

УДК 66.02:665.753+665.7.038(045)  
DOI DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/25>

**Циганенко В.П.**

<https://orcid.org/0009-0004-8707-4447>

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

**Трофімов І.Л.**

<https://orcid.org/0000-0001-5539-1166>

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

**Рогальський С.П.**

<https://orcid.org/0000-0002-5200-5247>

Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії імені В.П. Кухаря  
Національної академії наук України

## ВПЛИВ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХІМІЧНИХ ДОБАВОК НА ПРОТИЗНОШУВАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ДИЗЕЛЬНИХ ПАЛИВ І МОТОРНИХ ОЛИВ

У статті обговорюється питання протизношувальних властивостей дизельних палив та мінеральної моторної оливи. Основною метою роботи були експериментальні дослідження щодо впливу іонних рідин на зміну протизношувальних властивостей традиційних дизельних палив. Також мета полягала у дослідженні впливу іонних рідин на протизношувальні властивості мінеральної моторної оливи. Було проведено експериментальні дослідження, різними методами, щодо зміни протизношувальних властивостей традиційних дизельних палив шляхом додавання іонних рідин. Результати досліджень вказують на найбільшу ефективність імідазолієвих іонних рідин, зокрема  $C_{12}C_{11}IM$ -ДБС, для покращення протизношувальних властивостей дизельних палив. Плівка утворюється завдяки електростатичній взаємодії полярних груп іонних рідин з поверхнею металу, а також внаслідок міжмолекулярного впорядкування довгих алкільних ланцюгів.

Водночас результати проведених досліджень показали, що більшість зразків дизельних палив, модифікованих іонними рідинами мають гірші протизношувальні властивості порівняно з традиційним дизельним паливом. Це може бути зумовлено як низькою концентрацією іонних рідин у дизельному паливі, так і недостатньою взаємною сумісністю окремих сполук з вуглеводневим паливом. Одержані результати досліджень мають позитивний науковий ефект, оскільки дозволили виявити зразок –  $C_{12}C_{11}IM$ -ДБС, який проявив найкращі показники серед досліджених іонних рідин і може стати основою для розробки ефективних протизношувальних присадок нового покоління. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію концентрації даної сполуки, модифікацію її структури та оцінку впливу температурних і навантажувальних факторів на формування захисної плівки у зоні тертя.

Дослідження показали, що додавання іонних рідин до дизельних палив впливає на характер тертя та інтенсивність зношування поверхонь металу. Одержані результати свідчать про необхідність подальшої оптимізації складу і концентрації іонних рідин для їх використання у дизельному паливі.

При цьому, проведені дослідження показали, що модифікація мінеральної моторної оливи  $M10G2k$  іонними рідинами впливає на інтенсивність зношування сталі ШХ15. Найменш ефективним виявилась іонна рідина  $C_8S_8Rug$ -ДБС, а найбільш ефективним виявилось додавання  $MVT-C_{12}$ , яка утворює рівномірну та стійку трибоплівку. Загалом, присадки з вираженою хемосорбцією та довгими алкільними ланцюгами забезпечують найбільш стійкий протизношувальний ефект.

**Ключові слова:** протизношувальні властивості, дизельне паливо, моторна олива, іонні рідини, тертя, зношування.

**Постановка проблеми.** Під час експлуатації дизельної техніки можливі відмови окремих систем через збільшення зношення компонентів. Загальний досвід щодо надійності паливних систем як вітчизняних, так і закордонних дизельних

двигунів показує, що близько 50% відмов відбуваються через погіршення експлуатаційних властивостей дизельних палив [1].

Покращення довговічності, надійності та економічності дизельних двигунів є складним



завданням. Однією з ключових умов забезпечення надійності та довговічності є вдосконалення експлуатаційних властивостей дизельного палива.

Протизношувальні властивості палив для дизельних двигунів впливають на їхню надійність та довговічність, особливо стосовно пар тертя. Ці пари тертя функціонують у режимах кочіння, ковзання та комбінованого тертя за різноманітних навантажень, температур, тиску та швидкостей руху в умовах рідкого і граничного змащування. Властивості змащення пального мають значущу роль і залежать від їх хімічного складу, в'язкості, термоокислювальної стабільності, наявності механічних домішок і поверхнево-активних речовин [2].

Моделювання умов експлуатації двигунів внутрішнього згоряння є важливим етапом у трибологічних дослідженнях матеріалів, що використовуються в їхній конструкції. Двигуни, які реалізовані за традиційною схемою, мають циліндр та поршень, який виконує зворотно-поступальні рухи під впливом тиску газів. Для відтворення була розроблена модель, яка імітує принцип роботи поршневої групи шляхом формування вузла тертя «палець – площа». Зазначена схема дозволяє відтворити основні закономірності контактної взаємодії, забезпечити повторюваність досліду, провести точні вимірювання зношування поверхонь та ін.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні існує досвід використання екологічно безпечних іонних рідин на базі рицинолевої кислоти в ролі емульгаторів для створення стабільних мікроемульсій дизельного пального з етанолом. Ці системи виявилися стабільними і не розшарувалися навіть після року зберігання. Фізико-хімічні властивості мікроемульсій відповідали стандарту ASTM D975: густина, в'язкість і температурні характеристики були подібні чистому дизелю, а також спостерігалось покращення температури спалаху, температури застигання, зниження кислотного числа. Використання іонних рідин, на основі касторової олії, дозволило отримати стабільні та екологічні паливні суміші.

