

УДК 629.735:331.45

**Tetyana Kozlovskaya**, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Aviation Transport

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6106-5524> **e-mail:** [kozlovskaya5819@gmail.com](mailto:kozlovskaya5819@gmail.com)

**Volodymyr Golovenskiy**, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Aviation Transport

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2320-0895> **e-mail:** [pmm.nv.klk@gmail.com](mailto:pmm.nv.klk@gmail.com)

**Volodymyr Tiahnii**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Aviation Transport

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-9801> **e-mail:** [pmm.nv.klk@gmail.com](mailto:pmm.nv.klk@gmail.com)

**Oleg Kyrychenko**, Lecturer of the Department of Aviation Transport

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-4445-4057> **e-mail:** [pmm.nv.klk@gmail.com](mailto:pmm.nv.klk@gmail.com)

**Andriy Tsarenko**, Senior Lecturer of the Department of Aviation Transport

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4810-8382> **e-mail:** [pmm.nv.klk@gmail.com](mailto:pmm.nv.klk@gmail.com)

Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs, Kremenchuk, Ukraine

## FACTORS OF ENVIRONMENTAL CONDITION NORMALIZATION DURING AIRCRAFT OPERATION

***Abstract.** A comprehensive analysis of environmental factors shaping the impact of aviation activity on the environment has been carried out, including emissions of harmful substances, acoustic pollution, and thermal and vibrational effects. The operational characteristics of aircraft determining the scale of CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO, and particulate matter emissions at different flight phases have been systematically examined. The dependence of emission intensity on engine type, combustion parameters, and flight altitude – which influence photochemical processes in the tropopause – has been evaluated. A comparative analysis of the environmental characteristics of turbojet, turbofan, hybrid, and electric aircraft engines revealed a trend toward reduced specific fuel consumption and pollutant levels due to increased thermodynamic cycle efficiency. The nature of acoustic loads generated by engines, landing gear, and aerodynamic body elements has been studied, identifying zones of the greatest impact near airports. International standards on aircraft noise exposure and noise reduction methods have been analyzed, establishing correlations between propulsion system design parameters and noise emission levels. This enables optimization of turbine blade and nozzle architecture to minimize sound pressure levels. Secondary factors of environmental impact have been separately considered, including pollution caused by fuel and lubricants, de-icing agents, maintenance byproducts, and the formation of contrails and induced cirrus clouds that alter the atmospheric radiation balance. Monitoring data confirming spatial nonuniformity of pollution around airports and along flight corridors have been analyzed. Technological directions for minimizing harmful emissions have been summarized, particularly the implementation of low-temperature combustion technologies, and the advantages of hybrid-electric propulsion systems have been identified, achieving CO<sub>2</sub> emission reductions of 30–50%. The effectiveness of digital modeling of combustion chamber processes for predicting environmental performance at the design stage has been demonstrated.*

*A conceptual model of ecological monitoring for aircraft operation has been developed, integrating Big Data analytics, Internet of Things (IoT), and digital twin technologies for real-time control of emissions, noise, and fuel consumption. The integration of monitoring results into airport environmental management systems has been proposed, following a concept that includes energy-efficient infrastructure, renewable energy utilization, and waste recycling. The necessity of applying economic incentives for aviation enterprises – such as environmental certificates, tax benefits, and support for innovative projects – has been substantiated. Special attention is paid to personnel training, environmental awareness, and institutional cooperation between aviation and environmental protection authorities.*

**Keywords:** aircraft, environmental impact, engine emissions, noise exposure, sustainable aviation fuel, digital monitoring, decarbonization.

**Т.Ф. Козловська, В.В. Головенський, В.Г. Тягній,  
О.П. Кириченко, А.О. Царенко**

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, м. Кременчук, Україна

## **ЧИННИКИ НОРМАЛІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ДОВКІЛЛЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН**

**Анотація.** Проведено комплексний аналіз екологічних чинників, що формують вплив авіаційної діяльності на довкілля, зокрема викидів шкідливих речовин, акустичного забруднення, теплових і вібраційних ефектів. Системно розглянуто особливості експлуатації повітряних суден, які визначають масштаби викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO та твердих частинок у різних режимах польоту. Оцінено залежність інтенсивності викидів від типу силової установки, параметрів згоряння та висоти польоту, що впливають на перебіг фотохімічних процесів у тропопаузі. Проведено порівняльний аналіз екологічних характеристик турбореактивних, турбовентиляторних, гібридних та електричних авіадвигунів, який виявив тенденцію до зниження питомого споживання палива та рівня забруднень за рахунок підвищення ефективності термодинамічного циклу. Досліджено природу акустичного навантаження, що створюється авіадвигунами, шасі та аеродинамічними елементами корпусу, із визначенням зон найбільшого впливу поблизу аеропортів. Проаналізовано міжнародні стандарти щодо шумового впливу і методи зниження шуму, встановлено взаємозв'язок між конструктивними параметрами силових установок і рівнем шумового випромінювання, що дозволяє оптимізувати архітектуру лопаток турбіни та сопел для мінімізації звукового тиску. Окремо розглянуто вторинні фактори негативного впливу на довкілля, серед яких забруднення паливно-мастильними матеріалами, реагентами, продуктами технічного обслуговування, а також формування конденсаційних слідів і хмар, що змінюють радіаційний баланс атмосфери. Проаналізовано результати моніторингових досліджень, які підтверджують просторову нерівномірність забруднень у районах аеропортів та на висотних трасах польотів. Узагальнено технологічні напрями мінімізації шкідливих викидів, зокрема впровадження низькотемпературного згоряння, визначено переваги використання гібридно-електричних схем, що забезпечують зниження викидів CO<sub>2</sub> до 30–50%. Показано ефективність цифрового моделювання робочих процесів у камерах згоряння для прогнозування екологічних характеристик ще на етапі проєктування. Розроблено концептуальну модель екологічного моніторингу

експлуатації повітряних суден, що поєднує технології BigData, IoT та цифрових двійників для контролю викидів, шуму та витрат палива в реальному часі. Запропоновано інтеграцію результатів моніторингу у систему екологічного управління аеропортів за концепцією, яка включає енергоефективну інфраструктуру, використання відновлюваних джерел енергії та утилізацію відходів. Обґрунтовано необхідність застосування економічних стимулів для підприємств авіаційної галузі, таких як екологічні сертифікати, податкові пільги та підтримка інноваційних проєктів. Особливу увагу приділено ролі кадрової підготовки, екологічної культури персоналу та інституційної взаємодії між авіаційними й природоохоронними структурами.

