

УДК 662.7

АНАЛІЗ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВИРОБНИЦТВА АВІАЦІЙНОГО БІОПАЛИВА HEFA З РИЖІЮ ДЛЯ УМОВ УКРАЇНИ

Драгнєв С.В.¹, канд. техн. наук, **Желєзна Т.А.²**, канд. техн. наук

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник, dragnev@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0003-3754-4186>

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, провідний науковий співробітник, zhelyezna@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0002-9607-3022>

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2025.6>

Виконано оцінку життєвого циклу авіаційного біопалива HEFA – гідроочищених естерів та жирних кислот, вироблених з олійної культури рижю, вирощеного в Україні. Проведено оцінку скорочення викидів парникових газів при використанні HEFA, отриманого з вітчизняної сировини, порівняно із традиційним реактивним паливом. Визначено потенційні напрямки зменшення емісії парникових газів протягом життєвого циклу авіаційного біопалива.

Life cycle assessment of aviation biofuel HEFA produced from Camelina, an oilseed crop grown in Ukraine, has been conducted. The reduction of greenhouse gas emissions when using HEFA, hydroprocessed esters and fatty acids obtained from domestic feedstock, as compared to traditional jet fuel has been evaluated. Potential directions for reducing greenhouse gas emissions during the aviation biofuel life cycle have been determined.

Бібл. 23, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: біомаса, біопаливо, авіаційне біопаливо, стале авіаційне паливо, гідроочищені естери та жирні кислоти, оцінка життєвого циклу.

БП – біопаливо;

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ВРП – відновлюване реактивне паливо;

ОП – основний продукт;

ПГ – парникові гази;

ПП – побічний продукт;

САП – стале авіаційне паливо;

СТВ – система торгівлі квотами на викиди парникових газів;

ТР – транспортування;

екв. – еквівалент;

CORSIA – система компенсації та скорочення викидів вуглецю у міжнародній авіації;

FFA – вільні жирні кислоти;

HEFA – гідроочищені естери та жирні кислоти;

HEFA-SPK – синтетичний парафіновий керосин, отриманий з гідроочищених естерів та жирних кислот;

HVO – гідроочищена рослинна олія;

IATA – Міжнародна асоціація повітряного транспорту;

ICAO – Міжнародна організація цивільної авіації;

FT-SPK – синтетичний парафіновий керосин, отриманий за технологією газифікації з синтезом Фішера-Тропша.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю декарбонізації сектору транспорту, зокрема авіації, як одного з напрямків для уповільнення глобального потепління. Ефективним заходом для цього є впровадження сталих авіаційних палив, вироблених з біомаси. Для України перспективним джерелом сировини для САП може бути сільське господарство, зокрема, вирощування олійних культур з їх подальшою переробкою у гідроочищені естери та жирні кислоти – біопаливо HEFA. **Метою** роботи є розробка рекомендацій для розвитку виробництва авіаційного біопалива в Україні.

Методи дослідження включають оцінку життєвого циклу біопалива HEFA з вітчизняної сировини за методологію CORSIA, вивчення та аналіз літературних, статистичних й інших даних.

Передумови та тенденції розвитку виробництва авіаційного біопалива у світі

Традиційне авіаційне паливо являє собою суміш великої кількості вуглеводнів і вважається дистиллятом дизелю та бензину. Серед інших видів пального, авіапаливо є нафтопродуктом особливої якості, до якого висуваються дуже високі вимоги. Воно повинне не за-

мерзати при низьких температурах і не вибухати при високих, бути нелетким, стабільним і мати високу теплотворну здатність. При виробництві авіаційного палива застосовуються різні присадки для зменшення ризиків його використання, пов'язаних з коливаннями температури та іншими критичними умовами [1, 2]. Основним видом пального для реактивних двигунів цивільних літаків є авіаційний керосин Jet A і його покращений варіант Jet A-1, більш стійкий до низьких температур. В Україні авіакеросин Jet A-1 з'явився лише трохи більше десяти років тому; його якість визначається Національним стандартом ДСТУ 4796:2007 «Паливо авіаційне для газотурбінних двигунів Джет А-1. Технічні умови» [3].

Використовуючи великі обсяги нафтового палива, авіація робить значний внесок у посилення ризику глобального потепління. У період з 1990 року найбільші викиди діоксиду вуглецю у секторі авіації зафіксовано у 2019 р. – більше 1 млрд т CO₂/рік, що склало близько 2,5% глобальної емісії CO₂. Після цього протягом кількох років спостерігалось скорочення викидів CO₂ до порядку 600 млн т/рік (через Covid-19), але з 2021 року знову має місце тенденція росту викидів [4]. Додаткові впливи на довкілля від авіації включають викиди оксидів азоту, водяної пари, сажі, аерозолів сульфатів, а також збільшення хмарності через утворення конденсаційного сліду від повітряних суден [5].

