

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬОТНА АКАДЕМІЯ
НАЦІОНАЛЬНОГО АВІАЦІЙНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Факультет льотної експлуатації
Кафедра льотної експлуатації та безпеки польотів

ДЕМЧУК МИКОЛА РОМАНОВИЧ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ В
ПОВІТРЯНИХ СУДАХ**

Спеціальність 272 «Авіаційний транспорт»
ОПП «Авіаційний транспорт»
Освітній ступінь - магістр

«Допустити до захисту»
Т.в.о. завідувача кафедри
к.т.н., доцент _____ Пальоний А.С.
«_____» _____ 20__ р.

Науковий керівник:
к.п.н. _____ Чорноглазова Г.В.

Робота захищена:
«_____» _____ 20__ р.
з оцінкою _____

Голова ЕК _____

АНОТАЦІЯ

Демчук М. Р. Ефективність використання альтернативних палив в повітряних суднах – Рукопис

Дослідження на здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 272 «Авіаційний транспорт». – Українська державна льотна академія, Кропивницький, 2025.

У дослідженні розглянуто науково-методологічні основи інтегрованого підходу до використання альтернативних палив у повітряних суднах, досліджено їх особливості у контексті підвищення ефективності авіаційної галузі. Проаналізовано проблеми впровадження альтернативних палив у авіації з урахуванням міжнародних стандартів, сертифікації, цифровізації та екологічних вимог. Обґрунтовано шляхи оптимізації процесу переходу на альтернативні палива, зокрема за рахунок впровадження нових технологій, підвищення екологічної свідомості та вдосконалення інфраструктури.

Ключові слова: альтернативні палива, повітряні судна, ефективність використання, біопаливо, водень, синтетичні палива.

ANNOTATION

Demchuk M. R. Efficiency of using alternative fuels in aircraft – Manuscript Research for obtaining the second (master's) level of higher education in specialty 272 "Aviation transport". – Ukrainian State Flight Academy, Kropyvnytskyi, 2025.

The study considers the scientific and methodological foundations of an integrated approach to the use of alternative fuels in aircraft, investigates their features in the context of increasing the efficiency of the aviation industry. The problems of introducing alternative fuels in aviation are analyzed, taking into account international standards, certification, digitalization and environmental requirements. Ways to optimize the process of switching to alternative fuels are substantiated, in particular through the introduction of new technologies, increasing environmental awareness and improving infrastructure.

Keywords: alternative fuels, aircraft, efficiency of use, biofuel, hydrogen, synthetic fuels.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ В АВІАЦІЇ.....	9
1.1 Історія розвитку альтернативних палив для повітряних суден	9
1.2 Класифікація альтернативних палив для авіації	14
1.3 Характеристики та властивості альтернативних палив	21
Висновки до розділу 1	29
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ В ПОВІТРЯНИХ СУДНАХ.....	32
2.1. Методи оцінки ефективності використання альтернативних палив.....	32
2.2 Порівняльний аналіз ефективності різних типів альтернативних палив.....	42
2.3 Економічні аспекти використання альтернативних палив.....	51
Висновки до розділу 2	59
РОЗДІЛ 3 ПЕРСПЕКТИВИ ТА ВИКЛИКИ ВПРОВАДЖЕННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ В АВІАЦІЇ.....	61
3.1 Регуляторні вимоги та стандарти	61
3.2 Технологічні виклики та інновації	67
3.3 Вплив альтернативних палив на екологію та суспільство	73
Висновки до розділу 3	80
ВИСНОВКИ.....	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	84
ДОДАТКИ	89

ВСТУП

Актуальність теми. Авіаційна галузь є одним із ключових секторів глобальної економіки, що забезпечує швидке транспортування пасажирів і вантажів на великі відстані. Водночас ця галузь залишається значним споживачем викопного палива та джерелом викидів парникових газів, зокрема CO₂, NO_x і твердих часток. У контексті глобального потепління, енергетичної кризи та необхідності зменшення вуглецевого сліду актуальним стає питання пошуку альтернативних джерел енергії для авіаційної індустрії.

Використання альтернативних палив, таких як біопаливо, синтетичне паливо, водень та електроенергія, має потенціал для зменшення залежності від викопних ресурсів, зниження викидів та забезпечення стійкого розвитку галузі. Проте впровадження цих палив супроводжується низкою технічних, економічних і нормативних викликів. Актуальність теми дослідження визначається необхідністю розробки ефективних підходів до впровадження альтернативних палив у комерційну авіацію для досягнення екологічної, технічної та економічної ефективності.

Мета дослідження. Полягає в оцінці ефективності використання альтернативних палив у повітряних суднах, аналізі їх впливу на технічні, економічні та екологічні показники авіаційної галузі, а також розробці рекомендацій для їх практичного впровадження.

Задачі дослідження:

- 1) Проаналізувати науково-технічну літературу щодо використання альтернативних палив у повітряних суднах.
- 2) Оцінити екологічний вплив альтернативних палив порівняно з традиційними авіаційними паливами, зокрема викиди парникових газів та інші екологічні аспекти.

3) Дослідити економічні аспекти виробництва, зберігання та використання альтернативних палив, включаючи аналіз витрат і можливостей зниження витрат.

4) Вивчити технічну сумісність альтернативних палив із сучасними авіаційними двигунами та потребу в адаптації технологій для їх використання.

5) Проаналізувати міжнародний досвід впровадження альтернативних палив в авіаційній галузі та оцінити можливість його застосування в Україні.

6) Розробити рекомендації щодо оптимізації процесу переходу на альтернативні палива, з урахуванням технічних, економічних і екологічних аспектів.

Об'єктом дослідження є процес експлуатації повітряних суден із використанням альтернативних видів палива.

Предметом дослідження виступає ефективність використання альтернативних палив у повітряних суднах та їхній вплив на функціонування авіаційної галузі.

Методи дослідження:

Теоретичний аналіз літературних джерел, нормативних документів (ICAO, ASTM D7566, EASA) та міжнародного досвіду впровадження альтернативних палив.

Статистичний аналіз даних щодо екологічних показників (викидів CO₂, NO_x), вартості палива та операційних витрат авіакомпаній.

Метод спостереження за процесами заправки, технічного та наземного обслуговування літаків.

Узагальнення отриманих результатів та моделювання впливу впровадження альтернативних палив на ефективність авіаційної діяльності.

Теоретичні та методологічні основи досліджень:

З ефективності використання альтернативних палив у повітряних суднах включають аналіз екологічних, економічних та технічних аспектів. Важливо враховувати вплив альтернативних палив на зниження викидів

парникових газів, зокрема CO₂, порівняно з традиційними авіаційними паливами. Дослідження також охоплюють питання сумісності альтернативних палив із сучасними авіаційними двигунами та необхідність адаптації технологій для їх використання. Економічні аспекти включають аналіз вартості виробництва, зберігання та транспортування альтернативних палив, а також можливості зниження витрат за рахунок використання відновлюваних ресурсів. Крім того, дослідження розглядають перспективи розвитку інфраструктури для підтримки широкого впровадження альтернативних палив в авіаційній галузі.

Інформаційну базу наукового дослідження формують різноманітні джерела. До них належать статистичні дані реєстру авіаційних подій та інцидентів Aviation Safety Network за період 2017-2022 років, що дозволяють оцінити безпекові аспекти застосування різних видів палива. Аналітичні дані компанії Airbus за 2003-2023 роки надають інформацію про впровадження новітніх технологій та їх вплив на ефективність використання палив. Наукові дослідження зарубіжних та вітчизняних науковців забезпечують глибоке розуміння технологічних, економічних та екологічних аспектів використання альтернативних палив. Аналіз практичного досвіду комерційних компаній допомагає оцінити реальні результати впровадження технологій моніторингу та застосування інструментів глибинного навчання для оптимізації використання палив. Додатково до цього, слід включити дані про вплив альтернативних палив на зниження викидів парникових газів, аналіз вартості виробництва та зберігання палив, а також дослідження про сумісність альтернативних палив із сучасними авіаційними двигунами.

Наукова новизна результатів.

У роботі представлено комплексний підхід до оцінки ефективності використання альтернативних палив, який враховує їхню енергетичну щільність, технічну сумісність із сучасними авіаційними двигунами, економічну доцільність та екологічний вплив. Запропоновано модель

інтеграції альтернативних палив у авіаційну галузь із врахуванням вимог міжнародних стандартів та особливостей існуючої інфраструктури.

Інформаційна база дослідження:

Дослідження базується на аналізі нормативних документів ICAO, EASA та ASTM, наукових публікацій, офіційних звітів авіаційних організацій (наприклад, Air Transport Action Group, McKinsey & Company), статистичних даних авіакомпаній, а також результатах емпіричних досліджень.

Практичне значення одержаних результатів.

Результати роботи можуть бути використані для:

- 1) Розробки стратегій переходу авіакомпаній на альтернативні види палива.
- 2) Адаптації інфраструктури аеропортів для заправки та зберігання альтернативних палив.
- 3) Формування рекомендацій для державних органів щодо політики субсидування та підтримки впровадження альтернативних палив у авіаційній галузі.
- 4) Впровадження альтернативних палив є важливим кроком у розвитку стійкої авіації.

Апробація результатів кваліфікаційної роботи. Основні теоретичні та практичні положення магістерського дослідження оприлюднено та обговорено на Міжнародній науково-практичній конференції «Modern Problems of Science and Technology», яка відбулась 13-15 січня 2025 р. у м.Таллінн, Естонія.

Публікації. Черноглазова Г.В., Демчук М.Р. Эффективность использования альтернативных палив в авіаційних судах. збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції «Modern Problems of Science and Technology» 2025. Таллінн, Естонія, ст. 31-35. https://www.eoss-conf.com/wp-content/uploads/2025/01/Tallinn_Estonia_20.01.25.pdf

Структура, зміст та обсяг кваліфікаційної роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел (55 найменувань) та додатків. Загальний обсяг роботи становить 94 сторінок друкованого тексту, в тому числі 83 сторінки основного тексту, 5 сторінок списку використаних джерел та 6 сторінок додатків. Кваліфікаційна робота містить 2 таблиці, 7 рисунків, 5 додатків.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ В АВІАЦІЇ

Теоретичні основи використання альтернативних палив в авіації включають оцінку їх екологічних, економічних і технічних характеристик. Ці дослідження враховують вплив альтернативних палив на зниження викидів парникових газів та інші екологічні переваги, порівняно з традиційними авіаційними паливами. Економічний аспект розглядає витрати на виробництво, зберігання та транспортування альтернативних палив, а також можливості зниження витрат за рахунок використання відновлюваних ресурсів. Технічний аспект охоплює сумісність альтернативних палив із сучасними авіаційними двигунами та потребу в адаптації технологій для їх ефективного використання. Важливою частиною теоретичних основ є аналіз міжнародного досвіду впровадження альтернативних палив в авіації та перспектив їх подальшого розвитку з урахуванням екологічних та економічних викликів.

1.1 Історія розвитку альтернативних палив для повітряних суден

Витоки та еволюція ідеї використання альтернативних палив

Ідея використання альтернативних палив для повітряних суден бере свій початок з середини 20-го століття, коли стало зрозуміло, що традиційні джерела енергії, такі як нафтове паливо, мають обмежений ресурс і значний негативний вплив на навколишнє середовище. Підвищена стурбованість з приводу викидів вуглекислого газу (CO₂) та інших шкідливих речовин змусила науковців та інженерів шукати більш екологічно чисті та відновлювані джерела енергії.

Перші дослідження альтернативних палив для авіації почались з вивчення можливостей використання біопалива, яке виробляється з

рослинної та тваринної сировини. Біопаливо приваблювало своєю відновлюваністю та потенційно меншими викидами парникових газів у порівнянні з традиційними викопними паливами.

Перші експерименти з використання альтернативних палив у повітряних суднах почались у другій половині 20-го століття. Один з перших успішних прикладів був зареєстрований у 1980-х роках, коли дослідники випробували біопаливо на літаку Boeing 747. Експеримент показав, що біопаливо може успішно використовуватись як заміна традиційному авіаційному паливу без значних змін у конструкції двигуна.

У 2000-х роках, розвиток технологій дозволив проводити більш масштабні дослідження та випробування різних видів альтернативних палив. Наприклад, у 2008 році компанія Virgin Atlantic виконала перший комерційний рейс, використовуючи біопаливо, що стало важливою віхою у розвитку галузі.

Також значних успіхів було досягнуто у використанні водневих паливних елементів. У 2009 році компанія Boeing провела успішні випробування літака з водневим паливним елементом. Результати показали, що водневе паливо може забезпечити високий рівень енергоефективності та низькі викиди шкідливих речовин.

Синтетичні вуглеводневі паливні суміші також стали об'єктом активних досліджень. Ці паливні суміші можуть бути вироблені з використанням вуглекислого газу та водню, що робить їх потенційно нейтральними щодо викидів CO₂. У 2016 році компанія Lufthansa провела успішні випробування синтетичного авіаційного палива на своїх літаках, підтвердивши його високу ефективність та екологічність[6].

Таким чином, розвиток альтернативних палив для повітряних суден пройшов довгий шлях від перших ідей до сучасних технологій, що забезпечують високу ефективність та екологічність. Це дозволяє знизити залежність авіаційної галузі від викопних палив та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище.

На початку розвитку авіації в першій половині XX століття єдиним джерелом енергії для повітряних суден було викопне паливо. Його достатня доступність, відносна дешевизна та високий енергетичний потенціал зробили нафтове паливо основою для всіх типів авіаційних двигунів.

Однак у 1970-х роках ситуація почала змінюватися через глобальну енергетичну кризу, спричинену нафтовим ембарго. Це змусило світову спільноту звернути увагу на альтернативні джерела енергії, зокрема для транспорту. Одним із перших секторів, де почалися експерименти з альтернативними паливами, була авіація, адже її залежність від викопних ресурсів була надзвичайно високою.

У 1980-х роках вчені розпочали перші експерименти з використанням біопалива для авіаційних двигунів. Біопаливо отримували з рослинних олій та сільськогосподарських відходів.

Процес отримання біодобавок до альтернативних авіаційних палив з олій включає реакцію переестерифікації за допомогою простих спиртів та подальшу вакуумну дистиляцію отриманих продуктів. Основу олій складають складні естери гліцерину та вищих жирних кислот. Під час реакції між складним естером та спиртом утворюються нові складні естери жирних кислот (ЕЖК) та вільний гліцерин. Ці нові естери містять спиртовий радикал та радикал кислоти вихідного естеру. Реакція переестерифікації проводиться з використанням простих спиртів. Використання вакуумної дистиляції дозволяє ефективно відокремити отримані ЕЖК від інших компонентів суміші, забезпечуючи високу чистоту та якість біодобавок[49].

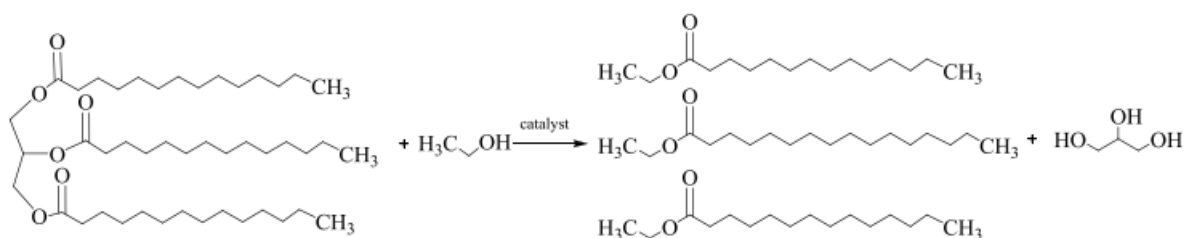


Рисунок 1.1 - Схема переестерифікації триацилгліцеридів метанолом

Процес переестерифікації забезпечує ефективне перетворення олій в компоненти, які можуть бути використані як добавки до авіаційних палив. Ця технологія дозволяє знизити викиди шкідливих речовин і підвищити енергетичну ефективність альтернативних палив. Використання біодобавок сприяє зменшенню залежності від традиційних викопних палив і сприяє розвитку екологічно чистих джерел енергії. Подальші дослідження та вдосконалення цього процесу можуть підвищити ефективність виробництва і зменшити витрати, що робить його перспективним для широкого впровадження в авіаційній галузі.

Ключові експерименти з біопаливом:

1) Пальне на основі соєвої олії;

Перші випробування включали змішування традиційного авіаційного гасу з пальним на основі соєвої олії. Це дозволило зменшити об'єм використаного викопного палива, але стикнулося з технічними проблемами, зокрема нестабільністю згоряння та осадженням часток у двигунах.

2) Масло жожоба;

У середині 1980-х років були проведені експерименти із застосуванням масла жожоба, яке мало високу енергетичну щільність. Випробування показали, що цей вид палива підходить для авіаційних двигунів, але його масове виробництво було економічно недоцільним.

3) Ріпакова олія;

У Європі активно проводили дослідження щодо використання ріпакової олії як сировини для виробництва авіаційного палива. Цей варіант показав високий екологічний потенціал, але потребував значної модифікації двигунів[25].

Розвиток водневих технологій.

Водень як джерело енергії для авіації почав розглядатися ще у 1950-х роках. У цей період водень вважався перспективним завдяки своїй високій

енергетичній щільності та екологічності, оскільки продуктом його згоряння є вода.

Ранні експерименти:

Проект "Туполєв-155" (СРСР, 1988):

Радянський Союз здійснив один із перших успішних польотів літака, оснащеного двигуном, що працював на зрідженому водні. Модифікований літак Ту-155 виконав серію тестових польотів, продемонструвавши, що водень може стати ефективним паливом для авіації.

Екологічність і висока енергоємність є перевагами, але високі вимоги до зберігання водню і великі резервуари, які зменшують вантажопідйомність літака, є недоліками.

Проекти NASA у 1970-х–1980-х роках:

NASA також проводила експерименти з використанням водню в авіаційних двигунах, зокрема у великих реактивних літаках. Ці експерименти мали переважно науковий характер і вказували на потенціал водню для зниження викидів CO₂.

Синтетичні палива, отримані шляхом хімічного перетворення викопних або біологічних матеріалів, почали активно розроблятися у 2000-х роках. Технологія Fischer-Tropsch, що використовується для синтезу таких палив, отримала поширення завдяки можливості використовувати різні джерела сировини, включаючи відходи.

Етапи розвитку:

Перші випробування синтетичного палива у військовій авіації розпочалися з армії США, яка була однією з перших, хто протестував його в бойових літаках. Це паливо продемонструвало стабільну роботу двигунів навіть у складних умовах[4]. У 2008 році комерційні авіакомпанії, зокрема Virgin Atlantic, здійснили перші тестові рейси з використанням суміші синтетичного палива та традиційного гасу, що підтвердило технічну можливість застосування таких палив у цивільній авіації. З початку 2010-х років у світі розпочався активний перехід до масштабного використання

альтернативних палив. Біопаливо другого покоління включає палива, отримані з відходів сільськогосподарської та харчової промисловості, що мають менший вплив на навколишнє середовище порівняно з паливом першого покоління. У 2011 році компанія Air France здійснила перший комерційний рейс із використанням біопалива. У 2016 році ICAO впровадила програму CORSIA, яка заохочує використання стійких авіаційних палив для зменшення викидів парникових газів. Компанії, такі як Airbus і Boeing, активно розробляють літаки з гібридними силовими установками, які комбінують традиційні двигуни з електричними. Розвиток технологій дозволив розширити спектр альтернативних палив, включаючи водневі паливні елементи, синтетичні вуглеводневі паливні суміші та інші інноваційні підходи. Ці дослідження стали основою для подальшого розвитку та впровадження нових рішень у сфері авіації. Сучасний етап включає активну роботу над поліпшенням екологічних характеристик авіаційних палив та зменшенням впливу авіації на кліматичні зміни[7].

1.2 Класифікація альтернативних палив для авіації

У сучасній авіаційній галузі використання альтернативних палив є одним із ключових шляхів досягнення сталого розвитку, зниження вуглецевого сліду та зменшення залежності від викопних ресурсів. Альтернативні палива класифікуються залежно від джерела їх походження, способу виробництва, екологічних переваг та технічної сумісності із сучасними авіаційними двигунами. Серед основних категорій альтернативних палив для авіації виділяють біопаливо, водневі паливні елементи та синтетичні вуглеводневі паливні суміші.

Біопаливо для авіації.

Біопаливо — це відновлюваний вид палива, отриманий із біологічної сировини, такої як рослинні масла, відходи сільського господарства,

водорості або навіть тверді побутові відходи. Біопаливо є важливою складовою стійких авіаційних палив (Sustainable Aviation Fuels, SAF), що використовуються для зниження викидів парникових газів[10].

