

Перспективи виробництва в Україні сталого авіаційного біопалива шляхом конверсії біоетанолу

Тетяна Железна

Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна

ORCID 0000-0002-9607-3022

Анотація: Проаналізовано перспективи виробництва в Україні сталого авіаційного біопалива шляхом конверсії біоетанолу. Актуальність питання пов'язана з нагальною необхідністю декарбонізації глобального сектору транспорту, зокрема авіації. Виділяють декілька напрямків для скорочення викидів парникових газів в авіації. Із них найбільший внесок може зробити використання сталих авіаційних палив (САП), які є альтернативою традиційному реактивному паливу. Зазвичай поняття САП включає біопалива і синтетичне паливо, отримане шляхом конверсії електроенергії в рідину. На сьогодні існує вісім технологій виробництва сталих авіаційних біопалив, сертифікованих стандартом ASTM D7566. Максимальна дозволена частка у суміші з традиційним реактивним паливом коливається у межах 10-50% для різних видів біопалив. Крім того, стандартом ASTM D1655 сертифіковано процес сумісної гідрообробки естерів та жирних кислот а також вуглеводнів Фішера-Тропша з традиційними нафтопродуктами при виробництві авіаційних палив – до 5% у загальній суміші в обох випадках. Авіаційне біопаливо HEFA-SPK, яке отримується з гідроочищених естерів та жирних кислот, зараз є єдиним біопаливом, технологія виробництва якого повністю досягла комерційного рівня. Також у світі з'являються перші комерційні установки з виробництва біопалива ATJ-SPK шляхом конверсії ізобутанолу та біоетанолу. Доцільно розглянути можливості виробництва цих авіаційних біопалив в Україні.

Виробництво біопалива ATJ-SPK в Україні можна організувати шляхом будівництва нового заводу і купівлі біоетанолу як сировини або шляхом доповнення вже існуючого біоетанольного заводу необхідним новим обладнанням. Для умов України можна запропонувати реалізацію пілотного проєкту на одному з нових сучасних заводів. Такі підприємства характеризуються високою енергетичною ефективністю, що дозволить мінімізувати енергетичні витрати на виробництво САП. Для визначення оптимальних варіантів виробництва сталих авіаційних біопалив необхідне проведення техніко-економічного обґрунтування і виконання оцінки життєвого циклу цих біопалив.

Ключові слова: сталі авіаційні палива, біопалива, біоетанол, синтетичний парафіновий керосин, конверсія спиртів.

1. Вступ

Проблемі декарбонізації транспорту, у тому числі авіації, приділяється значна увага у світі. Порівняно з секторами виробництва теплової і електричної енергії, транспорт вважається важким для декарбонізації. Однією з причин цього є обмеженість впровадження електрифікації, що особливо стосується авіації. Хоча поточний внесок авіації у загальні викиди парникових газів становить зараз лише 2-3%, без запровадження відповідних заходів цей сектор може викликати підвищення глобальної температури на 0,1 °C до 2050 року [1]. У відповідь на цей виклик Міжнародна організація цивільної авіації (ICAO) і Міжнародна асоціація повітряного транспорту (IATA) поставили за мету досягнення вуглецевої нейтральності сектору авіації для своїх членів (авіаліній, країн) до 2050 року. Для виконання цієї мети IATA визначила чотири напрямки – споживання сталих авіаційних палив (САП), на

що відводиться 65% загального скорочення викидів діоксиду вуглецю, компенсація та уловлення вуглецю (19%), використання водню та/або електроенергії (13%), підвищення оперативної ефективності сектору (3%). Підготовлено п'ять відповідних дорожніх карт, одна з яких передбачає розробку більш ефективних повітряних суден і двигунів для можливості роботи на 100% САП [2]. У підході ІКАО до досягнення вуглецевої нейтральності авіації також основна роль відводиться сталим авіаційним паливам, від споживання яких очікується 59-64% загального скорочення емісії CO₂. Інші заходи передбачають підвищення технічної (16%) і оперативної (16%) ефективності повітряних суден, використання водню (4-5%), зменшення кількості перельотів за рахунок розвитку високошвидкісних залізниць (2-3%) [3, 4].

У період з 2019 року загальні викиди парникових газів (ПГ) від світової авіації скоротилися на 8% до близько 0,94 млрд т CO_{2екв}/рік. Оскільки у 2023 році обсяг авіаційних перевезень практично досяг «доковідного» рівня, досягнуте скорочення викидів можна вважати результатом практичної реалізації заходів з декарбонізації. В першу чергу це стосується споживання сталих авіаційних палив, яке зросло до близько 1 млрд л/рік.

Сталі авіаційні палива – це рідкі біопалива і синтетичні палива, які зараз використовується в комерційній авіації, і здатні зменшити викиди парникових газів до 80% порівняно з традиційним реактивним паливом. При цьому формальною вимогою ІКАО до сталих авіаційних палив є здатність скорочувати емісію ПГ принаймні на 10% [5]. Це видається доволі «м'яким» підходом порівняно з позицією ЄС в даному питанні. Згідно Директиви ЄС 2018/2001 з відновлюваної енергетики (Директива RED III), скорочення викидів ПГ від використання рідких біопалив на транспорті має бути принаймні 65% відносно компаратора викопного палива – 94 г CO_{2-екв}/МДж [6].

