

А. В. Яковлева, канд. техн. наук, старш. досл.-к.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-7618-7129
anna.yakovlieva@nau.edu.ua;

М. В. Павловський, канд. техн. наук, доц.
Національний транспортний університет
orcid.org/0000-0002-0933-7326
maks.pavlovskiy@gmail.com;

С. О. Зубенко, канд. хім. наук
Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії
імені В. П. Кухаря НАН України
orcid.org/0000-0003-2161-5939
s.o.zubenko@ukr.net;

В. В. Бошков
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-4359-8597
vasiliyboshkov@gmail.com;

О. Л. Максимів
Національний авіаційний університет
orcid.org/0009-0001-8519-9009
maksymivoleh@gmail.com

ВЛАСТИВОСТІ АВІАЦІЙНИХ БІОПАЛИВ НА ОСНОВІ БІОДОБАВОК РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ

Вступ

Сучасна авіація є одним з основних споживачів невідновлюваної нафтової сировини у вигляді авіаційних бензинів та палив для газотурбінних двигунів (ГТД). У зв'язку зі стрімким розвитком авіаційної галузі актуальним є підвищення енергоефективності палива та зменшення викидів від повітряних суден [1]. Сьогодні, відповідно до державної політики провідних країн світу в паливно-енергетичній галузі, налагодження виробництва та використання альтернативних моторних палив, зокрема авіаційних, з відновлюваної сировини є одним з пріоритетних завдань [2].

Загальновідомо, що діяльність авіаційної галузі завдає значної шкоди навколишньому середовищу, оскільки продукти згоряння палива є джерелом забруднення атмосфери. Крім того, викиди CO₂ та інших парникових газів мають значний вплив на глобальні кліматичні зміни [2]. Проблемі авіаційних викидів присвячено низку керівних документів провідних організацій у галузі цивільної авіації. Ними встановлено вимоги щодо постійного скорочення викидів CO₂ в середньому на 1,5 % щорічно з метою зменшення вики-

дів вуглекислого газу на 50 % до 2050 року порівняно з 2005 роком [2–4]. На сьогоднішній день одним з перспективних шляхів екологізації авіаційного сектору є використання альтернативних авіаційних палив. У зв'язку з цим Міжнародна організація цивільної авіації (ІКАО) прогнозує, що сучасний авіаційний сектор потребує швидкого розвитку виробничих потужностей з виробництва нових видів авіаційних палив.

Постановка проблеми

На думку сучасних науковців та експертів у сфері діяльності авіаційного сектору на сьогоднішній день декарбонізація повітряного транспорту є одним з найскладніших завдань у порівнянні з іншими видами транспорту. Як один з можливих та найбільш ефективних шляхів скорочення викидів CO₂ в авіаційному секторі сьогодні розглядається використання низьковуглецевих сталих авіаційних палив, або біопалив [5]. Наразі ведуться розробки щодо перспектив електрифікації комерційних літаків. Крім того, активно досліджуються перспективи використання водню для живлення літаків, однак ці розробки знаходяться на ранніх стадіях проектування та

вимагають розвитку нової інфраструктури для його транспортування та зберігання [6, 7].

Отже, поки що єдиною доступною альтернативою для заміни традиційних авіаційних палив є біопалива. Сьогодні спостерігається значний прогрес у сфері розроблення та використання біопалив. Однак залишаються величезні виклики для комерціалізації передових процесів їх одержання: налагодження виробничих ланцюгів (від постачання сировини до синтезу палива), змішування та постачання нових видів палива, проведення комплексу лабораторних, стендових та льотних випробувань, сертифікація та допуск для комерційного використання. Таким чином, роботи спрямовані на розвиток технологій одержання альтернативних авіаційних палив та розширення сировинної бази для їх виробництва є актуальними як для України, так і для світу загалом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Серед існуючого на сьогодні різноманіття альтернативних авіаційних палив перевага надається тим, які повністю або частково отримані з відновлюваної сировини – біопаливам [3, 4]. Використання палив з відновлюваної сировини має низку переваг, зокрема їх природне походження, забезпечення замкнутого вуглецевого циклу під час виробництва та використання і, відповідно, зменшення викидів CO₂ в атмосферу, легкість біологічного розкладання палива в навколишньому середовищі, доступність сировини в різних регіонах, мінімізація негативного впливу на навколишнє середовище під час зберігання та транспортування палива [2, 3].

Одним з видів авіаційного біопалива, що активно досліджується сьогодні, є біопаливо для ГТД, що являє собою суміш традиційного авіаційного палива та біодобавок, одержаних з рослинних олій [3, 4]. Згідно з дослідженнями [5, 6] для одержання біодобавок до палив для ГТД може використовуватися різноманітна олійна сировина: ріпакова, соняшникова, рижієва олії, олія ятрофи, відпрацьована кулінарна олія, тваринні жири у вигляді відходів харчової промисловості тощо. Вибір сировини зазвичай залежить від її доступності в певному регіоні чи країні та фізико-хімічних властивостей олії [3, 7]. При цьому слід враховувати, що виробництво та постачання сировини для одержання авіаційного біопалива не повинно створювати конкуренції потребам харчової промисловості. З цієї та інших причин перевага у виборі надається тим видам сировини, що дозволяє одержувати біопалива другого покоління [1, 6]. Біодобавки зазвичай отримують естерифікацією олій (жировмісної сировини) різноманітними спиртами (метанол, етанол, бутанол тощо) та подальшою вакуумною

дистиляцією. Ці процеси детально описані в роботах [1, 6]. З хімічною точки зору основними складовими біодобавок є естери жирних кислот.

