

## РОЛЬ СТАЛИХ АВІАЦІЙНИХ БІОПАЛИВ У ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ СЕКТОРУ АВІАЦІЇ

*Т. А. Железна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

*E-mail: [zhelyezna@uabio.org](mailto:zhelyezna@uabio.org)*

**Анотація.** *Відновлювана енергетика, зокрема біоенергетика, робить значний внесок у заміщення викопних палив і скорочення викидів парникових газів. Це відповідає актуальному виклику на глобальному рівні – декарбонізація всіх секторів економіки, у тому числі енергетики і транспорту. Завдяки широкому використанню відновлюваних джерел енергії вже досягнуто значних успіхів у декарбонізації секторів виробництва теплової енергії і електроенергії. При цьому транспорт значно відстає від зазначених двох секторів у процесі впровадження відновлюваних енергоносіїв. Серед іншого, це пов'язано з об'єктивною важкістю електрифікації транспортного сектору і особливо це стосується авіації та водного транспорту. Із цього випливає підвищена роль біопалив у декарбонізації транспорту.*

*Нині внесок авіації у загальні викиди парникових газів у світі не перевищує 3 %. Однак, враховуючи стрімкий розвиток цього сектору і ріст споживання палив в ньому, цей внесок може суттєво збільшитися. Зважаючи на це, Міжнародна асоціація повітряного транспорту і Міжнародна організація цивільної авіації поставили за мету досягти вуглецевої нейтральності авіаційного сектору своїх членів до 2050 року. Важливо, що у реалізації цієї амбітної мети 65 % відводиться на споживання сталих авіаційних палив. В загальному сенсі сталі авіаційні палива – це біопалива і синтетичні палива, які можуть забезпечити високий рівень скорочення викидів діоксиду вуглецю порівняно із використанням викопного палива. В Євросоюзі також приділяють велику увагу питанню декарбонізації авіації, про що свідчить прийняття у 2023 році спеціального Регламенту ReFuelEU Aviation. Цим Регламентом поставлено обов'язкові цілі по частці сталих авіаційних палив у всіх аеропортах ЄС і надано більш детальне визначення поняття сталих авіаційних палив.*

*Метою роботи є визначення найбільш перспективних видів сталих авіаційних біопалив і типів сировини для їх отримання для умов України.*

*Для досягнення мети роботи виконано аналіз декількох принципових аспектів, що стосуються виробництва сталих авіаційних біопалив із наступним синтезом результатів для умов України. Цими аспектами є поточний рівень розвитку і комерціалізації технологій отримання сталих авіаційних біопалив; відповідні види сировини (біомаси) та можливості нарощування обсягів їх використання; вимоги Директиви ЄС 2018/2001 з відновлюваної енергетики щодо сталості рідких біопалив.*

**Ключові слова:** *відновлювані джерела енергії, декарбонізація, сталі авіаційні палива, авіаційні біопалива, біомаса*

**Актуальність.** Декарбонізація всіх секторів економіки та скорочення викидів парникових газів є нині нагальними питаннями на глобальному рівні. Розширення споживання відновлюваних і низьковуглецевих палив та енергоносіїв є одним з ефективних засобів вирішення зазначених проблем. У виробництві теплової і електричної енергії вже досягнуто значних успіхів з переходу на відновлювані джерела енергії (ВДЕ) завдяки використанню біомаси, енергії вітру і сонця. Так, ВДЕ забезпечують 30 % потреби в електроенергії і майже 20 % потреби в тепловій енергії у світі (дані 2023 р.). На відміну від зазначених секторів, транспорт важко піддається декарбонізації, що, серед іншого, пов'язане з обмеженістю електрифікації. Особливо це стосується секторів авіації та водного транспорту. ВДЕ, головним чином біопалива, забезпечують зараз тільки близько 6 % енергетичних потреб транспорту у світі [1]. Таким чином, сектор транспорту, зокрема авіація, потребує особливої уваги з точки зору впровадження заходів із скорочення викидів парникових газів (ПГ).

