

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БІОЕНЕРГЕТИКИ В АВІАЦІЙНІЙ ГАЛУЗІ

Поштаренко А.В., Решетняк Л.Р.
Національний авіаційний університет
пр. Любомира Гузара, 1, 03058, м. Київ
strutinskaya@ukr.net, ludres@ukr.net

Оскільки кількість авіаційних перевезень в майбутньому зростатиме виникає проблема пов'язана зі збільшенням використання природних паливних ресурсів та кількості викидів парникових газів. Впровадження біоенергетичних технологій є важливим кроком, який допоможе авіаційній галузі у використанні альтернативних джерел енергії і водночас здобути незалежність від обмеженого нафтового палива.

Насьогодні існує велика кількість природної сировини, з якої можна отримати дешеве та екологічно безпечне біопаливо. Тому в даній роботі основна увага зосереджена на дослідженні різної вихідної сировини для одержання авіаційного біопалива. У розділі про вихідну сировину для біопалива, проаналізовано найбільш використовувану в Україні біомасу, зокрема наведено порівняльну характеристику сировини першого, другого та третього покоління для отримання біодизелю, вимоги до її вирощування, збору, обробки, економічну та екологічну доцільність. Показано вміст олії в рослинній сировині та водоростях. Також наведено шляхи використання відходів переробки ріпакової культури. Наведено критичний аналіз методів отримання біопалива з різної вихідної сировини, рекомендації та майбутні напрямки розвитку альтернативного авіаційного палива.

Представлено порівняння сумарної кількості викидів парникових газів, які утворюються за весь життєвий цикл біопалива з різної рослинної сировини. З'ясовано, що виробництво біопалива з олійних культур другого покоління та з відпрацьованої олії є одним із шляхів скорочення викидів парникових газів. Олія з мікродоростей дає набагато більший вихід авіаційного біопалива та зменшує кількість викидів парникових газів. Встановлено, що вибір сировини залежить від просторових та часових критеріїв, а скорочення викидів парникових газів пов'язані зі збільшенням вартості палива. Ключові висновки містяться в останньому розділі. *Ключові слова:* біопаливо, авіація, реактивне паливо, біоенергетика, парникові гази, енергетична сировина.

Features of the use of bioenergy in the aviation industry. Poshtarenko A., Reshetnyak L.

Since the number of air transports will increase in the future, the problem arises related to the increase in the use of natural fuel resources and the amount of greenhouse gas emissions. The introduction of bioenergy technologies is an important step that will help the aviation industry to use alternative energy sources and at the same time gain independence from limited oil fuel.

Today, there is a large amount of natural raw materials from which you can get cheap and environmentally safe biofuel. Therefore, in this work, the main attention is focused on the study of various raw materials for the production of aviation biofuel. In the chapter on raw materials for biofuel, the most used biomass in Ukraine is analyzed, in particular, the characteristics of the first, second and third generation raw materials for obtaining biodiesel, the requirements for its cultivation, collection, processing, economic and ecological feasibility are given. The content of oil in vegetable raw materials and algae is shown. Ways of using rapeseed processing waste are also given. A critical analysis of the methods of obtaining biofuel from various raw materials, recommendations and future directions for the development of alternative aviation fuel is presented.

A comparison of the total amount of greenhouse gas emissions generated over the entire life cycle of biofuel from various plant materials is presented. It was found that the production of biofuel from second-generation oil crops and waste oil is one of the ways to reduce greenhouse gas emissions. Microalgae oil provides a much higher yield of aviation biofuel and reduces greenhouse gas emissions. It was established that the choice of raw materials depends on spatial and temporal criteria, and the reduction of greenhouse gas emissions is associated with an increase in the cost of fuel. Key conclusions are contained in the final section. *Key words:* biofuel, aviation, jet fuel, bioenergy, greenhouse gases, energy raw materials.

Постановка проблеми. Значні темпи індустріального розвитку більшості країн світу, об'єктивно вимагає від суспільства пошуку дієвих інструментів збереження екологічного балансу навколишнього середовища. В перспективі, одним із таких інструментів, буде заміна первинних джерел енергії альтернативними. Так, за розрахунками вчених, забезпечення нафтовими ресурсами у світовому просторі вистачить не більш як на 20–40 років і вироблені палива із сирової нафти забезпечують приблизно 96% транспортного попиту в світі, а річне видобування нафти за останнє століття зросло в 20 разів [1]. Крім того, це призводить до збільшення парникових газів в атмосфері і зміни клімату в цілому.

