

## ВПЛИВ ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНИХ ТА ВОДНЕВИХ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН НА ПРОЦЕДУРИ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ

О.Є. Луппо<sup>1</sup>, Г.Ф. Аргунов<sup>2</sup>, М.М. Богуненко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>канд. пед. наук, доцент кафедри аеронавігаційних систем,  
Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна  
ORCID ID: 0000-0001-9063-985X

<sup>2</sup>старший викладач кафедри аеронавігаційних систем,  
Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна  
ORCID ID: 0009-0009-1823-6461

<sup>3</sup>старший викладач кафедри аеронавігаційних систем,  
Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна  
ORCID ID: 0000-0002-9384-7870

### Анотація

**Вступ.** У сучасних наукових дослідженнях дедалі більше уваги приділяється декарбонізації транспортних систем як необхідній умові сталого розвитку. Авіаційний транспорт, попри відносно невелику частку у глобальних викидах парникових газів, характеризується високими темпами зростання та складністю зниження екологічного впливу. У цьому контексті гібридні та водневі повітряні судна розглядаються як перспективний напрям розвитку авіації. Водночас їх вплив на організацію транспортних процесів і процедури управління повітряним рухом досі залишається недостатньо систематизованим. **Мета.** Метою статті є аналіз впливу використання гібридних та водневих повітряних суден на процедури управління повітряним рухом з урахуванням змін клімату, експлуатаційних особливостей і перспектив розвитку аеропортової інфраструктури. **Результати.** У роботі встановлено, що впровадження гібридних і водневих повітряних суден може призводити до змін інтенсивності руху та фактичної пропускної спроможності аеропортів унаслідок специфіки наземного обслуговування й заправки. Показано, що відмінності у льотно-технічних характеристиках і режимах роботи силових установок впливають на існуючі підходи до ешелонування, класифікацію повітряних суден за турбулентністю сліду та формування стандартних маршрутів вильоту і заходження на посадку. Виявлено необхідність адаптації аварійних процедур і алгоритмів реагування диспетчерських служб з урахуванням властивостей водню як енергоносія. **Висновки та перспективи подальших досліджень.** Показано, що інтеграція гібридних і водневих повітряних суден у транспортну систему потребує комплексного перегляду процедур управління повітряним рухом з урахуванням кліматичних, інфраструктурних та експлуатаційних чинників. Обґрунтовано доцільність подальших досліджень, спрямованих на кількісне моделювання впливу нових типів повітряних суден на ефективність функціонування системи управління повітряним рухом у змішаному повітряному русі.

**Ключові слова:** гібридні повітряні судна, водневі повітряні судна, управління повітряним рухом, пропускна спроможність, декарбонізація авіації.



IMPACT OF THE USE OF HYBRID AND HYDROGEN AIRCRAFT  
ON AIR TRAFFIC MANAGEMENT PROCEDURES

O.Ye. Luppo<sup>1</sup>, H.F. Arhunov<sup>2</sup>, M.M. Bohunenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD in Education, Associate Professor of the Department Air Navigation Systems,  
National University "Kyiv Aviation Institute" Kyiv, Ukraine  
ORCID ID: 0000-0001-9063-985X

<sup>2</sup>Senior Lecturer of the Department Air Navigation Systems,  
National University "Kyiv Aviation Institute" Kyiv, Ukraine  
ORCID ID: 0009-0009-1823-6461

<sup>3</sup>Senior Lecturer of the Department Air Navigation Systems,  
National University "Kyiv Aviation Institute" Kyiv, Ukraine  
ORCID ID: 0000-0002-9384-7870

**Summary**

**Introduction.** Increasing environmental requirements and the growing impact of climate change necessitate the transformation of the aviation sector and the introduction of new types of aircraft. The use of hybrid and hydrogen propulsion systems is considered one of the most promising approaches to reducing the negative environmental impact of aviation. At the same time, the integration of such aircraft into the existing aviation system requires an assessment of their influence on the organisation and procedures of air traffic management. **Purpose.** The purpose of the article is to analyse the impact of the use of hybrid and hydrogen aircraft on air traffic management procedures, taking into account climate change, operational characteristics, and the prospects for the development of airport infrastructure. **Results.** It has been established that the introduction of hybrid and hydrogen aircraft may lead to changes in traffic intensity and the effective capacity of airports due to the specific features of ground handling and refuelling processes. It is shown that differences in flight performance characteristics and propulsion system operating modes affect existing approaches to aircraft separation, wake turbulence classification, and the design of standard departure and arrival routes. The need to adapt emergency procedures and response algorithms of air traffic services, taking into account the properties of hydrogen as an energy carrier, has been identified. **Conclusions.** The article demonstrates that the integration of hybrid and hydrogen aircraft into the transport system requires a comprehensive revision of air traffic management procedures, considering climatic, infrastructural, and operational factors. The expediency of further research aimed at quantitative modelling of the impact of new aircraft types on the efficiency of air traffic management systems under mixed traffic conditions is substantiated.