Покоління біопалива

1) Перше покоління:

Перше покоління біопалива виготовляється з харчових культур, таких як ріпак, кукурудза та цукровий буряк. Його виробництво є відносно простим, що робить його доступним варіантом для заміни традиційних викопних палив. Проте, використання харчових культур для виробництва біопалива створює конкуренцію з продовольчим сектором, що може призводити до підвищення цін на харчові продукти. Крім того, вирощування цих культур для біопалива може мати негативний вплив на біорізноманіття, оскільки вимагає великих площ землі, які інакше могли б бути використані для збереження природних екосистем. Варто також зазначити, що використання пестицидів і добрив під час вирощування цих культур може додатково впливати на навколишнє середовище.

2) Друге покоління:

Виготовляється з нехарчової сировини, такої як відходи сільського господарства, лісового господарства або водорості. Це зменшує конкуренцію за ресурси, які можуть бути використані для виробництва продовольства, що робить цей підхід більш екологічно сприятливим. Виробництво біопалива другого покоління також має менший вплив на навколишнє середовище завдяки використанню відновлюваних ресурсів і відходів. Однак, технологія виробництва цього типу біопалива є складною і вимагає значних інвестицій у науково-дослідні розробки та інфраструктуру. Незважаючи на ці виклики, розвиток біопалива другого покоління має потенціал для значного зменшення залежності від викопних палив і зниження викидів парникових газів, що є важливими кроками у боротьбі зі змінами клімату.

3) Третє покоління:

виготовляється з мікроводоростей, які здатні утворювати значну кількість олії. Це біопаливо відрізняється високою продуктивністю і можливістю вирощування у водному середовищі, що робить його перспективним варіантом для виробництва екологічно чистої енергії. Мікроводорості можуть бути вирощені в різних водних умовах, включаючи солону воду, що зменшує конкуренцію за прісну воду. Проте, виробництво біопалива з мікроводоростей має і свої виклики. Це включає високу вартість виробництва та потребу в новітніх технологіях для ефективного вирощування, збору та переробки мікроводоростей в паливо[9]. Додатково, важливим аспектом є енергетична ефективність всього процесу, яка наразі потребує подальших досліджень та удосконалень. Незважаючи на ці недоліки, третє покоління біопалива має великий потенціал для зниження викидів парникових газів і забезпечення сталого розвитку авіаційної галузі.

Технології виробництва біопалива для авіації.

1) Технологія гідроочищення олій та жирів (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids, HEFA):

Найбільш поширений метод, за якого біомасу перетворюють на молекули, подібні до авіаційного гасу.

2) Біогазове перетворення (Fischer-Tropsch):

Процес, який перетворює біомасу в синтетичні рідкі палива за допомогою каталізаторів.

3) Ферментація цукрів:

Використання мікроорганізмів для отримання авіаційного палива з цукрів, що містяться в сировині.

Авіаційне біопаливо має кілька значущих переваг. Перш за все, воно дозволяє значно скоротити викиди CO₂ порівняно з традиційним гасом, що сприяє зменшенню впливу на зміну клімату. Використання відходів сільського господарства та іншої біосировини для виробництва біопалива також знижує навантаження на екосистему, забезпечуючи ефективне

використання ресурсів. Крім того, авіаційне біопаливо є сумісним із сучасними авіаційними двигунами, що дозволяє використовувати його без значних модифікацій обладнання.

Проте, існують і певні недоліки авіаційного біопалива. Висока вартість виробництва є однією з головних перешкод на шляху до його широкого впровадження. Також необхідність розбудови інфраструктури для зберігання та транспортування біопалива вимагає значних інвестицій. Потреба у великих площах для вирощування біосировини може викликати конкуренцію за земельні ресурси, що може впливати на сільськогосподарське виробництво та біорізноманіття. Незважаючи на ці недоліки, розвиток авіаційного біопалива має потенціал для створення більш стійкої та екологічно чистої авіаційної галузі[12].

Водневі паливні елементи.

Водневі паливні елементи (ВПЕ) є перспективною технологією для авіаційної галузі, що може значно знизити вплив авіації на довкілля. ВПЕ генерують електроенергію через електрохімічну реакцію між воднем і киснем, утворюючи воду як єдиний побічний продукт. Це забезпечує безвуглецеве джерело енергії, що є особливо актуальним в контексті глобальних зусиль зі зменшення викидів парникових газів.

Переваги використання водневих паливних елементів в авіації:

Екологічність: ВПЕ не виробляють викидів CO_2 , оксидів азоту чи інших шкідливих речовин, що сприяє зменшенню забруднення атмосфери та боротьбі зі зміною клімату.

Висока енергоефективність: Паливні елементи мають вищий коефіцієнт корисної дії порівняно з традиційними двигунами внутрішнього згоряння, що дозволяє ефективніше використовувати енергію палива.

Зниження шумового забруднення: Електричні двигуни, живлені від ВПЕ, працюють тихіше, що є важливим для зменшення шумового впливу на навколишнє середовище, особливо в районах поблизу аеропортів.

Виклики та недоліки впровадження ВПЕ в авіації:

Зберігання та транспортування водню: Водень має низьку густину енергії в об'ємному вимірі, що вимагає його зберігання під високим тиском або в рідкому стані при наднизьких температурах (-253°C). Це потребує розробки спеціальних резервуарів, які можуть бути важкими та об'ємними, впливаючи на аеродинаміку та вантажопідйомність літаків.

Інфраструктурні обмеження: Для широкомасштабного впровадження водневих технологій необхідно створити глобальну інфраструктуру для виробництва, зберігання, транспортування та заправки воднем, що вимагає значних інвестицій та часу[15].

Вартість виробництва: Хоча водень є найпоширенішим елементом у Всесвіті, його виробництво в чистому вигляді є енергоємним та дорогим процесом, особливо якщо використовувати екологічно чисті методи, такі як електроліз води з використанням відновлюваної енергії.

Безпека: Водень є легкозаймистим газом, що вимагає впровадження додаткових заходів безпеки при його зберіганні та використанні, особливо в авіації, де безпека є пріоритетом.

Сучасні досягнення та перспективи:

Останніми роками спостерігається зростаючий інтерес до водневих технологій в авіації. Компанії, такі як Airbus, оголосили про розробку концепцій літаків на водневих паливних елементах, плануючи їх комерційне впровадження до 2035 року. Дослідження показують, що використання ВПЕ може знизити кліматичний вплив авіації на 75-90% . Крім того, розробляються гібридні системи, що поєднують водневі турбіни та паливні елементи, для досягнення оптимальної ефективності та зниження викидів.

Впровадження водневих паливних елементів в авіації є складним, але перспективним напрямом, який може суттєво змінити майбутнє повітряного транспорту, зробивши його більш екологічним та стійким. Для досягнення цієї мети необхідні подальші дослідження, інновації та співпраця між урядами, науковими установами та промисловістю.

Синтетичні вуглеводневі паливні суміші.

Синтетичні вуглеводневі палива є штучно створеними рідкими енергоносіями, отриманими шляхом хімічного синтезу з різноманітних джерел сировини, таких як природний газ, біомаса або навіть вуглекислий газ, вилучений з атмосфери. Ці палива розроблені для імітації властивостей традиційних нафтопродуктів, забезпечуючи сумісність із сучасними двигунами без необхідності їх модифікації[20].

Одним із провідних методів виробництва синтетичних палив є процес Фішера-Тропша, який передбачає перетворення сировини на синтез-газ — суміш оксиду вуглецю (CO) та водню (H_2). Цей газ потім піддається каталізу, утворюючи рідкі вуглеводні, що можуть бути використані як паливо. Інша технологія, відома як Power-to-Liquid (PtL), використовує відновлювану електроенергію для перетворення вуглекислого газу та водню в рідке паливо, що сприяє зниженню викидів парникових газів.

Серед переваг синтетичних палив варто відзначити їхню екологічність, особливо коли вони виробляються з використанням відновлюваних джерел енергії, що сприяє зменшенню вуглецевого сліду. Крім того, вони повністю сумісні з існуючими авіаційними двигунами, що дозволяє уникнути значних витрат на модернізацію інфраструктури. Різноманітність сировини для їх виробництва, включаючи відходи та промислові гази, розширює можливості їх застосування.

Однак, виробництво синтетичних палив пов'язане з високими витратами, зокрема через енергоємність процесів синтезу та необхідність значних обсягів електроенергії. Крім того, масштабування виробництва вимагає створення спеціалізованих заводів, що може бути складним та дорогим процесом.

В Україні дослідження в галузі альтернативних авіаційних палив активно проводяться, зокрема в Національному авіаційному університеті. Згідно з дисертаційною роботою, присвяченою фізико-хімічним властивостям палив для повітряно-реактивних двигунів, розробка технологій

виробництва авіаційних палив з екологічно безпечної, доступної та відносно дешевої відновлюваної сировини є актуальним напрямом досліджень[31].

Загалом, синтетичні вуглеводневі палива представляють перспективний напрямок розвитку авіаційної енергетики, поєднуючи екологічні переваги з технічною сумісністю, проте потребують подальших досліджень та оптимізації виробничих процесів для подолання існуючих економічних та технологічних викликів.

Синтетичні палива мають значні переваги, які роблять їх перспективними для майбутнього авіації. Однією з ключових переваг є їх сумісність із сучасними авіаційними двигунами. Це означає, що для використання синтетичних палив не потрібно проводити значні модифікації або адаптації існуючих авіаційних двигунів, що значно знижує витрати та час на впровадження. Крім того, синтетичні палива можуть бути дуже екологічними, якщо вони виробляються з використанням поновлюваних джерел енергії, таких як сонячна, вітрова або гідроенергія. Це допомагає значно знизити вуглецевий слід авіаційної галузі, сприяючи боротьбі зі змінами клімату та поліпшенню якості повітря.

Ще однією перевагою синтетичних палив є їхня різноманітність сировини, з якої вони можуть вироблятися. Це включає використання відходів сільського та промислового виробництва, промислових газів і навіть води. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати ресурси і зменшувати відходи, що накопичуються на звалищах і забруднюють навколишнє середовище. Багато джерел вказують на те, що виробництво синтетичних палив може значно зменшити залежність від викопних палив і сприяти сталому розвитку енергетичної системи.

Проте, виробництво синтетичних палив також має свої недоліки. Одним із головних викликів є висока вартість виробництва, що пов'язано з використанням складних і дорогих технологій синтезу. Це вимагає значних інвестицій у науково-дослідні розробки та будівництво виробничих потужностей. Також виробництво синтетичних палив потребує великої

кількості електроенергії, що може стати проблемою в умовах обмежених енергетичних ресурсів. Для вирішення цього питання необхідно забезпечити стабільне та ефективне постачання електроенергії з поновлюваних джерел.

Складність масштабування виробництва синтетичних палив також є важливим фактором, який варто враховувати. Будівництво спеціалізованих заводів для виробництва синтетичних палив вимагає значних фінансових та технологічних ресурсів. Однак, при правильному підході та довгостроковому плануванні ці виклики можуть бути подолані, що відкриває нові перспективи для розвитку авіаційної галузі. Синтетичні палива мають великий потенціал для зниження впливу авіації на навколишнє середовище та забезпечення стійкості енергетичної системи в майбутньому[46].

1.3 Характеристики та властивості альтернативних палив

Розвиток альтернативних палив для авіації зумовлений не лише екологічними викликами, але й потребою підвищити ефективність використання енергії та оптимізувати роботу авіаційних двигунів. Розуміння ключових характеристик і властивостей альтернативних палив дозволяє оцінити їхній потенціал у досягненні енергетичної незалежності галузі, зменшенні викидів та підвищенні технічної продуктивності. У цьому розділі розглянуто енергетичну ефективність, вплив на продуктивність двигунів, екологічні переваги та недоліки, а також додаткові аспекти, такі як стабільність палива, логістика та доступність ресурсів.

Енергетична ефективність є ключовою характеристикою, яка визначає здатність палива забезпечувати необхідний рівень потужності для двигунів при мінімальному обсязі споживання. У порівнянні з традиційним авіаційним гасом (Jet A-1), альтернативні палива мають різну енергоємність, що впливає на дальність польотів, витрати палива та загальну ефективність експлуатації повітряних суден.

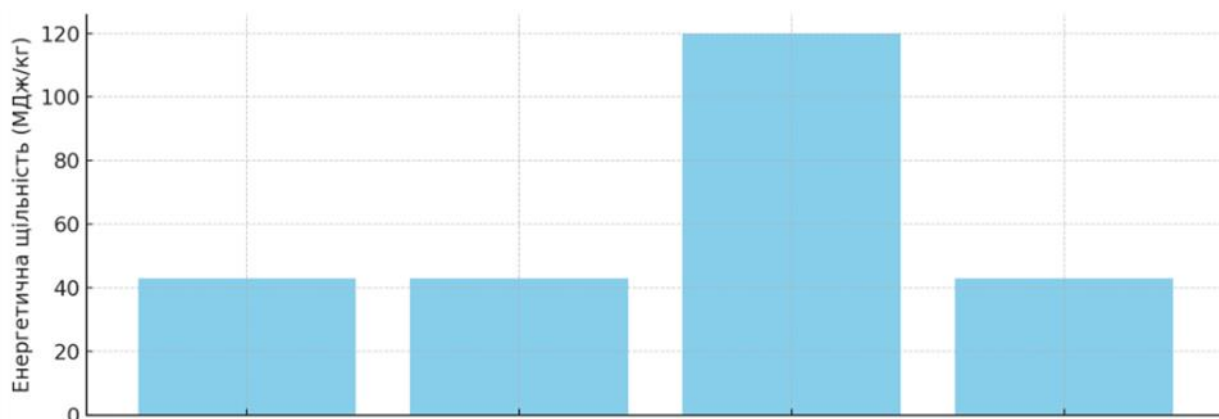


Рисунок 1.2 – Енергетична щільність альтернативних палив

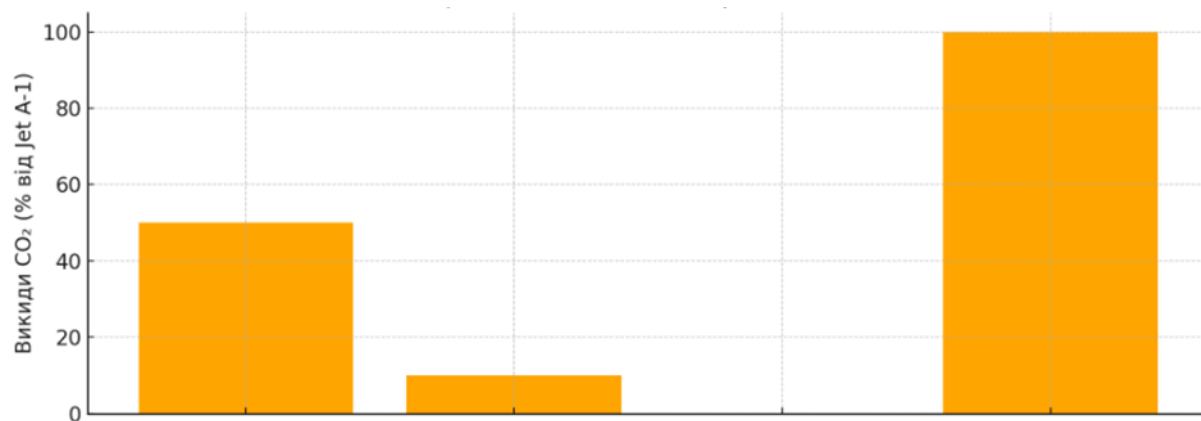


Рисунок 1.3 – Порівняння викидів CO₂ різних палив

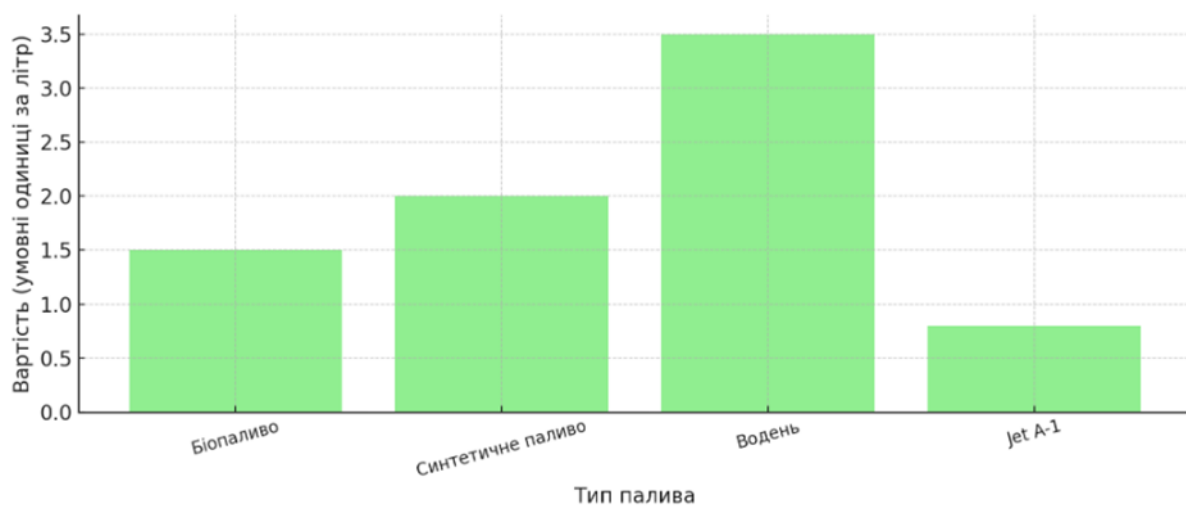


Рисунок 1.4 – Вартість виробництва альтернативних палив

Графіки демонструють порівняння ключових характеристик різних видів палив для авіації: біопалива, синтетичних палив, водню та традиційного Jet A-1[40].

Щільність енергії (енергетична щільність):

Традиційний гас має високу енергоємність (~43 МДж/кг), що робить його ідеальним паливом для авіації. Для порівняння, біопалива другого покоління, отримані за технологією HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids), мають майже ідентичну енергетичну щільність, що забезпечує схожі показники дальності польотів.

Водень, попри свою високу масову енергоємність (~120 МДж/кг), має низьку об'ємну енергоємність, що потребує великих резервуарів для зберігання. Це є обмеженням для літаків, що працюють на водні.

Ефективність згоряння:

Альтернативні палива, зокрема синтетичні, мають стабільніше згоряння, що сприяє більш рівномірному створенню тяги та зниженню витрат палива. Технологія Fischer-Tropsch, наприклад, дозволяє отримувати синтетичне паливо з високим рівнем чистоти, що мінімізує утворення побічних продуктів під час згоряння.

Вплив на питому витрату палива:

Питома витрата палива визначає, скільки палива потрібно для забезпечення одиниці енергії. Біопаливо та синтетичні палива демонструють конкурентоспроможність із традиційним гасом, тоді як водень, через свою низьку об'ємну щільність, потребує значно більше об'єму для зберігання та транспортування.

Використання альтернативних палив у повітряних суднах є одним із найважливіших напрямків модернізації авіаційної галузі. Однією з ключових сфер, де нові види палива можуть суттєво змінити існуючі практики, є вплив на продуктивність двигунів. Продуктивність двигунів визначається низкою факторів, таких як стабільність згоряння, рівень тяги, температура згоряння, утворення відкладень у камерах згоряння, тривалість експлуатації

компонентів двигуна та екологічний вплив. У цьому розділі розглянемо детальний вплив різних типів альтернативних палив, включаючи біопаливо, водень та синтетичні палива, на роботу авіаційних двигунів.

Енергетична ефективність.

Біопаливо, яке виробляється з рослинної або тваринної сировини, має різні характеристики порівняно з традиційним авіаційним паливом. Однією з основних переваг біопалива є його відновлюваність, що забезпечує сталість поставок у довгостроковій перспективі. Проте, енергетична щільність біопалива може бути нижчою за традиційне паливо, що впливає на продуктивність двигунів.

Біопаливо забезпечує стабільне згоряння завдяки меншому вмісту сірки та ароматичних вуглеводнів, що сприяє зниженню утворення відкладень у камерах згоряння. Це покращує ефективність двигунів, знижує витрати на технічне обслуговування та продовжує термін служби лопаток турбін.

Під час згоряння біопалива утворюється значно менше сажі, що зменшує забруднення повітря та знижує ймовірність формування висотних інверсійних слідів. Однак деякі типи біопалива мають нижчий рівень енергетичної щільності, що може потребувати підвищеної витрати палива для досягнення необхідної тяги[39].

Авіакомпанії, такі як Lufthansa, здійснили успішні тестові польоти, використовуючи суміш біопалива з традиційним гасом (до 50% біопалива). Результати показали, що продуктивність двигунів залишалася стабільною, а витрати палива та рівень тяги не змінювалися.

