УДК 621.892.8 DOI: 10.18372/0370-2197.3(112).21592

І.Л. ТРОФІМОВ, О. О. МІКОСЯНЧИК, О.В. БАШТА
Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА ПРОТИЗНОШУВАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Досліджено фізичні основи з підвищення протизношувальних властивостей мастильних матеріалів електричним полем. Установлено, що ключовим фізичним чинником взаємодії мастильного середовища з електричним полем є дипольний момент його молекул. Зазнала подальшого розвитку математична модель впливу електричного поля на вуглеводневі мастильні середовища через корекцію залежностей між напруженістю поля, поверхневим натягом та тензором напружень Максвелла, що описує механічні сили розтягнення або стиснення поверхневого шару рідини під дією поля. На основі розподілу Максвелла - Больцмана побудовано математичний апарат і систему диференціальних рівнянь, що описують імовірність злипання (коалесценції) та розпаду молекул під дією зовнішнього поля. Підтверджено, що впорядкування дипольних молекул вздовж силових ліній поля підвищує локальну концентрацію ПАР у зоні трибоконтакту, сприяє формуванню товщої мастильної плівки, зменшує питомий контактний тиск і знижує зношування.

Ключові слова: *мастильний матеріал, мастильне середовище, протизношувальні властивості, електричне поле, математична модель.*

Вступ. Сучасні тенденції в галузі паливно-енергетичних ресурсів висувають суворі вимоги щодо ефективності, надійності та екологічності паливно-мастильних матеріалів, особливо дизельного пального. У світлі зростаючих екологічних обмежень та необхідності зменшення шкідливих викидів, все більше акцентується застосування альтернативних видів пального, таких як біодизель. Біодизель, отриманий методом трансестерифікації рослинних олій або тваринних жирів, має ряд унікальних характеристик, які позитивно впливають на експлуатаційну надійність паливних систем. Одним із ключових критеріїв надійності є протизношувальні властивості, оскільки зношування компонентів паливної системи безпосередньо впливає на довговічність і надійність функціонування двигунів внутрішнього згоряння. Ще однією перспективною технологією, яка покращує властивості біопалива, є обробка дизельного пального магнітним полем. Це дозволяє змінювати молекулярну структуру пального, покращуючи процес згорання і сприяючи зменшенню зношення компонентів двигуна. Поєднання використання біопалива з обробкою магнітним полем відкриває нові можливості для створення інноваційних паливних систем із покращеними експлуатаційними характеристиками. Дослідження впливу біодизеля й обробки магнітним полем на зносостійкість та інші властивості дизельних палив є важливим для вдосконалення сучасних паливних систем. Вивчення взаємозв'язку між складом палива, його обробкою та експлуатаційними показниками є ключовим етапом у розробці ефективніших та екологічних рішень.

Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем. Аналіз літературних джерел показує активну зацікавленість науковців стосовно експериментальних і теоретичних досліджень з підвищення протизношувальних властивостей пар

тертя та досліджень впливу електричного поля на зміну стану і властивостей робочих рідин. Сучасна світова нафтогазова та паливна промисловість зіштовхується з цілою низкою суттєвих викликів, пов'язаних із підвищенням ефективності енергетичних ресурсів, мінімізацією впливу на навколишнє середовище та забезпеченням довготривалості роботи двигунів внутрішнього згорання. Один з перспективних напрямків покращення протизношувальних властивостей мастильних середовищ (МС) полягає в застосуванні обробки МС електричним полем, що підвищує його фізико-хімічні характеристики, покращує протизношувальні властивості та зменшує коефіцієнт тертя, сприяючи стабільнішій роботі двигунів. Використання мастильних матеріалів, зокрема палив, оброблених електричним полем, відкриває можливості для покращення економічної ефективності та екологічної безпеки транспортних засобів, завдяки меншій кількості утворюваних при згоранні відпрацьованих газів. Дослідження взаємодії між МС і обробкою електричним полем з метою підвищення протизношувальних властивостей є надзвичайно актуальним завданням. Це не лише вирішує важливі технічні проблеми, а й закладає основу для створення інноваційних підходів у виробництві та використанні паливно-мастильних матеріалів.