Актуальність. Насьогодні одним з важливих питань є раціональне використання запасів палива та зменшення впливу парникових газів на навколишнє середовище. Вчені розрахували, що для припинення зміни клімату і утримання його на безпечному рівні, за якого можна уникнути небезпеки для існування екосистем, у XXI столітті слід використовувати лише чверть обсягу вичерпного палива, яке нині вважається економічно вигідним [2].

Зв'язок автора доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Розвиток науково-технічного прогресу та гонитва за надлишками первинних енергоносіїв призводить до порушення природного балансу та біосистеми в цілому. Країни

світу та Україна гостро відчувають зміну клімату, природного балансу й їх вплив на здоров'я, економіку та природне середовище. Україні загрожують різні зміни температурних умов, перетворення степів південного регіону на пустелі, затоплення прибережних районів Чорного та Азовського морів, гостра нестача питної води у південних і східних областях [2]. Отже, наслідки життєдіяльності людства призводять до того, що уряди країн змушені до розгляду та впровадження нової екологічної політики щодо викидів парникових газів в атмосферу шляхом розвитку біоенергетики.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. За останні 10 років спостерігається зростаюча тенденція в дослідженнях авіаційного біопалива, що показує необхідність екологізації авіаційної галузі за допомогою різних видів альтернативних реактивних палив. В роботах Реймер і Чжен (2017) були представлені можливі стратегії комерційного використання авіаційного біопалива, такі як одночасне впровадження податків на традиційне паливо та заходи стимулювання використання біопалива. Можливість виробництва біопалива з різних видів сировини, таких як мікроводорості [5], лігноцелюлоза [6], міські та сільськогосподарські відходи [7] та рослинна олія [8]. Кандарамат Харі та ін. (2015) проаналізували шляхи виробництва з використанням сировини другого та третього покоління, які дають розуміння стану та майбутніх напрямків біоенергетики.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Проблеми, з якими стикається авіаційне біопаливо, загалом подібні до проблем біопалива: головна з них полягає в тому, як забезпечити, щоб сировина, яка надходить з біомаси, була безпечною, стійкою, дешевою та достатньо доступною. У зв'язку з тим, що авіаційна галузь разом із секторами опалення, наземного транспорту та електроенергії докладає зусиль, щоб позбутися залежності від викопного палива шляхом переходу на біомасу, її попит на ту саму сировину створює конкуренцію на постачання.

Новизна. Наявні наукові роботи обмежені окремими питаннями збору та обробки сировини для виробництва біопалива, і наразі відсутні дослідження щодо викидів парникових газів, які є результатом виробництва та реалізації біопалива. Тому новизною даної роботи є дослідження авіаційного біопалива шляхом аналізу сировини, технології отримання, економічної та екологічної доцільності виробництва.

Методологічне або загальнонаукове значення. Збільшення потужності виробництва авіаційного біопалива сприятиме енергетичній безпеці, стабільності цін та створенню робочих місць. Використання різної рослинної сировини для отримання біопалива може призвести до збільшення кількості сільськогосподарських угідь за рахунок використання неорних малопродуктивних земель.

Викладення основного матеріалу. Знайти швидке рішення для скорочення викидів парникових газів в авіаційній галузі є серйозною проблемою. Міжнародна організація цивільної авіації (ICAO) пропонує чотири етапи для досягнення цієї мети: 1) вдосконалення технології; 2) вдосконалення операцій; 3) економічні заходи; 4) використання біопалива.

На сьогоднішній день технологічні вдосконалення вже почали сприяти скороченню викидів парникових газів. Виробники літаків і двигунів зробили значні технологічні зміни, використовуючи більш легкі та міцні композитні матеріали в конструкції літаків із покращеною аеродинамікою та ефективнішими двигунами. Використовуючи заходи, які пов'язані зі зменшенням ваги вантажних контейнерів, викиди парникових газів зменшилися на 10000 т/рік [4]. Однак, повільні поступові зміни вже розробленої технології двигунів і тривалий термін служби існуючих парків вказують на біопаливо як на набагато швидший і економічно ефективніший варіант зменшення викидів.