**Key words:** aviation transport, hybrid aircraft, hydrogen technologies, air traffic management, capacity, transport decarbonisation.

**Вступ.** Зростання екологічних вимог і вплив зміни клімату зумовлюють необхідність трансформації авіаційного транспорту та впровадження нових типів повітряних суден (ПС). Використання гібридних і водневих силових установок розглядається як один із перспективних напрямів зниження негативного впливу авіації на довкілля. Водночас інтеграція таких ПС у чинну авіаційну систему потребує оцінювання їх впливу на організацію та процедури управління повітряним рухом (УПР).

**Постановка проблеми.** З початку XXI століття питання зміни клімату стало одним із ключових викликів для глобального економічного та транспортного розвитку. Парникові гази, що акумулюються в атмосфері, спричиняють підвищення середньорічних температур, зміну метеорологічних режимів та екстремальні явища, які вже впливають на життєдіяльність людських спільнот. Сектор цивільної авіації, незважаючи на відносно невелику частку у загальних глобальних викидах парникових газів (за оцінками близько 2–3 %), має значний вплив на атмосферу завдяки викидам CO<sub>2</sub>, оксидів азоту (NO<sub>x</sub>) та утворенню авіаційних конденсаційних слідів (контрейлів), що призводить до змін радіаційного балансу атмосфери в тропосфері та нижній стратосфері [1]. Це, зокрема, підтверджено при аналізі радіаційних ефектів авіаційних контрейлів, що спричиняють як локальне, так і глобальне потепління за рахунок тривалого впливу на енергетичний баланс атмосфери [2]. Хоча авіація становить відносно невелику частку світових викидів, вона є одним із найскладніших секторів для декарбонізації. Якщо не вжити жодних заходів, очікується, що авіаційні викиди зростуть ще більше, виходячи з прогнозу постійно зростаючого попиту на авіаперевезення. Очікується, що світовий попит на авіаперевезення щонайменше подвоїться до 2050 року.

У відповідь на екологічні виклики міжнародні організації та уряди приймають різноманітні ініціативи з декарбонізації авіаційного сектору. У 2021 році Європейський Союз (ЄС) прийняв План дій щодо нульового забруднення [3], який визначив бачення щодо скорочення забруднення повітря, води та ґрунту до рівнів, які більше не вважатимуться шкідливими для здоров'я та природних екосистем до 2050 року.

Серед таких заходів – глобальні схеми екологічних обліків і торгівлі викидами, стандартизація використання альтернативних видів палива, включно зі сталим авіаційним паливом (Sustainable Aviation Fuels – SAF), як сертифікованою альтернативою авіаційному гасу, що забезпечує зниження викидів CO<sub>2</sub> без модифікації повітряних суден (ПС) [4; 5].

Водночас практика показує, що ці механізми мають обмежену ефективність без суттєвого структурного оновлення авіаційних технологій (наприклад, переходу до електричних або водневих джерел енергії) [6]. Важливо також зазначити, що асоціації експертів і екологічних груп критикують деякі чинні підходи як недостатньо амбітні, наголошуючи на потребі більш радикальних технологічних рішень для досягнення кліматичних цілей.

Серед перспективних напрямів декарбонізації авіаційного транспорту значна увага приділяється водневим технологіям, що передбачають використання водню як альтернативного палива або джерела енергії в паливних елементах чи змінених газотурбінних установках. За оцінками EUROCONTROL та Альянсу за авіацію з нульовим рівнем викидів (Alliance for Zero-Emission Aviation – AZEA) [7], інтеграція водневих і електричних ПС може суттєво знизити викиди CO<sub>2</sub> на регіональних маршрутах і забезпечити до 36–68 % внутрішніх перельотів у ЄС з нульовими викидами до 2050 року при широкому впровадженні відповідної інфраструктури та технологій. Проте технічні та інфраструктурні складнощі можуть відтермінувати комерційну реалізацію водневих ПС, як мінімум до 2040 року.