Авіаційні біопалива можуть вироблятися з різних видів сировини, включаючи відпрацьовані жири, олії та мастила, тверді побутові відходи, сільськогосподарські та лісові залишки, а також непродовольчі культури, вирощені на маргінальних землях. Для цього застосовуються олеохімічний, термохімічний та біохімічний види конверсії. Синтетичне паливо отримується шляхом електролізу води за технологіями перетворення електроенергії у рідину (синтез Фішера-Тропша або синтез через метанол як проміжний продукт) [7].

Зазначені види авіаційного палива вважаються сталими, оскільки їх виробництво не створює конкуренції отриманню продуктів харчування, не вимагає додаткового використання земельних і водних ресурсів і не викликає таких екологічних проблем як обезліснення, погіршення якості ґрунту та втрата біорізноманіття [8]. Треба зазначити, що у Регламенті ЄС ReFuelEU Aviation до САП також віднесено авіаційні палива з вторинного вуглецю – рідкі палива, вироблені з невідновлюваних відходів або відхідних промислових газів [6, 9]. Регламент ReFuelEU Aviation, прийнятий у 2023 р., визначив обов'язкові цілі ЄС щодо обсягів споживання САП, в результаті чого попит на дані палива в ЄС суттєво збільшився. Цей Регламент є складовою законодавчого пакету “Fit for 55”, який спрямований на досягнення скорочення викидів ПГ в ЄС принаймні на 55% до 2030 року.

Протягом 2007-2015 рр. виробництво САП у світі не перевищувало 1-1,5 млн л/рік; помітний ріст почався з 2016 р. після прийняття ІКАО Системи компенсації та скорочення викидів вуглецю для міжнародної авіації (CORSIA). Поточний обсяг виробництва САП становить близько 1,2 млрд л/рік, при цьому у 2023 р. і 2024 р. мале місце подвоєння обсягу порівняно з попереднім роком. Основні виробники сталих авіаційних палив знаходяться в США (World Energy, Alder Fuels, SkyNRG та інші) і в Європі, наприклад, Neste (Фінляндія), Swedish Biofuels (Швеція), Avioxx (Об'єднане Королівство). В США основним видом САП є біопаливо, отримане шляхом конверсії спиртів (ізобутанолу, біоетанолу) – синтетичний парафіновий керосин ATJ-SPK. В Європі виробляється головним чином біопаливо HEFA-SPK, яке отримується з олійної сировини гідроочищенням естерів та жирних кислот. Іншими видами САП на європейському ринку є ATJ-SPK, синтетичний парафіновий керосин, вироблений за технологією газифікації лігноцелюлозної біомаси з синтезом Фішера-Тропша (FT-SPK) та

синтетичне паливо, отримане конверсією електроенергії в рідину (PtL). Поточні виробничі потужності САП в Європі оцінюються у 7,2 млн т/рік для біопалива HEFA-SPK, 700 тис. т/рік для FT-SPK, 400 тис. т/рік для ATJ-SPK і 200 тис. т/рік для синтетичного палива PtL [1].

На сьогодні стандартом ASTM D7566 сертифіковано вісім технологій виробництва сталих авіаційних біопалив. Першою (2009 р.) була технологія отримання синтетичного парафінового керосину шляхом газифікації біомаси з наступним синтезом Фішера-Тропша (біопаливо FT-SPK). Останньою, сертифікованою на даний момент (кінець 2023 р.), є технологія виробництва синтетичного керосину з ароматичними складовими шляхом конверсії спиртів (біопаливо ATJ-SKA). Цей процес був розроблений і доведений до рівня сертифікації шведською компанією Swedish Biofuels. Максимальна дозволена частка у суміші з традиційним реактивним паливом коливається у межах 10-50% для різних видів авіаційних біопалив. Додатково до технологій САП, стандартом ASTM D1655 сертифіковано процес сумісної гідрообробки естерів та жирних кислот а також вуглеводнів Фішера-Тропша з традиційними нафтопродуктами при виробництві авіаційних палив – до 5% у загальній суміші в обох випадках.

Найбільш розвиненою і комерційно зрілою вважається технологія гідроочищення естерів та жирних кислот, яка досягла найвищих показників 8-9 за шкалою рівнів готовності технологій (табл. 1). Завдяки цьому біопаливо HEFA-SPK забезпечує сьогодні близько 80% загального обсягу САП. Високий рівень розвитку даної технології пояснюється тим, що HEFA-SPK може сепаруватися як окрема фракція при виробництві гідроочищеної рослинної олії (HVO), яку також називають відновлюваним дизелем. Зазвичай, установки з отримання HVO можуть сепарувати 20-50% фракції HEFA-SPK із загального обсягу кінцевих продуктів, а за умови застосування спеціальних заходів ця частка може збільшитися і до 70%. Останнє має місце, коли власник установки віддає перевагу виробництву авіаційного біопалива, а не відновлюваного дизеля. Така ситуація є цілком реальною, враховуючи динамічно зростаючий попит на сталі авіаційні біопалива у світі. Вже спостерігається тенденція, що нові установки, які працюють за технологією гідроочищення естерів та жирних кислот, зразу налаштовані на максимальне отримання фракції HEFA-SPK.