Паливо вироблене із сирової нафти, є сумішшю різних вуглеводнів газу. В якості палива для авіації реактивному паливу надається перевага над бензином, оскільки воно менш летюче та густе, а в порівнянні з дизелем, реактивне паливо легше і менш схильне до утворення парафіну при низьких температурах [3]. Біопаливо повинно мати фізичні та хімічні властивості, подібні до традиційного. Авіаційне біопаливо повинне мати високу холодостійкість при температурах від -47 до 40 °C і на висотах понад 30 000 футів, а також мати достатньо енергії для здійснення далеких рейсів [5].

Очевидно, що викиди літака, що працює на біопаливі будуть значно нижчими від загальних викидів вуглецю порівняно з нафтовим паливом.

Біопаливо – альтернативний вид палива, який отримують в результаті переробки тваринної або рослинної сировини, а також органічних промислових відходів і продуктів життєдіяльності. Біопаливо може використовуватись в чистому вигляді або в сумішах з традиційним нафтовим реактивним паливом.

Біомаса, яка на сьогоднішній день використовується для отримання нових видів палив, поділяється на чотири покоління. Рослинні культури, такі як рижій, пальмова олія, ріпак, соя, соняшник, салікома, пшениця, цукрова тростина, цукрові буряки належать до сировини першого покоління. До сировини другого покоління належить ятрофа, рицина, слоняча трава, міскантус, тополя, верба, евкаліпт, а також відходи с/г та лісового господарства, харчові та побутові відходи. Водорості використовують в якості третього покоління сировини. Четверте покоління сировини для біопалива представлено генетично модифікованими організмами та неорганічною сировиною.

У таблиці 1 наведено порівняльну характеристику сировини, яку використовують для отримання біопалива.

Наведені в табл. 1 дані демонструють перевагу мікродоростей як найбільш перспективну альтернативу в порівнянні з іншими сировинними ресурсами. Водорості мають найвищий темп росту, що робить їх життєздатним джерелом біомаси, що здебільшого містить ліпідну олію, яка дає в 10–30 разів вищий вихід біодизельного палива у порівнянні з іншими видами олійних культур при вирощуванні їх на однаковій площі.

Із культур першого покоління отримують цукор, крохмаль, жир та олію. Рослинна олія або тригліцериди (складні ефірів гліцеролу з жирними кислотами) вступають у хімічну взаємодію із спиртом при використанні основних або кислотних катализаторів, в результаті чого утворюються біодизель та гліцерин. Цукор або крохмаль можна переробляти за новою технологією з використанням гомогенного або гетерогенного. Використання гомогенного катализатора для отримання біопалива в Україні на теперішній час слід вважати потенційно перспективним, оскільки на території України є достатня

кількість промислових заводів з виробництва таких катализаторів [10].

Використання гетерогенного катализатора для отримання біодизеля дає змогу зменшити витрати на установку і закупівлю катализатора та полегшити процес очищення продуктів реакції. Порівняно з гомогенним катализатором гетерогенний не розчиняється, а отже не потрапляє в біодизельне паливо та гліцеринову фракцію, що є важливим фактором для забезпечення довгострокової та безпечної експлуатації техніки. Одним з основних недоліків широкого використання цього катализатора слід вважати відсутність в Україні промислового виробництва гетерогенних катализаторів, необхідних для виробництва біодизеля.

В Україні основною сировиною для виробництва біодизельного палива служить ріпакова олія. Температура її застигання $-20 \dots -31,7$ °С, метиловий ефір ріпакової олії застигає при $-9 \dots -17$ °С, соевий при -1 °С, соняшниковий при -4 °С, тваринний жир вже при 9 °С. Таким чином, експлуатація транспорту з дизелем на чистому біодизельному паливі в холодну пору року на території України неможлива.