Праця [1] присвячена систематизації знань про властивості МС, які одночасно піддаються впливу механічних навантажень, електричних, магнітних та температурних полів. Головний теоретичний здобуток авторів – розробка узагальненого рівняння Рейнольдса для MEMT-поля (generalized MEMT-field Reynolds equation). На відміну від класичного рівняння Рейнольдса, яке враховує лише градієнт тиску та в'язкісні сили течії, розширена модель враховує: пондеромоторні та лоренцеві сили в магнітному полі; пондеромоторні (електростатичні) сили та діелектрофорез в електричному полі. Розроблена авторами модель описує, як електричні та магнітні поля змінюють локальну в'язкість, дипольний момент та орієнтацію молекул/наночастинок у мастильній плівці.

Науковцями праці [2] узагальнено сучасні експериментальні та теоретичні дослідження щодо того, як зовнішні електромагнітні, магнітні та електричні поля впливають на трибологічні характеристики (коефіцієнт тертя, інтенсивність зносу, морфологію поверхонь). Основний акцент зроблено на переході від сприйняття полів як «деструктивного чинника» (що викликає електроерозію та деградацію олив) до використання їх як інструменту активного керування тертям. Авторами встановлено, що електричне поле змінює поверхневий потенціал деталей, що прискорює або сповільнює адсорбцію полярних молекул присадок. Електричне поле впливає на швидкість утворення оксидних плівок на металевих поверхнях, які можуть виступати як тверде мастило або, навпаки, спричиняти абразивний знос при їх злущуванні. Досліджено вплив електричного поля на мікротвердість, дислокаційну структуру та перерозподіл напружень у поверхневому шарі контртіл під час тертя.

Дослідниками праці [3] детально розкрито складну взаємодію між електричним струмом, фізико-хімічними властивостями мастила та механікою контакту. Зокрема встановлено, що струмопровідне мастило знижує електричний опір контакту, що упереджує накопичення високої напруги та виникнення деструктивних мікроіскор. Проходження струму прискорює хімічні реакції між присадками та металевою поверхнею, сприяючи швидшому формуванню

захисних пасиваційних плівок. Електричне поле орієнтує полярні молекули та наночастинки в зону контакту, змінюючи локальну в'язкість і міцність граничної плівки. Головний висновок авторів полягав у створенні ідеального струмопровідного мастила, яке вимагає компромісу між високою електричною провідністю та низьким коефіцієнтом тертя, оскільки надмірна кількість провідних фаз може збільшувати абразивний знос або випадати в осад.

Автори праці [4] встановили, що ефективність магнітного поля суттєво залежить від поточного режиму тертя в трибосистемі. Магнітне поле створює направлену силу, яка концентрує наночастинки безпосередньо в зоні контакту, запобігаючи витісненню мастила. Експериментально зафіксовано зниження коефіцієнта тертя до 41.2% та зменшення об'єму зносу поверхні до 94.7% за умови оптимальної напруженості поля. Дослідження авторів дає чіткі математичні та експериментальні орієнтири для розробки «розумних» підшипників кочення та ковзання, де магнітне поле адаптується під поточне навантаження та швидкість обертання, автоматично мінімізуючи знос у найкритичніших режимах (наприклад, під час пуску та зупинки).

Науковцями праці [5] досліджено вплив зовнішнього постійного електричного поля на коефіцієнт тертя ковзання в парах «еластомер (силіконовий каучук) – метал» за умов змащування базовими синтетичними оливами. Авторами встановлено, що накладання електричного поля дозволило досягти стабільного зменшення коефіцієнта тертя ковзання до 30% порівняно з умовами без поля. Під дією електричного поля дипольні молекули базових олив (особливо полярних олив типу поліалкіленгліколей (PAG)) орієнтуються вздовж силових ліній, формуючи більш впорядковану та міцну граничну мастильну плівку на межі гума-метал. Величина ефекту зниження тертя суттєво залежить від електрофізичних властивостей металу (сталь, латунь, алюміній) та його поверхневого потенціалу, що визначає щільність подвійного електричного шару. Дослідження доводить можливість використання електричного поля для активного зменшення тертя в сальниках та ущільнювальних манжетах електромобілів, що дозволяє знизити механічні втрати на тертя і запобігти передчасному зносу та перегріву еластомерів.