**Аналіз сучасних досліджень та програм розвитку водневих літаків.** Сучасні дослідження у сфері декарбонізації авіаційного транспорту здійснюються

в межах комплексних міжнародних програм, спрямованих на трансформацію авіаційної галузі у довгостроковій перспективі. На рівні Європейського Союзу ключову роль у формуванні науково-дослідного порядку денного відіграє Спільне підприємство Clean Aviation, яке функціонує в рамках програми Horizon Europe та об'єднує зусилля промисловості, наукових установ і регуляторних органів. Метою цих ініціатив є поетапний перехід від традиційної авіації, що базується на викопному паливі, до кліматично нейтральної авіаційної системи, що передбачає впровадження нових енергетичних носіїв, зміну архітектури ПС, а також адаптацію операційних процедур і інфраструктури.

Узагальнену логіку поетапного переходу авіаційного сектору до кліматично нейтральної авіації в межах програми Horizon Europe наведено на рис. 1.



Рис. 1. Поетапний перехід авіаційних технологій від традиційної авіації на викопному паливі до кліматично нейтральної авіаційної системи (Horizon Europe, 2020–2050)

Джерело: адаптовано за матеріалами Horizon Europe та Clean Aviation Joint Undertaking.

Як показано на рис. 1, розвиток авіаційних технологій розглядається як багатоступеневий процес, у межах якого водневі рішення займають ключове місце на етапі переходу до кліматично нейтральної авіації, насамперед у сегментах регіональних та середньомагістральних перевезень. При цьому наголошується, що декарбонізація авіації не обмежується лише впровадженням нових типів ПС, а потребує системних змін у наземній інфраструктурі, нормативно-правовому забезпеченні та організації повітряного руху (ОрПР).

Аналіз наукових публікацій і галузевих звітів свідчить, що водневі технології в авіації розглядаються у двох основних напрямках: використання водню як палива для газотурбінних двигунів та застосування водню як джерела енергії для паливних елементів з подальшим електричним приводом. Обидва підходи активно досліджуються в межах програм Clean Aviation, а також у рамках демонстраційних проєктів промислових компаній та стартапів. Разом із тим у більшості джерел підкреслюється, що масове впровадження таких ПС обмежується не лише технічними викликами, але й необхідністю створення відповідної аеропортової та операційної екосистеми.

Український науковий контекст також демонструє розуміння важливості водневих технологій з точки зору загального енергетичного переходу. Зокрема громадська спілка «Енергетична асоціація «Українська воднева рада» займається розвитком зеленої водневої енергетики як невід'ємної частини виробництва та постачання альтернативних джерел енергії, а також поширенням водневих технологій у різних секторах промисловості та бізнесу з метою підвищення їхньої енергоефективності [8]. Так, міжнародні та вітчизняні дослідження підкреслюють потенціал водню в енергетичній системі України як елемента стратегії переходу до низьковуглецевої економіки, хоча прямої участі у світових авіаційних водневих проєктах Україна наразі не має.

Окремий блок досліджень присвячений регуляторним та сертифікаційним аспектам. У звітах Європейського агентства з авіаційної безпеки (EASA) та Міжнародної організації цивільної авіації (ICAO) наголошується, що для водневих ПС необхідно розробити нові або адаптовані стандарти безпеки, які охоплюватимуть питання криогенних систем, електричних силових установок великої потужності, а також інтеграції таких ПС у чинні системи УПР. Відсутність усталених стандартів на даному етапі розглядається як один із ключових чинників невизначеності щодо строків широкого впровадження водневих літаків у комерційну експлуатацію.

Таким чином, аналіз сучасних досліджень показує, що водневі технології розглядаються як перспективний напрям розвитку авіації, однак їх практична реалізація неминуче супроводжуватиметься змінами в організації повітряного руху, структурі аеропортів та процедурному забезпеченні польотів. Це зумовлює необхідність комплексного аналізу впливу водневих та гібридних ПС на процедури УПР, що й визначає подальшу логіку дослідження.

**Метою цієї роботи є** всебічний аналіз того, як використання гібридних та водневих ПС вплине на процедури УПР, включно з адаптацією існуючих підходів до ешелонування, профілів польоту, пропускної спроможності аеропортів та організації аварійних процедур. Ця проблема є ключовою для забезпечення безпечної й ефективної інтеграції нових технологій у майбутню авіаційну систему. Для досягнення поставленої мети у роботі передбачено вирішення таких завдань:

- проаналізувати сучасний стан і перспективи розвитку гібридних та водневих ПС з урахуванням міжнародних програм декарбонізації авіаційного транспорту;
- дослідити взаємний вплив авіаційної діяльності та зміни клімату, зокрема вплив кліматичних факторів на умови експлуатації ПС і організацію повітряного руху;

- оцінити вплив використання гібридних та водневих ПС на аеропортову інфраструктуру, інтенсивність повітряного руху та пропускну спроможність;
- проаналізувати можливі зміни процедур УПР, включно з ешелонуванням, профілями польоту та аварійними процедурами, зумовлені впровадженням нових типів ПС.

