

УДК 621.891(045)

А. В. ЯКОВЛЄВА¹, О. О. ВОВК¹, С. В. БОЙЧЕНКО¹, К. ЛЕЙДА²,
Х. КУЖЕВСЬКИЙ², М. ЯКУБОВСЬКИЙ²

¹Національний авіаційний університет, Україна

²Жешувська політехніка, Польща

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОТИЗНОСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПАЛИВ ДЛЯ ПОВІТРЯНО-РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ НА РОСЛИННО-МІНЕРАЛЬНІЙ ОСНОВІ

Експериментально досліджено протизносні властивості палива для повітряно-реактивних двигунів (ПРД), трьох видів біокомпонентів, отриманих з ріпакової олії та їх сумішей. Встановлено, що змащувальна здатність біокомпонентів є значно вищою у порівнянні з традиційним нафтовим паливом для ПРД. Проведені дослідження показали, що додавання біокомпонентів до складу авіаційного палива призводить до зміцнення граничної плівки і таким чином поліпшує протизносні властивості паливних сумішей. Встановлено, що додаткове модифікування біокомпонентів дозволяє підвищити їх змащувальну здатність у порівнянні зі стандартними біокомпонентами, отриманими з ріпакової олії.

Ключові слова: паливо для ПРД, альтернативні палива, протизносні властивості, біокомпоненти, змащувальна здатність, навантаження задирання, тертя.

Вступ. Протягом останніх років все більше уваги приділяється питанню щодо заміни традиційних джерел енергії їх альтернативними аналогами [1]. На сьогодні властивості альтернативних палив для ПРД вивчені не в повній мірі. Особливої уваги потребує дослідження експлуатаційних властивостей таких палив. Так, слід відзначити [1, 2], що альтернативні палива для ПРД, отриманих ФТ-синтезом характеризуються низькими змащувальними властивостями, що в майбутньому може призводити до передчасного зносу деталей двигуна. У той же час, є повідомлення про досить гарні змащувальні властивості естерів рослинних олій [3-4]. У більшості, такі висновки були зроблені на основі досліджень характеристик біодизелю як заміника нафтового дизельного палива [3-5].

Приймаючи до уваги відомі дані про змащувальні властивості естерів рослинних олій, представляє інтерес дослідження їх впливу на протизносні властивості палив для ПРД. Таким чином, завданням даної роботи є дослідження протизносних властивостей сумішевих рослинно-мінеральних палив для ПРД, що містять метилові естери ріпакової олії.

Протизносні властивості палив для ПРД визначають надійність та ресурс роботи паливних агрегатів ПС, зокрема їх пар тертя [6-8]. Ці пари працюють в режимах тертя кочення, тертя ковзання і комбінованого тертя при різних навантаженнях, температурах, тиску, швидкості відносного руху в умовах рідкого та граничного змащування.

Змащувальні властивості палив залежать від їх хімічного складу, в'язкості, термоокиснювальної стабільності, вмісту механічних домішок, наявності поверхнево-активних речовин [6, 9]. За високих питомих навантажень зазвичай спостерігається напіврідке тертя, коли поверхні тертя не повністю розділені паливом. У разі напіврідкого тертя протизносні властивості палив для ПРД визначаються: 1) в'язкістю палива, що забезпечує гідродинамічний ефект розділення поверхонь те-

ртя шаром рідини; 2) наявністю в паливі поверхнево-активних речовин, що утворюють на поверхні тертя абсорбційний шар високої міцності, що розділяє поверхні тертя і тим самим зменшує коефіцієнта тертя та знос деталей [8, 9].