**Ключові слова:** повітряні судна, екологічний вплив, викиди авіадвигунів, шумове навантаження, сталє авіаційне паливо, цифровий моніторинг, декарбонізація.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.43-59>

## Вступ

Авіаційна галузь, як один із ключових секторів глобальної транспортної системи, залишається значним джерелом антропогенного впливу на навколишнє середовище [1-3]. Зростання інтенсивності повітряних перевезень, розширення флоту цивільної авіації та впровадження нових форм енергетичного забезпечення створюють складний комплекс екологічних викликів, що охоплюють викиди парникових газів, шумове забруднення, утворення конденсаційних слідів і внесення змін у мікроклімат навколо аеропортів [1, 4-6]. Сучасні підходи до експлуатації повітряних суден потребують не лише підвищення паливної ефективності та надійності, а й інтеграції принципів сталого розвитку у всі етапи життєвого циклу від проектування до утилізації складників авіаційних конструкцій [5, 7-9]. У цьому контексті особливої ваги набуває дослідження чинників, що визначають можливості нормалізації екологічного стану довкілля при експлуатації повітряних суден, яке є **актуальним** у світлі глобальної декарбонізації авіаційної індустрії та переходу до концепції “зеленого неба” (GreenSky, GS).

**Аналіз сучасних наукових досліджень** у сфері екологічної безпеки авіації [1-9] засвідчує стрімке зростання інтересу до вивчення комплексного впливу експлуатації повітряних суден на довкілля, що охоплює як хімічні, так і фізичні чинники. Значна частина робіт присвячена кількісній оцінці викидів шкідливих речовин, зокрема CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, часток сажі та летких сполук [4-6, 10], які утворюються на різних етапах циклу польоту (Landing/Take-Off, LTO). У наукових публікаціях активно досліджують методи математичного моделювання процесів згоряння в камерах авіадвигунів, що дають змогу прогнозувати динаміку формування продуктів викидів і їхній вплив на верхні шари атмосфери [11-13]. Одночасно з цим досліджуються механізми утворення авіаційного шуму та його просторове поширення [14-16], а також розробляються критерії оцінки акустичного навантаження згідно з вимогами стандартів «ІСАО Annex-16» і програм «CAEP» [17, 18]. Також значну увагу приділено впливу експлуатаційних факторів на стан ґрунтів і водних об'єктів поблизу аеропортів, насамперед забрудненню паливно-мастильними матеріалами, реагентами для обробки злітно-посадкових смуг і стоками

технічного обслуговування [19-21]. Останніми роками формується тенденція до впровадження комплексних систем екологічного моніторингу, що поєднують супутникові спостереження, сенсорні мережі IoT та аналітику великих даних для оцінки кумулятивного ефекту авіаційної діяльності на регіональному рівні. Водночас більшість наявних робіт мають фрагментарний характер і зосереджені на ізольованих аспектах проблеми без урахування їхньої взаємодії у спільній екосистемі авіаційного транспорту. **Невирішеною залишається проблема** побудови комплексної методології оцінювання та нормалізації екологічного стану довкілля при експлуатації повітряних суден, яка б інтегрувала технічні, організаційні й цифрові чинники в єдину систему управління екологічними ризиками та забезпечення сталого розвитку авіації.

Таким чином, **метою роботи** є розроблення комплексної методології оцінювання та нормалізації екологічного стану довкілля при експлуатації повітряних суден, яка інтегрує технічні, технологічні, організаційні та цифрові чинники впливу авіаційної діяльності на навколишнє середовище. Концепція дослідження базується на поєднанні моделей викидів шкідливих речовин, акустичного навантаження, енергоспоживання та життєвого циклу авіаційних систем (LifeCycleAssessment, LCA) із сучасними засобами цифрового моніторингу, аналітики великих даних (BigData, BD) та цифрових двійників польотних процесів. Передбачається, що запропонований підхід забезпечить можливість кількісного прогнозування екологічних наслідків експлуатації на основі інтеграції даних про реальні режими польоту, параметри авіадвигунів і стан навколишнього середовища. Особливу увагу при цьому має бути приділено створенню інструментарію для впровадження політики сталого розвитку в авіаційній галузі, що дозволить перейти від локального контролю забруднень до динамічного управління екологічними ризиками у масштабі життєвого циклу повітряних суден і підвищити рівень екологічної безпеки авіації в цілому.

**Постановка задачі визначення екологічних чинників, пов'язаних з експлуатацією повітряних суден.** Забезпечення екологічної збалансованості авіаційної діяльності потребує глибокого розуміння механізмів формування основних чинників впливу на довкілля під час експлуатації повітряних суден. Одними із ключових напрямів сучасних досліджень є ідентифікація фізико-хімічних процесів, що супроводжують роботу авіадвигунів та експлуатаційно-технологічні цикли, пов'язані з польотними і наземними операціями. У структурі екологічного навантаження провідну роль відіграють газові та аерозольні викиди продуктів згоряння, рівень шуму та вібрацій, а також вторинні ефекти, спричинені взаємодією технічних систем з атмосферним і ґрунтовим середовищем. Ці фактори мають різну природу, часову тривалість та просторову масштабність, проте у сукупності вони формують інтегральний екологічний слід авіації, який потребує системного аналізу. Визначення екологічних чинників базується на урахуванні взаємозв'язку між конструктивними параметрами повітряного судна, характеристиками його силової установки, режимами польоту й умовами навколишнього середовища. Особливої уваги заслуговують процеси згоряння у камерах авіадвигунів, що визначають хімічний склад і концентрацію шкідливих викидів, а також акустичні ефекти, пов'язані з роботою компресорів, турбін та елементів обтікання. Поряд із цим актуальним є дослідження локального впливу авіаційної інфраструктури на стан повітряного, водного та ґрунтового

середовищ. Комплексний підхід до ідентифікації таких факторів створює основу для розроблення моделей оцінювання екологічного навантаження та подальшої нормалізації параметрів довкілля в умовах інтенсивної експлуатації повітряних суден.

Даний етап дослідження має бути структуровано за принципом послідовного розгляду основних груп екологічних чинників, що супроводжують експлуатацію повітряних суден, із урахуванням їхньої фізичної природи, механізмів утворення та масштабів впливу. Основні складники цього етапу охоплюють наступні категорії:

1. Аналіз викидів шкідливих речовин у процесі роботи авіадвигунів, що передбачає: визначення хімічного складу продуктів згоряння ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}$ , частки сажі), оцінку впливу висотних умов польоту на перебіг хімічних реакцій у тропопаузі, порівняння типів двигунів (турбореактивних, турбовентилаторних, гібридних) за екологічними параметрами, використання моделей оцінювання викидів на різних етапах польоту [10-13].

