УДК 665.73 **DOI 10.20535/1813-5420.2.2022.261397**

С.В. Бойченко, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-2489-4980
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
А.В. Яковлєва, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-7618-7129
Д.В. Боднар, магістр, ORCID 0000-0003-0377-6034
А.В. Гудзь, магістр, ORCID 0000-0001-6003-5756
М.В. Московчук, магістр, ORCID 0000-0002-1555-858X
Український науково-дослідний та навчальний центр хіммотології та сертифікації ПММ,
науково-технічна спілка хіммотологів, Національний авіаційний університет
М.Г. Лорія, д-р техн. наук, проф. ORCID 0000-0002-5589-8351
Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ ПАЛИВ ДЛЯ ПОВІТРЯНО-РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ ЗІ СПИРТУ

У статті розглянуто питання конкурентоспроможності технологій виробництва альтернативних авіаційних палив та їх використання у сучасному транспортному секторі, що стрімко розвивається. Розглянуто актуальні тенденції транспортної галузі щодо необхідності переходу від традиційного нафтового палива до альтернативного, не тільки для наземного, а й для авіаційного транспорту. Така тенденція обумовлена вичерпністю запасів нафти з одного боку та погіршенням стану довкілля з іншого. В роботі проаналізовано асортимент відновлюваної сировини та технологічні процеси її перероблення, що використовуються сьогодні для виробництва альтернативних авіаційних палив. Виконано порівняльний аналіз характеристик технологічних процесів одержання альтернативних палив для повітряно-реактивних двигунів на основі біомаси. Розглянуто процеси одержання спиртів (етанолу та бутанолу) з відновлюваної рослинної сировини та процеси їх подальшої конверсії на альтернативне паливо для повітряно-реактивних двигунів. Показано, що на сьогоднішній день використання авіаційних палив, одержаних зі спиртів дозволено у сумішах з традиційним нафтовим паливом у кількості до 50 %.

Ключові слова: *біопаливо, повітряно-реактивний двигун, спирт, цеоліти, авіаційна галузь, біоетанол, конверсія, ферментація.*

Вступ. Розвиток авіаційної техніки постійно рухається у напрямі збільшення швидкостей та висот польотів літальних апаратів (ЛА), покращення економічності, масових характеристик, надійності та ресурсу силових установок. Надійність та ефективність роботи двигуна і відповідно самого ЛА потребують високої якості палива [1]. Сучасні палива для цивільної авіації мають задовольняти низку вимог, пов'язаних з економічністю, надійністю, довговічністю роботи авіаційної техніки та екологічною безпечністю палива. Також слід не забувати про обмеженість світових запасів нафти, що є основною сировиною для виробництва авіаційного палива. Беручи до уваги зазначені фактори, актуальним стає пошук та розробка альтернативних технологій виробництва авіаційного палива з відновлюваної сировини. На сьогодні вже відомо низку енерготехнологій виготовлення альтернативних авіаційних палив, які активно досліджуються та впроваджуються в практику [1, 2].

Сучасні тенденції розвитку цивільної авіації вказують на необхідність підвищення паливної ефективності та екологічності застосовуваних палив. Застосування традиційного палива для повітряно-реактивних двигунів (ПРД) все в меншій мірі задовольняє перспективним вимогам до екологічності при постійно зростаючій на нього ціні. Крім того, запаси нафти не безмежні [3]. На думку багатьох фахівців, рішенням зростаючих проблем з нафтовими паливами може бути використання альтернативних видів авіаційного палива. Низка компаній в різних країнах світу спільно з виробниками авіаційної техніки при вагомій державній підтримці активно розробляють нові види палива. Найбільш поширені на даний момент біопалива, що складаються з біоетанолу, отримані з різних рослинних і тваринних джерел [2, 4].

Альтернативні види палива за своїми експлуатаційними властивостями не повинні поступатися нафтовим палив. Можливий перехід на них не повинен вимагати значних витрат на модернізацію повітряних суден і засобів наземного авіапаливозабезпечення. Тому актуальним завданням є проведення порівняння основних показників якості нафтових палив, біопалив і їх сумішей для оцінки можливості застосування біопалив на повітряних судах. У найближчій перспективі можуть використовуватися зріджений природний газ, синтетичні бензини і дизельне паливо, а в майбутньому можна очікувати на широке застосування водню і енергетичних установок з паливними елементами [3].

