МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАУКОВА РОБОТА

для участі у Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт з спеціальності «Техногенна безпека»

Тема: «Підвищення техногенної безпеки авіаційної галузі упровадженням альтернативних авіаційних палив»

Шифр роботи «БЕЗПЕКА АВІАЦІЇ»

2019-2020 н.р.

АННОТАЦІЯ

на наукову роботу під шифром «безпека авіації»

Роботу присвячено аналізу вплив авіаційної галузі на стан довкілля та розробленню методів підвищення екологічної та техногенної безпеки авіаційної галузі упровадженням альтернативних авіаційних палив.

Розглянуто та обгрунтовано перспективні види відновлюваної рослинної сировини, що є найбільш доцільними для виробництва авіаційних біопалив в Україні. Одержано біодобавки для використання їх як компонентів авіаційних біопалив. Досліджено основні їх фізико-хімічні властивості. Показано, що біодобавки можуть використовуватися як додатки до палива для ПРД у певному співвідношенні.

Підготовлено зразки авіаційних біопалив, що містять нафтове паливо для ПРД. Досліджено фізико-хімічні властивості зразків біопалив з вмістом біодобавок у кількості 10 %, 20 % та 30 % та порівняно їх з вимогами до якості традиційного палива для ПРД. Встановлено, що введення біодобавок до палива для ПРД у кількості до 20 % цілком задовольняє вимоги стандартів.

Досліджено екологічні властивості нових біопалив що містять нафтове паливо для ПРД та біодобавки у кількості 10 % та 20 % та порівняно їх з нафтовим паливом для ПРД. Розраховано індекси емісії та кількість викидів продуктів повного згорання палив, а також оксидів азоту. Показано, що використання біопалив дозволяє скоротити викиди CO_2 до 22,61 %, викиди H_2O до 23,51 %, викиди SO_2 до 56,95 %, а викиди NO_x до 29,59 %.

Матеріал наукової роботи викладено в трьох розділах на 33 сторінках, містить 20 рисунків, 4 таблиць та 23 використаних джерела літератури.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ВІДПРАЦЬОВАНІ ГАЗИ, ПАЛИВО ДЛЯ ПРД, БІОПАЛИВО, БІОДОБАВКА, ЕСТЕР ЖИНИХ КИСЛОТ, ЕКОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ.

Зміст

Вступ……..... 4
Розділ 1. Передумови розвитку та впровадження авіаційних палив…… 6
1.1. Вплив авіаційної галузі на довкілля……. 6
1.2. Сучасний стан використання біопалив в авіаційній галузі…… 9
Розділ 2. Характеристика сировини та метод отримання біодобавок до альтернативного авіаційного палива..... 10
2.1. Сировина для виробництва біодобавок до альтернативного авіаційного палива…… 10
2.2. Метод отримання біодобавок до альтернативного авіаційного палива……. 12
2.3. Фізико-хімічні властивості біодобавок до альтернативного авіаційного палива…….. 14
Розділ 3. Фізико-хімічні та екологічні властивості нових авіаційних біопалив…….. 18
3.1. Фізико-хімічні властивості нових авіаційних біопалив……. 18
3.2. Екологічні властивості нових авіаційних біопалив…… 22
Висновки……. 30
Список використаної літератури…… 32

Вступ

Акутуальність. З початку появи авіація була прив'язана до нафтопереробної промисловості. Протягом останніх років в галузі авіаційного транспорту спостерігається тенденція щодо зниження затрат на експлуатацію авіаційної техніки. Як військова, так і цивільна авіації активно шукають шляхи мінімізації цих затрат. На сьогоднішній день близько чверті вартості польоту становить ціна на паливо. У зв’язку з тим що нафтові ресурси як сировина для виробництва палив вичерпуються, їх ціна постійно зростає. У зв’язку з цим у недалекій перспективі авіаційна галузь постане перед необхідністю заміни традиційних авіаційних палив на альтернативні. Окрім того занепокоєння викликає стан довкілля. Виробництво палив пов'язано з видобутком із надр землі викопних джерел енергії, що призводить до збільшення кількості CO_2 в атмосфері, результатом чого є підвищення глобального парникового ефекту.

Сьогодні одним із шляхів вирішення проблем впливу авіації на довкілля, а також питання вичерпності традиційних енергоресурсів, є перехід на альтернативні палива. Упровадження біопалив у авіаційній галузі дозволить у майбутньому підвищити ефективність використання моторних палив, функціонування авіатранспортної та енергетичної галузей, а також мінімізувати техногенний вплив на навколишнє середовище.

На тлі зростаючого техногенного забруднення довкілля урбанізованих областях чітко проявляються негативні процеси, а саме що загрожуватиме стану здоров'ю і життю людей. В результаті різкого збільшення інтенсивності руху повітряних суден (ПС), появи в експлуатації важких реактивних літаків, а також значною урбанізації територій прилеглих до об’єктів авіаційної, пов'язаних з експлуатацією авіаційних двигунів (аеропорт, авіаційна база і ін.), Оцінка їх впливу на навколишнє середовище в даний час набуває особливої актуальності. Відпрацьовані гази авіапалив надають найбільш несприятливий техногенний вплив на екосистеми в районі аеропортів. При цьому велика частина викидів забруднюючих речовин відбувається в

двометровому приземному шарі повітря (ДПШП) - зоні дихання людей. Тому потрібно впроваджувати альтернативне авіаційне паливо, для зменшення викидів на навколишнє середовище та для полегшення життя людей .

Мета: дослідити можливість використання авіаційних біопалив для півищення техногенної безпеки авіаційної галузі та мінімізації її впливу на навколишнє середовище

Завдання:

- Проаналізувати вплив авіації на довкілля та ситуацію у галузі виробництва та використання альтернативних авіаційних палив
- Одержати біодобавки до авіаційних палив переестерифікацією ріпакової та рижієвої олії спиртами та подальшою вакуумною дистиляцією;
- Дослідити і обґрунтувати фізико-хімічні властивості біодобавок на основі метилових, етилових та ізо-бутилових естерів ріпакової та рижієвої олії;
- Дослідити фізико-хімічні властивості зразків авіаційних біопалив з вмістом біодобавок та проаналізувати відповідність їх якості вимогам стандартів на традиційне авіаційне паливо;
- Розрахувати та порівняти індекси емісії та кількість викидів відпрацьованих газів повітряних суден з використанням зразків авіаційних біопалив та традиційного авіаційного палива;
- Обґрунтувати можливість використання авіаційних біопалив для зниження впливу авіації на навколишнє середовище.

Методи дослідження: монографічний метод, метод переестерифікації олії та вакуумної дистиляції естерів жирних кислот, стандартні методики визначення фізико-хімічних властивостей палив, .аналітичний метод розрахунку емісії відпрацьованих газів

Розділ 1

Передумови розвитку та впровадження авіаційних палив

1.1. Вплив авіаційної галузі на довкілля.

Сьогодні особливе занепокоєння викликає стан навколишнього природного середовища, що невпинно погіршується. Ідеться насамперед про глобальне потепління, що інтенсифікується у результаті процесів видобування енергоресурсів, їх перероблення та використання [1].

Основними продуктами згорання енергоресурсів, у тому числі й авіаційних палив, є CO_2 та H_2O. Результатом є підвищення глобального парникового ефекту на планеті. Сьогодні концентрація CO_2 в атмосфері становить близько 400 ppm (0,04 %), що вдвічі більше ніж було до початку промислової революції XVIII ст.. За нинішніх темпів розвитку концентрація CO_2 в атмосфері до 2050 р. може досягати 500 ppm (0,05 %) [2-5]. Водночас Міжнародне Енергетичне Агенство повідомляє, що частка викидів вуглекислого газу в результаті діяльності авіаційного транспорту становить близько 2 % (рис. 1) і найближчим часом може досягнути 3% [3].

Стрімкий приріст вмісту CO_2 в атмосфері зумовлено активним розвитком авіаційної галузі. Світовий обсяг пасажирських авіаперевезень щорічно зростає на 4–5 %. Розширення парку літаків та збільшення кількості польотів веде до зростання кількості споживання авіаційних палив [6, 7]. За даними аналітичного сайту www.indexmundi.com у світі щоденно виробляється та споживається близько 5,5 тис. барелей палива для ПРД.

Протягом 10-річного періоду (2002 – 2012 рр.) рівень споживання авіаційних палив зріс на 17 %. Окрім вуглекислого газу продукти згорання палив містять низку речовин, що негативно впливають на стан навколишнього середовища. За результатами досліджень відпрацьовані гази літаків містять близька 200 шкідливих речовин, основними з яких є вуглекислий газ, метан, сажа, оксиди сірки, чадний газ, оксиди азоту, неспалені вуглеводні та ін. (табл. 1) [8-10].