2. Дослідження акустичного забруднення та вібраційного впливу, що включає ідентифікацію основних джерел авіаційного шуму (двигуни, шасі, аеродинамічні поверхні), визначення критеріїв оцінювання шумового навантаження, аналіз екологічних зон навколо аеропортів і нормативних обмежень «ІСАО Annex 16», розгляд методів пасивного та активного шумозниження, як-то екрани, шумопоглинальні матеріали, керування фазами [14-18].

3. Оцінювання інших факторів екологічного впливу, зокрема забруднення ґрунтів і водно-повітряного середовища поблизу аеропортів паливно-мастильними матеріалами, реагентами та відходами технічного обслуговування, вплив конденсаційних слідів і хмар індукованого типу на радіаційний баланс атмосфери, вторинні ефекти у вигляді теплових полів, мікропилу та витоків робочих рідин [19-21].

Діаграма на рис. 1 відображає логіку дослідження, спрямованого на визначення основних чинників екологічного впливу під час експлуатації повітряних суден. При цьому послідовно представлено ключові етапи аналізу, а структуризація дозволяє відобразити взаємозв'язки між фізико-хімічними, акустичними та технологічними процесами, що визначають рівень екологічного навантаження авіації, і створює аналітичну основу для подальшого моделювання процесів нормалізації стану довкілля при експлуатації повітряних суден. Сформована структура забезпечує комплексне охоплення ключових аспектів екологічного впливу авіації, дозволяючи узгодити результати фізико-хімічного, акустичного та екологічного аналізу у межах єдиної системи оцінювання стану довкілля під час експлуатації повітряних суден.

Авіадвигуни формують комплекс газових і аерозольних викидів, інтенсивність яких визначається термодинамічними параметрами згоряння (тиск/температура в камері, надлишок повітря), режимом роботи (ЛТО та крейсерський політ), типом двигуна й висотними умовами [10-13]. Для кількісної оцінки зручно використовувати індекси емісій (EmissionIndex, EI) та розраховувати загальний обсяг викидів за циклом:

$$E_{\text{poll}} = \sum_r \left( \text{Fuel}_r \cdot EI_{\text{poll}}^{(r)} \right), \quad (1)$$

де  $r$  – етап польоту/наземного руху,  $Fuel_r$  – маса спаленого авіаційного палива. Хімічний склад викидів та механізми їхнього утворення визначаються на основі наступних категорій [1, 5, 10-13]:

- $CO_2$ , як базовий маркер «вуглецевого сліду» пропорційний витраті палива;
- $NO_x$ , як складник викидів, що формується переважно за механізмом термічного NO при високій температурі та тиску у камері згоряння;
- $SO_x$ , як складник викидів, що частково перетворюється у сульфатні аерозолі і прямо залежить від вмісту сірки в паливі;
- CO, як незгорілі вуглеводні, частка яких зростає на «холодних» режимах через неповне згоряння;
- частки сажі, що впливають на утворення контралей та оптику атмосфери і більшою мірою характерні для збагачених та перехідних режимів.

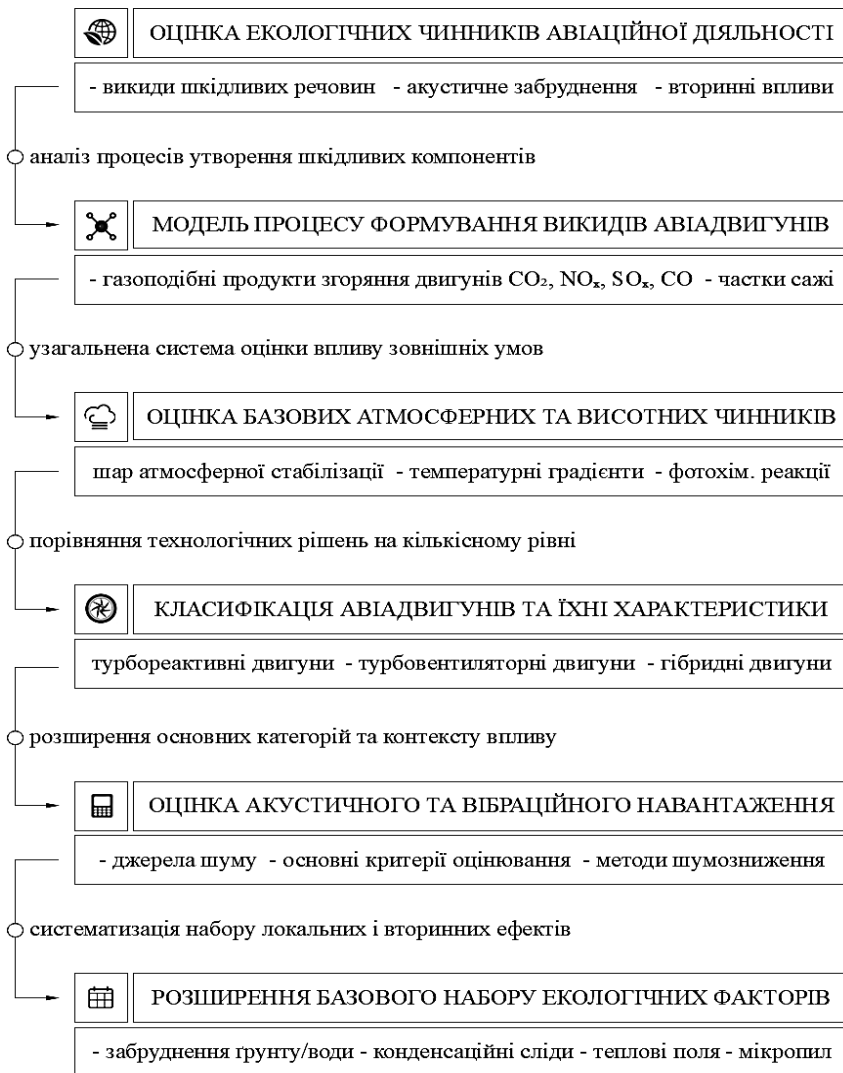


Рисунок 1. Структурна схема оцінки екологічних чинників авіаційної діяльності

У зоні тропопаузи (межовий шар між тропосферою та стратосферою) знижений тиск і температура сприяють утворенню контралей та подальших індукованих хмар; зміни вологості та радіаційного фону впливають на швидкість фотохімічних реакцій. Для оцінки висотних ефектів застосовують коригування індексів емісій з урахуванням температури, тиску та відносної вологості повітря, а також критерії утворення конденсаційних слідів.