Основна частина. Під час проведення експерименту було досліджено змащувальну здатність палива для ПРД, трьох видів біокомпонентів, а також їх сумішей з паливом для ПРД. Як паливо для ПРД було використано традиційне авіаційне паливо нафтового походження марки Jet A-1, що відповідає вимогам ASTM D1655 [10]. Біокомпоненти були представлені сумішшю метилових естерів жирних кислот (МЕЖК) ріпакової олії, що відповідають вимогам EN 14214 [11], а також метиловими (МЕЖК(М)) та етиловими (ЕЕЖК(М)) естерами ріпакової олії, спеціально модифікованими для застосування як компонента палив для ПРД. Модифікація проводилася вакуумним фракціонуванням відповідно до розробленої технології [5, 6]. Зразки паливних сумішей містили зазначені біокомпоненти у кількості 10 %, 20 %, 30 %, 40 % та 50 %.

Протизносні властивості зразків палива було досліджено за допомогою чотирикулькової машини T-02U, що складається з випробувального приладу та системи контролю. Механічна частина (випробувальний прилад) включає в себе корпус, двигун, регулюючий навантаження на пару тертя привід, чашу для розміщення кульок і основу. Пара тертя складається з трьох нижніх кульок, встановлених в затискач з навантаженням відповідної сили, що прикладена до верхньої кульки, встановленої на шпинделі, що обертається з заданою швидкістю [12].

Для випробувань було використано типові шарикопідшипники діаметром 1/2 дюйма. Підшипники виготовлені з підшипникової сталі GCR15 з твердістю $60 \div 65$ HRC. Механічна система дозволяє збільшувати лінійне навантаження, що прикладається до пари тертя під час випробування. Система контролю складається з блоку управління з мікропроцесором, асинхронним контролером двигуна та комп'ютеру з відповідним програмним забезпеченням [12].

Випробування проводилися в умовах поступового збільшення навантаження. Швидкість обертання під час випробувань становила 500 обертів на хвилину, за швидкості підвищення навантаження 409 Н/с. Температура зразків палив на початку дослідження становила $60 \pm 0,5$ °С. В рамках даного дослідження, задирання пари тертя відбувається тоді, коли перевищується граничний момент тертя $M_T = 10$ Нм. Ця величина визначається за міцністю верхньої кульки у парі тертя. Значення моменту тертя M_T та лінійно зростаючого навантаження P на пару тертя фіксуються під час тесту.

Принцип методу полягає у визначенні навантаження задирання прикладеного до пари тертя [12]. Тобто, зразок палива з найбільшим прикладеним навантаженням задирання вважається таким, що має кращі протизносні властивості. Іншими словами, це означає, що гранична плівка цього зразка палива продемонструвала найбільш високу стійкість до руйнування.

На рис. 1-4 представлено криві моменту тертя, навантаження на пару тертя та коефіцієнту тертя, що вимірювалися під час дослідів. Для кожного випробуваного зразка було визначено навантаження задирання, що характеризує критерій для оцінки змащувальних властивостей палив згідно обраної методики досліджень.

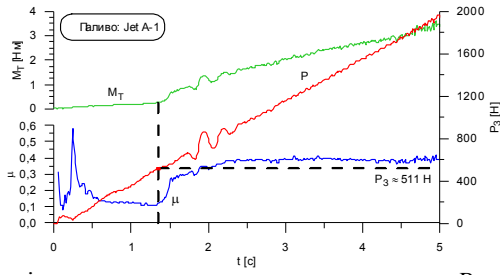


Рис. 1. Залежність зміни сили навантаження на пару тертя P , моменту тертя M_T та коефіцієнту тертя μ від часу проведення дослідів t для палива Jet A-1