У попередніх роботах [3, 8–11] авторами виконано серію експериментальних досліджень, спрямованих на аналіз основних фізико-хімічних властивостей біопалив. В рамках цих досліджень було проаналізовано біопалива на основі метилових та етилових естерів ріпакової та рижієвої олій за параметрами густини, в'язкості, фракційного складу, температури кристалізації, температури спалаху та деяких інших характеристик [3, 8, 11]. Результати показали достатній рівень сумісності традиційних авіаційних палив та біодобавок, задовільні фізико-хімічні властивості біопалив, які відповідають вимогам нормативних документів, а також покращення окремих експлуатаційних властивостей. Отримані результати також обумовили необхідність подальших експериментальних досліджень, які матимуть на меті оптимізацію деяких фізико-хімічних властивостей біопалив для ГТД [3, 11]. Окрім того, іншим важливим аспектом є дослідження можливостей використання нових видів сировини для одержання біопалив – як олій, так і спиртів. Використання нових видів відновлюваної сировини для виробництва біодобавок може дозволить оптимізувати низку фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей біопалив та забезпечити ширший асортимент та більшу доступність сировини.

Таким чином, дана стаття є логічним продовженням серії раніше виконаних робіт і присвячена дослідженням властивостей біодобавок, одержаних з нових видів олій, та авіаційних біопалив на їх основі.

Метою даної роботи є обґрунтування впливу біодобавок на основі різних рослинних олій на властивості палив для ГТД та оцінка можливості використання нових біодобавок для одержання авіаційних біопалив. Для досягнення поставленої мети необхідним є виконання наступних завдань:

- дослідити та проаналізувати жирнокислотний склад та фізико-хімічні властивості біодобавок на основі різних рослинних олій;
- дослідити фізико-хімічні властивості зразків авіаційних біопалив на основі нафтового палива для ГТД та зразків біодобавок;
- пояснити вплив біодобавок на властивості палива для ГТД та оцінити можливість їх використання для одержання авіаційних біопалив.

Виклад основного матеріалу

З робіт [3, 11] та праць інших дослідників відомо, що традиційні авіаційні палива отримують прямою перегонкою сирової нафти. Палива для ГТД являють собою керосиново-газойлеву фракцію, яка википає в діапазоні 140–250 (280) і

складається в основному з парафінових, нафтових і деякої кількості ароматичних вуглеводнів C5–C16 [3], що пояснюється природним складом сирої нафти, яка використовується для виробництва. Залежно від походження нафти співвідношення вуглеводнів у паливі може змінюватися в певному діапазоні [2, 12].

В рамках даної роботи були досліджені та проаналізовані біодобавки на основі метилових естерів ріпакової олії (МЕРО), етилових естерів ріпакової олії (ЕЕРО), етилових естерів рижієвої олії (ЕЕРижО), етилових естерів пальмоядрової

олії (ЕЕПЯО) та етилових естерів кокосової олії (ЕЕКО). Біодобавки одержували методом переестерифікації на базі відділу каталітичного синтезу ІБОНХ ім. В. П. Кухаря НАН України [8–10]. Детальний опис технологічного процесу наведено у працях [8–10].

На основі результатів власних досліджень та попередніх робіт низки дослідників проведено порівняльний аналіз хімічного складу (жирнокислотного складу) біодобавок, що досліджено у рамках даної роботи (табл. 1) [3, 7, 11].

Таблиця 1

Жирнокислотний склад зразків біодобавок на основі різних рослинних олій

Жирні кислоти	Коротка назва	МЕРО	ЕЕРО	ЕЕРижО	ЕЕПЯО	ЕЕКО
		Вміст, %	Вміст, %	Вміст, %	Вміст, %	Вміст, %
Гексанова	C6:0	–	–	–	0,8	–
Каприлова	C8:0	–	–	–	19,4	2,9
Деканова	C10:0	–	–	–	7,7	3,2
Лауринова	C12:0	–	–	–	53,1	47,1
Міристинова	C14:0	–	–	–	17,4	16,4
Пальмітинова	C16:0	6,0	6,6	5,7	4,7	8,9
Стеаринова	C18:0	1,9	2,6	2,5	1,7	2,4
Олеїнова	C18:1	52,6	20,0	48,4	2,0	14,3
Лінолева	C18:2	21,1	29,6	30,6	0,6	2,5
Ліноленова	C18:3	7,2	24,5	9,0	–	–
Арахідинова	C20:0	0,45	1,1	0,4	–	–
Ейкозенова	C20:1	1,25	9,7	0,8	–	–
Генікозанова	C21:1	4,2	–	–	–	–
Ейкозадіосва	C20:2	–	1,3	–	–	–
Бегенова	C22:0	0,23	–	–	–	–
Ерукова	C22:1	2,5	0,9	0,4	–	–
Інші		2,57	3,7	1,2	1,6	2,3