Досвід використання діамонійних іонних рідин як емульгаторів для створення стабільних мікроемульсій дизельного палива, відпрацьованої кулінарної олії та етанолу показує подібні результати. Характеристики отриманого сумішевого пального відповідали стандартам ASTM D975 [3], зокрема, за показниками цетанового числа, теплоти згорання, в'язкості, густини та температури спалаху.

Розроблені паливні зразки потребують меншої кількості повітря для згорання в порівнянні з чистим дизельним паливом, що призводить до зменшення викидів забруднюючих речовин. Мікроемульсії демонстрували високу стабільність на протязі тривалого часу [4, 5].

Іншим перспективним напрямом є застосування іонних рідин  $[C_{10}H_{19}N_2]^+[C_2F_6NO_4S_2]^-$ . Вони формують захисний шар на поверхні сталі типу С. Експерименти довели їх високу антикорозійну ефективність на сталі, яка становить близько 99 %, завдяки сильним адсорбційним властивостям та антиоксидантній активності [6].

Металоорганічні каркаси на основі молібдену використовували у якості додатків до синтетичної оливи ПАО10, при цьому іонна рідина (тетраметилдодецилдіізононілфосфат) була використана як диспергатор. Іонна рідина має диспергуючу роль та більше збагачує змащувальні фосфати на межі розділу. Зазначені оксиди та фосфати разом утворюють трибоплівку, що має низьку силу зсуву і захист тертя на межі розділу [7].

На основі попередніх результатів можна прогнозувати, що додавання іонних рідин до складу дизельного палива сприятиме покращенню його змащувальних характеристик і протизношувальних властивостей. Такий підхід є актуальним у контексті сучасних екологічних вимог. Однак вилучення сірковмісних сполук стало причиною погіршення його протизношувальних характеристик і збільшення ризику пошкодження паливної системи. У такому разі іонні рідини розглядаються як перспективні присадки, здатні компенсувати втрату змащувальної здатності малосірчаного дизельного палива.

**Постановка завдання.** Метою роботи є експериментальні дослідження щодо впливу іонних рідин та органічних сполук на зміну протизношувальних властивостей традиційних дизельних палив та мінеральної моторної оливи. Експериментальні дослідження було проведено різними методами для оцінки зміни протизношувальних властивостей шляхом додавання іонних рідин.

**Виклад основного матеріалу.** Протизношувальні властивості дизельного палива відіграють ключову роль у забезпеченні надійної та довговічної роботи дизельних двигунів. Недостатня змащувальна здатність палива може призвести до підвищеного зносу компонентів паливної системи, таких як паливні насоси та форсунки, що, у свою чергу, збільшує витрати на обслуговування та ремонт.

У дослідженнях використовували дизельне паливо нафтового походження марки «Л», придбане на АЗС „ОККО“. Якість дизельного палива відповідає вимогам ДСТУ 7688:2015 Паливо дизельне Євро. Технічні умови [8]. Також дослідження проводилися з мінеральною моторною оливою М10Г2к, яка в товарному виді не містить пакету присадок.

Для модифікації дизельного палива були розроблені нові гетероциклічні сполуки та іонні рідини, які були використані у проведених дослідженнях:

- 2-додецилмеркаптобензотіазол (МВТ-С<sub>12</sub>);
- N-додеканоїлморфолін (Mor-LA);
- N-децилоксикарбонілметилморфолін (Mor-CH<sub>2</sub>COOC<sub>10</sub>);
- 1-додецил-3-метилімідазолій додецилбензолсульфонат (C<sub>12</sub>C<sub>1</sub>ІМ-ДБС);
- 1,3-діоктилімідазолій додецилбензолсульфонат (C<sub>8</sub>C<sub>8</sub>ІМ-ДБС);
- 1-додецилпіридиній додецилбензолсульфонат (PyrC<sub>12</sub>-ДБС).

Синтезовано нові модифікуючі добавки до мастильних матеріалів, які належать до класу онієвих солей. Завдяки низьким температурам топлення такі сполуки мають популярну назву «іонні рідини». Вони включають об'ємні органічні катіони 1-додецилпіридинію, 1-додецил-3-метилімідазолію, 1,3-діалкілімідазолію та аніон додецилбензолсульфонат. Присутність у складі іонних рідин гетероциклічних катіонів з довгими вуглеводневими замісниками надає їм широкого спектру антимікробної активності, а також високої адсорбційної активності відносно металевих поверхонь. Крім того, сполуки можуть проявляти антиоксидантні властивості. Аніон додецилбензолсульфонат надає іонним рідинам гідрофобних властивостей, а також розчинності в органічних розчинниках (в тому числі вуглеводневих). Серед досліджених зразків до іонних рідин належать сполуки C<sub>12</sub>C<sub>1</sub>ІМ-ДБС, C<sub>8</sub>C<sub>8</sub>ІМ-ДБС та PyrC<sub>12</sub>-ДБС, а МВТ-С<sub>12</sub>, Mor-LA та Mor-CH<sub>2</sub>COOC<sub>10</sub> належать до органічних гетероциклічних сполук.

МВТ-С<sub>12</sub> – це органічна сполука, яка має бензотіазольне кільце (ароматичний цикл із атомами сірки та азоту) з тіольною (–SH) функціональною групою та довгим додециловим алкільним ланцюгом (C<sub>12</sub>). Бензотіазольне кільце з атомами S і N забезпечує полярність і здатність до адсорбції на металічних поверхнях. Алкільний ланцюг надає гідрофобність і добре розчинна у вуглеводневих середовищах, зокрема у дизельному паливі.