**Виклад основного матеріалу.** Систематизація існуючих концептів дозволяє виділити два базові архетипи водневих ПС, кожен із яких має специфічні експлуатаційні характеристики і виклики.

#### ***Повітряні судна з прямим згорянням водню***

Цей підхід передбачає модифікацію газотурбінних двигунів для спалювання водню або створення гібридних схем із традиційними турбовентиляторними елементами. Концепти такого типу орієнтовані на регіональні та середньомігстральні місії з пасажиромісткістю від ~100 до 150 осіб і дальністю від ≈1 000 до ≈1 400 морських миль залежно від архітектури. Переваги: відносно менші переробки аеродинамічних концепцій у порівнянні з повністю електричними рішеннями; потенційно краща продуктивність на крейсерських висотах порівняно з деякими паливно-електричними схемами. Виклики: криогенне зберігання  $LH_2$ , система подачі та впорскування паливного газу, контроль  $NO_x$  при згорянні, питання безпеки і матеріалів баків. (Цей тип представлений у концептах ZEROe [9] і численних аналітичних документах Clean Aviation) [10].

#### ***Повітряні судна з електроприводом на паливних елементах***

У цій архітектурі водень є лише енергетичним носієм для паливних елементів, які генерують електроенергію для електричних двигунів. Такий підхід вже реалізований у демонстраторах (HY4 [11], ZeroAvia [12]) і підходить для регіональних літаків малої місткості. Переваги: відсутність прямого згоряння на борту (нижчі емісії  $NO_x$ ), можливість гнучкого розміщення електричних підсистем. Виклики: енергоємність стеків паливних елементів, маса енергетичного обладнання (стек, інвертори, акумуляторні буфери), низька швидкість зміни тяги при короткочасних пікових навантаженнях, потреба у високовольтних системах і охолодженні. Демонстраційні польоти показали життєздатність концепту, але також вказали на необхідність подальшої оптимізації вагово-енергетичних параметрів.

#### **Вплив зміни клімату на авіаційну діяльність та процедури УПР**

Зміна клімату впливає на авіаційну систему не лише через необхідність скорочення викидів парникових газів, але й безпосередньо через погіршення метеорологічних та експлуатаційних умов виконання польотів. Згідно з European Aviation Environmental Report 2025, підготовленим EASA спільно з Європейською комісією, Європейським агентством з навколишнього середовища та EUROCONTROL, підвищення середніх і екстремальних температур, зміна режимів опадів, зростання частоти штормів та теплових хвиль уже створюють відчутні ризики для безпеки та регулярності авіаційних перевезень [13].

Підвищення температури повітря призводить до зменшення його щільності, що безпосередньо впливає на злітно-посадкові характеристики ПС. У таких умовах знижуються експлуатаційні запаси безпеки при зльоті та посадці, зростає потреба в обмеженні корисного навантаження або використанні довших злітно-посадкових смуг (ЗПС). За даними EASA, ці ефекти особливо критичні для аеропортів,

розташованих на великій висоті над рівнем моря або з обмеженою довжиною ЗПС, що може призводити до зменшення їх фактичної пропускної спроможності в періоди високих температур [13].

Зміна режимів опадів і зростання частоти інтенсивних дощів та снігопадів підвищують ризик забруднення, підтоплення та деградації ЗПС, а також збільшують імовірність викочування ПС за межі ЗПС. У звіті EASA наголошується, що такі явища можуть спричинити тимчасове закриття аеродромів або окремих елементів аеродромної інфраструктури, що, у свою чергу, призводить до масових затримок, відхилень маршрутів і збільшення навантаження на органи УПР.

Окрему групу ризиків становить зростання частоти сильних штормів, шквальних вітрів і грозової активності. Подібні метеорологічні явища збільшують імовірність пошкодження ПС, наземного обладнання та аеронавігаційних засобів, а також знижують стабільність процедур заходження на посадку. Крім того, зміна вітрових полів, зокрема струменевих течій та приземних вітрів, впливає на вибір робочої ЗПС, інтервали ешелонування та ефективну пропускну спроможність повітряного простору [13; 14].