Авторами праці [6] вперше в режимі реального часу (in-situ) за допомогою ультразвукового методу досліджено, як саме електричний струм змінює товщину мастильної плівки у найкритичніших режимах змащування – граничному та змішаному. Дослідниками встановлено, що проходження електричного струму через мікроконтакти нерівностей викликає високий локальний нагрів. Це знижує в'язкість оливи в локальних ділянках дотику поверхонь та призводить до потоншення мастильного шару. Проходження струму модифікує або руйнує адсорбційні граничні плівки присадок (зокрема, залишків діалкілдитіофосфату цинку (ZDDP)), що прискорює безпосередній контакт метал-метал. Встановлено чіткі критичні пороги щільності струму, перевищення яких призводить до різкого «просідання» товщини плівки та переходу від змішаного режиму мащення до жорсткого граничного тертя та абразивного зносу. Ця робота надає чіткий інструмент та фізичне пояснення того, чому електричний струм викликає передчасне старіння оливи в електромобілях.

Науковцями праці [7] встановлено підвищення стійкості та надійності швидкорізального інструменту (зокрема сталі Р6М5) шляхом впровадження мікродозованого змащувально-охолоджувального середовища, активованого

електричним полем коронного розряду Автори розробили та дослідили спеціальний сопловий пристрій, який забезпечує мікродозовану подачу промислової оливи (Mobil DTE 22) у вигляді розпиленої суміші з подальшою іонізацією повітряного потоку електричним полем різної полярності (від 1.5 до 14 кВ). Застосування іонізованого повітряно-оливного струменя підвищило період стійкості швидкорізальних різців до 3 разів порівняно з «сухим» різанням та до 2.5 разів порівняно з традиційним змащуванням вільним поливом. Електричне поле розпилює та іонізує краплі оливи, прискорюючи їх адсорбцію та проникнення в мікрощілини зони контакту. Це суттєво знижує момент тертя і зменшує шорсткість обробленої деталі. Завдяки математичній оцінці із застосуванням функції бажаності було доведено зростання загальної ефективності обробки до 40%.

Значні результати щодо впливу магнітного поля на дизельне паливо висвітлені в роботах Зінченка Р. О. та Матвєєвої О. Л. [8]. Встановлено, що обробка палив магнітним полем сприяє покращенню молекулярної структури, зменшенню утворення відкладень і зношування форсунок.

Дослідження Ramar K. і Subbiah G. [9] зосереджувались на впливі електромагнітного поля на показники роботи двигуна на біодизелі. Виявлено, що застосування електромагнітного поля збільшує енергоефективність на 8% і знижує рівень викидів CO і HC на 12% та 15% відповідно.

Авторами праці [10] показано, що обробка дизельного палива електромагнітним полем є перспективним підходом для покращення його фізико-хімічних властивостей, що здатне позитивно вплинути на ефективність роботи дизельних двигунів. Дослідження вказують на те, що вплив електромагнітного поля на паливо спричиняє зміни в структурі молекул вуглеводнів, зокрема в їх орієнтації та агрегації. Це може знизити в'язкість палива та покращити його змащувальні характеристики. Результати досліджень підтверджують, що обробка палива електромагнітним полем зменшує знос сталі ШХ15 при терті ковзання в середовищі авіапалива ТС-1 приблизно на 12–16%.

Взаємодія електромагнітного поля з кисневмісними молекулами біодизеля є важливим напрямом, що сприяє стабілізації його хімічної структури. Це покращує експлуатаційні характеристики пального та знижує негативний вплив на паливну апаратуру. Електромагнітне поле змінює електронну структуру цих молекул, зменшуючи їхню реактивність і агресивний вплив на металеві компоненти двигуна. Дослідження, описане в [11], засвідчує, що електромагнітний вплив на біодизель, отриманий із застосуванням нанокаталізаторів, скорочує кількість пероксидів і вільних жирних кислот у його складі. Це сприяє стабілізації кисневих молекул, які зазвичай є основними джерелами корозійно активних сполук. У підсумку рівень корозійного зношування металевих поверхонь зменшується на 15% порівняно з необробленим біодизелем.