Дані таблиці 1 показують вміст (% мас.) кожної окремої жирної кислоти, що міститься у зразках досліджених біодобавок. Жирнокислотний склад МЕРО, ЕЕРО та ЕЕРижО було визначено та вивчено під час попередніх досліджень [3, 13, 14]. У той же час жирнокислотний склад ЕЕКО та ЕЕПЯО проаналізовано вперше і також представлено в таблиці для порівняльного аналізу. Так, ЕЕКО та ЕЕПЯО місять у своєму складі естери меншої молекулярної маси, у порівнянні з МЕРО, ЕЕРО та ЕЕРижО. Крім того, ЕЕКО та ЕЕПЯО у більшості складені насиченими естерами на відміну від МЕРО, ЕЕРО та ЕЕРижО.

З метою аналізу впливу жирнокислотного складу біодобавок на властивості авіаційних біопалив проведено комплекс експериментальних досліджень деяких основних фізико-хімічних властивостей. Для дослідження підготовлено серію зразків біопалив на основі нафтового палива для ГТД та зразків біодобавок. Зразки біопалив готували механічним перемішуванням нафтового палива для ГТД марки Jet A-1 з біодобавками (МЕРО, ЕЕРО, ЕЕРижО, ЕЕПЯО

та ЕЕКО) у кількості 10 % (об.), 20 % (об.), 30 % (об.), 40 % (об.) та 50 % (об.).

Як еталонне паливо досліджували традиційне авіаційне паливо марки Jet A-1 без вмісту біодобавок. Для дослідження були обрані такі властивості, як густина за температури 20 °С, кінематична в'язкість за температури 20 °С, температура кристалізації та температура спалаху. Ці властивості визначаються та обґрунтовуються хімічним складом палива та структурою його молекул. Тому дослідження та аналіз цих властивостей біопалива дозволяють зрозуміти та охарактеризувати ступінь впливу жирнокислотного складу біодобавок на властивості сумішевого біопалива.

У таблиці 2 наведено значення основних фізико-хімічних властивостей зразків біодобавок та традиційного нафтового палива для ГТД, що використовувалися під час дослідження. Ці дані дозволяють проаналізувати та пояснити відмінності у властивостях нафтового палива та біодобавок на основі дослідження їх структури та складу.

Таблиця 2

Фізико-хімічні властивості традиційного авіаційного палива та біодобавок

Властивість	Авіаційне паливо	Біодобавка				
		МЕРО	ЕЕРО	ЕЕРижО	ЕЕПЯО	ЕЕКО
Густина за 20 °С, кг/м ³	792,0–794,0	880,38	873,22	871,13	860,4	866,92
В'язкість за 20 °С, мм ² /с	1,50–1,58	6,734	7,355	6,422	4,546	4,041
Температура кристалізації, °С	мінус 59 – мінус 60	мінус 19	мінус 18,5	мінус 7	мінус 13	мінус 12
Температура спалаху, °С	43 – 51	167	170	35	110	112

З даних, наведених у таблиці 2 видно, що кількісні значення густини, в'язкості, температури кристалізації та температури спалаху біодобавок суттєво відрізняються від традиційного авіаційного палива. Як правило, густина палива залежить від його хімічного та фракційного складу. Всі досліджувані біодобавки мають значно вищі значення густини порівняно з густиною традиційного палива для реактивних двигунів. Аналогічно можна спостерігати істотно вищі значення в'язкості та температури кристалізації. Такі відмінності у властивостях палива для ГТД та біодобавок пояснюються відмінностями у їх хімічній будові. На відміну від вуглеводнів традиційних палив для ГТД, які містять 5-16 атомів вуглецю, ацильні радикали молекул естерів містять ширший спектр молекул, як правило, з 8–22 атомами вуглецю або навіть більше, залежно від сировини. Це є причиною сильної дисперсійної взаємодії між ними і, як наслідок, більшої густини порівняно з авіаційним паливом.

З таблиці 2 видно, що густина різних біодобавок суттєво відрізняється і перебуває у межах 860,4–880,38 кг/м³. Це пояснюється кількісним

та якісним жирнокислотним складом кожної з біодобавок. З таблиці 1 видно, що МЕРО та ЕЕРО містять молекули з 16–22 атомами вуглецю в радикалах жирних кислот. При цьому близько 90 % всіх молекул є складними естерами жирних кислот з 16, 18 і 20 атомами вуглецю (пальмітинової, олеїнової, лінолевої, ліноленої та ейкозенової кислот). Подібно до них ЕЕРижО містять переважно складні ефіри пальмітинової, олеїнової, лінолевої та ліноленої кислот (С16–С18). Такий вміст високомолекулярних естерів зумовлює високі значення густини. У той же час ЕЕПЯО та ЕЕКО складаються з молекул, що містять меншу кількість атомів вуглецю (С8–С18), крім того, ЕЕЖК ПО містять деяку кількість молекул С6. При цьому, основну частку складають естери С8–С12. Можна припустити, що в цьому випадку міжмолекулярна взаємодія між молекулами естерів з коротшими вуглеводневими лагцюгами є слабшою, і це призводить до нижчих значень густини (860,4–866,92 кг/м³).