Споживання палива у глобальному секторі авіації має сталу тенденцію росту, яка тимчасово була перервана пандемією COVID-19. Лише за період 2014-2019 років річне споживання авіаційного палива зросло з 350 до 436 млрд л/рік, із «доковідним» прогнозом 446 млрд л/рік для 2020 року. У реальності використання палива комерційною авіацією у 2020 р. впало до 236 млрд л з наступним поступовим збільшенням до «доковідного» рівня після закінчення обмежень, викликаних пандемією [2]. Динаміка викидів парникових газів, зокрема діоксиду вуглецю, повторює коливання у споживанні палива. Так, емісія CO<sub>2</sub> від світової авіації зросла з 733 млн т у 2014 р. до 915 млн т у 2019 р. (3 % обсягу глобальних викидів), з падінням до 495 млн т у 2020 р. і подальшим відновленням росту. Треба зазначити, що підходи до визначення емісії CO<sub>2</sub> в залежності від обсягу спожитого палива продовжують вдосконалюватися, і одна з новітніх моделей (FEAT) була запропонована швейцарськими експертами [3].

Враховуючи нагальну потребу декарбонізації глобальної економіки, Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) у 2019-2020 рр. розробило Сценарій сталого розвитку енергетики до 2050 р. [4]. Цей сценарій ґрунтується на швидкому розвитку інноваційних технологій, у тому числі в авіації. Враховуючи майбутнє впровадження інноваційних технологій та вже існуючий ріст енергоефективності у секторі, загальне споживання палива у світовій авіації в 2040 р. прогнозується на рівні близько 395 млрд л/рік. При цьому частка сталих авіаційних палив (САП) буде складати 19 % (75 млрд л/рік).

Погляди Міжнародної асоціації повітряного транспорту (ІАТА) щодо майбутніх обсягів використання САП суттєво відрізняються від прогнозів МЕА. За оцінками ІАТА, споживання САП у 2040 р. має досягти 229 млрд л/рік, а в 2050 р. – 449 млрд л/рік. Ці цифри визначені як такі, що забезпечують виконання мети ІАТА, поставленої у 2021 р. – досягнення вуглецевої нейтральності авіаційного сектору членів асоціації до 2050 р. Ця амбітна ціль була підтверджена в 2022 р. Міжнародною організацією цивільної авіації (ІСАО). Важливо, що в забезпеченні вуглецевої нейтральності авіації 65 % відводиться саме на споживання САП [5]. Іншими заходами є впровадження нових технологій, електрифікація, використання водню (13 %); компенсація та уловлення викидів вуглецю (19 %); вдосконалення інфраструктури та підвищення операційної ефективності (3 %). Експерти визнають, що можливості використання електроенергії і водню в авіації є доволі обмеженими (тільки для відносно коротких перельотів), що ще більше підвищує роль сталих авіаційних палив. Особливо це стосується довгих перельотів, які роблять найбільший внесок у секторальні викиди парникових газів, і для яких САП фактично є основним засобом скорочення емісії ПГ.

Поточний обсяг споживання сталих авіаційних палив є дуже низьким у порівнянні з традиційним авіаційним керосином, але обсяги їх виробництва прискорено нарощуються. Так, у 2024 р. було вироблено 1250 млн л САП, що удвічі більше, ніж у 2023 р., і складає 0,3 % світового споживання реактивного палива. За підходом Міжнародної асоціації повітряного транспорту, САП – це рідкі біопалива і

синтетичні палива, які можуть забезпечити скорочення викидів діоксиду вуглецю до 80 % порівняно з компаратором викопного палива.

Питанню декарбонізації сектору авіації приділяється значна увага в Євросоюзі. Регламентом ReFuelEU Aviation (2023 р.) визначено обов'язкові цілі по об'ємній частці САП в аеропортах ЄС: 2 % з 2025 р., 70 % з 2050 р. При цьому частка синтетичних авіаційних палив має бути 1,2 % з 2030 р., 35 % з 2050 р. [6]. Визначення і трактування САП в офіційних документах ЄС дещо відрізняється від підходу IATA, що буде проаналізовано далі.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У роботі [7] розглянуто три стадії розвитку сталих авіаційних палив і пов'язані з цим глобальні стратегії. Зазначено, що виробництво та споживання САП є основним засобом декарбонізації авіаційного сектору, і розвиток цього напрямку потребує більшої підтримки. Основне виробництво САП зараз сконцентровано в Європі і США, при цьому в ЄС основним видом САП є синтетичний парафіновий керосин (СПК), отриманий з гідроочищених етерів та жирних кислот (біопаливо HEFA-SPK), а в США – СПК, отриманий за технологією конверсії спиртів (біопаливо ATJ-SPK).

