозії, але також зменшують опір потоку повітря завдяки покращеним аеродинамічним властивостям [11–12]. Ефективність процесу поверхневого захисту на основі нанотехнологій спеціально розроблених для аеронавігаційних застосувань на літальних апаратах з композитних матеріалів описується в роботах [13–15].

У джерелі [16] розглянуто питання, пов’язані з аеродинамічним проектуванням лопатей повітряного гвинта; наведено основні відомості з вихрової теорії повітряного гвинта; подано метод обліку кінцевих втрат; розглянуто методику вирішення завдань аеродинаміки гвинта та виконання перевірки розрахунку; проаналізовано питання

вибору найвигіднішого гвинта з нескінченною і кінцевою кількістю лопатей; запропоновано методи та алгоритми аеродинамічного проектування лопатей гвинта.

Так як аеродинамічні характеристики являються важливими показниками якості, то проведено аналіз наукових публікацій щодо принципів та методів оцінювання якості. Так, наприклад, у публікаціях [17, 18] представлено методологію застосування кваліметричних методів оцінювання різних об'єктів, застосовуючи нелінійні функціональні залежності. Представлено також методологію оцінювання якості у машинобудуванні, де представлено оптимізацію допусків щодо якості та точності деталей машин.

Дослідники Інституту аеронавтики Ризького технічного університету [19] розробили багатошарове металокерамічне нанопокриття під назвою McBLADE, яке можна використовувати для захисту лопатей компресора та турбіни в сучасних реактивних двигунах із титанових сплавів. Кожен шар покриття надзвичайно тонкий і виконує певну функцію. Перший шар підвищує адгезію до основного матеріалу, а другий – захищає титановий сплав від окислення. Верхній шар забезпечує термозахист і стійкість покриття до стирання, що дозволяє компонентам працювати при високих температурах.

У праці [20] подана методика використання протиобмерзаючого покриття поверхні літака для зменшення трудомісткості та вартості виконання робіт у холодну пору року. Протиобмерзання літаків у холодну погоду може бути дорогим і трудомістким процесом. Було розроблено нанопокриття, які можуть відштовхувати воду та лід, що призводить до економії витрат на обслуговування. Випробування в польоті літака Airbus A320 British Airways продемонстрували покращення гідрофобності поверхні на 20–40 % порівняно з іншими комерційно доступними звичайними покриттями. А також, інноваційні покриття на основі наноструктурованих вуглецевих матеріалів (таких як вуглецеві нанотрубки та оксид графену) зменшують опір повітряному потоку на поверхні літака. Таким чином, зменшується споживання палива та викидів CO_2.

Дослідний проект під назвою ReSiSTant [21], що фінансується програмою ЄС із досліджень та інновацій Horizon 2020, був спрямований на розробку передових нанопокриттів і методів його нанесення для покращення продуктивності та забезпечення стійкості до стирання та корозії. У проекті розглядаються ребристі поверхні, що складаються з дуже маленьких (2–100 мікрон) паралельних канавок для зниження пасивного опору поверхні в літаках нового покоління.

У роботі [22] наводяться матеріали з розрахунково-експериментальних досліджень компонування повітряного гвинта із застосуванням чисельних методів дослідження. Використання нових методів зниження пасивного опору в авіації є одним із найбільш життєздатних підходів до зменшення споживання авіаційного палива, викидів CO2 та створення шуму. Таким чином, мета статті полягає у покращенні основних аеродинамічних характеристик повітряних гвинтів фіксованого та змінного кроку шляхом нанесення електростатичного водовідштовхувального покриття на поверхню лопатей.

Властивості матеріалу на нанорозмірі регулюються міжмолекулярними силами такими як взаємодія Ван-дер-Ваальса, водневими зв'язками та електростатичними силами. Ці міжмолекулярні сили діють на малих масштабах довжини в межах від кількох ангстремів до кількох нанометрів. Коли розміри матеріалу стають такими ж, як відстані між молекулярними силами (тобто нанорозміри) властивості матеріалу різко змінюються [23]. Таким чином, покриття, що складаються з наночастинок, або кількох шарів на нанорозмірі дають можливість досліджувати їх покращені фізичні та хімічні властивості в широкому діапазоні нових застосувань.

При взаємодії поверхні повітряного гвинта з набігаючим потоком повітря необхідно створити найменший опір, оскільки частинки твердої поверхні гвинта будуть стикатися з частинками молекул повітря. В гетерогенних системах, як відомо, розрізняється міжмолекулярна взаємодія всередині фази та між фазами. Електростатичне відштовхування є наслідком кулонівської взаємодії між однаково зарядженими об'єктами. Це явище має фундаментальне значення для розуміння поведінки матеріалів у гетерогенних системах, таких як колоїдні розчини, біополімери та наночастинки. Його контроль дозволяє створювати функціональні матеріали та пристрої [24].

Взаємодію між атомами та молекулами в межах однієї фази називають когезією (від латинського слова cohaesia, що означає «зчеплення») [25]. Саме когезія визначає можливість існування речовин у конденсованому стані та виникає завдяки міжатомним і міжмолекулярним силам різного характеру. До таких сил належать хімічні ковалентні зв'язки, водневі зв'язки, електростатичні взаємодії, а також сили Ван-дер-Ваальса. Когезійні сили часто позначають також як сили атракції, тобто притягання.