До обмежень, пов'язаних з Covid-19, світове споживання авіапалива для реактивних двигунів складало близько 360 млрд л/рік і, за оцінками експертів, до 2050 р. може збільшитися більш ніж удвічі. Отже, якщо продовжувати використовувати звичайні практики щодо палива при зростаючих обсягах повітряних перевезень, до 2050 р. обсяги викидів діоксиду вуглецю світовою авіацією можуть подвоїтися. Для запобігання цьому, ще у 2009 р. Міжнародна асоціація повітряного транспорту (IATA) і Група дій з повітряного транспорту (ATAG) взяли на себе зобов'язання досягти скорочення викидів CO₂ відносно рівня 2005 р. на 50% до 2050 р. Зважаючи на зростаючу нагальність процесу декарбонізації, у 2021 р. авіалінії-члени IATA посилили свої зобов'язання і поставили за мету досягти вуглецевої нейтральності авіарейсів до 2050 р. За оцінками IATA, з внеску усіх заходів, необхідних для досягнення вуглецевої нейтральності авіації, 65% припадає на використання САП [6]. Питаннями обмеження викидів у авіаційному секторі займається Міжнародна організація цивільної авіації (ICAO), яка у 2021 р. запустила ринковий механізм компенсації та скорочення викидів вуглецю для міжнародної авіації (CORSIA) [7].

В ЄС також велика увага приділяється питанню декарбонізації транспорту, зокрема авіації. В рамках реалізації «Європейського зеленого курсу», викиди ПГ в секторі авіації ЄС до 2030 р. повинні зменшитися до 55% від рівня 1990 р., а до 2050 р. має бути досягнуто вуглецеву нейтральність. При цьому 34% скорочення викидів парникових газів, що відповідає 99 млн т CO₂/рік, може бути досягнуто за рахунок використання сталих авіаційних палив [8]. Законодавча ініціатива ЄС із декарбонізації авіації “RefuelEU Aviation” зобов'язує постачальників авіаційного палива включати до поставок частку САП щонайменше 2% у 2025 р., 6% – у 2030 р. і 70% – у 2050 р. [9]. Авіація входить до системи торгівлі квотами на викиди парникових газів ЄС, що також спонукає сектор до скорочення викидів ПГ. За методологією моніторингу та звітності СТВ ЄС, викиди діоксиду вуглецю для САП, що задовольняють вимогам Директиви ЄС 2018/2001 (RED III) [10], вважаються нульовими, тоді як для авіакеросину Jet A і Jet A-1 застосовується коефіцієнт викидів 3,16 т CO₂/т палива [11].

Порівняно із традиційним реактивним паливом, САП дозволяють досягти скорочення викидів CO₂ до 85% і більше. Біопалива для транспорту (включаючи САП), що виробляється на установках, запущених в роботу з 01.01.2021, мають досягти 65% скорочення викидів ПГ у порівнянні з компаратором викопного палива для транспорту – 94 г CO_{2-екв}/МДж. У випадку відновлюваного палива небіологічного походження, ця вимога збільшується до 70%. Зазначені вимоги визначені в Директиві ЄС з відновлюваної енергетики (RED III) [10].

Україна як член Міжнародної організації цивільної авіації підтримує глобальні й європейські цілі зі скорочення викидів парникових газів в секторі авіації. Відповідно до вимог ICAO, у 2021 р. Державна авіаційна служба України затвердила План дій зі зменшення викидів CO₂ в атмосферу авіацією [12]. Цей план передбачає одним із ключових заходів – використання сталих авіаційних палив, які включають сучасні біопалива та синтетичні палива.

У світі існує кілька компаній, які виробляють або намагаються комерціалізувати виробництво біопалив для реактивних двигунів. Основні виробники САП – американські компанії World Energy, Lanzatech, Gevo [13]. Технології отримання авіаційних біопалив знаходяться на різних стадіях технологічної готовності. Комерційного рівня вже досягли технології виробництва гідроочищених рослинних олій / гідроочищених естерів та жирних кислот (рис. 1), тоді як комерціалізація інших

технологій триває. Кожна установка з виробництва HVO дозволяє виділити 15...50% фракції HEFA, з яких можна виробити авіаційне біопаливо – синтетичний парафіновий керосин. Наразі всі альтернативні авіаційні палива дозволено використовувати лише в суміші з традиційним реактивним паливом. Стандарт ASTM D7566 визначає співвідношення таких сумішей, наприклад, частка HEFA може становити до 50% за об'ємом. За оцінками експертів, керосин HEFA-SPK може бути найдешевшим авіаційним біопаливом [14].

Іншою технологією, яка майже досягла комерційного рівня, є газифікація біомаси з наступним синтезом Фішера-Тропша, що дає можливість отримати фракції авіаційного біопалива (керосин FT-SPK) серед інших кінцевих продуктів [16]. Так, в Об'єднаному Королівстві будується потужний завод із виробництва САП виду FT-SPK (проект Lighthouse Green Fuels), який до кінця 2028 р. має вийти на виробничу потужність більше 175 млн л/рік [17]. Очікується, що це буде найкрупніший завод із виробництва авіаційного біопалива в Європі.

У 2023 р. у світі було вироблено, за різними даними, 300...600 млн л САП; у 2024 р. цей обсяг збільшився до 1,3 млрд л/рік. Більша частина (~80%) вироблених САП – це біопаливо HEFA, хоча у перспективі буде рости внесок авіаційних біопалив, отриманих за іншими технологіями. За оцінками експертів, для досягнення вуглецевої нейтральності сектору авіації до 2050 р. світовий обсяг виробництва САП має зрости на порядок – до 400...650 млрд л/рік [18].