Наступним кроком було досліджено густину зразків сумішевих біопалив з різним вмістом біодобавок (рис. 1).

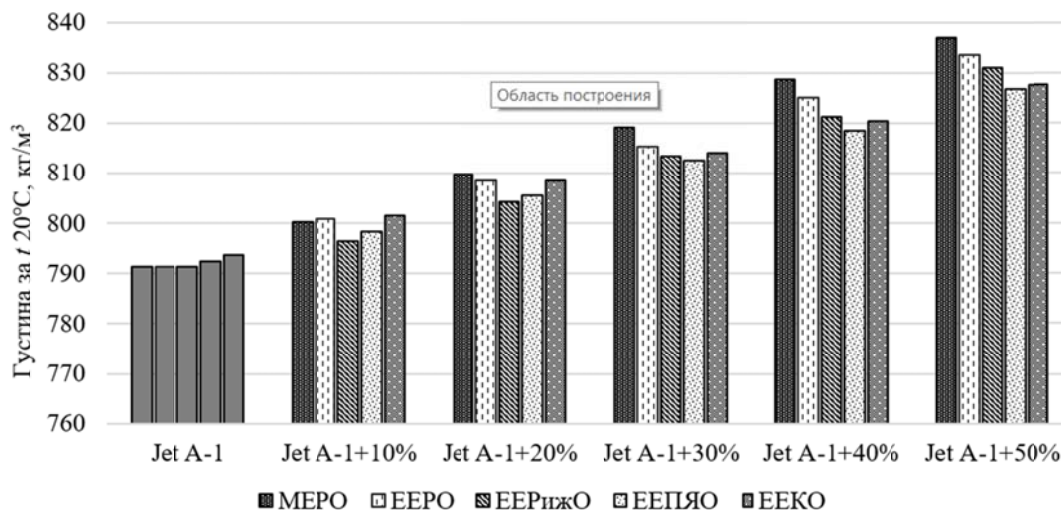


Рис. 1. Залежність густини зразків авіаційних біопалив від вмісту біодобавок: МЕРО, ЕЕРО, ЕЕРижО, ЕЕПЯО, та ЕЕКО

Густина зразків біопалива зростає зі збільшенням вмісту біодобавок. Для всіх зразків зміна густини має адитивний характер. Зростання зна-

чень густини пояснюється посиленням дії сил міжмолекулярної взаємодії між молекулами вуглеводнів палива для ГТД і ацильними радикала-

ми складних естерів. Ацильні радикали молекул естерів містять більшу кількість атомів вуглецю, що призводить до сильнішої взаємодії та утворення міцніших міжмолекулярних зв'язків [11]. Як наслідок, збільшення кількості біодобавок у паливі для ГТД призводить до зростання густини зразків біопалив. При цьому зразки біопалив з ЕЕПЯО та ЕЕКО мають нижчі значення густини порівняно з біопаливами з МЕРО, ЕЕРО та ЕЕРижО, і є більш подібними до значень, характерних для нафтових палив для ГТД.

В'язкість палива – це середнє значення в'язкостей всіх його компонентів. В'язкість вуглевод-невих палив для ГТД, як і біодобавок, залежить від структури молекул, їх взаємодії і, в невеликій мірі, від їх молекулярної маси. З таблиці 2 видно, що значення в'язкості біодобавок (4,041–6,734 мм²/с) значно відрізняються від в'язкості традиційного авіаційного палива (1.50–1.58 мм²/с).

Причиною цього, як зазначалося вище, є хімічна структура естерів жирних кислот. Довжина радикалів жирних кислот зумовлює великий розмір сполук, що призводить до більшої енергії їх міжмолекулярної взаємодії. В'язкість, як і густина, є властивістю, за допомогою якої можна досить точно охарактеризувати сили міжмолекулярної взаємодії в рідині [3]. Чим вища енергія міжмолекулярної взаємодії палива, тим вища його в'язкість. Молекули вуглеводнів не містять у своєму складі карбоксильних груп і характери-

зуються значно меншими розмірами, внаслідок чого сили взаємодії між ними значно менші, ніж між молекулами складних естерів.

Крім того, з таблиці 2 видно, що ЕЕПЯО і ЕЕКО мають нижчі значення в'язкості порівняно з МЕРО, ЕЕРО і ЕЕРижО. Звертаючись до таблиці 1, можна побачити, що естери ріпакові та рижієвої олій складаються з довголанцюгових естерів з 16–22 атомами вуглецю, в той час як естери пальмоядрової та кокосової олій містять молекули з 8–18 атомами вуглецю. Завдяки цьому сили міжмолекулярної взаємодії в біодобавках на основі ЕЕПЯО і ЕЕКО слабші, а, отже, і в'язкість нижча. Крім того, біодобавки на основі МЕРО, ЕЕРО і ЕЕРижО приблизно на 80% складаються з естерів ненасичених жирних кислот з одним і двома подвійними зв'язками, що додатково збільшує їх в'язкість. Біодобавка ЕЕПЯО, навпаки, містить лише близько 3 % ненасичених жирних кислот, а біодобавка ЕЕКО – близько 17 %, що значно нижче в порівнянні з естерами ріпакової та рижієвої олій.