Авторами [8] проаналізовано поточний стан виробництва САП у світі, розглянуто існуючі технології виробництва, представлено різні види біомаси як сировини для авіаційних біопалив, виконано порівняльний аналіз основних характеристик різних видів САП. Зроблено висновок, що нині біопаливо HEFA-SPK є найбільш придатним для комерційного виробництва, хоча його ціна залишається вище вартості традиційного реактивного палива. За умови підвищення ефективності та оптимізації технологічного процесу на комерційний рівень можуть швидко вийти біопалива ATJ-SPK і синтетичний парафіновий керосин, отриманий за технологією газифікації біомаси з наступним синтезом Фішера-Тропша (FT-SPK).

У дослідженні [9] зазначено, що здатність до повної змішуваності з традиційним реактивним паливом є основною вимогою до САП. З точки зору безпеки перельотів, сталі авіаційні палива повинні не тільки повністю відповідати специфікаціям реактивного палива, але й, можливо, деяким додатковим вимогам, наприклад, мати визначене похідне цетанове число. З іншого боку, автори

рекомендують видалити або послабити для САП вимогу по наявності ароматичних сполук в їх складі. Також пропонується вдосконалити процес сертифікації САП для забезпечення виконання всіх необхідних критеріїв сталості.

У роботі [10] представлено критичний аналіз поточного стану розвитку сектору сталих авіаційних палив; визначено проблеми, що потребують негайного вирішення для досягнення вуглецевої нейтральності світової авіації до 2050 року. Зазначено, що вартість САП залишається вищою на 20 % і більше від ціни традиційного авіаційного палива. При цьому споживання САП може забезпечити на 80 % і вище скорочення викидів CO<sub>2</sub> порівняно з викопним реактивним паливом. Рекомендовано підсилити підтримку виробників САП для збільшення обсягів виробництва, оскільки зараз багато установок працюють не на повну потужність.

**Мета дослідження** – визначення найбільш перспективних видів сталих авіаційних біопалив і типів сировини для їх отримання для умов України.

**Матеріали та методи дослідження.** Для досягнення мети роботи виконано аналіз декількох принципових аспектів, що стосуються виробництва сталих авіаційних біопалив із наступним синтезом результатів для умов України. Цими аспектами є поточний рівень розвитку і комерціалізації технологій отримання САП; відповідні види сировини (біомаси) та можливості нарощування обсягів їх використання; вимоги Директиви ЄС 2018/2001 з відновлюваної енергетики щодо сталості рідких біопалив.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Для правильного визначення перспективних видів сталих авіаційних біопалив для України необхідне точне розуміння цього поняття згідно європейського Регламенту ReFuelEU Aviation [6]. У Регламенті зазначено, що до САП відносяться авіаційні біопалива, синтетичні авіаційні палива і авіаційні палива з вторинного вуглецю (тобто вироблені з невідновлюваних відходів або відхідних промислових газів). При цьому авіаційні біопалива – це передові рідкі біопалива у сенсі Директиви ЄС 2018/2001 з відновлюваної енергетики (RED III); біопалива, вироблені з видів сировини, зазначених у частині Б Додатку IX Директиви RED III; біопалива, що відповідають

критеріям сталості та вимогам по скороченню викидів парникових газів, визначених Директивою RED III [11].

Директива ЄС 2018/2001 у своїй поточній версії віддає перевагу виробництву авіаційних біопалив і заохочує їх отримання з проміжних/покривних культур і нехарчових/некормових культур, вирощених на деградованих землях. Це видно із переліку видів сировини, включених до Додатку IX RED III, який складається з частин А і Б. Якщо проміжні/покривні культури і культури, вирощені на деградованих землях, використовуються для виробництва авіаційних біопалив, вони попадають до частини А Додатку IX, яка стосується передових (II покоління) рідких біопалив; якщо ні, то до частини Б, яка стосується рідких біопалив, обсяг виробництва яких є певним чином обмеженим для країн ЄС.

Ці аспекти є важливими для умов України, оскільки, по-перше, в країні є можливість вирощувати проміжні/покривні культури, принаймні на 20 % ріллі; по-друге, країна має кілька мільйонів гектарів деградованих земель, і їх площа тільки зростає через воєнні дії. Хоча нині в біоенергетиці України найбільш перспективним напрямком є виробництво біометану, у тому числі з проміжних/покривних культур [12], частина відповідної сировини може бути виділена для отримання САП без послаблення розвитку біометанового сектору.