Водень має високу енергетичну щільність на одиницю маси, що робить його привабливим варіантом для використання в авіаційних двигунах. Водневі паливні елементи, які перетворюють хімічну енергію водню в електричну, забезпечують високий рівень енергоефективності та низькі викиди шкідливих речовин. Проте, зберігання та транспортування водню потребує спеціальних умов, що може ускладнити його використання.

Водень також має вищу температуру згоряння порівняно з традиційним гасом, що підвищує ефективність двигунів, але може спричиняти більший знос компонентів, зокрема турбінних лопатей.

З переваг, водень забезпечує швидке та чисте згоряння, що мінімізує утворення сажі та відкладень у двигуні.

Підвищена ефективність згоряння сприяє зменшенню витрати палива на одиницю тяги, хоча для літаків великої дальності потрібна адаптація конструкції для зберігання великих обсягів водню.

Як недолік, для роботи на водні потрібні спеціально розроблені двигуни або паливні елементи. Останні використовують водень для вироблення електроенергії, що живить електродвигуни. Такі системи забезпечують низький рівень шуму та високу продуктивність, але потребують масштабної перебудови аеродинамічної структури літаків.

В результаті, модифікований літак Ту-155, розроблений у СРСР, виконав серію успішних польотів на зрідженому водні. Дослідження показали стабільну роботу двигуна, проте були виявлені проблеми з ефективним використанням водню в умовах низьких температур.

Синтетичні вуглеводневі паливні суміші.

Синтетичні паливні суміші виробляються з використанням хімічних процесів, які дозволяють отримувати паливо з низьким вмістом викидів. Такі суміші можуть мати подібні характеристики до традиційного авіаційного палива, забезпечуючи високу енергетичну ефективність і сумісність з існуючими авіадвигунами. Вони також можуть бути вироблені з відновлюваних джерел, що робить їх екологічно більш прийнятними.

Теплотворна здатність: синтетичні палива мають теплотворну здатність, еквівалентну Jet A-1, що дозволяє використовувати їх у комерційній авіації без потреби у модифікації двигунів.

Знос компонентів: відсутність домішок, таких як сірка, сприяє зниженню корозії та термічного навантаження на компоненти двигуна. Це подовжує термін служби турбінних лопатей та інших деталей[1].

Експлуатаційні переваги: авіакомпанії, такі як Virgin Atlantic, вже успішно використовують синтетичні палива в суміші з традиційним гасом. Під час тестових польотів було зафіксовано стабільну роботу двигунів та зниження викидів CO₂.

Вплив на робочі характеристики двигунів.

Залежно від типу палива, робочі характеристики двигунів можуть змінюватися. Біопаливо, наприклад, може мати трохи нижчу теплотворну здатність порівняно з традиційним паливом, що впливає на потужність двигунів. Проте, деякі типи біопалива можуть покращити змащувальні властивості, що знижує знос двигунів і підвищує їхню економічність.

Водневі паливні елементи забезпечують високий рівень потужності та ефективності завдяки високій енергетичній щільності водню. Однак, зберігання водню в рідкому або стисненому стані вимагає додаткових витрат енергії та ресурсів, що може вплинути на загальну економічність.

Синтетичні паливні суміші можуть забезпечувати стабільну потужність двигунів, аналогічну до традиційного палива. Вони також мають потенціал для підвищення економічності завдяки зниженню викидів та можливості використання відновлюваних ресурсів для їхнього виробництва.

Температурний режим та знос деталей.

Використання різних видів палива може впливати на температурний режим роботи двигунів. Біопаливо, наприклад, може мати нижчу температуру займання, що зменшує ризик утворення нагару на внутрішніх поверхнях двигуна. Це може знизити знос деталей і продовжити термін служби двигунів[8].

Водень має високу енергоємність, але його використання може призвести до підвищених температур згоряння, що вимагає спеціальних матеріалів та технологій для забезпечення довговічності двигунів. Тому дослідження водневих паливних елементів зосереджені на створенні стійких до високих температур матеріалів.

Синтетичні паливні суміші можуть бути адаптовані для досягнення оптимальних температурних режимів згоряння. Вони можуть включати добавки, що знижують температуру займання та забезпечують більш рівномірне згоряння, що позитивно впливає на знос деталей та загальну продуктивність двигунів.

Викиди шкідливих речовин.

Однією з основних причин переходу на альтернативні види палива є зменшення викидів шкідливих речовин. Біопаливо може знизити викиди CO₂, оскільки рослини, які використовуються для його виробництва, поглинають вуглекислий газ з атмосфери під час росту. Однак, залежно від типу біопалива, можуть утворюватись інші шкідливі речовини, такі як NO_x та PM.

Водневі паливні елементи виробляють воду як єдиний продукт побічної реакції, що робить їх екологічно чистим видом палива. Проте, виробництво водню з викопних джерел може генерувати викиди CO₂, тому важливо розвивати методи отримання водню з відновлюваних джерел.

Синтетичні паливні суміші можуть забезпечувати низький рівень викидів шкідливих речовин завдяки своїй чистій хімічній структурі. Вони можуть включати спеціальні добавки, які зменшують утворення NO_x та інших шкідливих речовин під час згоряння.

Технологічні виклики.

Основні технологічні виклики, пов'язані з використанням альтернативних палив, включають необхідність модифікації двигунів для роботи з новими видами палива, розробку нових матеріалів для стійкості до високих температур та корозії, а також забезпечення безпеки зберігання та транспортування палива[13].

Висока вартість виробництва альтернативних палив та необхідність інвестицій у нову інфраструктуру можуть бути серйозними економічними бар'єрами. Проте, розвиток технологій та збільшення масштабів виробництва можуть знизити ці витрати у майбутньому.

Розвиток альтернативних палив має значний потенціал для підвищення ефективності та екологічності авіаційних операцій. Подальші дослідження та інновації у сфері виробництва, зберігання та використання альтернативних палив можуть сприяти їхньому широкому впровадженню та зниженню негативного впливу авіації на навколишнє середовище.

Таким чином, використання альтернативних палив у повітряних суднах має значний вплив на продуктивність двигунів, забезпечуючи їхню високу енергоефективність, покращення робочих характеристик та зниження екологічного впливу. Проте, для реалізації повного потенціалу цих палив необхідно подолати ряд технологічних та економічних викликів.

Загальні аспекти впливу альтернативних палив на двигуни.

1. Модифікації двигунів:

Біопалива та синтетичні палива є майже повністю сумісними з існуючими двигунами, тоді як водневі системи потребують істотної адаптації.

2. Зниження шуму:

Електричні двигуни, живлені від водневих паливних елементів, працюють тихіше, що є важливим для екологічного та соціального комфорту.

3. Технічне обслуговування:

Альтернативні палива знижують частоту проведення технічних оглядів завдяки чистоті згорання та зменшенню утворення відкладень.

4. Використання у гібридних системах:

Двигуни, які поєднують традиційні та альтернативні палива, демонструють кращі показники продуктивності, особливо для літаків середньої дальності.

Висновки до розділу 1

Ідея застосування альтернативних палив у авіації набула актуальності через необхідність зменшити залежність від викопних джерел енергії, підвищити екологічну чистоту та забезпечити стабільність поставок палива. Перші дослідження в цій сфері розпочалися в середині XX століття, коли стало очевидним, що традиційні нафтові ресурси обмежені, а їх використання супроводжується значними викидами парникових газів. Початкові дослідження альтернативних джерел енергії, таких як біопаливо, водневі паливні елементи та синтетичні вуглеводневі паливні суміші, показали, що ці джерела можуть бути ефективними та екологічно чистими, хоча потребують додаткових досліджень та вдосконалення технологій.

Перші експерименти з альтернативними паливами почалися у 1980-х роках. Значним досягненням стало використання біопалива на комерційному рейсі Boeing 747 у 2008 році компанією Virgin Atlantic, що продемонструвало його ефективність як заміну традиційному авіаційному паливу без значних змін у конструкції двигуна. У 2009 році компанія Boeing успішно випробувала літак з водневими паливними елементами, підтвердивши високу ефективність та низькі викиди цього палива. У 2016 році Lufthansa провела випробування літака на синтетичному авіаційному паливі, що також підтвердило його високу ефективність та екологічність.

Класифікація альтернативних палив включає біопаливо, водневі паливні елементи та синтетичні вуглеводневі паливні суміші. Біопаливо виготовляється з рослинної та тваринної сировини, включаючи відходи агропромислового комплексу, і має переваги у вигляді відновлюваності та зниження викидів CO₂. Водневі паливні елементи генерують електроенергію через хімічну реакцію між воднем та киснем, утворюючи воду як єдиний побічний продукт, і відрізняються високою теплотворною здатністю, але потребують спеціальних умов для зберігання та транспортування. Синтетичні вуглеводневі паливні суміші створюються шляхом хімічних

процесів, що використовують вуглекислий газ та водень для синтезу палив з низьким вмістом викидів, і забезпечують високу енергетичну ефективність та сумісність з існуючими авіадвигунами.

Альтернативні палива мають низку характеристик та властивостей. Енергетична ефективність є важливим фактором: традиційне авіаційне паливо має високу теплотворну здатність (близько 43 МДж/кг), що забезпечує високу продуктивність двигунів. Біопаливо має нижчу енергетичну щільність, але достатню для використання в авіації. Водень володіє дуже високою теплотворною здатністю (понад 120 МДж/кг), що робить його привабливим варіантом для авіадвигунів, а синтетичні паливні суміші можуть мати характеристики, подібні до традиційного палива.

Використання різних видів палива впливає на робочі характеристики авіадвигунів. Біопаливо може мати трохи нижчу теплотворну здатність, що знижує потужність двигунів, але покращує змашувальні властивості та зменшує знос деталей. Водневі паливні елементи забезпечують високу потужність та ефективність завдяки високій енергетичній щільності водню. Синтетичні паливні суміші можуть забезпечувати стабільну потужність двигунів та високу паливну економічність[25].

Основною перевагою альтернативних палив є їхній низький екологічний вплив порівняно з традиційним авіаційним паливом. Біопаливо знижує викиди CO₂ завдяки поглинанню вуглекислого газу під час росту рослин. Водневі паливні елементи виробляють тільки воду як побічний продукт, що робить їх екологічно чистим джерелом енергії. Синтетичні паливні суміші можуть забезпечувати низький рівень викидів шкідливих речовин завдяки своїй чистій хімічній структурі. Проте, виробництво та транспортування деяких видів альтернативних палив може супроводжуватися викидами CO₂, залежно від джерел енергії, що використовуються у процесі.

Загалом, розвиток та впровадження альтернативних палив в авіації є важливим кроком до зменшення залежності від викопних ресурсів та

зниження негативного впливу на навколишнє середовище. Біопаливо, водневі паливні елементи та синтетичні вуглеводневі паливні суміші мають потенціал для підвищення ефективності та екологічної чистоти авіаційної галузі, але потребують вирішення технологічних та економічних викликів. Подальші дослідження та інновації у цій сфері сприятимуть зниженню негативного впливу авіації на клімат та забезпеченню сталого розвитку галузі.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ В ПОВІТРЯНИХ СУДНАХ

Аналіз ефективності використання альтернативних палив в повітряних суднах показує, що такі палива можуть значно скоротити викиди парникових газів і зменшити залежність від викопних палив. Зокрема, біопаливо та синтетичні палива демонструють високу екологічність, сумісність із сучасними авіаційними двигунами та можливість використання відновлюваних ресурсів, таких як відходи або мікроводорості. Однак, висока вартість виробництва, складність технологій синтезу та необхідність розбудови відповідної інфраструктури залишаються викликами, що потребують подальших інвестицій і досліджень. Переваги в довгостроковій перспективі, включаючи зменшення екологічного впливу та забезпечення сталого розвитку авіаційної галузі, роблять ці альтернативи вартими уваги та розвитку.

2.1 Методи оцінки ефективності використання альтернативних палив

Оцінка ефективності використання альтернативних палив у повітряних суднах є багатогранним процесом, що враховує різні показники. Основні методи оцінки включають:

Аналіз витрати палива: Визначення кількості палива, спожитого двигуном за певний час або відстань, дозволяє оцінити економічну доцільність використання альтернативного палива. Для цього використовуються як експериментальні методи, так і математичне моделювання.

Вимірювання викидів шкідливих речовин: Оцінка екологічної ефективності палива проводиться шляхом аналізу викидів CO₂, NO_x та інших забруднювачів. Зменшення викидів є ключовим фактором при виборі альтернативного палива.

Аналіз фізико-хімічних властивостей: Дослідження таких параметрів, як густина, теплота згоряння, цетанове число та низькотемпературні властивості, допомагає визначити придатність палива для авіаційних двигунів.

Оцінка впливу на двигун та систему паливостачання: Вивчення сумісності палива з матеріалами та компонентами двигуна, а також його вплив на знос і надійність систем.

Економічний аналіз: Порівняння вартості виробництва та постачання альтернативного палива з традиційним, а також оцінка потенційної економії.

Аналіз життєвого циклу (LCA): Оцінка загального впливу палива на довкілля протягом усього його життєвого циклу — від виробництва до утилізації.

Для наочності можна представити порівняльну таблицю, що відображає основні показники ефективності різних альтернативних палив:

Таблиця 2.1 - основні показники ефективності палив

Показник	Традиційне паливо	Біокеросин (BIOJET)	Біопаливо з відходів
Витрата палива	Базова	+10-30% економії	Дані відсутні
Викиди CO ₂	Високі	Знижені на 90%	Знижені на 90%
Фізико-хімічні властивості	Стандартні	Подібні	Подібні
Вплив на двигун	Нейтральний	Позитивний	Потребує досліджень
Вартість	Залежить від ринку	Вища	Невідома
Екологічний вплив (LCA)	Високий	Низький	Низький

Примітка: Дані в таблиці є узагальненими та можуть варіюватися залежно від конкретних умов та технологій.

Використання альтернативних палив, таких як біокеросин з рослинних компонентів, може зменшити споживання нафтової сировини на 10–30% та знизити техногенне навантаження на довкілля.

Аналіз ефективності використання альтернативних палив у повітряних суднах є складним багатогранним процесом, який включає різні методи досліджень і випробувань. Для забезпечення достовірної оцінки ефективності нових видів палив у авіації використовують два основні підходи: лабораторні дослідження та випробування на реальних повітряних суднах. Кожен із цих методів має свої особливості, переваги та обмеження, що дозволяють комплексно оцінити вплив альтернативного палива на технічні, економічні та екологічні аспекти авіаційної діяльності[16].

З метою оцінки можливості використання біопалив як альтернативи нафтовим авіаційним паливам, було проведено дослідження якості зразків біопалив з різним вмістом біодобавок та порівняння їх з вимогами стандартів якості нафтових палив. В ході дослідження були вивчені зразки біопалив, що містили нафтове паливо для ПРД(прямоточний реактивний двигун) марки Jet A-1 з додаванням 10 %, 20 % та 30 % біодобавок ріпакової олії та ріжєвої олії. Крім того, було проаналізовано якість нафтового палива для ПРД марки Jet A-1 без біодобавок.

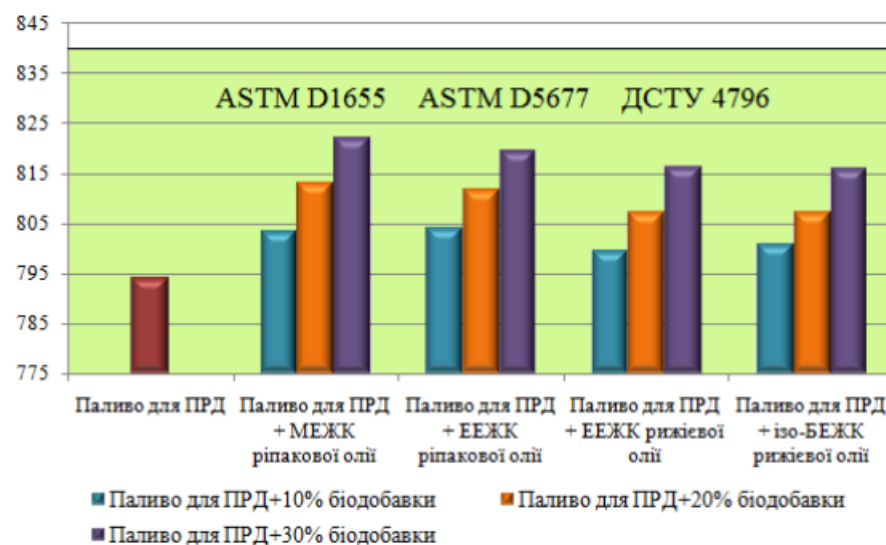


Рисунок 2.1 - Відповідність зразків авіаційних біопалив для ПРД з вмістом біодобавок вимогам стандартів на паливо марки Jet A-1

Лабораторні дослідження є початковим етапом оцінки властивостей і характеристик альтернативного палива. У спеціалізованих лабораторіях проводяться детальні експерименти з вивчення фізико-хімічних властивостей палива, таких як теплотворна здатність, в'язкість, температурні межі зберігання, точка спалаху, щільність та схильність до окислення. Ці показники дозволяють зрозуміти, наскільки нове паливо відповідає існуючим стандартам для авіації, наприклад, вимогам ASTM D7566 для синтетичних палив або нормам ICAO для стійких авіаційних палив.

Лабораторні випробування також включають моделювання процесу згоряння альтернативного палива в умовах, що максимально наближені до реальної роботи авіаційних двигунів. Для цього використовуються стенди, що імітують роботу камери згоряння турбореактивного двигуна. На цих стендах вимірюються показники теплотворної здатності, ефективності згоряння, рівня утворення відкладень і викидів (CO_2 , NO_x , сажі). Зокрема, для біопалив другого покоління проводяться дослідження щодо чистоти згоряння, оскільки ці палива мають низький вміст сірки, що сприяє зниженню утворення відкладень у камерах згоряння.

Окремою частиною лабораторних досліджень є аналіз взаємодії палива з матеріалами, які використовуються в авіаційних двигунах та системах зберігання. Це необхідно для оцінки корозійного впливу, стабільності палива під час тривалого зберігання, а також його поведінки при низьких температурах, що характерні для польотів на великих висотах. Наприклад, біопалива можуть потребувати додаткових домішок для покращення морозостійкості, а водень, через низьку температуру кипіння (-253°C), потребує спеціальних рішень для зберігання[4].

Після завершення лабораторних досліджень проводяться випробування на реальних повітряних суднах, які є критично важливим етапом для підтвердження результатів, отриманих у лабораторних умовах. У реальних польотах оцінюється вплив альтернативного палива на продуктивність

двигунів, витрату палива, стабільність роботи бортових систем, а також реальний вплив на викиди шкідливих речовин.

Для тестових польотів використовуються як модифіковані, так і стандартні літаки. Наприклад, компанії Boeing та Airbus проводили випробування біопалива другого покоління на своїх комерційних моделях, таких як Boeing 787 та Airbus A350. Літаки заправляли сумішшю традиційного авіаційного гасу та біопалива (зазвичай у пропорції 50/50) для аналізу продуктивності двигунів, а також перевірки сумісності нового палива із системами зберігання та подачі палива.

Під час польотів збираються дані про рівень тяги, витрату палива, зміну температури згоряння та рівень викидів. Зокрема, випробування водню як палива в модифікованих літаках, таких як радянський Ту-155, продемонстрували можливість використання цього палива для зменшення викидів CO₂, хоча високі температури згоряння вимагали розробки нових систем охолодження[14].

Реальні польоти також дозволяють оцінити вплив альтернативного палива на логістичні процеси, такі як заправка, транспортування та зберігання. Для синтетичних палив, наприклад, перевіряється їх сумісність із наявною інфраструктурою аеропортів, що значно спрощує їх впровадження. Натомість використання водню потребує розробки нової інфраструктури, зокрема кріогенних систем зберігання.

Випробування на реальних суднах дають змогу оцінити не лише технічні аспекти, але й операційні витрати. Наприклад, авіакомпанія Lufthansa виявила, що використання біопалива дозволяє зменшити витрати на технічне обслуговування двигунів завдяки зниженню утворення відкладень.

Таким чином, аналіз ефективності використання альтернативних палив у повітряних суднах базується на двох взаємопов'язаних методах: лабораторних дослідженнях, що дозволяють визначити фізико-хімічні властивості палива та моделювати процес його використання, та

випробуваннях на реальних літаках, які підтверджують лабораторні результати в умовах експлуатації. Поєднання цих методів забезпечує всебічну оцінку ефективності нових видів палива, сприяючи їхньому впровадженню в авіаційну галузь.