Порівняння типів авіадвигунів надає можливість сформулювати наступну класифікацію [9–12, 14–16]:

- турбореактивні авіадвигуни, що застосовуються для високошвидкісних літаків та засобів військової авіації, характеризуються вищою питомою тягою на малих габаритах, що призводить до збільшення частки  $\text{NO}_x$  і рівня шуму;

- турбовентиляторні авіадвигуни, що є сучасним стандартом цивільної авіації, характеризуються підвищеним ступенем двоконтурності, який знижує питому витрату палива та рівень шуму;

- гібридно-електричні та електричні авіадвигуни локально зменшують ЛТО-викиди та шум, але критично залежать від енергетичної щільності накопичувачів та ланцюга постачання енергії.

Порівняння типів авіадвигунів дозволяє не лише класифікувати їх за конструктивними особливостями, але й виявити тенденції зниження екологічного навантаження у процесі розвитку силових установок. Зростання ступеня двоконтурності, оптимізація паливо-повітряного співвідношення та застосування нових матеріалів у камерах згоряння сприяють зменшенню питомих викидів  $\text{CO}_2$  і  $\text{NO}_x$ . Водночас використання гібридно-електричних схем змінює енергетичну структуру польоту, переносячи частину викидів із зони аеропорту на етапи енергогенерації, що потребує комплексного підходу до оцінки екологічного ефекту. Таким чином, еволюція авіадвигунів від турбореактивних до гібридно-електричних систем демонструє чіткий вектор переходу від локального зниження викидів до формування глобальної стратегії декарбонізації авіації, де важливу роль відіграє баланс між енергоефективністю, шумовими характеристиками та впливом на атмосферу.

Моделювання екологічного впливу авіаційної діяльності неможливе без урахування відмінностей між етапами польоту, адже умови роботи двигунів, висота, тяга та тривалість режимів суттєво впливають на кількість і склад викидів. Для цього застосовують спеціалізовані моделі оцінювання викидів за етапами польоту, які дозволяють перейти від узагальнених розрахунків до реалістичних прогнозів екологічного навантаження. Моделі оцінювання за етапами польоту [1, 5, 10–13]:

1. Наземно-повітряний цикл ЛТО охоплює режими запуску та руління, зльоту, набору висоти та заходу на посадку. Модель орієнтована на аналіз екологічного стану в зоні аеропорту й використовується для оцінювання локальних викидів у межах висот до 915 метрів.

2. Крейсерський етап польоту (Cruise-Phase, CP) враховує реальні профілі тяги, висоти та швидкості польоту. На цьому етапі головним показником є витрата палива, що визначає обсяги викидів вуглекислого газу, тоді як утворення оксидів азоту оцінюється за співвідношенням тиску та температури в камері згоряння. Для прогнозування утворення конденсаційних слідів застосовують термодинамічні критерії насичення водяної пари.

3. Інтеграція результатів із траєкторіями польоту, отриманими з бортових систем керування польотом (Flight Management System, FMS) або автоматичних

систем спостереження (Automatic Dependent Surveillance–Broadcast, ADS-B), дає змогу перейти від середньостатистичних до індивідуальних (рейсових) оцінок викидів і екологічних наслідків. Це дозволяє підвищити точність аналізу та врахувати специфіку кожного рейсу, типу літака й умов експлуатації.

Застосування моделей оцінювання за етапами польоту забезпечує поетапне відтворення екологічного профілю авіаційної місії, такий підхід дозволяє кількісно оцінювати частку кожного етапу у формуванні загального вуглецевого сліду, визначати ефективність технологічних рішень та створює підґрунтя для побудови комплексних моделей сталого розвитку авіації.

Акустичне навантаження є одним із найбільш відчутних екологічних чинників, що супроводжують експлуатацію повітряних суден, особливо у зонах, прилеглих до аеропортів. Високий рівень шуму негативно впливає на якість життя населення, спричиняє психологічний та фізіологічний дискомфорт, а також порушує екологічну рівновагу у природних біоценозах. Джерела авіаційного шуму різноманітні, і для його ефективного контролю потрібен системний підхід, який охоплює конструктивні, технологічні та організаційні рішення. Основними джерелами акустичного випромінювання під час роботи повітряного судна є наступні [14-16]:

- Авіадвигуни, які формують найбільш інтенсивне акустичне навантаження внаслідок турбулентності вихлопних струменів, зсуву потоків між внутрішнім і зовнішнім контурами, а також обертання лопаток компресора й турбіни.

- Шасі, що створюють характерні аеродинамічні шуми на етапах зльоту й посадки, коли механізми посадки випущені в повітряний потік.

- Аеродинамічні поверхні (закрылки, елерони, передкрылки), які є джерелами шуму через вихрові коливання під час змін конфігурації крила.

У сукупності ці джерела формують комплексне акустичне поле, що залежить від швидкості, режиму роботи двигунів, висоти польоту, напрямку вітру та метеоумов.

Для кількісної характеристики авіаційного шуму застосовуються стандартизовані показники [16-18]:

- децибел з частотною корекцією відображає рівень шуму з урахуванням чутливості людського слуху до різних частот;

- показник сприйманого рівня шуму (Perceived Noise Level, PNL) оцінює психоакустичне сприйняття шуму, інтегруючи частотні й часові параметри;

- ефективний сприйманий рівень шуму (Effective Perceived Noise Level, EPNL) враховує не лише інтенсивність, а й тривалість звукового впливу, що робить його базовим критерієм у міжнародних нормах.

Оцінювання шумового навантаження здійснюється з використанням вимірювальних станцій, розташованих у контрольних точках навколо аеропортів, що дозволяє побудувати акустичні карти зон впливу та визначити допустимі межі експлуатації. Зниження рівня авіаційного шуму досягається за допомогою комплексу технічних і технологічних заходів [11, 14-17]:

#### 1. Пасивні методи:

- використання шумопоглинальних матеріалів у каналах двигуна, на обшивці повітряного судна та елементах шасі;

- застосування аеродинамічних екранів і зміни профілю лопаток для зменшення турбулентності потоку;

- оптимізація режимів зльоту та посадки (зменшення потужності двигунів, плавні траєкторії).

## 2. Активні методи:

- фазове керування акустичними хвилями, при якому генеруються протифазні сигнали для нейтралізації шуму;
- регулювання подачі палива та повітря з метою мінімізації пульсацій у камері згоряння;
- використання цифрових систем керування тягою (Full Authority Digital Engine Control, FADEC), що дозволяють адаптивно знижувати рівень шуму в режимі реального часу.

Проблематика акустичного забруднення безпосередньо пов'язана з рівнем технологічного розвитку авіаційної техніки. Поступовий перехід від турбореактивних до високодвоконтурних і гібридних двигунів, удосконалення аеродинаміки та впровадження систем активного шумозниження зумовлюють зменшення акустичного впливу в середньому на 20-25 % за останні два десятиліття. Проте локальні перевищення нормативів навколо великих аеропортів і над густонаселеними територіями залишаються суттєвою проблемою. Тому актуальним напрямом є інтеграція акустичних моделей у системи екологічного моніторингу, що дозволить не лише контролювати рівень шуму, а й прогнозувати його поширення в реальному часі з урахуванням погодних і траєкторних факторів.