Згідно з працею [12], оптимізація структури ефірів біодизеля разом із обробкою електромагнітним полем значно покращує його окислювальну стабільність. Використання бутилових естерів у процесі трансестерифікації сприяє утворенню більш стійких молекулярних структур, які краще зберігають свої властивості під час підвищених теплових і хімічних навантажень. Після обробки електромагнітним полем біодизель характеризується покращеними протикорозійними властивостями, що позитивно впливає на термін служби

компонентів паливної системи. Зокрема, стабілізація кисневмісних молекул завдяки електромагнітному впливу сприяє утворенню захисної плівки на металевих поверхнях, зменшуючи зношування у трибологічних контактах. Цей ефект має вирішальне значення для забезпечення функціональності та надійності паливної апаратури, особливо при використанні біодизеля з високим вмістом кисневих сполук [13]. Отже, електромагнітне поле відіграє важливу роль у підвищенні стабільності кисневмісних молекул біодизеля, що не лише знижує корозійний вплив, а й покращує загальні експлуатаційні характеристики пального.

Аналіз джерел [14-17] свідчить, що ключовим компонентом мастильних матеріалів, що сприяє формуванню адсорбційних шарів на поверхні металів, є поверхнево-активні речовини (ПАР). Їх характерна особливість полягає в розбіжності центрів позитивних і негативних зарядів, що обумовлює наявність постійного дипольного моменту у молекулах ПАР. Під впливом електричного поля ці дипольні моменти орієнтуються у напрямку напруженості цього поля. Це призводить до переорієнтації молекул ПАР таким чином, що найдрібніші фізичні одиниці ПАР отримують дипольні моменти, а ця поляризація перевищує за інтенсивністю ту, яка індукується електричним полем. Молекули ПАР починають орієнтуватися відповідно до вектора напруженості зовнішнього електричного поля, і в міру зростання його величини все більше молекул приймають таку орієнтацію. Настає момент, коли майже всі молекули досягають максимального орієнтування під певною напругою [14-15]. Така поляризація молекул ПАР може спричинити збільшення ймовірності їх взаємодії один з одним. Крім того, їх компактність (густина на одиницю довжини поверхні) буде вищою при розташуванні на поверхні металу.

Вплив зовнішнього електричного поля на базову оливу, яка за своїми властивостями є неполярним діелектриком, супроводжується ефектом поляризації. Під дією вектора напруженості поля відбувається різноспрямований зсув позитивних і негативних зарядів, унаслідок чого молекули мастильного середовища набувають дипольного моменту. Цей фізичний процес не порушує первинної хімічної структури базової оливи [15, 16]. Набувши дипольних властивостей, її молекули орієнтуються вздовж силових ліній поля та взаємодіють із вуглеводневими радикалами ПАР. Така структуризація середовища – як через збільшення частки мономерів ПАР, так і за рахунок їхнього зв'язку з базою – підвищує в'язкість ММ, що безпосередньо сприяє збільшенню товщини мастильного шару. Зазначений механізм забезпечує підвищену локальну концентрацію молекул ПАР безпосередньо в зоні трибоконтакту. Це сприяє формуванню мастильної плівки більшої товщини, завдяки чому мінімізується безпосереднє взаємопроникнення мікронерівностей поверхонь та зменшується інтенсивність їхнього зношування. Додатково продукти зношування, оточені капсулою з молекул ПАР, заповнюють западини шорсткості, знижуючи та перерозподіляючи питомий контактний тиск. Одночасно виникає ефект адсорбційного пластифікування поверхневих шарів металу, що гарантує зниження коефіцієнта тертя навіть у жорстких умовах граничного режиму мащення.

Аналіз праць [1-17] показав, що питання щодо фізики та математичного опису впливу електричного поля на протизношувальні властивості ММ на сьогодні залишається відкритим.

Мета роботи полягала у розробці математичної моделі впливу електричного поля на протизношувальні властивостей ММ.

Матеріали та методика дослідження. Методологічною основою дослідження цієї праці є математичне моделювання досліджуваного процесу впливу електричного поля на МС. Побудову моделі здійснювали на основі теоретичного аналізу досліджуваного процесу, використовуючи відомі фізичні закономірності та результати попередніх досліджень. Адекватність моделі оцінювали шляхом порівняння розрахункових результатів із експериментальними даними та визначення статистичних показників точності моделювання.

Результати досліджень та їх аналіз. На основі аналітичних досліджень розглянутих праць доведено, що фундаментальним фізичним чинником, який визначає характер взаємодії компонентів МС (базових олив та ПАР) із зовнішнім електричним полем, є електричний дипольний момент їхніх атомів і молекул. З огляду на цей параметр розглянемо поведінку окремої молекули МС під дією електричного поля.