Зростання частоти явищ турбулентності ясного неба, особливо на крейсерських ешелонах, також розглядається як один із наслідків кліматичних змін. За оцінками європейських експертів, це ускладнює підтримання стабільних профілів польоту, підвищує потребу в зміні ешелонів та маршрутизації в реальному часі і, відповідно, збільшує операційну складність роботи диспетчерських служб.

Таким чином, зміна клімату виступає не лише довгостроковим екологічним викликом для авіації, але й чинником, що безпосередньо впливає на безпеку польотів, регулярність авіаційних перевезень та ефективність процедур УПР. У цьому контексті впровадження гібридних та водневих ПС має розглядатися з урахуванням зростаючої метеорологічної мінливості та необхідності підвищення адаптивності систем УПР, оскільки кліматичні фактори можуть посилювати експлуатаційні обмеження нових типів ПС.

На відміну від більшості наявних досліджень, у цій роботі основна увага приділяється впливу нових типів ПС саме на процедури УПР.

#### **Організація та управління повітряним рухом**

Перехід авіаційної галузі до використання гібридних та водневих ПС відкриває перспективи зниження викидів і підвищення екологічної ефективності перевезень. Водночас впровадження таких літальних апаратів ставить перед системою УПР і аеропортовою інфраструктурою ряд нових завдань. На відміну від традиційних реактивних і турбогвинтових ПС, апарати з альтернативними силовими установками мають інші аеродинамічні характеристики, енергетичні профілі, вимоги до наземних операцій і специфічні ризики, що прямо впливатиме на діяльність диспетчерських служб.

У контексті майбутньої інтеграції таких ПС до регіональної та міжнародної мережі доцільно виокремити ключові напрями, у межах яких експлуатація гібридних і водневих літаків може змінити усталені процедури УПР:

- Вимоги до аеропортової інфраструктури та руху на землі.
- Вплив на інтенсивність операцій і загальну пропускну спроможність.

- Можливе коригування принципів ешелонування із врахуванням особливостей турбулентності сліду.
- Відмінності у профілях набору висоти, горизонтального польоту та зниження.
- Специфіка аварійних та нестандартних процедур.

Окремою, але невід’ємною складовою є підготовка персоналу – підготовка й перепідготовка диспетчерського та аеродромного складу має розглядатися як наступний крок після формалізації технічних стандартів і процедур; навчання саме не є первинним джерелом технічних обмежень, проте є критичною умовою безпечної інтеграції нових технологій.

#### ***Аеропортова інфраструктура та наземне обслуговування***

Впровадження водневих ПС вимагатиме цілеспрямованої реконфігурації аеропортових ресурсів: виділення спеціальних стоянок і зон заправки LH<sub>2</sub>, встановлення систем визначення витоків, посилення протипожежних заходів і оновлення процедур наземного обслуговування. Через наявність криогенних баків і чутливих магістралей деякі елементи конструкції виявляються несумісними з традиційними де-айсинговими реагентами; це вимагає оновлення технології обробки льоду (обмеження температури нанесення, локальні методи очищення, виділені майданчики для обробки) і, як наслідок, призводить до подовження часу обслуговування та ускладнення логістики перону.

#### ***Інтенсивність руху та пропускна спроможність***

Через збільшену тривалість наземних операцій і можливе зниження кількості доступних стоянок загальна інтенсивність польотів на початковому етапі впровадження може скоротитись. Конструктивні особливості водневих ПС (включно з необхідністю криобаків та ізоляції) часто супроводжуються зменшеною пасажиромісткістю, тож для збереження пасажиропотоку авіакомпаніям доведеться збільшувати кількість рейсів або парк ПС. Це підвищує щільність руху, навантаження на стоянки та потребу в слотах, що у сумі погіршує пропускну спроможність аеропорту і системи УПР; додаткові операційні затримки посилюються в зимовий період через адаптовані de-icing процедури.

#### ***Ешелонування за категоріями турбулентності сліду***

Класифікація ПС за турбулентністю сліду (Wake Turbulence Categories – WTC) (ICAO: Light/Medium/Heavy/Super) традиційно спирається на максимальну злітну масу (*Maximum Take-Off Weight – MTOW*) [15; 16], однак інтенсивність вихрового сліду визначається широким набором параметрів – розмах крил, аеродинамікою, конфігурацією тощо. Саме це послужило підґрунтям для RECAT-EU (шестикатегорійна модель) [17]. Хоча масо-габаритні параметри водневих ПС можуть співпадати з існуючими типами, змінена геометрія фюзеляжу й крила, а також нетипові режими тяги здатні модифікувати вагову поведінку ПС; тому можливі перегляди категоризації або введення підкатегорій, що матиме прямі наслідки для інтервалів ешелонування і роботи диспетчерів у змішаному русі.