Окрім газових викидів та шумового навантаження, авіаційна діяльність супроводжується низкою вторинних екологічних ефектів, які мають локальний або глобальний характер. Їхній вплив часто залишається поза межами прямих вимірювань, проте вони формують значну частку загального екологічного сліду авіації. До таких факторів належать забруднення ґрунтів і водно-повітряного середовища у зонах аеропортів, утворення конденсаційних слідів та індукованих хмар, а також теплові поля, мікропил і витоки технологічних рідин. Їх дослідження є необхідним для формування комплексної екологічної моделі функціонування авіаційної інфраструктури.

Зони аеропортів характеризуються високою концентрацією джерел техногенного забруднення: паливно-мастильних матеріалів, гідравлічних рідин, антиобліднювальних реагентів, мастил, розчинників і відходів технічного обслуговування. Основні механізми потрапляння забруднювачів у довкілля включають у себе наступні категорії [19-21]:

- розливи та випаровування палива під час заправки літаків;
- стік рідких реагентів з оброблених поверхонь під час танення снігу;
- просочування відпрацьованих мастил у ґрунт через дренажні системи;
- накопичення відходів технічного обслуговування і ремонту.

Ці процеси зумовлюють локальне підвищення концентрацій нафтопродуктів, гліколів та важких металів у ґрунтах і поверхневих водах. У довгостроковій перспективі вони впливають на структуру мікробіоценозів, окисно-відновний потенціал ґрунту та якість підземних вод. Ефективна протидія забрудненню вимагає системи очищення стоків, герметизації паливних складів і впровадження програм екологічного моніторингу навколо аеропортів.

На висотах 8-12 км, у зоні тропопаузи, вихлопні гази авіадвигунів містять водяну пару, частки сажі та іонізовані домішки, які слугують ядрами конденсації. Це сприяє утворенню конденсаційних слідів, що за певних умов перетворюються на індуковані перисті хмари. Їхній вплив формалізується через введення у математичну модель наступних факторів [1, 2, 5]:

- зменшення альbedo поверхні Землі за рахунок відбиття сонячної радіації;
- підвищення утримання довгохвильового випромінювання в атмосфері, що створює ефект додаткового потепління;
- збільшення оптичної товщини атмосфери і змінах локального радіаційного балансу.

Згідно з сучасними кліматичними моделями, індуковані хмари можуть мати порівнянний або навіть більший вплив на баланс енергії, ніж прямі викиди CO<sub>2</sub>. Це свідчить про необхідність урахування контралеї як непрямого чинника глобального потепління під час оцінювання екологічного ефекту авіації. Зменшення цього впливу можливе за рахунок оптимізації маршрутів і висот польоту залежно від температури й вологості у верхніх шарах тропосфери.

Серед додаткових впливів у рамках дослідження пропонується виділити наступні категорії [6, 19, 21]:

1. Теплові поля, що формуються внаслідок роботи двигунів, систем кондиціонування та допоміжних енергетичних установок (Auxiliary Power Unit, APU). Вони локально змінюють температурний режим навколо аеропортів і можуть впливати на розвиток турбулентності.

2. Мікропил утворюється під час зносу шин, гальмівних колодок, бетонних покриттів злітно-посадкових смуг. Мікрочастинки містять важкі метали (Cu, Zn, Pb), які можуть потрапляти у повітря та водне середовище.

3. Витоки технологічних рідин (гідравлічних, охолоджувальних, мастильних) становлять небезпеку через токсичність і тривалу біодеградацію.

Хоча зазначені фактори мають локальний характер, вони визначають якість середовища в безпосередній зоні експлуатації повітряних суден і можуть кумулятивно впливати на стан екосистем. Зазначені фактори впливу, що супроводжують авіаційну діяльність, мають комплексний і мультифакторний характер. Вони поєднують локальні забруднення наземних екосистем із глобальними атмосферними ефектами, які впливають на кліматичні процеси. Аналіз цих чинників свідчить, що традиційні методи контролю авіаційних викидів є недостатніми, якщо не враховувати непрямі впливи, пов'язані з утворенням індукованих хмар, теплових полів і мікропили. Перспективним напрямом подальших досліджень є розроблення інтегрованих моделей екологічного впливу, які об'єднують наземні та висотні процеси, забезпечуючи більш повну оцінку екологічної безпеки авіаційної інфраструктури.

## **Теоретичні основи досліджень**

**Технологічні та організаційні підходи до нормалізації екологічного стану.** Поглиблення екологічної трансформації авіаційної галузі вимагає переходу від констатації масштабів впливу до активного управління екологічними процесами на всіх етапах життєвого циклу повітряних суден. У сучасних умовах стрімкого зростання повітряного трафіку та посилення міжнародних кліматичних зобов'язань критично важливо формувати не лише аналітичні моделі оцінювання впливів, а й практичні технологічні та організаційні рішення, здатні знизити рівень шкідливих викидів, шумового навантаження й ресурсного споживання. Глобальна ініціатива переходу до вуглецево-нейтральної авіації вимагає комплексного підходу, який поєднує

інженерні інновації, цифрові системи моніторингу, нормативні механізми регулювання та формування екологічної культури персоналу. Саме тому розроблення технологічних і організаційних підходів до нормалізації екологічного стану є одним із найактуальніших напрямів розвитку сучасної авіаційної науки і практики, що визначає траєкторію сталого функціонування повітряного транспорту.

Даний етап дослідження структуровано за напрямками, які відображають взаємозв'язок між технічними, цифровими та управлінсько-нормативними засобами забезпечення екологічної стійкості авіаційної діяльності. Послідовність дослідження базується на переході від технічних рішень і технологічних інновацій до систем моніторингу, аналітики та організаційного впровадження заходів сталого розвитку [6-12, 17, 18].

1. Технічні рішення для зменшення шкідливих викидів – передбачають дослідження й впровадження технологій, спрямованих на скорочення газових і твердих викидів авіадвигунів. Основну увагу зосереджено на застосуванні систем низькотемпературного згоряння, що знижують утворення оксидів азоту; переході на альтернативні види палива, зокрема стійкі авіаційні палива (Sustainable Aviation Fuels, SAF), водень і синтетичні вуглеводні; оптимізації аеродинамічних характеристик і зменшенні маси конструкції, що знижує питомі витрати палива; інтеграції гібридно-електричних і повністю електричних силових установок, які мінімізують локальні викиди в зоні аеропортів.