На рис. 1 показано вміст олії в рослинній сировині та водоростях.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика сировини для отримання біодизелю

Рослинна сировина	Показники			
	Джерело росту	Збір врожаю	Обсяг врожаю, т/га в рік	Продуктивність біопалива, кг/рік
Перше покоління	– сонячне світло; – CO ₂ ; – вода; – добрива.	через 10–11 міс.	ріпак 1,5–4,0 соя 1,8–2,3 соняшник 1,1–2,7	ріпак – 860 соя – 560 соняшник – 950
Друге покоління			ятрофа 2,0–2,2 стрижень 9,6–10,1 кукурудзяний жом 3,4–3,9 цикорій 30–40 маніока – 5020,0	цукровий буряк 250–600 кукурудза 250–350 пшениця 150–280 жито 100–210 картопля 160–360 цикорій – 300–400
Третє покоління	– сонячне світло; – CO ₂ ; – вода.	маса збільшується вдвічі через 40 год.	80–120	121000
Четверте покоління	– CO ₂ , – вода, – сонячне світло.	–	–	–

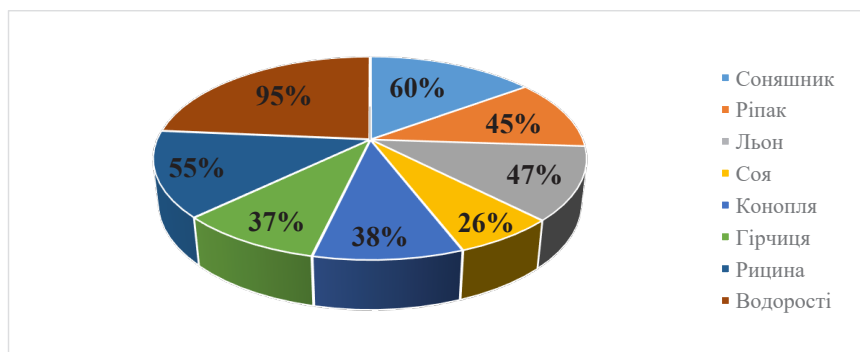


Рис. 1. Олійність сировини

Можливим шляхом вирішення даної проблеми є використання його сумішей з традиційним дизельним паливом або додаванням спеціальних присадок.

На підприємствах з виготовлення ріпакової олії, головною проблемою є утилізація відходів. Щоб виробництво біодизелю стало економічно доцільним потрібно під час переробки ріпакової культури налагодити комплексну переробку сировини та усіх побічних продуктів. Технології використання відходів переробки ріпакової олії наведені в таблиці 2 [10].

Одним із потенційних сировинних джерел другого покоління може бути сорго цукрове, оскільки в його соку стебла міститься 16–20% вуглеводів. Виробництво біопалива з сорго цукрового має економічні перспективи для розвитку цукрової, харчової промисловості та біоенергетичного виробництва України, оскільки природно-кліматичні умови відкривають можливості для сорго цукрового в посушливих південних районах, де вирощування буряку цукрового є економічно недоцільним, що забезпечує розширення географії розміщення підприємств та сприятиме створенню нових робочих місць та розвитку сільських регіонів [11].

Цінною сільськогосподарською культурою є цикорій, коренеплоди якого містять полісахарид інουλін у кількості 18–20%, до 2–3% фруктози, і є перспективним для виробництва паливного біоетанолу. Вихід спирту з одного центнера коренеплодів становить десять літрів. При забезпеченні врожайності коренеплодів на рівні 30–40 т/га, цикорій стає в один ряд з такими високопродуктивними енергетичними культурами як сорго, буряк цукровий, кукурудза. Основними факторами, які стримують розширення вирощування даної культури, є відсутність високопродуктивних сортів стійких до несприятливих чинників навколишнього середовища [12].

Топінамбур – багаторічна трав'яниста рослина, в пагонах якого міститься від 16–18% розчинного полісахариду інуліну, фруктоза, мікроелементи, азотисті речовини, каротин, вітаміни В1 та С, що необхідно для мікробного синтезу біоетанолу.

Маніок – чагарник, коріння якого містить 20–40% крохмалю і незначну кількість білка, має високу врожайність та може використовуватись в якості сировини для отримання паливного біоетанолу.

До деревних енергетичних культур для виробництва біопалива відносять тополь, вербу, евкаліпт. Деякі експериментальні дослідження показали, що верба є реальним джерелом прекурсорів реактивного палива, до яких входять спирти, синтетичний газ [13] і піролізна нафта [14]. На відміну від іншої сировини, енергетичні культури потребують меншої кількості добрив, а тому рекомендується їх вирощувати на неродючих землях, що може покращити біорізноманіття цих територій, призвести до фіторедації забруднених ділянок.

