

УДК 665.753-028.82(045)

Трофімов І.Л., канд. техн. наук, доц., **Свирид М.М.**, канд. техн. наук, доц., **Бойченко С.В.**, докт. техн. наук, проф., **Яковлева А.В.**, канд. техн. наук, **Терновенко С.В.**

Національний авіаційний університет, Київ

просп. Космонавта Комарова, 1, 03058 Киев, Украина, e-mail: troffi@ukr.net, chemmotology@ukr.net

Дослідження протизносних властивостей сумішевих авіаційних палив на основі етилових естерів рижієвої олії

Описані дослідження відносяться до авіаційної та машинобудівної галузей. Експериментально досліджено протизносні властивості палива для повітряно-реактивних двигунів (ПРД), біокомпоненту, отриманого з рижієвої олії та їх сумішей. Встановлено, що змащувальна здатність біокомпоненту є значно вищою у порівнянні з традиційним нафтовим паливом для повітряно-реактивних двигунів. Експериментально встановлено, що додавання біокомпонентів до складу авіаційного палива призводить до зміцнення граничної плівки, зменшення коефіцієнту тертя та поліпшує протизносні властивості паливних сумішей. Обгрунтовано механізм впливу естерів жирних кислот, доданих в авіапаливо, на покращення протизносних властивостей. Встановлено, що естери жирних кислот рижієвої олії позитивно впливають на мастильну здатність нафтових палив для повітряно-реактивних двигунів та можуть використовуватися з метою покращення протизносних властивостей традиційних авіаційних палив. *Бібл. 15, рис. 2, табл. 1.*

Ключові слова: паливо для повітряно-реактивних двигунів, рижієва олія, протизносні властивості, біокомпоненти, змащувальна здатність, зношування, тертя.

УДК 665.753-028.82(045)

Трофимов И.Л., канд. техн. наук, доц., **Свирид М.М.**, канд. техн. наук, доц., **Бойченко С.В.**, докт. техн. наук, проф., **Яковлева А.В.**, канд. техн. наук, **Терновенко С.В.**

Национальный авиационный университет, Киев

просп. Космонавта Комарова, 1, 03058 Киев, Украина, e-mail: troffi@ukr.net, chemmotology@ukr.net

Исследование противоизносных свойств смесевых авиационных топлив на основе этиловых эстеров рыжикового масла

Описанные исследования относятся к авиационной и машиностроительной отраслей. Экспериментально исследованы противоизносные свойства топлива для воздушно-реактивных двигателей (ПРД), биокомпонента, полученного из рыжиков масла и их смесей. Установлено, что смазка способность биокомпонента значительно выше по сравнению с традиционным нефтяным топливом для воздушно-реактивных двигателей. Экспериментально установлено, что добавление биокомпонентов в состав авиационного топлива приводит к укреплению предельной пленки, уменьшение коэффициента трения и улучшает противоизносные свойства топливных смесей. Обоснован механизм влияния эфиров жирных кислот, добавленных в авиатопливо, на улучшение противоизносных свойств. Установлено, что эфиры жирных кислот рижиевой масла положительно влияют на смазочную способность нефтяных топлив для воздушно-реактивных двигателей и могут использоваться с целью улучшения противоизносных свойств традиционных авиационных топлив. *Библ. 15, рис. 2, табл. 1.*

Ключевые слова: топливо для воздушно-реактивных двигателей, рыжиковое масло, противоизносные свойства, биокомпоненты, смазывающая способность, изнашивание, трение.