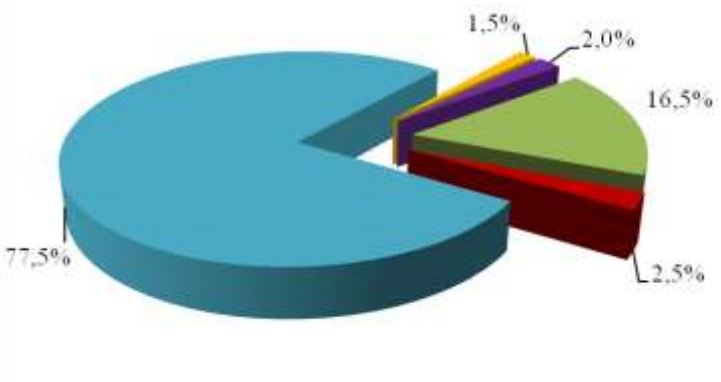

Рис. 1.1 Частка викидів CO_2 від авіаційного транспорту порівняно з іншими видами транспорту: 1,5 % – міжнародна авіація; 2 % – міжнародний морський транспорт; 16,5 % – автомобільний транспорт; 2,5 % – інші види транспорту; 77,5 % – інші джерела енергії

Таблиця 1.1

Склад відпрацьованих газів повітряних суден [11]

№ з/п	Сполука	Механізм утворення	Вплив на навколишнє середовище
1	CO_2	Вуглекислий газ є продуктом повного згорання авіаційного палива. Вуглець палива окиснюється киснем повітря до CO_2	Вуглекислий газ є основним парниковим газом з довготривалим життєвим (50–200 рр.). Його частка від загальних викидів ПРД становить приблизно 70%. Розсіюючись в атмосфері CO_2 спричиняє нагрівання тропосфери під дією сонячного випромінювання
2	H_2O	Водяна пара є іншим продуктом повного згорання палива. У процесі горіння водень окиснюється до H_2O	Становить близько 29% усіх відпрацьованих газів ПРД. Не спричиняє негативної дії на стан навколишнього середовища
3	CO	Чадний газ утворюється у результаті неповного згорання авіаційного палива за нестачі кисню у паливо-повітряній суміші	CO негативно впливає на всі живі компоненти екосистем. В організмі людини блокує доступ кисню до тканин, спричиняє серцево-судинні захворювання
4	NO_x	Оксиди азоту утворюються під час потрапляння повітря у зону горіння з високими температурою та тиском, де молекулярний азот з'єднується з киснем з утворенням NO_x.	NO_x спричиняють утворення фотохімічного смогу та руйнування озонового шару у верхніх шарах атмосфери. В організмі людини викликають подразнення слизових оболонок, ураження ЦНС
5	C_xH_y	Вуглеводні викидаються внаслідок неповного згорання палива в умовах нестачі кисню у паливо-повітряній суміші	Вуглеводні є джерелами забруднень довкілля канцерогенними речовинами. В організмі людини C_xH_y чинять канцерогенний, мутагенний, наркотичний та інші токсичні ефекти
6	SO_x	Оксиди сірки утворюються внаслідок окиснення	Оксиди сірки у вологому повітрі утворюють водні розчини сірчаної кислоти, що

		сірковмісних сполук авіаційних палив киснем повітря у процесі горіння.	потрапляють на поверхню землі, знижуючи родючість грунту та руйнуючи хлорофілу врослинах. SO_x спричиняють корозію металів, знижують стійкість лакофарбувальних покриттів, міцність металів, будівель
7	Сажа, тверді частин-ки палива		Фракції частинок до 10 мкм утримуються в атмосфері, знижують прозорість повітря, зменшують доступ ультрафіолетової радіації та погіршують мікроклімат певних регіонів. В організмі людини тверді частинки впливають надихальну систему, слизові оболонки

Такий вплив авіаційного транспорту на навколишнє середовище змушує міжнародні організації, з одного боку, підвищувати екологічні вимоги до авіаційних палив, а з другого боку пропагувати впровадження альтернативних екологічно безпечних палив. Міжнародна асоціація повітряного транспорту (IATA) поставила завдання щодо зниження рівня викидів CO_2 від авіатранспорту на 50% до 2050 р.у. Резолюція Європарламенту про зменшення наслідків діяльності авіації для кліматичних змін (INI/2005/2249) закликає сприяти введенню біопалив, що допоможе знизити наслідки для кліматичних змін. Водночас Європейська комісія затвердила політику щодо зниження рівня CO_2 на 60 % до 2050 р., а частка низковуглецевих палив у авіації має досягти 40% до 2050 р/ [3-5].

Беручи до уваги сучасний стан паливно-енергетичного комплексу України, зокрема галузей нафтоперероблення та авіапаливозабезпечення, нагальним є упровадження та реалізація заходів, спрямованих на раціональне використання та економію ПММ. Як відзначено в Енергетичній стратегії України до 2035 року збільшення частки альтернативних палив є одним з першочергових завдань сучасного паливно-енергетичного комплексу, може стати інструментом для зменшення залежності України від імпорту нафтопродуктів з одного боку та розширення сировинної бази для виробництва авіаційних палив, з другого.

1.2. Сучасний стан використання біопалив в авіаційній галузі.

За визначенням біопаливо виготовляється з природних поновлюваних матеріалів, тому його застосування має істотно менший вплив на екологічну ситуацію на планеті. Саме турбота про навколишнє середовище стала причиною низки серйозних рішень в галузі цивільної авіації, зокрема щодо виробництва та використання альтернативного авіаційного палива [13-15].

Для застосування в авіації альтернативне паливо має бути не тільки порівняно дешевим, але і подібним за своїми фізико-хімічними характеристиками до нафтового авіаційного палива. У такому випадку для переходу авіапарку на нові види палива не доведеться проводити заміну або модернізацію двигунів, що загрожує додатковими витратами, в тому числі і на створення таких двигунів [16, 17].

Найперспективнішим напрямом розвитку біопалива сьогодні є створення комбінованих сумішей з компонентів рослинного та нафтового. Іншими словами, з різноманітної рослинної сировини виробляється компонент палива, що має непогані, але недостатні для використання в авіації характеристики. Такий компонент додається до нафтової фракції, а також вводиться комплекс присадок. Завдяки ефективному процесу згорання така суміш може бути успішно використана як альтернатива традиційному нафтовому авіаційному паливу [3, 4].

РОЗДІЛ 2
Характеристика сировини та метод отримання біодобавок до альтернативного авіаційного палива

2.1. Сировина для виробництва біодобавок до альтернативного авіаційного палива

Різноманіття технологій забезпечує можливість виробництва альтернативних палив для ПРД з використанням багатьох видів сировини. Серед асортименту сировини натепер найбільш перспективними вчені вважають рослини з високим вмістом олій, водорості та деякі види промислових і побутових відходів [18].

Рижій належить до енергетичних культур з високим вмістом олії. Основними споживачами її сьогодні є виробники біопалив. Зазвичай рижій використовують у сільському господарстві як сівозмінну культуру, що попереджає зниження родючості земель та забезпечує підвищення стійкості інших культур до хвороб і шкідників. Крім того, рижій є невибагливим до кліматичних умов, тобто не потребує ретельного обробітку та догляду. Відомо, що насіння рижію містить 40–50% олії, що забезпечує вихід олії близько 1250 л/га. Ще однією перевагою цієї культури є можливість використання шроту (побічного продукту процесу екстракції олії) як корму для сільськогосподарських тварин та птиці. На думку вчених, такі характеристики рижію забезпечуватимуть «сталість» процесу виробництва авіаційних біопалив, не створюючи конкуренції харчовій промисловості. Ця культура набула поширення на території США, Канади та деяких країн Європи. Як прогнозують деякі експерти, обсяги виробництва рижію в Україні у найближчі роки стрімко зростатимуть [17].

Ріпак протягом останніх 10–15 років був основною сільськогосподарською культурою для виробництва біопалив. Протягом 2000–2010 рр. провідними виробниками ріпакової олії були Канада, США і такі європейські країни як Німеччина, Франція, Чехія, Польща, Велика

Британія. За хімічним складом та основними технічними характеристиками ріпакова олія є придатною для виробництва альтернативних палив. Тепер постало питання про доцільність вирощування ріпаку як біопаливної сировини. Вчені звертають увагу на те, що культура ріпаку є вибагливою до умов вирощування, потребує постійного внесення добрив та іншого догляду, істотно виснажує грунт на територіях, що традиційно використовувалися агропромисловими комплексами.

Слід зазначити, що для України ріпак є типовою культурою, а протягом останніх 8–10 років спостерігалося масове його виробництво. Найбільш стрімке нарощування обсягів виробництва ріпаку відбувалося у період 2004–2008 рр., що збігалося з ростом світового попиту на ріпакову олію як сировину для виробництва біопалив. Площі посівів ріпаку в 2011 р. склали понад 1,1 млн га , а середня врожайність становила 15–17 ц/га. Протягом цих років в Україні ріпак вирощувався виключно для експорту, його внутрішнє перероблення майже не проводилося. Лише в останні роки відзначався деякий спад у експорті ріпаку та підвищення внутрішніх об’ємів його перероблення. Отже можливість виробництва альтернативних палив для ПРД з ріпакової олії потребує подальших досліджень [18].

Отже, проаналізувавши основні різновиди біопаливної сировини, такі як рижій та ріпак можна сказати, що обидві культури є дуже перспективними. Ріпак на сьогоднішній день має більшу популярність, але доцільність його вирощування для біопаливної промисловості як на мене не зовсім доцільна. Ріпак виснажує грунти та є дуже вибагливим щодо вирощування, на той час як рижій стійким до будь-яких умов. Вихід олії на 1га у обох культур є приблизно однаковим, але при цьому, ріпак виснажує грунти, а рижій облагороджує їх [15, 17].