Мета роботи і завдання дослідження. ***Метою роботи*** є порівняльний аналіз і характеристика технологій отримання палив для повітряно-реактивних двигунів зі спиртової сировини, що володіють

поліпшеними експлуатаційними та екологічними властивостями, порівняно з традиційними паливами для ПРД.

Об'єкт дослідження – паливо для ПРД на основі спиртів та технологічні процеси його одержання.

Предмет дослідження – методологічні основи використання альтернативних видів палива, в тому числі, спиртів як палив для ПРД.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. З кожним роком авіаційна галузь відчуває зростаючий пресинг з боку громадськості та екологів, які відзначають, що збільшення обсягу перевезень завдає серйозної шкоди навколишньому середовищу, до того ж авіація є одним з найбільших споживачів паливно-мастильних матеріалів.

Провідні представники авіаційної галузі прийшли до єдиної думки про необхідність підвищення паливної ефективності експлуатованих літаків на 1,5% до 2020 р. Одним з таких способів є застосування альтернативного палива. Але, головна проблема, пов'язана з широкомасштабним виробництвом біопалива – це його вартість. На даний момент біопаливо дорожче традиційного авіаційного керосину в 2–3 рази. Але з нарощуванням обсягів виробництва біопалива його вартість буде поступово падати. При цьому, за прогнозами аналітиків, вартість традиційного авіакеросину буде збільшуватися, відповідно, з часом ці два види палива, напевно, змінять свої позиції [2, 5].

Однією з головних рушійних сил для галузі є спільна ініціатива американських ВВС і флоту. На дослідженні виділяються значущі кошти, а на сьогоднішній день розробки ведуться з використанням усіх можливих видів сировини. Зокрема, морські сили США планують до 2020 року передати всі повітряні транспортні засоби на суміш 50/50 авіаційного керосину та біопалива [6].

Всесвітній економічний форум в Давосі щорічно стає всесвітнім діловим і економічним центром. Місцем, де лідери провідних розвинених країн обговорюють стратегічно-важливі питання, котрі стосуються вектора розвитку планети в цілому. У тому числі і екологічні. Не секрет, що цьогоріч форум відвідала і юна активістка за збереження планети Гретта Тумберг. І ось, перші ініціативи не змусили себе довго чекати. Аеропорт Цюріха вперше заправив літаки біопаливом [7].

Основна частина. В основі будь-якого моторного палива, чи то традиційного, чи то альтернативного, зокрема на основі біомаси, є вуглеводні, що утворені атомами водню та вуглецю. Незважаючи на те, що як нафта так і біомаса є джерелами природного вуглецю, кожна з цих видів сировини має дуже різний хімічний склад [8]. Відмінності у складі сировини визначають підходи та технологічні процеси, що використовуються для перероблення обох видів ресурсів на вуглеводневе паливо. Так, природа нафтових вуглеводнів (гідрофобні, дуже леткі та інертні) вимагає здійснення конверсії за високих температур і в паровій фазі. На відміну від них, вуглеводні, одержані з біомаси є високо реакційно здатними і тому потребують значно нижчих температур для проведення реакцій, ніж нафтові сполуки [9].

На рис. 1 наведено основні технологічні процеси перероблення біомаси на альтернативне паливо для ПРД. У всіх випадках необхідний перший етап подрібнення, метою якого є зменшення структурної складності біомаси та отримання оксигеновмісних проміжних сполук, менш складні і, як наслідок, більш придатних для подальшого одержання палива для ПРД. Ці проміжні продукти (олії, синтетичний газ, спирти та цукри) дають назву різноманітним напрямам перетворення біомаси на альтернативне паливо для ПРД: *Oil to Jet – OtJ* (олії у паливо для ПРД), *Gas to Jet – GtJ* (газ у паливо для ПРД), *Alcohol to Jet – AtJ* (спирти у паливо для ПРД) та Sugars to Jet – *StJ* (цукри у паливо для ПРД) відповідно [8, 9].