УДК 665.753-028.82(045)

Trofimov I. L., PhD, Assoc. Prof., **Svirid M. M.**, PhD, Assoc. Prof., **Boichenko S.V.**, Dr.Sc., Prof., **Yakovlieva A.V.**, PhD, **Ternovenko S.V.**

National Aviation University, Kyiv

Kosmonavt Komarov, ave. 1, 03058 Kyiv, Ukraine, e-mail: troffi@ukr.net, chemmotology@ukr.net

Study of antiwear properties of blended jet fuels based on camelina oil ethyl esters

Presented studies are related to the spheres of aviation and machine-building. Anti-wear properties of conventional jet fuel, fatty acids ethyl esters bio-additives derived from camelina oil and their blends were investigated experimentally. It was found that lubricity of bio-additive is significantly higher comparing to conventional oil-derived jet fuel. It was found that addition of bio-additive into the composition of jet fuel leads to strengthening of boundary film, decreasing of friction coefficient and improvement of anti-wear properties of fuel blends. The mechanism of fatty acids esters influence on improvement of anti-wear properties of jet fuel was substantiated. It was shown that camelina oil fatty acids esters positively influence on lubricating ability of oil-derived jet fuels and may be used in order to improve anti-wear properties of conventional jet fuels.

Дослідження, описані у цій статті, відносяться до галузей авіапаливобезпеки та експлуатації авіаційної техніки.

Світовий досвід експлуатації авіаційної техніки накопичив величезний статистичний матеріал по відмовам бортових систем через підвищений рівень зношування деталей. Узагальнений досвід з експлуатаційної надійності паливних систем вітчизняних і закордонних літаків свідчить, що майже 30 % усіх аварій і катастроф, до 50 % відмов авіаційних двигунів, від 20 до 40 % – гідравлічних і майже 10 % відмов паливних систем відбуваються внаслідок зниження експлуатаційних властивостей палив, а термін роботи насосів і інших агрегатів скорочується по цій причині у 6–7 разів [1, 2].

Підвищення надійності, довговічності і економічності авіаційних двигунів є комплексною проблемою і її вирішення досягається на всіх стадіях конструювання, виробництва і експлуатації виробів. Важливою умовою реалізації надійності і довговічності, покладених у конструкцію двигуна, є підвищення експлуатаційних властивостей паливно-мастильних матеріалів (ПММ). Безперервне вдосконалення авіаційної та наземної техніки, забезпечення надійної, економічної і довговічної її роботи висувають високі вимоги до якості властивостей ПММ. Ресурс і надійність авіаційних двигунів визначаються сукупністю фізико-хімічних, експлуатаційних і екологічних властивостей палив та мастильних матеріалів.

Як відомо, найбільш розповсюдженою причиною погіршення рівня якості мастильних матеріалів є окислення з утворенням смол, лаків, нагару, карбонів, карбонатів і інших осадів, а також корозія нерозчинних продуктів.

Сучасні вимоги до авіаційних палив, режиму і стабільних властивостей їх роботи в різних умовах визначають необхідність підвищення трибохімічних властивостей існуючих нафтових авіаційних палив та нових сумішевих на основі біокомпонентів.

Саме тому питання відносно дослідження і поліпшення протизносних властивостей сучасних палив для автомобільних та реактивних двигунів є одним із складових при розгляді пріоритетних напрямів забезпечення надійності роботи моторної техніки і вузлів тертя. Підвищення експлуатаційних властивостей паливно-мастильних матеріалів є актуальною науково-технічною проблемою.

Постановка проблеми. Мета і задачі дослідження

Надійність паливних і гідравлічних агрегатів авіаційної техніки значною мірою залежить від працездатності прецизійних пар тертя. Підвищене зношування, руйнування і заклинювання пар тертя спричиняють відмови гідроагрегатів, з'являється необхідність планомірної заміни зношених деталей. Дефекти, що найчастіше зустрічаються: заклинювання плунжерних, пластинчатих і золотникових пар, руйнування підшипників кочення, знос підп'ятників плунжерів і так далі. Специфічність цих пар тертя потребує критичного підходу в питанні використання до них існуючих уявлень відносного впливу мастильних середовищ, механічних властивостей матеріалів, шорсткості спряжених поверхонь, швидкості їх відносного переміщення.