Сили Ван-дер-Ваальса виникають через взаємодію короткочасно створених диполів і вважаються найслабшим типом зв'язку. Тимчасовий асиметричний розподіл зарядів в атомі чи молекулі формує миттєвий диполь, який здатен поляризувати сусідні молекули, створюючи нові диполі.

Здатність молекули до поляризації залежить від кількості електронів, що входять до її складу. Чим більша молекула, тим більше електронів у ній і тим значнішими можуть бути внутрішньомолекулярні зміщення заряду. У результаті цього з'являються численні короткочасні часткові електричні заряди (миттєві диполі), що генерують електричне поле. Під впливом цього поля виникають електростатичні сили, які можуть спричиняти притягання чи відштовхування між диполями.

Чим більший розмір молекул речовини, тим більше між ними утворюється взаємодій типу Ван-дер-Ваальса. Енергія когезії, або робота когезії, залежить від енергії яка необхідна для утворення двох поверхонь:

$$W_k = 2\sigma, \tag{1}$$

де σ – поверхневий натяг поверхні. Взаємодія, яка виникає між фазами чи поверхнями тіл різної природи, які вступають у контакт, називають адгезією [26]. Цей процес забезпечує зчеплення поверхонь двох різнорідних тіл завдяки міжмолекулярним взаємодіям (фізичним або хімічним силам). Адгезія проявляється у випадках взаємодії між двома рідинами, рідиною та твердим тілом, а також між двома твердими тілами або поверхнею твердого тіла і газом (у нашому випадку повітрям).

Основним фактором, який сприяє адгезії, є прагнення системи зменшити свою поверхневу енергію, що робить цей процес термодинамічно вигідним і, за певних умов, спонтанним. Міцність утвореного адгезійного контакту характеризується величиною, що називається роботою адгезії (Wa). Вона визначає енергію, необхідну для зворотного розриву контакту, віднесену до одиниці площі взаємодії, і вимірюється в одиницях, аналогічних до поверхневого натягу – джоулів на квадратний метр (Дж/м^2).

Таким чином, робота адгезії Wa є важливим параметром, що дозволяє оцінити силу з'єднання між поверхнями. Для подальшого розуміння процесів адгезії корисно проаналізувати схему змін міжфазних поверхневих натягів, яка ілюструє, як розподіляються сили на межах фазових контактів та як ці сили впливають на стабільність взаємодії, як показано на рисунку 1.

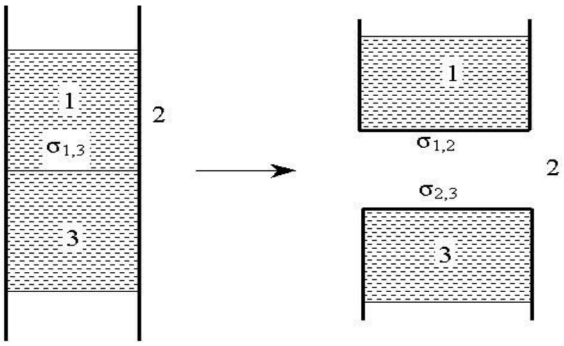


Рис. 1. Зміна міжфазних поверхневих натягів при розділенні рідин 1 і 3 які не змішуються в середовищі газу 2 [27]

Кожна з рідин характеризується міжфазним поверхневим натягом $\sigma_{1,3}$. При розділенні цих рідин утворюються дві нові поверхні: рідина 1, що має поверхневий натяг $\sigma_{1,2}$ і рідина 3 з поверхневим натягом $\sigma_{2,3}$, тоді як поверхня розділу між фазами з натягом $\sigma_{1,3}$ зникає. Робота адгезії (енергія, необхідна для розділення одиниці площі контакту між рідинами) визначається відповідно до рівняння Дюпре [26]:

$$W_a = \sigma_{1,2} + \sigma_{2,3} - \sigma_{1,3}, \tag{2}$$

де $\sigma_{1,2}$ – поверхневий натяг на межі рідина – газ; $\sigma_{2,3}$ – тверде тіло – газ; $\sigma_{1,2}$ – та тверде тіло – рідина. Поверхневий натяг діє вздовж дотичної до відповідної поверхні σ і розташовується під певним кутом до площини контакту. Цей кут називають краєвим кутом змочування. Позначимо величину кута крайового змочування через букву θ.

Роботу адгезії W_a рідини можна визначити за допомогою рівняння Дюпре-Юнга, взявши за основу експериментально виміряний крайовий кут змочування θ [25]:

$$W_a = \sigma(1 + \cos\theta). \tag{3}$$

Під час роботи лопаті у повітряному потоці виникає взаємодія між твердою поверхнею та повітрям. Для наочного вивчення впливу електростатичних сил розглянемо взаємодію між твердою поверхнею та рідиною. Зокрема, звернемо увагу на явище змочування, що виникає під час контакту рідини з твердим тілом внаслідок молекулярної взаємодії.

Відомо, що змочування проявляється в розтіканні краплі рідини по поверхні твердого тіла. Процес розтікання рідини на твердій поверхні відрізняється від її розтікання на поверхні рідин, яке визначається молекулярною рухливістю. На твердих поверхнях рідини розтікаються внаслідок таких процесів, як дифузія, капілярність, летючість рідини тощо. Якщо молекули рідини сильніше взаємодіють із молекулами твердої поверхні, ніж між собою, рідина розтікається по цій поверхні, тобто змочує її. Процес продовжується, доки рідина не вкриє всю поверхню твердого діла. Це явище відоме як повне змочування.