Перекачування рідини технологічними комунікаціями спричиняє природну трибоелектризацію з подальшим формуванням об'ємного електростатичного поля. Його інтенсивність можна підвищити накладанням зовнішнього електричного чи електромагнітного поля. Зовнішнє поле напруженістю E викликає зсув зарядів у полярних і неполярних молекулах відносно їхнього центра мас. На заряд молекули q діє сила F, при цьому середовище характеризується відносною діелектричною проникністю ε, значення якої 2…4 [18].

Отже, можна записати:

$$F = \frac{qE}{\varepsilon}. \tag{1}$$

Напруженість електричного поля E є функцією напруги U та відстані h між зонами її прикладання. У межах цього підходу оцінено ефективність обробки МС у постійному електричному полі за напруги U. Обробка здійснюється в спеціальному пристрої, робочий об'єм якого заповнено вуглеводневою рідиною, з метою покращення експлуатаційних властивостей ПММ.

Таким чином,

$$E = \frac{U}{h}. \tag{2}$$

Енергію взаємодії заряджених частинок із полем виражають у стандартних одиницях вимірювання енергії. Множення обох частин співвідношення (1) на відстань h дає вираз для обчислення роботи, необхідної для поляризації та переорієнтації заряду. Ця робота кількісно характеризує енергетичну взаємодію електростатичного поля та заряду. Нижче наведено аналітичний вираз цієї залежності й аналіз її розмірностей.

$$Fh = \frac{qE}{\varepsilon}h; \qquad A = \frac{qEh}{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon}qU\ [\text{Кл}\cdot\text{В}] = \frac{1}{\varepsilon}qU\ [\text{Дж}]. \tag{3}$$

Співвідношення (3) підтверджує, що енергія взаємодії між зарядом молекули та полем визначається єдиним змінним параметром – напругою постійного струму. У дослідженнях процесів тертя та зношування ключову роль відіграють

адгезія ММ до поверхні тертя та явище змочування твердих тіл. Відповідно до праці [19], стан рівноваги краплі ПММ на твердій поверхні описується формулою (у *ерг/см*^{2}):

$$\sigma_{\text{тг}} = \sigma_{\text{рт}} + \sigma_{\text{рг}} \cdot \cos\phi \tag{4}$$

та формула роботи адгезії між твердим тілом та рідиною:

$$W_{\text{рт}} = \sigma_{\text{рг}}(1 + \cos\varphi), \tag{5}$$

де φ − крайовий кут зіткнення рідкої і твердої фаз;

σ − поверхневий натяг, ерг/см^2;

р, т, г − індекси позначають відповідно рідку, тверду і газоподібну фази.

Аналіз розглянутих залежностей показує, що домінуючою змінною величиною являється поверхневий натяг σ.

Згідно законів термодинаміки [19] відомо, що повна енергія системи має вигляд:

$$U' = H - T\frac{dH}{dT}, \tag{6}$$

де H − вільна енергія;

$T\frac{dH}{dT}$ − зв'язана енергія.

Згідно з джерелом [19], під час ізотермічної зміни площі поверхні (наприклад, рідини) на 1 см^2 механічна робота, яка витрачається при розтягуванні або виділяється при стисканні, чисельно дорівнює поверхневому натягу. Отже, ця робота еквівалентна зміні вільної енергії поверхні за умов ізотермічного збільшення чи зменшення її площі на 1 см^2 Таким чином, $H = \sigma$, а рівняння (6) набуває вигляду:

$$U' = \sigma - T\frac{dH}{dT}, \tag{7}$$

де σ − поверхневий натяг, а також вільна енергія одиниці поверхні, ерг/см^2.

Величину $T\frac{dH}{dT}$ можна знайти, якщо відома залежність $\sigma = f(T)$. Цю залежність можна прийняти в широкому інтервалі температур [14]:

$$\sigma = \sigma_0 - \beta t, \rightarrow \frac{d\sigma}{dT} = -\beta, \rightarrow U' = \sigma + \beta T. \tag{8}$$

У залежності (8) σ_0− поверхневий натяг за нульової температури. Очевидно, що з підвищенням температури поверхневий натяг знижується, оскільки збільшується середня відстань між молекулами і їх міжмолекулярна дія слабішає.