Оцінити ефективність використання альтернативних палив в авіації можна розписати на наступні методи:

1) Лабораторні дослідження

Лабораторні дослідження є першим і дуже важливим етапом в оцінці альтернативних палив. Вони проводяться в контрольованих умовах і дозволяють отримати детальні дані про фізико-хімічні властивості палив, їх сумісність з матеріалами двигунів, а також емісійні характеристики.

1.1) Аналіз фізико-хімічних властивостей: Першим етапом лабораторних досліджень є визначення основних фізико-хімічних властивостей палива, таких як щільність, в'язкість, теплотворна здатність, температура займання, склад та інші параметри. Ці дані дозволяють зрозуміти, як паливо буде поводитись в умовах реальної експлуатації.

1.2) Сумісність з матеріалами: Важливим аспектом є дослідження впливу альтернативного палива на матеріали, які використовуються в конструкції двигунів. Це включає аналіз корозійної стійкості, розчинення полімерів, знос деталей та інших матеріалознавчих аспектів.

1.3) Оцінка емісії: Лабораторні дослідження також дозволяють визначити викиди шкідливих речовин при згорянні палива. Використання спеціалізованих тестових стендів дозволяє змодельовати процес згоряння і виміряти викиди CO₂, NO_x, CO, твердих частинок та інших забруднюючих речовин.

1.4) Енергоефективність та ефективність згоряння: Лабораторні випробування також включають оцінку ефективності згоряння та енергоефективності палива. Використання модельних камер згоряння та інших пристроїв дозволяє визначити, наскільки ефективно нове паливо згоряє у порівнянні з традиційними видами палива.

2) Випробування на реальних повітряних суднах

Після успішного завершення лабораторних досліджень альтернативні палива тестуються на реальних повітряних суднах. Це дозволяє перевірити результати лабораторних досліджень у реальних умовах експлуатації і оцінити вплив палива на продуктивність та безпеку польотів.

2.1) Наземні випробування: Першим етапом практичних випробувань є наземні випробування, під час яких паливо тестується на двигунах в умовах, максимально наближених до реальних польотів. Це включає запуск і роботу двигунів на різних режимах, оцінку поведінки палива під час зльоту, круїзу та посадки.

2.2) Льотні випробування: Після наземних випробувань альтернативні палива тестуються під час реальних польотів. Це дозволяє оцінити продуктивність двигунів, паливну економічність, стабільність роботи двигунів та інші параметри в умовах реальної експлуатації. Льотні випробування також включають моніторинг викидів шкідливих речовин, щоб оцінити екологічний вплив палива.

3) Техніко-економічне обґрунтування

Техніко-економічне обґрунтування включає аналіз витрат на виробництво, транспортування та використання альтернативних палив, а також оцінку економічної ефективності їхнього впровадження.

3.1) Аналіз витрат: Визначення вартості виробництва альтернативних палив, враховуючи витрати на сировину, процеси переробки та транспортування. Це дозволяє оцінити фінансову доцільність використання нового палива.

3.2) Оцінка економічної ефективності: Аналіз економічної ефективності включає порівняння витрат на традиційне та альтернативне паливо, а також оцінку потенційних економічних переваг, таких як зниження витрат на паливо, покращення паливної економічності та зниження екологічних платежів.

4) Екологічна оцінка

Оцінка екологічних властивостей альтернативних палив включає аналіз впливу палива на навколишнє середовище.

4.1) Оцінка викидів: Аналіз викидів CO₂, NO_x, CO та інших забруднюючих речовин під час згоряння альтернативного палива. Це дозволяє оцінити, наскільки екологічно чистим є нове паливо у порівнянні з традиційними видами палива.

4.2) Аналіз життєвого циклу: Оцінка впливу альтернативного палива на навколишнє середовище протягом усього життєвого циклу, від видобутку сировини до утилізації відходів. Це включає аналіз вуглецевого сліду та інших екологічних показників.

5) Інноваційні дослідження та перспективи

Важливим аспектом оцінки ефективності альтернативних палив є дослідження новітніх технологій та перспектив їхнього використання.

5.1) Розробка нових технологій: Дослідження нових методів виробництва та використання альтернативних палив, таких як водневі паливні елементи, синтетичні вуглеводневі суміші та інші інноваційні рішення.

5.2) Перспективи впровадження: Аналіз перспектив впровадження альтернативних палив у масову експлуатацію, враховуючи технологічні, економічні та екологічні аспекти. Це включає визначення можливостей та обмежень для широкого використання нових видів палива у авіаційній галузі.

Випробування альтернативних видів палива на реальних повітряних суднах є важливим етапом в оцінці їхньої ефективності та безпеки. Цей процес дозволяє перевірити результати лабораторних досліджень у реальних умовах експлуатації та отримати точні дані про вплив альтернативних палив на продуктивність двигунів, паливну економічність, викиди шкідливих речовин та загальну безпеку польотів. Ось детальний опис процесу випробувань альтернативних видів палива на реальних повітряних суднах[39].

Підготовка до випробувань починається з вибору відповідного повітряного судна та двигунів, які будуть використовуватися для тестування. Вибране судно повинно бути в хорошому технічному стані і мати можливість працювати на різних типах палива. Крім того, важливо провести попередню оцінку сумісності альтернативного палива з матеріалами та компонентами двигуна, щоб уникнути пошкоджень під час випробувань.

Наземні випробування є першим етапом практичних випробувань і проводяться на землі в умовах, максимально наближених до реальних польотів. Цей етап дозволяє виявити потенційні проблеми та отримати початкові дані про поведінку альтернативного палива у двигунах.

Запуск і робота двигунів: Під час наземних випробувань двигуни повітряного судна запускаються і працюють на різних режимах, включаючи холостий хід, злітний режим, круїзний режим та режим посадки. Це дозволяє оцінити стабільність роботи двигунів, ефективність згоряння палива та температурний режим.

Оцінка викидів: Використання спеціалізованого обладнання для моніторингу викидів шкідливих речовин під час роботи двигунів. Це включає вимірювання викидів CO_2 , NO_x , CO , твердих частинок та інших забруднюючих речовин. Наземні випробування дозволяють отримати точні дані про екологічний вплив використання альтернативного палива[50].

Аналіз економічності: Наземні випробування також дозволяють оцінити паливну економічність, тобто кількість палива, що витрачається на певну відстань або час роботи двигунів. Це важливий параметр для визначення доцільності використання нового палива в комерційних польотах.

Після успішного завершення наземних випробувань наступним етапом є льотні випробування, які проводяться під час реальних польотів. Це дозволяє оцінити вплив альтернативного палива на роботу повітряного судна в умовах реальної експлуатації.

Планування польотів: Льотні випробування починаються з розробки детального плану польотів, який включає вибір маршрутів, аеродромів для

зльоту та посадки, а також визначення тривалості та висоти польотів. Важливо, щоб польоти були максимально наближеними до реальних комерційних операцій.

Проведення льотних випробувань: Під час льотних випробувань повітряне судно виконує заплановані польоти на альтернативному паливі. Це дозволяє оцінити продуктивність двигунів, паливну економічність, стабільність роботи двигунів та інші параметри в умовах реальної експлуатації. Під час польотів проводиться моніторинг температурних режимів, тиску палива, споживання палива та інших критично важливих параметрів.

Моніторинг викидів: Під час льотних випробувань проводиться моніторинг викидів шкідливих речовин, таких як CO₂, NO_x, CO та твердих частинок. Це дозволяє отримати точні дані щодо екологічного впливу альтернативного палива в умовах реальної експлуатації.

Після завершення льотних випробувань проводиться детальний аналіз зібраних даних для оцінки ефективності використання альтернативного палива.

Оцінка продуктивності двигунів: Аналіз продуктивності двигунів включає порівняння потужності, ефективності згоряння та паливної економічності при використанні альтернативного палива та традиційного авіаційного палива. Це дозволяє визначити, наскільки ефективним є нове паливо у порівнянні з традиційним.

Оцінка екологічного впливу: Аналіз даних щодо викидів шкідливих речовин дозволяє оцінити екологічний вплив використання альтернативного палива. Це включає порівняння рівнів викидів CO₂, NO_x, CO та інших забруднюючих речовин з традиційним паливом.

Економічний аналіз: Аналіз витрат на використання альтернативного палива включає розрахунок вартості виробництва, транспортування та зберігання палива, а також порівняння цих витрат з витратами на традиційне

паливо. Це дозволяє визначити економічну доцільність використання альтернативного палива в комерційних операціях.

2.2 Порівняльний аналіз ефективності різних типів альтернативних палив

Біопаливо та традиційне авіаційне паливо.

Розглядаючи сучасні тенденції в авіаційній галузі, використання біопалива як альтернативи традиційному авіаційному паливу (Jet A-1) стає все більш актуальним. Порівняння цих двох видів палив потребує оцінки їхніх фізико-хімічних властивостей, впливу на двигуни, екологічної ефективності, економічної доцільності та логістичних можливостей. Ключовими аспектами такого аналізу є порівняння енергетичної ефективності, сумісності з авіаційною інфраструктурою, впливу на технічне обслуговування літаків і довкілля.

Фізико-хімічні властивості та енергетична ефективність.

Традиційне авіаційне паливо (Jet A-1):

Традиційне авіаційне паливо є нафтовим продуктом, що має високу енергетичну щільність (~43 МДж/кг). Воно добре підходить для авіації завдяки оптимальним властивостям згоряння, морозостійкості та стабільності під час зберігання. Його використання забезпечує високу дальність польотів і стабільну роботу двигунів.

Біопаливо:

Біопалива, зокрема другого покоління (наприклад, отримані за технологією HEFA), мають теплотворну здатність, близьку до традиційного палива. Це дозволяє забезпечувати аналогічні параметри згоряння та тяги. Проте біопалива можуть мати інші фізико-хімічні властивості, такі як нижча в'язкість або точка спалаху, що іноді вимагає адаптації систем подачі палива.

Порівняння:

Біопаливо забезпечує схожу енергетичну ефективність із Jet A-1. Однак його використання може потребувати незначних модифікацій у роботі паливних систем через деякі відмінності у властивостях. Водночас чистота біопалива сприяє кращому згорянню, що компенсує ці відмінності.

Вплив на роботу двигунів.

Традиційне авіаційне паливо:

Jet A-1 забезпечує стабільну роботу двигунів завдяки збалансованим характеристикам згорання. Проте через вміст сірки та інших домішок воно спричиняє утворення відкладень у камерах згорання та корозію турбінних лопатей, що знижує довговічність компонентів двигунів.

Біопаливо:

Однією з ключових переваг біопалива є його чистота. Біопалива другого покоління містять мінімальну кількість сірки, що знижує корозійне навантаження на компоненти двигунів. Також вони продукують менше сажі під час згорання, що зменшує потребу в очищенні турбін. Однак у деяких випадках біопаливо може спричиняти нижчу температуру згорання, що впливає на оптимальну роботу двигунів, особливо на великих висотах.

Порівняння:

Біопаливо позитивно впливає на стан двигунів, зменшуючи утворення відкладень і зношування компонентів. Це дозволяє зменшити витрати на технічне обслуговування. Однак для забезпечення стабільної роботи на великих висотах може знадобитися ретельний аналіз сумішей біопалива з традиційним гасом.

Екологічна ефективність.

Традиційне авіаційне паливо:

Jet A-1 є викопним паливом, що виділяє значні обсяги CO_2 , NO_x і твердих часток під час згорання. Ці викиди сприяють глобальному потеплінню та забрудненню атмосфери.

Біопаливо:

Біопалива мають значно нижчий вуглецевий слід, оскільки CO_2 , що виділяється під час згоряння, компенсується поглинанням цього газу під час вирощування сировини. Залежно від типу біопалива, викиди CO_2 можуть знижуватися на 50–80% порівняно з Jet A-1. Крім того, біопалива утворюють менше сажі, що сприяє зменшенню висотних інверсійних слідів.

Порівняння:

Екологічна перевага біопалива є очевидною. Завдяки відновлюваній природі та зменшенню викидів CO_2 і сажі, біопалива значно перевершують традиційне паливо з точки зору екологічності.

Економічна доцільність.

Традиційне авіаційне паливо:

Jet A-1 є більш доступним через наявність розвиненої глобальної інфраструктури для його виробництва, транспортування та зберігання. Його виробництво є значно дешевшим завдяки масштабності нафтопереробної промисловості.

Біопаливо:

Біопалива наразі є дорогими у виробництві, особливо в порівнянні з Jet A-1. Це пов'язано з обмеженою доступністю сировини, складністю технологічних процесів та недостатнім розвитком інфраструктури. Однак програми субсидування, спрямовані на стимулювання використання стійких палив, дозволяють поступово знижувати їхню вартість.

Порівняння:

Попри вищу вартість виробництва, економічна доцільність біопалива зростає завдяки зменшенню витрат на технічне обслуговування двигунів і скороченню викидів, що дозволяє уникати штрафів у межах екологічних регуляцій.

Логістика та доступність.

Традиційне авіаційне паливо:

Jet A-1 широко доступне завдяки розвиненій інфраструктурі виробництва, транспортування та зберігання. Це дозволяє забезпечувати надійність поставок у глобальному масштабі.

Біопаливо:

Виробництво біопалива залежить від доступності сировини, такої як відходи сільського господарства або олійні культури. Водночас його транспортування та зберігання не потребують значної модернізації інфраструктури, оскільки біопаливо сумісне з існуючими системами.

Порівняння:

Традиційне паливо має перевагу в логістиці через розвинутість інфраструктури. Однак біопаливо, завдяки сумісності з поточними логістичними ланцюгами, є перспективним для поступового впровадження.

Підбиваючи підсумок, можна прийти до наступного висновку.

Біопаливо виготовляється з рослинного матеріалу, такого як кукурудза, соняшник, або біометан. Основні переваги біопалива:

екологічність, оскільки викиди CO₂, що виникають при його використанні, частково компенсуються рослинами, які поглинають цей газ під час свого росту. Також біопаливо є безпечнішим, оскільки воно менш токсичне і має менший ризик займання. Крім того, біопаливо може вироблятися з сировини, яка легко доступна в різних регіонах, що забезпечує його широку доступність і використання[54].

Традиційне авіаційне паливо, таке як авіаційний керосин (Jet A-1), має ряд переваг. Воно відзначається високою енергетичною ємністю, що дозволяє літакам долати великі відстані без необхідності частих дозаправок. Крім того, авіаційне паливо має тривалий термін зберігання і не вимагає спеціальних умов для зберігання. Ще однією важливою перевагою є добре розвинена інфраструктура для заправки, яка доступна по всьому світу, що

забезпечує зручність і ефективність використання такого палива в авіаційній галузі.

У порівнянні з традиційним авіаційним паливом, біопаливо має декілька ключових переваг. З екологічної точки зору, біопаливо продукує менші викиди CO₂, оскільки рослини, з яких воно виробляється, поглинають цей газ під час свого росту. Енергетична ефективність традиційного авіаційного палива залишається вищою, що робить його важливим для дальніх польотів. З точки зору безпеки, біопаливо менш токсичне і має нижчий ризик займання, що зменшує потенційні небезпеки для здоров'я та навколишнього середовища. Біопаливо також може бути виготовлене з локальних рослинних ресурсів, що зменшує залежність від імпорту і підтримує місцеву економіку. Проте інфраструктура для заправки традиційного авіаційного палива значно розвиненіша у всьому світі, що забезпечує зручність і ефективність його використання. Водночас, інфраструктура для біопалива вимагає подальшого розвитку та інвестицій. Незважаючи на ці виклики, обидва види палива мають свої унікальні переваги, які варто враховувати при виборі енергетичних рішень для авіації.

Порівняльний аналіз водневих паливних елементів та традиційного авіаційного палива.

Сучасна авіаційна галузь стоїть перед необхідністю переходу до більш екологічних видів енергії для зменшення вуглецевого сліду та зниження залежності від викопних ресурсів. У цьому контексті водневі паливні елементи (ВПЕ) є однією з найбільш перспективних альтернатив традиційному авіаційному паливу (Jet A-1). Ці два види енергоносіїв мають суттєві відмінності у фізико-хімічних властивостях, впливі на двигуни, екологічній ефективності та вимогах до інфраструктури. Розглянемо їх детально[24].

Водень є одним із найперспективніших джерел енергії для авіації завдяки своїм унікальним властивостям. Він має найвищу масову енергоємність серед усіх відомих видів палива, досягаючи приблизно 120

МДж/кг, що робить його надзвичайно ефективним у контексті енергетичної потужності на одиницю маси. Водночас водень демонструє значно нижчу об'ємну енергетичну щільність — приблизно 8 МДж/л у зрідженому стані. Це створює потребу в розробці спеціальних систем для його зберігання, таких як криогенні резервуари, які займають більше місця та додають конструктивних складнощів для інтеграції в літаки.

Головною перевагою водневих паливних елементів є їх здатність перетворювати хімічну енергію водню на електричну з високим коефіцієнтом корисної дії, що може досягати 60%. Це робить водень більш ефективним у порівнянні з традиційними паливами, особливо у використанні на сучасних електричних та гібридних літаках. У той же час Jet A-1, як основне традиційне паливо для авіації, має перевагу завдяки своїй компактності, високій об'ємній енергоемності та легкості транспортування і зберігання. Хоча Jet A-1 перевірене часом і забезпечує стабільну роботу двигунів, водень відкриває нові можливості для створення більш ефективних та екологічних авіаційних систем.

При згорянні водень виділяє лише воду як побічний продукт, що робить його абсолютно чистим з екологічної точки зору. Ця властивість повністю усуває викиди CO_2 і сажі, які є основними забруднювачами традиційного Jet A-1. Використання водневих паливних елементів також зменшує термічне навантаження на компоненти двигуна, оскільки електродвигуни, які живляться від таких елементів, мають менше рухомих частин, що знижує ризик зношування та механічних поломок. Проте високі температури згоряння водню можуть спричиняти підвищений рівень утворення оксидів азоту (NO_x) у традиційних камерах згоряння, що потребує додаткових технологічних рішень для мінімізації цих викидів.

З точки зору екологічної ефективності водень має явну перевагу над Jet A-1. Окрім нульового вуглецевого сліду під час експлуатації, водень може вироблятися за допомогою відновлюваних джерел енергії через електроліз води, що робить його повністю екологічним у разі використання "зеленого"

водню. Проте водень, отриманий із викопного палива ("сірий" водень), значно втрачає свої екологічні переваги через високу вуглецеву інтенсивність виробництва. У порівнянні, Jet A-1 є основним джерелом викидів CO₂ в авіаційній галузі, що робить його менш привабливим у контексті глобальних зусиль зі зменшення вуглецевого сліду[36].

Вартість виробництва та впровадження є ще однією важливою складовою порівняння. Jet A-1 залишається значно дешевшим завдяки відпрацьованій інфраструктурі, масштабності виробництва та стабільній доступності. У той же час виробництво водню, особливо "зеленого", є дорогим через високі витрати на відновлювану енергію, необхідну для електролізу. Додатково побудова нових інфраструктур для зберігання та транспортування водню потребує значних капіталовкладень, включаючи створення криогенних систем і резервуарів високого тиску. Це суттєво ускладнює інтеграцію водню в авіацію, особливо в короткостроковій перспективі.

Інфраструктура для Jet A-1 є добре розвиненою, що забезпечує його доступність і зручність у використанні на глобальному рівні. Натомість водень, попри свої переваги, вимагає побудови нових логістичних систем для заправки літаків і транспортування палива до аеропортів. У багатьох випадках це означає повну реконструкцію існуючих аеропортів і додаткові витрати, які роблять водень економічно менш привабливим на поточному етапі розвитку.

Отже, водневі паливні елементи мають величезний потенціал для створення екологічно чистої та ефективної авіації майбутнього. Проте впровадження водню вимагає подолання технічних, економічних та інфраструктурних бар'єрів. Jet A-1 залишається більш доступним і перевіреним рішенням для сучасної авіації, хоча його екологічний вплив є значним викликом у контексті глобальної декарбонізації. Вибір між цими видами палива залежить від довгострокових цілей авіаційної галузі, зокрема

від амбіцій щодо зниження викидів парникових газів і технологічної модернізації.

Синтетичні паливні суміші та традиційне авіаційне паливо.

Синтетичні паливні суміші (СПС) є одним із найважливіших напрямів у розвитку альтернативних джерел енергії для авіації. Вони створені як заміна або доповнення традиційного авіаційного палива (Jet A-1) і мають низку унікальних властивостей, які можуть значно покращити екологічну та технічну ефективність повітряних суден. Порівняння синтетичних паливних сумішей із традиційним авіаційним гасом охоплює аналіз їхніх фізико-хімічних властивостей, впливу на двигуни, екологічну ефективність, економічну доцільність та логістичні аспекти.