Так як олії саме цих двох культур є передовими для виробництва біопалива в світі, саме ці олії були використані нами для одержання біодобавок до альтернативного авіаційного палива.

2.2. Метод отримання біодобавок до альтернативного авіаційного палива

Технологія отримання біодобавок до альтернативних авіаційних палив з олій полягає в реакції їх переестерифікації простим спиртом та подальшій вакуумній дистиляції отриманих продуктів. Основним компонентом олій є повні складні естери гліцерину та вищих жирних кислот. У результаті реакції між складним естером та спиртом утворюються нові складні естери жирних кислот (ЕЖК) та вільний гліцерин. Утворені ЕЖК містять спиртовий радикал та радикал кислоти вихідного естеру [18, 20]. Для проведення реакції використовують прості спирти. Сумарне рівняння реакції переестерифікації наведено на рис. 2.1.

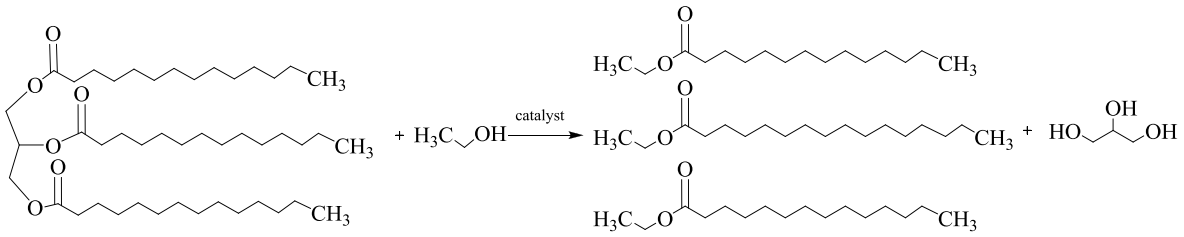

Рис. 2.1. Схема переестерифікації триацилгліцеридів метанолом

Біодобавки до авіаційних палив отримували естерифікацією ріпакової та рижієвої олій метиловим, етиловим та ізо-бутиловим спиртами._Принципова схема одержання біодобавок складається з низки етапів (рис. 2.2).

На першому етапі готували вихідну сировину – олію; вона має бути належної якості: бути профільтрованою, не містити механічних домішок або забруднень. Окрім того, готували спирт як агент переестерифікації.

На другому етапі готували розчин каталізатора переестерифікації – алкоголяту натрію, розчиняючи наважку лугу у всьому об’ємі вихідного спирту.

Далі олію завантажували у реактор, куди при перемішуванні додавали спирт з розчиненим каталізатором. Реакція алкоголізу перебігає за температури 15–60 ^{o}C. У результаті утворюються естери та гліцерин. Заключним етапом є очищення естерів, відгонка з естерового шару надлишкового неконвертованого спирту, якщо це потрібно, та утилізація гліцеринової фази.

Рис. 2.2. Принципова блок-схема одержання ЕЖК

З метою підвищення рівня чистоти ЕЖК та видалення важкокиплячих сполук ЕЖК піддавали вакуумній дистиляції. Вакуумну дистиляцію проводили на установці для вакуумної перегонки з використанням масляного вакуумного насоса. за тиску на рівні 3–5 мм рт. ст. (0,4–0,6 кПа) [17-20]. Схему процесу дистиляції наведено на рис. 2.3.

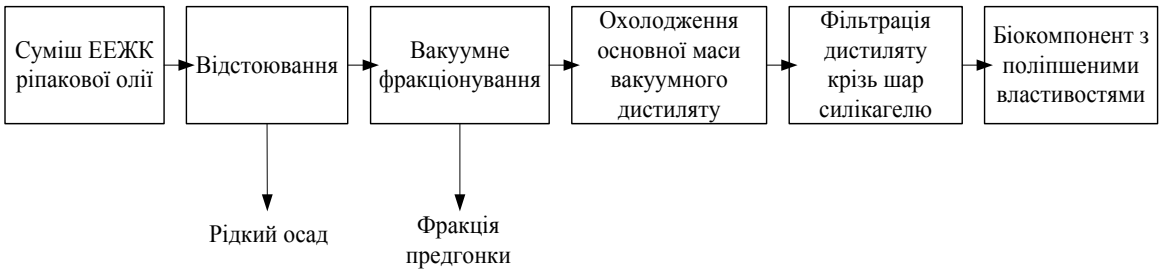

Рис. 2.3. Схема вакуумної дистиляції

Суміш ЕЖК ріпакової олії перед вакуумною дистиляцією відстоювали протягом 1–2 діб для осідання механічних домішок, гліцерину, моно- та дигліцеридів, мил тощо. Утворений осад відділяли. Надалі вакуумний дистилят, що одержували в результаті перегонки охолоджували до температури навколишнього середовища, у разі потреби фільтрували крізь шар силікагелю та поміщали у скляну посудину, що закривається, для подальшого зберігання.

2.3. Фізико-хімічні властивості біодобавок до альтернативного авіаційного палива

Наступним етапом роботи було дослідження фізико-хімічних властивостей наступних біодобавок, отриманих за наведеною вище методикою:

- Метилові естерів жирних кислот (МЕЖК) ріпакової олії;
- Етилові естери жирних кислот (ЕЕЖК) ріпакової олії;
- Етилові естери жирних кислот (ЕЕЖК) рижієвої олії;
- Ізо-бутилові естери жирних кислот (ізо-БЕЖК) рижієвої олії;

Дослідження проводили за показниками фізико-хімічних властивостей, що є типовими для авіаційного палива, зокрема палива для ПРД: густина, в'язкість, температура застигання, нижча теплота згорання та температура спалаху. Результати наведено но рис. 2.4 – 2.7.

Як бачимо з рис. 2.4 значення густини досліджених зразків біодобавок варіюються в діапазоні 870 – 884 кг/м^3. При цьому ізо-БЕЖК рижієвої олії характеризуються найнижчим значенням густини. Це можна пояснити наявністю 4-х груп CH_2 у спиртових радикалах ізо-БЕЖК, порівняно з однією групою у МЕЖК та двома групами в ЕЕЖК, завдяки чому зменшується компактність взаємного розміщення молекул бутилових естерів. Враховуючи вимоги до густини нафтового палива для ПРД (775 – 840 кг/м^3) як біодобавку найбільш доцільно використовувати саме ізо-БЕЖК рижієвої олії.

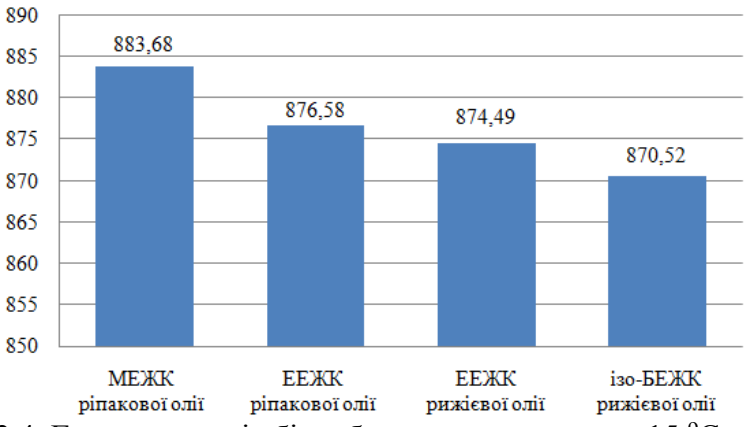

Рис. 2.4. Густина зразків біодобавок за температури 15 °С, кг/м^2

На рис. 2.5 наведено значення в'язкості досліджуваних зразків біодобавок, що лежать у діапазоні 6,4–8,2 мм^2/с. такі значення є достатньо високими порівняно з нафтовим паливо для ПРД (1,5–1,7 мм^2/с).

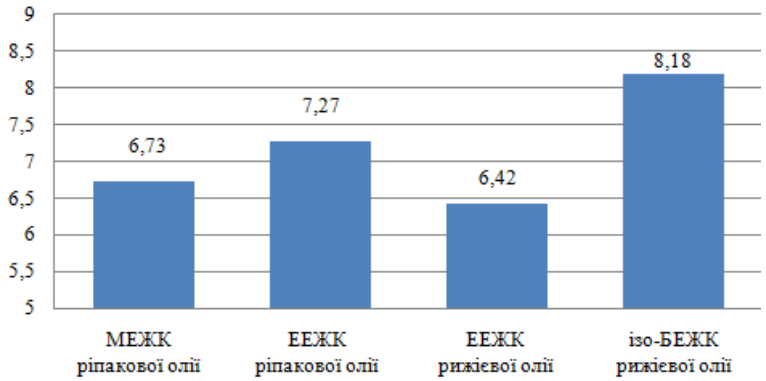

Рис. 2.5. В'язкість зразків біодобавок за температури 20 °С, мм^2/с

Причиною цього є їх хімічна будова ЕЖК. Довжина ланцюга визначає великий розмір сполук, що зумовлює більшу енергію їх міжмолекулярної взаємодії. Очевидно, що МЕЖК ріпакової олії та ЕЕЖК рижієвої олії володіють найнижчими значеннями густини. Найвище значення в'язкості ізо-БЕЖК пояснюється довжиною бутилового радикалу.