Якщо ж молекули рідини взаємодіють одна з одною значно сильніше, ніж із молекулами твердої поверхні, розтікання не відбувається – рідина збирається в краплю. Інакше кажучи, якщо сили відштовхування між молекулами твердої поверхні переважають сили притягання між молекулами рідини, то вода не розтікається, а утворює краплі.

Між цими крайніми випадками існують проміжні, коли змочування є частковим. У такій ситуації крапля формує на твердій поверхні певний рівноважний кут, що називається краєвим кутом або кутом змочування θ.

Краєвий кут θ визначається як кут між дотичною до поверхні краплі та твердою поверхнею. Менший кут θ свідчить про краще змочування поверхні рідиною. Відповідно, чим більший кут θ, тим гірше змочування, і тим сильніше проявляються електростатичні сили, які створюють відштовхування між диполями рідини та твердого тіла. На рисунку 2 наведено вигляд поверхні краплі води, що розміщується на поверхні твердого тіла

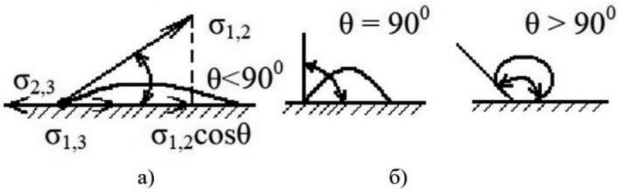


Рис. 2. Вигляд краплі води на поверхні твердого тіла у випадку: змочування (а) і незмочування (б) поверхні твердого тіла

Відповідно, на одиниці довжини периметра змочування діють три сили б1,2; б2,3 і б1,3. Тоді умова рівноваги сил, яка виражається рівнянням Юнга, матиме вигляд [25]:

$$\sigma_{2,3} = \sigma_{1,3} + \sigma_{1,2} \cos\theta. \quad (4)$$

Звідси

$$cos\theta = \frac{\sigma_{2,3} - \sigma_{1,3}}{\sigma_{1,2}}. \quad (5)$$

Величину $\cos\theta$ яка характеризує здатність рідини змочувати поверхню, називають змочуванням та позначають через В. При повному змочуванні θ = 00, $B = +1$, при повному незмочуванні θ = 1800, $B = -1$.

Серед двох рідин краще змочує тверду поверхню та інтенсивніше розтікається та, для якої зменшення поверхневої енергії системи є найбільшим. Це означає, що змочування твердої поверхні рідиною можливе лише за умови, що поверхневий натяг на межі розділу тверде тіло – рідина $\sigma_{1,2}$ є меншим, ніж поверхневий натяг між твердим тілом і газовою фазою σ_{13}. Якщо ця умова не виконується, рідина не зможе змочувати тверду поверхню, оскільки її молекули будуть більше притягуватися одна до одної, ніж до молекул твердої поверхні.

Крім того, міцність контакту між рідиною (адгезивом) і твердим тілом (субстратом) залежить від їхньої полярності. Чим ближчі вони за полярністю, тим сильнішими будуть міжмолекулярні взаємодії між ними, що сприятиме кращому змочуванню та збільшенню адгезійної міцності. Це особливо важливо у технологіях склеювання, фарбування, нанесення покриттів і створення полімерних композиційних матеріалів.

У випадку коли ми розглядаємо поверхню повітряного гвинта де існує контакт між твердою поверхнею і повітрям нам необхідно мати як найменшу міцність цього контакту. Іншими словами можна сказати, що нам необхідно мати незмочування поверхні твердого тіла рідиною. Ця умова необхідна для зменшення втрат енергії на тертя, між твердою поверхнею гвинта та повітрям, при роботі повітряного гвинта.

Електрична теорія адгезії пов'язує явище адгезії з формуванням подвійного електричного шару на межі контакту між адгезивом і субстратом. Цей шар виникає внаслідок різниці в зарядах між двома матеріалами, що контактують. А це впливає на міцність та властивості зв'язку.

Щоб визначити роботу адгезії, часто використовують непрямі методи, які дозволяють оцінити сили, що діють на межі розділу фаз. Ці методи особливо ефективні, коли хоча б одна з фаз є рідиною, оскільки це дозволяє вимірювати такі фізичні параметри, як краєвий кут змочування θ. Краєвий кут змочування характеризує здатність рідини взаємодіяти з поверхнею твердого тіла, і може служити індикатором сили адгезії. Вимірювання цього кута дає можливість отримати важливу інформацію про ефективність зчеплення між матеріалами та, відповідно, оцінити роботу адгезії.

Роботу адгезії можна оцінити за допомогою непрямих методів, що є особливо корисними, коли хоча б одна з фаз взаємодії перебуває у рідкому стані. Це відкриває можливість для точних вимірювань, таких як краєвий кут змочування θ, який є важливим показником взаємодії рідини з поверхнею твердого матеріалу. Краєвий кут змочування відображає, наскільки добре рідина розтікається по поверхні, що, в свою чергу, залежить від сили адгезії між рідиною та матеріалом. Чим менший цей кут, тим сильніше адгезія, оскільки рідина має більшу здатність до «прилипанню» до поверхні.