Mor-LA – це органічна сполука, що має у своїй структурі морфолінове кільце (амін + ефірна

функція) і довгий алкільний ланцюг (C<sub>12</sub>), що робить молекулу амфифільною з частково полярною та частково неполярною частинами. Mor-LA добре розчинна у неполярних розчинниках завдяки алкільному ланцюгу; з помірною полярністю через морфолінове кільце.

N-децилоксикарбонілметилморфолін (Mor-CH<sub>2</sub>COOC<sub>10</sub>) – це органічна сполука, яка містить морфолінове кільце з приєднаним метиленовим фрагментом, що через карбонільну групу зв'язаний з довгим C<sub>10</sub>-децильним алкільним радикалом. Дна сполука може взаємодіяти як із полярними, так і з неполярними середовищами.

1-додецил-3-метилімідазолій додецилбензолсульфонат (C<sub>12</sub>C<sub>1</sub>ІМ-ДБС) є гідрофобною іонною рідиною.

Для дослідження стану поверхонь тертя і коефіцієнта тертя використали комплекс для аналізу трибологічних характеристик паливно-мастильних матеріалів. Експериментальні дослідження проводилися за допомогою приладу, призначеного для вивчення поведінки поверхонь тертя в умовах постійних рівномірних і нерівномірних магнітних полів. У конструкцію входять два магніти, полюси яких можуть змінювати положення паралельно до диска з контртілом і робочим середовищем [9, 10]. Це забезпечує формування постійного рівномірного або нерівномірного магнітного поля, що впливає на робоче середовище.

Експериментальні дослідження були проведені за схемою тертя «палець–площина» матеріал зразків ШХ15 – сталь Ст45 (загартована до значення HRC 58),  $\vartheta = 0,2$  м/с; P = 5 Н,  $\nu = 1$  Гц. Розміри зразка: d = 4 мм, L = 33,5 мм.

Для проведення досліджень використовували традиційне дизельне паливо (ДП) і дизельне паливо модифіковане сполуками (ДП, ДП+МВТ-С<sub>12</sub>, ДП+Mor-LA, ДП+Mor-CH<sub>2</sub>COOC<sub>10</sub>, ДП+C<sub>12</sub>C<sub>1</sub>ІМ-ДБС). Також, у якості робочої рідини застосовували мінеральну моторну оливу М10Г2к, яку модифікували додатково присадками МВТ-С<sub>12</sub>, C<sub>12</sub>C<sub>1</sub>ІМ-ДБС, PyrC<sub>12</sub>-ДБС та C<sub>8</sub>C<sub>8</sub>Pyr-ДБС. Модифікація палива змінювала його змащувальні та протизношувальні властивості, що дозволило оцінити вплив різних композицій на інтенсивність зношування сталі. Ступінь зношування зразків визначався шляхом профілографування площ зношування і розрахунку величини зношування згідно з методикою [11].

Для проведення дослідження матеріалів на тертя був використаний пристрій, описаний у [12]. Головна мета експерименту полягала у визначенні інтенсивності зношування пари тертя та триболо-

гічних характеристик загартованої сталі ШХ15 під впливом середовища дизельного палива, що було модифіковане іонними рідинами різного хімічного складу і структури.

Іонні рідини були розчинені в стандартному дизельному паливі з об'ємом кожного досліджуваного зразка в 50 мл. У таблиці 1 представлено склад і умовні позначення досліджених зразків дизельного палива.

Напрацювання на машині тертя проводились у середовищах згідно з даними таблиці 1.

Таблиця 1

**Склад зразків дизельного палива, модифікованого іонними рідинами**

№	Умовне позначення	Склад зразка
1	ДП	Дизельне паливо (100 %)
2	ДП+С <sub>12</sub> С <sub>1</sub> ІМ-ДБС	Дизельне паливо (95 %) + 1-додецил-3-метил-імідазолій додецилбензолсульфонат (5 %)
3	ДП+МВТ-С <sub>12</sub>	Дизельне паливо (95 %) + 2-додецилмеркаптобензотіазол (5 %)
4	ДП+Mor-LA	Дизельне паливо (95 %) + N-додеканоїлморфолін (5 %)
5	ДП+Mor-CH <sub>2</sub> COOC <sub>10</sub>	Дизельне паливо (95 %) + N-децилоксикарбонілметилморфолін (5 %)

Для забезпечення точності вимірювань та об'єктивності отриманих результатів інтенсивність зносу пар тертя визначали в двох різних точках на поверхнях досліджуваних пар тертя. У таблиці 2 наведено результати вимірювань інтенсивності зношування пар тертя в точці 1 –

I<sub>1</sub>, в точці 2 – I<sub>2</sub>, а також середнє значення I<sub>ср</sub> для двох вимірювань.

Таблиця 2

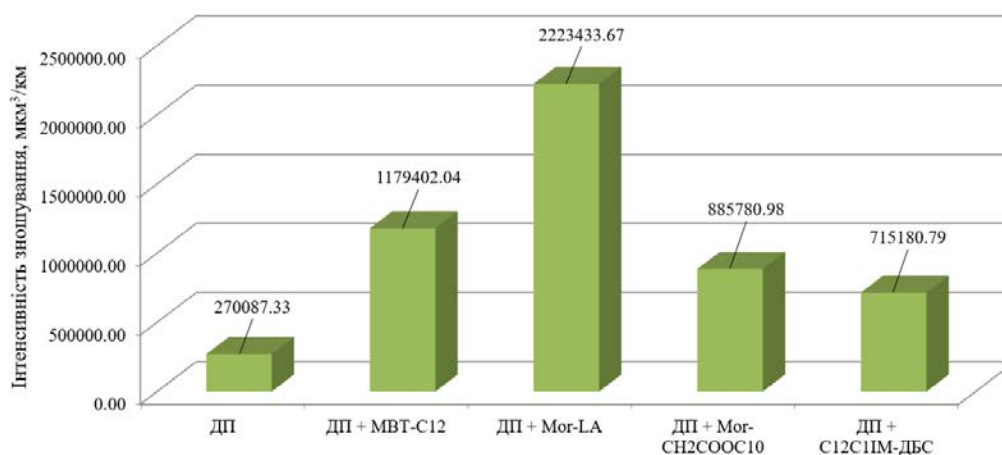
**Результати оцінки інтенсивності зношування досліджуваних пар тертя, у середовищах зразків дизельних палив**