На рис. 2.6 представлено результати дослідження температури застигання біодобавок. Біодобавки відрізняються значно вищими значеннями температури застигання порівняно з нафтовими паливами для ПРД (норма для яких становить не вище -47 °С). Такі високі температури застигання біодобавок зумовлюються хімічною будовою молекул. Довжина вуглеводневого ланцюга та спиртового радикалу ЕЖК визначає великий розмір сполук і зумовлює міцну взаємодію між молекулами.

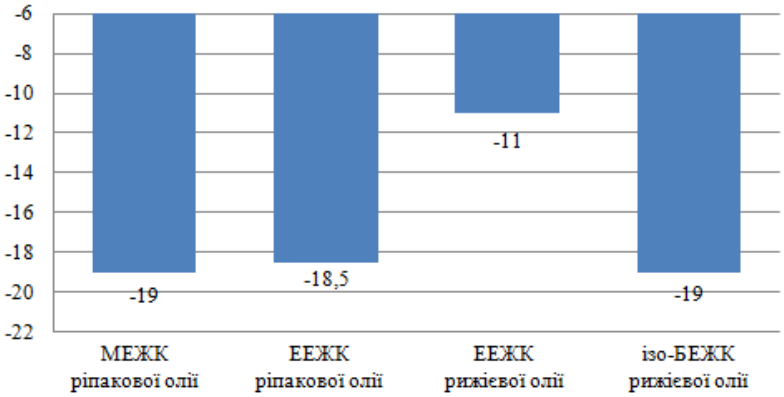

Рис. 2.6. Температура застигання біодобавок, °С

На рис. 2.7 представлено результати дослідження теплоти згорання біодобавок. Біодобавки характеризуються істотно нижчими значеннями теплоти згорання порівняно з нафтовими паливами для ПРД (норма для яких становить не нжче 432000 кДж/кг). Це пояснюється відмінностями біодобавок: естери містять у своєму складі ~12 % водню, паливо для ПРД – 14 %. До складу естерів входить 11–11,5% кисню, якого майже немає у нафтовому паливі. Найвищу теплоту згорання мають ізо-БЕЖК, так як їх молекули містять чотири групи CH_2, завдяки чому масова частка водню є найбільшою, а кисню – навпаки найменшою серед усіх досліджених зразків біодобавок.

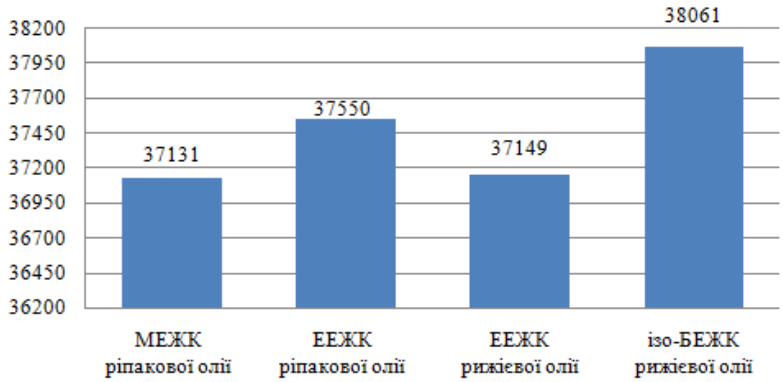

Рис. 2.7. Нижча теплота згорання зразків біодобавок, кДж/кг

На рис. 2.8 представлено результати дослідження температури спалаху біодобавок. Біодобавки на основі ріпакової та рижієвої олій відрізняються значно вищими значеннями температури спалаху порівняно з нафтовими паливами для ПРД ПРД (норма для яких становить 28 – 38 °С). Це можна пояснити відмінностями хімічної будови ЕЖК та палива для ПРД, зокрема більшою довжиною вуглеводневого ланцюга молекулах ЕЖК та їх вищою температурою кипіння. Низьке значення температури спалаху ЕЕЖК рижієвої олії може бути пояснено наявністю в біодобавці незначної кількості спирту, що залишився після її одержання.

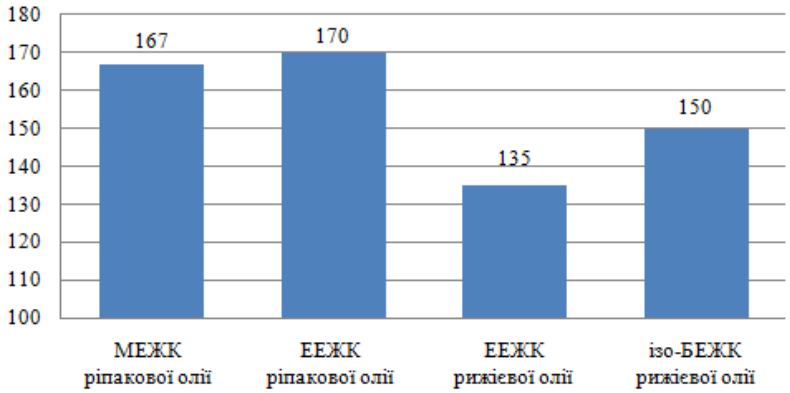

Рис. 2.8. Температура сплаху біодобавок, ^{o}C

Таким чином було отримано біодобавки на основі ріпакової та рижієвої олій методом їх переестерифікації простими спиртами (метанолом, етанолом, ізо-бутанолом) та вакуумної дистиляції. Далі досліджено основні фізико-хімічні характеристики біодобавок та порівняно їх з характеристиками традиційних авіаційних палив. Показано, що відмінності у показниках якості авіаційних палив та біодобавок зумовлені їх різною хімічною будовою.

РОЗДІЛ 3

Фізико-хімічні та екологічні властивості нових авіаційних біопалив

3.1. Фізико-хімічні властивості нових авіаційних біопалив

З метою встановлення можливості використання біопалив, як альтернативи нафтовим авіаційним паливам, було проведено дослідження якості зразків біопалив з різним вмістом біодобавок та порівняно з вимогами стандарів щодо якості нафтових палив. У рамках роботи ми дослідили зразки біопалив, що містили у своєму складі нафтове паливо для ПРД марки Jet A-1, також 10 %, 20 % та 30 % біодобавок МЕЖК ріпакової олії, ЕЕЖК ріпакової олії, ЕЕЖК рижієвої олії та ізо-БЕЖК рижієвої олії. крім того дослідили якість нафтового палива для ПРД марки Jet A-1 без вмісту біодобавок. Якість досліджених зразків палив перевіряли на відповідність вимогам діючих стандартів на паливо для ПРД марки Jet A-1: на території України – це ДСТУ 4796:2007, міжнародні стандарти – це ASTM D1655 та ASTM D5677 [21-23].

За результатами досліджень встановлено, що густина біопалив підвищується зі збільшенням вмісту біодобавок (рис. 3.1). Це відбувається через посилення дії сил міжмолекулярної взаємодії між молекулами вуглеводнів та естерами. Біопалива, з біодобавками ізо-БЕЖК, мають найнижчі значення густини.

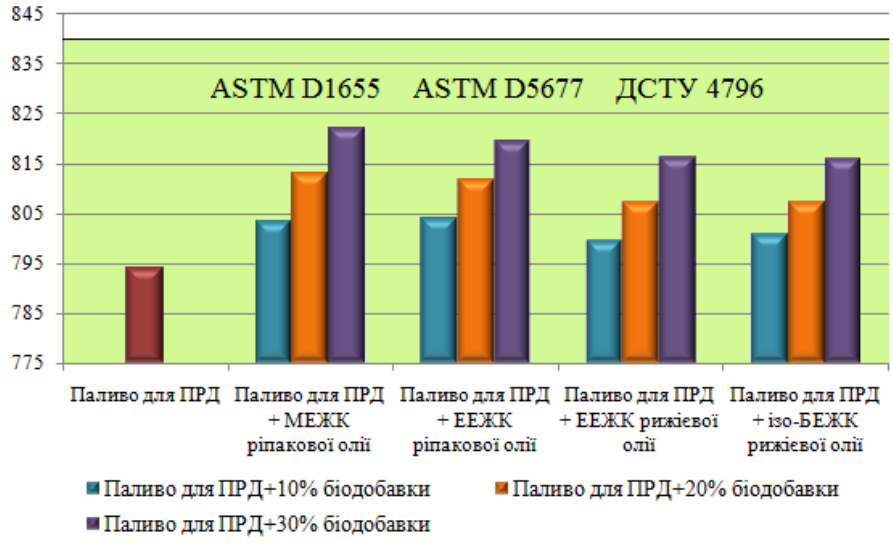

Рис. 3.1. Відповідність зразків авіаційних біопалив для ПРД з вмістом біодобавок вимогам стандартів на паливо марки Jet A-1 за показником густини за температури 15 ^{o}C, кг/м^{2}

Згідно стандартів на паливо для ПРД марки Jet A-1 його густина має бути в діапазоні 775 – 840 кг/м^2. Отже, з наведеного рисунку бачимо, що зразки біопалив з вмістом біодобавок 10 %. 20 % та 30 % цілком задовольняють вимоги стандартів на традиційне паливо для ПРД.За результатами досліджень встановлено, що введення до палив для ПРД біодобавок зумовлює підвищення їх кінематичної в'язкості (рис. 3.2). Це пояснюється виникненням сил міжмолекулярної взаємодії між молекулами вуглеводнів та естерів.