На сьогодні у світі велика увага приділяється альтернативним джерелам енергії, зокрема, альтернативним паливам. Але у більшості випадків, це палива для автомобілів. Враховуючи стрімкий ріст авіаційного парку та великі об'єми заправки одного літака, порівняно з автомобілем, актуальним залишається питання альтернативних палив для авіаційних двигунів. Особливої уваги потребує дослідження експлуатаційних властивостей таких палив, оскільки вони на пряму впливають на безпеку польотів. У працях [3, 4] встановлено, що альтернативні палива для повітряно-реактивних двигунів (ПРД), отримані з рослинної основи характеризуються низькими змащувальними властивостями, порівняно з авіаційними паливами нафтового походження. У той же час, є повідомлення про досить гарні змащувальні властивості естерів рослинних олій [5, 6].

Приймаючи до уваги відомі дані про змащувальні властивості естерів рослинних олій, представляє інтерес дослідження їх впливу на протизносні властивості палив для газотурбінних двигунів.

Мета цієї роботи полягала у дослідженні протизносних властивостей сумішевих рослинно-мінеральних палив для повітряно-реактивних двигунів, що містили етилові естери рижієвої олії. Відповідно, однією з задач дослідження було порівняння протизносних властивостей цих сумішевих палив з протизносними властивостями мінеральних палив для газотурбінних двигунів.

Робота виконувалася у рамках наукової теми 182ДБ18 «Підвищення експлуатаційних характеристик палив для газотурбінних двигунів, безпеки авіаційного транспорту та його екологічності».

Об'єктом дослідження було підвищення протизносних властивостей сумішевих авіаційних палив, що містили етилові естери рижієвої олії.

Предмет дослідження склали модифіковані рослинною основою авіаційні палива та вплив етилових естерів жирних кислот рижієвої олії на закономірності формування триботехнічних характеристик сумішевих авіаційних палив.

Основна частина

Як відомо, протизносні властивості палив для ПРД визначають надійність та ресурс роботи паливних агрегатів ПС, зокрема їх пар тертя [4–6]. Ці пари працюють у режимах тертя кочення, тертя ковзання та 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 [7]. 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 в'язкістю палива, що забезпечує гідродинамічний ефект розділення поверхонь тертя шаром рідини, а також наявністю у паливі поверхнево-активних речовин, що утворюють на поверхні тертя абсорбційний шар високої міцності, який розділяє поверхні тертя і тим самим зменшує коефіцієнт тертя та зношування деталей [8].

Аналіз літературних джерел [1–10] показує зацікавленість авторів в експериментальних і теоретичних розробках підвищення протизносних властивостей прецизійних пар тертя і дослідженнях впливу на протизносні властивості різних складових палив і олів. Одним з напрямів продовження терміну експлуатації і відновлення трибосопряжень є трибомодифікація поверхонь тертя за рахунок формування стійких окисних плівок, шляхом використання модифікованих чи енергетично змінених мастильних матеріалів.

Під час проведення експерименту було досліджено протизносні властивості авіаційного палива JET A-1, етилового естеру жирної кислоти рижієвої олії та сумішей JET A-1 з рослинними біокомпонентами. Марка JET A-1 відповідала вимогам ASTM D1655 [11]. Біокомпоненти були представлені сумішшю етилових естерів жирних кислот (ЕЕЖК(М)) рижієвої олії, що відповідають вимогам EN 14214 [12], спеціально модифікованими для застосування як компонента палив для ПРД. Модифікація проводилася вакуумним фракціонуванням відповідно до розробленої технології [9]. Зразки паливних сумішей містили зазначені біокомпоненти у кількості 10, 20, 30, 40 та 50 %.

Зазвичай протизносні властивості палив для ПРД оцінюються за величиною зносу характерної пари тертя. Знос в середовищі певного виду палива однієї довільної пари тертя не може характеризувати змащувальні властивості цього палива однозначно. Зміна матеріалу деталей, режимів випробувань та інших факторів може істотно вплинути на знос поверхонь тертя. У зв'язку з цим, оцінка протизносних властивостей проводиться за жорстко регламентованих умов [13].

Для дослідження стану поверхонь тертя та коефіцієнту тертя було використано комплекс для дослідження трибологічних характеристик паливно-мастильних матеріалів, розроблений авторами [13]. Для дослідження матеріалів на тертя та зношування була використана установка дослідження матеріалів на тертя та зношування при реверсивному переміщенні (рис.1), розроблена авторами [14].