Зразок	I <sub>1</sub> , мкм <sup>3</sup> /км	I <sub>2</sub> , мкм <sup>3</sup> /км	I <sub>ср</sub> , мкм <sup>3</sup> /км
ДП	221569,01	318605,64	270087,33
ДП + С <sub>12</sub> С <sub>1</sub> ІМ-ДБС	531212,42	899149,16	715180,79
ДП + МВТ-С <sub>12</sub>	920860,59	1437943,49	1179402,04
ДП + Mor-LA	2520400,33	1926467,00	2223433,67
ДП + Mor-CH <sub>2</sub> COOC <sub>10</sub>	670289,59	1101272,37	885780,98

На рис. 1 наведено узагальнені результати дослідження інтенсивності зношування сталі ШХ15 у середовищі досліджуваних зразків дизельних палив, модифікованих іонними рідинами по загартованій сталі Ст45 (твердість HRC 58).

Згідно з одержаними результатами, пара тертя у середовищі дизельного палива продемонструвала найнижчу інтенсивність зношування. У той же час пари тертя, які працювали у середовищах дизельного палива, модифікованого дадатками, мали вищу інтенсивність зношування. Найбільшу інтенсивність зношування показала пара тертя у середовищі дизельного палива, модифікованого N-додеканоїлморфоліном (Mor-LA). Аналіз результатів вказує на те, що пара тертя у середовищі традиційного дизельного палива, модифікованого С<sub>12</sub>С<sub>1</sub>ІМ-ДБС, продемонструвала вищу інтенсивність зношування поверхні за дизельне паливо.

Дизельне паливо, модифіковане С<sub>12</sub>С<sub>1</sub>ІМ-ДБС, знаходиться на поверхнях тертя, забезпечуючи



**Рис. 1. Інтенсивність зношування пари тертя (I, мкм<sup>3</sup>/км) в середовищі дизельного палива, модифікованого іонними рідинами: ДП, ДП + МВТ-С<sub>12</sub>, ДП + Mor-LA, ДП + Mor-CH<sub>2</sub>COOC<sub>10</sub>, ДП + С<sub>12</sub>С<sub>1</sub>ІМ-ДБС**

адекватний рівень їх змочування. Така поведінка обумовлена молекулярною будовою 1-додецил-3-метил-імідазолій додецилбензосульфону. Зокрема, цьому сприяє поєднання імідазолієвого кільця з метильною групою і  $C_{12}$ -алкільним ланцюгом з одного боку, а також ароматичного кільця із сульфонатною групою і  $C_{12}$ -ланцюгом з іншого. Завдяки цьому сполука має гідрофобні властивості. Зазначена іонна рідина демонструє поверхнево-активні властивості, утворюючи міцелярні структури, які формують адсорбційні плівки на поверхні металів, сприяючи протизношувальному ефекту. При цьому помітно, що шар змащувальної плівки на поверхні тертя виявляється майже вдвічі тоншим у порівнянні з дизельним паливом, до якого не додавали іонних рідин. Таким чином, можна зробити висновок, що саме тонша змащувальна плівка є однією з причин підвищеного рівня зношення пар тертя під час їх дослідження.

З узагальнених результатів видно, що пара тертя, досліджена у середовищі традиційного дизельного палива, модифікованого  $\text{Mog-CH}_2\text{COOC}_{10}$  продемонструвала схожу інтенсивність зношення поверхні, яка становила  $I=885780,98 \text{ мкм}^3/\text{км}$  порівняно з попереднім зразком. Трибологічний аналіз параметрів поверхні вказує на утворення тонкої проміжної поверхневої плівки.

У дослідженнях трибологічних властивостей середовища дизельного палива, модифікованого 2-додецил-меркапто-бензотіазолом ( $\text{МВТ-С}_{12}$ ), встановлено, що третя пара продемонструвала порівняно вищу інтенсивність зношення поверхні, яка становила  $I=1179402,04 \text{ мкм}^3/\text{км}$ , що аналогічно попереднім зразкам.

Плівка, утворена в процесі експлуатації на поверхні зразка сталі ШХ15, має виразні відмінності від попередніх досліджуваних зразків. На поверхнях пар тертя, описаних раніше, спостерігалася сітчаста структура, тоді як на цьому зразку виявлено зміни металевої поверхні, які характеризуються шаруватою, лускоподібною структурою. Крім того, за досягнення певної товщини поверхневої плівки було зафіксовано її відлущування.