Нині стандартом ASTM D7566 сертифіковано вісім технологій виробництва сталих авіаційних біопалив (таблиця). Крім того, стандартом ASTM D1655 сертифіковано процес сумісної обробки ліпідів (до 5 % у загальній суміші) та рідини Фішера-Тропша (до 5 %) з нафтопродуктами при виробництві авіаційних палив [13].

Технологія отримання HEFA-SPK є зараз єдиною, яка повністю досягла комерційного рівня, тому саме на це біопаливо припадає близько 80 % світового обсягу виробництва САП. Технологія отримання FT-SPK майже досягла такого ж високого рівня, вже працюють кілька комерційних установок. Вважається, що біопаливо FT-SPK має великі перспективи через використання лігноцелюлозної біомаси як сировини. Натомість проблемою біопалива HEFA-SPK у подальшому може стати обмежений обсяг сталої сировини (олії, жири), необхідної для значного нарощування обсягів виробництва. Крім цього, важливим аспектом для всіх САП є

досягнення необхідного рівня скорочення викидів парникових газів порівняно з компаратором викопного палива. За підходом Міжнародної організації цивільної авіації (ICAO), це скорочення має бути принаймні 10 % порівняно з компаратором 89 г CO<sub>2-екв</sub>/МДж [14]; за вимогою RED III – принаймні 65% відносно компаратора 94 г CO<sub>2-екв</sub>/МДж [11].

**Технології отримання сталих авіаційних біопалив, сертифіковані за стандартом ASTM D7566**

Біопаливо, технологія, рік сертифікації	Сировина	Максимальна частка у суміші з традиційним авіапаливом
СПК, отриманий за технологією газифікації з синтезом Фішера-Тропша (FT-SPK), 2009 р.	Тверді побутові відходи, сільськогосподарські (с/г) залишки, лісові відходи, енергетичні культури	50 %
СПК, отриманий з гідроочищених етерів та жирних кислот (HEFA-SPK), 2011 р.	Використана харчова олія, нехарчові рослинні олії, тваринні жири	50 %
Синтезовані ізопарафіни (SIP), 2014 р.	Цукри з лігноцелюлозної сировини	10 %
Синтетичний керосин з ароматичними складовими, отриманий за технологією газифікації з синтезом Фішера-Тропша (FT-SKA), 2015 р.	Тверді побутові відходи, с/г залишки, лісові відходи, енергетичні культури	50 %
СПК, отриманий за технологією конверсії спиртів – ізобутанолу (2016 р.) та етанолу (2018 р.) (ATJ-SPK)	Цукри з лігноцелюлозної сировини	50 %
СПК, отриманий з гідроочищених вуглеводнів, етерів та жирних кислот (HC-HEFA), 2020 р.	Олія з мікрободоростей	10 %
Біопаливо, отримане каталітичним гідротермолізом (CHJ), 2020 р.	Рослинна олія, жирові та олійні відходи	50 %
Синтетичний керосин з ароматичними складовими, отриманий за технологією конверсії спиртів (C <sub>2</sub> -C <sub>5</sub> ) (ATJ-SKA), 2023 р.	Цукри з лігноцелюлозної сировини	50 %

Враховуючи існуючий рівень розвитку технологій та їх складність, для України видається доцільним розглянути можливість виробництва біопалива HEFA-SPK. Особливістю цієї технології є те, що фракції HEFA-SPK (20-55 %) можуть сепаруватися при виробництві гідрогенізованої рослинної олії (HVO), яку також називають відновлюваним дизелем. Технологічний процес отримання HVO є добре розвиненим і встановленим у світі; будь-яка установка з виробництва

відновлюваного дизелю при необхідності може зсунути процес у бік більшого обсягу фракцій авіаційного біопалива.

Для умов України рижій рекомендується як сировина для виробництва HEFA-SPK. Перевагою цієї культури є те, що її олія використовується, переважно, на технічні потреби і дуже обмежено споживається як харчова. Отже, у разі експорту до ЄС біопалива, отриманого з олії рижію, є висока ймовірність довести сталість сировини, тобто підтвердити, що не створюється конкуренція виробництву продуктів харчування. Результати попереднього техніко-економічного обґрунтування показують, що для забезпечення прибутковості проєктів з виробництва HEFA-SPK необхідна державна підтримка, принаймні на етапі розвитку цього напрямку [15]. Це відповідає міжнародній практиці, оскільки вартість САП залишається помітно вищою за ціну традиційного реактивного палива [10].