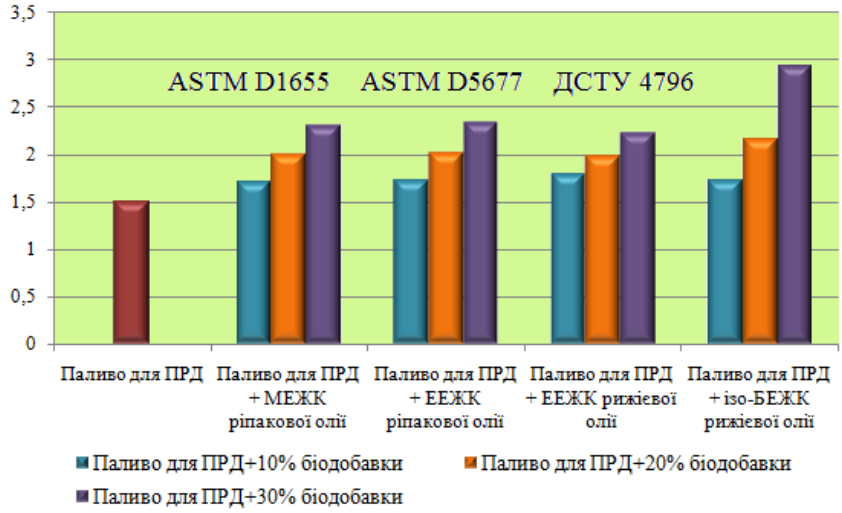

Рис. 3.2. Відповідність зразків авіаційних біопалив для ПРД з вмістом біодобавок вимогам стандартів на паливо марки Jet A-1 за показником в'язкості за температури 20 ^{o}C, мм^2/с

Згідно стандартів на паливо для ПРД марки Jet A-1 його густина має бути не менше 1,5 мм/с^2 за температури 20 ^{o}C, мм^2/с. Отже, з наведеного рисунку бачимо, що зразки біопалив з вмістом біодобавок 10 %. 20 % та 30 % цілком задовольняють вимоги стандартів на традиційне паливо для ПРД.

Результати досліджень показали, що введення біодобавок до палива для ПРД підвищує температуру застигання палив для ПРД (рис. 3.3). За концентрації біодобавок до 20 % (об.) їх вплив на температуру застигання є відносно незначним. З подальшим підвищенням вмісту естерів температура застигання підвищується, і поступово наближається до значень характерних для чистих ЕЖК. Враховуючи те, що згідно стандартів температура застигання палив для ПРД має бути не вище мінус 47 ^{o}C, бачимо, що біопалива з вмістом біодобавок не більше 20 % задовольняють вимоги стандартів.

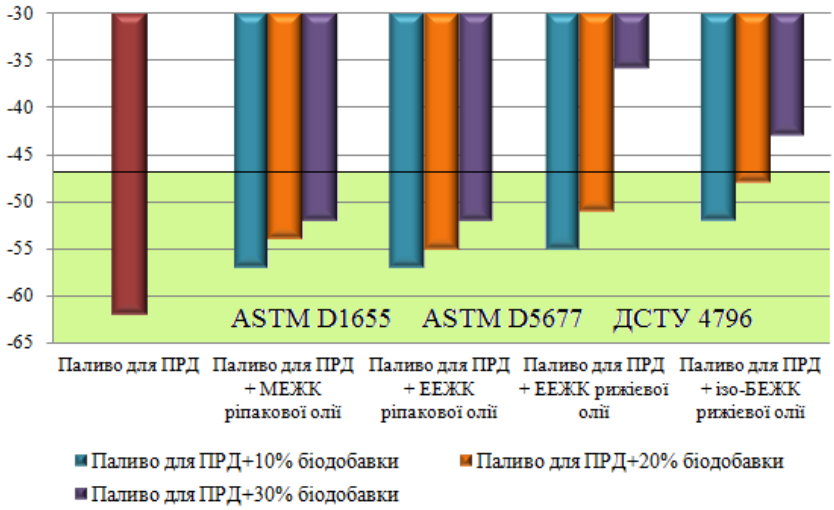

Рис. 3.3. Відповідність зразків авіаційних біопалив для ПРД з вмістом біодобавок вимогам стандартів на паливо марки Jet A-1 за показником температури застигання, ^{o}C

За результатами досліджень встановлено, що додавання до палива для ПРД біодобавок підвищує їх температуру спалаху. Усі з досліджених зразків біопалив цілком задовольняють вимоги стандартів за даним показником. З отриманих результатів можна зробити висновок, що палива для ПРД з вмістом біодобавок характеризуються підвищеною температурою спалаху і, відповідно, вищим рівнем пожежної безпеки.

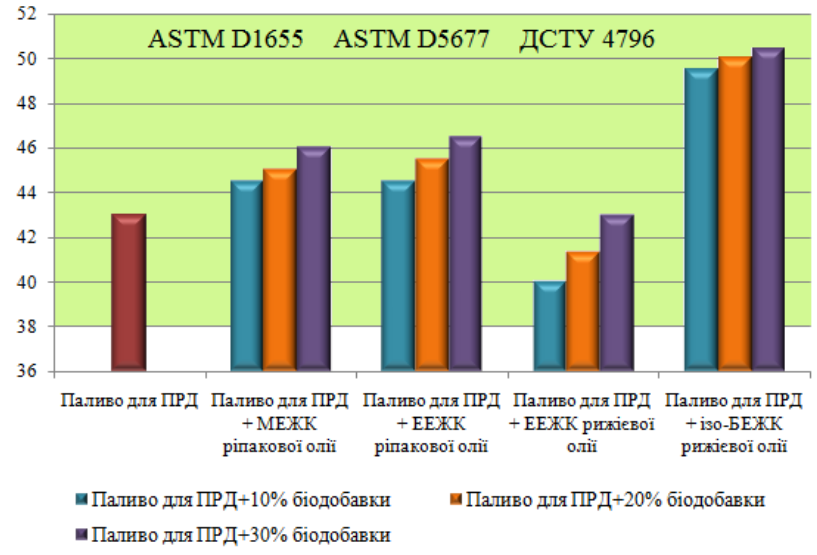

Рис. 3.4. Відповідність зразків авіаційних біопалив для ПРД з вмістом біодобавок вимогам стандартів на паливо марки Jet A-1 за показником температури спалаху, ^{o}C

Результати досліджень показали, що введення біодобавок до палива для ПРД призводить до зниження масової теплоти згорання (рис. 3.5). Згідно стандартів теплота згорання палив для ПРД має бути не нижче 42800 кДж/кг,

Отже, біопалива з вмістом біодобавок не більше 20 % задовольняють вимоги стандартів. Проте, густина біопалив є істотно вищою ніж палив для ПРД. Завдяки цьому буде можливо компенсувати дещо нижчі значення мосової теплоти згорання завдяки вищій густині біопалив.

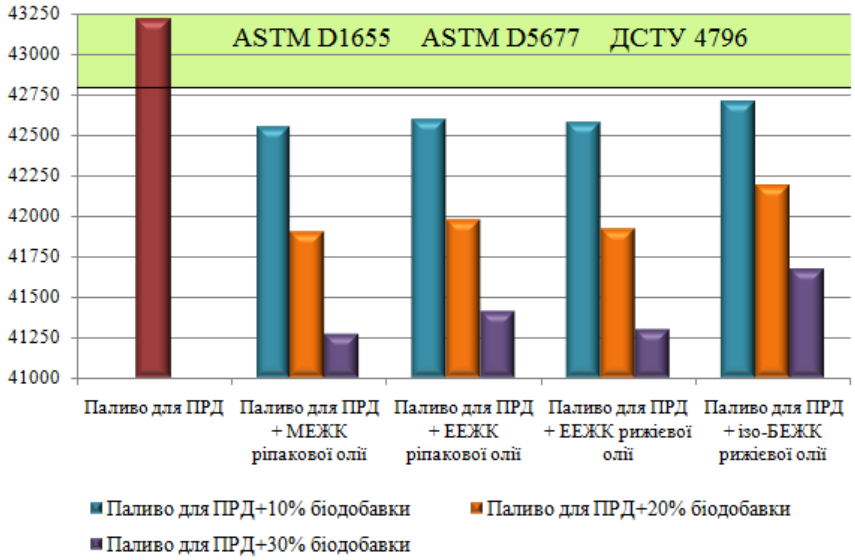

Рис. 3.5. Відповідність зразків авіаційних біопалив для ПРД з вмістом біодобавок вимогам стандартів на паливо марки Jet A-1 за показником нижчої теплоти згорання, кДж/кг

За результатами експериментальної та аналітичної роботи зроблено висновок, що вміст біодобавок у біопаливах обмежується значенням таких показників, як температура застигання та нижча теплота згорання. Відповідно до значень цих показників вміст естерів у паливі для ПРД може становити не більше як 20%. При цьому спостерігається зростання густини модифікованих палив для ПРД у межах 2,2–2,4 %. В'язкість палив для ПРД при введенні біодобавок у кількості до 20 % зростає приблизно вдвічі у межах 33,13–44,7 %. Температура застигання біопалив зростає до 22 %. Така зміна показників якості цілком задовольняє вимоги нормативної документації. Нижча теплота згорання модифікованих палив змінюється у межах 2,4–3,0 %. При цьому вдається поліпшити експлуатаційні показники біопалив: температура спалаху підвищується до 16,3 %.