Синтетичні паливні суміші (СПС) є продуктом передових хімічних процесів, таких як Fischer-Tropsch та Power-to-Liquid (PtL), що дозволяють створювати паливо з високим рівнем чистоти. Відсутність у складі СПС сірки та ароматичних вуглеводнів забезпечує значну перевагу у фізико-хімічних властивостях порівняно з традиційним авіаційним паливом Jet A-1. Завдяки еквівалентній енергетичній щільності ці палива здатні підтримувати аналогічну дальність польотів і стабільну роботу авіаційних двигунів, але при цьому мають підвищену морозостійкість і меншу схильність до окислення. Ці характеристики роблять СПС особливо перспективними для використання в авіації, яка працює в умовах екстремальних температур.

СПС значно перевершують Jet A-1 за чистотою згоряння, що забезпечує низький рівень утворення відкладень у двигунах. Це позитивно впливає на роботу авіаційних турбін, зменшуючи корозію лопаток та інших важливих компонентів. Завдяки своєму стабільному хімічному складу СПС забезпечують рівномірний процес згоряння, що підвищує ефективність роботи двигунів. Дослідження та випробування свідчать про те, що використання СПС значно подовжує термін служби двигунів і зменшує необхідність частого технічного обслуговування, що знижує експлуатаційні витрати. У цьому контексті СПС демонструють явну перевагу над Jet A-1,

який, хоч і забезпечує високу продуктивність, спричиняє більший знос і забруднення компонентів через наявність домішок.

Екологічна ефективність СПС є одним із ключових факторів їхньої популярності. Завдяки сучасним технологіям виробництва, наприклад, PtL, у яких використовується уловлений вуглекислий газ, СПС можуть мати "вуглецево-нейтральний" цикл. Це означає, що викиди CO₂ під час їх згоряння повністю компенсуються викидами, поглинутими під час виробництва[44]. На додаток до цього, чистота СПС знижує утворення сажі та інших твердих часток, що значно зменшує вплив на атмосферу. Використання СПС повністю відповідає міжнародним екологічним ініціативам, таким як CORSIA, спрямованим на зниження викидів в авіаційній галузі. У порівнянні, традиційне паливо Jet A-1 є основним джерелом викидів парникових газів, зокрема CO₂, що підвищує його екологічну вартість.

Однак слід зазначити, що на сьогодні виробництво СПС є дорожчим порівняно з Jet A-1. Це пов'язано зі складністю хімічних процесів синтезу, такими як Fischer-Tropsch, а також залежністю від відновлюваних джерел енергії для зниження вуглецевого сліду. Незважаючи на це, перспективи здешевлення СПС є високими завдяки розвитку технологій, збільшенню масштабів виробництва та зростаючому попиту на екологічно чисті види палива. Крім того, економічна перевага СПС полягає у зниженні витрат на технічне обслуговування двигунів, що частково компенсує їхню вищу початкову вартість.

Ще однією перевагою СПС є їхня сумісність із існуючою інфраструктурою авіації. Завдяки своїм фізико-хімічним властивостям, які подібні до Jet A-1, СПС можуть використовуватися в поточній системі заправки, транспортування та зберігання без значних модифікацій. Це значно знижує витрати на інтеграцію СПС у галузь і робить їх більш доступними для авіакомпаній, що прагнуть перейти на екологічно чисті види палива. У порівнянні, Jet A-1 має перевагу завдяки розвиненій глобальній

інфраструктурі, однак ця перевага поступово нівелюється завдяки сумісності СПС із поточними логістичними ланцюгами.

Таким чином, синтетичні паливні суміші є перспективною альтернативою традиційному Jet A-1, демонструючи вищу екологічну ефективність, покращені фізико-хімічні властивості та позитивний вплив на продуктивність і довговічність двигунів[55]. Незважаючи на вищу вартість виробництва, їхній потенціал для створення стійкої авіації робить СПС важливим напрямом розвитку галузі. Вибір на користь СПС стане критично важливим у контексті міжнародних зобов'язань зі зменшення викидів та переходу до більш екологічних видів транспорту.

2.3 Економічні аспекти використання альтернативних палив

Економічні аспекти використання альтернативних палив у повітряних суднах є багатовимірною темою, яка охоплює виробництво, логістику, вплив на авіаційний сектор і довгострокові вигоди. Основним стимулом до впровадження таких палив є необхідність зменшення залежності від викопного палива, а також адаптація до суворіших екологічних норм. Проте економічна ефективність залишається під питанням через високі початкові інвестиції.

Вартість виробництва альтернативного палива, як-от біокеросину або синтетичного палива, значно перевищує вартість традиційного авіаційного гасу. Це обумовлено складністю технологічних процесів і потребою в дорогих сировинних матеріалах. Наприклад, виробництво біопалива з водоростей або відходів вимагає використання спеціалізованого обладнання та значних обсягів енергії. Тим не менш, масштаби виробництва поступово зростають, що знижує середню собівартість продукції.

Транспортні витрати також є важливою складовою. У багатьох випадках виробництво альтернативного палива розташоване в регіонах, де воно використовується, щоб уникнути додаткових витрат на

транспортування. Це допомагає зменшити вплив логістики на ціну, але водночас обмежує доступність таких палив на глобальному рівні.

Для авіакомпаній економічна вигода від використання альтернативного палива полягає в можливості зменшити плату за викиди вуглекислого газу, які регулюються міжнародними угодами, такими як Схема компенсації та скорочення викидів вуглецю для міжнародної авіації (CORSIA). В деяких країнах існують податкові пільги або державні субсидії для компаній, що використовують екологічно чисті палива, що додатково стимулює їх впровадження.

На ринку авіаційних перевезень альтернативні палива також впливають на імідж авіакомпаній. Багато з них, зокрема найбільші гравці, готові вкладати кошти в їх використання, адже це підвищує лояльність екологічно свідомих клієнтів. Водночас виникає запитання про економічну доцільність таких витрат у короткостроковій перспективі, адже кінцевий споживач може не бути готовим платити більше за квитки[30].

Серед переваг альтернативних палив слід відзначити зменшення впливу на світові ринки нафти. Масове впровадження таких палив знижує залежність від коливань цін на нафту, що забезпечує більшу фінансову стабільність авіаційної галузі. Хоча сьогодні витрати залишаються високими, технологічний прогрес та інвестиції в дослідження і розробки можуть значно змінити ситуацію в майбутньому.

Таким чином, економічні аспекти використання альтернативних палив є складним поєднанням витрат, потенційної економії та стратегічних переваг для авіакомпаній і економіки в цілому. Успіх залежатиме від політики, ринкових умов і технологічних інновацій, що дозволять зробити ці рішення доступнішими та вигіднішими.

Додатково варто зазначити, що економічна ефективність альтернативних палив значною мірою залежить від масштабу їх виробництва. У випадку збільшення попиту та створення стабільної інфраструктури для виготовлення і транспортування таких палив, їх вартість

може суттєво зменшитися. Існують реальні приклади, коли регіональні програми підтримки біопалива, наприклад, у США та країнах ЄС, допомогли знизити собівартість завдяки стимулюванню конкуренції серед виробників.

Особливу увагу слід приділити впливу на сільське господарство та його інтеграцію в ланцюги постачання. Використання біопалив із рослинних компонентів створює додаткові можливості для фермерів, але водночас піднімає питання про потенційне зростання цін на продовольство. Наприклад, виробництво біокеросину з кукурудзи або сої може призводити до скорочення земель, доступних для вирощування їжі. Тому важливою перспективою є розвиток палив на основі відходів або спеціалізованих культур, таких як водорості, які не впливають на аграрний сектор[40].

Ще одним унікальним фактором є вплив на інноваційний розвиток. Створення нових технологій для виробництва альтернативного палива стимулює розвиток пов'язаних галузей, таких як машинобудування, біотехнології та хімічна промисловість. Наприклад, дослідження в сфері синтетичних палив на основі уловленого вуглекислого газу (Carbon Capture and Utilization, CCU) можуть мати революційний вплив на економіку і зробити авіацію майже повністю вуглецево нейтральною.

Додатково слід врахувати вплив на соціально-економічну сферу. Використання альтернативних палив може створити тисячі нових робочих місць у сфері досліджень, виробництва й обслуговування інфраструктури. Це особливо важливо для регіонів, які прагнуть диверсифікувати свої економіки і зменшити залежність від традиційного видобутку корисних копалин.

Окремо слід згадати про регіональні диспропорції. Наприклад, країни з обмеженим доступом до традиційних енергоресурсів можуть виграти від розвитку локальних джерел палива, що зміцнить їхню енергетичну незалежність. У той же час це створює можливості для нових партнерств у глобальній авіаційній галузі, де країни, що розвиваються, зможуть стати важливими постачальниками сировини чи навіть готових продуктів.

Отже, економічні аспекти використання альтернативних палив включають не лише прямі витрати і вигоди, але й довгострокові стратегічні перспективи, які можуть значно змінити структуру глобальної економіки та авіаційної галузі.

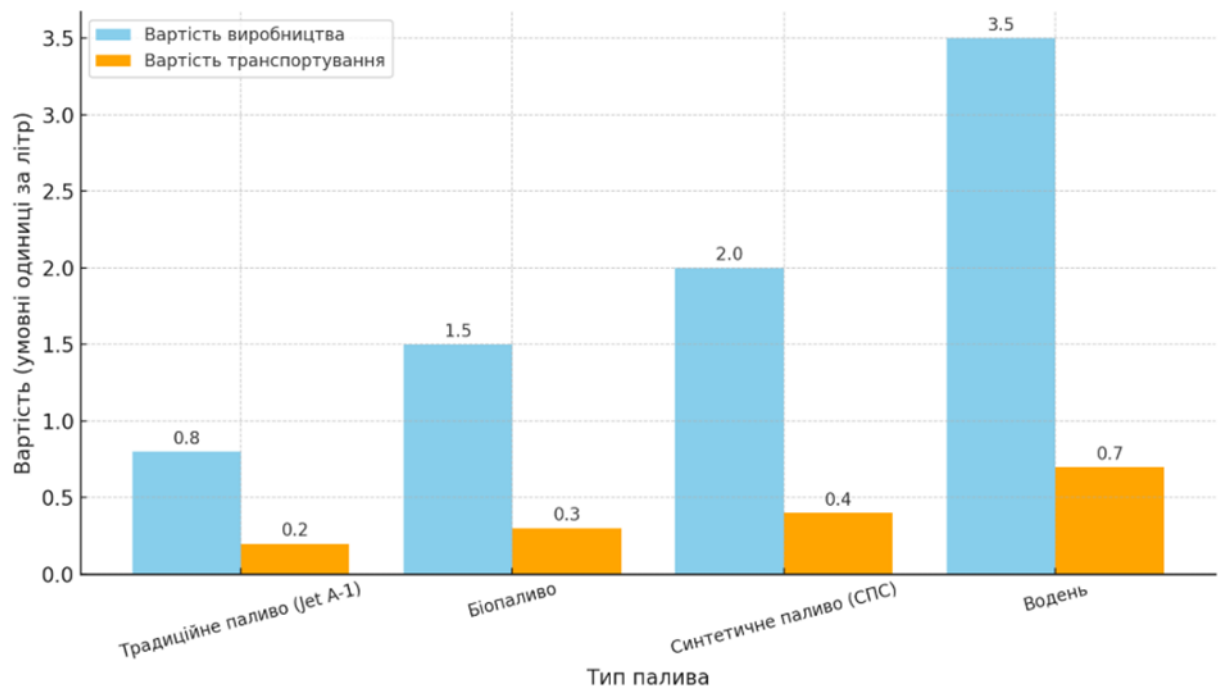


Рисунок 2.2 – Вартість виробництва та транспортування альтернативних палив

Економічні аспекти використання альтернативних палив для авіації є важливим фактором, який впливає на їхнє впровадження. Вартість виробництва та транспортування таких палив є значно вищою порівняно з традиційним авіаційним паливом Jet A-1, що пов'язано зі складністю технологій, обмеженою доступністю сировини та недостатньо розвиненою інфраструктурою.

Виробництво традиційного авіаційного палива є більш економічним завдяки відпрацьованій нафтопереробній інфраструктурі, яка існує десятиліттями. Середня вартість виробництва Jet A-1 складає приблизно 0.8 умовних одиниць за літр. Для біопалива вартість значно вища — близько 1.5 умовних одиниць за літр, оскільки його виробництво вимагає складного

процесу обробки сировини, такої як рослинні олії чи сільськогосподарські відходи.

Синтетичне паливо, створене за технологіями Fischer-Tropsch або Power-to-Liquid (PtL), має ще більшу вартість — близько 2.0 умовних одиниць за літр. Основною причиною цього є високі енергетичні витрати та складність синтезу. Найдорожчим у виробництві є водень, особливо "зелений" водень, отриманий методом електролізу з використанням відновлюваної енергії. Його вартість досягає 3.5 умовних одиниць за літр, що робить цей варіант поки що неприйнятним для масового впровадження[46].

Транспортування традиційного палива також є менш витратним (приблизно 0.2 умовних одиниці за літр), оскільки його можна перевозити існуючою інфраструктурою трубопроводів, танкерів та автомобільних цистерн. Біопалива та синтетичні палива сумісні з цією інфраструктурою, але їх транспортування дещо дорожче через менші обсяги виробництва та додаткові витрати на сертифікацію партій (до 0.3–0.4 умовних одиниць за літр).

Водень є найдорожчим для транспортування. Зріджений водень потребує криогенних резервуарів, здатних підтримувати температуру до -253°C , або резервуарів для зберігання під високим тиском. Це підвищує вартість транспортування до 0.7 умовних одиниць за літр. Крім того, існує потреба в побудові нової логістичної інфраструктури, яка здатна обслуговувати водневі паливні системи.

Графік, представлений вище, демонструє порівняльну вартість виробництва та транспортування різних типів палив. Як видно, Jet A-1 залишається найбільш економічним, тоді як альтернативні палива мають вищі витрати. Проте розвиток технологій та масштабування виробництва може значно знизити вартість біопалива, синтетичних палив і водню в майбутньому. Зокрема, збільшення попиту на стійкі авіаційні палива стимулюватиме інвестиції у вдосконалення виробничих процесів і логістичних систем.

Використання альтернативних палив в авіаційній галузі має як фінансові переваги, так і недоліки для авіакомпаній. Однією з головних переваг є потенційне зниження витрат на паливо в довгостроковій перспективі. Хоча початкові інвестиції у впровадження альтернативних палив можуть бути значними, з часом вони можуть окупитися завдяки стабільнішим та передбачуванішим цінам на такі види палива порівняно з традиційним авіаційним гасом.

Крім того, використання екологічно чистих палив може зменшити витрати, пов'язані з екологічними податками та зборами, які поступово впроваджуються в різних країнах для боротьби зі зміною клімату. Авіакомпанії, що використовують альтернативні палива, можуть отримати податкові пільги або інші фінансові стимули від урядів, що прагнуть підтримати екологічно відповідальний бізнес.

З іншого боку, існують і фінансові недоліки. Високі початкові витрати на дослідження, розробку та впровадження нових технологій можуть стати серйозним фінансовим навантаженням для авіакомпаній. Крім того, інфраструктура для виробництва та постачання альтернативних палив ще не є достатньо розвиненою, що може призвести до додаткових витрат на логістику та зберігання[32].

Також варто враховувати, що не всі альтернативні палива повністю сумісні з існуючими авіаційними двигунами, що може вимагати додаткових інвестицій у модернізацію флоту або технічне обслуговування. Крім того, ринок альтернативних палив ще формується, і ціни на них можуть бути нестабільними, що додає фінансових ризиків для авіакомпаній.

Незважаючи на ці виклики, багато авіакомпаній вже інвестують у дослідження та впровадження альтернативних палив, розуміючи їхній потенціал для забезпечення стійкого розвитку галузі та зменшення впливу на довкілля. З часом, із розвитком технологій та інфраструктури, фінансові переваги можуть переважити недоліки, роблячи альтернативні палива привабливішими для широкого використання в авіації.

Для наочності, нижче представлено порівняльну таблицю(таблиця 2.2), що відображає основні фінансові аспекти використання традиційного авіаційного палива та альтернативних палив:

Таблиця 2.2 - Основні фінансові аспекти використання палив

Показник	Традиційне паливо	Альтернативні палива
Початкові інвестиції	Низькі	Високі
Вартість палива	Змінна	Стабільніша
Податкові пільги	Відсутні	Можливі
Витрати на екологічні збори	Високі	Нижчі
Витрати на інфраструктуру	Відсутні	Високі
Сумісність з існуючими двигунами	Повна	Часткова

Також економічні аспекти використання альтернативних палив авіакомпаніями є складним питанням, яке включає фінансові переваги, довгострокові перспективи та численні виклики. Щоб зрозуміти ці аспекти глибше, варто розглянути реальні приклади та кейси впровадження альтернативних палив у світовій авіаційній індустрії.

Однією з найбільших переваг альтернативних палив є їх здатність зменшити залежність від волатильного ринку викопного палива. Наприклад, авіакомпанія *United Airlines* активно інвестує в альтернативні палива з метою зменшення вуглецевих викидів і стабілізації витрат на паливо. У 2021 році компанія уклала багатомільйонну угоду з виробником *Fulcrum BioEnergy*, який спеціалізується на виготовленні біопалива з відходів. Завдяки цьому компанія планує замінити частину традиційного авіаційного гасу на біопаливо, що дозволить їй зменшити вплив на навколишнє середовище і отримати економію на екологічних зборах.

Ще один приклад — авіакомпанія *Lufthansa*, яка у співпраці з *Neste* (одним із найбільших виробників альтернативних палив) протестувала використання біопалива на комерційних рейсах. Ця ініціатива дозволила

компанії зменшити викиди CO₂, що допомогло уникнути додаткових витрат, пов'язаних із європейськими податками на вуглець. Такі інновації також позитивно впливають на репутацію авіакомпаній серед екологічно свідомих клієнтів, що сприяє зростанню пасажиропотоку.

Проте впровадження альтернативних палив не обходиться без значних витрат. Авіакомпанії стикаються з високими початковими інвестиціями, які можуть стати значним тягарем для їхніх фінансів. Наприклад, *KLM Royal Dutch Airlines* здійснювала довгострокову програму тестування біопалива, що включала додаткові витрати на закупівлю палива за ціною, що перевищує вартість традиційного гасу майже вдвічі. Такі витрати є стримуючим фактором для широкого впровадження альтернативних палив.

Також варто враховувати витрати на адаптацію інфраструктури. Для зберігання та транспортування біопалива потрібні спеціалізовані резервуари та логістичні рішення. Наприклад, у 2019 році *British Airways* оголосила про запуск проєкту виробництва альтернативного палива з побутових відходів, однак будівництво відповідного заводу потребувало інвестицій у розмірі понад 500 мільйонів фунтів стерлінгів, що викликало занепокоєння щодо окупності проєкту в найближчі роки[33].

Ключовим викликом є низька доступність альтернативних палив на ринку. У 2022 році *Delta Air Lines* зіштовхнулася з труднощами забезпечення регулярних поставок біопалива, адже більшість виробників не мають можливості забезпечити масштабне виробництво. Це ускладнює планування та веде до зростання логістичних витрат.

Однак приклад *Singapore Airlines* демонструє, що стратегічні партнерства можуть стати вирішенням цієї проблеми. Компанія уклала угоду з місцевими постачальниками біопалива та запустила програму *SAF (Sustainable Aviation Fuel)*, яка дозволяє значно зменшити логістичні витрати через виробництво палива неподалік аеропортів базування.

Поступовий розвиток ринку альтернативних палив та технологій може зробити їх використання більш економічно вигідним у майбутньому.

Світовий досвід показує, що фінансові переваги, зокрема економія на податках і екологічних зборах, перевищують початкові витрати за умови наявності державної підтримки та міжнародного співробітництва.

Окрім того, розвиток технологій, таких як синтетичне паливо, що створюється з водню та вуглекислого газу, відкриває нові горизонти. Наприклад, *Airbus* інвестує у створення водневих літаків, що в довгостроковій перспективі можуть зробити авіацію більш екологічно чистою та економічно вигідною.

Висновки до розділу 2

Авіаційна галузь є важливим сектором економіки, однак її діяльність супроводжується значними викидами вуглекислого газу, що сприяє зміні клімату. Згідно з даними, внесок світової авіації до глобальних антропогенних викидів CO₂ становить 2–2,5%, що є суттєвою часткою.

У зв'язку з цим, розробка та впровадження альтернативних палив для авіації набувають особливої актуальності. Серед основних напрямків досліджень виділяються біопаливо, водневі паливні елементи та синтетичні паливні суміші. Біопаливо, зокрема, може знижувати викиди CO₂ на 50–80% порівняно з традиційним авіаційним паливом. Однак його використання потребує адаптації двигунів та інфраструктури.