2. Системи екологічного моніторингу та управління впливами – формують аналітичне підґрунтя для оцінки реального екологічного ефекту застосованих технологій. До основних напрямів віднесено: створення систем екологічного моніторингу польотів (Flight Environmental Impact Monitoring; FEIA), що забезпечують контроль за рівнем викидів і шуму в режимі реального часу; використання моделей життєвого циклу для кількісної оцінки «вуглецевого сліду» повітряних суден; впровадження концепції «Зелений аеропорт» (Green Airport), орієнтованої на енергоефективну інфраструктуру, замкнений обіг відходів та використання відновлюваних джерел енергії; розвиток цифрових платформ обліку та прогнозування викидів, що базуються на аналітиці великих даних та цифрових двійниках.

3. Організаційно-нормативні механізми визначають рамкові умови реалізації екологічних ініціатив у галузі авіації. Вони включають: узгодження з міжнародними стандартами, які регламентують рівень допустимих викидів і шуму; участь у національних програмах декарбонізації авіації та розвитку «зеленої логістики»; використання економічних стимулів, таких як екологічні збори, сертифікати на скорочення викидів і державні субсидії для інноваційних технологій; підвищення рівня екологічної культури та професійної підготовки персоналу як передумови ефективної реалізації екологічної політики підприємств авіаційного транспорту.

Запропонована структура забезпечує цілісність підходу до нормалізації екологічного стану, поєднуючи інженерні рішення, цифрову аналітику та організаційно-економічні механізми в єдину систему екологічного управління авіаційною галуззю. Рис. 2 ілюструє взаємозв'язок між технічними, цифровими та нормативними напрямками забезпечення екологічної стійкості авіаційної діяльності. Схема демонструє, що ефективна нормалізація стану довкілля можлива лише за умови поєднання інженерних інновацій,

спрямованих на зменшення викидів, із системами моніторингу та аналітики, які забезпечують контроль екологічних параметрів у режимі реального часу. У подальшому ці процеси узгоджуються через організаційно-нормативні механізми, що формують єдиний регуляторний і управлінський контур. Таким чином, наведена на рис. 2 схема відображає послідовність переходу від технологічних рішень до цифрової екологічної інтеграції та управління впливами, що є основою сучасної моделі сталого розвитку авіаційної галузі.

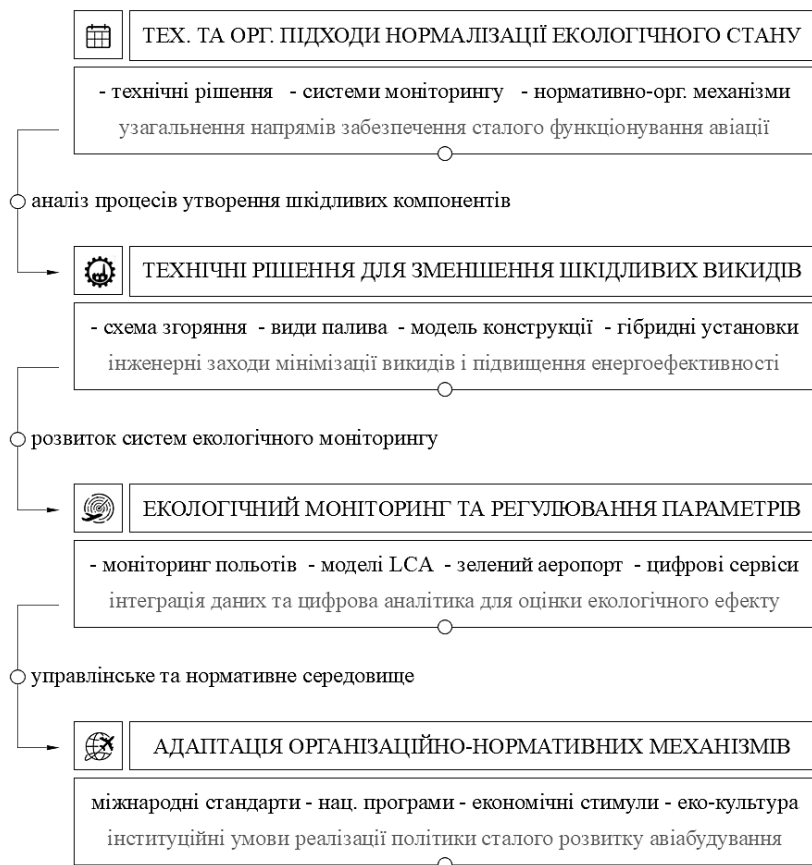


Рисунок 2. Структурна схема технологічних та організаційних підходів до нормалізації екологічного стану авіабудування

Сучасна авіаційна галузь перебуває на етапі переходу від традиційних підходів до зниження викидів до комплексних технологічних стратегій екологічної оптимізації силових установок. Ключовим напрямом є впровадження систем низькотемпературного згоряння, як-то технологій типу «Lean-Burn» та «Rich-Quench-Lean», які забезпечують істотне скорочення утворення оксидів азоту за рахунок зменшення пікових температур у камері згоряння та контролю співвідношення паливо-повітря.

Значного розвитку набули дослідження щодо альтернативних видів палива, зокрема стійких авіаційних палив (Sustainable Aviation Fuels, SAF), синтетичних вуглеводнів і водню [9-12]. Такі енергетичні носії дають змогу скоротити «вуглецевий слід» на 50-80 % у межах життєвого циклу палива,

а надалі досягти майже нульових викидів CO<sub>2</sub>. Розроблення адаптованих паливних систем і камер згоряння для водневих двигунів формує нову технологічну парадигму “Zero-Emission Propulsion”, що визначає стратегічний напрям декарбонізації авіації. Не менш важливим є підвищення аеродинамічної досконалості та зниження маси конструкції, що безпосередньо зменшує питомі витрати палива. Використання композиційних і градієнтних матеріалів, оптимізація геометрії крила, інтеграція адаптивних поверхонь керування забезпечують зменшення опору руху та підвищення енергоефективності. Наступним етапом технологічної еволюції стає інтеграція гібридно-електричних і повністю електричних силових установок, здатних мінімізувати локальні викиди та шум у зоні аеропортів. Поєднання електричних приводів з газотурбінними системами створює передумови для гнучкого енергетичного балансу, зниження пікових навантажень і розширення можливостей енергоменеджменту польоту. Узагальнюючи, зазначені технічні рішення становлять інноваційний комплекс заходів, спрямований на формування авіаційної енергетики нового покоління, де скорочення викидів досягається не за допомогою ізольованих технічних удосконалень, а через інтеграцію термодинамічної, конструктивної та електроенергетичної оптимізації.