Зображені на рис. 3.1–3.5 діаграми ілюструють, що нові авіаційні біопалива з біодобавками на основі рослинних олій у кількості до 20%, відповідають вимогам сучасних стандартів. Знижена масова теплота згорання

модифікованих палив (рис. 3.5) може бути компенсована завдяки підвищеній густині нових палив та зростанню їх енергоємності.

Зважаючи на різницю у характеристиках біопалив, з додаванням метилових, етилових та ізо-бутилових естерів, варто надавати перевагу етиловим та ізо-буиловим естерам. Використання етанолу та бутанолу забезпечує виробництво біодобавок з повністю відновлюваної сировини. Таким чином для подальших досліджень, зокрема розрахунку викидів відпрацьованих газів від авіаційних двигунів, що живляться новими біопаливами, було обрано зразки біопалив, що містять 10 % та 20 % ЕЕЖК ріпакової олії.

3.2. Екологічні властивості нових авіаційних біопалив

Якісний та кількісний склад відпрацьованих газів повітряних суден визначається конструкцією та ефективною експлуатацією двигуна, а також екологічними властивостями палив для ПРД, що у свою чергу, визначаються вмістом у них гетероатомних сполук, таких як сірка. Сполуки сірки є джерелом оксидів сірки у відпрацьованих газах. Наявність ароматичних вуглеводнів у паливах для ПРД є важливим показником під час оцінки його екологічних властивостей, адже є джерелом сажі у відпрацьованих газах.

З метою оцінки викидів відпрацьованих газів ICAO визначено еталонний злітно-посадковий цикл (ЗПЦ) на висоті нижче 915 м (рис. 3.6).

Цей цикл складається з чотирьох фаз для характеристики режимів зльоту, набору висоти, зниження та холостого ходу і є значно спрощеною версією експлуатаційного циклу польоту (таблиця 3.1).

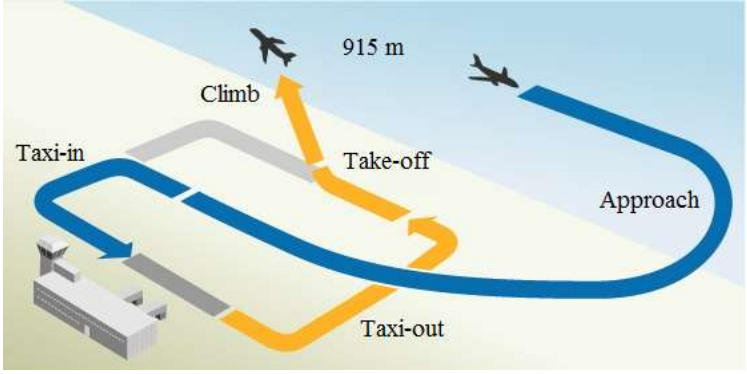

Рис. 3.6. Еталонний злітно-посадковий цикл

Таблиця 3.1

Еталонний злітно-посадковий цикл літака

Фаза ЗПЦ	Тривалість фаз ЗПЦ, хв	Відносна тяга двигуна, %
Зліт	0.7	100
Набір всоти до 915 м	2.2	85
Зниження та посадка з висоти 915 м	4.0	30
Холостий хід	26.0	7

Викидами літаків, які оцінюються відповідно до рекомендацій ІСАО, є: CO_2, H_2O, SO_2, CH_4, CO, C_nH_m, NO_x та сажа. Кількість відпрацьованих газів також залежить від типу палива для ПРД, зокрема його вуглеводневого та елементного складу.

Рівні викидів оцінюються в грамах забруднюючих речовин за цикл на 1 кН злітно-посадкової тяги і визначаються за формулою:

(1)

де:

M_j – маса забрудника *j*, що викидається під час стандартного ЗПЦ, що складається з *i* режимів, г;
$R_{т.зл.}$ – зльотна тяга, kH,
EI_j – індекс емісії (ІЕ) забрудника, г/кг палива;
G_i – витрата палива, кг/с;
τ_i – тривалість *i* режиму, с;
$G_п$ – питома витрата палива, кг/Н год;
$_i$ – відносна тяга.

Коли фактична витрата палива відома, формула спрощується до [116]:

(2)

де:

EI_j – індекс емісії (ІЕ) забрудника, г/кг палива;
G_i – витрата палива, кг/с;
τ_i – тривалість *i* режиму, с.

З формули видно, що рівень викидів залежить від ефективності камери згоряння, що характеризується індексом емісії EI_j та витратою палива Gs на кожному режимі ЗПЦ.

Враховуючи вимоги ІСАО, кількість продуктів повного згоряння палива обчислюється за рівнянням хімічної реакції повного окислення

палива (повне згоряння). Продукти повного згорання палива включають CO_2, H_2O і SO_2. Дані про вміст водню, вуглецю та сірки в паливі, необхіді для розрахунку CO_2, H_2O, та SO_2 наведено в талиці 3.2. Похибка розрахунків за існуючих значень ефективності згорання зазвичай не перевищує 2%.

Таблиця 3.2

Масова частка хімічних елементів у зразках палив

Зразок палива	Вміст елементу, % (мас.)			
	Вуглець (C)	Водень (H)	Сірка (S)	Кисень (O)
Паливо для ПРД	84.975	14.0	0.025	-
Паливо для ПРД + 10% ЕЕЖК ріпакової олії	84.1668	13.7095	0.02335	1.1008
Паливо для ПРД + 20% ЕЕЖК ріпакової олії	83.3586	13.419	0.0217	2.2015

Реакція повного згорання вуглецю виглядає як:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

Знаючи молекулярну масу вуглецю (C) та кисню (O_2) отримуємо:

12 kg (C)+32 kg (O_2)=44 kg (CO_2) →1 kg (C)+ kg (O_2)= — C kg (CO_2)

Маючи коефіцієнти рівняння хімічної реакції розраховуємо EI CO_2:

— (3)

де:

m_C – вміст вуглецю в паливі, % (мас.)

Результати розрахунку IE викидів CO_2 наведено на рис 3.7.

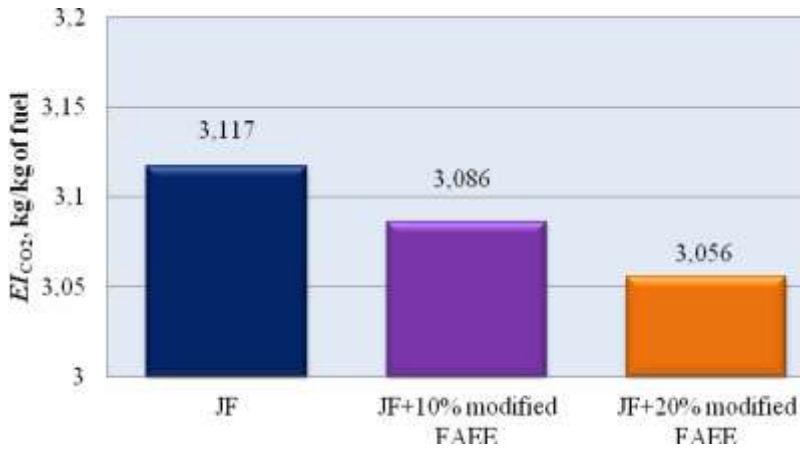

Рис. 3.7. IE CO_2 під час згорання досліджуваних видів авіаційного біопалива

Встановлено, що згорання авіаційних біопалив, що містили біодобавки на основі ЕЕЖК ріпакової олії у кількості 10 % і 20 % (об.), призводить до зниження кількості викидів CO_2 порівняно зі згоранням традиційного палива. Це пояснюється відмінностями в хімічному та елементному складі біодобавок та палива для ПРД. Типове паливо для ПРД містить близько 85 %. При цьому біодобавки містять менше вуглецю – 77 %. Отже, додавання біодобавок до палива для ПРД знижує загальний вміст вуглецю в паливних сумішах. Таким чином, в результаті згоряння баопалив, які містять 20 % біодобавок, кількість викидів CO_2 може бути зменшена на 1,96 %. Наявність кисню у біодобавках (~ 11%) дозволяє підвищити повноту згоряння палив для ПРД з біодобавками. З одного боку спостерігається зменшення викидів CO_2 внаслідок зменшення вмісту вуглецю в паливах з біодобавками, а з іншого – збільшення вмісту кисню підвищує повноту згорання палива.