Таблиця 1. Рівень готовності технологій виробництва САП, затверджених стандартом ASTM D7566 [10].

Вид сталого авіаційного біопалива, рік затвердження	Рівень готовності технології*
Синтетичний парафіновий керосин (СПК), отриманий з гідроочищених естерів та жирних кислот (HEFA-SPK), 2011 р.	8-9 (9 [11])
СПК, отриманий за технологією конверсії спиртів – ізобутанолу/етанолу (ATJ-SPK), 2016 р./2018 р.	6-9 (7-8 [11])
Синтетичний керосин з ароматичними складовими, отриманий за технологією конверсії спиртів (ATJ-SKA), 2023 р.	6-8
СПК, отриманий за технологією газифікації з синтезом Фішера-Тропша (FT-SPK), 2009 р.	6-8 (7-8 [11])
СПК з ароматичними складовими, отриманий за технологією газифікації з синтезом Фішера-Тропша (FT-SPK/A), 2015 р.	6-8
Біопаливо, отримане каталітичним гідротермолізом (CHJ), 2020 р.	6-8
СПК, отриманий з гідроочищених естерів та жирних кислот з попередньою обробкою вуглеводнів (HC-HEFA-SPK), 2020 р.	1-5
Синтезовані ізопарафіни (SIP), 2014 р.	1-5 (5-7 [11])

* Шкала від 1 до 9, де 9 відповідає найбільш зрілій технології.

Потенційною проблемою, яка у майбутньому може завадити нарощуванню обсягів виробництва авіаційного біопалива HEFA-SPK, є обмежений потенціал сталих видів

сировини. Принаймні, ця проблема стосується ЄС, де Директива 2018/2001 з відновлюваної енергетики визначає критерії сталості рідких біопалив. Сталими видами сировини для HEFA-SPK вважаються жирові та олійні відходи, економічно-доцільний потенціал яких до 2030 р. оцінюється у 2,4 млн т/рік (табл. 2). При цьому аналогічний потенціал сировини для отримання інших видів САП є на порядок і більше вищим. Таким чином, в ЄС є сенс нарощувати потужності виробництва САП, в першу чергу, за технологіями конверсії спиртів (ATJ-SPK, ATJ-SKA) та газифікації лігноцелюлозної біомаси з наступним синтезом Фішера-Тропша (FT-SPK). Ці технології мають найвищий рівень готовності (6-8, 6-9) після біопалива HEFA-SPK (див. табл. 1). Існують плани по будівництву більше 15 нових установок по виробництву FT-SPK (ЄС, Об'єднане Королівство, США) та близько 20 установок по отриманню ATJ-SPK (Японія, США, Європа) [7].

Таблиця 2. Потенціал різних видів біомаси для виробництва САП в ЄС [12].

Вид біомасової сировини	Теоретичний потенціал, млн т, 2030 р.	Економічний потенціал*, млн т, 2030 р.	Теоретичний потенціал, млн т, 2050 р.
Олійні та жирові відходи	5,3	2,4	9,9
Органічна фракція твердих побутових відходів	44-80	21,2	33-61
Сільськогосподарські залишки	45-65	87,7	65-71
Покривні культури	36-108		42-127
Первинні залишки лісового господарства	41-68	5,1	45-75
Вторинні залишки лісового господарства	89-126		93-139

* Враховує інші напрямки використання біомаси.

Для країн ЄС особливо вигідно виробляти авіаційне біопаливо з видів сировини, перелічених у частині А Додатку IX Директиви RED III. Таке біопаливо вважається передовим (другого покоління); його споживання зараховується подвійно по енергетичному вмісту у виконання цілей країн ЄС по частці відновлюваної енергії на транспорті. До відповідних видів сировини, серед іншого, відносяться різні види лігноцелюлозної біомаси, водорості, проміжні культури, енергетичні нехарчові рослини, вирощені на деградованих землях.

2. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є технологія виробництва сталого авіаційного палива шляхом конверсії біоетанолу (рис. 1). Предметом дослідження є технічні та економічні характеристики цієї технології. На сьогодні недостатньо робіт з аналізу технології виробництва САП шляхом конверсії біоетанолу з точки зору можливості її впровадження в Україні.



Рисунок 1. Блок-схема отримання авіаційного біопалива ATJ-SPK з біоетанолу [10].

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – оцінити можливості запровадження виробництва САП АТJ-SPK з біоетанолу в Україні.

Задачі дослідження:

1. Проаналізувати можливі модельні рішення організації виробництва сталого авіаційного палива шляхом конверсії біоетанолу.
2. Провести попередній порівняльний аналіз витрат, необхідних для реалізації цих модельних рішень.
3. Виконати ранжування можливих модельних рішень організації виробництва за рівнем доцільності в умовах України.