Вимірювання краєвого кута змочування дозволяє не лише оцінити взаємодію між матеріалами, а й розрахувати роботу адгезії, що є критично важливим для багатьох технологічних процесів де у нашому випадку є покриття повітряного гвинта.

Згідно даних літературних джерел [25, 26] змочуваність деяких твердих тіл водою характеризується такими краєвими кутами: кварц – 00, малахіт – 170, графіт – 550, тальк – 690, парафін – 1060, тефлон – 1080. Найбільшими краєвими кутами володіє тефлон та парафін, які мають кращі водовідштовхувальні властивості. Для підтвердження теоретичних положень можливості зменшення притягання молекулами твердої речовини своєю поверхнею рідини або газу, а отже і зменшення лобового опору повітряним гвинтом, було проведено експериментальні дослідження.

Для проведення експериментальних досліджень впливу електростатичного водовідштовхувального покриття лопатей повітряного гвинта було виготовлено моноблочний повітряний гвинт діаметром 125 см та кроком 57 см. Матеріалом, з якого виготовлявся гвинт, були дошки із сосни. Розміри бруска для виготовлення гвинта взято розміром 12 см × 5 см. Брусок склеювався із декількох дошок для надання механічної міцності гвинту. Розрахунок параметрів повітряного гвинта для дослідної гвинтомоторної установки здійснювався за [28].

Окремі ділянки гвинта, зокрема закінцівки лопатей, передня кромка в районі закінцівки, поверхня маточини, а також отвори під болти та центральний отвір, потребують підвищеної міцності та твердості, оскільки зазнають значних механічних навантажень під час експлуатації. Для зміцнення цих зон використовувався універсальний водостійкий клей, що дозволяє підвищити зносостійкість і запобігти передчасному руйнуванню матеріалу. У процесі затягування болтів, що використовуються для кріплення гвинта, можливе деформування поверхні маточини через надмірний тиск. Крім того, передня кромка лопаті може зазнавати пошкоджень у разі контакту з травою, дрібним камінням або іншими матеріалами під час роботи гвинта.

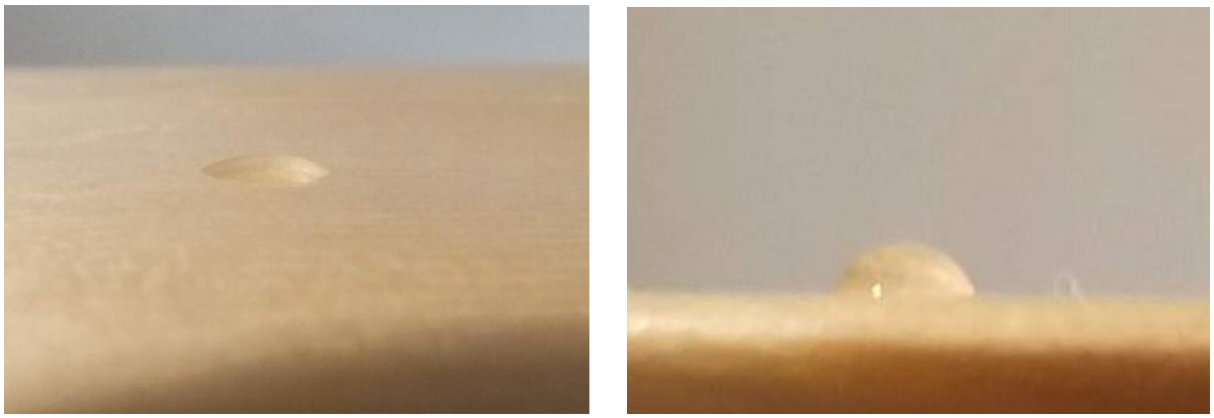
Щоб уникнути таких проблем, перед нанесенням клею поверхня гвинта піддавалась ретельно шліфуванню, забезпечуючи рівномірний розподіл захисного шару. Завдяки своїй рідкій консистенції, клей ефективно проникає в структуру деревини, просочуючи її на глибину від 0,5 до 1 мм залежно від породи дерева. Це дозволяє значно підвищити твердість поверхневого шару, покращуючи його стійкість до механічних пошкоджень, стирання та впливу зовнішніх факторів.

Для зовнішнього покриття поверхні повітряного гвинта використано двокомпонентний поліуретановий лак. Важливо добавляти оптимальну кількість затверджувача, оскільки порушення пропорції спричинить збільшення тривалості висихання лаку. Розхід лаку на одну лопать гвинта діаметром 125 см на один шар покриття склав 20 г. Лак наносився двома шарами з витримкою часу для висихання попереднього шару.

Для оцінки впливу на економічні та тягові показники сконструйованого гвинта з лаковим покриттям та електростатичним водовідштовхувальним покриттям проведено експериментальні дослідження роботи в реальних умовах на парамоторній установці із двигуном Solo 210. Потужність двигуна 14 к.с. Згідно паспортних даних, максимальні обороти даного двигуна – 6200 об/хв. Редуктор 2,5. Крило українського виробника Sky-Country Moscito-4. Площа крила 27,5 м^2. Зовнішній вигляд парамоторної установки показано на рисунку 3.