Водневі паливні елементи є екологічно чистим варіантом, оскільки їх згоряння не призводить до викидів CO₂. Проте технологія водневих паливних елементів для авіації ще перебуває на стадії розробки, і потребує значних інвестицій у дослідження та інфраструктуру.

Синтетичні паливні суміші можуть бути виготовлені з різних джерел, включаючи відновлювальні ресурси. Вони можуть знижувати викиди CO₂ та покращувати ефективність двигунів. Однак їх виробництво є енергоємним і потребує значних інвестицій.

Економічні аспекти використання альтернативних палив також є важливими. Альтернативні палива зазвичай мають вищу вартість виробництва та транспортування порівняно з традиційним паливом, що може вплинути на економічну доцільність їх використання. Використання альтернативних палив може призвести до зниження експлуатаційних витрат завдяки зменшенню витрати палива та викидів шкідливих речовин. Однак високі початкові інвестиції та необхідність адаптації інфраструктури можуть бути значними фінансовими бар'єрами.

РОЗДІЛ 3

ПЕРСПЕКТИВИ ТА ВИКЛИКИ ВПРОВАДЖЕННЯ

АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ В АВІАЦІЇ

Впровадження альтернативних палив в авіації має великі перспективи завдяки потенціалу зниження викидів парникових газів, підвищення екологічної безпеки та зменшення залежності від викопних палив. Однак, це стикається з викликами, такими як висока вартість виробництва, необхідність розбудови інфраструктури для зберігання та транспортування, а також потреба у великих інвестиціях у науково-дослідні розробки і технології. Незважаючи на ці виклики, розвиток і впровадження альтернативних палив залишається важливою метою для забезпечення стійкості авіаційної галузі в майбутньому.

3.1 Регуляторні вимоги та стандарти

Впровадження альтернативних палив в авіаційну галузь є важливим кроком до зменшення викидів парникових газів та забезпечення сталого розвитку транспорту. Однак для ефективного використання таких палив необхідно дотримуватися чітких регуляторних вимог та стандартів, які визначають їх якість, безпеку та сумісність з існуючою інфраструктурою.

Міжнародна організація цивільної авіації (ICAO) розробила стандарти та рекомендації щодо використання альтернативних авіаційних палив. Зокрема, стандарт ASTM D7566 визначає вимоги до синтетичних авіаційних палива, які можуть бути використані в суміші з традиційним авіаційним паливом. Цей стандарт охоплює різні типи синтетичних палив, включаючи ті, що виробляються з біомаси, вугілля або природного газу.

Крім того, ICAO розробила концепцію "Сталого авіаційного палива" (Sustainable Aviation Fuel, SAF), яка включає критерії сталості для

виробництва та використання таких палив. Ці критерії охоплюють аспекти, пов'язані з викидами парникових газів, використанням земельних ресурсів, водних ресурсів та біорізноманіттю.

В Європейському Союзі використання альтернативних авіаційних палив регулюється рядом директив та регламентів. Зокрема, Директива 2018/2001/ЄС встановлює вимоги до використання відновлювальних джерел енергії, включаючи авіаційні палива. Вона передбачає встановлення національних цілей щодо використання відновлювальних джерел енергії в транспортному секторі та визначає механізми підтримки таких ініціатив[55].

Також, відповідно до Директиви 2014/94/ЄС щодо інфраструктури альтернативних видів палива, держави-члени повинні забезпечити наявність відповідної інфраструктури для заправки альтернативними авіаційними паливами в аеропортах, що включає встановлення необхідного обладнання та забезпечення доступності таких палив для авіакомпаній.

В Україні використання авіаційних палив регулюється Державним стандартом ДСТУ 4796:2007 "Паливо для авіаційних газотурбінних реактивних двигунів Jet A-1. Технічні характеристики". Цей стандарт визначає вимоги до фізико-хімічних властивостей авіаційного палива, включаючи в'язкість, температуру замерзання, вміст води та інших домішок.

Однак, з огляду на розвиток технологій та впровадження альтернативних палив, виникає необхідність перегляду та оновлення цього стандарту. Зокрема, необхідно розробити вимоги до сумішей традиційного палива з біопаливами та іншими альтернативними компонентами, а також визначити процедури сертифікації та контролю якості таких сумішей.

Одним з основних викликів є забезпечення сумісності альтернативних палив з існуючою авіаційною технікою та інфраструктурою. Для цього необхідно провести сертифікацію нових видів палива та розробити відповідні процедури їх впровадження.

Крім того, важливим аспектом є забезпечення сталості виробництва альтернативних палив, що включає оцінку їх впливу на навколишнє

середовище, використання земельних та водних ресурсів, а також вплив на біорізноманіття.

Впровадження альтернативних авіаційних палив в Україні потребує чіткої регламентації та розробки відповідних стандартів. Наразі в Україні відсутні спеціалізовані нормативні документи, що регулюють використання таких палив у цивільній авіації. Зокрема, ДСТУ 3982-2000 "Авіаційні палива" не передбачає можливості змішування біопалива з традиційним авіаційним паливом[20].

Для ефективного впровадження альтернативних палив необхідно розробити та прийняти низку нормативно-правових актів, які включатимуть:

1) Оновлення існуючих стандартів: перегляд та адаптація ДСТУ 3982-2000 з урахуванням можливості використання біопалив та інших альтернативних компонентів.

2) Розробка нових нормативів: створення стандартів для сумішей традиційного палива з біопаливами, визначення вимог до їх якості, безпеки та сумісності з авіаційною технікою.

3) Встановлення критеріїв сталості: розробка критеріїв сталості для виробництва та використання альтернативних палив, що включають оцінку викидів парникових газів, використання земельних та водних ресурсів, а також вплив на біорізноманіття.

4) Визначення процедур сертифікації: встановлення процедур сертифікації нових видів палива та їх сумішей, включаючи методи тестування, оцінки ризиків та моніторингу.

5) Розробка механізмів підтримки: створення механізмів фінансової та інституційної підтримки для виробників та споживачів альтернативних палив, включаючи податкові пільги, субсидії та інші стимули.

6) Інтеграція з міжнародними стандартами: гармонізація національних стандартів з міжнародними вимогами та рекомендаціями, зокрема з тими, що розроблені Міжнародною організацією цивільної авіації (ICAO) та Європейським Союзом.

7) Розробка плану впровадження: створення детального плану впровадження альтернативних палив, що включає етапи, терміни, відповідальних осіб та ресурси, необхідні для реалізації.

8) Моніторинг та оцінка ефективності: __встановлення системи моніторингу та оцінки ефективності впровадження альтернативних палив, що дозволить коригувати стратегію та оперативно реагувати на виклики.

9) Підготовка кадрів: організація навчання та підвищення кваліфікації персоналу, залученого до виробництва, сертифікації та використання альтернативних палив.

10) Інформування та залучення громадськості: проведення інформаційних кампаній для підвищення обізнаності про переваги та виклики використання альтернативних палив серед громадськості та зацікавлених сторін.

Впровадження цих заходів вимагатиме координації між державними органами, науковими установами, виробниками та іншими зацікавленими сторонами. Важливим кроком є розробка Концепції запровадження вуглецевого податку в Україні, що може стати додатковим стимулом для використання альтернативних палив.

Впровадження альтернативних палив в авіаційну галузь стикається з низкою політичних та законодавчих бар'єрів, які можуть уповільнити або ускладнити цей процес.

У деяких країнах відсутня чітка політична підтримка для переходу на альтернативні паливні технології, що може бути пов'язано з лобістським впливом традиційних енергетичних секторів або недостатньою обізнаністю політиків про переваги таких змін.

В Україні відсутність чіткої політичної волі щодо переходу на альтернативні паливні технології є значним бар'єром. Це може бути пов'язано з лобістським впливом традиційних енергетичних секторів або недостатньою обізнаністю політиків про переваги таких змін. Зокрема, у звіті "Політика ЄС

щодо зеленої економіки та інновацій" зазначається, що відсутність політичної підтримки може призвести до затримок у впровадженні інноваційних технологій, включаючи альтернативні паливні рішення.

Політична нестабільність також може вплинути на процеси впровадження альтернативних палив. В умовах політичної нестабільності уряди можуть бути зосереджені на вирішенні нагальних проблем, що може призвести до відсутності довгострокових стратегій та планів щодо впровадження альтернативних палив. Наприклад, у звіті "Реалізація Європейського зеленого курсу в транспорті та формування сталої мобільності" підкреслюється, що політична нестабільність може ускладнити впровадження зелених ініціатив у транспортному секторі.

Недостатня нормативно-правова база є серйозним бар'єром для впровадження альтернативних палив. В Україні існують застарілі нормативні документи, які не відповідають сучасним вимогам та міжнародним стандартам у галузі альтернативних палив. Зокрема, у проєкті "Дорожня карта для виробництва та використання водню в Україні" зазначається, що національна нормативна технологічна база стосовно водню не відповідає існуючому світовому рівню, і необхідно розробити стандарти, узгоджені з міжнародними.

Відсутність стимулів для інвесторів також є значним бар'єром. Ненадання податкових пільг або інших фінансових стимулів для компаній, які інвестують у виробництво та використання альтернативних палив, може знизити їх зацікавленість у таких проєктах. У звіті "Торгівля квотами на викиди на практиці" підкреслюється, що відсутність фінансових стимулів може уповільнити впровадження екологічно чистих технологій[48].

Регулювання викидів та екологічні стандарти також можуть стати бар'єром. Встановлення жорстких екологічних стандартів без урахування реальних можливостей галузі може призвести до додаткових витрат для авіакомпаній та виробників палива, що може уповільнити процес переходу на альтернативні джерела енергії. У звіті "Звіт про міжнародні добровільні та

обов'язкові вуглецеві ринки з точки зору України" зазначається, що надмірно суворі екологічні вимоги можуть створити додаткові фінансові навантаження на підприємства.

Рекомендації для подолання бар'єрів:

Для подолання політичних та законодавчих бар'єрів необхідно оновити нормативно-правову базу, адаптуючи її до сучасних вимог та міжнародних стандартів, щоб забезпечити правову основу для розвитку альтернативних палив. У звіті "Політика ЄС щодо зеленої економіки та інновацій" підкреслюється важливість розробки та впровадження нових законодавчих актів для підтримки зеленої економіки.

Уряди повинні визначити національні цілі щодо використання альтернативних палив та розробити довгострокові стратегії для їх досягнення, що включатимуть конкретні заходи та терміни. У проєкті "Дорожня карта для виробництва та використання водню в Україні" зазначається, що необхідно розробити національні стандарти, узгоджені з міжнародними, для розвитку водневих технологій.

Введення податкових пільг, субсидій або інших фінансових механізмів для підтримки інвестицій у виробництво та використання альтернативних палив може стимулювати розвиток цієї сфери. У звіті "Торгівля квотами на викиди на практиці" підкреслюється важливість фінансових стимулів для підтримки екологічно чистих технологій.

Організація інформаційних кампаній та залучення громадськості до обговорення питань екології та енергетики може сприяти формуванню підтримки для впровадження альтернативних палив. У звіті "Звіт про міжнародні добровільні та обов'язкові вуглецеві ринки з точки зору України" зазначається, що підвищення обізнаності громадськості може сприяти більш ефективному впровадженню екологічних ініціатив.

3.2 Технологічні виклики та інновації

Розвиток технологій виробництва та зберігання

Впровадження альтернативних палив у авіаційну галузь супроводжується низкою технологічних викликів, які потребують інноваційних підходів у виробництві та зберіганні таких палив.

Адаптація авіадвигунів:

Один з основних викликів впровадження альтернативних палив – це адаптація існуючих авіадвигунів до використання нових видів палива. Традиційні авіаційні двигуни розроблені для роботи на керосині, який має високу теплотворну здатність та добре вивчені властивості згоряння. Використання біопалива, водневих паливних елементів або синтетичних паливних сумішей потребує врахування різниць у фізико-хімічних властивостях палива та їхньому впливі на роботу двигунів[14].

Для використання біопалива необхідно враховувати його нижчу енергетичну щільність порівняно з традиційним паливом, а також можливі проблеми з сумісністю з матеріалами двигунів. Біопаливо може мати різні хімічні властивості, які можуть впливати на корозію металів та знос полімерних компонентів. Тому необхідно розробити спеціальні добавки та інгібітори корозії, щоб забезпечити надійну роботу двигунів на біопаливі.

Використання водневих паливних елементів потребує розробки нових типів двигунів або модифікації існуючих. Водень має високу теплотворну здатність, але для його ефективного використання необхідно забезпечити високі температури згоряння та спеціальні матеріали, які можуть витримувати ці умови. Крім того, водень є вибухонебезпечним газом, тому необхідно розробити спеціальні системи безпеки для зберігання та транспортування водню.

Синтетичні паливні суміші можуть мати подібні характеристики до традиційного авіаційного палива, але їхнє використання також потребує адаптації двигунів. Важливо забезпечити стабільне згоряння синтетичних

палив та їхню сумісність з матеріалами двигунів. Крім того, необхідно враховувати можливі відмінності у в'язкості та інших фізико-хімічних властивостях, які можуть впливати на роботу паливної системи.

Виробництво альтернативних палив:

Одним із основних викликів є розробка ефективних та економічно вигідних методів виробництва альтернативних палив. Наприклад, біопаливо може бути отримане з різних джерел, таких як рослинні олії, відходи харчової промисловості або спеціально вирощені культури. Однак процеси переробки та очищення цих матеріалів потребують значних енергетичних та фінансових ресурсів. Згідно з дослідженнями, ефективність виробництва біопалива залежить від вибраної сировини та технології переробки, що може впливати на його конкурентоспроможність порівняно з традиційними видами палива.

Іншим важливим аспектом є розробка технологій для виробництва синтетичних палив, таких як синтетичний авіаційний гас (SAF). Ці технології включають процеси, як-от Fischer-Tropsch синтез, які дозволяють отримувати рідкі вуглеводні з вуглекислого газу та водню. Однак ці процеси потребують значних енергетичних витрат та високих температур, що ускладнює їх впровадження на комерційній основі.

Зберігання альтернативних палив:

Після виробництва виникає необхідність у зберіганні альтернативних палив, що також супроводжується низкою технологічних викликів. Наприклад, біопаливо може мати різні фізико-хімічні властивості порівняно з традиційним авіаційним паливом, що може вплинути на його сумісність з існуючими системами зберігання та транспортування. Дослідження показують, що біопаливо може мати вищу кислотність та гігроскопічність, що може призвести до корозії матеріалів та зниження терміну служби обладнання.

Синтетичні паливні суміші, хоча і мають переваги у вигляді зменшення викидів CO₂, можуть бути менш стабільними при зберіганні, особливо при

високих температурах. Це може вимагати розробки нових матеріалів для резервуарів та трубопроводів, здатних витримувати агресивні умови експлуатації[52].

Зберігання водню є важливим технологічним викликом через його високу вибухонебезпечність та низьку щільність. Водень може зберігатися у рідкому або стисненому стані, але це вимагає спеціальних резервуарів та систем безпеки. Розробка нових матеріалів для зберігання водню, таких як металогідридні резервуари, може значно підвищити безпеку та ефективність зберігання.

Зберігання синтетичних палив може здійснюватися у стандартних резервуарах, що використовуються для традиційного авіаційного палива. Проте, важливо забезпечити сумісність синтетичних палив з матеріалами резервуарів та паливних систем, щоб уникнути корозії та інших проблем. Крім того, необхідно розробити методи зберігання, які мінімізують втрати енергії та забезпечують стабільність палива протягом тривалого часу.

Інновації у виробництві та зберіганні:

Для подолання цих викликів необхідні інноваційні підходи. Наприклад, розробка біореакторів нового покоління, які дозволяють ефективніше переробляти органічні відходи на біопаливо, може значно знизити витрати на виробництво. Також важливим напрямком є створення нових матеріалів для зберігання палива, які б забезпечували високу корозійну стійкість та сумісність з різними типами палива.

Використання нанотехнологій для покращення властивостей матеріалів, таких як підвищення їх міцності та зносостійкості, може стати ключовим фактором у забезпеченні надійності та довговічності систем зберігання альтернативних палив.

Таким чином, технологічні виклики у виробництві та зберіганні альтернативних палив вимагають комплексного підходу, що включає розробку нових технологій, матеріалів та процесів, здатних забезпечити ефективність та безпеку використання таких палив у авіаційній галузі.

Дослідження і розробки нових матеріалів.

Впровадження альтернативних палив у авіаційну галузь вимагає значних наукових досліджень та розробок нових матеріалів, здатних забезпечити ефективність, безпеку та екологічність. Ці матеріали повинні відповідати специфічним вимогам, таким як висока термостійкість, корозійна стійкість та сумісність з новими видами палива[54].

Розробка нових матеріалів для авіаційних двигунів:

Авіаційні двигуни працюють при екстремальних температурах та тисках, що вимагає використання матеріалів з високою термостійкістю та механічною міцністю. Традиційно використовуються титанові та нікелеві сплави, однак для підвищення ефективності та зменшення ваги розробляються нові композитні матеріали. Наприклад, використання вуглецевих та керамічних композитів дозволяє зменшити вагу конструкції та підвищити її термостійкість. Однак такі матеріали потребують ретельних досліджень щодо їх довговічності та впливу на навколишнє середовище.

Виклики у розробці нових матеріалів:

Одним з основних викликів є забезпечення сумісності нових матеріалів з альтернативними видами палива. Наприклад, біопаливо може мати інші хімічні властивості порівняно з традиційним авіаційним паливом, що може вплинути на корозійну стійкість матеріалів. Дослідження, проведене в 2021 році, показало, що біокомпоненти на основі спиртової сировини можуть змінювати фізико-хімічні властивості палива, що вимагає адаптації матеріалів двигуна.

Крім того, необхідно враховувати вплив нових матеріалів на навколишнє середовище. Використання композитних матеріалів може призвести до утворення токсичних відходів під час їх виробництва та утилізації. Тому важливо розробити технології, які мінімізують екологічний вплив та забезпечують можливість повторного використання матеріалів.

Перспективи та напрямки досліджень:

Перспективними напрямками є розробка біорозкладних композитних матеріалів, які зменшують екологічний вплив та забезпечують високу ефективність. Також важливим є дослідження впливу різних видів альтернативних палива на властивості матеріалів, щоб забезпечити їх довговічність та безпеку. Наприклад, аналіз фізико-хімічних властивостей палив для повітряно-реактивних двигунів показав необхідність розробки нових матеріалів, здатних витримувати специфічні умови роботи з альтернативними видами палива[55].

Успішна реалізація цих досліджень вимагатиме тісної співпраці між науковими установами, виробниками матеріалів та авіаційними компаніями для створення ефективних та екологічно безпечних рішень у галузі авіації.

Матеріали для біопалива.

Біопаливо може викликати корозію металів через вміст води та інших агресивних компонентів. Тому необхідно розробляти нові корозійно-стійкі сплави, які будуть витримувати агресивне середовище. Одним з перспективних напрямків є використання алюмінієвих сплавів з додаванням магнію та кремнію, що підвищують їхню стійкість до корозії.

Полімерні матеріали:

Біопаливо може негативно впливати на полімери, викликаючи їх розбухання або розчинення. Тому важливо розробляти нові полімерні матеріали, що будуть стійкими до дії біопалива. Наприклад, фторвмісні полімери та термопластичні еластомери можуть забезпечити необхідну стійкість та довговічність[40].

Матеріали для водневих паливних елементів:

Використання водню в якості палива вимагає розробки спеціальних матеріалів, здатних витримувати високі температури згоряння, тиск та агресивний хімічний вплив.

Високотемпературні матеріали:

Для забезпечення ефективного згоряння водню необхідно використовувати матеріали, здатні витримувати високі температури (понад 1000°C). Одним з перспективних напрямків є використання жароміцних сплавів на основі нікелю та кобальту. Такі сплави можуть забезпечити необхідну стійкість до високих температур та механічних навантажень.

Матеріали для зберігання водню.

Водень є вибухонебезпечним газом, тому його зберігання потребує спеціальних матеріалів, що забезпечать герметичність та безпеку. Металогідридні резервуари, що використовують матеріали на основі титану та лантану, можуть ефективно поглинати водень та забезпечувати його безпечне зберігання. Крім того, розробляються композитні матеріали з вуглецевими волокнами, що можуть витримувати високий тиск і забезпечувати безпеку зберігання водню.

Матеріали для синтетичних паливних сумішей.

Синтетичні паливні суміші можуть мати різні фізико-хімічні властивості, залежно від процесу їх синтезу. Тому важливо розробляти матеріали, що забезпечать стабільність та ефективність таких палив.

Антиокислювальні матеріали.