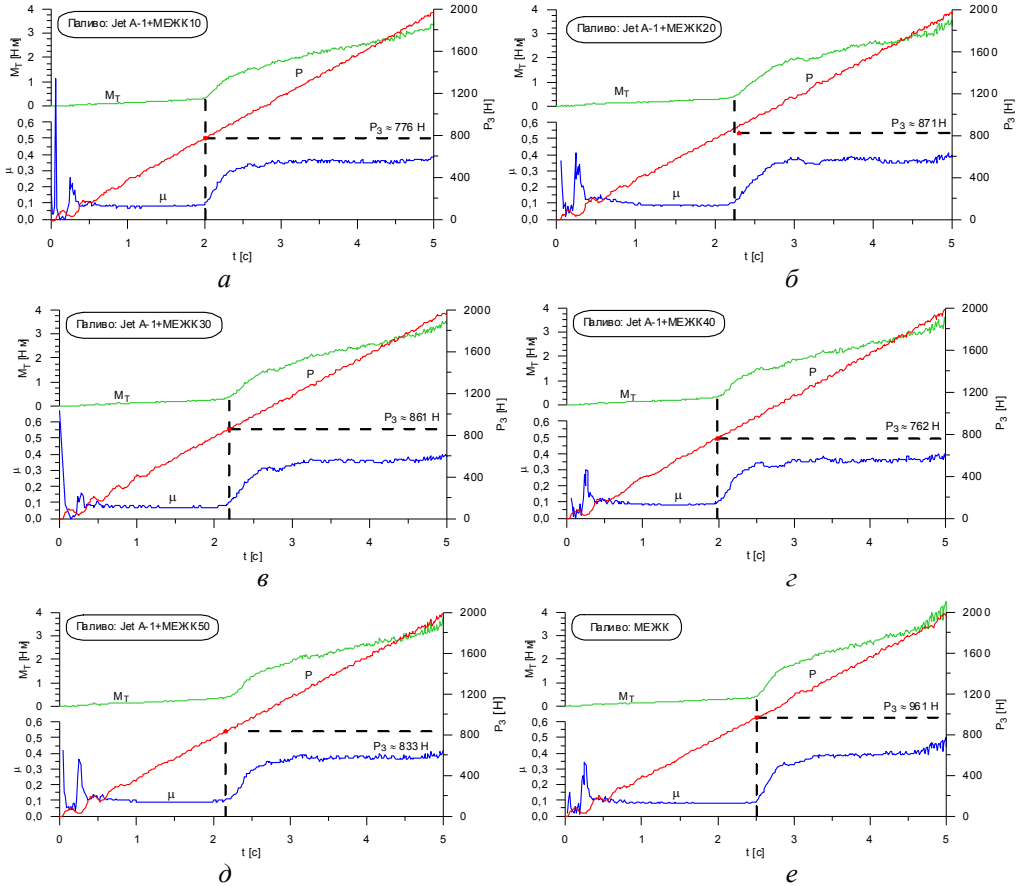
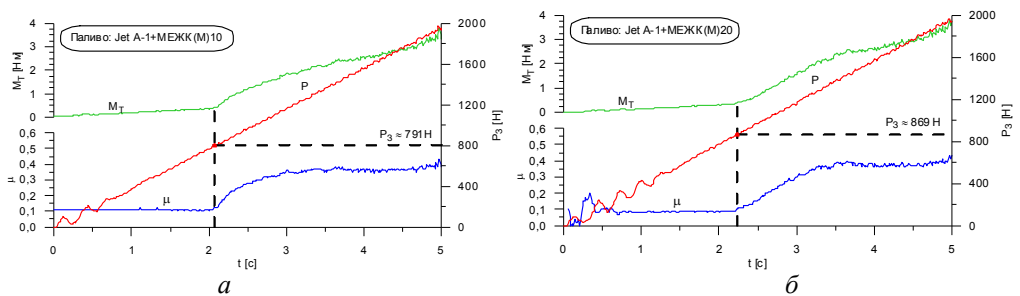


Рис. 2. Залежність зміни сили навантаження на пару тертя P , моменту тертя M_T та коефіцієнту тертя μ від часу проведення дослідів t для зразків палив:

a – Jet A-1+МЕЖК10; $б$ – Jet A-1+МЕЖК20; $в$ – Jet A-1+МЕЖК30;
 $г$ – Jet A-1+МЕЖК40; $д$ – Jet A-1+МЕЖК50; e – МЕЖК; P_3 – навантаження задирання