#### ***Профілі зльоту, набирання висоти та зниження***

Демонстраційні проекти (H2Fly [11], ZeroAvia [12],) і технічні оцінки (Airbus ZEROe [9]) вказують на неоднорідність льотно-технічних характеристик водневих ПС залежно від архітектури силової установки: паливні елементи, як правило,

характеризуються меншою швидкодинамікою тяги, що знижує ROC і уповільнює реакцію при маневрах; водневі турбореактивні установки можуть демонструвати підвищену ефективність на крейсерських висотах [18; 19]. У підсумку очікуються зміни у стандартних маршрутах прибуття та вильоту, процедурах постійного зниження і процедурах стабілізованого заходу, а також потенційна необхідність формування окремих швидкісних потоків.

#### ***Аварійні процедури та реагування***

Властивості водню (легкість, криогенний стан, малопомітне полум'я) трансформують класичні аварійні сценарії. Наявні методичні матеріали EUROCONTROL/SKYbrary [20] слугують корисною базою для формування алгоритмів реагування, проте вимагають доповнення спеціалізованими процедурами: алгоритмами дій при криогенних витоках, оновленими протоколами взаємодії з аварійними службами, процедурами обробки підозри на деградацію паливних елементів, а також критеріями пріоритизації в повітряному просторі під час одночасної присутності традиційних і водневих ПС.

#### **Український контекст**

Масштабні руйнування авіаційної інфраструктури України внаслідок бойових дій створюють унікальну можливість відмовитися від простого копіювання застарілих рішень на користь моделі “Build Back Better” (відбудувати краще, ніж було). Це дозволяє інтегрувати вимоги до водневої авіації ще на етапі проектування нових генеральних планів аеропортів.

Для розвитку таких стратегічних вузлів, як, наприклад, аеропорти різних класів та функціонального призначення – «Бориспіль», «Львів» чи «Антонов», – необхідно передбачати технічні коридори для вакуумно-ізольованих трубопроводів і спеціалізовані зони для криогенного зберігання рідкого водню. Це дозволить у майбутньому уникнути критичних затримок під час заправки та обслуговування ПС, які є суттєвим викликом для пропускнуої спроможності.

Україна має потужний потенціал відновлюваної енергетики, що дозволяє реалізувати концепцію виробництва «зеленого» водню безпосередньо поблизу аеропортових зон. Такий підхід вирішує складну проблему логістики палива та дозволяє аеропортам стати не просто транспортними вузлами, а енергетичними хабами, що відповідає цілям програми Clean Aviation. Враховуючи специфіку українських зим, особливу увагу слід приділити розробці нових методів протиобледеніння (de-icing) для водневих ПС. Оскільки традиційні реагенти можуть бути несумісними з чутливими елементами криогенних конструкцій, необхідно проектувати спеціалізовані майданчики з локальним підігрівом або інноваційними методами очищення, щоб мінімізувати операційні затримки.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У статті проаналізовано сучасні напрями декарбонізації авіаційного транспорту з акцентом на розвиток гібридних і водневих повітряних суден та їх вплив на організацію й управління повітряним рухом. Показано, що, попри відносно невелику частку авіації у глобальних викидах парникових газів, саме цей сектор є одним із найбільш складних для досягнення кліматичної нейтральності.

Аналіз міжнародних програм і наукових досліджень засвідчив, що водневі технології розглядаються як один із ключових інструментів довгострокової

декарбонізації, насамперед у сегменті регіональних і середньоміжконтинентальних перевезень. Водночас масове впровадження водневих ПС стримується технічними, інфраструктурними та регуляторними обмеженнями, а також потребою у створенні нових стандартів безпеки й сертифікації.

Встановлено, що зміна клімату вже сьогодні безпосередньо впливає на умови експлуатації ПС, пропускну спроможність аеропортів і ефективність процедур УПР. Підвищення температур, зростання частоти екстремальних метеорологічних явищ і збільшення турбулентності повітряних мас ускладнюють підтримання стабільних профілів польоту та підвищують навантаження на диспетчерські служби.

Показано, що інтеграція гібридних і водневих ПС вимагатиме адаптації процедур ешелонування, маршрутів польоту та заходження на посадку, аварійного реагування та наземного обслуговування, а також може впливати на інтенсивність руху і загальну пропускну спроможність аеропортів. У зв'язку з цим подальші дослідження доцільно спрямувати на кількісне моделювання впливу нових типів ПС на роботу системи УПР у змішаному повітряному русі.