Викиди парникових газів протягом життєвого циклу біопалива HEFA

Авіаційне біопаливо HEFA виробляють з тваринних жирів, використаних олій, дистилату пальмових жирних кислот, пальмової олії, кукурудзяної олії та різноманітних олійних культур, таких як соя, ріпак

та рижій [15]. Більшість з цих культур вирощуються і в Україні. Так, у 2022 р. в Україні було зібрано 3,4 млн т сої та 3,3 млн т ріпаку із середньою урожайністю 22,6 ц/га й 28,7 ц/га, відповідно [19]. Соя і ріпак характеризуються високим попитом на ринку, мають доволі високу ціну реалізації та експортуються у значних обсягах, тому собівартість HEFA з цих культур буде прогнозовано високою. Натомість рижій вирощується у відносно невеликих обсягах, але в останні роки значно підвищився інтерес до цієї культури як додаткового джерела оригінальної олійної сировини. За своєю біологічною природою рижій менш вимогливий до умов росту, ніж інші олійні культури, характеризується високою холодостійкістю і значною посухостійкістю. Ярий рижій є доволі урожайною культурою, що дозволяє збирати до 3,2 т/га насіння, яке містить до 40...46 % висихаючої олії. Зазвичай посівна площа рижію в Україні займає 5...6 тис. га (близько 3% площі всіх олійних рослин), головним чином у північній частині лівобережного Лісостепу [20]. З огляду на можливість вирощування рижію у складних умовах за менш затратною технологією порівняно із соєю та ріпаком, насіння рижію розглядається як перспективна сировина для виробництва авіаційного біопалива HEFA.

Аналіз літературних даних по оцінці викидів ПГ протягом життєвого циклу HEFA показує, що вони складають, в середньому, 40,4 г CO_{2екв}/МДж біопалива для випадку виробництва HEFA з сої, 42,0 г CO_{2екв}/МДж для рижію і 47,4 г CO_{2екв}/МДж для ріпаку (табл. 1). Якщо порівнювати ці значення з компаратором викопного палива для транспорту 94 г CO_{2екв}/МДж (згідно RED III [10]), то досягнуте скорочення викидів ПГ становить 57% для HEFA з сої, 55% для HEFA з рижію і 50% для HEFA з ріпаку. При порівнянні з компаратором реактивного палива 89 г CO_{2екв}/МДж (згідно CORSIA [15]), ці скорочення є дещо меншими.

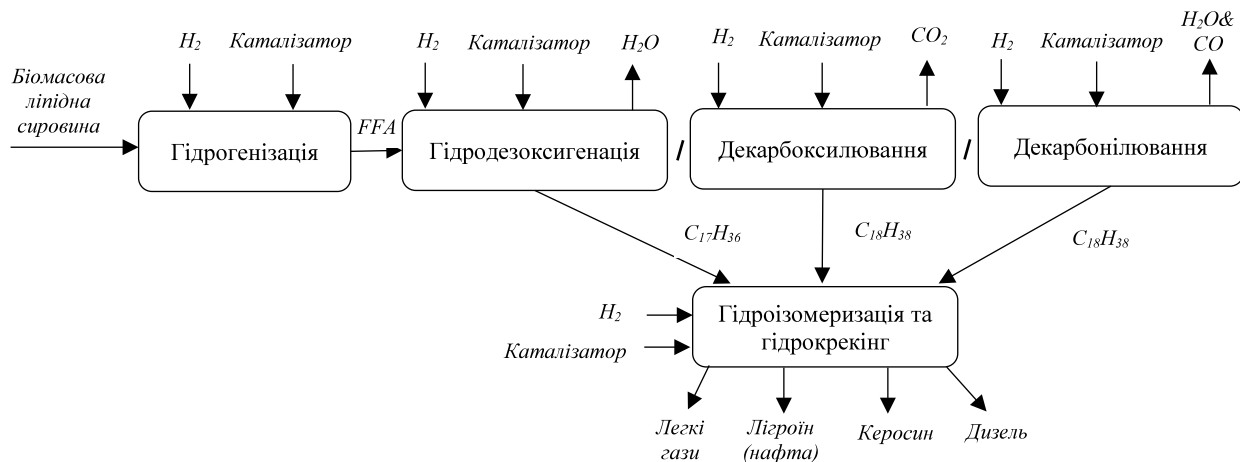


Рис. 1. Загальна схема технології виробництва HEFA [15]

Fig. 1. General process flow of HEFA pathway [15]

Оцінка скорочення викидів ПГ для певного біопалива суттєво залежить від застосованого підходу до розподілення витрат енергії між різними продуктами, що утворюються в процесі виробництва біопалива. На рис. 2 представлено результати оцінки скорочення викидів ПГ при отриманні HEFA з рижію за різними методиками розподілення енерговитрат між основним і побічним продуктами [21]. Скорочення емісії ПГ визначалося порівняно з традиційним реактивним паливом із середнім рівнем викидів ПГ протягом життєвого циклу 87,5 г CO_{2екв.}/МДж. Основним продуктом в даному випадку є олія рижію, а побічним – макуха, що застосовується як корм для тварин з високим вмістом протеїну. Найкращий результат, а саме скорочення емісії ПГ майже на 60% при використанні «зеленого» водню, відповідає варіанту розподілення енерговитрат

по масі продуктів, що пояснюється високим виходом побічного продукту. Найгірший результат отримано при використанні методу заміщення стосовно побічного продукту, але зміна певних вихідних припущень може призвести до суттєво кращих показників і в цьому випадку. Метод заміщення полягає у виділенні частини емісії ПГ на побічні продукти, беручи до уваги їх вихід в технологічному процесі і рівень викидів ПГ, пов'язаний з отриманням заміщених ними аналогічних продуктів, наприклад, викопного походження («кредит субпродукту», див. рис. 2).