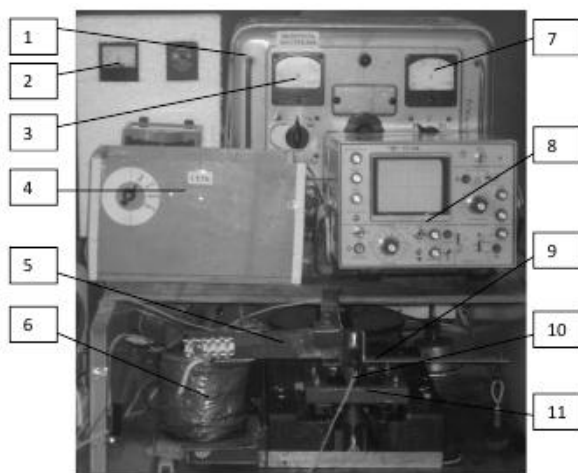


Рис.1. Установка для дослідження матеріалів на тертя та зношування при реверсивному переміщенні: 1 – незалежне джерело живлення; 2 - амперметр для реєстрації магнітного поля; 3 - амперметр для реєстрації струму в зоні тертя; 4 – переривник; 5 – магнітопровід; 6 - котушка індуктивності; 7 - джерело живлення; 8 - осцилограф для реєстрації параметрів електричного струму в магнітопроводі; 9-навантаження; 10 - вузол тертя; 11 - смінь для робочого середовища.

Дослідження проводилися за схемою тертя «палець-площина», матеріал зразків ШХ15 – сталь 45 (загартована до значення HRC 52), $\varnothing = 0,20$; $P = 5$ Н, частота = 1 Гц. Розміри пальця-зразка: діаметр – 4 мм, довжина – 25 мм. Оцінка зносу зразків виконувалась з профілографуванням плям зношування і одержанням величини об'ємного зношування за методикою [15]. Шлях тертя усіх зразків становив 8 км.

Напрацювання на машині тертя проводились в мастильних середовищах таких проб: № 1 – JET A-1; № 2 – етиловий естер жирної кислоти (ЕЕЖК) рижієвої олії; № 3 – JET A-1+ЕЕЖК20% рижієвої олії; № 4 – JET A-1+ЕЕЖК30% рижієвої олії; № 5 – JET A-1+ЕЕЖК40% рижієвої олії; № 6 – JET A-1+ЕЕЖК50% рижієвої олії. Результати експерименту представлено в таблиці.

Триботехнічні характеристики пари тертя ШХ15 – сталь 45 в різних мастильних середовищах (проби №№ 1-6) при $T = 353$ К

Проби	μ (коефіцієнт тертя)	$I_V, \text{мм}^3$
-------	--------------------------	--------------------

№ 1	0,4	0,08
№ 2	0,35	0,0044
№ 3	0,3	0,006
№ 4	0,3	0,0035
№ 5	0,35	0,0022
№ 6	0,35	0,0026

На рис.2 наведено мікрофотографії поверхонь тертя. Дослідження проводилися на комплексі для дослідження протизносних властивостей паливно-мастильних матеріалів за методикою описаною в парці [13].