Окремо слід відзначити, що післявоєнне відновлення авіаційної інфраструктури України створює можливість інтеграції вимог водневої авіації та адаптації процедур УПР ще на етапі стратегічного планування.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Prashanth P., Elmourad J., Grobler C. [et al.]. Near-zero environmental impact aircraft. *Sustainable Energy & Fuels*. 2024. Vol. 8. No 20. P. 4772–4782. doi: 10.1039/D4SE00419A
2. Ortiz I., Dimitropoulou E., de Buyl P. [et al.]. Satellite-Based Quantification of Contrail Radiative Forcing over Europe: A Two-Week Analysis of Aviation-Induced Climate Effects. *arXiv*. 2024. doi: 10.48550/arXiv.2409.10166
3. European Commission. Zero Pollution Action Plan: Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil. Brussels, 2021. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0400> (дата звернення: 17.02.2026).
4. European Union Aviation Safety Agency. Sustainable aviation fuels: Technical, environmental and operational perspectives. Cologne: EASA, 2021. 56 p.
5. International Civil Aviation Organization. Sustainable Aviation Fuels Guide. Montreal: ICAO, 2018. 104 p.
6. НТЦ «Псіхея». Авіаційний сектор на шляху до декарбонізації: виклики та можливості до 2025 року. 2025. URL: <https://oilreview.kiev.ua/2025/03/19/aviacijnij-sektor-na-shlyaxu-do-dekarbonizaci%D1%97-vikliki-ta-mozhливosti-do-2025-roku/> (дата звернення: 17.02.2026).
7. EUROCONTROL. The vision for zero-emission aviation in Europe. 2024. URL: <https://www.eurocontrol.int/article/vision-zero-emission-aviation-europe> (дата звернення: 17.02.2026).
8. Hydrogen Ukraine Association. Hydrogen.ua – аналітика та огляди щодо виробництва та використання водню. URL: <https://hydrogen.ua/en/about-association/achievements> (дата звернення: 17.02.2026).

9. Airbus. Airbus reveals new zero-emission concept aircraft (ZEROe). 2020. URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2020-09-airbus-reveals-new-zero-emission-concept-aircraft> (дата звернення: 17.02.2026).
10. Clean Aviation. Towards Disruptive Technologies for New Generation Aircraft by 2035. 2024. URL: <https://clean-aviation.eu/sites/default/files/2024-09/2024-Clean-Aviation-SRIA.pdf> (дата звернення: 17.02.2026).
11. H2FLY. World's first piloted flight of liquid-hydrogen powered electric aircraft. 2023. URL: <https://www.h2fly.de/2023/09/07/h2fly-and-partners-complete-worlds-first-piloted-flight-of-liquid-hydrogen-powered-electric-aircraft> (дата звернення: 17.02.2026).
12. ZeroAvia. Fuel cell system replicates full flight profile in ground test. 2025. URL: <https://www.h2-tech.com/news/2025/09-2025/zeroavia-certification-intent-fuel-cell-system-replicates-full-flight-profile-in-ground-test> (дата звернення: 17.02.2026).
13. European Union Aviation Safety Agency. European Aviation Environmental Report 2025. 2025. URL: <https://www.eurocontrol.int/publication/european-aviation-environmental-report-2025> (дата звернення: 17.02.2026).
14. European Environment Agency. Environment and climate impacts of aviation continue growing. URL: <https://www.eea.europa.eu/highlights/environment-and-climate-impacts-of> (дата звернення: 17.02.2026).
15. International Civil Aviation Organization. Doc 4444: Procedures for Air Navigation Services – Air Traffic Management. 16th ed. Montreal: ICAO, 2016.
16. ICAO Wake Turbulence Category. URL: <https://skybrary.aero/articles/icao-wake-turbulence-category> (дата звернення: 17.02.2026).
17. EUROCONTROL. European Wake Turbulence Categorisation and Separation Minima on Approach and Departure (RECAT-EU). Edition 2.0. Brussels: EUROCONTROL, 2024.
18. Huang X., Li J., Wang Y. Proton Exchange Membrane Fuel Cells for Aircraft Applications: A Comprehensive Review of Key Challenges and Development Trends. *Aerospace*. 2025. Vol. 6. No 4. Article 116. doi: 10.3390/hydrogen6040116
19. McKinsey & Company; Clean Sky 2 Joint Undertaking. Hydrogen-powered Aviation: A Fact-Based Study of Hydrogen Technology, Economics, and Climate Impact by 2050. 2020. URL: <https://www.h2knowledgecentre.com/content/researchpaper1126> (дата звернення: 20.12.2025).
20. EUROCONTROL. Guidelines for Dealing with Unusual/Emergency Situations in ATC. URL: <https://skybrary.aero/articles/guidelines-dealing-unusualemergency-situations-atc> (дата звернення: 17.02.2026).