Ефективне управління екологічним станом авіаційної діяльності базується на переході від періодичного контролю до безперервного моніторингу екологічних параметрів у реальному часі. Центральне місце у цьому процесі посідають системи екологічного моніторингу польотів (Flight Environmental Impact Monitoring, FEIM), які забезпечують збір, аналіз і візуалізацію даних щодо викидів, шуму, витрати палива та маршруту польоту [6-8]. Інтеграція таких систем у бортові комплекси управління дає змогу оперативно оцінювати вплив польотних операцій на довкілля, формувати адаптивні профілі тяги й оптимізувати траєкторії для мінімізації шкідливих ефектів. Важливим складником сучасної аналітичної екосистеми є моделі життєвого циклу, що дозволяють оцінювати «вуглецевий слід» авіаційних технологій з урахуванням усіх етапів. Такий підхід забезпечує можливість виявлення «критичних точок» впливу та прийняття рішень щодо підвищення екологічної ефективності на системному рівні. Впровадження концепції «Зелений аеропорт» (Green Airport) є ключовим напрямом нормалізації стану довкілля на наземному етапі експлуатації. Вона передбачає створення енергоефективної інфраструктури, замкнених циклів водо- та відходообігу, а також активне використання відновлюваних джерел енергії для живлення аеропортових систем. Таким чином, формується інтегрована модель екологічно орієнтованої аеронавігаційної інфраструктури, здатна суттєво скоротити не лише прямі, а й опосередковані викиди. Особливу роль у розвитку сучасних підходів до моніторингу відіграють цифрові платформи обліку та прогнозування екологічних параметрів [6-8], що поєднують аналітику великих даних, мережу сенсорних пристроїв (Internet of Things, IoT) та технологію цифрових двійників. Вони дозволяють моделювати екологічні сценарії віртуально, прогнозувати наслідки експлуатаційних рішень та виявляти аномалії у системах викидів або споживання енергії. Сукупність цих рішень формує нову парадигму управління екологічними впливами в авіації, засновану на прозорості даних, предиктивному аналізі та інтеграції цифрових інструментів у процеси експлуатації. Новизна підходу полягає у створенні єдиного

інформаційного простору екологічної взаємодії, який перетворює моніторинг із контрольної процедури на активний інструмент оптимізації екологічної ефективності авіаційних систем і наземної інфраструктури.

Ефективне зниження екологічного навантаження в авіаційній галузі неможливе без формування інституційного середовища, що забезпечує узгодженість технічних рішень, нормативної бази та економічних стимулів. Центральне місце в цьому процесі займають міжнародні стандарти («ICAO SAEP», «EASA PartEco», «CORSA»), які визначають параметри допустимих викидів, шумових рівнів і процедури обліку вуглецевого балансу. Їхня адаптація до національного законодавства створює основу для гармонізації екологічної політики на глобальному рівні та забезпечує сумісність систем моніторингу в межах єдиного авіаційного простору. Важливим складником інституційної трансформації є державні програми декарбонізації авіації та розвитку «зеленої логістики», спрямовані на інтеграцію екологічних критеріїв у транспортну стратегію. Такі програми формують умови для впровадження стійких авіаційних палив, розвитку енергетично нейтральних аеропортів та стимулюють технологічне оновлення флоту. Економічні інструменти стимулювання, зокрема екологічні збори, сертифікати на скорочення викидів і державні субсидії, відіграють роль каталізаторів технологічних інновацій. Вони переводять принцип «екологія як витрати» у площину «екологія як інвестиція», забезпечуючи конкурентоспроможність підприємств, що впроваджують стійкі рішення. Не менш суттєвим є розвиток екологічної культури та професійної підготовки персоналу, який формує когнітивну основу для впровадження екологічно орієнтованого мислення в управлінських і технічних процесах. Таким чином, організаційно-нормативні механізми утворюють метарівень екологічної трансформації авіації, у якому технічні та аналітичні інновації поєднуються з регуляторними інструментами, створюючи умови для системного переходу до вуглецево-нейтральної та ресурсно збалансованої авіаційної інфраструктури. Новизна цього підходу полягає у переході від декларативного екологічного контролю до керованої моделі сталого розвитку, що інтегрує інженерні, економічні та управлінські аспекти в єдину екосистему авіаційної політики.

## **Висновки**

Дослідження присвячене комплексному аналізу екологічних чинників, що формують вплив експлуатації повітряних суден на довкілля, та розробленню методологічних основ нормалізації екологічного стану в умовах інтенсивного розвитку авіаційної галузі. У межах роботи системно розглянуто газові, акустичні, теплові та вторинні фактори впливу, а також визначено взаємозв'язки між параметрами авіадвигунів, режимами польоту й умовами атмосфери. Особлива увага приділена питанням декарбонізації авіаційного транспорту, оптимізації термодинамічних процесів згоряння, зниженню шумового навантаження, формуванню моделей оцінювання викидів за етапами польоту та розробленню структурних схем екологічного моніторингу. У результаті проведеного дослідження:

– виявлено закономірності формування основних видів шкідливих викидів залежно від конструктивних характеристик авіадвигунів і висотних режимів польоту;

- узагальнено підходи до моделювання акустичного впливу повітряних суден і визначено ефективність технічних засобів шумозниження;
- запропоновано технологічні рішення для зменшення екологічного навантаження, включно з використанням низькотемпературного згоряння, стійких авіаційних палив, гібридно-електричних силових установок та легких конструкцій;
- розроблено концепцію інтегрованої системи екологічного моніторингу авіаційної діяльності, що базується на поєднанні технологій великих даних, сенсорних мереж і цифрових двійників;
- обґрунтовано необхідність узгодження технічних і цифрових рішень з міжнародними екологічними стандартами та національними програмами декарбонізації;
- визначено роль економічних стимулів, кадрової підготовки та екологічної культури як чинників інституційної трансформації авіаційної галузі.