Рис. 3. Зовнішній вигляд парамоторної установки з повітряним гвинтом 125 × 57

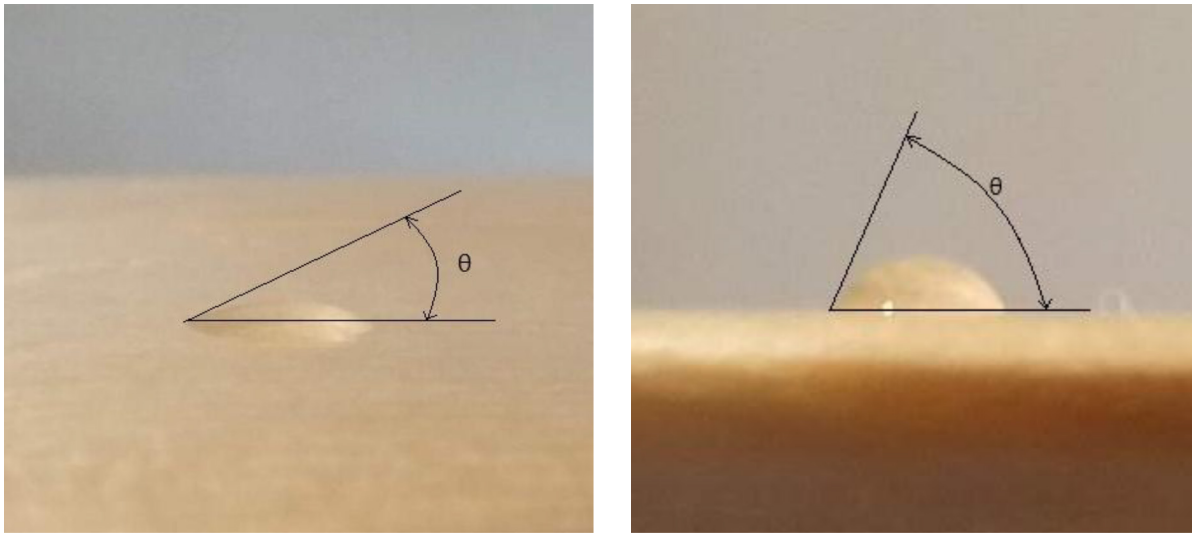
Первинні експериментальні дослідження проводились із гвинтом на який нанесено тільки лакове покриття. Економічні і тягові показники парамоторної установки знято і записано впродовж 5 годинного нальоту. Результати експериментальних досліджень роботи повітряного гвинта з лаковим покриттям його поверхні представлено в таблиці 1. Після проведення первинних випробувань повітряний гвинт знято з парамоторної установки та на його поверхню нанесено краплю води для оцінки поверхневого натягу на лаковому покритті гвинта. Фото вигляду краплі води на поверхні повітряного гвинта показано на рисунку 4, *а*. Наступні дослідження проводились при нанесенні на поверхню гвинта електростатичного водовідштовхувального покриття. Фото виду краплі води на поверхні повітряного гвинта з електростатичним водовідштовхувальним покриттям показано на рисунку 4, *б*.



а ***б***

Рис. 4. Крапля води нанесена на поверхню лопаті: з лаковим покриттям (*а*); з електростатичним водовідштовхувальним покриттям (*б*)

Для наочного зображення краєвого кута змочування θ нанесемо дотичні лінії до поверхонь краплі води для двох варіантів поверхні повітряного гвинта – з лаковим покриттям і поверхні гвинта з електростатичним водовідштовхувальним покриттям. Нанесені дотичні лінії до поверхонь краплі води для відображення краєвого кута змочування θ зображено на рисунку 5.



а ***б***

Рис. 5. Крапля води нанесена на поверхню лопаті: з лаковим покриттям (*а*); з електростатичним водовідштовхувальним покриттям (*б*)

Як видно з рисунка 5, на поверхні повітряного гвинта з лаковим покриттям краєвий кут змочування поверхні θ складає 300, а на поверхні повітряного гвинта з електростатичним водовідштовхувальним покриттям, краєвий кут змочування поверхні θ складає 700.

Для оцінки впливу властивостей поверхні повітряного гвинта, а саме зменшення його лобового опору повітряному потоку, проведено повторні експериментальні дослідження з повітряним гвинтом на поверхню якого

нанесено електростатичне водовідштовхувальне покриття. Впродовж 5 годинного нальоту знімались і записувались економічні та тягові показники парамоторної установки. Результати експериментальних досліджень роботи повітряного гвинта з двома різними типами покриттів його поверхні занесено в таблицю 1.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень роботи повітряного гвинта з двома різними покриттями його поверхні

Показники	Гвинт 125 × 57 Поверхня повітряного гвинта з лаковим покриттям	Гвинт 125 ×57 Поверхня повітряного гвинта з електростатичним водовідштовхувальним покриттям
Краєвий кут змочування поверхні повітряного гвинта, θ, °	30	70
Збільшення краєвого кута змочування поверхні повітряного гвинта, θ, °	0	40
Максимальні обороти двигуна на місці, об/хв	6030…6050	6130…6150
Збільшення максимальних оборотів двигуна на місці, %	0	1,67
Максимальні обороти двигуна в польоті, 43…45 км/год (набір висоти), об/хв	5970…6000	6010…6030
Обороти двигуна в крейсерському режимі польоту, об/хв	5200…5400	5200…5400
Тяга на місці, кг	42…44	43…45
Збільшення тяги гвинта, %	0	3,7…4
Висота польоту, м	100…150	100…150
Вага пілота, кг	93	93
Вага парамоторної установки, кг	23	23
Температура повітря, °С	20	20
Розхід палива за 1 год маршрутного польоту, л	3…3,15	2,8…2,9
Економія палива, %	0	4…6

Обробка поверхні повітряного гвинта електростатичним водовідштовхувальним покриттям за запропонованою методикою показали збільшення максимальних оборотів двигуна при роботі гвинтомоторної установки на місці та у польоті. Згідно проведених досліджень, використання електростатичного водовідштовхувального покриття дозволяє знизити розхід палива на 4…6 %.