## REFERENCES

1. Prashanth, P., Elmourad, J., Grobler, C., et al. (2024). Near-zero environmental impact aircraft. *Sustainable Energy & Fuels*, 8 (20), 4772–4782. doi: 10.1039/D4SE00419A

2. Ortiz, I., Dimitropoulou, E., de Buyl, P., et al. (2024). Satellite-based quantification of contrail radiative forcing over Europe: A two-week analysis of aviation-induced climate effects. *arXiv*. doi: 10.48550/arXiv.2409.10166
3. European Commission. (2021). *Zero pollution action plan: Towards zero pollution for air, water and soil*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0400>.
4. European Union Aviation Safety Agency. (2021). *Sustainable aviation fuels: Technical, environmental and operational perspectives*. EASA.
5. International Civil Aviation Organization. (2018). *Sustainable aviation fuels guide*. ICAO.
6. Psikheia Research Center. (2025). Aviatsiyni sektor na shliakhu do dekarbonizatsii: vyklyky ta mozhlyvosti do 2025 roku [The aviation sector on the path to decarbonization: Challenges and opportunities until 2025]. <https://oilreview.kiev.ua/2025/03/19/aviacijnij-sektor-nashlyaxu-do-dekarbonizaci%D1%97-vikliki-ta-mozhlyvosti-do-2025-roku/> [in Ukrainian].
7. EUROCONTROL. (2024). *The vision for zero-emission aviation in Europe*. <https://www.eurocontrol.int/article/vision-zero-emission-aviation-europe>.
8. Hydrogen Ukraine Association. (n.d.). Hydrogen.ua – analytics and reports on hydrogen production and use. <https://hydrogen.ua/en/about-association/achievements>.
9. Airbus. (2020). Airbus reveals new zero-emission concept aircraft (ZEROe). <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2020-09-airbus-reveals-new-zero-emission-concept-aircraft>.
10. Clean Aviation. (2024). Towards disruptive technologies for new generation aircraft by 2035. <https://clean-aviation.eu/sites/default/files/2024-09/2024-Clean-Aviation-SRIA.pdf>.
11. H2FLY. (2023). World's first piloted flight of a liquid-hydrogen-powered electric aircraft. <https://www.h2fly.de/2023/09/07/h2fly-and-partners-complete-worlds-first-piloted-flight-of-liquid-hydrogen-powered-electric-aircraft>.
12. ZeroAvia. (2025). Fuel cell system replicates full flight profile in ground test. <https://www.h2-tech.com/news/2025/09-2025/zeroavia-certification-intent-fuel-cell-system-replicates-full-flight-profile-in-ground-test>.
13. European Union Aviation Safety Agency. (2025). European aviation environmental report 2025. <https://www.eurocontrol.int/publication/european-aviation-environmental-report-2025>.
14. European Environment Agency. (n.d.). Environment and climate impacts of aviation continue growing. <https://www.eea.europa.eu/highlights/environment-and-climate-impacts-of>.
15. International Civil Aviation Organization. (2016). *Doc 4444: Procedures for air navigation services – Air traffic management* (16th ed.). ICAO.
16. Skybrary. (n.d.). ICAO wake turbulence category. <https://skybrary.aero/articles/icao-wake-turbulence-category>.

17. EUROCONTROL. (2024). *European wake turbulence categorisation and separation minima on approach and departure (RECAT-EU)* (Edition 2.0). EUROCONTROL.
18. Huang, X., Li, J., & Wang, Y. (2025). Proton exchange membrane fuel cells for aircraft applications: A comprehensive review of key challenges and development trends. *Aerospace*, 6 (4), Article 116. doi: 10.3390/hydrogen6040116
19. McKinsey & Company, & Clean Sky 2 Joint Undertaking. (2020). *Hydrogen-powered aviation: A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050*. <https://www.h2knowledgecentre.com/content/researchpaper1126>.
20. EUROCONTROL. (n.d.). Guidelines for dealing with unusual/emergency situations in ATC. <https://skybrary.aero/articles/guidelines-dealing-unusualemergency-situations-atc>.

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026