Доволі складною практичною проблемою є забезпечення необхідного рівня скорочення викидів парникових газів при виробництві рідких біопалив. Про це свідчать результати оцінки життєвого циклу виробництва авіаційного біопалива HEFA-SPK з олії рижію. Найвищі рівні емісії парникових газів припадають на етапи вирощування рижію, збирання насіння (46 % від загального) і виробництва самого біопалива (42,5 %). Великі викиди ПГ при вирощуванні пов'язані із застосуванням азотних добрив, які є джерелом емісії закису азоту ( $N_2O$ ). Оскільки закис азоту має високий коефіцієнт потенціалу глобального потепління (298 г  $CO_{2\text{екв.}}$ /г  $N_2O$  згідно RED III), він робить значний внесок у загальний обсяг емісії ПГ (24,1 %). При виробництві HEFA-SPK використовуються водень і природний газ, що також помітно збільшує загальні викиди ПГ. Внесок (невідновлюваного) водню становить 22 %, природного газу – майже 20 %.

Для скорочення емісії парникових газів протягом життєвого циклу HEFA-SPK можна запропонувати кілька напрямків. На етапі виробництва біопалива це використання «зеленого» водню або біометану; на «сировинному» етапі – вирощування рижію як проміжної культури. Існують дані, що в останньому випадку викиди ПГ при вирощуванні можуть скоротитися на 13,4...15,3 г  $CO_{2\text{-екв.}}$ /МДж [13,

16]. Це забезпечує рівень викидів ПГ протягом життєвого циклу 27...29 г CO<sub>2-екв</sub>/МДж, що цілком відповідає вимогам Директиви ЄС 2018/2001 з відновлюваної енергетики (RED III).

**Висновки і перспективи.** Виробництво авіаційного біопалива HEFA-SPK з олії рижію видається перспективним напрямком розвитку біоенергетики України. Цей напрямок є інноваційним і відповідає сучасним тенденціям розвитку відновлюваної енергетики у транспортному секторі. Вирощування рижію як проміжної культури дає можливість помітно скоротити викиди парникових газів на «сировинному» етапі життєвого циклу біопалива і досягти необхідного скорочення загальної емісії ПГ – 65% від компаратора викопного палива 94 г CO<sub>2-екв</sub>/МДж згідно Директиви RED III.

У середньостроковій перспективі можна розглянути використання біометану замість природного газу при виробництві HEFA-SPK. Біометановий сектор зараз стрімко розвивається в Україні, і це може бути одним з варіантів його застосування. У довгостроковій перспективі рекомендується оцінити можливості запровадження й інших технологій отримання САП – конверсія спиртів (біопаливо ATJ-SPK) і газифікація лігноцелюлозної біомаси з подальшим синтезом Фішера-Тропша (біопаливо FT-SPK). У будь-якому випадку, подальші дослідження у сфері авіаційних біопалив мають полягати у виконанні всебічних техніко-економічних обґрунтувань та проведенні оцінок життєвого циклу. Виробництво САП в Україні для внутрішнього споживання та експорту зробить значний внесок у декарбонізацію національного і загальноєвропейського авіаційного сектору.

#### Список використаних джерел

1. Renewables. Analysis and forecast to 2030. IEA Report, 2024. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/17033b62-07a5-4144-8dd0-651cdb6caa24/Renewables2024.pdf> (дата звернення: 18.03.2025)
2. Marszalek N., Lis T. The future of sustainable aviation fuels. *Combustion Engines*. 2022. 191(4). P. 29-40. <https://doi.org/10.19206/CE-146696>
3. Seymour K., Held M., Georges G., Boulouchos K. Fuel Estimation in Air Transportation: Modeling global fuel consumption for commercial aviation. *Transportation Research Part D*. 2020. V. 88, 102528. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102528>
4. Energy Technology Perspectives. Special Report on Clean Energy Innovation. IEA, 2020 URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/04dc5d08-4e45-447d-a0c1->

[d76b5ac43987/Energy Technology Perspectives 2020 -](https://www.iea.org/publications/energy-technology-perspectives-2020)

[Special Report on Clean Energy Innovation.pdf](#) (дата звернення: 20.03.2025)

5. Susan van Dyk, Jack Saddler. Project Report: Update on developments in SAF/biojet fuel commercialisation. IEA Bioenergy Task 39 seminar, 10 October 2024. URL: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/10/IEA-Bioenergy-T39-Webinar-October-2024.pdf> (дата звернення: 20.03.2025)