Викиди ПГ протягом життєвого циклу HEFA можуть бути скорочені за рахунок удосконалення технологічних процесів від вирощування сировини до виробництва біопалива та його кінцевого використання, у тому числі за рахунок застосування ВДЕ і проведення раціональних

Табл. 1. Оцінка викидів парникових газів протягом життєвого циклу біопалива HEFA, отриманого з різних видів сировини, г CO_{2екв.}/МДж [15]

Table 1. GHG emissions assessment during the life cycle of HEFA obtained from different feedstocks, g CO_{2eq}/MJ [15]

Сировина	Джерело даних	Вирощування	ТР сировини	Виробництво олії	ТР олії	Переробка у БП	ТР БП	Всього	Середнє значення
Соя	США	17,9	1,1	7,3	0,7	14	0,5	41,5	40,4
	ЄС (BioGrace ¹)	17,9	1,1	3,7	0,7	13,8	0,5	37,7	
	Латинська Америка	19,5	1	7,7	0,7	13,5	0,5	43	
	ЄС (JRC ²)	19,1	1,1	4,1	0,7	14,1	0,5	39,7	
	ЄС (JRC – E3db ³)	20,6	2,3	3,3	3,3	11,5	0,3	41,4	
Ріпак	США	28	0,7	4,8	0,5	14	0,5	48,5	47,4
	ЄС (BioGrace)	29,7	0,8	4,5	0,5	13,8	0,5	49,7	
	Канада	24,8	0,7	4,7	0,5	13,9	0,5	45,0	
	ЄС (JRC)	30,1	0,7	3,5	0,5	14,1	0,5	49,4	
	ЄС (JRC – E3db)	31,4	0,3	3,1	0	11	0,3	46,1	
Рижій	США	23	0,9	2,9	0,5	14	0,5	41,8	42,0
	Канада	26,3	0,9	2,7	0,5	13,3	0,5	44,1	
	ЄС (JRC)	19,4	0,8	4,6	0,5	14,1	0,5	39,9	
	ЄС (JRC – E3db)	25	0	4,8	0,2	11	0,3	41,3	

1. BioGrace – інструмент розрахунку викидів парникових газів для біопалив, затверджений Єврокомісією.
2. JRC (Joint Research Centre) – Об'єднаний дослідницький центр, що є незалежною науково-інформаційною службою Єврокомісії.
3. E3db – розрахункова модель, що використовується при оцінці життєвого циклу біопалива. В інших випадках в таблиці мається на увазі модель GREET Департаменту енергетики США.

агротехнологічних заходів. Одним з перспективних напрямків вважається отримання авіаційного біопалива з олійних покривних культур. В дослідженні [22] зазначено, що у випадку виробництві HEFA з гірчиці, рижію і талабану польового як покривних культур, викиди на етапі вирощування сировини скорочуються, принаймні, на 12,9, 15,3 і 18,3 г CO_{2екв}/МДж, відповідно.

Оцінка життєвого циклу авіаційного біопалива HEFA з рижію для умов України

Враховуючи актуальність і перспективність використання САП, видається доцільним провести оцінку життєвого циклу біопалива HEFA з вітчизняного насіння рижію та проаналізувати можливості зменшення емісії ПГ для забезпечення вимоги RED III щодо скорочення викидів парникових газів на 65%. При оцінці буде застосовано розподілення енерговитрат між основним і побічним продуктами за їх енергетичним вмістом. Побічним продуктом виробництва олії є макуха; побічними продуктами отримання HEFA є лігроїн (нафта) і пропан. До меж системи життєвого циклу HEFA включено всі основні етапи від вирощування рижію до використання авіаційного біопалива як показано на рис.

3. Для кожного етапу виконано оцінку викидів діоксиду вуглецю CO₂ і закису азоту N₂O з перерахуванням у обсяг еквіваленту CO₂.

Оцінку життєвого циклу проведено для випадку виробництва авіаційного біопалива з насіння рижію, зібраного з 1 га з врожайністю 1,5 т/га. Прийнято, що з 1 тони насіння можна отримати 0,374 т олії (ОП) і близько 0,6 т макухи (ПП). Після цього олію рижію переробляють у реактивне паливо HEFA (ОП) з коефіцієнтом перетворення 1,17 МДж сировини/МДж ВРП; побічними продуктами виробництва HEFA є лігроїн – 0,14 МДж /МДж ВРП та пропан – 0,1 МДж /МДж ВРП [21]. Результати розрахунків показують, що загальні викиди парникових газів протягом життєвого циклу авіаційного біопалива становлять близько 48,8 г CO_{2екв}/МДж HEFA (табл. 2). Це відповідає скороченню емісії ПГ на 45...48% залежно від прийнятого компаратора викопного палива – 89 г CO_{2екв}/МДж (згідно CORSIA [15]) або 94 г CO_{2екв}/МДж (згідно RED III [10]). В обох випадках очевидно, що цей результат є ще далеким від виконання вимоги Директиви ЄС 2018/2001 щодо скорочення викидів ПГ принаймні на 65% для установок, запущених в роботу з 01.01.2021.