Із рівнянь (7), (8) виходить, що повна енергія поверхневого шару не залежить від температури, оскільки $\frac{d\sigma}{dT} = -\beta$ то $\frac{d^2\sigma}{dT^2} = 0.$ Але, з рівняння (7) виходить, що $\frac{dU'}{dT} = -T\frac{d^2\sigma}{dt^2}$, отже, $\frac{dU'}{dT} = 0$, що відповідає U'=const.

У цьому випадку допустимо припустити, що енергетичний вплив електростатичного поля на одиницю поверхні ПММ відповідає повній енергії цієї одиничної поверхні. Звідси:

$$U' = \sigma + \beta T = U. \tag{9}$$

Із формул (2) , (8) і (9) отримано такі залежності:

$$U = Eh = \sigma + \beta T \rightarrow \sigma = Eh - \beta T . \quad (10)$$

Висунуті гіпотези було детально досліджено у працях [20, 21] у контексті моделювання впливу електричного поля на протизношувальні характеристики ММ. Згідно з формулою (10), поверхневий натяг σ є функцією напруженості електричного поля E. Однак таке співвідношення ігнорує механічні зусилля, які виникають у мікрооб'ємі ММ. Обґрунтованим кроком є розширення формули (10) шляхом урахування тензора натягу Максвелла, який характеристики механічного впливу поля на діелектрик описує найточніше.

У контексті електрогідродинаміки та фізики м'якої матерії тензор напружень Максвелла (σ_{ij}) тісно пов'язаний із поверхневим натягом рідини, що виразно проявляється при дослідженні поведінки крапель чи плівок у зовнішніх електричних полях. Механічна складова – поверхневий натяг (σ) – зумовлює виникнення лапласівського тиску, який прагне мінімізувати площу поверхні. У той же час тензор Максвелла відображає питомі електричні сили, які виникають на міжфазній межі через різницю діелектричних проникностей середовищ. У рівноважному стані механічні сили компенсуються електричними, визначаючи підсумковий напружений стан поверхневого шару. Таким чином, дія зовнішнього поля через тензор Максвелла здана коригувати ефективний поверхневий натяг, деформуючи об'єкт: якщо поверхневий натяг прагне «стягнути» рідину, то тензор Максвелла описує її розтягнення або стиснення під дією поля.

Відомо, що в електростатиці ефекти магнетизму відсутні. Отже магнітне поле відсутнє (B=0), і ми отримуємо тензор електростатичних напружень Максвелла:

$$\sigma_{ij} = \varepsilon_0 E_i E_j - 1/2 \varepsilon_0 E^2 \delta_{ij} \quad (11)$$

де: ε_0 – електрична стала;

E – електричне поле;

δ_{ij} – дельта Кронекера.

Враховуючи описані вище припущення, формула (10) набуває такого вигляду:

$$U = Eh = (\sigma + \beta T) + \sigma_{ij} \rightarrow \sigma = (Eh - \beta T) + \sigma_{ij}$$

Ураховуючи зазначені вище положення, формулу (10) можна подати у такому вигляді:

$$U = Eh = (\sigma + \beta T) + \sigma_{ij} \rightarrow \sigma = (Eh - \beta T) + \sigma_{ij} \quad (12)$$

Далі проаналізуємо динаміку молекул за умов дії зовнішнього електричного поля на молекулярну систему (МС). Під впливом поля (E) постійні диполі молекул як основної фази, так і ПАР прагнуть орієнтувати свої електричні моменти вздовж вектора напруженості.

За зазначених умов підвищується ймовірність міжмолекулярного притягання та коалесценції (злипання) молекул МС. З метою теоретичного обґрунтування впливу зовнішнього поля на переорієнтацію осей молекул ПАР застосуємо молекулярно-статистичний підхід. Нехай у незбуреному стані вектор дипольного моменту молекули утворює певний кут . За цих умов енергію диполя та потенціал силового поля пов'язує таке співвідношення:

$$U = -\vec{P}\vec{E} = -EP\cos\alpha. \quad (13)$$

де $\vec{P} = g\vec{l}$ – електричний дипольний момент молекул;

$\vec{E}$ – напруженість електричного поля.