6. Regulation (EU) 2023/2405 of 18.10.2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport (ReFuelEU Aviation). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02023R2405-20231031> (дата звернення: 20.03.2025)

7. Wang B., Ting Zh.J., Zhao M. Sustainable aviation fuels: Key opportunities and challenges in lowering carbon emissions for aviation industry. *Carbon Capture Science & Technology*. 2024. V. 13, 100263. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100263>

8. Md Fahim Shahriar, Aaditya Khanal. The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF). *Fuel*. 2022. V. 325, 124905. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124905>

9. Kramer S., Andac G., Heyne J.S. et al. Perspectives on Fully Synthesized Sustainable Aviation Fuels: Direction and Opportunities. *Front. Energy Res.* 2022. V. 9, 782823. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.782823>

10. Watson M.J., Machado P.G., da Silva A.V. et al. Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: A critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2024. V. 449, 141472. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141472>

11. Directive (EU) 2018/2001 of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02018L2001-20240716> (дата звернення: 19.03.2025)

12. Железна Т.А., Драгнев С.В. Аналіз підходів до використання проміжних культур як сировини для виробництва біометану в Україні. *Енергетика і автоматика*. 2024. № 3. С. 121-131. [http://dx.doi.org/10.31548/energiya3\(73\).2024.121](http://dx.doi.org/10.31548/energiya3(73).2024.121)

13. Susan van Dyk, Jack Saddler. Progress in Commercialization of Biojet/Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies and Policies. IEA Bioenergy: Task 39, 2024. URL: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/06/IEA-Bioenergy-Task-39-SAF-report.pdf> (дата звернення: 19.03.2025)

14. CORSIA Eligible Fuels – Life Cycle Assessment Methodology. CORSIA Supporting Document, 2019. URL: <https://bit.ly/3VMwdh9> (дата звернення: 19.03.2025)

15. Железна Т.А., Драгнев С.В., Баштовий А.І. Перспективи використання біопалив другого покоління як авіаційного палива. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2022. Т. 44, № 2. С. 54-63. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.7>

16. Taheripour F., Sajedinia E., Karami O. Oilseed Cover Crops for Sustainable Aviation Fuels Production and Reduction in Greenhouse Gas Emissions Through Land Use Savings. *Front. Energy Res.* 2022. V. 9, 790421. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.790421>

## References

1. Renewables. Analysis and forecast to 2030. IEA Report (2024). URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/17033b62-07a5-4144-8dd0-651cdb6caa24/Renewables2024.pdf> (дата звернення: 18.03.2025)
2. Marszalek N., Lis T. (2022). The future of sustainable aviation fuels. *Combustion Engines*, 191(4), 29-40. <https://doi.org/10.19206/CE-146696>
3. Seymour, K., Held, M., Georges, G., Boulouchos, K. (2020). Fuel Estimation in Air Transportation: Modeling global fuel consumption for commercial aviation. *Transportation Research Part D.*, 88, 102528. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102528>
4. Energy Technology Perspectives. Special Report on Clean Energy Innovation. IEA, (2020). URL: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/04dc5d08-4e45-447d-a0c1-d76b5ac43987/Energy\\_Technology\\_Perspectives\\_2020\\_-\\_Special\\_Report\\_on\\_Clean\\_Energy\\_Innovation.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/04dc5d08-4e45-447d-a0c1-d76b5ac43987/Energy_Technology_Perspectives_2020_-_Special_Report_on_Clean_Energy_Innovation.pdf) (дата звернення: 20.03.2025)
5. Susan van Dyk, Jack Saddler. Project Report: Update on developments in SAF/biojet fuel commercialisation. IEA Bioenergy Task 39 seminar, 10 October 2024. URL: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/10/IEA-Bioenergy-T39-Webinar-October-2024.pdf> (дата звернення: 20.03.2025)
6. Regulation (EU) 2023/2405 of 18.10.2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport (ReFuelEU Aviation). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02023R2405-20231031> (дата звернення: 20.03.2025)
7. Wang, B., Ting, Zh.J., Zhaom M. (2024). Sustainable aviation fuels: Key opportunities and challenges in lowering carbon emissions for aviation industry. *Carbon Capture Science & Technology*, 13, 100263. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100263>
8. Md Fahim Shahriar, Aaditya Khanal (2022). The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF). *Fuel*, 325, 124905. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124905>
9. Kramer, S., Andac, G., Heyne, J.S. et al. (2022). Perspectives on Fully Synthesized Sustainable Aviation Fuels: Direction and Opportunities. *Front. Energy Res.*, 9, 782823. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.782823>
10. Watson, M.J., Machado, P.G., da Silva, A.V. et al. (2024). Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 449, 141472. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141472>
11. Directive (EU) 2018/2001 of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02018L2001-20240716> (дата звернення: 19.03.2025)
12. Zheliezna, T. A., Drahnev, S. V. (2024). Analiz pidkhodiv do vykorystannia promizhnykh kultur iak syrovyny dlia vyrobnytstva biometanu v Ukraini [Analysis of approaches to the use of intermediate crops as feedstock for biomethane production in Ukraine]. *Energy and Automation*, 3, 121-131. [http://dx.doi.org/10.31548/energiya3\(73\).2024.121](http://dx.doi.org/10.31548/energiya3(73).2024.121)
13. Susan van Dyk, Jack Saddler. Progress in Commercialization of Biojet/Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies and Policies. IEA Bioenergy: Task 39, 2024. URL: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/06/IEA-Bioenergy-Task-39-SAF-report.pdf> (дата звернення: 19.03.2025)