На основі проведених спостережень можна зробити висновок, що під час взаємодії середовища палива з поверхнями тертя молекули 2-додецил-меркапто-бензотіазолу здатні проникати у поверхневий шар металу, утворюючи нові хімічні сполуки. Цей ефект, ймовірно, зумовлено наявністю бензотіазольного кільця в радикалі. Низька полярність цього кільця дозволяє утворення лише поверхневої плівки на металі, яка недостатньо

ефективно змащує поверхню та не формується у стійку плівку. Як наслідок, спостерігається відшаровування цієї плівки, що призводить до більш інтенсивного зношення поверхонь тертя порівняно з іншими зразками. Це також підтверджується широким слідом доріжки, що є ознакою посиленого зношення. Трибологічні випробування у середовищі дизельного палива, модифікованого 2-N-додеканоїлморфоліном ( $\text{Mog-LA}$ ), показали найвищу інтенсивність зношення поверхонь тертя з показником  $I=2223433,67 \text{ мкм}^3/\text{км}$ . У порівнянні з традиційним дизельним паливом інтенсивність зношення була у 8,2 раза вищою. При порівнянні зразків дизельних палив, модифікованих іншими додатками, вона перевищувала показники у 1,9–3,1 раза.

Існує також залежність між інтенсивністю зношення контактуючих поверхонь тертя і молекулярною масою іонних рідин. Результати цих досліджень представлені у таблиці 3.

З аналізу отриманих даних виходить, що на процес зношення впливає не тільки структура радикалів іонних рідин (наприклад, присутність ароматичного кільця або атомів кисню), але й довжина молекули. Довший ланцюг молекули забезпечує формування товстішої захисної плівки на поверхні металу, що підтверджують результати мікрофотографічного аналізу.

Друга частина досліджень проводилася у різних середовищах (моторна олива та модифікована моторна олива з додатками) для визначення інтенсивності зношення. Оскільки всі зразки працювали за однакового часу тертя, інтенсивність зношення визначалася за площею плями контакту. Інтенсивність зношення порівнювали між моторною оливою та модифікованою моторною оливою з додатками.

Для оцінки впливу модифікованих моторних олив на інтенсивність зношення було досліджено п'ять зразків різних комбінацій оливи з іонними рідинами. Синім кольором позначено зношення зразка пальця, оранжевим – зношення контрзразка. На рис. 2 представлена діаграма інтенсивності зношення зразків ШХ15 в середовищах чистої оливи та з домішками.

Одержані результати представлені у таблиці 4.

Для чистої мінеральної моторної оливи  $\text{M10G2k}$  спостерігається найбільша розбіжність інтенсивності зношення у двох дослідженнях. Це явище є закономірним для олив, що не містять хімічно активних модифікуючих компонентів. У присутності додатків такі розбіжності зменшуються, а поведінка системи стає більш передбачуваною.

$C_{12}C_1IM$ -ДБС є іонною рідиною на основі катіона 1-додецил-3-метилімідазолію. Імідазолієві катіони мають більш локалізований позитивний заряд і часто демонструють більшу полярність і хімічну активність на поверхні металу. Суміш з  $C_{12}C_1IM$ -ДБС забезпечує протизношувальний ефект завдяки схильності до сильніших поверхневих взаємодій та утворенню більш міцної трибоплівки, що підтверджується одною з найнижчою інтенсивністю зношування.

$C_8C_8IM$ -ДБС є іонною рідиною на основі катіона 1,3-діоктилімідазолію й містить два довгі алкільні ланцюги ( $C_8-C_8$ ), що підвищує гідрофобність катіона та сприяє утворенню досить

еластичної адсорбційної плівки на поверхні металу. Результати досліджень вказують на найвищу інтенсивність зношування з досліджених додатків. Ймовірно, що комплекс гідрофобних та адсорбційних факторів призвів до утворення нестабільної і неоднорідної трибоплівки.

$PyrC_{12}$ -ДБС з моторною оливою утворює адсорбційний шар, що зменшує безпосередній контакт метал-метал і підвищує граничне навантаження, але він переважно фізичний і відносно чутливий до температурних коливань. Зниження інтенсивності зношування після введення  $PyrC_{12}$ -ДБС пояснюється ефективною адсорбцією піридинієвих катіонів та утворенням захисної плівки.

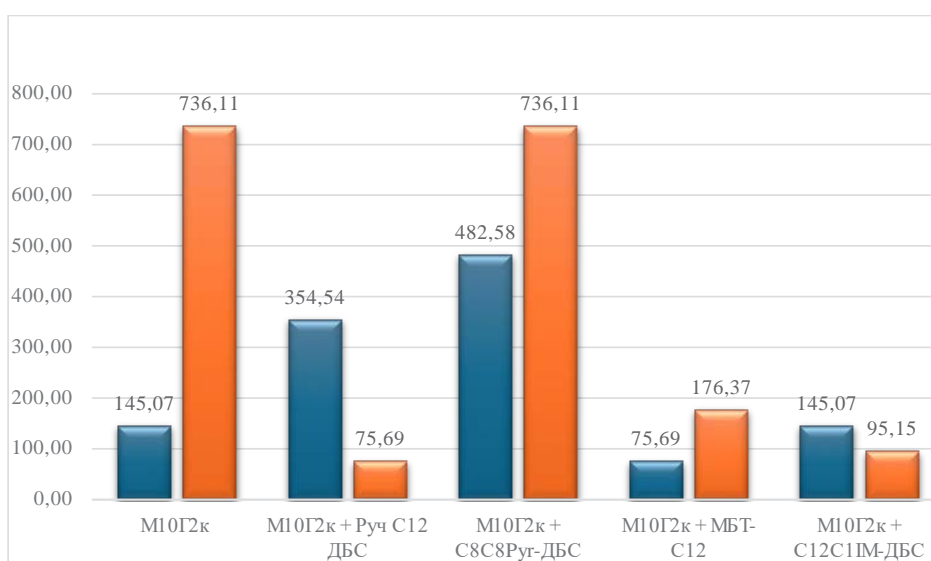


Рис. 2. Інтенсивність зношування в  $mkm^3$  у моторній оливі та модифікованій моторній оливі