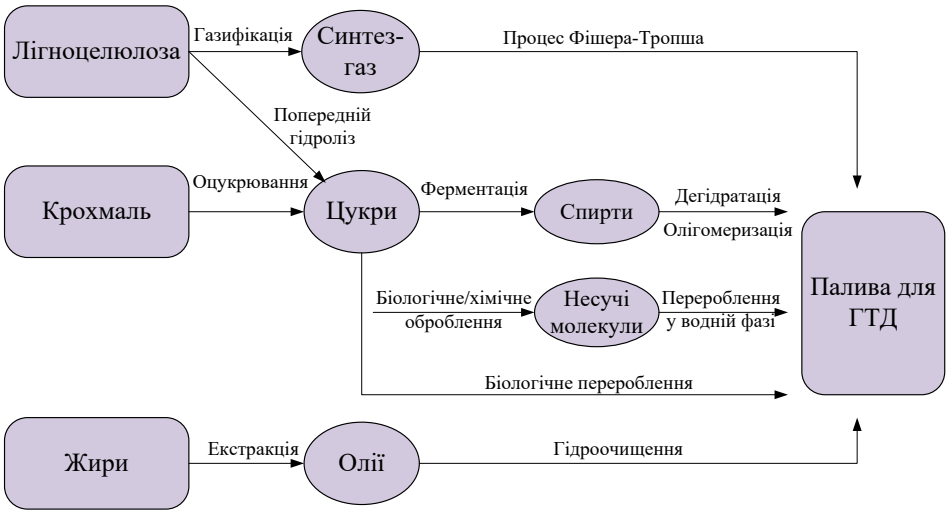

Рисунок 1 – Основні технологічні процеси перероблення біомаси на альтернативне паливо для ПРД [9]

На сьогодні вже відомо низка технологій виготовлення альтернативних авіаційних палив, що активно досліджуються та впроваджуються в практику. У межах даної статті представлено огляд основних технологій, доступних сьогодні, зокрема детально буде розглянуто технологічні процеси одержання альтернативного палива для ПРД зі спиртової сировини. Основні характеристики чотирьох найбільш поширених технологічних процесів (*OtJ, GtJ, AtJ та StJ*) представлено в таблиці 1 [9].

Таблиця 1 – Основні характеристики технологічних процесів одержання альтернативних авіаційних палив на основі біомаси

№ з/п	Показник	Технологічний процес			
		OtJ	GtJ	AtJ	StJ
1	Сировина	Рослинні олії	Лігноцелюлоза, побутові та сільськогос-подарські відходи	Спирти, одержані з біомаси	Цукри, фурани
2	Етапи реакцій	Гідроочищення Фракціонування	Газифікація ФТ-синтез фракціонування	Дегідрування Олігомеризація Гідрогенізація Фракціонування	Деоксигенація С-С групування Гідрогенізація Фракціонування
3	Каталізатори	Al сульфіди та інші металеві каталізатори	Каталізатори на основі Fe та Co	Гетерогенні та гомогенні каталізатори	Широкий спектр гетерогенних каталізаторів
4	Комерційна готовність	Комерційне використання	Демонстраційні польоти	Лабораторні дослідження	Лабораторні дослідження
5	Мінімальна вартість, $/галон	4,4–5,1	3,9–4,3	Не розраховувалося	Більше 3,5
6	Емісія ПГ (г CO_2/МДж)	13–141	2–10	Не розраховувалося	15–49
7	Наявність ароматичних сполук у складі палива	Ні	Так, за технологією FT-SKA	Так	Так
8	Сертифікація ASTM	Так Компаундування у кількості до 50 % з нафтовим паливом для ГТД	Так Компаундування у кількості до 50 % з нафтовим паливом для ГТД	Так Компаундування у кількості до 50 % з нафтовим паливом для ГТД	На стадії проведення випробувань

Використання біоетанолу як моторного палива вимагає рішення низки технологічних проблем, пов'язаних з його застосуванням. Перш за все слід зазначити необхідність попереднього очищення етанолу від води. Крім того, виникає необхідність модифікації двигуна для роботи на чистому етанолі або обов'язкове змішання з бензином для використання в двигунах без їх модифікації. До недоліків можна віднести також високий тиск пари і, як наслідок, високу випаровуваність етанолу, високу корозійну активність через неминучу присутність води, а також можливість її вимерзання в умовах низьких температур і розшарування паливної суміші [5, 6].