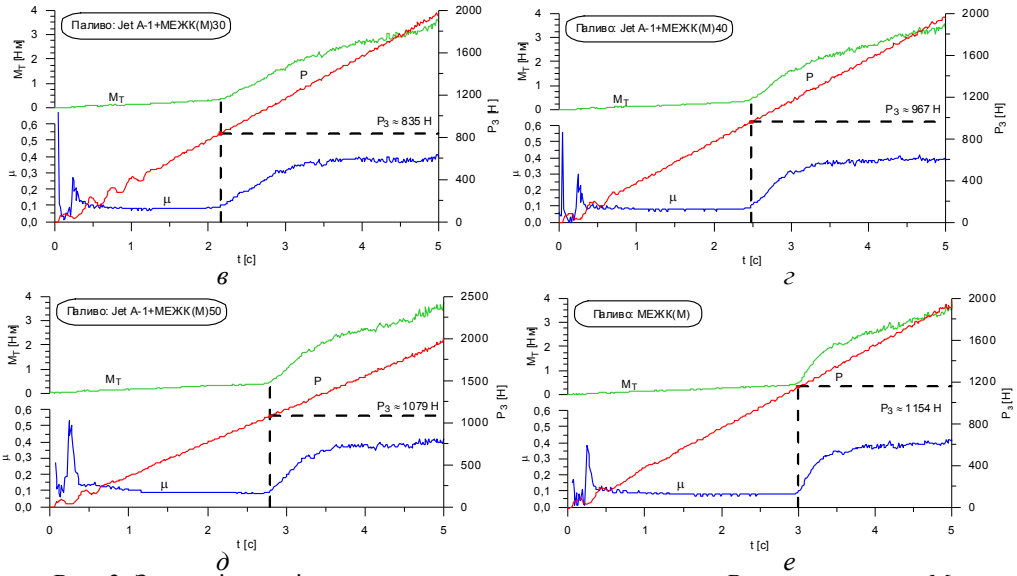


Рис. 3. Залежність зміни сили навантаження на пару тертя P , моменту тертя M_T та коефіцієнту тертя μ від часу проведення дослідів t для зразків палив: а – Jet A-1+МЕЖК(M)10; б – Jet A-1+МЕЖК(M)20; в – Jet A-1+МЕЖК(M)30; г – Jet A-1+МЕЖК(M)40; д – Jet A-1+МЕЖК(M)50; е – МЕЖК(M); P_3 – навантаження задирання