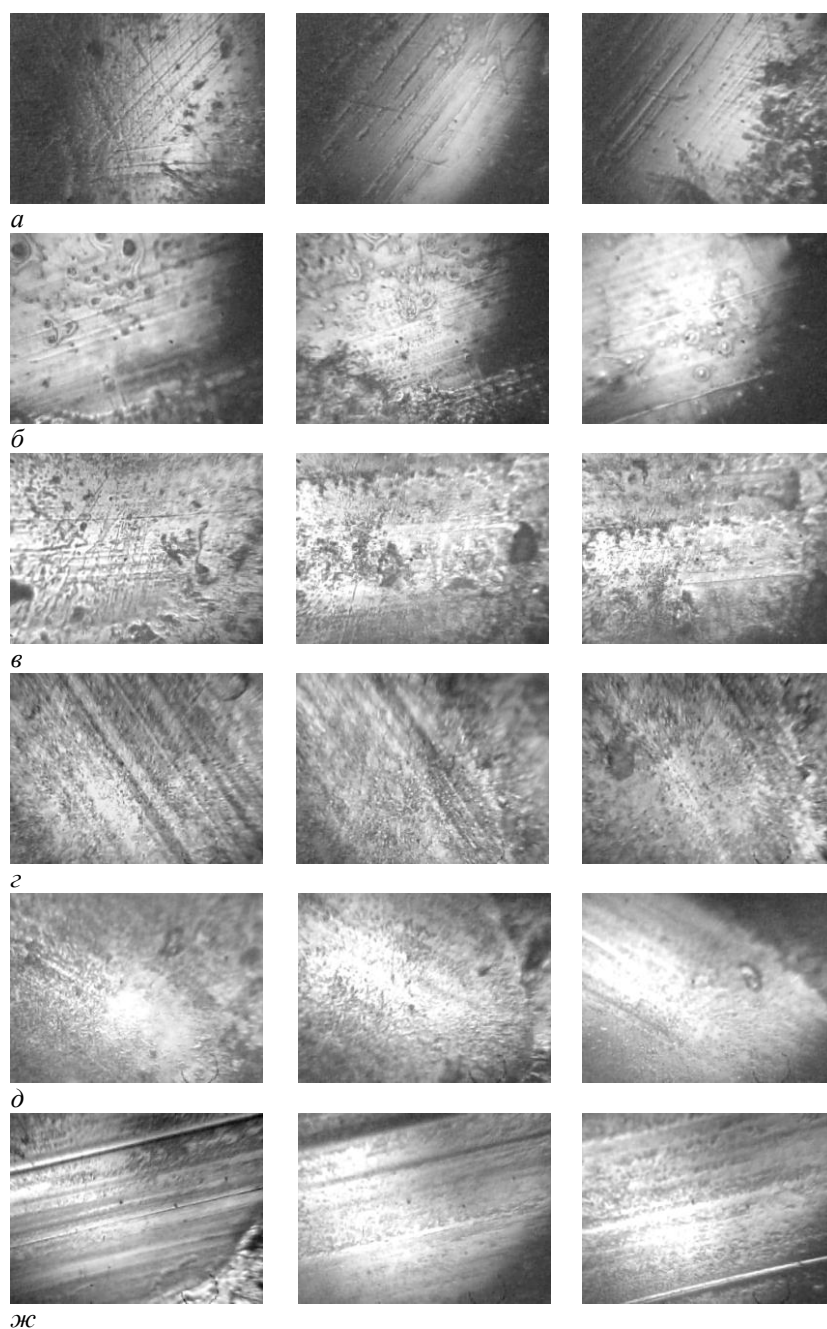


Рис. 2. Мікрофотографії поверхонь тертя (збільшено у 400 разів): *a* – напрацювання у середовищі JET A-1; *б* – напрацювання у середовищі 100% EEЖК рижієвої олії; *в* – напрацювання у середовищі JET A-1+EEЖК20% рижієвої олії; *г* – напрацювання у середовищі JET A-1+EEЖК30% рижієвої олії; *д* – напрацювання у середовищі JET A-1+EEЖК40% рижієвої олії; *ж* – напрацювання у середовищі JET A-1+EEЖК50% рижієвої олії.

Порівнюючи поверхні тертя можна стверджувати, що поверхні тертя зразків, напрацьованих в EEЖК рижієвої олії (рис. 2 *б*) є більш рівномірними, чим поверхні тертя напрацьовані в базовому JET A-1 (рис. 2 *a*), а окисні плівки є більш