Світове виробництво етанолу базується на двох методах: нафтохімічному і біотехнологічному (ферменти або бактерії). Нафтохімічний метод полягає в гідратації етилену в присутності неорганічних кислот. Простота технологічного оформлення і висока продуктивність робить цей метод надзвичайно привабливим в умовах низької вартості використовуваного сировини. На даний момент через негативний баланс цін між етанолом і етиленом даний метод практично повністю витіснений процесами на основі переробки біомаси [5].

Ферментація глюкози – це найстаріший метод виробництва етанолу, що застосовується для виготовлення алкогольних напоїв. Як сировина використовується продукція сільського господарства, що містить цукру, крохмаль і целюлозу, а також відходи деревної промисловості та побутові відходи [7].

Є методи виробництва спирту гідролізом целюлози. Біда тільки, що целюлоза – одна з найміцніших з'єднань, наявних в рослинах, і «розвалити» цей на диво міцний полісахарид на цукри, що є основою для виробництва спирту, ще треба зуміти. Целюлозу доводиться розкладати або за допомогою сильнодіючих хімікатів (від кислоти до ензимів), або вдаватися безпосередньо до допомоги ензими бактерій. Процес

виходить нешвидким і не дешевим: станом на 2006 рік вартість виробництва літра целюлозного спирту становила 60 центів, і при такій ціні по економіці він зрівняється з нафтою при ціні її не нижче 120 доларів за барель [4–5, 8].

Оскільки переробка целюлози так складна, спирт в значно більших обсягах отримують з, наприклад, крохмалю. Він хоч теж полісахарид, але розкладається на цукри куди простіше.

Каліфорнійська Byogy Renewables рапортує про розробку першого в світі методу прямої переробки спирту в 100 % заміну гасу шляхом каталітичного синтезу. Там вважають, що таке паливо може бути сертифіковане в кінці 2013-середині 2014 року, і відома Qatar Airways вже уклала з Byogy угоду про використання виробленого біопалива на своїх літаках відразу після отримання сертифікату. Авіакомпанія розраховує, що виробництво палива з спирту незабаром стане провідним трендом, і воно допоможе їй відмовитися від використання на своїх літаках палива нафтового походження [10].

Qatar Petroleum і Shell вже побудували в Катарі завод з виробництва палива GTL (Gas-to-liquid), а авіакомпанія з 2009 року використовує на своїх A340-600 суміш з рівних кількостей GTL і керосину A1. GTL не містить ароматичних вуглеводнів, тому його доводиться змішувати з керосином, але керосин можна буде замінити на ATJ [8].

Технологічний процес конверсії етанолу на цеолітах. Біоетанол – один з видів відновлюваної сировини, що отримується з рослинної біомаси, що містить природні цукри, целюлозу або крохмаль, шляхом її ферментативної переробки. Використання біоетанолу як моторного палива вимагає рішення ряду технологічних проблем, пов'язаних з його застосуванням. Перш за все слід зазначити необхідність попереднього очищення етанолу від води [11].

Світове виробництво етанолу базується на двох методах: нафтохімічному і біотехнологічному (ферменти або бактерії). Здійснення прямої конверсії ферментацій сумішей і етанолу в вуглеводні можливо на каталізаторах на основі ZSM-5. У цеолітах типу пентасілов основним елементом кристалічної решітки є фрагмент з п'яти- і шестичленних кілець, поєднання яких дає ланцюжки, що утворюють шари [12].

Усередині цеоліту формується система каналів, поєднання яких представляє собою круглу десятичленне кільце діаметром 0,54-0,56 нм.

При пропущенні біоетанолу через цеоліти зі структурою HZSM-5 утворюється ряд ароматичних і аліфатичних вуглеводнів різної будови. Цей процес за аналогією з процесом конверсії метанолу MTG (methanol-to-gasoline) відомий під назвою ETG (ethanol-to-gasoline). Механізм реакції включає в себе дегідратацію етанолу, олігомеризацію етилену з подальшим крекінгом і ароматизацією олефінів або олефінових фрагментів.