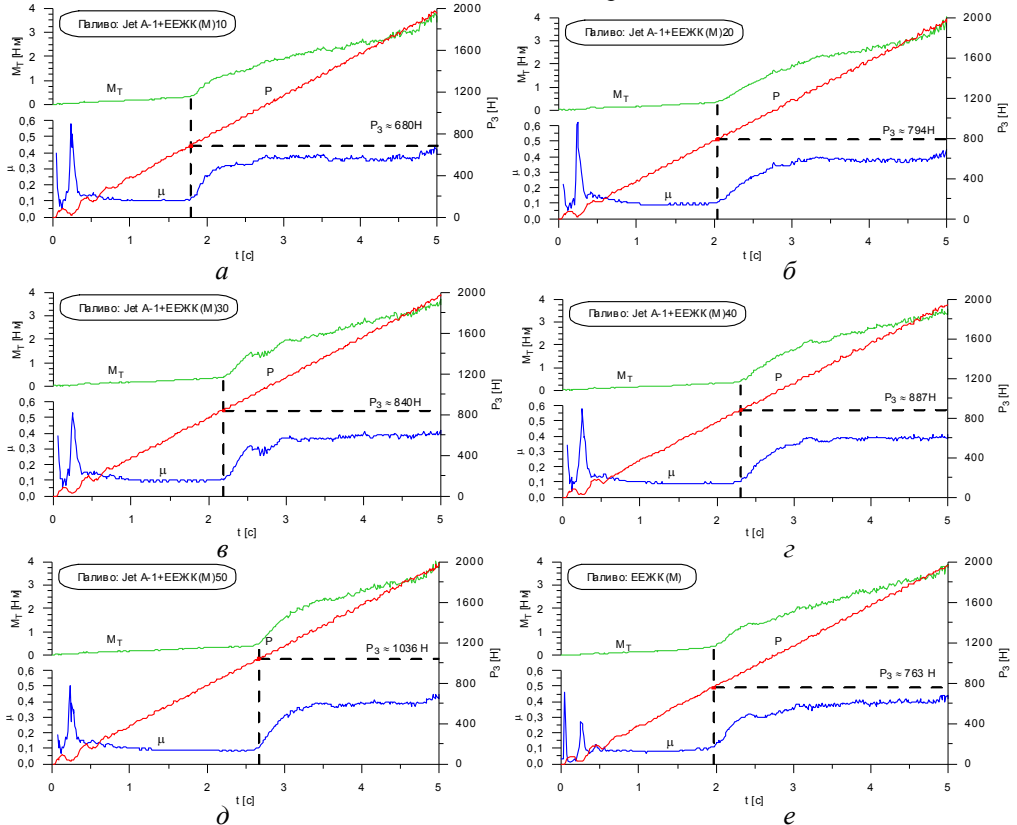


Рис. 4. Залежність зміни сили навантаження на пару тертя P , моменту тертя M_T та коефіцієнту тертя μ від часу проведення дослідів t для зразків палив: а – Jet A-1+ЕЕЖК(M)10; б – Jet A-1+ЕЕЖК(M)20; в – Jet A-1+ЕЕЖК(M)30; г – Jet A-1+ЕЕЖК(M)40; д – Jet A-1+ЕЕЖК(M)50; е – ЕЕЖК(M); P_3 – навантаження задирання

У процесі обробки отриманих результатів, було визначено навантаження задирання P_S для кожного зі зразків палив, що представлено на рис. 5.

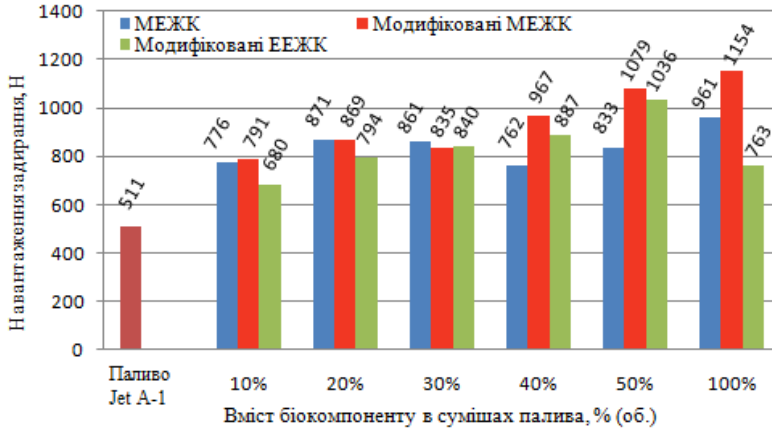


Рис. 5. Навантаження задирання пари тертя в середовищі палива для ПРД та досліджених сумішевих палив

З наведених результатів видно, що традиційне паливо для ПРД марки Jet A-1 продемонструвало найнижчі значення навантаження задирання – 511 Н. У той же час максимальні значення навантаження задирання були зафіксовані для двох видів біокомпонентів: 961 Н – для MEJK ріпакової олії і 1154 Н – для модифікованих MEJK ріпакової олії. Модифіковані EEJK ріпакової олії показали дещо нижче значення у порівнянні з попередніми зразками. Приймаючи зразок палива Jet A-1 за контрольний, можемо зробити висновок, що використання естерів ріпакової олії позитивно впливає на змащуючі властивості палива для ПРД.