14. CORSIA Eligible Fuels – Life Cycle Assessment Methodology. CORSIA Supporting Document, 2019. URL: <https://bit.ly/3VMwdh9> (дата звернення: 19.03.2025)

15. Zheliezna, T. A., Drahnev, S. V., Bashtovyi, A. I. (2022). Perspektyvy vykorystannia biopalyv drugogo pokolinnia iak aviatsiinogo palyva [Prospects for the use of second generation biofuels as jet fuel]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 45(2), 54-63. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2022.7>

16. Taheripour, F., Sajedinia, E., Karami, O. (2022). Oilseed Cover Crops for Sustainable Aviation Fuels Production and Reduction in Greenhouse Gas Emissions Through Land Use Savings. *Front. Energy Res.*, 9, 790421. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.790421>

## ROLE OF SUSTAINABLE AVIATION BIOFUELS IN THE DECARBONISATION OF AVIATION SECTOR

*T. Zheliezna*

**Abstract.** *Renewable energy, in particular bioenergy, makes a significant contribution to replacing fossil fuels and reducing greenhouse gas emissions. This is in line with the current challenge at the global level – the decarbonization of all sectors of the economy, including energy and transport. Due to the widespread use of renewable energy sources, significant progress has already been made in the decarbonization of the heat and electricity production sectors. At the same time, transport lags significantly behind these two sectors in introducing renewable energy carriers. Among other things, this is on account of the objective difficulty of electrifying the transport sector, and this especially applies to aviation and water transport. This determines an increased role of biofuels in the decarbonization of transport.*

*Today, the contribution of aviation to the global greenhouse gas emissions does not exceed 3%. However, given the rapid development of this sector and the growth in fuel consumption in it, this contribution can increase significantly. In view of this, the International Air Transport Association and the International Civil Aviation Organization have set a goal of achieving carbon neutrality in aviation by 2050. It is important that in the implementation of this ambitious goal, 65% is allocated to the consumption of sustainable aviation fuels. In a general sense, sustainable aviation fuels are biofuels and synthetic fuels that can provide a high level of reduction in carbon dioxide emissions compared to the use of fossil fuels. The European Union also pays considerable attention to the issue of decarbonization of aviation, as evidenced by the adoption of a special ReFuelEU Aviation Regulation in 2023. This Regulation sets mandatory targets for the share of sustainable aviation fuels at all the EU airports and provides a more detailed definition of sustainable aviation fuels.*

*The aim of the work is to identify the most promising types of sustainable aviation biofuels and kinds of feedstock for their production for the conditions of Ukraine.*

*To achieve the goal of the work, an analysis of several fundamental aspects related to the production of sustainable aviation biofuels was performed, followed by a synthesis of the results for Ukraine's conditions. These aspects include the current level of development and commercialization of technologies for obtaining sustainable aviation biofuels; relevant types of feedstock (biomass) and the possibilities of increasing their use;*

*the requirements of Directive (EU) 2018/2001 (RED III) regarding the sustainability of liquid biofuels.*

**Key words:** *renewable energy sources, decarbonization, sustainable aviation fuels, aviation biofuels, biomass*