Таблиця 3

Залежність інтенсивності зношування пар тертя від молекулярної маси іонних рідин

Додатки	ДП + $C_{12}C_1IM$ -ДБС	ДП + Mor- $CH_2COOC_{10}$	ДП + МБТ- $C_{12}$	ДП + Mor-LA
Молекулярна маса, г/моль	579	285,4	335,5	269,4
I, $mkm^3$	715180,79	885780,98	1179402,04	2223433,67

Таблиця 4

Дані вимірювання плям зношування і розрахунків

Тип оливи	№	Діаметр кола, мкм	Всегм, $mkm^3$	I, $mkm^3/km$
M10Г2к	1	384,6	413,63	145,07
	2	576,9	2098,79	736,11
M10Г2к + $C_{12}C_1IM$ -ДБС	1	384,6	413,63	145,07
	2	346,14	271,29	95,15
M10Г2к + $C_8C_8IM$ -ДБС	1	519,21	1375,93	482,58
	2	576,9	2098,79	736,11
M10Г2к + $PyrC_{12}$ -ДБС	1	480,75	1010,87	354,54
	2	326,91	215,81	75,69
M10Г2к + МБТ- $C_{12}$	1	326,91	215,81	75,69
	2	403,83	502,86	176,37

МВТ-С<sub>12</sub> має будову, що добре підходить для роботи в умовах граничного змащування: меркаптогрупа -SH та атоми S і N у бензотгіазольному кільці забезпечують сильну адсорбцію й часткову хемосорбцію на поверхні металу. Одержані результати вказують, що МВТ-С<sub>12</sub> утворює рівномірну і міцну трибоплівку, що підтверджує ефективність додатка з однією з найнижчих інтенсивностей зношування у проведених дослідженнях.

Для комплексного дослідження протизношувальних властивостей дизельних палив, модифікованих додатками, було проведено додаткові випробування. Експерименти проводилися з використанням машини тертя «Micron-tribo», а поверхні оцінювалися за допомогою безконтактних інтерференційних 3D профілометрів «Micron-alpha» та «Micron-beta» [13].

Для оцінки поверхонь використовували інтерференційні 3D профілометри. У межах дослідження було проаналізовано протизношувальні властивості дизельного палива, модифікованого 1-додецил-3-метил-імідазолій додецилбензосульфوناتом. Особливістю експерименту є зміна умов і характеру руху поверхонь металу – було вивчено ступінь зношування поверхні металу під час руху за схемою «pin-on-disk».

На рис. 3 представлено результати досліджень щодо зношування пар тертя у середовищах традиційного дизельного палива і дизельного палива, модифікованого 1-додецил-3-метил-імідазолій додецилбензосульфوناتом, а саме: за об'ємом зношування (V, мкм<sup>3</sup>).

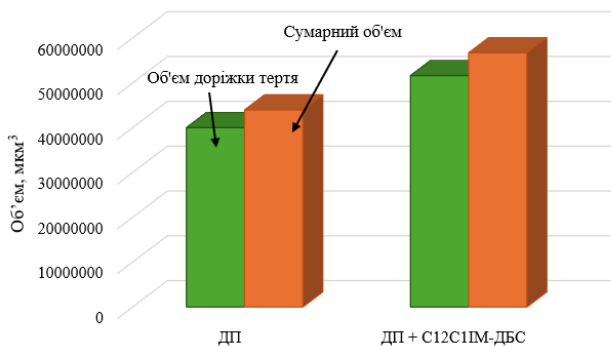


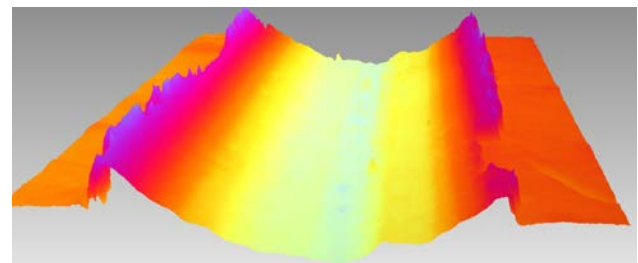
Рис. 3. Об'єм зношування пари тертя (V, мкм<sup>3</sup>) в середовищі ДП і ДП + С<sub>12</sub>С<sub>1</sub>ІМ-ДБС

Результати випробувань пар тертя за схемами «pin-on-disk» та «палець-площина» демонструють чітку кореляцію між собою. Під час тестування традиційного дизельного палива виявлено нижчий рівень зношування: об'єм утвореної доріжки тертя склав 40022968 мкм<sup>3</sup>, а сумарний об'єм зношування – 51632934 мкм<sup>3</sup>. Для пар, які працювали

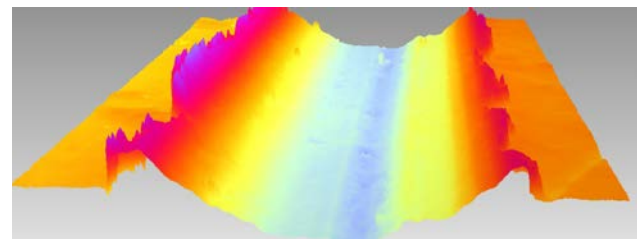
у середовищі дизельного палива, модифікованого С<sub>12</sub>С<sub>1</sub>ІМ-ДБС ці показники дещо вищі: об'єм доріжки тертя – 43974356 мкм<sup>3</sup>, сумарний об'єм зношування – 56718230 мкм<sup>3</sup>. В обох випадках коефіцієнт тертя склав 0,15.