Надалі було досліджено кінематичну в'язкість зразків біопалив з різним вмістом біодобавок (рис. 2). Встановлено, що збільшення вмісту біодобавок у біопаливі призводить до зростання кінематичної в'язкості. Це явище можна пояснити посиленням сил міжмолекулярної взаємодії між молекулами вуглеводнів та молекулами складних естерів.

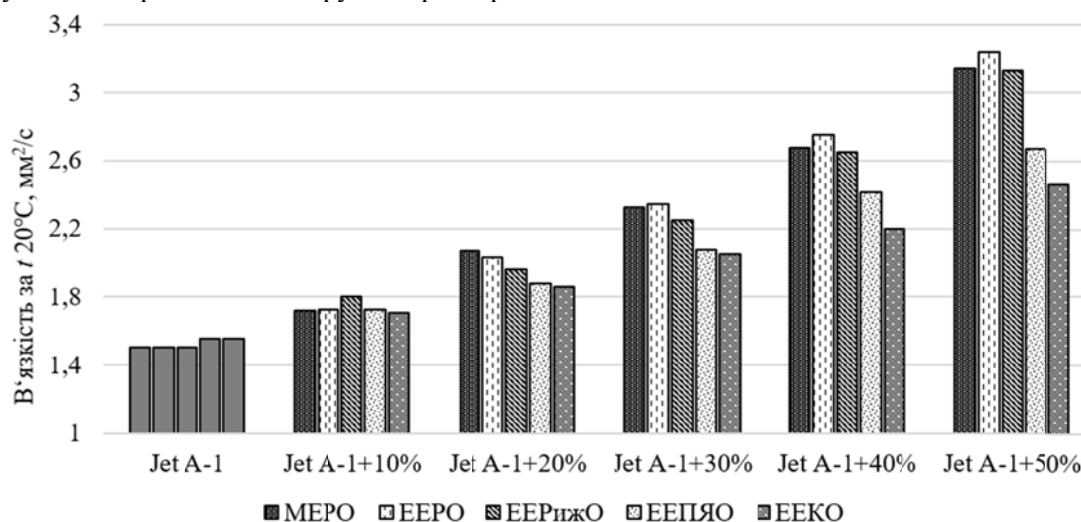


Рис. 2. Залежність кінематичної в'язкості зразків авіаційних біопалив від вмісту біодобавок: МЕРО, ЕЕРО, ЕЕРижО, ЕЕПЯО, ЕЕКО

З рис. 2 також видно, що зразки біопалив з ЕЕПЯО та ЕЕКО мають нижчі показники кінематичної в'язкості у порівнянні з біопаливами з біодобавками МЕРО, ЕЕРО та ЕЕРижО і є більш подібними до значень, характерних для традиційних палив для ГТД.

Дослідження низькотемпературних властивостей показали, що біодобавки на основі МЕРО, ЕЕРО, ЕЕРижО, ЕЕПЯО та ЕЕКО мають значно вищі значення температури кристалізації порівняно з традиційним авіаційним паливом (табл. 2). Такі високі температури кристалізації біодобавок

пояснюються хімічною структурою молекул та силами міжмолекулярної взаємодії, що існують між ними. Довжина вуглеводневого ланцюга (C8–C22) визначає великий розмір сполук, завдяки чому енергія зв'язків між молекулами значно вища порівняно зі звичайними авіаційними паливами.

Завдяки існуванню сил міжмолекулярної взаємодії швидкість хаотичного руху молекул естерів жирних кислот незначна. За зниження температури їх асоціація швидко зростає; це відбувається завдяки зменшенню теплового руху молекул, що послаблює зв'язки між ними, а така ж внаслідок зменшення рухливості молекул естерів, які з'єднуються одна з одною. За подальшого зниження температури в'язкість підвищується доти, доки естери не застигають і втрачають свою рухливість.

Структура молекул біодобавки має певний вплив на температуру застигання. Наявність подвійних зв'язків у молекулах складних естерів робить їх форму вигнутою, що ускладнює їх щільне розміщення одна біля одної. Результати дослідження показали, що змішування авіаційних палив з біодобавками підвищує їх температуру кристалізації (рис. 3). За концентрації біодобавок до 30 % (об.) їх вплив на температуру кристалізації відносно незначний. За низьких концентрацій біодобавок вони рівномірно розподілені в об'ємі традиційного нафтового палива для ГТД і знаходяться на відстанях, недостатніх для їх взаємодії. За подальшого збільшення вмісту естерів температура кристалізації зростає і

поступово наближається до значень, характерних для чистих естерів жирних кислот.