Тверді побутові відходи також все частіше розглядаються як вихідна сировина для отримання біопалива. Дослідження, щодо виробництва біопалива із відходів показують найменшу загальну вартість та мінімальні викиди парникових газів, що в майбутньому гарантуватиме зменшення викидів парникових газів авіаційною галузю. Транспортування та доступність біомаси відходів залишаються основними проблемами при використанні їх як сировини для виробництва біопалива. Збір, транспортування та зберігання великої кількості відходів біомаси, таких як гній тварин і тверді побутові відходи, створюють ризик для здоров'я та безпеки.

Мікроводорості як вихідна сировина третього покоління мають високу продуктивність через вміст жирних кислот, які легко можна перетворити на біопаливо. Серед всієї біологічної сировини найвищу олійність мають водорості (рис. 1). Таким чином, мікроводорості можуть використовуватись для виробництва біопалива у великих масштабах. Але існують проблеми з технологіями вирощування, збору врожаю та видобутку олії, які все ще є неефективними та дорогавартісними [5].

На рис. 2, наведена вихідна сировина, яка найчастіше використовується для отримання авіаційного біопалива. На стадіях вирощування, обробки сировини та при зберіганні, транспортуванні та використанні біопалива утворюються різноманітні викиди, в тому числі гази, що спричиняють парниковий ефект.

Аналізуючи дані наведені на рис. 2, можна зробити висновок, що вирощування ріпаку має найбільші викиди парникових газів, і потреба в енергії для отримання ріпакової олії також є найбільшою.

Таблиця 2

Використання відходів переробки ріпакової культури

Відходи	Застосування
Солома	– на підстилку тваринам; – для виробництва енергії та будівельних атеріалів; – виробництво гранул та пелет.
Шрот	Сировина для комбікорму
Гліцерин	– спалювання; – виробництва біогазу; – хімічне, фармацевтичне та косметологічне виробництво; – виробництво фосфорних добрив.

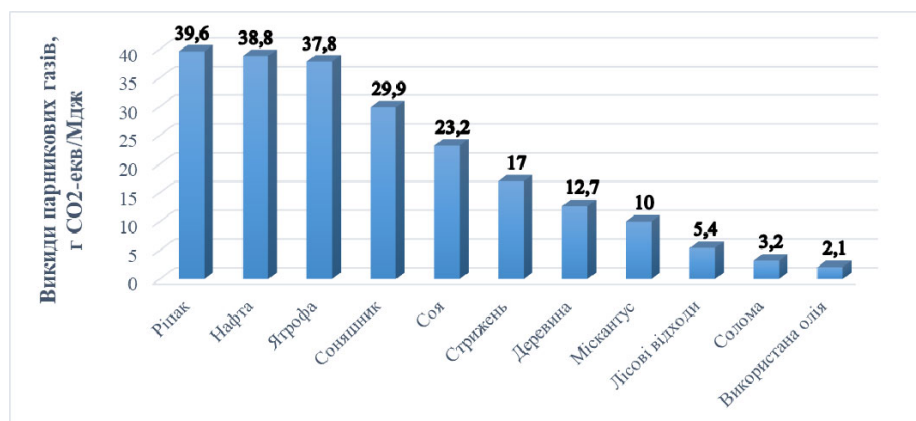


Рис. 2. Викиди парникових газів, які утворилися при виробництві та використанні біопалива

Викиди парникових газів протягом життєвого циклу біопалива з соняшника та сої в півтора рази менші в порівнянні з виробництвом нафтового палива, що підтверджує альтернативність виробництва авіаційного палива із сировини першого покоління.

Використання деревних енергетичних ресурсів та міскантусу зменшує викиди парникових газів у 3 рази в порівнянні з нафтовою сировиною. Але, масштабне вирубування деревини потенційно може призвести до значного збільшення атмосферного вуглецю. Тому рекомендується уникати використання деревних енергетичних культур для виробництва біопалива через непередбачувані екологічні наслідки.

У випадку вирощування ятрофи рівень викидів парникових газів подібний до нафти. Для ятрофи потрібні родючі сільськогосподарські чи лісові угіддя, це в свою чергу унеможливає її вирощування на неродючих землях, що потенційно може призвести до зміни екологічної стійкості родючих земель.