На рис. 4а і рис. 4б наведено мікротопографії поверхонь тертя, за результатами проведених досліджень пар тертя у відповідних середовищах.

Одержані мікротопографії свідчать про більший об'єм зношування поверхні металу, що досліджений у середовищі дизельного палива, модифікованого С<sub>12</sub>С<sub>1</sub>ІМ-ДБС у порівнянні з традиційним дизельним паливом. Це підтверджує одержані результати об'єму зношування пар тертя для обох дослідження.



а



б

Рис. 4. Мікротопографії поверхонь тертя металу: а – дизельне паливо, б – дизельне паливо + С<sub>12</sub>С<sub>1</sub>ІМ-ДБС

**Висновки.** Результати трибологічних досліджень свідчать про значний вплив іонних рідин на інтенсивність зношування металевих поверхонь у середовищі дизельних палив. Виявлено, що ефективність модифікації залежить не лише від хімічної структури іонних рідин, але також і від їхньої молекулярної маси та довжини вуглеводневого радикала.

Зокрема, найнижчі рівні інтенсивності зношування досягнуті для дизельного палива, модифікованого 1-додецил-3-метилімідазолій додецилбензосульфوناتом (С<sub>12</sub>С<sub>1</sub>ІМ-ДБС), який показав зниження інтенсивності зношування на 17–35 % порівняно з іншими дослідженими видами палива. Такий результат пов'язується зі здатністю

молекули формувати щільну адсорбційну плівку завдяки довгому алкільному ланцюгу.

При цьому, модифікація дизельного палива N-додеканоїлморфоліном сприяла підвищеному зношуванню порівняно з традиційним дизельним паливом. Це, імовірно, пов'язане із присутністю атомів кисню в молекулі, які можуть викликати руйнування оксидного шару поверхні й появу локальної корозії під час тертя. Аналогічна тенденція зафіксована для палива, модифікованого MBT-C<sub>12</sub>, де спостерігалось підвищене мікрозношування через слабке адсорбційне зв'язування з поверхнею металу.

Результати проведених досліджень за схемами «палець-площина» та «pin-on-disk» показали подібну тенденцію: зразок дизельного палива + C<sub>12</sub>C<sub>1</sub>ІМ-ДБС продемонстрував найнижчі втрати матеріалу у порівнянні з іншими іонними рідинами. Це свідчить про стабільність утвореної граничної плівки, яка ефективно розділяє контактуючі поверхні. Мікротопографічний аналіз виявив, що поверхня після роботи в середовищі модифікованого дизельного палива має рівномірний рельєф, що свідчить про м'який режим тертя.

Встановлена кореляція між молекулярною масою іонних рідин та інтенсивністю зношування дозволяє зробити висновок, що довший вуглеводневий радикал позитивно впливає на протизношувальні властивості дизельних палив. Подовжені радикали покращують здатність молекул іонних рідин до орієнтації та адсорбційної взаємодії з поверхнею металу, що сприяє утворенню стійкої гідрофобної захисної плівки.

Отже, результати проведених досліджень демонструють найбільшу ефективність імідазолієвих іонних рідин, зокрема C<sub>12</sub>C<sub>1</sub>ІМ-ДБС, для покращення протизношувальних властивостей дизельних палив. Захисна плівка формується за рахунок електростатичної взаємодії полярних груп іонних рідин із поверхнею металу, а також завдяки міжмолекулярному впорядкуванню довгих алкільних ланцюгів.

Однак більшість досліджених зразків дизельного палива, модифікованих іонними рідинами,

показали нижчу ефективність у протизношувальних властивостях порівняно з традиційним дизельним паливом. Це може бути спричинено недостатньою концентрацією іонних рідин у паливі або їх незадовільною сумісністю з основною вуглеводневою складовою. Незважаючи на це, дослідження виявили зразок C<sub>12</sub>C<sub>1</sub>ІМ-ДБС, як найефективніший серед проаналізованих іонних рідин. Ця сполука може стати базою для розробки сучасних протизношувальних присадок нового покоління. Подальші дослідження варто спрямувати на оптимізацію її концентрації, вдосконалення структури та оцінку впливу температурних і механічних факторів на формування захисної плівки у зоні тертя.

Дослідження показали, що додавання іонних рідин до дизельних палив впливає на характер тертя та інтенсивність зношування поверхонь металу. Одержані результати свідчать про необхідність подальшої оптимізації складу і концентрації іонних рідин для їх використання у дизельному паливі.

При цьому, проведені дослідження показали, що модифікування мінеральної моторної оливи M10Г2к іонними рідинами впливає на інтенсивність зношування сталі ШХ15. Найменш ефективним виявилась іонна рідина C<sub>8</sub>C<sub>8</sub>ІМ-ДБС, що утворює нестабільну та неоднорідну трибоплівку. RurC<sub>12</sub>-ДБС суттєво знижує зношування, але її захисна дія обмежена у часі фізичною адсорбцією. Додавання C<sub>12</sub>C<sub>1</sub>ІМ-ДБС сприяє утворенню стабільної трибоплівки завдяки сильнішим взаємодіям з поверхнею металу, що забезпечує одну з найнижчих інтенсивностей зношування. Найбільш ефективним виявилось додавання MBT-C<sub>12</sub>, яка утворює рівномірну та стійку трибоплівку. Загалом, присадки з вираженою хемосорбцією та довгими алкільними ланцюгами забезпечують найбільш стійкий протизношувальний ефект.