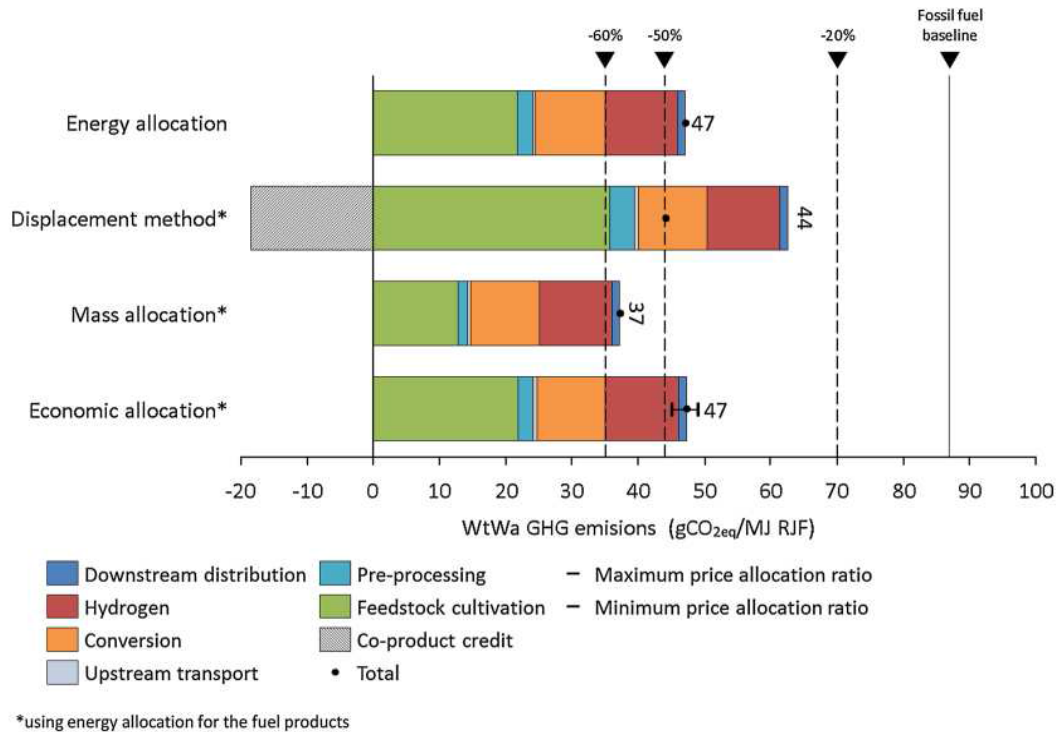


Рис. 2. Скорочення викидів ПГ при виробництві біопалива HEFA з рижію за різними методиками розподілення енерговитрат між основним і побічним продуктами [21]

Fig. 2. GHG emissions reduction when producing HEFA from Camelina using different co-product allocation methods [21]

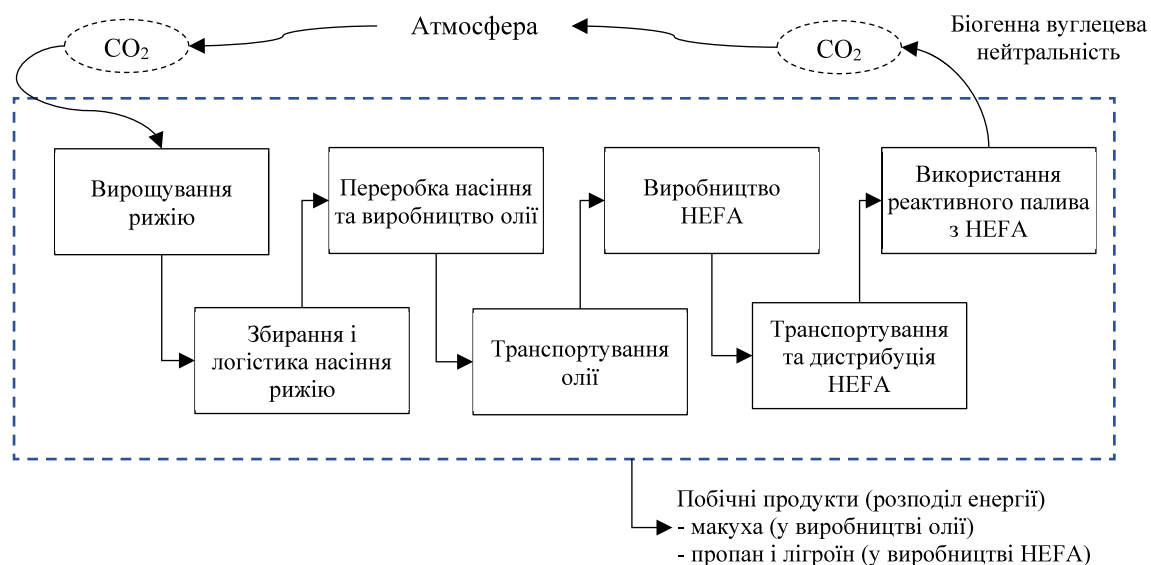


Рис. 3. Межі системи життєвого циклу біопалива HEFA з рижю відповідно до методики оцінки життєвого циклу CORSIA

Fig. 3. Boundaries of the life cycle system of HEFA from Camelina according to CORSIA life cycle assessment methodology

Табл. 2. Результати оцінки життєвого циклу біопалива HEFA з рижю для умов України