Даний ефект може бути пояснений, проаналізувавши міжмолекулярні взаємодії та властивості нафтопродуктів [10, 14]. За збільшення вмісту біодобавок у біопаливі понад 30 % вміст відносно великих молекул складних естерів стає достатнім для їх асоціації: з одного боку, за рахунок дії фізичних сил притягання, а з іншого боку, за рахунок «зчеплення» або «поєднання» кількох окремих ланцюгів молекул. Особливу роль у процесі «зчеплення» відіграють ненасичені естери, що завдяки наявності подвійних зв'язків мають зігнуту форму. Таким чином, асоційовані молекули складних естерів ініціюють формування структури в суміші вуглеводневого палива для ГТД та естерів жирних кислот.

З рис. 3 видно, що біопалива з ЕЕПЯО та ЕЕКО мають вищі значення температури кристалізації порівняно з МЕРО, ЕЕРО та ЕЕРиЖО. Причина такого ефекту може бути пояснена відмінностями в структурі радикалів жирних кислот. З одного боку, ЕЕПЯО і ЕЕКО складені, в основному, молекулами меншого розміру і між ними повинна виникати взаємодія меншої сили. Однак, з іншого боку, обидві біодобавки складаються здебільшого з насичених молекул складних естерів, що мають лінійну (пряму) будову (ЕЕПЯО – близько 93 % і ЕЕКО – близько 87 %). Подібно до n-парафінів у традиційних паливах для ГТД, коротколанцюгові насичені ефіри перетворюються на кристали за порівняно високих температур.

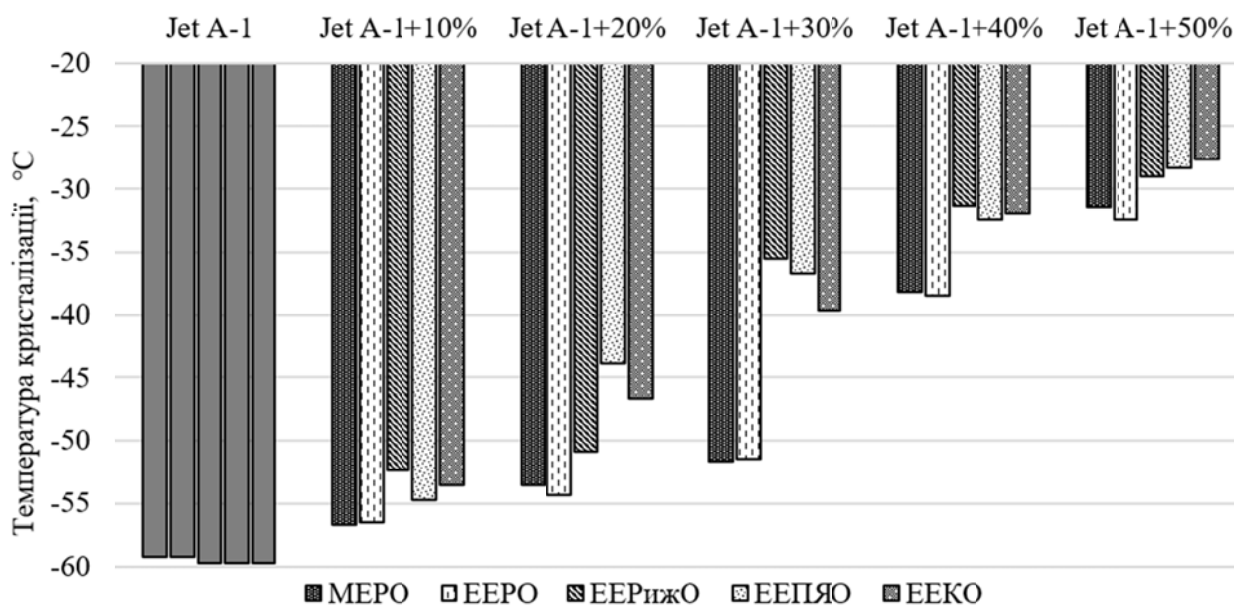


Рис. 3. Залежність температури замерзання зразків авіаційних біопалив від вмісту біодобавок: МЕРО, ЕЕРО, ЕЕРиЖО, ЕЕПЯО, ЕЕКО

Висновки

У межах даної роботи досліджено та проаналізовано жирнокислотний склад та фізико-хімічні властивості біодобавок на основі різних рослинних олій. Показано, що кількісний та якісний вміст естерів жирних кислот визначає фізико-хімічні властивості біодобавок. Узагальнивши характер впливу жирнокислотного складу на властивості біодобавок можна сформулювати наступні закономірності:

– наявність у складі біодобавок естерів з високим числом атомів вуглецю обумовлює підвищення їх молекулярної маси. Чим довша довжина жирнокислотних радикалів, тим міцнішими є сили міжмолекулярної взаємодії в біодобавках.

Це, у свою чергу, зумовлює підвищення густини та в'язкості біодобавок. Крім того, більша молекулярна маса біодобавок обумовлює вищі температури їх кипіння:

– наявність у складі біодобавок ненасичених естерів з одним або кількома подвійними зв'язками зумовлює підвищення в'язкості біодобавок.