Практична значущість отриманих результатів полягає у створенні цілісної методології, що інтегрує технічні, цифрові та організаційні аспекти управління екологічними впливами повітряних суден. Запропонований підхід дозволяє здійснювати кількісне прогнозування екологічних наслідків експлуатації на основі реальних даних польотів, формувати політику сталого розвитку авіації та підвищувати рівень екологічної безпеки як у межах аеропортової інфраструктури, так і на глобальному рівні. Отримані результати можуть бути використані при розробленні програм декарбонізації, екологічних стандартів, цифрових систем моніторингу та управління викидами, що робить дане дослідження вагомим внеском у формування науково-прикладних засад «зеленої» авіації майбутнього.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ \ REFERENCES

1. Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., Wilcox, L. J., et al. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244, 117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
2. Burkhardt, U., & Kärcher, B. (2011). Global radiative forcing from contrail cirrus. *Nature Climate Change*, 1(1), 54–58. <https://doi.org/10.1038/nclimate1068>
3. Grewe, V., Gangoli Rao, A., Grönstedt, T., Xisto, C., Linke, F., Melkert, J., Dahlmann, K., et al. (2021). Evaluating the climate impact of aviation emission scenarios towards the Paris agreement including COVID-19 effects. *Nature Communications*, 12(1), 3841. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24091-y>
4. Rupcic, L., Pierrat, E., Saavedra-Rubio, K., Thonemann, N., Ogugua, C., & Laurent, A., et al. (2023). Environmental impacts in the civil aviation sector: Current state and guidance. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 119(3), 103717. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103717>
5. Singh, D. K., Sanyal, S., & Wuebbles, D. J. (2024). Understanding the role of contrails and contrail cirrus in climate change: A global perspective. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(16), 9219–9262. <https://doi.org/10.5194/acp-24-9219-2024>
6. Gough, W. A., & Leung, A. (2022). Do airports have their own climate? *Meteorology*, 1(2), 171–182. <https://doi.org/10.3390/meteorology1020012>
7. Keiser, D., Schnoor, L. H., Pupkes, B., & Freitag, M. (2023). Life cycle assessment in aviation: A systematic literature review of applications, methodological approaches and challenges. *Journal of Air Transport Management*, 110, 102418. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102418>

8. Mazur, K., Saleh, M., & Hornung, M. (2024). Integrating Life Cycle Assessment in conceptual aircraft design: A comparative tool analysis. *Aerospace*, *11*(1), 101. <https://doi.org/10.3390/aerospace11010101>
9. Khalifa, R., Alherbawi, M., Bicer, Y., & Al-Ansari, T. (2024). Fueling circularity: A thorough review of circular practices in the aviation sector with sustainable fuel solutions. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, *23*, 200223. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2024.200223>
10. Wayson, R. L., Fleming, G. G., & Iovinelli, R. (2009). Methodology to estimate particulate matter emissions from certified commercial aircraft engines. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *59*(1), 91–100. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.59.1.91>
11. Chikishev, L. M., Sharaborin, D. K., Lobasov, A. S., Dekterev, A. A., Tolstoguzov, R. V., Dulin, V. M., & Markovich, D. M. (2022). LES Simulation of a Model Gas-Turbine Lean Combustor: Impact of Coherent Flow Structures on the Temperature Field and Concentration of CO and NO. *Energies*, *15*(12), 4362. <https://doi.org/10.3390/en15124362>
12. Wang, Z., Yang, Z. (2024). NOx Formation Mechanism and Emission Prediction in Turbulent Combustion: A Review. *Applied Sciences*, *14*(14), 6104. <https://doi.org/10.3390/app14146104>
13. Terrenoire, E., Hauglustaine, D. A., et al. (2022). Impact of present and future aircraft NOx and aerosol emissions on atmospheric composition and associated direct radiative forcing of climate. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *22*, 11987–12013. <https://doi.org/10.5194/acp-22-11987-2022>
14. Edgington-Mitchell, D. M. (2019). Aeroacoustic resonance and self-excitation in screeching and impinging supersonic jets-A review. *International Journal of Aeroacoustics*, *18*(2-3), 118–188. <https://doi.org/10.1177/1475472X19834521>
15. Zhao, K., Okolo, P., Neri, E., et al. (2020). Noise reduction technologies for aircraft landing gear-A bibliographic review. *Progress in Aerospace Sciences*, *112*, 100589. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2019.100589>
16. Rindfleisch, T. C., Alonso, J. J., Jackson, D. C., Munguía, B. C., & Bowman, N. W. (2024). A large-scale validation study of aircraft noise modeling for airport arrivals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *155*(3), 1928–1949. <https://doi.org/10.1121/10.0025276>
17. International Civil Aviation Organization. (2017). *Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation, Volume I: Aircraft Noise (8th ed.)*. Montreal, QC: ICAO. <https://store.icao.int/en/annex-16-environmental-protection-volume-i-aircraft-noise>
18. Rutherford, D. (2025, May). The International Civil Aviation Organization’s CAEP/13 aircraft noise standards (ICCT Policy Update). *International Council on Clean Transportation*. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2025/05>
19. Sulej-Suchomska, A. M., Szumińska, D., de la Guardia, M., Przybyłowski, P., & Polkowska, Ż. (2024). Airport runoff water: State-of-the-art and future perspectives. *Sustainability*, *16*(18), 8176. <https://doi.org/10.3390/su16188176>
20. Exton, B., Hassard, F., Medina-Vaya, A., & Grabowski, R. C. (2024). Impact of carbon sources in airport de-icing compounds on the growth of *Sphaerotilus natans*. *Frontiers in Microbiology*, *15*, 1320487. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1320487>
21. Olds, H. T., Corsi, S. R., & Rutter, T. D. (2022). Benzotriazole concentrations in airport runoff are reduced following changes in airport deicer formulations. *Integrated Environmental Assessment and Management*, *18*(1), 245–257. <https://doi.org/10.1002/ieam.4468>

*Стаття надійшла до редакції 10.02.2026, надійшла після рецензування 23.03.2026, прийнята 07.04.2026*

*The article was received 10.02.2026, received after revision 23.03.2026, accepted 07.04.2026*

**Козловська Тетяна Федорівна**

кандидат хімічних наук, доцент, завідувач кафедри авіаційного транспорту, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

**Адреса робоча:** вул. Перемоги 17/6, м. Кременчук Полтавської обл., 39605

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6106-5524> **e-mail:** kozlovskaya5819@gmail.com

**Головенський Володимир Васильович**

кандидат технічних наук, професор кафедри авіаційного транспорту, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

**Адреса робоча:** вул. Перемоги 17/6, м. Кременчук Полтавської обл., 39605

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2320-0895> **e-mail:** pmm.nv.klk@gmail.com

**Тягній Володимир Григорович**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри авіаційного транспорту, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

**Адреса робоча:** вул. Перемоги 17/6, м. Кременчук Полтавської обл., 39605

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-9801> **e-mail:** pmm.nv.klk@gmail.com

**Кириченко Олег Петрович**

викладач кафедри авіаційного транспорту, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

**Адреса робоча:** вул. Перемоги 17/6, м. Кременчук Полтавської обл., 39605

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-4445-4057> **e-mail:** pmm.nv.klk@gmail.com

**Царенко Андрій Олександрович**

старший викладач кафедри авіаційного транспорту, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

**Адреса робоча:** вул. Перемоги 17/6, м. Кременчук Полтавської обл., 39605

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4810-8382> **e-mail:** pmm.nv.klk@gmail.com