Конверсія етанолу на розроблених каталізаторах типу HZSM-5 призводить до утворення насичених і ненасичених вуглеводнів, у тому числі толуолу, ксилолів та інших ароматичних вуглеводнів. Октанове число рідкого продукту при конверсії етанолу на цеолітах ЦКЕ-Г50 склало 98 за дослідницьким методом. З урахуванням відсутності в його складі сірки і азоту, а також низький вміст бензолу його можна використовувати як високооктанове, екологічно більш чисте моторне паливо, що відповідає рівню якості за Євро-4–5, у порівнянні з паливом, що продукують з нафти [12].

Крім того, ці каталізатори можна розглядати як перспективні для отриманя з етанолу олефінів і ароматичних вуглеводнів – важливих продуктів для нафтохімічної промисловості. Таким чином, експериментальні дані дозволяють розглядати цеолітні каталізатори на основі HZSM-5 як перспективні і відкривають можливість отримання етилену, пропан-пропенової і бутан-бутенової фракцій, вуглеводнів бензинового ряду і ароматичних вуглеводнів з біоетанолу. За відсутності нафти отримання їх з відновлюваної сировини стане нагальною потребою [11].

Використання спиртів як сировини для отримання вуглеводневих моторних палив. Спирти мають високі октанові числа – більше 100 од., але меншу в порівнянні з нафтовими паливами теплоту згоряння (під час згорання палива виділяється менше енергії, потужність падає, а витрата палива збільшується) [4].

У даний час як альтернатива використовуються сумішеві палива (суміші бензину з етанолом). Такі суміші зазвичай позначають буквою Е (від слова етанол) і числом, що показує вміст спирту у відсотках. Найбільш поширене паливо Е10 або газохол, що містить 10 % етанолу [4, 6].

Спирт і його суміші з бензином не замерзають, проте схильні до поглинання вологи. На певному етапі це може привести до розшарування паливної суміші, що неприпустимо. У спиртового палива є низка істотних недоліків, таких як токсичність (особливо це стосується метанолу), корозійна активність і агресивність по відношенню до алюмінієвих сплавів, гумі та інших конструкційних матеріалів.

У ролі альтернативної сировини для виробництва моторних палив і інших продуктів для нафтохімії можна використовувати нижчі спирти, головним з яких є біоетанол.

Переробка біомаси в етиловий спирт є одним з найбільш ефективних способів її використання. При цьому необхідно відзначити, що 80 % виробленого в світі біоетанолу використовується як автомобільне паливо у вигляді бензіноетанольної суміші різного складу [4, 6]

Одержання палив для повітряно-реактивних двигунів на основі спиртової сировини. Паливо AtJ (Alcohol-to-Jet) – це паливо, що одержують зі спиртів, таких як метанол, етанол, бутанол та інших довголанцюгових жирних спиртів. В останні роки, перетворення етанолу в сумішеве паливо для ПРД є досить перспективним варіантом для розвитку галузі виробництва альтернативного авіаційного палива. Технологічний процес одержання альтернативних палив для ПРД зі спиртів (AtJ) включає у себе три основні етапи [13]:

1. зневоднення спирту біологічного походження до відповідного олефіну;
2. олігомеризація олефінів до нового олігомеризованого олефіну;
3. гідрування олігомеризованого олефіну до насиченого вуглеводневого продукту.

Ці три процеси є добре відомими і широко використовуються в нафтохімічній промисловості. Спирти, що зазвичай використовуються у технології AtJ, включають невеликі сполуки з кількістю атомів вуглецю С2 – С4, такі як етанол та бутанол (н-бутанол та ізо-бутанол). Ці спирти можуть бути отримані з цукровмісної біомаси за допомогою мікробних технологій бродіння, подібних до тих, що використовуються у пивоварінні та виноробстві [8, 13]. Одержання цукрів з вуглеводних полімерів з біомаси на основі їстівної сировини, такої як цукровий очерет або кукурудза є порівняно легким, адже достатньо простої обробки в гарячій воді для вивільнення мономерів. У разі використання неїстівної біомаси (наприклад, лігноцелюлози) одержання цукру є більш проблематичним, і потребує додаткового попереднього оброблення з метою послаблення структури лігніну, яка оточує полімери целюлози та геміцелюлози. Спирти утворюються в біоферментаторах за низьких концентрацій у межах кімнатної температури, щоб забезпечити виживання мікроорганізмів.