Синтетичні паливні суміші можуть містити компоненти, що сприяють окисленню та деградації матеріалів. Для запобігання цьому необхідно розробляти антиокислювальні сплави та покриття, що забезпечать довговічність та стабільність паливних систем. Наприклад, нержавіючі сталі з додаванням хрому та молібдену можуть ефективно протистояти окисленню[49].

Розвиток нових матеріалів для альтернативних палив є важливим кроком до впровадження екологічно чистих та ефективних технологій в авіаційній галузі. Подальші дослідження у цій сфері сприятимуть підвищенню ефективності та надійності авіадвигунів, зниженню їхнього

негативного впливу на навколишнє середовище та забезпеченню сталого розвитку авіаційної галузі.

Одним з перспективних напрямків є використання наноматеріалів, що мають унікальні властивості та можуть забезпечити високу стійкість до агресивних впливів. Наноматеріали на основі графену, оксиду цинку та інших наноструктурованих матеріалів можуть забезпечити високу міцність, легкість та стійкість до корозії та високих температур.

Іншим важливим напрямком є використання композитних матеріалів, що поєднують властивості різних компонентів і забезпечують високу міцність та легкість. Композити на основі вуглецевих волокон та полімерних матриць можуть ефективно використовуватись у конструкціях авіадвигунів та паливних систем, знижуючи їхню вагу та підвищуючи ефективність.

3.3 Вплив альтернативних палив на екологію та суспільство

Зменшення викидів CO₂ та інших шкідливих речовин.

Впровадження альтернативних палив в авіації має значний потенціал для зменшення викидів CO₂ та інших шкідливих речовин, що сприяє покращенню екологічної ситуації та зниженню негативного впливу на здоров'я людей.

Використання біопалив в авіації може значно зменшити викиди CO₂ та інших шкідливих речовин. Дослідження показують, що додавання 20% біодобавок на основі естерів жирних кислот ріпакової олії до традиційного палива для реактивних двигунів може знизити викиди CO₂ на 1,96% .

Крім того, використання біопалив може зменшити викиди інших шкідливих речовин. Наприклад, введення 20% біодобавок призводить до зниження викидів SO₂ на 14,0% [50].

Якісний і кількісний склад відпрацьованих газів повітряних суден залежить від конструкції та ефективності роботи двигуна, а також від екологічних властивостей палив для ПРД, що визначаються вмістом

гетероатомних сполук, таких як сірка. Сполуки сірки є джерелом утворення оксидів сірки у відпрацьованих газах. Наявність ароматичних вуглеводнів у паливах для ПРД є важливим показником при оцінці їхніх екологічних властивостей, оскільки вони є джерелом утворення сажі у відпрацьованих газах. Для оцінки викидів відпрацьованих газів ІСАО визначило еталонний злітно-посадковий цикл (ЗПЦ) на висоті нижче 915 метрів. Цей цикл складається з чотирьох фаз, що характеризують режими зльоту, набору висоти, зниження та холостого ходу, і є значно спрощеною версією експлуатаційного циклу польоту.



Рисунок 3.1 - Еталонний злітно-посадковий цикл

Варто зазначити, що впровадження біопалив в авіації стикається з низкою викликів, таких як необхідність адаптації існуючих двигунів та інфраструктури, забезпечення стабільного постачання сировини для виробництва біопалив та економічна доцільність їх використання. Проте, з огляду на зростаючий попит на екологічно чисті технології та посилення екологічних стандартів, розвиток та впровадження альтернативних палив в авіації є перспективним напрямком, який може суттєво зменшити негативний вплив авіаційної галузі на довкілля та здоров'я людей.

Окрім зниження викидів CO_2 , використання біопалив може зменшити викиди інших шкідливих речовин. Зокрема, введення 20% біодобавок призводить до зниження викидів SO_2 на 14,0%

Біопаливо може вироблятися з різних джерел, таких як відпрацьована кулінарна олія, тваринні жири та інші відходи. Наприклад, авіакомпанія Virgin Atlantic здійснила трансатлантичний політ на паливі, виготовленому з таких компонентів[46].

Технологічні досягнення:

Американські авіакомпанії планують перейти на біопаливо до 2030 року, маючи намір отримувати і використовувати 13,65 мільярда літрів біопалива з рослинної олії та тваринних жирів.

Вчені активно працюють над створенням біопалив із різних джерел, включаючи відходи та рослинні олії. Наприклад, використання біодобавок на основі естерів жирних кислот ріпакової олії показало зниження викидів CO_2 .

Технологічні досягнення дозволяють адаптувати існуючі авіаційні двигуни для використання біопалив без значних модифікацій, що сприяє швидшому впровадженню екологічно чистих палив.

Дослідження впливу біодобавок на основі різних рослинних олій на властивості авіаційних палив допомагають створювати суміші з оптимальними характеристиками для використання в авіації.

У 2011 році авіакомпанія Lufthansa першою в світі виконала регулярний рейс із використанням біопалива, використовуючи суміш, що складається з рівних часток біопалива та традиційного авіаційного палива.

Скандинавська авіакомпанія SAS прагне протягом наступного десятиліття перевести внутрішні рейси на біопаливо та зменшити викиди CO_2 на 25%[47].

Зменшення викидів інших шкідливих речовин: Окрім вуглекислого газу (CO_2), авіаційні двигуни викидають інші шкідливі речовини, такі як оксиди азоту (NO_x) та сірчистий ангідрид (SO_2), які негативно впливають на довкілля та здоров'я людей. Використання біопалив може сприяти зменшенню цих викидів.

Зменшення викидів SO₂:

Додавання біодобавок до авіаційного палива може суттєво знизити викиди SO₂. Наприклад, введення 20% біодобавок на основі естерів жирних кислот ріпакової олії призводить до зниження викидів SO₂ (Діоксид сірки) на 14,0%. Це пов'язано з низьким вмістом сірки в біодобавках, що зменшує утворення сірчистого ангідриду під час згоряння палива.

Зменшення викидів NO_x:

Використання біопалив також може знизити викиди оксидів азоту (NO_x). Це пояснюється покращеною повнотою згоряння та нижчими температурами згоряння, що зменшує утворення NO_x. Дослідження показують, що біопаливо може скоротити викиди сажі принаймні на 50% та зменшити викиди парникових газів на 80% у порівнянні з традиційним реактивним паливом.

Зменшення викидів NO_x та SO₂ позитивно впливає на якість повітря, знижуючи ризики для здоров'я населення та зменшуючи кислотні дощі, які шкодять екосистемам. Високі викиди цих речовин мають прямі негативні впливи на здоров'я населення та якість довкілля[52].

Сучасні дослідження спрямовані на розробку біодобавок з різних рослинних олій та відходів, що дозволяє отримувати біопаливо з покращеними фізико-хімічними властивостями. Це сприяє зниженню викидів шкідливих речовин та підвищенню ефективності згоряння палива.

Деякі авіакомпанії вже активно впроваджують біопаливо у своїх операціях. Наприклад, Lufthansa та Virgin Atlantic здійснювали рейси з використанням біопалива, демонструючи його ефективність та екологічні переваги.

Таким чином, використання біопалив в авіації є перспективним напрямком для зменшення викидів шкідливих речовин, що позитивно впливає на довкілля та здоров'я людей. Подальші дослідження та впровадження цих технологій сприятимуть підвищенню екологічної безпеки авіаційної галузі.

Водневі паливні елементи виробляють тільки воду як побічний продукт, що робить їх екологічно чистим джерелом енергії. Використання водню може суттєво знизити викиди CO₂ та інших парникових газів, а також виключити викиди шкідливих речовин, таких як SO_x та NO_x.

Синтетичні паливні суміші можуть бути виготовлені з використанням вуглекислого газу та водню, що робить їх потенційно нейтральними щодо викидів CO₂. Крім того, синтетичні паливні суміші можуть зменшити викиди інших шкідливих речовин завдяки своїй чистій хімічній структурі[44].

Використання альтернативних палив може зменшити залежність від імпорتنих нафтопродуктів, що підвищує енергетичну безпеку країни. Розвиток виробництва біопалив може стимулювати економічний розвиток, створюючи нові робочі місця в сільському господарстві та промисловості. Зокрема, вирощування енергетичних культур для виробництва біопалив може стати додатковим джерелом доходу для фермерів.

Незважаючи на переваги, впровадження альтернативних палив в авіації стикається з низкою викликів. Серед них – необхідність адаптації існуючої інфраструктури для зберігання та транспортування біопалив, можливий вплив на продуктивність та надійність авіаційних двигунів, а також конкуренція за земельні ресурси між енергетичними та продовольчими культурами. Крім того, виробництво біопалив може вимагати значних водних та енергетичних ресурсів, що може зменшити їх екологічні переваги.

Варіанти покращення становища:

Одним з важливих напрямків є розвиток відновлюваних джерел енергії для виробництва альтернативних палив. Використання сонячної, вітрової та гідроенергії для виробництва біопалива, водню та синтетичних палив може зменшити залежність від викопних ресурсів та знизити викиди CO₂ під час виробництва палива.

Інноваційні технології виробництва альтернативних палив можуть підвищити їхню ефективність та знизити екологічний вплив. Наприклад, використання нових каталізаторів для синтезу синтетичних палив може

підвищити ефективність процесу та знизити викиди шкідливих речовин. Розробка нових методів генетичної модифікації рослин для виробництва біопалива може збільшити врожайність та підвищити вміст олій.

Забезпечення безпеки та ефективності зберігання і транспортування альтернативних палив є важливим аспектом. Розробка нових матеріалів для зберігання водню, таких як металогібридні резервуари та композитні матеріали з вуглецевими волокнами, може значно підвищити безпеку та ефективність зберігання. Також важливо забезпечити сумісність матеріалів з біопаливом та синтетичними паливами для уникнення корозії та інших проблем.

Інвестиції у наукові дослідження та розробки нових технологій для виробництва, зберігання та використання альтернативних палив можуть сприяти їхньому широкому впровадженню. Підтримка університетів, науково-дослідних інститутів та промислових компаній у цій сфері допоможе знайти нові рішення та впровадити інновації.

Підвищення обізнаності суспільства про переваги альтернативних палив та їхній вплив на навколишнє середовище може сприяти їхньому широкому впровадженню. Проведення освітніх кампаній, семінарів та тренінгів для фахівців та громадськості допоможе залучити більше людей до підтримки екологічних ініціатив[52].

Соціально-економічні вигоди для суспільства.

Впровадження альтернативних палив в авіаційній галузі може мати значні соціально-економічні вигоди для суспільства. Ці вигоди можуть сприяти поліпшенню якості життя, забезпеченню сталого економічного розвитку та зниженню екологічного впливу на навколишнє середовище. Розглянемо детальніше основні соціально-економічні вигоди від впровадження альтернативних палив.

Використання альтернативних палив дозволяє знизити залежність від викопних ресурсів, таких як нафта та газ, які є обмеженими і часто піддаються коливанням цін на світових ринках. Зменшення залежності від

викопних палив сприяє енергетичній безпеці та стабільності економіки, знижуючи ризики, пов'язані з політичними та економічними кризами. Крім того, розвиток альтернативних джерел енергії може знизити вплив нестабільності цін на нафту на економіку, забезпечуючи стабільніший та передбачуваний розвиток.

Розвиток індустрії альтернативних палив створює нові робочі місця у виробництві, науково-дослідних інститутах, технологічних компаніях та секторах, пов'язаних з відновлюваною енергією. Впровадження нових технологій вимагає кваліфікованих спеціалістів у галузі хімії, біоінженерії, машинобудування та інших технічних дисциплін. Створення нових робочих місць сприяє зниженню безробіття та підвищенню рівня зайнятості, що позитивно впливає на добробут суспільства.

Використання альтернативних палив може призвести до зниження енерговитрат та підвищення енергоефективності в авіаційній галузі, що, у свою чергу, зменшує експлуатаційні витрати авіакомпаній[54].

Використання екологічно чистих альтернативних палив зменшує викиди шкідливих речовин, таких як оксиди сірки (SO_x), азоту (NO_x) та твердих частинок, що сприяє покращенню якості повітря та зниженню рівня забруднення довкілля. Зменшення викидів шкідливих речовин має позитивний вплив на здоров'я населення, знижуючи ризики захворювань дихальних шляхів, серцево-судинних захворювань та інших медичних проблем, пов'язаних з забрудненням повітря.

Впровадження альтернативних палив сприяє сталому розвитку, оскільки вони є відновлюваними та мають менший вплив на навколишнє середовище порівняно з викопними паливами. Використання біопалива, водневих паливних елементів та синтетичних паливних сумішей дозволяє знизити викиди парникових газів та запобігти глобальному потеплінню. Стійке використання ресурсів забезпечує екологічну безпеку та збереження природних екосистем для майбутніх поколінь.

Впровадження альтернативних палив сприяє підвищенню екологічної обізнаності населення. Освітні кампанії, семінари та тренінги допомагають громадянам зрозуміти важливість екологічно чистих технологій та їхній вплив на довкілля. Це сприяє формуванню екологічної культури та підтримці сталого розвитку[33].

Розвиток альтернативних палив може сприяти розвитку малого та середнього бізнесу. Створення нових підприємств для виробництва та переробки біопалива, виробництва водневих паливних елементів та синтетичних паливних сумішей надає можливості для розвитку підприємництва та економічного зростання. Це сприяє диверсифікації економіки та зменшенню залежності від традиційних галузей.

Висновки до розділу 3

Впровадження альтернативних палив у авіаційну галузь має значний позитивний вплив як на екологію, так і на суспільство. Альтернативні палива, такі як біопаливо, водневі паливні елементи та синтетичні паливні суміші, сприяють суттєвому зменшенню викидів CO₂ та інших шкідливих речовин. Використання біопалива дозволяє знизити викиди парникових газів завдяки природному поглинанню вуглекислого газу рослинами під час росту. Водневі паливні елементи виробляють лише воду як побічний продукт, що робить їх екологічно чистими. Синтетичні паливні суміші можуть бути нейтральними щодо викидів CO₂ і зменшувати викиди інших шкідливих речовин завдяки своїй чистій хімічній структурі.

Соціально-економічні вигоди для суспільства, пов'язані з використанням альтернативних палив, є значними. Впровадження альтернативних палив сприяє створенню нових робочих місць у різних секторах економіки, включаючи сільське господарство, виробництво, наукові дослідження та інфраструктуру. Це сприяє зниженню рівня безробіття та

підвищенню добробуту населення. Зменшення залежності від імпорتنих енергоносіїв підвищує енергетичну незалежність країн, що важливо для забезпечення стабільності постачань енергії та зниження витрат на імпорт енергоносіїв. Стимулювання інновацій та технологічного розвитку сприяє підвищенню ефективності та зниженню витрат на виробництво палив, що робить їх більш доступними для широкого використання.

Покращення здоров'я населення є ще однією важливою соціально-економічною вигодою. Зменшення викидів шкідливих речовин сприяє поліпшенню якості повітря, що знижує випадки респіраторних захворювань та інших проблем зі здоров'ям. Це, в свою чергу, знижує витрати на охорону здоров'я та підвищує загальний рівень життя. Розвиток сільського господарства, пов'язаний з виробництвом біопалива, сприяє підвищенню доходів фермерів та зміцненню сільських громад. Зниження витрат на енергію для підприємств та домогосподарств сприяє економічному зростанню та підвищенню рівня життя.

Підвищення екологічної обізнаності населення завдяки впровадженню альтернативних палив сприяє формуванню екологічної культури та підтримці сталого розвитку. Підтримка малого та середнього бізнесу, пов'язана з розвитком альтернативних палив, сприяє диверсифікації економіки та зниженню залежності від традиційних галузей.

Загалом, впровадження альтернативних палив в авіаційну галузь має значний позитивний вплив на екологію та суспільство. Це сприяє зниженню викидів шкідливих речовин, покращенню якості повітря, створенню нових робочих місць, зменшенню залежності від імпорتنих енергоносіїв, стимулюванню інновацій та технологічного розвитку, покращенню здоров'я населення, розвитку сільського господарства, зниженню витрат на енергію та підвищенню екологічної обізнаності. Інвестиції у цю сферу, підтримка наукових досліджень, інновацій та освітніх програм є важливими кроками для досягнення цих цілей та забезпечення сталого розвитку суспільства.

ВИСНОВКИ

Дослідження ефективності використання альтернативних палив у повітряних суднах свідчить про їх значний потенціал у зменшенні негативного впливу авіації на довкілля та підвищенні енергетичної безпеки. Зокрема, застосування біопалив та синтетичних палив може суттєво знизити викиди CO₂ та інших шкідливих речовин, що сприяє покращенню якості повітря та боротьбі зі зміною клімату.

Однак, впровадження альтернативних палив супроводжується низкою викликів, таких як необхідність адаптації існуючих авіаційних двигунів, розбудова відповідної інфраструктури для виробництва та постачання цих палив, а також забезпечення їх економічної конкурентоспроможності порівняно з традиційними нафтопродуктами.

Для розвитку альтернативних палив в авіації необхідно розробити та впровадити національну стратегію, яка враховуватиме міжнародний досвід і специфіку України. Така стратегія має включати конкретні цілі, завдання та механізми реалізації, щоб забезпечити ефективне впровадження альтернативних палив в авіаційну галузь. Фінансування наукових досліджень слід спрямувати на вдосконалення технологій виробництва альтернативних палив, а також на адаптацію авіаційних двигунів до їх використання. Це дозволить знизити вартість виробництва та підвищити ефективність цих палив.

Важливо також запровадити економічні та податкові стимули для авіакомпаній, що переходять на використання альтернативних палив. Це може включати зниження податків, гранти на модернізацію обладнання, а також інші форми фінансової підтримки, що сприятимуть підвищенню їх конкурентоспроможності на ринку.

Інвестиції в розбудову інфраструктури для виробництва, зберігання та постачання альтернативних палив мають ключове значення для забезпечення їх доступності для авіаційної галузі. Це включає будівництво нових заводів, створення спеціалізованих терміналів на аеропортах і розробку логістичних ланцюгів постачання. Така інфраструктура забезпечить стабільне та безперебійне постачання альтернативних палив авіакомпаніям.

Міжнародна співпраця є ще одним важливим аспектом для розвитку альтернативних палив. Активна участь у міжнародних проектах, обмін знаннями та технологіями з іншими країнами та організаціями допоможе Україні впровадити передові рішення та досвід у цій сфері. Це також сприятиме створенню глобальної мережі підтримки і співпраці, що підвищить ефективність впровадження альтернативних палив в авіації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. McKinsey & Company – “Decarbonizing Aviation: Pathways to Net-Zero”
2. Air Transport Action Group (ATAG) – “Aviation Climate Solutions”
3. ICAO (International Civil Aviation Organization) – “Environmental Report”
4. Jane’s All the World’s Aircraft – “Analysis of Alternative Fuels for Aviation”
5. Кравчук М.В. – “Енергоефективність і стійкий розвиток транспортної галузі”
6. Офіційний сайт ICAO – www.icao.int
7. Офіційний сайт ASTM International – www.astm.org
8. Публікації Boeing про дослідження альтернативних палив – www.boeing.com
9. Airbus Innovation Projects – www.airbus.com
10. Lufthansa Group – www.lufthansagroup.com
11. Пакет ЄС “Fit for 55” <https://ecoaction.org.ua/paket-ies-fit-for-55.html>
12. Biofuels for aviation: Technology brief. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA), 2017. 54 p. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/IRENA_Biofuels_for_Aviation_2017.pdf
13. Водень і електрика. Як будуть їздити і літати після Ілона Маска. Dsnews.ua : веб-сайт. URL: <https://www.dsnews.ua/ukr/future/po-primeru-avtomobiley-zelenaya-revolyuetsiya-dokatilas-do-22092018220000>
14. Яковлєва А. В. Фізико-хімічні властивості палив для повітряно-реактивних двигунів, модифікованих компонентами рослинного походження : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.07. Національний авіаційний університет. Київ, 2016. 177 с.