При цьому, «зігнута» (нелінійна) структура молекул спричиняє деякий позитивний вплив на низькотемпературні властивості біодобавок. У той же час, наявність естерів з одним або кількома подвійними зв'язками істотно знижує хімічну стабільність біодобавок і робить їх схильними до окиснення.

На наступному етапі роботи досліджено фізико-хімічні властивості зразків авіаційних біопалив на основі нафтового палива для ГТД та біодобавок. Показано, що введення біодобавок до складу палив для ГТД призводить до зміни їх властивостей, зокрема до підвищення густини, в'язкості та температури кристалізації. За показниками густини та в'язкості зразки біопалив цілком задовольняють вимоги нормативних документів щодо якості авіаційних палив. За показником температури кристалізації лише біопалива з вмістом біодобавок не більше 30 % (об.) задовольняють вимоги нормативних документів.

За результатами експериментальних досліджень можна зробити висновок, що біодобавки на основі пальмоядрової та кокосової олій мають кращі характеристики порівняно з біодобавками на основі ріпакової та рижієвої олій, зокрема, з огляду можливості їх використання як компонентів авіаційних біопалив. Біодобавки на основі пальмоядрової та кокосової олій мають молекулярний склад та молекулярну масу, що більш наближені до складу традиційного авіаційного палива, а отже мають властивості, що є більш подібними до властивостей нафтового палива для ГТД. Таким чином, одержані результати да-

ють підґрунтя для подальших лабораторних досліджень, зокрема, експлуатаційних властивостей, та випробувань на стендових авіаційних двигунах.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Lee, D. S., Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P. J., Wit, R. C., Lim, L. L., Owen, B., & Sausen, R. (2009). "Aviation and global climate change in the 21st century". *Atmospheric Environment*, 43(22–23), pp. 520–537. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024
- [2] Yakovlieva A. V., Boichenko S. V., Zarembo J. (2019). "Improvement of air transport environmental safety by implementing alternative jet fuels". *MOSATT 2019 – Modern Safety Technologies in Transportation International Scientific Conference, Proceedings*, pp. 146–151. DOI: 10.1109/MOSATT48908.2019.8944122
- [3] Yakovlieva, A., Boichenko, S., Lejda, K., & Vovk, O. (2019). "Modification of jet fuels composition with renewable bio-additives". *Kyiv, Center for education literature*, 207 p. <https://doi.org/10.18372/37895>
- [4] Dessens, O., Köhler, M. O., Rogers, H. L., Jones, R. L., & Pyle, J. A. (2014). "Aviation and climate change". *Transport Policy*, 34, pp. 14–20. doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.02.014
- [5] Achinas, S., Margry, S., & Euverink, G. J. W. (2021). "A technological outlook of biokerosene production". In *Applied biotechnology reviews, sustainable biofuels*, Academic Press, pp. 225–246. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820297-5.00011-6>
- [6] Wormslev, E., Tang, C., Eriksen, C. (2017). *Sustainable fuels for aviation: an analysis of Danish achievements and opportunities*. Danish Transport Authority, Denmark, 148 p.
- [7] Panchuk M., Kryshchtopa S., Shlapak L., Kryshchtopa L., Yarovyi V., Sladkovskiy, A. (2017). "Main trend of biofuels production in Ukraine". *Transport Problems*. 12(4). pp. 95–103. <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.4.2>
- [8] Boichenko, S., Zubenko, S., Konovalov, S., & Yakovlieva, A. (2020). "Synthesis of Camelina oil ethyl esters as components of jet fuels". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(6(103)), pp. 42–49. doi.org/10.15587/1729-4061.2020.196947
- [9] Konovalov, S., Zubenko, S., Patrylak, L., Yakovenko, A., Povazhnyi, V., Burlachenko, K. (2022). "Revisiting the Synthesis of Fatty Acid Alkyl Esters of Lower Monohydric Alcohols by Homogeneous Base-Catalyzed Transesterification of Vegetable Oils", in *Chemotological Aspects of Sustainable Development of Transport*. Cham: Springer, pp. 49–80. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06577-4_4
- [10] Patrylak, L. K., Zubenko, S. O., Konovalov, S. V. "Transesterification of rapeseed oil by butanol over alkaline catalysts". *Voprosy Khimii i*

- Khimicheskoi Tekhnologii, 2018, (5), pp. 125–130. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-125-4-95-100>
- [11] Iakovlieva, A., Vovk, O., Boichenko, S., Lejda, K., & Kuszewski, H. (2016). “Physical-chemical properties of jet fuel blends with components derived from rapeseed oil”. *Chemistry and Chemical Technology*, 10(4), pp. 485–492. doi.org/10.23939/chcht10.04.485
- [12] El-Araby, R., Abdelkader, E., El Diwani, G., Hawash, S.I. (2020). “Bio-aviation fuel via catalytic hydrocracking of waste cooking oils”. *Bulletin of the National Research Center*, 44, pp. 177. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00425-6>
- [13] Moser B.R. (2010). “Camelina (*Camelina sativa* L.) oil as a biofuels feedstock: Golden opportunity of false hope?”. *Lipid technology*. 22(12). P. 270–273. <https://doi.org/10.1002/lite.201000068>
- [14] Navas, M. B., Bolla, P. A., Lick, I. D., Casella, M. L., Ruggera, J. F. (2018). “Transesterification of Soybean and Castor Oil with methanol and butanol Using Heterogeneous Basic Catalysts to obtain Biodiesel”. *Chemical Engineering Science*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.04.068>