Як видно із залежності (11), величина потенціалу силового поля обумовлена напруженістю E та кутом між напрямком поля і дипольним моментом. Ураховуючи співвідношення (2), (9) та (13), сформулюємо вираз для потенціалу силового поля, яке діє на одиницю площі поверхні МС:

$$U = -\vec{E}\vec{P} = ((\sigma + \beta T) + \sigma_{ij})\cos\alpha. \quad (14)$$

Застосувавши рівняння (14) та врахувавши функцію розподілу молекул МС за кутами орієнтації в силовому полі (відомий розподіл Максвелла — Больцмана), маємо:

$$f(\alpha) = e^{-\frac{U}{KT}} \rightarrow f(\alpha) = Ce^{-\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})\cos\alpha}{KT}} \quad (15)$$

де K – постійна Больцмана;

T – температура МС;

C – константа.

Константу C знаходимо з умови нормування:

$$2\pi C\int_0^{\pi} \sin\alpha e^{-\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})\cdot\cos\alpha}{KT}} d\alpha = C\frac{2\pi KT}{(\sigma+\beta T)}\left(e^{-\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}} - e^{\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}}\right) = 1. \quad (16)$$

Функцію розподілу можна записати у вигляді:

$$f(\alpha) = \frac{(\sigma+\beta T)}{4\pi KT}\cdot\frac{e^{-\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})\cos\alpha}{KT}}}{\mathrm{sh}\left(\frac{(\sigma+\beta T)}{KT}\right)}, \quad (17)$$

де $\mathrm{sh}\left(\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}\right)$ – гіперболічний синус від аргументу $\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}$.

У випадку відсутності зовнішнього електричного поля E, коли ($E \rightarrow 0$), $f(\alpha) \rightarrow \frac{1}{4\pi}$. Важливо при цьому, чи будуть молекули взаємодіяти між собою (злипатись, поєднуватись), чи ні. Для цього введемо імовірність об'єднання молекул $P_{\text{об.}}(\alpha)$, причому середнє за кутом α значення імовірності позначимо як $\ddot{P}_{\text{об.}}$.

$$\ddot{p}_{\text{об.}} = 2\pi\int P_{\text{об.}}(\alpha)\sin\alpha d\alpha. \quad (18)$$

За аналогічним принципом визначимо середнє значення ймовірності розпаду молекул $\ddot{\ddot{P}}_{\text{розп.}}$. За таких умов формування обох видів молекул — як МС, так і ПАР — можна подати у вигляді системи диференціальних рівнянь:

$$\frac{dn_0}{dt} = \ddot{p}_{\text{розп.}} n_{\text{М}} - \ddot{P}_{\text{об.}} n_0; \quad (19)$$

$$\frac{dn_{\text{М}}}{dt} = \ddot{p}_{\text{об.}} n_0 - \ddot{\ddot{P}}_{\text{розп.}} n_{\text{М}}, \quad (20)$$

де n_0 – кількість однакових молекул;

$n_{\text{М}}$ – кількість макромолекул.

Як видно з рівнянь (19, 20), у випадку ($\frac{d}{dt} = 0$) отримуємо:

$$n_{\text{M}} = n_0 \frac{\ddot{\vec{P}}_{\text{об.}}}{\ddot{\vec{P}}_{\text{розп.}}} \tag{21}$$

За наявності електростатичного поля слід очікувати зростання ймовірності злипання молекул. Густину розподілу ймовірності їхнього злипання залежно від α можна подати у вигляді такого виразу:

$$P^{E}_{\text{об.}}(\alpha) = f(\alpha) W(\alpha) \tag{22}$$

де $W(\alpha)$ – вірогідність злипання (об'єднання) 2-ох молекул під дією поля $\vec{E}$;

α – кут орієнтації їх осей при зіткненні.

Очевидно, що $W(\alpha)$ є суттєвою лише за малих кутів α. Допустимо, що імовірність злипання молекул підкоряється закономірності

$$W(\alpha) = \frac{1+\cos\alpha}{2} \tag{23}$$

Отже, середнє за кутами значення імовірності злипання молекул базової оливи (аналогічно ПАР) $\ddot{P}^{E}_{об.}$ буде визначатися за залежністю:

$$\ddot{\vec{P}}^{E}_{об.} = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} Ce^{-\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})\cdot\cos\alpha}{KT}} \sin\alpha W(\alpha) d\alpha = 2\pi \int_0^{\pi} Ce^{-\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})\cdot\cos\alpha}{KT}} \left(\frac{\sin\alpha}{2} + \frac{\cos\alpha}{2}\sin\alpha\right) d\alpha = \tag{24}$$

$$= 2\pi \int_0^{\pi} Ce^{-\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})\cdot\cos\alpha}{KT}} \frac{\sin\alpha}{2} d\alpha + \int_0^{\pi} Ce^{-\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})\cdot\cos\alpha}{KT}} \frac{\cos\alpha}{2} \sin\alpha d\alpha.$$