Table 2. Results of life cycle assessment of HEFA from Camelina for Ukraine's conditions

Етапи життєвого циклу ¹ та основні джерела викидів парникових газів ³	Емісія парникових газів ² , г CO _{2екв} /МДж HEFA	Частка у загальному обсягу емісії протягом життєвого циклу
Вирощування рижю, збирання насіння рижю, у тому числі:	22,48	46,1%
- споживання дизелю	5,23	10,7%
- використання добрив	4,80	9,8%
- викиди N ₂ O з поля	11,76	24,1%
Сушіння насіння рижю	0,39	0,8%
Транспортування насіння рижю (споживання дизелю, 50 км)	0,20	0,4%
Переробка насіння та виробництво олії, у тому числі:	3,64	7,5%
- споживання природного газу	2,64	5,4%
Транспортування олії (споживання дизелю, 50 км)	0,16	0,3%
Виробництво HEFA, у тому числі:	20,72	42,5%
- споживання водню	10,73	22,0%
- споживання природного газу	9,58	19,7%
Транспортування та дистрибуція HEFA, у тому числі:	1,17	2,4%
- споживання дизелю (225 км)	0,77	1,6%
- споживання електроенергії	0,40	0,8%
Всього по етапах життєвого циклу	48,75	100%

1. Етап «Використання HEFA» не включено, оскільки викиди ПГ від нього вважаються нульовими.

2. Із врахуванням розподілення між основним та побічними продуктами.

3. Включено джерела, питома вага яких у загальних викидах ПГ певного етапу більше 15%.

Аналіз отриманих даних показує, що найвищі рівні емісії ПГ протягом життєвого циклу НЕФА мають місце на етапах вирощування, збирання насіння рижію (46,1% від загального) і виробництва біопалива НЕФА (42,5%). Для етапу вирощування рижію враховано викиди закису азоту з поля, пов'язані з застосуванням азотних добрив. Через високе значення коефіцієнту потенціалу глобального потепління для N_2O (265 г $CO_{2\text{екв.}}$ /г згідно [23], 298 г $CO_{2\text{екв.}}$ /г згідно [10]), закис азоту робить великий внесок у загальний обсяг емісії парникових газів протягом життєвого циклу НЕФА (24,1%). При виробництві авіаційного біопалива використовуються водень і природний газ, що також помітно збільшує загальні викиди ПГ. Внесок водню (з невідновлюваних джерел) складає 22,0%, природного газу – 19,7% (див. табл. 2).

Для скорочення емісії парникових газів протягом життєвого циклу НЕФА можна запропонувати такі варіанти як заміщення азотних добрив дигестатом з біогазових установок при вирощуванні рижію й використання «зеленого» водню замість традиційного та біометану замість природного газу при виробництві НЕФА. Попередні оцінки показують, що споживання енергоносіїв з ВДЕ при виробництві НЕФА дає можливість досягти скорочення викидів ПГ на понад 70% порівняно з компаратором вичопного палива 94 г $CO_{2\text{екв.}}$ /МДж (згідно RED III). Подальше скорочення може бути пов'язане із застосуванням дигестату замість азотних добрив при вирощуванні рижію. Кожний з цих напрямків потребує додаткових детальних досліджень і аналізу для визначення оптимальних рішень для умов України.

Висновки та рекомендації для України

Декарбонізація транспорту, у тому числі сектору авіації, є сьогодні загальносвітовою задачею, у рішенні якої Україна також повинна брати участь. Актуальність цієї задачі пов'язана з необхідністю скорочення викидів парникових газів задля пом'якшення наслідків глобального потепління. Для сектору авіації ефективним засобом декарбонізації є перехід на сталі авіаційні палива, зокрема на біопаливо НЕФА, яке отримується з рослинних олій, жирових та олійних відходів. Технологія виробництва НЕФА затверджена стандартом ASTM D7566 для реактивних палив і вже повністю досягла комерційного рівня. В Україні виробництво авіаційного біопалива НЕФА може бути реалізовано з використанням насіння рижію як сировини. Виконана оцінка життєвого циклу НЕФА для умов України показує, що при впровадженні цієї технології необхідні додаткові заходи для виконання вимоги Директиви ЄС 2018/2001 щодо

ЛІТЕРАТУРА:

1. Han G.B., Jang J.H., Ahn M.H. et al. Operation of bio-aviation fuel manufacturing facility via hydroprocessed esters and fatty acids process and optimization of fuel property for turbine engine test // Korean Journal of Chemical Engineering. – 2021, v. 38, N 6, p. 1205-1223. <https://doi.org/10.1007/s11814-021-0770-z>
2. Bofan Wang, Zhao Jia Ting, Ming Zhao. 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>
3. Вовк О.О., Яковлева А.В., Овчаренко Т.Л. Сучасний стан забезпеченості авіаційної галузі України паливами для повітряних суден // Наукоємні технології.– 2013, т. 19, N 3, с. 258-262. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nt_2013_3_4
4. Bergero C., Gosnell G., Gielen D. et al. Pathways to net-zero emissions from aviation // Nature Sustainability. – 2023, v. 6, N 4, p. 404-414. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01046-9>
5. Lee D.S., Fahey D.W., Skowran A. et al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018 // Atmospheric Environment.– 2021, v. 244, 117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
6. Annual Review 2024. IATA, 2024. <https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/iata-annual-review-2024.pdf>
7. Reaching Zero with Renewables: Biojet fuels. IRENA, 2021. <https://www.irena.org/Publications/2021/Jul/Reaching-Zero-with-Renewables-Biojet-Fuels>
8. Elisabeth van der Sman, Bram Peerlings, Johan Kos et al. Destination 2050 – A route to net zero European aviation. NLR and SEO, 2021. https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2021/03/Destination2050_Report.pdf
9. Желєзна Т.А., Драгнев С.В. Роль рідких біопалив у декарбонізації транспортного сектору // Теплофізика та теплоенергетика. – 2024, т. 46, № 4, с. 82-90. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.9>
10. 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). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/2024-07-16>
11. ReFuelEU Aviation Handbook. IATA, 2024. <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/refuel-eu-aviation-handbook.pdf>