Зношування деталей суттєво залежить від в'язкості палив [13, 15]. Традиційні палива для ПРД характеризуються відносно низькими значеннями в'язкості, так як складені вуглеводнями невеликої молекулярної маси. Їх молекули мають порівняно малі розміри і, як наслідок, менший дипольний момент. У результаті, гранична плівка, що формується на поверхні твердого тіла має меншу міцність, у порівнянні з паливами з більш високими значеннями в'язкості. Крім того, зменшення розміру молекул спричиняє збільшення середньої швидкості їх хаотичного теплового руху, що сприяє руйнуванню (десорбції) граничної плівки.

Оскільки змащувальні властивості зразків сумішевих палив для ПРД було досліджено за температури 60 °С, доцільним було оцінювати кінематичну в'язкість за такого ж температурного режиму. Результати вимірювань представлено у табл. 1.

Таблиця 1

Кінематична в'язкість досліджених зразків палива

Позначення зразка палива	Кінематична в'язкість за t 60 °С, мм ² /с	Позначення зразка палива	Кінематична в'язкість за t 60 °С, мм ² /с	Позначення зразка палива	Кінематична в'язкість за t 60 °С, мм ² /с
Jet A-1	0,89500	Jet A-1	0,89500	Jet A-1	0,895
Jet A-1+ MEJK10	0,99289	Jet A-1+ MEJK(M)10	0,99992	Jet A-1+ EEJK(M)10	1,008
Jet A-1+ MEJK 20	1,11510	Jet A-1+ MEJK(M)20	1,13090	Jet A-1+ EEJK(M)20	1,1493
Jet A-1+ MEJK 30	1,25760	Jet A-1+ MEJK(M)30	1,26790	Jet A-1+ EEJK(M)30	1,2913
Jet A-1+ MEJK 40	1,46030	Jet A-1+ MEJK(M)40	1,42880	Jet A-1+ EEJK(M)40	1,4628
Jet A-1+ MEJK 50	1,70560	Jet A-1+ MEJK(M)50	1,59570	Jet A-1+ EEJK(M)50	1,6652
MEJK	3,06220	MEJK(M)	2,92630	EEJK(M)	3,1881

З наведених даних видно, що кінематична в'язкість традиційного нафтового палива для ПРД є набагато нижчою у порівнянні з в'язкістю біокомпонентів. Такі високі значення в'язкості МЕЖК та ЕЕЖК пояснюються їх хімічною структурою. В'язкісні характеристики палив для ПРД залежить від їх вуглеводневого складу: вмісту алканів (парафінів), циклоалканів (нафтенів), моно- і біциклічних аренів із середнім числом атомів вуглецю в молекулі від 5 до 16. У той же час, у вуглеводневих ланцюгах молекул складних естерів міститься 14 – 23 атомів вуглецю [14]. Це зумовлює порівняно великий розмір молекул, завдяки чому зменшується швидкість їх хаотичного руху. З таблиці 1 видно, що збільшення вмісту біокомпоненту в зразках сумішевих палив спричиняє збільшення їх в'язкості. На рисунку 6 представлено залежність зміни в'язкості та навантаження задирання зі збільшенням вмісту біокомпонентів в зразках сумішевих палив.