тонкими та еластичнішими. Це цілком пояснює отримання меншого значення коефіцієнту тертя та величини зношування за однакового пройденого шляху тертя. Більш того, на рис. 2 б чітко видно контури окисних плівок. По мірі напрацювання у різних пропорціях сумішевих палив, плівки зразків стають значно більшими за довжиною і шириною порівняно з плівками зразка напрацьованого в ЕЕЖК рижієвої олії, а більш контрастне їх забарвлення дає змогу стверджувати, що плівки поверхні тертя зразка на рис. 2 б мають меншу товщину і є більш еластичними. На рис. 2 г, д чітко видно, що поверхні тертя стали рівномірними за усією плямою зносу, окисні плівки менші за розмірами, але зосередженні щільно по всій поверхні. Це цілком пояснює зменшення величини зношування для зразків напрацьованих у 30% та 40 % сумішах ЖЕТ А-1+ЕЕЖК. На рис. 2 ж видно, що поверхня тертя стає більш гладенькою порівняно з поверхнями тертя на рис. 2 г та рис. 2 д, але окисні плівки зміщуються, а мікронерівності збільшуються. Це цілком пояснює незначне збільшення величини зносу та коефіцієнту тертя.

Пояснити отриманий ефект зниження величини зношування у разі додавання у авіаційне паливо естерів жирних кислот рижієвої олії можна тим, що естери підвищують полярність, а отже і адсорбційну здатність ефірних молекул і зміщення електронної густини до атомів кисню карбонільної групи. Також варто зауважити той відомий факт, що міцність плівок олів на естеровій основі складає до 22000 кг/см^2 , у той час як для мінеральних олів близько 4500 кг/см^2 та синтетичних олів близько $9000 - 12000 \text{ кг/см}^2$. У цій роботі додаванням естерів до базового авіаційного палива ЖЕТ А-1, ми отримали: зміцнення масляної плівки на поверхні тертя; підвищення щеплення металевих поверхонь; присадку у виді жирних кислот, що входить до естерів.

Висновки

Дослідження зразків сумішевих палив показали, що етилові естери жирних кислот рижієвої олії виявляють здатність утворювати більш міцну граничну плівку на поверхнях тертя порівняно з паливом для повітряно-реактивних двигунів нафтового походження. Ця здатність пояснюється поверхневою активністю молекул естерів та їх високою в'язкістю. Приймаючи зразок палива ЖЕТ А-1 за контрольний, можемо зробити висновок, що використання естерів рижієвої олії позитивно впливає на мастильні властивості палива для повітряно-реактивних двигунів.

Встановлено, що естери жирних кислот рижієвої олії позитивно впливають на мастильну здатність нафтових палив для повітряно-реактивних двигунів та можуть використовуватися з метою покращення протизносних властивостей традиційних авіаційних палив.

Список літератури

1. Васильева Т.В. Прогнозирование показателей надежности авиационной техники с использованием рядов Фурье. *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*, 2016. Т. 15. С. 1476–1480. — URL: <http://e-koncept.ru/2016/96214.htm>
2. Шаабдиев С.Ш. Анализ надежности топливной системы регионального пассажирского самолета Ан-140 на начальном этапе эксплуатации. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. 2017. Вып. 3. С. 83–89. — http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pptvk_2017_3_9
3. Chuck C. J., Donnelly J. The compatibility of potential bioderived fuels with Jet A-1 aviation kerosene. *Applied Energy*. 2014. Vol. 118. pp. 83–91.
4. Hu J., Du Z., Li C., Min E. Study on the lubrication properties of biodiesel as fuel lubricity enhancers. *Fuel*. 2005. Vol. 84. pp. 1601–1606.
5. Нагорнов С.А. и др. 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.
6. A. Yakovleva, O. Vovk, S. Boichenko, K. Lejda, H. Kuszewski Physical-chemical properties of jet fuels blends with components derived from rapeseed oil // *Journal of Chemistry & Chemical Technology*. – 2017. – Vol. 10. – No. 1. – P. 485-492. doi.org/10.23939/chcht10.04.485
7. Сіренко Г.О., Мідак Л.Я., Кузишин О.В., Кириченко Л.М., Кириченко В.І. Антифрикційні властивості полікомпонентних композицій на основі хімічно модифікованої ріпакової оливи під час мащення пари ароматичний поліамід — сталь. *Полімер. журн.* 2008. Т. 30, № 4. С. 338–344.
8. Дубовкин Н.Ф., Яновский С.Л. Инженерные методы определения физико-химических и эксплуатационных свойств топлив. Казань, 2002. Казан. науч. центр, Отд. энергетики, Рос. инж. акад. Библиогр.: С.365-376.
9. Патент № 95751 Укр., МПК C10L 10/00/ Спосіб отримання компонента палив для повітряно-реактивних двигунів із сировини рослинного походження / А.В. Яковлева, С.В. Бойченко, О.О. Вовк. № u201406122. Заявл. 04.06.2014. Опубл. 12.01.2015, Бюл. № 1.
10. Братков А.А., Серегин Е.П., Горенков А.Ф. Химмотология ракетных и реактивных топлив. М. : Химия, 1987. – 304 с.
11. An American National Standard ASTM D1655 Standard Specification for Aviation Turbine Fuel. — https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=ASTM%20D1655&item_s_key=00015939
12. Liquid petroleum products — Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engines and heating applications — Requirements and test methods. — https://infostore.saiglobal.com/preview/98708742874.pdf?sku=861350_SAIG_NSAI_NSAI_2049227