Яковлєва А. В., Павловський М. В., Зубенко С. О., Бошков В. В., Максимів О. Л.
ВЛАСТИВОСТІ АВІАЦІЙНИХ БІОПАЛИВ НА ОСНОВІ БІОДОБАВОК
РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ

Робота присвячена дослідженню фізико-хімічних властивостей авіаційних біопалив, зокрема, обґрунтуванню впливу біодобавок на основі різних рослинних олій на властивості палив для ГТД та оцінці можливості використання нових біодобавок для одержання авіаційних біопалив. Розглянуто сучасний стан авіаційної галузі та наведено ключові напрями її розвитку. Враховуючи завдання щодо мінімізації впливу авіації на навколишнє середовище, декарбонізації авіаційного сектору та підвищення його енергоефективності, одним із основних пріоритетів галузі є розвиток технологій виробництва альтернативних авіаційних палив та упровадження їх у практичне використання. У рамках роботи розглянуто альтернативні авіаційні палива (біопалива), що є сумішшю традиційного авіаційного палива та біодобавок, одержаних з різноманітних рослинних олій. Ураховуючи тенденції щодо активного переходу від біопалив першого покоління до біопалив другого та третього поколінь у статті розглядаються нові види рослинної сировини для одержання біодобавок до палив. Зокрема, розглянуто можливості використання біодобавок на основі пальмоядрової та кокосової олій для одержання біопалив другого покоління. У роботі досліджено та проаналізовано хімічний склад та фізико-хімічні властивості біодобавок на основі різних рослинних олій. Показано, що кількісний та якісний склад біодобавок визначає їх фізико-хімічні властивості. Надалі, досліджено фізико-хімічні властивості зразків авіаційних біопалив на основі нафтового авіаційного палива та біодобавок. Показано, що введення біодобавок до складу нафтових авіаційних палив призводить до зміни їх властивостей, зокрема до підвищення густини, в'язкості та температури кристалізації. За результатами експериментальних обґрунтовано, що біодобавки на основі пальмоядрової та коко-сової олій мають кращі характеристики порівняно з біодобавками, що вивчалися раніше (на основі ріпакової та рижієвої олій), зокрема, з огляду можливості їх використання як компонентів авіаційних біопалив. Таким чином, нові біодобавки можуть успішно використовуватися для подальших досліджень щодо розроблення альтернативних авіаційних палив.

Ключові слова: авіаційне паливо; біодобавка; біопаливо; властивості, естерифікація; естери; густина, в'язкість, температура кристалізації

Yakovlieva A., Pavlovskiy M., Zubenko S., Boshkov V., Maksymiv O.
PROPERTIES OF AVIATION BIOFUELS BASED ON BIO-ADDITIVES OF PLANT ORIGIN

The paper is devoted to the study of the physicochemical properties of aviation biofuels, in particular, to the substantiation of the influence of bio-additives based on various vegetable oils on the properties of jet fuels and to the assessment of the possibility of using new bio-additives to produce aviation biofuels. The aviation industry's current state is considered and its development's key directions are presented. Considering the tasks of minimizing the environmental impact of aviation, decarbonizing the aviation sector and increasing its energy efficiency, one of the industry's main priorities is the development of technologies for the production of alternative aviation fuels and their practical use. This paper considers alternative aviation fuels (biofuels), which are a mixture of traditional aviation fuels and bio-additives derived from various vegetable oils. Taking into account the trends of active transition from first-generation biofuels to second- and third-generation biofuels, the article considers new types of plant raw materials for obtaining bio-additives to fuels. In particular, the possibilities of using bio-additives based on palm kernel and coconut oils to produce second-generation biofuels are considered. The chemical composition and physicochemical properties

of bio-additives based on various vegetable oils were investigated and analyzed. It is shown that the quantitative and qualitative composition of bio-additives determines their physicochemical properties. Further, the physicochemical properties of aviation biofuel samples based on petroleum aviation fuel and bio-additives were investigated. It is shown that the introduction of bio-additives into the composition of petroleum aviation fuels leads to changes in their properties, in particular, to an increase in density, viscosity, and crystallization temperature. The experimental results substantiate that bio-additives based on palm kernel and coconut oils have better characteristics than the previously studied bio-additives (based on rapeseed and castor oils), in particular, regarding the possibility of their use as components of aviation biofuels. Thus, the new bio-additives can be successfully used for further research on the development of alternative aviation fuels.

Keywords: aviation fuel; bio-additive; biofuel; properties; esterification; esters; density; viscosity; freezing point

Стаття надійшла до редакції 31.04.2023 р.

Прийнято до друку 01.06.2023 р.