Для перероблення спиртів на паливо для ПРД, їх спочатку зневоднюють у відповідний алкенний продукт, що містить однакову кількість атомів вуглецю. Потім продукт відокремлюють від рідкої води та домішок фракціонуванням і подають на наступний етап процесу у вигляді газу. На наступному етапі газоподібний матеріал олігомеризується до ненасичених сполук з більшою молекулярною масою. Ненасичені олігомери, що мають молекулярну масу, приблизно сумісну з нафтовим паливом для ПРД, відокремлюють та додатково обробляють на третьому основному етапі – гідруванні над твердофазним каталізатором газоподібним воднем. На завершальній стадії гідрований продукт переганяють з отриманням кінцевих продуктів, серед яких є керосинова фракція [3, 9, 13].

Сьогодні прийнято виділяти два різновиди технологічних процесів виробництва палива для ПРД зі спитів. Перший з них, що описано вище, відомий як *AtJ-SPK – Alcohol To Jet – Synthesized Paraffinic Kerosene,* тобто синтетичний парафіновий керосин. Другим процесом є виробництво альтернативного палива для ПРД зі спиртів, що містить у своєму складі ароматичні вуглеводні. Ця технологія називається *AtJ-SKA – Alcohol To Jet - Synthesized Kerosene with Aromatics*. Альтернативне паливо за технологією *AtJ-SKA*, виробляється сьогодні компанією Swedish Biofuels, також є відоме під торговою назвою SB-JP-8 [9]. Принципово технологічний процес одержання палива *AtJ-SKA* є таким же, як технологічний процес *AtJ-SPK*, за винятком наявності додаткового етапу ароматизації вуглеводнів. Залежно від технологічних можливостей підприємства з виробництва палива, виробництво ароматичних речовин може виконуватися як інтегрований потік у загальному виробничому процесі.

Для поширення виробництва альтернативного палива для ПРД на основі спиртів у комерційних масштабах, технологічний процес повинен пройти процедуру його затвердження та відповідати стандартам ASTM [3]. Традиційно, вимоги до палив для ПРД визначено стандартом ASTM D1655 для авіаційних турбінних палив, у якому деталізовано вимоги до палив нафтового походження та який визначає паливо для ПРД придатним до застосування. Сумішеве паливо для ПРД, що одержується зі спиртів за технологічним процесом ATJ, вже наразі затверджене стандартом ASTM D7566 [4]. В даний час таке паливо, що виробляється з етанолу або проміжного продукту ізобутанолу, допускається до компаундування з нафтовим паливом для ПРД у кількості до 50 %.

Висновки. Історія розвитку енергетичної індустрії пройшла шлях від використання поновлюваних джерел сировини через розквіт нафтової епохи, повертаючись знову до екологічно чистої поновлюваної сировини. Однак альтернативні джерела енергії не є взаємовиключними. Історія показує, що в залежності від рівня потреби в енергії і вимог, що пред'являються до екології, необхідно знаходити раціональні шляхи використання природних ресурсів, як говорив Д.І. Менделєєв, витрачаючи їх дбайливо й економно. Запропонований перелік технологій отримання палив і цінних продуктів для нафтохімії дає всі підстави припускати, що існуючі технології переробки нафти можна замінити на альтернативні, що сприяють значному зменшенню техногенного впливу на навколишнє середовище.

Таким чином, на сьогодні у світі розробляється велика кількість альтернативних технологій виготовлення авіаційних палив з використанням як відновлюваної, так і не відновлюваної сировини. Аналізуючи ситуацію, що склалася в сучасній нафтопереробній галузі, та беручи до уваги екологічну ситуацію у світі, що постійно погіршується – перехід на альтернативні види авіаційного палива є очевидним.

Крім того, слід враховувати вимоги міжнародних організацій, таких як ICAO, IATA, CAEP, щодо екологізації цивільної авіації. Серед цих вимог слід виділити такі: зниження викидів CO_2 літальними апаратами, зниження токсичності їх відпрацьованих газів (NO_x, SO_2 та інші речовини).