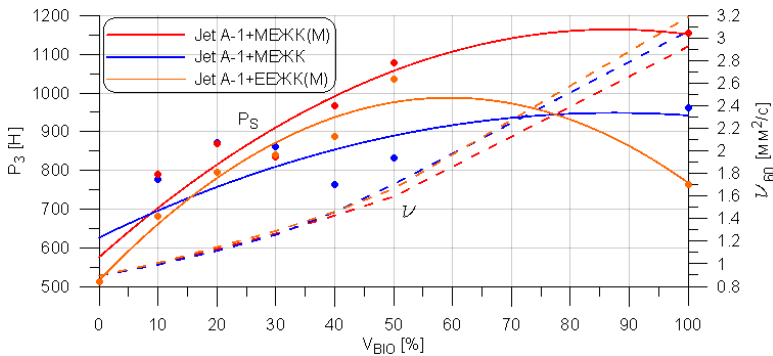


Рис. 6. Навантаження задирання пари тертя P_s , в'язкість палива ν як функція вмісту біокомпоненту в зразках сумішевих палив

З наведеного графіку видно, що підвищення в'язкості палив через збільшення вмісту біокомпонентів зумовлює зміцнення граничної плівки на поверхні пари тертя. Як наслідок суміші палив з більшим вмістом біокомпонентів мають вищі значення навантаження задирання. Отримані результати свідчать про те, що протизносні властивості палив для ПРД на пряму залежать від їх в'язкості, що забезпечує розділення поверхонь тертя шаром палива, забезпечуючи зниження коефіцієнту тертя та зносу деталей.

Висновки. Дослідження зразків сумішевих палив показали, що МЕЖК та ЕЕЖК ріпакової олії виявляють здатність утворювати більш міцну граничну плівку у порівнянні з паливом для ПРД нафтового походження для окремо взятої пари тертя. Ця здатність пояснюється поверхневою активністю молекул естерів та їх високою в'язкістю. Результати проведених випробувань свідчать, що збільшення вмісту біокомпонентів у зразках сумішевих палив сприяє зміцненню граничної плівки на поверхні пари тертя. Таким чином, можна припустити, що палива для ПРД з вмістом біокомпонентів, отриманих з ріпакової олії, характеризуються кращими протизносними властивостями. Іншими словами, естери жирних кислот ріпакової олії позитивно впливають на змащувальні властивості нафтових палив для ПРД і можуть використовуватися з метою покращення протизносних властивостей традиційних авіаційних палив.

Список літератури

1. The compatibility of potential bioderived fuels with Jet A-1 aviation kerosene / C. J. Chuck, J. Donnelly // Applied Energy. – 2014. – No. 118. – P. 83–91.

2. Горюче-смазочные материалы для авиационных двигателей : монография / С.Л. Яновский, Н.Ф. Дубовкин, Ф.М. Галимов и др. – М. : Мстер Лайн, [2002]. – 399 с. – ISBN 5-93139-143-6.
3. Study on the lubrication properties of biodiesel as fuel lubricity enhancers / J. Hu, Z. Du, C. Li, E. Min // Fuel. – 2005. – No. 84. – P. 1601–1606.
4. Техника и технологии производства и переработки растительных масел : учебное пособие / С.А. Нагорнов, Д.С. Дворецкий, С.В. Романцова, В.П. Таров. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, [2010]. – 96 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-0964-7.
5. Спосіб отримання компонента палив для повітряно-реактивних двигунів із сировини рослинного походження. Патент № 95751 / А.В. Яковлева, С.В. Бойченко, О.О. Вовк. – Зареєстр. 12.01.2015.
6. Антифрикційні властивості полікомпонентних композицій на основі хімічно-модифікованої ріпакової оливи під час мащення пари ароматичний поліамід - сталь / Г.О. Сіренко, Л.Я. Мідак, О.В. Кузишин, Л.М. Кириченко, В.І. Кириченко // Полімер. журн. – 2008. – Т. 30. – № 4. – С. 338 – 344.
7. Инженерные методы определения физико-химических и эксплуатационных свойств топлив : монография / Н.Ф. Дубовкин, С.Л. Яновский, Т.Н. Шигабиев. – Казань: [2000]. – 378 с.
8. Автоматизированная измерительно-испытательная система исследования динамических процессов при трении граничных слоев / А. В. Стельмах // Наукові нотатки. – 2013. – Вип. 42. – С. 288-291. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Nn_2013_42_48.pdf.
9. Химмотология ракетных и реактивных топлив : / А.А. Братков, Е.П. Серегин, А.Ф. Горенков и др. ; под. ред. А.А. Браткова. – М. : Химия, [1987]. – 304 с.
10. An American National Standard ASTM D1655 Standard Specification for Aviation Turbine Fuel
11. Liquid petroleum products - Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engines and heating applications - Requirements and test methods
12. T-02U. Aparat czterokulowy – instrukcja obsługi. Radom: Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji; 2011.
13. Закономерность влияния скорости скольжения на характеристики трибоконтакта посредством изменения агрегатного состояния смазочной среды / А. У. Стельмах, Д. Д. Хусейн // Наукові нотатки. – 2013. – Вип. 42. – С. 292-295. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Nn_2013_42_49.pdf.
14. Основы авиационной химмотологии. : учеб. пособие / Л.С. Яновский [и др.]. – М. : Изд-во МАТИ, [2005]. – 678 с. – ISBN 5-93271-229-5.