Висновки

Застосування електростатичного водовідштовхувального покриття лопатей повітряного гвинта сприяє підвищенню його аеродинамічних властивостей та підвищенню ефективності функціонування гвинтомоторної групи.

Розроблена методика оцінки електростатичних водовідштовхувальних властивостей матеріалу базується на використанні явищ водовідштовхування через аналіз його кута крайового змочування.

Дослідження за цією методикою було проведено на парамоторній установці з двигуном Solo 210 (14 к.с.) та крилом Moscito-4, як у польотному режимі, так і при роботі на місці.

Експериментальні результати показали, що нанесення електростатичного водовідштовхувального покриття на лопаті повітряного гвинта дозволяє досягти збільшення тяги на 4 %, знизити лобовий опір та покращити паливно-економічні показники гвинтомоторної установки, зокрема зменшити витрату палива на 4–6 %.

Список використаної літератури

1. Rizzi, A & Oppelstrup, J 2021, “Introduction to Aircraft Aerodynamic Design”, in Cambridge University Press eBooks, pp. 1–44, https://doi.org/10.1017/9781139094672.003.

2. Lukianov, P & Dusheba, O 2023, “Modeling of aerodynamic noise of quadrotor type aerotaxi”, Aerospace Technic and Technology, (4):38–49, https://doi.org/10.32620/aktt.2023.4.05.

3. Cummings, RM & Bertin, JJ 2021, Aerodynamics for engineers. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009105842

4. Zhornik, O, Kravchenko, I, Mitrakhovych, M & Balalaieva, K 2022, “Comparative evaluation of the efficiency of the ring-type and bucket inlet devicesfor a power plant with a turbopropfan engine”, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(1(118)):6–12, https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263023

5. Hoyos, JD, Alvarado, JP & Jiménez, JH 2021, “Propeller aerodynamic optimisation to minimise energy consumption for electric fixed-wing aircraft”, The Aeronautical Journal, 125(1292):1844–1870, https://doi.org/10.1017/aer.2021.51

6. Hoyos, J, Jímenez, JH, Echavarría, C & Alvarado, JP 2021, “Airfoil Shape Optimization: Comparative Study of Meta-heuristic Algorithms, Airfoil Parameterization Methods and Reynolds Number Impact”, IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 1154(1):012016, https://doi.org/10.1088/1757-899x/1154/1/012016

7. Mian, HH, Wang, G, Zhou, H & Wu, X 2021, "Optimization of thin electric propeller using physics-based surrogate model with space mapping", Aerospace Science and Technology, 111106563, https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106563

8. Khomiak, E., Burdeina, V., Cherniak, O., Olesia, N., Bubela, T. (2024). Improving the Method of Quality Control of the Fuel Element Shell in Order to Improve the Safety of a Nuclear Reactor. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Krytskyi, D. (eds) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2023. ICTM 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1008. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61415-6_30

9. Khomiak, E., Trishch, R., Zabolotnyi, O., Cherniak, O., Lutai, L., Katrich, O. (2024). Automated Mode of Improvement of the Quality Control System for Nuclear Reactor Fuel Element Shell Tightness. In: Faure, E., et al. Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 221. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_7

10. Hussain, M, Abdel-Nasser, Y, Banawan, A & Ahmed, Y M 2020, "FSI-based structural optimization of thin bladed composite propellers", in Alexandria Engineering Journal, vol. 59, no. 5, pp. 3755–3766, https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.06.032

11. Bhat, A, Budholiya, S, Aravind Raj, S, Sultan, M T H, Hui, D, Md Shah, A U & Safri, S N A 2021, "Review on nanocomposites based on aerospace applications", in Nanotechnology Reviews, vol. 10, no. 1, pp. 237–253, https://doi.org/10.1515/ntrev-2021-0018

12. Rashid, A B, Haque, M, Islam, S M M & Uddin Labib, K M R 2024, "Nanotechnology-enhanced fiber-reinforced polymer composites: Recent advancements on processing techniques and applications", in Heliyon, vol. 10, no. 2, e24692, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24692

13. Trishch, R, Cherniak, O, Zdenek, D & Petraskevicius, V 2024, "Assessment of the occupational health and safety management system by qualimetric methods", in Engineering Management in Production and Services, vol. 16, no. 2, pp. 118–127, https://doi.org/10.2478/emj-2024-0017

14. Trishch, R, Nechuiviter, O, Hrinchenko, H, Bubela, T, Riabchykov, M & Pandova, I 2023, "Assessment of safety risks using qualimetric methods", in MM Science Journal, 2023(3), https://doi.org/10.17973/mmsj.2023_10_2023021

15. Cherniak, O, Trishch, R, Ginevičius, R, Nechuiviter, O & Burdeina, V 2024, "Methodology for Assessing the Processes of the Occupational Safety Management System Using Functional Dependencies", in Lecture notes in networks and systems, pp. 3–13, https://doi.org/10.1007/978-3-031-60549-9_1