4. Аналіз літератури

Тематиці виробництва та споживання сталих авіаційних палив вже присвячено чимало досліджень. Одні являють собою огляди та охоплюють широкий спектр питань, інші висвітлюють окремо взятий напрямок. Прикладом огляду є дослідження [1], де представлено стадії розвитку сектору САП і відповідні глобальні політики та стратегії; проаналізовано ринок САП у різних регіонах світу; розглянуто стратегії стимулювання сектору в США, Об'єднаному Королівстві, Євросоюзі. Проаналізовано технології отримання сталих авіаційних палив з твердих органічних відходів; розглянуто процеси сертифікації та стандартизації САП. Для чотирьох видів САП оцінено структуру виробничих витрат. Так, наприклад, для біопалива АТJ-SPK найбільші частка припадає на операційні витрати (близько 40%), за якими слідують витрати на сировину (25%), на обробку виробничих стічних вод (25%) і на водень (10%). Принципово схожу структуру виробничих витрат, але з більшим внеском операційних витрат (>50%), мають біопалива HEFA-SPK і FT-SPK. Для синтезованих ізопарафінів SIP ця структура є більш однорідною для всіх чотирьох складових. Наведені в роботі дані є важливими, оскільки показують можливі напрямки вдосконалення технологій для здешевлення собівартості виробництва. На сьогодні сталі авіаційні палива є помітно дорожчими за традиційне реактивне паливо, особливо якщо сировиною є лігноцелюозна біомаса. На думку авторів, технології виробництва біопалив FT-SPK і АТJ-SPK з лігноцелюозної сировини ще не досягли комерційного рівня.

В оглядовому звіті Міжнародного енергетичного агентства [7] проаналізовано поточний стан комерціалізації технологій виробництва САП, розглянуто існуючі проблеми та перспективи розвитку. Очікується, що біопаливо HEFA-SPK продовжить домінувати на ринку сталих авіаційних біопалив до 2030 року. Відомо про плани будівництва більше 50 відповідних установок в США, Канаді, Європі, Південній Америці, Азії. При виробництві синтетичного парафінового керосину FT-SPK етап, пов'язаний з синтезом Фішера-Тропша, є повністю комерційним; доопрацювання потребують етапи газифікації біомаси та логістики постачання біомасової сировини. Зазначено очевидний прогрес у розвитку технології конверсії спиртів в авіаційне біопаливо АТJ-SPK, оскільки перші комерційні установки вже будуються і зазначили терміни початку своєї роботи. В основному, мова іде про конверсію біоетанолу першого і другого покоління. Одні компанії планують купувати біоетанол як сировину, інші – інтегрувати процеси виробництва біоетанолу і САП. Проблема біоетанолу другого покоління (з лігноцелюозної сировини) є висока вартість, тому кількість установок з його виробництва у світі є доволі обмеженою. Прогнозується, що у найближчій перспективі більшість компаній-виробників біопалива АТJ-SPK буде орієнтуватися на біоетанол з цукрової тростини, який характеризується невеликим «вуглецевим слідом». При цьому продовжуються дебати щодо сталості використання біоетанолу з зерна кукурудзи з огляду на рівень викидів ПГ протягом його життєвого циклу.

Дослідження [13] присвячено питанню покривних культур як сировини для виробництва сталих авіаційних біопалив. Питання є актуальним, оскільки використання традиційних харчових культур для цього зменшує екологічні переваги САП. Натомість, застосування покривних культур не створює конкуренції виробництву продуктів харчування і не призводить до непрямой зміни землекористування. Результати дослідження показують, що використання олійних покривних культур як сировини суттєво скорочує викиди ПГ на сировинному етапі життєвого циклу САП. Так, для ефіопської гірчиці, ріжю і талабану польового це скорочення становить 12,9, 15,3 та 18,3 г CO₂екв./МДж, відповідно. Важливо, що отримані результати є дуже близькими до даних у документах CORSIA: 12,7 г CO₂екв./МДж для ефіопської гірчиці, 13,4 г CO₂екв./МДж для ріжю. В США площа, доступна для вирощування олійних покривних культур, може зрости до 29,3 млн га до 2035 року. Потенційне використання цієї площі для отримання сировини для САП, наприклад, HEFA-SPK, відповідає скороченню викидів парникових газів на 92 млн т CO₂екв./рік.

Авторами [14] представлено результати оцінки життєвого циклу і виробничих витрат для авіаційних біопалив, отриманих шляхом конверсії біоетанолу і ізобутанолу, для умов США. Викиди ПГ протягом життєвого циклу САП складають 758 г CO₂екв./л для біоетанолу та 976 г CO₂екв./л для ізобутанолу як сировини. Відповідне скорочення емісії ПГ порівняно з традиційним авіаційним паливом становить 70,6% і 62,1%. Мінімальна ціна продажу оцінена у 2,71 дол. США/л для САП з біоетанолу та 2,44 дол. США/л для САП з ізобутанолу. Ця вартість є доволі високою, оскільки вихідною сировиною для спиртів в роботі прийнято лігноцелюлозну біомасу (порубкові залишки). Зроблено висновок про необхідність державної підтримки розвитку даного напрямку виробництва сталих авіаційних біопалив. В дослідженні [11] мінімальна ціна продажу біопалива ATJ-SPK зазначена як 0,9-2,02 євро/л для випадку біоетанолу першого покоління як сировини й 1,53-2,75 євро/л – для передового біоетанолу. В огляді [7] ця величина оцінена як 0,79 дол. США/л для ATJ-SPK з біоетанолу з зерна кукурудзи і 2,35 дол. США/л для ATJ-SPK з ізобутанолу. При цьому біоетанол як сировина (456 дол. США/т) у 2,4 рази дешевший за ізобутанол (1110 дол. США/т).