13. Свирид М.М., Паращанов В.Г., Онищенко А.В. Комплекс для дослідження триботехнічних параметрів вузла тертя. *Проблеми тертя та зношування*. 2006. № 45. С. 204–209.

14. Пат. 70877 Укр., МПК G 01 N 3/56. Пристрій для дослідження поверхонь тертя / М.М.Свирид, А.П.Кудрін, І.А.Кравець, Л.Б.Приймак, В.М.Бородій. № u201115161. Заявл. 21.12.2011. Опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.

15. Трофімов І.Л., Бурикін В.В., Захарчук В.П. Дослідження протизносних властивостей палив, оброблених електричним полем, за схемою трибоконтакту «циліндр — площина». *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент : техника и технология его изготовления и применения* : Сб. науч. тр. Ин-та сверхтвёрдых материалов им. В.Н.Бакуля НАНУ. 2011. № 14. С. 602–608.

Надійшла до редакції

Відомості про авторів

1. Трофімов Ігор Леонідович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології факультету екологічної безпеки, інженерії та технологій Національного авіаційного університету. Scopus Author ID: 57194035006, ORCID:0000-0001-5539-1166. Дом. адреса: 08320, с. Велика Олександрівка, Бориспільський район, Київська обл., вул. Ватутіна 32. Роб. адреса: 03058, Київ, просп. Космонавта Комарова, 1. Тел.: 097-238-28-89, e-mail: troffi@ukr.net.

2. Свирид Михайло Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри літальних апаратів аерокосмічного факультету Національного авіаційного університету. ORCID: ID ORCID: 0000-0003-1300-0192. Дом. адреса: 03044, м. Київ, вул. Ніжинська 45, кв. 3. Роб. адреса: 03058, Київ, просп. Космонавта Комарова, 1. Тел.: 097-725-38-79., e-mail: svirid_mn@ukr.net.

3. Бойченко Сергій Валерійович, доктор технічних наук, професор, декан факультету екологічної безпеки, інженерії та технологій Національного авіаційного університету. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1196-3852>. Дом. адреса: 03118, Україна, м. Київ, вул. Кустанайська, буд. 2, кв. 27. Роб. адреса: 03058, Київ, просп. Космонавта Комарова, 1. Тел.: 093-457-01-13., e-mail: chemmotology@ukr.net.

4. Яковлева Анна Валерівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри екології факультету екологічної безпеки, інженерії та технологій Національного авіаційного університету. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7618-7129>. Дом. адреса: 02095, м. Київ, вул. Княжий Затон, 5, кв. 59. Роб. адреса: 03058, Київ, просп. Космонавта Комарова, 1. Тел.: 063-630-89-59, e-mail: anna.yakovlieva@nau.edu.ua.

5. Терновенко Сергій Володимирович, студент 4-го курсу кафедри екології факультету екологічної безпеки, інженерії та технологій Національного авіаційного університету. Дом. адреса: м. Київ, вул. Митрополита Андрія Шептицького 3, кв. 30. Роб. адреса: 03058, Київ, просп. Космонавта Комарова, 1. Тел.: 096-504-24-75, e-mail: sergeyka929@gmail.com.