Реакція повного згорання водню виглядає як:

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

Знаючи молекулярну масу водню (H) та кисню (O_2) отримуємо:

$$4\ \text{kg}\ (H_2)+32\ \text{kg}\ (O_2)=36(H_2O) \rightarrow 1\ \text{kg}\ (H_2)+ 8H\ \text{kg}\ (O_2)=9H\ \text{kg}\ (H_2O)$$

Маючи коефіцієнти рівняння хімічної реакції розраховуємо EI H_2O:

(4)

де:

m_H – вміст водню в паливі, % (мас.).

Результати розрахунку IE викидів H_2O наведено на рис 3.8.

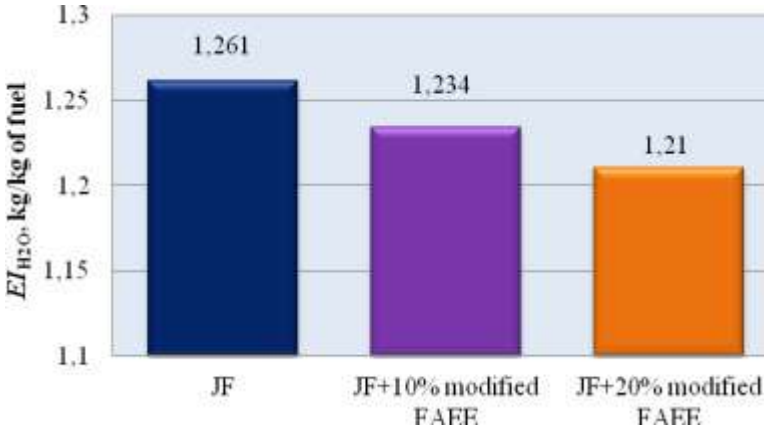

Рис3.8. EI of H_2O під час згорання досліджуваних видів авіаційного біопалива

Згорання авіаційних біопалив, що містили біодобавки на основі ЕЕЖК ріпакової олії у кількості 10 % і 20 % (об.), призводить до зменшення викидів H_2O порівняно зі згоранням традиційного палива. Це пояснюється відмінностями у хімічному складі біодобавок та звичайних палив для ПРД. Типове паливо аля ПРД містить ~ 14 % водню, а біодобавки ~ 12 %. У результаті горіння біопалив з біодобавками у кількості 20 %, зменшуються викиди H_2O на 4,04 %.

Реакція повного згорання сірки виглядає як:

$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$

Знаючи молекулярну масу сірки (S) та кисню (O_2):

$$32 \text{ kg S} + 32 \text{ kg } O_2 = 64 \text{ kg } (SO_2) \rightarrow 1 \text{ kg S} + S \text{ kg } (O_2) = 2 S \text{ kg } (SO_2)$$

Маючи коефіцієнти рівняння хімічної реакції розраховуємо SO_2:

(5)

де:

m_S – вміст сірки в паливі, % (мас.).

Результати розрахунку ІЕ викидів SO_2 приведено на рис. 3.9.

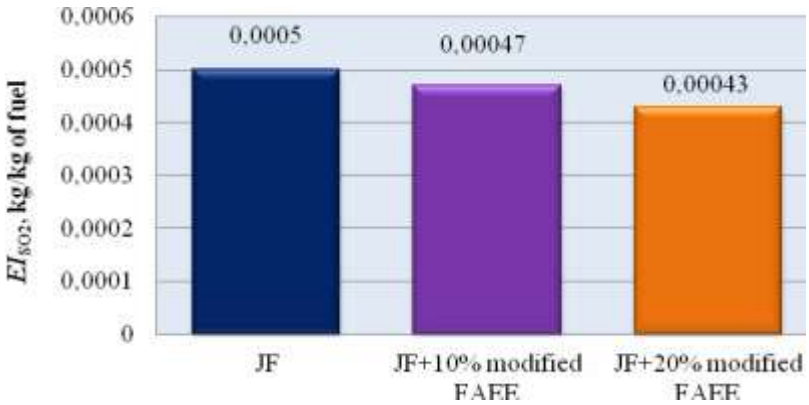

Рис. 3.9. EI SO_2 під час згорання досліджуваних видів авіаційного біопалива

Встановлено, що згорання авіаційних біопалив, що містили біодобавки на основі ЕЕЖК ріпакової олії у кількості 10 % і 20 % (об.), призводить до зниження викидів SO_2, порівняно зі згоранням традиційного палива для ПРД. Це можна пояснити тим фактом, що ріпакова олія і, відповідно, біодобавки містять значно меншу (незначну) кількість сполук сірки порівняно із традиційними паливами для ПРД. Це означає, що додавання біодобавок в паливо для ПРД знижує в

ньому загальний вміст сірки. Таким чином, викиди SO_2 в результаті згорання біоппалив, які містять 20 % біодобавки, можуть бути зменшені на 14,0 %.

IE NO_x розраховували використовуючи дані результатів стендових випробувань нових авіаційних біопалив за формулою:

(6)

де:

$\tau_з$ – час перебування паливо-повітряної суміші в камері згорання, $\tau_c = 2 \div 10$ ms,

$t_{г.п.т.}$ – температура газу перед турбіною.

У рамках даної роботи було прийнято середнє значення $\tau_з$ = 6 мс. Відомо, що значення температури газу перед турбіною зазвичай вище температури газу за нею на ~ 200 ° С. Враховуючи, що значення температури газу перед турбіною $t_{г.п.т.}$ залежить від режиму роботи авіаційного двигуна, IE було розраховано для кожного режиму стандартного ЗПЦ. Результати розрахунків наведено на рис. 3.10.

Результати показали, що згорання зразків біопалива, з біодобавками в кількостях 10 % і 20 % (об.), призводить до зменшення викидів NO_x на всіх етапах стандартного ЗПЦ порівняно зі згоранням традиційного палива. Значення викидів NO_x не залежать від хімічного складу палива, адже можуть містити лише слідові кількості сполук азоту, що не є вирішальним для формування загальних викидів NO_x.

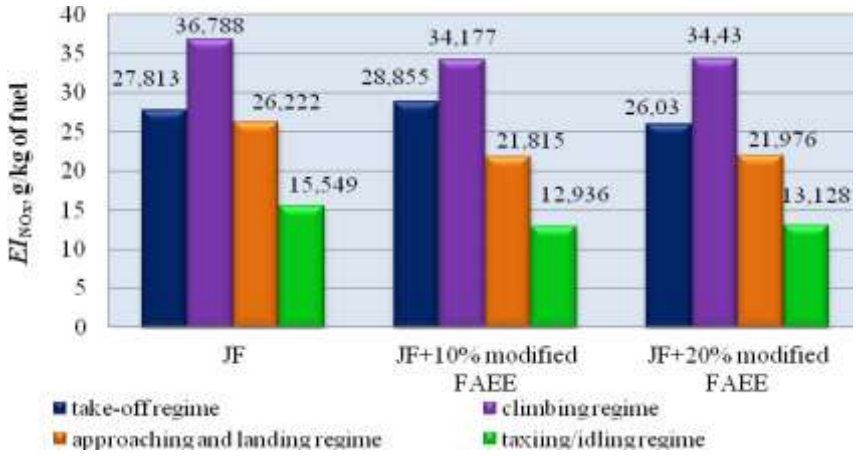

Рис. 3.10. IE NO_x під час згорання досліджуваних зразків біопалива на різних режимах стандартного ЗПЦ

Викиди NO_X, які є продуктом окиснення атмосферного азоту, визначаються часом перебування паливо-повітряної сміші у камері згоряння і

температурою на вході в турбіну. З експериментальних досліджень роботи авіаційного двигуна, відомо, що використання біопалив призводить до зниження температур на вході в турбіну та за турбіною в порівнянні традиційними паливмаи для ПРД. Це впливає на кількість викидів NO_x на кожному режимі роботи двигуна, тобто на стандартних режимах ЗПЦ. Отже, викиди NO_x в результаті згоряння біопалив, що містять 20 % біодобавки, можуть зменшитися під час зльоту на 6,41 %, підйому – на 7,10 %, під час зниження і посадки – на 16,81 % і під час холостого ходу – на 16,80 %.

Для узагальнення результатів щодо оцінки викидів відпрацьованих газів від авіаційних двигунів, що працюють на біопаливах та традиційному паливі ля ПРД, розроблено порівняльну характеристику рівнів викидів.

Рівні викидів визначаються не тільки ІЕ певного забрудника, але й питомою витратою палива на кожному режимі ЗПЦ та тривалістю цих режимів. Розроблено порівняльну характеристику рівнів викидів, на основі загальної кількості забруднюючих речовин, що виділяються під час стандартного ЗПЦ (табл. 3.3.).

Таблиця 3.3

Порівняльна характеристика відпрацьованих газів літаків у зразках палива

Зракзи палива	Характеристики вихлопних газів повітряних суден - маса забруднювача, кг / стандартний цикл ТЛО							
	CO_2	Зміна параметрів%	H_2O	Зміна параметрів%	SO_2	Зміна параметрів%	NO_x	Зміна параметрів%
Паливо для ПРД	228.914	-	92.608	-	0.037	-	1.826	-
Паливо для ПРД + 10% ЕЕЖК ріпакової олії	177.148	-22.61	70.836	-23.51	0.016	-56.95	1.285	-29.59
Паливо для ПРД + 20% ЕЕЖК ріпакової олії	199.903	-12.67	79.150	-14.53	0.028	-23.43	1.441	-21.07

Маси забруднюючих речовин розраховували за формулою (2). Дані про витрату палива взято з результатів випробувань параметрів роботи

авіаційного двигуна. Стандартний час тривалості режимів ЗПЦ був прийнятий, як це рекомендовано ІСАО.