Враховуючи ці та інші фактори, альтернативні авіаційні палива, що розробляються та використовуються сьогодні в світі мають задовольняти такі вимоги:

– бути поширеними та доступними в усьому світі з метою забезпечення міжнародних польотів;

– великий термін експлуатації ЛА (більше 30 років) вимагає альтернативні палива бути сумісними з деталями двигуна та не потребувати значних його переобладнань;

– альтернативні палива мають проходити жорстку процедуру сертифікації з метою забезпечення повної відповідності показникам якості традиційних реактивних палив;

– альтернативні авіаційні палива мають бути екологічно безпечними та здатними забезпечити постійно зростаючі потреби авіації в паливі.

Список використаної літератури.

1. Трофімов І.Л. Аналіз впливу авіаційного транспорту на забруднення атмосфери / І.Л. Трофімов // *Енергетика: економіка, технології, екологія.* 2014. – №1. – С. 119 – 12
2. Grace J. Understanding and managing the global carbon cycle / J. Grace // *Journal of Ecology.* 2004. – Vol. 92. – P. 189–202.
3. Yakovlieva A. Modification of jet fuels composition with renewable bio-additives / A. Yakovlieva, S. Boichenko, K. Lejda, O. Vovk. Monograph. K.: Center for education literature. 2019. – 207 p.
4. Третьяков В. Ф. Биоэтанол-стратегия развития топливного и нефтехимического комплекса / В. Ф. Третьяков // *Химия и техника*. 2008. – № 1. – С. 8–12.
5. Boichenko S. Energy Efficient Renewable Feedstock for Alternative Motor Fuels Production: Solutions for Ukraine / S. Boichenko, A. Yakovlieva // Systems, Decision and Control in Energy I: monograph, Springer, Swizerland, 2020. – P. 247–259.
6. Schulz J. Conversion of ethanol over Zeolite H-ZSM-5 / J. Schulz, F. Bandermann // Chemical Engineering and Technology. 1994. – Vol. 17. – P. 179–186.
7. Han J. Life-cycle analysis of bio-based aviation fuels / J. Han, A. Elgowainy, H. Cai, M.Q. Wang // Bioresources technology. 2013. – Vol. 150. – P. 447–456.
8. Ghazanfari J. Limiting factors for the use of palm oil biodiesel in a diesel engine in the context of the ASTM standard / J. Ghazanfari. // Cogent Engineering. – 2017. – №1. – С. 1–17..
9. Rajagopal D. Environmental, Economic and Policy Aspects of Biofuels / D. Rajagopal, D. Zilberman: New Publishers Inc, 2008. – 115 p.
10. Fjerbeak L. A review of the current state of biodisel production using enzmatic transesterifi cation / L. Fjerbeak, K. V. Christensen, B. Norddahl // Biotechnology and Bioengineering. 2009. – Vol. 102. – No. 5. – P. 1298–1315.
11. Кузьмина Р. И., Конверсия одноатомных спиртов на поверхности Zr-модифицированных высококремнистых цеолитных системах типа zsm-5 / Р. И. Кузьмина, А. Ю. Пилипенко, Е. В. Зюмченко // Наука 21 века: новый подход: материалы 21-й молодеж. междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб., 2013. – С. 21–26.
12. Bezhadi S. Review : Examining the use of different feedstock for the production of biodiesel / S. Bezhadi, M.M. Farid // Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. 2007. – Vol. 2. – P. 480–486.
13. Iakovlieva A. Peculiarities of the development and implementation of aviation biofuels in Ukraine / A. Iakovlieva, K. Lejda, O. Vovk, S. Boichenko // World Congress on Petrochemistry and Chemical Engineering. Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology. November 2013, San Antonio. – 2013. – Vol.4. – Iss.6. – P. 47.