12. *Action plan of Ukraine for reducing aviation CO₂ emissions*. State Aviation Administration of Ukraine, 2021. [https://www.ecac-ceac.org/images/activities/environment/Ukraine_Action_Plan_on_CO₂_Emission_Reduction_2021.pdf](https://www.ecac-ceac.org/images/activities/environment/Ukraine_Action_Plan_on_CO2_Emission_Reduction_2021.pdf)
13. *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>
14. *Malthe Fredsgaard, Laura Sini Sofia Hulkko, Tanmay Chaturvedi et al*. Process simulation and techno-economic assessment of *Salicornia* sp. based jet fuel refinery through *Hermetia illucens* sugars-to-lipids conversion and HEFA route // *Biomass and Bioenergy*. – 2021, v. 150, 106142. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106142>
15. *CORSIA Eligible Fuels – Life Cycle Assessment Methodology*. CORSIA, 2019. <https://bit.ly/3VMwdh9>
16. *Железна Т.А., Драгнев С.В., Баумовий 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>
17. *Lighthouse Green Fuels*. A Greener Take Off. Biofuels International, Sustainable Aviation Supplement, 2024. <https://biofuels-news.com/safspecial/?v=d>
18. *Susan van Dyk, Jack Saddler*. Progress in Commercialization of Biojet /Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies and policies. IEA Bioenergy Task 39, 2024. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/06/IEA-Bioenergy-Task-39-SAF-report.pdf>
19. *Рослинництво України 2022*. Статистичний збірник. Державна служба статистики України, 2023. – 183 с.
20. *І.А. Шевченко, О.І. Поляков, К.В. Ведмедєва, І.Б. Комарова*. Рижій, сафлор, кунжут. Стратегія виробництва олійної сировини в Україні (малопоширені культури) / Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України. – Запоріжжя: СТАТУС, 2017. – 40 с.
21. *Sierk de Jong, Kay Antonissen, Ric Hoefnagels et al*. Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production // *Biotechnology Biofuels*. – 2017, 10:64. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0739-7>
22. *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>
23. *Commission Implementing Regulation (EU) 2022/996 of 14 June 2022 on rules to verify sustainability and greenhouse gas emissions saving criteria and low indirect land-use change-risk criteria*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32022R0996>

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF THE PRODUCTION OF AVIATION BIOFUEL HEFA FROM CAMELINA FOR CONDITIONS OF UKRAINE

Drahniev S.V.¹, Zheliezna T.A.²

¹PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0003-3754-4186, e-mail: dragnev@secbiomass.com

²PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-9607-3022, e-mail: zhelyezna@secbiomass.com

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2025.6>

The aim of the work is to prepare recommendations for the development of aviation biofuel production from domestic feedstock in Ukraine. Using large volumes of petroleum fuel, global aviation makes a significant contribution to increasing the risks of climate change. The production and consumption of sustainable aviation fuels is one of the measures for decarbonizing transport to mitigate global warming. Before the restrictions related to Covid-19, the global consumption of aviation fuel for jet engines was about 360 billion l/y and, according to experts, may more than double by 2050. If the application of conventional fuel practices is continued along with increasing air traffic, carbon dioxide emissions from global aviation may double by 2050. The International Civil Aviation Organization deals with issues of limiting emissions in the aviation sector. In 2021, it launched the Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). As compared to traditional jet fuel, sustainable aviation fuels allow for a reduction in CO₂ emissions of up to 85% or more, which meets the requirements of Directive (EU) 2018/2001 for transport biofuels. Ukraine, as a member of the International Civil Aviation Organization, supports global and European goals for reducing greenhouse gas emissions in the aviation sector. In 2021, the State Aviation Service of Ukraine approved an Action Plan for reducing aviation CO₂ emissions. This plan envisages the use of sustainable aviation fuels, which include modern biofuels and synthetic fuels, as one of the key measures. Technologies for obtaining aviation biofuels are at various stages of technological readiness. The production of hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA) has already reached the commercial level, while the commercialization of other technologies is ongoing. Aviation biofuel HEFA is produced from

animal fats, used oils, palm fatty acid distillate, palm oil, maize oil and various oilseeds, such as soybean, rapeseed and Camelina. Most of these crops are grown in Ukraine. The production of domestic aviation biofuel HEFA can be implemented using Camelina seeds as feedstock. The life cycle assessment of HEFA for Ukrainian conditions shows that when introducing this technology, some additional measures are needed to meet the requirements of Directive (EU) 2018/2001 on the reduction of greenhouse gas emissions from the production of transport biofuels. Such measures may include the use of digestate from biogas plants instead of nitrogen fertilizers when growing Camelina and the consumption of renewable energy carriers in the HEFA production process. The selection of optimal solutions is the subject of further detailed research and assessment.