Бачимо, що використання авіаційних біопалив з біодобавкою на основі ЕЕЖК ріпакової олії у кількості до 20 % (об.) дозволяє зменшити загальний рівень викидів відпрацьованих газів від двигунів повітряних суден.

Результати показали, що збільшення вмісту біодобавок у біопаливах обумовлює зменшення кількості забруднюючих речовин. Додавання до 20 % біодобавки, дозволяє зменшити ІЕ CO_2 до 1,96 %, ІЕ H_2O до 4,04 %, ІЕ SO_2 до 14,0 % і ІЕ NOx до 6,41 % на режимі зльоту та до 16,80 % на режимі холостого ходу.

У той же час оцінка загальної маси забруднюючих речовин, що викидаються під час стандартного ЗПЦ, показала відмінні результати. Додавання біодобавок до палив для ПРД, як правило, знижує загальну масу викидів. Однак додавання 10 % біодобавки дозволяє досягти більшого зменшення маси викидів, ніж у випадку, коли додається 20 % біодобавки. Цей результат пояснюється тим, що витрата палива, виміряна під час стендових випробувань, була вищою для біоалива, що містило 20 % біодобавок. Таким чином, можна зробити висновок, що додавання біодобавок на основі ЕЕЖК ріпакової олії дозволить зменшити викиди CO_2 до 22,61 %, викиди H_2O до 23,51 %, викиди SO_2 до 56,95 %, а викиди NO_x до 29,59 %.

Висновки

У результаті роботи проаналізовано вплив авіаційної галузі на стан довкілля, динаміку, об'єми та структуру викидів відпрацьованих газів повітряних суден. Показано, що одним із пріорітетних шляхів мінімізації впливу авіації на довкілля є упровадження альтернативних палив. Розглянуто та обгрунтовано перспективні види відновлюваної рослинної сировини, що є найбільш доцільними для виробництва авіаційних біопалив в Україні.

Одержано біодобавки для використання їх як компонентів авіаційних біопалив. Досліджено основні їх фізико-хімічні властивості. Показано, що біодобавки можуть використовуватися як додатки до палива для ПРД у певному співвідношенні.

Підготовлено зразки авіаційних біопалив, що містять нафтове паливо для ПРД та біодобавки у кількості 10 %, 20 % та 30 %. Досліджено фізико-хімічні властивості зразків біопалив та порівняно їх з вимогами до якості традиційного палива для ПРД. Встановлено, що введення біодобавок до палива для ПРД у кількості до 20 % цілком задовольняє вимоги стандартів.

Досліджено екологічні властивості нових біопалив що містять нафтове паливо для ПРД та біодобавки у кількості 10 % та 20 % та порівняно їх з нафтовим паливом для ПРД. Розраховано індекси емісії та кількість викидів продуктів повного згорання палив, а також оксидів азоту. Показано, що використання біопалив дозволяє скоротити викиди CO_2 до 22,61 %, викиди H_2O до 23,51 %, викиди SO_2 до 56,95 %, а викиди NO_x до 29,59 %.

Таким чином, використання авіаційних біопалив з вмістом біодобавок на основі рослинних олій дозволяє досягти низку позитивних ефектів:

- Скоротити використання невідновлюваної нафтової сировини, необхідної для виробництва авіаційних палив до 20 %;
- Знизити токсичність відпрацьованих газів повітряних суден, зокрема вміст оксидів сірки до 57 %;
- Знизити кількість викидів відпрацьованих газів, зокрема CO_2 до 22,61 %, викидів H_2O до 23,51 % та викидів NO_x до 29,59 %;

- Поліпшити деякі експлуатаційні характеристики авіаційних біопалив, зокрема підвищити пожежну безпечність до 16,3%;

- Знизити енергозалежність України завдяки використанню власної відновлюваної сировини для виробництва авіаційних біопалив;

- Сприяти розвитку сільського господарства, галузей хімічної технології, авіапаливозабезпечення та нафто перероблення;

- Сприяти підвищенню статусу нашої держави на міжнародному рівні через підтримку політики міжнародних організацій у сфері цивільності авіації щодо екологізації авіації через упровадження альтернативних авіаційних палив.

Список використаної літератури:

1. Кулик Н.С., Аксенов А.Ф., Яновский Л.С. и др.Авиационная химмотология: топлива для авиационных двигателей. Теоретические и инженерные основы применения К.: НАУ, 2015. – 560 с.
2. Яковлєва А. В., Бойченко С.В., Азаренкова А.О., Шкільнюк І.О. Розроблення технічного регламенту щодо вимог до авіаційного бензину та палива для реактивних двигунів в Україні // Вісник Національного транспортного університету. 2014. № 30. С. 39–50.
3. Boichenko S., Iakovlieva A., Vovk O., etc. Traditional and alternative jet fuels: problems of quality standardization // Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology. 2013. Vol. 4. Iss. 3. DOI: http://dx.doi.org/10.4172/2157-7463.1000146
4. International Air Transport organization. – Vision 2050. Report. – Montreal – Geneva. 87 p. 2011. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.iata.org/pressroom /facts_figures/Pages/vision-2050.aspx
5. Daggett D. L., Hendricks R.C., Walther R., Corporan E. Alternative fuels for use in commercial aircrafts // The Boeing Company. 2007. 8 p.
6. Яковлева А.В., Бойченко С.В. Причинно-следственная связь производства авиационных топлив и состояния окружающей среды // Monografia «Systems and means of motor transport». Seleced problems. Seria: Transport. Rzeszow, 2012. № 3. – P. 239–246.
7. Boichenko S., Yakovleva A. Prospects of biofuels introduction into aviation // Transport engineering and management: Proceedings of the 15-th conference for Lithuania Junior researchers. Science – future of Lithuania, 4 May 2012. Vilnius: Technika. 2012. P. 90–94.
8. Energy and Climate Change. World Energy Outlook Special Report / International Energy Agency. 2015. 200 p. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015SpecialReportonEnergyandClimateChange.pdf
9. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.indexmundi.com
10. Франчук Г.М., Ісаєнко В.М. Екологія, авіація і космос: Навч. посібник. К.: НАУ, 2004. – 456 с.
11. Рябцев Г. Л. Пріоритети державної політики розвитку ринку нафтопродуктів в Україні на період до 2030 року // Державне управління: удосконалення та розвиток № 5, 2015. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.dy.nayka.com.ua/?op=1&z=850

12. Iakovlieva A., Lejda K., Vovk O., Boichenko S.Potential of jet biofuels production and application in Ukraine and Poland // Proceedings of the 1st International Simposium on Sustainable Aviation. 31 May–03 June 2015, Isntanbul. P. 137.
13. Kandaramath Hari T., Yaakob Z., Binitha N. N. Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 42. P. 1234–1244. DOI: 10.1016/j.rser.2014.10.095
14. Jenkins R.W., Munro M., Christopher S. N., Chuck C.Potential renewable oxygenated biofuels for the aviation and road transport sectors // Fuel. 2013. Vol. 103. P. 593–599. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.08.019
15. Яковлева А. В. Бойченко С. В., Бондарук А. В. Сировинний потенціал рижію для отримання компонентів модифікування складу авіаційного палива // Наукоємні технології №. 1 (29). 2016. С. 123–127.
16. Чередніченко О.О. Особливості ефективного функціонування олійножирового підкомплексу // Вісник Сумського національного аграрного університету Серія «Фінанси і кредит». 2011. №1. С. 53–59.
17. Марков В. А., Нагорнов С. А., Девянин С. Н. Состав и теплота сгорания биотоплив, получаемых из растительных масел // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2012. № 2. С. 65–80.
18. Патриляк К.І., Патриляк Л.К., Охріменко М.В. та ін. Біодизельне паливо на основі етанолу та соняшникової олії // Катализ и нефтехимия. 2012. № 21. С. 100-103.
19. Iakovlieva A., Lejda K., Vovk O., etc. Improvement of technological scheme of fatty acids ethyl esters production for use as jet fuels biocomponents // International Journal of Theoretical and Applied Science. 2014. Iss. 11(19). P. 44–55. DOI: 10.15863/tas.2014.11.19.9
20. Кириченко В. Бойченко С., Кириченко В., Нездоровин В. Комплексная переработка технических растительных масел: концепция, методы и технологи // «Systems and means of motor transport» Seria: Transport. Monografia. № 4. 2013. P. 357–370.
21. Standard Specification for Aviation Turbine Fuels : ASTM D1655-11b. – [approved Oct. 1, 2011]. – ASTM International, 2011. – 16 p. (An American National Standard).
22. Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons : ASTM D7655-11a. – [approved July. 15, 2011]. – ASTM International, 2011. – 22 p. (An American National Standard).
23. Паливо авіаційне для газотурбінних двигунів ДЖЕТ А-1. Технічні умови : ДСТУ 4796 :2007. – [чинний від 2007-07-05]. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 27 с. (Національний стандарт України)