Робота [10] присвячена техніко-економічному обґрунтуванню та аналізу життєвого циклу двох технологій виробництва САП для умов Мексики. Розглянуто гідроочищені естери та жирні кислоти (біопаливо HEFA-SPK) і синтетичний парафіновий керосин, отриманий за технологією конверсії спиртів (ATJ-SPK). Отримано результат, що обидві технології є життєздатними з економічної точки зору. Економічні показники біопалива ATJ-SPK трохи гірші за HEFA-SPK, отже рекомендовано працювати над вдосконаленням технології конверсії спиртів з метою здешевлення капітальних витрат. Для технології конверсії спиртів кращі перспективи має біоетанол першого покоління з цукрової тростини, цукрового сорго, зернового сорго.

Авторами [15] зроблено порівняльний аналіз різних САП та інших низьковуглецевих палив/енергоносіїв для авіації і виконано ранжування цих палив/енергоносіїв. При визначенні рейтингу альтернативних авіаційних палив/енергоносіїв враховано такі аспекти як рівень розвитку технології та її складність; сертифікація технології за стандартом ASTM D7566 (для САП); допустимий відсоток змішування з нафтовим реактивним паливом (для САП); ціна; потенційне скорочення викидів парникових газів протягом життєвого циклу; наявність та доступність сировинної та ресурсної бази; вихід реактивного палива порівняно з обсягом інших супутніх продуктів (для САП з біомаси); необхідність зміни паливної системи літака та інфраструктури аеропорту. Для умов України найбільший рейтинг отримано для біопалива HEFA-SPK, за яким слідує ATJ-SPK та FT-SPK. Зазначено, що для практичного запровадження виробництва цих біопалив в країні необхідні зміни у законодавстві, спрямовані на підтримку даного напрямку біоенергетики.

В роботі [16] проведено попереднє техніко-економічне обґрунтування виробництва біопалива HEFA-SPK з олії ріжю в Україні. Рижій вибрано як сировину для САП, оскільки його олія використовується, переважно, у технічних цілях і майже не має харчового

застосування. Зроблено висновок про необхідність державної підтримки для досягнення рентабельності такого виробництва. Рекомендовано виконання науково-практичних робіт, спрямованих на здешевлення відповідних технологій та обладнання. Автори дослідження акцентують увагу на тому, що Україна, як член Міжнародної організації цивільної авіації (ICAO), у 2021 році розробила і надала в ICAO План дій щодо скорочення викидів діоксиду вуглецю в секторі авіації. В цьому Плані представлено комплексний підхід до проблеми, у тому числі зазначено необхідність використання низьковуглецевих сталих альтернативних палив. Отже, напрямок виробництва САП є актуальним і важливим для України.

5. Методи досліджень

Для досягнення мети роботи було застосовано такі методи теоретичного дослідження як аналіз, синтез, порівняння, абстрагування. Використання порівняльного аналізу дало можливість виявлення і визначення властивостей та характеристик окремих об'єктів дослідження на основі зібраних техніко-економічних даних і емпіричних досліджень. Також застосовано метод вторинного дослідження, який спирається на необхідні дані, що є у вільному доступі. Автори користувалися відкритими даними з вітчизняних та зарубіжних наукових статей, звітів, інтернет-ресурсів.

6. Результати досліджень

Для умов України доцільно розглянути біоетанол (БЕ) як сировину для виробництва сталого авіаційного палива за технологією конверсії спиртів. Перш за все, мова іде про біоетанол першого покоління, оскільки технологія його отримання є добре відпрацьованою і вже впровадженою в Україні. Особливості технологічного процесу виробництва біоетанолу залежить від виду сировини, яка може бути цукро-, крохмале- або целюлозовмісною. В останньому випадку отримується біоетанол другого покоління (передове рідке біопаливо). Для всіх видів сировини виробничий процес, зазвичай, включає наступні етапи: підготовка сировини та екстракція цукру або гідроліз (оцукрювання) сировини, ферментація оцукреної маси, отримання етанолу шляхом дистиляції браги, очищення спирту [17].

Особливість технології виробництва біоетанолу з лігноцелюлозної біомаси полягає в тому, що така сировина потребує попередньої обробки перед зброджуванням для полегшення доступу ферментів до целюлозних волокон. Для попередньої обробки застосовуються різні види механічного, хімічного і теплового впливу. Гідроліз целюлози та геміцелюлоз до моносахаридів відбувається за участю кислот або ферментів. Кислотний гідроліз проводять розведеною сірчаною кислотою або концентрованою сірчаною/соляною кислотою. Гідроліз розведеною сірчаною кислотою є класичним і найдешевшим, однак має певні недоліки. Один з них – утворення великого обсягу токсичних побічних продуктів, які гальмують ріст і ферментацію мікроорганізмів, а їх детоксикація є дорогим заходом. Під час гідролізу концентрованими кислотами утворюється менше токсичних побічних продуктів, але цей процес дорожчий і викликає певні екологічні проблеми.