A. V. IAKOVLIEVA, O. O. VOVK, S. V. BOICHENKO, K. LEJDA, H. KUSZEWSKI, M. JAKUBOWSKI

STUDY OF ANTIWEAR PROPERTIES OF PLANT-MINERAL BASED FUELS FOR JET ENGINES

Antiwear properties of jet fuel, three kinds of biocomponents derived from rapeseed oil and their mixtures were investigated experimentally. Antiwear properties were estimated by the value of the scuffing load and the limiting load of scuffing applied to the friction pair working in a fuel medium. Biocomponents, mainly rapeseed oil FAME, rapeseed oil FAME modified and rapeseed oil FAEE modified via vacuum distillation were used during the study. It is found that lubricity of biocomponents is significantly higher comparing to conventional jet fuel. It is explained by the chemical composition of FAME and FAEE: highly polarity of molecules stipulate their good adsorption at the surface of friction pair. High viscosity of biocomponents due to chemical structure positively influence on their lubricity. Adding biocomponents into jet fuel results in strengthening of boundary film and thus improves antiwear properties of fuel blends. It is determined that biocomponents modified via vacuum distillation possess better lubricating ability comparing to standard biocomponent derived from rapeseed oil. Correlation between viscosity and lubricity of fuel is shown.

Keywords: jet fuel, alternative fuels, antiwear properties, biocomponents, lubricating ability, scuffing load, friction.

Яковлева Анна Валеріївна – асистент кафедри екології, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел./факс: +38 044 408 54 00, E-mail: pinchuk_anya@ukr.net.

Вовк Оксана Олексіївна – д-р. техн. наук, доцент кафедри екології, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел./факс: +38 044 408 54 00, E-mail: o.a.vovk@mail.ru.

Бойченко Сергій Валерійович – д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри екології, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел./факс: +38 044 408 54 00, E-mail: chemmotology@ukr.net.

Лейда Казимір – д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри двигунів внутрішнього згорання та транспорту, Жешувська політехніка, ал. Повстанців Варшави, 8, м. Жешув, Польща, 35-959, тел./факс: +48 17 854-31-12, E-mail: klejda@prz.edu.pl.

Кужевський Хуберт – канд. техн. наук, доцент кафедри двигунів внутрішнього згорання та транспорту, Жешувська політехніка, ал. Повстанців Варшави, 8, м. Жешув, Польща, 35-959, тел./факс: +48 17 854-31-12, E-mail: hkuszews@prz.edu.pl.

Якубовський Мирослав – канд. техн. наук, доцент кафедри двигунів внутрішнього згорання та транспорту, Жешувська політехніка, ал. Повстанців Варшави, 8, м. Жешув, Польща, 35-959, тел./факс: +48 17 854-31-12, E-mail: mjakubows@prz.edu.pl.