References 23, tables 2, figures 3.

Key words: biomass, biofuel, aviation biofuel, sustainable aviation biofuel, hydroprocessed esters and fatty acids, life cycle assessment.

1. Han G.B., Jang J.H., Ahn M.H. et al. Operation of bio-aviation fuel manufacturing facility via hydroprocessed esters and fatty acids process and optimization of fuel property for turbine engine test // Korean Journal of Chemical Engineering. – 2021, v. 38, N 6, p. 1205-1223. <https://doi.org/10.1007/s11814-021-0770-z>
2. Bofan Wang, Zhao Jia Ting, Ming Zhao. 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>
3. Vovk O.O., Yakovlieva A.V., Ovcharenko T.L. Suchasnyi stan zabezpechenosti aviatsiinoi haluzi Ukrainy palyvamy dlia povitrianykh suden. [Current status of Ukraine's aviation industry's supply of aircraft fuels.] // Science-intensive technologies. – V. 19, № 3 (2013), P. 258-262. (Ukr.) http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nt_2013_3_4
4. Bergero C., Gosnell G., Gielen D. et al. Pathways to net-zero emissions from aviation // Nature Sustainability. – 2023, v. 6, N 4, p. 404-414. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01046-9>
5. Lee D.S., Fahey D.W., Skowran A. et al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018 // Atmospheric Environment. – 2021, v. 244, 117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
6. Annual Review 2024. IATA, 2024. <https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/iata-annual-review-2024.pdf>

7. *Reaching Zero with Renewables: Biojet fuels*. IRENA, 2021. <https://www.irena.org/Publications/2021/Jul/Reaching-Zero-with-Renewables-Biojet-Fuels>
8. *Elisabeth van der Sman, Bram Peerlings, Johan Kos et al. Destination 2050 – A route to net zero European aviation*. NLR and SEO, 2021. https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2021/03/Destination2050_Report.pdf
9. *Zheliezna T.A., Drahniev S.V. Rol ridkykh biopalyv u dekarbonizatsii transportnoho sektoru [Role of biofuels in transport sector decarbonization.]*. Thermophysics and Thermal Power Engineering. – V. 46, № 4 (2024), P. 82-90. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.9>
10. *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)*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/2024-07-16>
11. *ReFuelEU Aviation Handbook*. IATA, 2024. <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/refuel-eu-aviation-handbook.pdf>
12. *Action plan of Ukraine for reducing aviation CO₂ emissions*. State Aviation Administration of Ukraine, 2021. [https://www.ecac-ceac.org/images/activities/enviro-nment/Ukraine_Action_Plan_on_CO₂Emission_Reduction_2021.pdf](https://www.ecac-ceac.org/images/activities/enviro-nment/Ukraine_Action_Plan_on_CO2_Emission_Reduction_2021.pdf)
13. *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>
14. *Malthe Fredsgaard, Laura Sini Sofia Hulkko, Tanmay Chaturvedi et al. Process simulation and techno-economic assessment of Salicornia sp. based jet fuel refinery through Hermetia illucens sugars-to-lipids conversion and HEFA route* // *Biomass and Bioenergy*. – 2021, v. 150, 106142. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106142>
15. *CORSIA Eligible Fuels – Life Cycle Assessment Methodology*. CORSIA, 2019. <https://bit.ly/3VMwdh9>
16. *Zheliezna T.A., Drahniev S.V., Bashtovyi A.I. Perspektyvy vykorystannia biopalyv druhoho pokolinnia yak aviatsiinoho palyva [Prospect for the use of second generation biofuels as jet fuel]* // *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. – V. 44, № 2 (2022), P. 54-63. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2022.7>
17. *Lighthouse Green Fuels. A Greener Take Off*. Biofuels International, Sustainable Aviation Supplement, 2024. <https://biofuels-news.com/safspecial/?v=d>
18. *Susan van Dyk, Jack Saddler*. Progress in Commercialization of Biojet /Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies and policies. IEA Bioenergy Task 39, 2024. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/06/IEA-Bioenergy-Task-39-SAF-report.pdf>
19. *Roslynnystvo Ukrainy 2022*. [Plant Growing in Ukraine 2022.] Statistical publication. State Statistics Service Of Ukraine, 2023. – 183 p. (Ukr.)
20. *Shevchenko I.A., Poliakov O.I., Vedmedieva K.V., Komarova I.B. Ryzhii, saflor, kunzhut. Stratehiia vyrobnytstva oliinoi syrovyny v Ukraini (maloposhyreni kultury)*. [Camelina, safflower, sesame. The strategy for the production of oil feedstocks in Ukraine (rare crops.)] / Institute of Oilseeds of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. – Zaporizhia: STATUS, 2017. – 40 p. (Ukr.)
21. *Sierk de Jong, Kay Antonissen, Ric Hoefnagels et al. Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production* // *Biotechnology Biofuels*. – 2017, 10:64. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0739-7>
22. *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>
23. *Commission Implementing Regulation (EU) 2022/996 of 14 June 2022 on rules to verify sustainability and greenhouse gas emissions saving criteria and low indirect land-use change-risk criteria*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32022R0996>

Отримано 20.01.2025

Received 20.01.2025

Принято до друку 10.05.2025
Accepted for publication 10.05.2025