З рис. 2 видно, що відходи біомаси мають найнижчі викиди парникових газів протягом всього життєвого циклу біопалива, а лісові відходи є найбільш екологічно безпечними як на етапі

виробництва сировини, так і на етапі виробництва палива.

За рівнем викидів парникових газів даний аналіз показує, що відпрацьована олія є найбільш екологічно ефективною сировиною для виробництва авіаційного біопалива, але відсутність шляхів збору унеможливає її використання у великих масштабах.

Головні висновки. Встановлено, що негативний вплив на навколишнє середовище рослинних культур, таких як ріпак та ятрофа, обмежує їх застосування для виробництва біопалива, але використання відходів, таких як використана олія, відходи деревини та солома, дають можливість розширити шляхи їх утилізації з отриманням спиртового біопалива.

Великий потенціал використання в якості вихідної сировини для отримання авіаційного біодизелю можуть мати водорості, які завдяки своїй високій врожайності та безпечності для довкілля є економічно вигідними у довгостроковій перспективі.

Перспективи використання результатів дослідження. У цій статті наведено комплексний аналіз сировини, методів отримання, рівень викидів парникових газів всього життєвого циклу біопалива, які можуть в майбутньому допомогти розвитку галузі виробництва авіаційного біопалива та стати енергетично незалежними від вичерпних паливних ресурсів.

Література

1. Гелетуа Г.Г. Українська біоенергетична асоціація. URL: <https://uabio.org/> (дата звернення: 27.02.2023)
2. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України, ІВЕ НАН України, 2020. 163 с.
3. Постачання та використання енергії. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 27.02.2023)
4. Yang, J., Xin, Z., He, Q. S., Corcadden K., and Niu H. An overview on performance characteristics of bio-jet fuels. Fuel 237, 2019. 916–936 p. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.10.079
5. Reimer, J. J., Zheng X. Economic analysis of an aviation bioenergy supply chain. Renew. Sustain. Energy Rev. 77, 2017. 945–954 p. DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.036
6. Swapwa J. K., Anandraj A., and Trois C. Conceptual process design and -simulation of microalgae oil-conversion to aviation fuel. Biofuels Bioprod. Bioref. 12, 2018. 935–948 p. DOI: 10.1002/bbb.1890
7. Cheng, F., and Brewer, C. E. Producing jet fuel from biomass lignin: potential pathways to alkyl-benzenes and cycloalkanes. Renew. Sustain. Energy Rev. 72, 2017. 673–722 p. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.030
8. Jiménez-Díaz, L., Caballero, A., Pérez-Hernández, N., and Segura, A. Microbial alkane production for jet fuel industry: motivation, state of the art and perspectives. Microb. Biotechnol. 10, 2017. 103–124 p. DOI: 10.1111/1751-7915.12423
9. Vásquez, M. C., Silva, E. E., and Castillo, E. F. Hydrotreatment of vegetable oils: a review of the technologies and its developments for jet biofuel production. Biomass Bioenergy 105, 2017. 197–206 p. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.07.008

10. Kandaramath Hari, T., Yaakob, Z., and Binitha, N. N. Aviation biofuel from renewable resources: routes, opportunities and challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 42, 2015. 1234–1244 p. DOI: 10.1016/j.rser.2014.10.095
11. Будько М. О. Використання комплексної переробки ріпаку як один з варіантів зменшення собівартості виробництва біодизелю. Київ: НТУУ „КПІ”, 2013. С. 425–427.
12. Курило В. Л., Кулик. М. І. Енергетичні культури для виробництва біопалива: довідник. Полтава, 2017. 74 с.
13. Гелетуха Г. Г., Железна Т. А., Трибой О. В. Перспективи вирощування та використання енергетичних культур в Україні. Київ, 2014. 33 с.
14. Crawford, J. T., Shan, C. W., Budsberg, E., Morgan, H., Bura, R., and Gustafson, R. Hydrocarbon bio-jet fuel from bioconversion of poplar biomass: techno-economic assessment. *Biotechnol. Biofuels*, 9:141, 2016. DOI: 10.1186/s13068-016-0545-7
15. Giudicianni, P., Pindozzi, S., Grottole, C. M., Stanzone, F., Faugno, S., Fagnano, M., et al. Pyrolysis for exploitation of biomasses selected for soil phytoremediation: characterization of gaseous and solid products. *Waste Manage.* 61, 2017. 288–299 p. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.01.031