Одержані результати експериментальних досліджень можуть бути використані для подальших наукових досліджень з метою отримання доказової бази щодо використання впливу іонних рідин для покращення протизношувальних властивостей дизельних палив.

### Список літератури:

1. Trofimov I., Svyryd M., Hetmanenko L., Ternovenko S. Influence of electric field on antiwear properties of Jet aviation fuels reformulated by biocomponents. *International independent scientific journal*. 2020. Vol. 1, № 20. P. 23-30.
2. 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. *Полімер. журн*. 2008. Т. 30, № 4. С. 338-344.
3. ASTM D975-21. Standard Specification for Diesel Fuel. 2021. 28 p.

4. Ben Salah H., Nancarrow P., Al Othman A. Desulfurization of Diesel Using Ionic Liquids: Process Design and Optimization Using COSMO-Based Models and Aspen Plus. *ACS Omega*. 2023. Vol. 8(33). 30001-30023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01952>.
5. Barbour R., Rickeard D., Elliott N. Understanding Diesel Lubricity. *SAE Technical Paper*. 2000. Vol. 01. 1918. DOI: <https://doi.org/10.4271/2000-01-1918>.
6. Deyab M.A., Mohsen, Q. Improving the sustainability of biodiesel by using imidazolium-based ionic liquid. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. 16832. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96358-9>.
7. Jia S., Qin J., Chen L., Zhang Y., Mao Y., Lin H., Han S. Tribological properties and synergistic lubrication mechanism between tetramethyl dodecyl diisooctyl phosphate ionic liquids and molybdenum-based metal organic frameworks additives. *Wear*. 2025. Vol. 576-577. 206137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.206137>.
8. ДСТУ 7688:2015. Паливо дизельне Євро. Технічні умови. Київ, 2016. 12 с.
9. Пристрій для дослідження матеріалів на тертя та зношування при зворотно-поступальному русі: пат. 45574 Україна: МПК G 01 N 3/56. № u200908003; заявл. 29.07.09; опубл. 10.11.09, Бюл. № 21. 8 с.
10. Пристрій для дослідження поверхонь тертя в постійному рівномірному та нерівномірному магнітному полі: пат. 70877 Україна: МПК G01N 3/56. № u201115161; заявл. 21.12.11; опубл. 25.06.12, Бюл. № 12. 5 с.
11. Трофімов І. Л., Бурикін В. В., Захарчук В. П. Дослідження протизносних властивостей палив, оброблених електричним полем, за схемою трибоконтакту «циліндр – площа». *Збірка наукових праць Інституту надтвердих матеріалів ім. В. Н. Бакуля НАН України*. 2011. № 14. С.602-608.
12. Пристрій для дослідження матеріалів на тертя та зношування: пат. 36600 Україна: МПК G01N 3/56. № u200809663; заявл. 23.07.08; опубл. 27.10.08, Бюл. № 20. 3 с.
13. Безконтактний триимірний профілометр: пат. 39972 Україна: МПК G 01 B 9/02, G 01 B 11/30. № u200809989; заявл. 01.08.08; опубл. 25.03.09, Бюл. № 6. 3 с.

#### **Tsyhanenko V.P., Trofimov I.L., Rogalskyi S.P. IMPACT OF FUNCTIONAL CHEMICAL ADDITIVES ON THE ANTIWEAR PROPERTIES OF DIESEL FUELS AND MOTOR OILS**

*The article discusses the issue of antiwear properties of diesel fuels. The main purpose of the work was experimental research on the influence of ionic liquids on changing the antiwear properties of traditional diesel fuels. The goal was also to study the influence of different types of ionic liquids on the antiwear properties of diesel fuels. Experimental research was conducted, using the best methods, on changing the antiwear properties of traditional diesel fuels by adding ionic liquids. The results of the studies indicate the greatest effectiveness of imidazole ionic liquids, in particular C<sub>12</sub>C<sub>1</sub>IM-DBS, for improving the antiwear properties of diesel fuels. The film is formed due to the electrostatic interaction of polar groups of ionic liquids with the metal surface, as well as due to the intermolecular ordering of long alkyl chains. At the same time, the results of the studies showed that most samples of diesel fuels modified with ionic liquids showed worse antiwear properties compared to traditional diesel fuel. This may be due to both the low concentration of ionic liquids in diesel fuel and the insufficient mutual compatibility of individual compounds with hydrocarbon fuel. The obtained research results have a positive scientific effect, as they allowed us to identify a sample – C<sub>12</sub>C<sub>1</sub>IM-DBS, which showed the best performance among the studied ionic liquids and can become the basis for the development of effective anti-wear additives of a new generation. Further research should be directed at optimizing the concentration of this compound, modifying its structure and assessing the influence of temperature and load factors on the formation of a protective film.*

*The studies have shown that the addition of ionic liquids to diesel fuels affects the nature of friction and the intensity of wear of metal surfaces. The obtained results indicate the need for further optimization of the composition and concentration of ionic liquids for their use in diesel fuel.*

*At the same time, the conducted studies showed that the modification of mineral motor oil M10G2k with ionic liquids affects the intensity of the increase in steel ShKh15. The most effective was the ionic liquid C<sub>8</sub>C<sub>8</sub>Pyr-DBS, and the most effective was the addition of MVT-C<sub>12</sub>, which creates a uniform and stable tribofilm. In general, additives with pronounced chemisorption and long alkyl chains provide the most stable antiwear effect.*

**Keywords:** antiwear properties, diesel fuel, motor oil, ionic liquids, friction, wear.

Дата першого надходження статті до видання: 01.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 31.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026