16. Adkins, C N & Liebeck, R H 1994, "Design of optimum propellers", in Journal of Propulsion and Power, vol. 10, no. 5, pp. 676–682, https://doi.org/10.2514/3.23779

17. Trishch, R, Nechuiviter, O, Hrinchenko, H, Bubela, T, Riabchykov, M & Pandova, I 2023, "Assessment of safety risks using qualimetric methods", in MM Science Journal, 2023(3), https://doi.org/10.17973/mmsj.2023_10_2023021

18. Cherniak, O, Trishch, R, Ginevičius, R, Nechuiviter, O & Burdeina, V 2024, "Methodology for Assessing the Processes of the Occupational Safety Management System Using Functional Dependencies", in Lecture notes in networks and systems, pp. 3–13, https://doi.org/10.1007/978-3-031-60549-9_1

19. Labs of Latvia 2021, Nanocoatings for the New Generation of Aviation Engine Parts Developed by RTU, https://labsoflatvia.com/en/news/nanocoatings-for-the-new-generation-of-aviation-engine-parts-developed-by-rtu

20. Gu, Y, Xia, K, Wu, D, Mou, J & Zheng, S 2020, "Technical Characteristics and Wear-Resistant Mechanism of Nano Coatings: A Review", Coatings, 10(3):233, https://doi.org/10.3390/coatings10030233

21. Kiesel, L 2021, "Advanced air plasma spray TBCs for aerospace and industrial components", in Honeywell Aerospace Technologies, https://aerospace.honeywell.com/us/en/learn/about-us/blogs/advanced-air-plasma-spray-tbcs

22. Kobayakawa, M & Onuma, H 1985, "Propeller aerodynamic performance by vortex-lattice method", in Journal of Aircraft, vol. 22, no. 8, pp. 649–654, https://doi.org/10.2514/3.45181

23. Lopez, N R 2020, "Resistant project: How can nanotechnology reduce environmental impacts of aircrafts?" in Open Access Government, https://www.openaccessgovernment.org/nanotechnology-reduce-environmental-impacts-of-aircrafts/85311

24. Firoozi, A., Hejazi, F., & Firoozi, A. (2024). Advancing Wind Energy Efficiency: A Systematic Review of Aerodynamic Optimization in Wind Turbine Blade Design. Energies. https://doi.org/10.3390/en17122919

25. Демченко, В. І. Колоїдна хімія. Київ: Вища школа, 2008.

26. 2Мчедлов-Петросян М. О., Лебідь В. І., Глазкова О. М., Лебідь О. В. Колоїдна хімія : підручн. за ред. проф. М. О. Мчедлова-Петросяна. 2-ге вид., випр. і доп. Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2012. 500 с.

27. Адгезія і когезія. Явища розтікання та змочування. Лекція. https://chemeducation.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/14/2020/02/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F_3_%D0%90%D0%B4%D0%B3%D0%B5%D0%B7%D1%96%D1%8F.pdf

28. Соловей І. М. Проектування та технологія виготовлення повітряних гвинтів. Монографія. Бережани, Дніпро : Середняк Т. К. 2025. 166 с.

References

1. Rizzi, A & Oppelstrup, J 2021, "Introduction to Aircraft Aerodynamic Design", in Cambridge University Press eBooks, pp. 1–44, https://doi.org/10.1017/9781139094672.003

2. Lukianov, P & Dusheba, O 2023, "Modeling of aerodynamic noise of quadrotor type aerotaxi", Aerospace Technic and Technology, (4):38–49, https://doi.org/10.32620/aktt.2023.4.05

3. Cummings, RM & Bertin, JJ 2021, Aerodynamics for engineers. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009105842

4. Zhornik, O, Kravchenko, I, Mitrakhovych, M & Balalaieva, K 2022, "Comparative evaluation of the efficiency of the ring-type and bucket inlet devicesfor a power plant with a turbopropfan engine", Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(1 (118)):6–12, https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263023

5. Hoyos, JD, Alvarado, JP & Jiménez, JH 2021, "Propeller aerodynamic optimisation to minimise energy consumption for electric fixed-wing aircraft," The Aeronautical Journal, 125(1292):1844–1870, https://doi.org/10.1017/aer.2021.51

6. Hoyos, J, Jímenez, JH, Echavarría, C & Alvarado, JP 2021, "Airfoil Shape Optimization: Comparative Study of Meta-heuristic Algorithms, Airfoil Parameterization Methods and Reynolds Number Impact", IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 1154(1):012016, https://doi.org/10.1088/1757-899x/1154/1/012016

7. Mian, HH, Wang, G, Zhou, H & Wu, X 2021, "Optimization of thin electric propeller using physics-based surrogate model with space mapping", Aerospace Science and Technology, 111106563, https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106563

8. Khomiak, E., Burdeina, V., Cherniak, O., Olesia, N., Bubela, T. (2024). Improving the Method of Quality Control of the Fuel Element Shell in Order to Improve the Safety of a Nuclear Reactor. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Krytskyi, D. (eds) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2023. ICTM 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1008. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61415-6_30

9. Khomiak, E., Trishch, R., Zabolotnyi, O., Cherniak, O., Lutai, L., Katrich, O. (2024). Automated Mode of Improvement of the Quality Control System for Nuclear Reactor Fuel Element Shell Tightness. In: Faure, E., et al. Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 221. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_7