Найбільш ефективним і перспективним методом гідролізу попередньо обробленої лігноцелюлозної біомаси є ферментативний. Він реалізується за участю целюлаз та геміцелюлаз мікроорганізмів, головним чином грибів та бактерій, і не призводить до утворення токсичних побічних продуктів. Впровадженню ферментативного гідролізу в практику заважає кілька факторів, одним з яких є висока вартість. Інша проблема полягає у сильному гальмуванні ферментативного гідролізу моно- та олігосахаридами, які звільняються під час дії целюлаз і геміцелюлаз, тобто відбувається гальмування процесу кінцевим продуктом. Для подолання цієї проблеми ферментативний гідроліз слід проводити разом з мікроорганізмами, які ферментують звільнені цукри до етанолу. Такий процес є значно продуктивнішим порівняно з роздільними сахарифікацією та ферментацією. Однак в цьому

випадку існує не до кінця вирішена проблема, пов'язана з несумісністю оптимальних температур, необхідних для дії целюлаз і геміцелюлаз (близько 50-55°C) й для функціонування більшості відомих мікроорганізмів, що здійснюють спиртове бродіння (30-40°C). Ведуться пошуки видів дріжджів, здатних ферментувати основні цукри гідролізатів лігноцелюлози за температур близько 50°C.

Через зазначені проблеми підприємства з виробництва біоетанолу з лігноцелюлозної біомаси часто є нерентабельними, і їх кількість у світі є обмеженою. В Україні зараз не існує заводів з виробництва передового біоетанолу, тому з точки зору отримання САП шляхом конверсії спиртів є сенс розглядати біоетанол першого покоління. Це не означає відмови від виробництва біоетанолу другого покоління, тим більш, що розвиток цього напрямку запланований Національним планом дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року. Так, згідно цього Плану, споживання передового біоетанолу на транспорті має збільшитися з 1 т н.е. у 2026 році до 10 т н.е. у 2030 році, що означає десятикратний ріст.

Важливо, щ з травня 2025 року набуває чинності вимога Закону України «Про альтернативні види палива» [19], яка стосується обов'язкової частки біопалива (біокомпонентів) в автомобільних бензинах. Ця частка повинна бути не менш як 5% об'ємних за абсолютної похибки визначення $\pm 1\%$. Можна припустити, що для виконання зазначеної вимоги більшість власників мереж автозаправних станцій (АЗС) будуть скоріше імпортувати бензин, в якому вже є 5% або 10% біоетанолу (бензин Е5, Е10, відповідно), ніж виконувати змішування звичайного бензину (Е0) з біоетанолом вітчизняного виробництва. В такому випадку виконання вимоги Закону України «Про альтернативні види палива» практично не вплине на вітчизняну біоетанольну галузь, принаймні у найближчому майбутньому.

Якщо ж власники АЗС підуть по шляху змішування бензину з біоетанолом, то виробникам біоетанолу в Україні прийдеться нарощувати обсяги виробництва і принаймні частково відмовитися від експорту, куди зараз іде лівова частина біоетанолу. Але і в цьому випадку можна очікувати, що вітчизняні виробники пристосуються до нових умов, і залишиться певна частина загального обсягу біоетанолу, яку можна розглядати як сировину для САП. Враховуючи зростаючий попит на стале авіаційне біопаливо в Європі та інших частинах світу, експорт САП з біоетанолу може бути не менш вигідним, ніж експорт самого біоетанолу. Ще один варіант – будівництво нових біоетанольних заводів самими власниками мереж АЗС; наприклад, є інформація про плани групи ОККО збудувати такий завод у Тернопільській області.

Виробництво біопалива АТJ-SPK можна організувати шляхом будівництва нового заводу і купівлі готового біоетанолу як сировини або шляхом доповнення вже існуючого біоетанольного заводу необхідним новим обладнанням. Для визначення вигіднішого варіанту є сенс провести аналогію із започаткуванням виробництва самого біоетанолу та проаналізувати можливі рішення. Таке виробництво може бути створено як окремий новий завод або впроваджено на вже існуючому підприємстві, де є відповідна сировина, наприклад на цукровому заводі. Виконані оцінки показують, що питомі капітальні витрати на новий біоетанольний завод (сировина – зерно кукурудзи) становлять 0,46-0,58 дол. США/л БЕ, а на організацію виробництва біоетанолу на існуючому цукровому заводі – 0,37-0,56 дол. США/л БЕ, тобто дещо нижчі. Ці дані є орієнтовними, оскільки суттєво залежать від багатьох факторів, у тому числі виробничої потужності та видів побічних продуктів.

Перевагою виробництва біоетанолу на цукровому заводі вважається наявність необхідних потужностей для прийому, переробки та зберігання сировини (цукрових буряків, меляси). Використання дифузійного соку для ферментації та зброджування може збільшити вихід біоетанолу без додаткових витрат на зберігання та логістику сировини. Енергетичні потужності та комунікації можуть бути адаптовані для виробництва біоетанолу, що значно зменшує капітальні витрати. Біоетанольне виробництво може інтегруватися з енергетичною системою заводу, використовуючи надлишкову пару та електроенергію. З іншого боку, існує експертна думка, що при запровадженні виробництва біоетанолу з зерна кукурудзи більш

перспективно будувати заводи з нуля, ніж виконувати реконструкцію існуючих спиртових заводів, де необхідно додати 3-4 нові цехи. Будівництво нового заводу дає можливість правильно спроектувати енергетичну систему підприємства і забезпечити високу енергоефективність.