S. Boichenko, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-2489-4980
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
A. Yakovlieva, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-7618-7129
D. Bodnar, master student, ORCID 0000-0003-0377-6034
A. Hudz, master student, ORCID 0000-0001-6003-5756
M. Moskovchuk, master student, ORCID 0000-0002-1555-858X
National Aviation University
M. Loriia, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-5589-8351
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNOLOGIES OF JET FUEL PRODUCTION FROM ALCOHOLS

The article considers the question of competitive ability of technologies of alternative aviation fuels production and its application in modern transport sector that develops quickly. Modern tendencies in transport sphere concerning the necessity of transition from conventional oil-derived fuel to alternative one for both road

and air transport are considered in the article. These tendencies are explained by the limitation of crude oil deposits, from one side and worsening of the state of environment caused by exhaust gases emissions from another side. Moreover, international aviation authorities, such ICAO, IATA determine the necessity of active development and implementation of alternative aviation fuels. The article analyzes variety of available today renewable feedstock and technological processes of its processing, which are used today for production of alternative aviation fuels. Peculiarities of direct ethanol use in blends with motor fuels are shown and necessity of its chemical conversion for use in jet fuels is substantiated. The comparative analysis of characteristics of technological processes of alternative jet fuels production based on biomass was done. Processes of alcohols (ethanol, n-butanol and iso-butanol) production from renewable plant feedstock and processes of its further conversion to alternative jet fuel are considered. Two methods of ethanol production (petrochemical and biochemical) were shown and analyzed; advantages and disadvantages of both methods were presented.

It was shown that today application of alternative aviation fuels produced from alcohols is allowed in blends with conventional oil-derived jet fuels in quantity up to 50 %.

Key words: *biofuel, jet engine, alcohol, ceolites, aviation sphere, bioethanol, butanol, conversion, fermentation.*

References

1. Trofimov I.L. Analysis of impact of aviation on atmosphere pollution. Power engineering: economics, technologies, ecology. 2014. No 1. Pp. 119 – 12. (Ukr)
2. Grace J. Understanding and managing the global carbon cycle. Journal of Ecology. 2004. Vol. 92. Pp. 189–202.
3. Yakovlieva A. Boichenko S., Lejda K., Vovk O. Modification of jet fuels composition with renewable bio-additives: Monograph. K.: Center for education literature. 2019. 207 p.
4. Tretiakov V. F. Bioethanol – strategy of development of fuel and oil complex. Chemistry and technology. 2008. No. 1. Pp. 8–12. (Rus)
5. Boichenko S., Yakovlieva A. Energy Efficient Renewable Feedstock for Alternative Motor Fuels Production: Solutions for Ukraine. In Systems, Decision and Control in Energy I: monograph, Springer, Swizerland. 2020. Pp. 247–259.
6. Schulz J., Bandermann F.Conversion of ethanol over Zeolite H-ZSM-5. Chemical Engineering and Technology. 1994. Vol. 17. Pp. 179–186.
7. Han J., Elgowainy A., Cai H., Wang M.Q. Life-cycle analysis of bio-based aviation fuels. Bioresources technology. 2013. Vol. 150. Pp. 447–456.
8. Ghazanfari J. Limiting factors for the use of palm oil biodiesel in a diesel engine in the context of the ASTM standard. Cogent Engineering. 2017. No 1. Pp. 1–17.
9. Rajagopal D., Zilberman D. Environmental, Economic and Policy Aspects of Biofuels. New Publishers Inc, 2008. 115 p.
10. Fjerbeak L., Christensen K.V., Norddahl B. A review of the current state of biodisel production using enzmatic transesterifi cation. Biotechnology and Bioengineering. 2009. Vol. 102. No. 5. Pp. 1298–1315.
11. Kuzmina R.I., Pilipenko A.Yu., Zumchenko Ye.V. Conversion of mono-atom alcohols at the surface of Zr-modified high-silisium ceolite systems of type zsm-5. In Science of 21st century: new approach: Proceeding of the 21st international scientific conference of students and young scientists. St. Petersburg. 2013. Pp. 21–26.
12. Bezhadi S., Farid M.M. Review : Examining the use of different feedstock for the production of biodiesel. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. 2007. Vol. 2. Pp. 480–486.
13. Iakovlieva A., Lejda K., Vovk O., Boichenko S. Peculiarities of the development and implementation of aviation biofuels in Ukraine. In World Congress on Petrochemistry and Chemical Engineering. Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology. November 2013, San Antonio. 2013. Vol.4. Iss.6. P. 47.

Надійшла 29.09.2021
Received 29.09.2021