10. Hussain, M, Abdel-Nasser, Y, Banawan, A & Ahmed, Y M 2020, "FSI-based structural optimization of thin bladed composite propellers", in Alexandria Engineering Journal, vol. 59, no. 5, pp. 3755–3766, https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.06.032

11. Bhat, A, Budholiya, S, Aravind Raj, S, Sultan, M T H, Hui, D, Md Shah, A U & Safri, S N A 2021, "Review on nanocomposites based on aerospace applications", in Nanotechnology Reviews, vol. 10, no. 1, pp. 237–253, https://doi.org/10.1515/ntrev-2021-0018

12. Rashid, A B, Haque, M, Islam, S M M & Uddin Labib, K M R 2024, "Nanotechnology-enhanced fiber-reinforced polymer composites: Recent advancements on processing techniques and applications", in Heliyon, vol. 10, no. 2, e24692, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24692

13. Trishch, R, Cherniak, O, Zdenek, D & Petraskevicius, V 2024, "Assessment of the occupational health and safety management system by qualimetric methods", in Engineering Management in Production and Services, vol. 16, no. 2, pp. 118–127, https://doi.org/10.2478/emj-2024-0017

14. Trishch, R, Nechuiviter, O, Hrinchenko, H, Bubela, T, Riabchykov, M & Pandova, I 2023, "Assessment of safety risks using qualimetric methods", in MM Science Journal, 2023(3), https://doi.org/10.17973/mmsj.2023_10_2023021

15. Cherniak, O, Trishch, R, Ginevičius, R, Nechuiviter, O & Burdeina, V 2024, "Methodology for Assessing the Processes of the Occupational Safety Management System Using Functional Dependencies", in Lecture notes in networks and systems, pp. 3–13, https://doi.org/10.1007/978-3-031-60549-9_1

16. Adkins, C N & Liebeck, R H 1994, "Design of optimum propellers", in Journal of Propulsion and Power, vol. 10, no. 5, pp. 676–682, https://doi.org/10.2514/3.23779

17. Trishch, R, Nechuiviter, O, Hrinchenko, H, Bubela, T, Riabchykov, M & Pandova, I 2023, "Assessment of safety risks using qualimetric methods", in MM Science Journal, 2023(3), https://doi.org/10.17973/mmsj.2023_10_2023021

18. Cherniak, O, Trishch, R, Ginevičius, R, Nechuiviter, O & Burdeina, V 2024, "Methodology for Assessing the Processes of the Occupational Safety Management System Using Functional Dependencies", in Lecture notes in networks and systems, pp. 3–13, https://doi.org/10.1007/978-3-031-60549-9_1

19. Labs of Latvia 2021, Nanocoatings for the New Generation of Aviation Engine Parts Developed by RTU, https://labsoflatvia.com/en/news/nanocoatings-for-the-new-generation-of-aviation-engine-parts-developed-by-rtu

20. Gu, Y, Xia, K, Wu, D, Mou, J & Zheng, S 2020, "Technical Characteristics and Wear-Resistant Mechanism of Nano Coatings: A Review", Coatings, 10(3):233, https://doi.org/10.3390/coatings10030233

21. Kiesel, L 2021, "Advanced air plasma spray TBCs for aerospace and industrial components", in Honeywell Aerospace Technologies, https://aerospace.honeywell.com/us/en/learn/about-us/blogs/advanced-air-plasma-spray-tbcs

22. Kobayakawa, M & Onuma, H 1985, “Propeller aerodynamic performance by vortex-lattice method”, in Journal of Aircraft, vol. 22, no. 8, pp. 649–654, https://doi.org/10.2514/3.45181

23. Lopez, N R 2020, “Resistant project: How can nanotechnology reduce environmental impacts of aircrafts?” in Open Access Government, https://www.openaccessgovernment.org/nanotechnology-reduce-environmental-impacts-of-aircrafts/85311

24. Firoozi, A., Hejazi, F., & Firoozi, A. (2024). Advancing Wind Energy Efficiency: A Systematic Review of Aerodynamic Optimization in Wind Turbine Blade Design. Energies. https://doi.org/10.3390/en17122919

25. Demchenko, V. I. (2008). Koloidna khimiia [Colloidal chemistry]. Kyiv : Vyshcha shkola. [in Ukrainian].

26. Mchedlov-Petrosian M. O., Lebid V. I., Hlazkova O. M., Lebid O. V. (2012) Koloidna khimiia : pidruchn. [Colloidal chemistry] za red. prof. M. O. Mchedlova-Petrosiana. 2-he vyd., vypr. i dop. Kharkiv : KhNU im. V. N. Karazina – Kharkiv : V. N. Karazin Kharkiv National University. 500 s. [in Ukrainian].

27. Adheziia i koheziia. Yavyshcha roztikannia ta zmochuvannia. Lektsiia [Adhesion and cohesion. Phenomena of spreading and wetting. Lecture] https://chemeducation.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/14/2020/02/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F_3_%D0%90%D0%B4%D0%B3%D0%B5%D0%B7%D1%96%D1%8F.pdf [in Ukrainian].

28. Solovei I. M. (2025) Proektuvannia ta tekhnolohiia vyhotovlennia povitrianykh hvyntiv [Design and manufacturing technology of propellers. Monograph]. Monohrafiia. Berezhany, Dnipro : Seredniak T. K., 166 s. [in Ukrainian].