В літературі відсутні однозначні дані щодо питомих інвестицій, необхідних для запровадження виробництва біопалива ATJ-SPK. Можливо, це пов'язано з початковим етапом комерціалізації технології конверсії спиртів в авіаційне біопаливо. Враховуючи складність технологій виробництва самого біоетанолу і наступної конверсії у САП, можна припустити, що загальні питомі капітальні витрати будуть у 2-2,5 рази вище, ніж на виробництво тільки біоетанолу. Це дає результат 1,0-1,4 дол. США/л САП, який не протирічить даним роботи [20] – 1,10-1,54 дол. США/л САП для біоетанолу першого покоління як сировини для отримання біопалива ATJ-SPK.

Враховуючи всі наведені дані, для умов України можна запропонувати реалізацію пілотного проєкту по виробництву авіаційного біопалива ATJ-SPK на існуючому біоетанольному заводі. В Україні існує 22 невеликих біоетанольних заводів загальною виробничою потужністю близько 500 млн л/рік. З них сім – це нові приватні виробництва, інші – реконструйовані старі державні заводи. Проєкт по виробництву сталого авіаційного біопалива рекомендується реалізувати на одному з нових сучасних заводів. Такі підприємства характеризуються високою енергетичною ефективністю, що дозволить мінімізувати енергетичні витрати на виробництво САП.

7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

У середньостроковій перспективі подальші дослідження мають полягати у проведенні техніко-економічного обґрунтування започаткування виробництва САП на сучасному біоетанольному заводі та виконанні оцінки життєвого циклу біопалива ATJ-SPK. Оцінка життєвого циклу необхідна для визначення «вуглецевого сліду», що є важливим з точки зору потенційно досягнутого ефекту декарбонізації і може підтвердити сталість біопалива при експорті до ЄС. У довгостроковій перспективі необхідно проаналізувати і дослідити можливість виробництва авіаційного біопалива ATJ-SPK з біоетанолу другого покоління. Справа в тому, що далеко не у всіх випадках виробництво біоетанолу першого покоління відповідає вимозі Директиви RED III щодо скорочення викидів парникових газів на 65% порівняно з компаратором викопного палива. Якщо ж з цього біоетанолу ще отримується авіаційне біопаливо, то потенційне скорочення ще зменшується. Вирішити проблему можна шляхом використання відновлюваної енергії при виробництві біоетанолу і САП або шляхом переходу на передовий біоетанол. Як зазначалося вище, технологія виробництва БЕ з лігноцелюлозної сировини є складнішою, але це дає можливість досягти скорочення викидів парникових газів на 80% і більше. Враховуючи євроінтеграційний курс України, питання сталості в секторі біоенергетики виходять на перший план і можуть стати вирішальними при виборі сировини та технологій для виробництва рідких біопалив.

8. Висновки

Використання сталих авіаційних палив, зокрема біопалив, є потужним інструментом декарбонізації світової авіації. Попит на САП динамічно зростає з огляду на відповідні цілі, прийняті рядом міжнародних організацій сектору авіації і Європейським Союзом. На сьогоднішній комерційний рівень повністю досягла лише технологія виробництва біопалива HEFA-SPK, яке отримується з олійної сировини гідроочищенням естерів та жирних кислот. Ще дві технології (FT-SPK і ATJ-SPK) є дуже близькими до цього; вже з'являються перші комерційні установки, що працюють за цими технологіями. Для умов України видається доцільним дослідити можливість запровадження виробництва авіаційних біопалив HEFA-SPK і ATJ-SPK. Перше

може отримуватися з олії ріжю, друге – з біоетанолу на існуючому біоетанольному заводі. Для визначення оптимальних варіантів виробництва САП необхідне проведення техніко-економічного обґрунтування і виконання оцінки життєвого циклу цих біопалив.

Список літератури:

- 1) Wang B., Ting Zh.J., Zhao M. (2024). Sustainable aviation fuels: Key opportunities and challenges in lowering carbon emissions for aviation industry. *Carbon Capture Science & Technology*, v. 13: 100263. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100263>
- 2) Thomsen M.O., Mistry H., Block A. IATA Net Zero Roadmaps. 79th AGM and World Air Transport Summit, Turkey, 19-21 June 2022 [Online]. Available at: <https://www.iata.org/contentassets/4b18fa1ac4a246879c058cf75954dbda/netzero-roadmaps-presentation-agm2023.pdf>
- 3) ICAO's 2050 net-zero CO₂ goal for international aviation. ICCT Policy update, 2023 [Online]. Available at: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/12/global-aviation-ICAO-net-zero-goal-jan23.pdf>
- 4) Graver B., Zheng X.S., Rutherford D. Vision 2050. Aligning aviation with the Paris agreement. ICCT, 2022 [Online]. Available at: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/06/Aviation-2050-Report-A4-v6.pdf>
- 5) CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels. ICAO, 2022 [Online]. Available at: <https://bit.ly/4278c6K>
- 6) Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) [Online]. – Available at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/2024-07-16>
- 7) Susan van Dyk, Jack Saddler. Progress in Commercialization of Biojet/Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies and Policies. IEA Bioenergy: Task 39, 2024 [Online]. Available at: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/06/IEA-Bioenergy-Task-39-SAF-report.pdf>
- 8) Net zero 2050: sustainable aviation fuels. IATA, 2024 [Online]. Available at: <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet-sustainable-aviation-fuels/>
- 9) Regulation (EU) 2023/2405 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport (ReFuelEU Aviation) [Online]. Available at: <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/2405/2023-10-31>
- 10) Aburto J., Martínez-Hernández E., Castillo-Landero A. (2025). Is Sustainable Aviation Fuel Production Through Hydroprocessing of Esters and Fatty Acids (HEFA) and Alcohol-to-Jet (ATJ) Technologies Feasible in Mexico? *Sustainability*, v. 17, N 4: 1584. <https://doi.org/10.3390/su17041584>
- 11) Shehab M., Moshhammer K., Franke M., Zondervan E. (2023). Analysis of the Potential of Meeting the EU's Sustainable Aviation Fuel Targets in 2030 and 2050. *Sustainability*, v. 15, N 12: 9266. <https://doi.org/10.3390/su15129266>
- 12) Detsios N., Theodoraki S., Maragoudaki L. (2023). Recent Advances on Alternative Aviation Fuels/Pathways: A Critical Review. *Energies*, v. 16, N 4: 1904. <https://doi.org/10.3390/en16041904>
- 13) 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.*, v. 9: 790421. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.790421>
- 14) Akter H.A., Masum F.H., Dwivedi P. (2024). Life cycle emissions and unit production cost of sustainable aviation fuel from logging residues in Georgia, United States. *Renewable Energy*, v. 228: 120611. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120611>
- 15) T. Zheliezna, S. Drahniev (2022). Comparative analysis of biofuels and other alternative fuels for introduction in aviation and waterborne transport of Ukraine. *Journal of Science. Lyon*, N 37, p. 37-42. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7409774>

16) Zheliezna T.A., Drahnev S.V., Bashtovyi A.I. (2022). Perspektyvy vykorystannia biopalyv drugoho pokolinnia yak aviatsiynoho palyva. *Teplofizyka ta teploenerhetyka*, 44 (2), 54-63. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.7>

17) Dubrovin V.O. ta inshi. Biodyzel ta bioetanol. UNIDO/GEF, 2015 [Online]. Rezhym dostupu: http://ir.polissiauniver.edu.ua/bitstream/123456789/5143/1/Biodizel_TM6.pdf

18) Natsionalnyi plan dii z vidnovliuvanoi enerhetyky na period do 2030 roku. Rozporiadzhennia KMU N 761-p, 13.08.2024 [Online]. Rezhym dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text>

19) Zakon Ukrainy «Pro alternatyvni vydy palyva» (N 1391-XIV, 14.01.2000, iz zminamy) [Online]. Rezhym dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1391-14#Text>

20) Pavlenko N., Searle S., Christensen A. The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union. ICCT Working Paper 2019-05 [Online]. Available at: https://theicct.org/sites/default/files/publications/Alternative_jet_fuels_cost_EU_20190320.pdf

Prospects for the production of sustainable aviation biofuel by bioethanol conversion in Ukraine

Tetiana Zheliezna

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID 0000-0002-9607-3022

Abstract: Prospects for the production of sustainable aviation biofuels by bioethanol conversion in Ukraine are analysed. Importance of the issue is associated with the urgent need to decarbonize the global transport sector, in particular aviation. Several directions for reducing greenhouse gas emissions in aviation are distinguished. Of them, the use of sustainable aviation fuels (SAF), which are an alternative to traditional jet fuel, can make the greatest contribution. Typically, the concept of SAF includes biofuels as well as synthetic fuels obtained by converting electricity into liquid. Today, there are eight technologies for the production of sustainable aviation biofuels certified by ASTM D7566 standard. The maximum permissible share in the mixture with traditional jet fuel is in the range of 10-50% for different types of biofuels. In addition, ASTM D1655 standard certified the combined hydrotreating of ethers and fatty acids as well as Fischer-Tropsch hydrocarbons with fossil petroleum products in the production of aviation fuels; the share of the biofuels can be up to 5% in the mixture in both cases. HEFA-SPK aviation biofuel, which is obtained from hydrotreated ethers and fatty acids, is currently the only one whose production technology has fully reached the commercial level. Besides, first commercial plants for the production of ATJ-SPK biofuel by converting isobutanol and bioethanol are also emerging in the world. It is advisable to consider the possibilities of producing these aviation biofuels in Ukraine.

The production of ATJ-SPK biofuel in Ukraine can be organized by building a new plant and purchasing bioethanol as feedstock or by supplementing an existing bioethanol plant with the necessary new equipment. For Ukraine's conditions, the implementation of a pilot project at one of the new modern bioethanol plants may be suggested. Such enterprises are characterized by high energy efficiency, which will minimize energy consumption for the production of SAF. To determine the optimal options for the production of sustainable aviation biofuels, it is necessary to conduct a feasibility study and perform a life cycle assessment of these biofuels.

Key words: sustainable aviation fuels, biofuels, bioethanol, synthetic paraffinic kerosene, alcohol conversion.