15. Альтернативні палива для авіаційної техніки: досягнення і проблеми <https://journal-hnups.com.ua/index.php/nitps/article/view/1432>
16. "Інноваційні джерела енергії" О.О. Азюковський, Д.В. Циценков, О.В. Бобров, Н.С. Дрешпак, Розділ 3, ст. 45-67.
17. Фізико-хімічні потужності палива для повітряно-реактивних двигунів А.В. Яковлєв, Розділ 2, ст. 30-55.
18. «Альтернативні пари для авіаційної техніки: наздогнаність та проблеми» А.Ш. Бекіров, А.О. Бережний, І.А. Токарьова, Т.П. Мухіна
19. Журнал: Наука та техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, №2 (51), 2023 Сторінки: 15-20
20. "Аналіз можливостей вибору альтернативних видів палива для газотурбінних енергетичних установок на морських суднах" Н.С.У Випуск: №2 (67), 2021 Сторінки: 123
21. "Перспективи вибору альтернативних палив" Інститут відкритої енергетики НАН України Випуск: №3, 2021 Сторінки: 45-52
22. Альтернативні авіаційні паливно-мастильні матеріали. Методичні рекомендації Міністерства освіти і науки України. Національний авіаційний університет, 2022.
23. Аналіз досліджень щодо використання альтернативних видів палива для газотурбінних енергетичних установок на морських суднах. Olga Evgrafova, Academia.edu, 2021.
24. Альтернативні авіаційні паливно-мастильні матеріали. Тематичний план лекцій з дисципліни «Альтернативні авіаційні паливно-мастильні матеріали». Національний авіаційний університет, 2022.
25. Хіммотологія. Навч.-метод. посібник / Бойченко С. В., Кучма Н. М., Тітова О. С., Єфименко В. В1. – К.: НАУ, 2006.
26. Транспортна екологія. Навч. посібник / Запорожець О. І., Бойченко С. В., Матвеєва О. Л., Шаманський С. Й., Дмитруха Т. І., Маджд С. М1. – К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2017

27. Blakey, S., Rye, L., & Wilson, C. W. (2011). Авіаційні газотурбінні альтернативні палива: огляд. Праці Інституту горіння, 33 (2), 2863-2885.
28. Khandelwal, B., Karakurt, A., Sekaran, P. R., Sethi, V., & Singh, R. (2013). Літаки на водневому двигуні: майбутнє повітряного транспорту. Progress in Aerospace Sciences, 60, 45-59.
29. Хукман, С. К. (2009). Біопаливо в США – виклики та можливості. Відроджена енергетика, 34 (1), 14-22
30. Пітерс П. та Міддел Дж. (2007). Паливна ефективність комерційних літаків: огляд історичних і майбутніх тенденцій. Національна аерокосмічна лабораторія Нідерландів NLR.
31. Кім Х., Кім С. та Дейл Б. Е. (2009). Біопаливо, зміни у землекористуванні та викиди парникових газів: деякі невивчені змінні. Environmental Science & Technology, 43(3), 961-967.
32. Альтернативні авіаційні паливно-мастильні матеріали. Методичні рекомендації. Національний авіаційний університет, 2022.
33. Транспортна екологія. Запорожець О. І., Бойченко С. В., Матвеева О. Л., Шаманський С. Й., Дмитруха Т. І., Маджд С. М. - Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2017.
34. Хімотологія. Бойченко С. В., Кучма Н. М., Тітова О. С., Єфименко В. В. - К.: НАУ, 2006.
35. Дослідження альтернативних палив для авіаційних двигунів. МГТУ ім. Н. Э. Баумана, 2019.
36. Альтернативні палива в авіації: Сучасні дослідження та перспективи. Колектив авторів МДТУ ім. н. е.. Баумана, 2018 року.
37. Проєкт рекомендацій з удосконалення законодавства для розвитку використання альтернативних видів палива в авіаційному та водному транспорті України https://uabio.org/wp-content/uploads/2022/11/Pastukh_Presentation-3-1.pdf

38. International Air Transport organization. – Vision 2050. Report. – Montreal – Geneva. 87 p. 2011. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.iata.org/pressroom/facts_figures/Pages/vision-2050.aspx

39. Daggett D. L., Hendricks R.C., Walther R., Corporan E. Alternative fuels for use in commercial aircrafts // The Boeing Company. 2007. 8 p.

40. Яковлева А.В., Бойченко С.В. Причинно-наслідковий зв'язок виробництва авіаційних палив та стану навколишнього середовища // Monografia «Systems and means of motor transport». Selected problems. Seria: Transport. Rzeszow, 2012. № 3. – P. 239–246.

41. Boichenko S., Yakovleva A. Prospects of biofuels introduction into aviation // Transport engineering and management: Proceedings of the 15-th conference for Lithuania Junior researchers. Science – future of Lithuania, 4 May 2012. Vilnius: Technika. 2012. P. 90–94.

42. Франчук Г.М., Ісаєнко В.М. Екологія, авіація і космос: Навч. посібник. К.: НАУ, 2004. – 456 с

43. Чередніченко О.О. Особливості ефективного функціонування олійножирового підкомплексу // Вісник Сумського національного аграрного університету Серія «Фінанси і кредит». 2011. №1. С. 53–59.

44. Jenkins R.W., Munro M., Christopher S. N., Chuck C. Potential renewable oxygenated biofuels for the aviation and road transport sectors // Fuel. 2013. Vol. 103. P. 593–599. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.08.019

45. Яковлева А. В. Бойченко С. В., Бондарук А. В. Сировинний потенціал рижию для отримання компонентів модифікування складу авіаційного палива // Наукоємні технології №. 1 (29). 2016. С. 123–127.

46. Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons : ASTM D7655-11a. – [approved July. 15, 2011]. – ASTM International, 2011. – 22 p. (An American National Standard).

47. Паливо авіаційне для газотурбінних двигунів ДЖЕТ А-1. Технічні умови : ДСТУ 4796 :2007. – [чинний від 2007-07-05]. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 27 с. (Національний стандарт України)

48. Кулик Н.С., Аксенов А.Ф., Яновский Л.С. и др. Авиационная химмотология: топлива для авиационных двигателей. Теоретические и инженерные основы применения К.: НАУ, 2015. – 560 с.

49. Iakovlieva A., Lejda K., Vovk O., etc. Improvement of technological scheme of fatty acids ethyl esters production for use as jet fuels biocomponents // International Journal of Theoretical and Applied Science. 2014. Iss. 11(19). P. 44–55. DOI: 10.15863/tas.2014.11.19.9

50. Кириченко В. Бойченко С., Кириченко В., Нездоровин В. Комплексная переработка технических растительных масел: концепция, методы и технологии // «Systems and means of motor transport» Seria: Transport. Monografia. № 4. 2013. P. 357–370.

ASTM D1655-19. Standard Specification for Aviation Turbine Fuels. West Conshohocken: ASTM, 2019. URL: <https://www.astm.org/d1655-19.html> (дата звернення: 01.08.2024).

51. FAA Advisory Circular 43.13-1B. Acceptable Methods, Techniques, and Practices – Aircraft Inspection and Repair. Washington: FAA, 2018. URL: https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentID/99861 (дата звернення: 11.10.2024).

52. IATA Annual Review 2022. Montreal: IATA, 2022. URL: <https://www.iata.org/en/publications/annual-review/> (дата звернення: 10.10.2024).

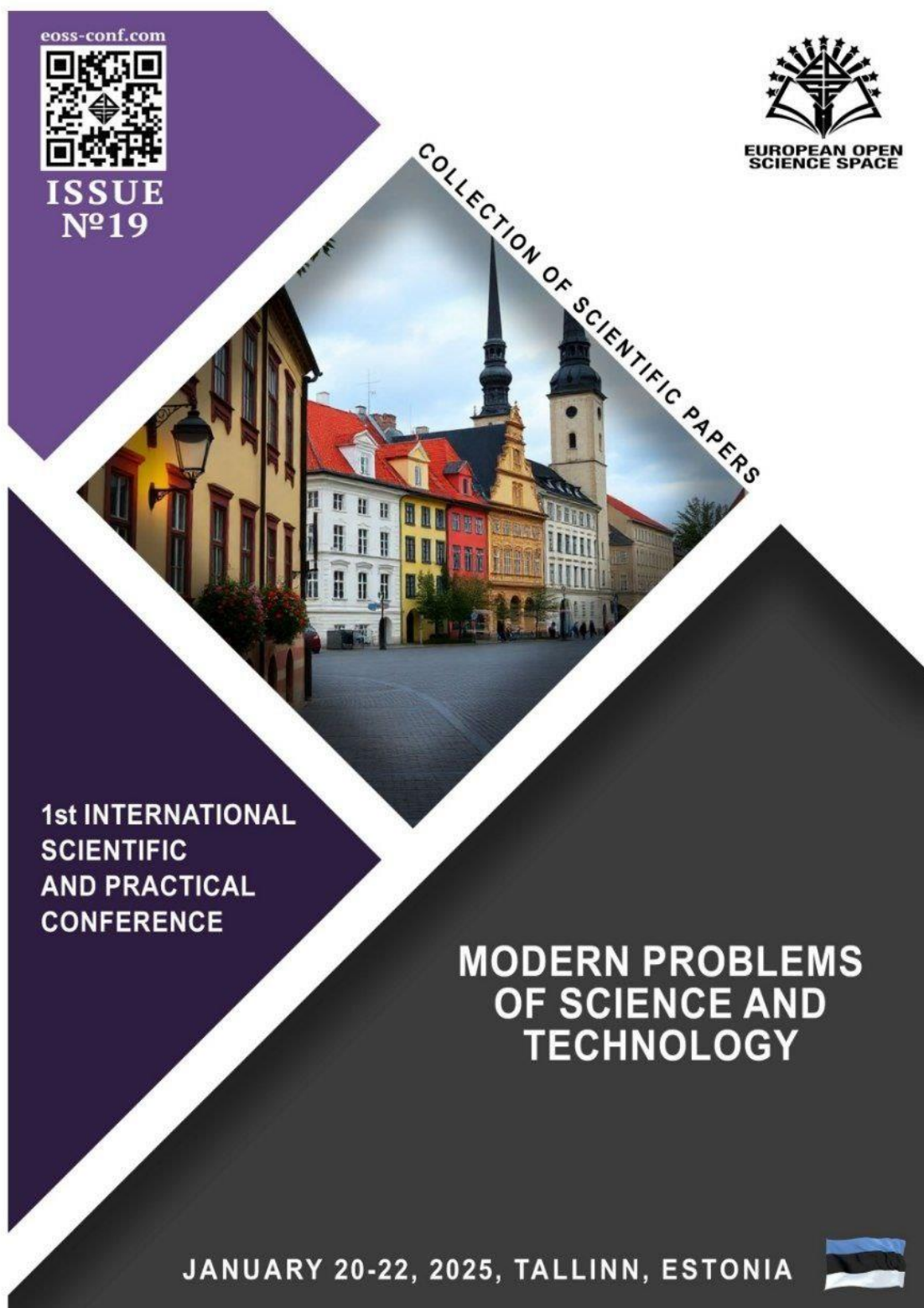
53. IATA Fuel Efficiency Report 2021. Montreal: IATA, 2021. URL: <https://www.iata.org/en/publications/store/fuel-efficiency/> (дата звернення: 10.10.2024).

54. ICAO Doc 9379. Контроль якості в авіаційній галузі. Монреаль: ICAO, 2018. URL: <https://www.icao.int/publications/pages/doc9379.aspx> (дата звернення: 02.02.2025).

55. ISO 14001:2015. Environmental management systems. Requirements. Geneva: ISO, 2015. URL: <https://www.iso.org/standard/60857.html> (дата звернення: 22.01.2025).

ДОДАТКИ

Копії публікацій за темою магістерського дослідження



Section: Logistics and Transport

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ В ПОВІТРЯНИХ СУДАХ

Чорноглазова Г.В.

к.п.н, старший викладач
 ORCID ID 0000-0002-3207-3525

Демчук М.Р.

здобувач вищої освіти магістерського рівня
 Українська державна льотна академія
 м. Кропивницький

Сучасний прогрес у розробці альтернативних палив для авіації разом із впровадженням інноваційних технологій оптимізації паливної ефективності створює нові перспективи для зниження впливу авіаційного транспорту на довкілля та підвищення його економічної доцільності. Як важлива складова критичної інфраструктури, авіація потребує технологічних рішень, які гарантують екологічну безпеку та стабільну експлуатацію. **Метою цього дослідження** є оцінка ефективності використання альтернативних палив у повітряних судах, аналіз їхнього впливу на економічні, екологічні та технічні показники, а також визначення ключових аспектів для їх впровадження. На основі вивчення основних викликів і досягнень буде розроблено рекомендації для адаптації альтернативних палив до існуючих і майбутніх потреб авіаційної галузі.

Використання біопалив (HEFA-SPK) дозволяє скоротити викиди CO₂ до 80% порівняно з традиційним авіаційним гасом, водень як паливо забезпечує нульовий викид CO₂ під час згоряння, хоча його виробництво є енергоємним, тоді як синтетичне паливо забезпечує значне зменшення парникових газів і повну сумісність із сучасними авіаційними двигунами.

Для оцінки економічної доцільності впровадження альтернативних палив в авіаційну галузь необхідно провести комплексний аналіз, який охоплює кілька ключових аспектів, зокрема витрати на виробництво, адаптацію інфраструктури та технічне обслуговування, економічні переваги, а також державну підтримку.

Що стосується витрат на виробництво, то біопаливо типу HEFA-SPK має варіативну ціну, залежно від використовуваної сировини, такої як рослинні олії або відходи. Вартість цього палива може бути на 30–50% вищою за традиційне авіаційне паливо, хоча з розвитком технологій виробництва та збільшенням масштабу його виготовлення ціни можуть знижуватися. Водень, виготовлений із використанням відновлювальних джерел енергії, має значно вищу собівартість через дорогий процес електролізу та потребу в спеціалізованих інфраструктурних рішеннях для зберігання та транспортування, що робить його менш економічно вигідним у короткостроковій перспективі. Щодо



синтетичного палива, його виробництво залишається дорогим через енергоємні технології уловлювання CO₂ і процес синтезу з воднем, а також значною мірою залежить від вартості енергоресурсів, які використовуються на різних етапах виробництва.

Крім того, важливим чинником є витрати на адаптацію існуючої інфраструктури. Біопалива та синтетичні види палива мають високу сумісність з сучасними авіадвигунами та інфраструктурою, що дозволяє знизити витрати на модернізацію існуючих систем, а також зменшує необхідність значних інвестицій у нові технології. Водночас водень потребує значних капіталовкладень у нові системи зберігання, транспортування та двигуни, що додає додаткові витрати до початкової інвестиції.

У довгостроковій перспективі економічні переваги використання альтернативних палив можуть бути суттєвими. Перш за все, впровадження таких палив може допомогти знизити операційні витрати завдяки зменшенню штрафів за викиди CO₂, а також зменшенню залежності від коливань цін на традиційне паливо, що є важливим фактором для забезпечення стабільності витрат авіакомпаній. Крім того, використання альтернативних палив може покращити конкурентоспроможність авіаперевізників, адже споживачі все більше віддають перевагу екологічно чистим перевезенням. Це дає авіакомпаніям можливість привернути увагу екологічно свідомих пасажирів, тим самим збільшуючи свою частку на ринку.

Велике значення для впровадження альтернативних палив має також державна підтримка. Багато країн вже зараз пропонують субсидії, податкові пільги та інші стимули для компаній, які інвестують у екологічно чисті технології. Це зменшує економічне навантаження на авіакомпанії та забезпечує додаткові мотивації для переходу на альтернативні види палива.

Практичні приклади з реального світу також підтверджують економічну доцільність застосування альтернативних палив. Наприклад, авіакомпанія Lufthansa вже використовує біопаливо на окремих рейсах, демонструючи економічну вигоду цього рішення при підтримці державних субсидій. Водночас компанія Boeing активно інвестує в розвиток синтетичних палив і очікує зниження їхньої собівартості в найближчі роки, що також свідчить про економічний потенціал цих технологій. У Європі деякі авіакомпанії розглядають водень як можливий варіант для використання на коротких рейсах, що також підкреслює перспективність цього палива.

Екологічне авіаційне паливо має значний потенціал для скорочення авіаційних викидів, але на даний момент воно становить лише 0,05% від загального споживання палива в авіаційній галузі.

Рада Європи ухвалила загальний підхід до пропозиції, що має на меті створення рівних умов для сталого розвитку повітряного транспорту в рамках ініціативи ReFuelEU. Ця пропозиція спрямована на збільшення попиту та пропозиції екологічно чистого авіаційного палива (SAF), включаючи синтетичне паливо. Зокрема, планується зобов'язати постачальників авіаційного палива забезпечити, щоб до 2025 року все паливо, доступне



операторам в аеропортах ЄС, містило мінімум 2% SAF, а до 2030 року – мінімальну частку синтетичного палива, з подальшим поступовим збільшенням до 2050 року. Також передбачено збільшення мінімальної частки до 6% до 2030 року. Ця ініціатива спрямована на досягнення кліматичних цілей ЄС на 2030 і 2050 роки, оскільки SAF є важливим інструментом для декарбонізації авіації в коротко- та середньостроковій перспективі.

Для ефективного впровадження альтернативних палив у комерційну авіацію необхідно забезпечити їх відповідність міжнародним стандартам, зокрема ASTM D7566, та регуляціям таких організацій, як ICAO і EASA. На державному рівні варто створити сприятливі умови шляхом розробки програм підтримки виробництва біопалива та інших стійких видів авіаційних палив (SAF). Це включає стимулювання авіакомпаній через субсидії та інші економічні механізми.

Інфраструктура аеропортів потребує модернізації для адаптації до нових типів палив, включаючи створення потужностей для їхнього зберігання, транспортування та заправки. Зокрема, необхідно впроваджувати кріогенні технології для зберігання водню та резервуари для синтетичних палив. Розвиток логістичних ланцюгів, що враховують особливості SAF, також стане важливим етапом цього процесу.

Літаки повинні бути адаптовані до нових видів палива шляхом модифікації двигунів, що дозволить працювати на біопаливі, водні чи синтетичних паливних сумішах. Випробування таких систем у реальних умовах допоможуть підтвердити їхню ефективність і безпеку. Паралельно слід розвивати гібридні технології, які поєднують використання традиційного палива та SAF.

Фінансова підтримка має охоплювати податкові пільги для авіакомпаній, які обирають екологічно чисті види палива, а також програми зеленого фінансування для стимулювання виробництва SAF. Інвестиції в дослідження та розробки технологій, таких як Fischer-Tropsch, HEFA і Power-to-Liquid, сприятимуть створенню ефективних рішень для отримання палива з відновлюваних ресурсів.

Освітні програми та тренінги мають підвищити обізнаність персоналу аеропортів і авіакомпаній щодо роботи з SAF, а також забезпечити підготовку інженерів до технічного обслуговування літаків із новими системами живлення. Інформування пасажирів про переваги стійких палив сприятиме формуванню їхньої підтримки та розуміння необхідності таких змін.

Моніторинг впливу SAF на експлуатаційні витрати, технічний стан літаків і зниження викидів шкідливих речовин дозволить оцінити їхню ефективність. Залучення незалежних експертів допоможе визначити перспективи їхнього подальшого використання та вдосконалення. Використання цих підходів сприятиме сталому розвитку авіаційної галузі та адаптації до сучасних екологічних викликів.

Комплексний аналіз економічної доцільності впровадження альтернативних палив в авіаційну галузь демонструє, що такі інновації можуть мати значні переваги. Незважаючи на початкові високі витрати на виробництво



та адаптацію інфраструктури, у довгостроковій перспективі використання біопалива, водневих паливних елементів та синтетичних палив може призвести до зниження операційних витрат, зменшення залежності від коливань цін на традиційне паливо та підвищення конкурентоспроможності авіаперевізників.

Інвестиції в нові технології виробництва та зберігання альтернативних палив, адаптація інфраструктури аеропортів та модифікація літакових двигунів є ключовими кроками для забезпечення ефективного переходу на нові види палива. Державна підтримка у вигляді субсидій, податкових пільг та програм зеленого фінансування значно сприяє впровадженню цих технологій.

Практичний досвід авіакомпаній, таких як Lufthansa та Boeing, підтверджує економічну доцільність застосування альтернативних палив за умов державної підтримки та інноваційного підходу. Модернізація інфраструктури, розвиток логістичних ланцюгів та впровадження гібридних технологій сприяють підвищенню ефективності та зниженню викидів шкідливих речовин.

Список використаних джерел

1. Пакет ЄС "Fit for 55" <https://ecoaction.org.ua/paket-ies-fit-for-55.html>
2. Biofuels for aviation: Technology brief. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA), 2017. 54 p. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/IRENA_Biofuels_for_Aviation_2017.pdf
3. Водень і електрика. Як будуть їздити і літати після Ілона Маска. Dsnews.ua : веб-сайт. URL: <https://www.dsnews.ua/ukr/future/po-primeru-avtomobiley-zelenaya-revolutsiya-dokatilas-do-22092018220000>
4. Яковлева А. В. Фізико-хімічні властивості палив для повітряно-реактивних двигунів, модифікованих компонентами рослинного походження : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.07. Національний авіаційний університет. Київ, 2016. 177 с.
5. Альтернативні палива для авіаційної техніки: досягнення і проблеми <https://journal-hnups.com.ua/index.php/nitps/article/view/1432>