Для спрощення виразу введемо заміну змінних $\cos\alpha = t$, $dt = -\sin\alpha d\alpha$ і у цьому випадку отримаємо:

$$\ddot{\vec{P}}^{E}_{об.} = \frac{1}{2} + 2\pi \int_1^{-1} Ce^{-\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}t} \frac{t}{2}(-dt) = \left(\frac{1}{2} + \frac{C}{2} 2\pi \left(\frac{te^{-\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}t}}{\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}} - \frac{e^{\frac{(\sigma+\beta T)}{KT}t}}{\left(\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}\right)^2} \right)\right)\Bigg|_{-1}^{1} = \tag{25}$$

$$= \frac{1}{2}\left[1 + C2\pi \left(\frac{2\text{ch}\left(-\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}\right)}{\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}} - \frac{2\text{sh}\left(\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}\right)}{\left(\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}\right)^2} \right)\right].$$

З урахуванням залежностей (23) і (24) підставимо значення константи в рівняння (25) і отримаємо:

$$\ddot{\vec{P}}^{E}_{об.} = \frac{1}{2}\left[1 + \frac{2\pi((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{4\pi KT\text{sh}\left(\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}\right)} \left(\frac{2\text{ch}\left(-\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}\right)}{\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}} - \frac{2\text{sh}\left(\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}\right)}{\left(\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}\right)^2} \right)\right] = \tag{26}$$

$$= \frac{1}{2}\left[\left(1 + \left(\frac{\text{ch}\left(-\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}\right)}{\text{sh}\left(\frac{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})}{KT}\right)} \right) - \frac{KT}{((\sigma+\beta T)+\sigma_{ij})} \right)\right].$$

Щоб обчислити середнє значення ймовірності злипання молекул МС (у нашому випадку — авіаційного пального JET A-1) залежно від поверхневого

натягу (вільної енергії одиниці поверхні), використаємо такі вихідні дані: K – постійна Больцмана, K = 1,38·10^{-23}, Дж/т, або K = 1,38·10^{-16}, ерг/т; $\sigma_{\text{Jet A-1}}$ – поверхневий натяг авіапалива JET A-1 за температури 60 ^{0}C (табличне значення [126]), становить 23 ерг/см^2; T – температура МС, T = 333К; β = 0,152 (табличне значення для авіапалива JET A-1); ε_0 = 8,85x10^{-12} Ф/м (табличне значення); δ_{ij} =1.

Для виконання розрахунків значенням $\sigma_{\text{Jet A-1}}$ варіюємо в межах 21…26 ерг/см^2, оскільки числові значення більші чи менші від інтервалу варіювання, це табличні значення поверхневого натягу вже за інших температур, а ми задались робочою температурою МС: +60 ^{0}C і (T=const). Виконавши розрахунки за залежністю (24), результати зводимо в табл. 1 і будуємо графік залежності середньої імовірності злипання молекул авіапалива JET A-1 від величини поверхневого натягу (рис. 1).

Таблиця 1

Результати розрахунку $\ddot{P}^{E}_{\text{об.}} f(\sigma)$

$\sigma_{\text{Jet A-1}}$, ерг/м^2	21	22	**23**	24	25	26
$\ddot{P}^{E}_{об.}$	0,975	0,968	0,956	0,798	0,670	0,550

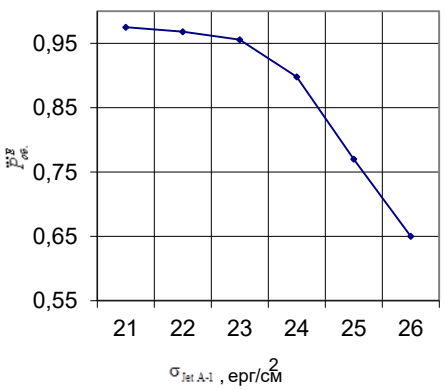


Рис 1. Залежність $\ddot{P}^{E}_{\text{об.}}$ від поверхневого натягу авіапалива $\sigma_{\text{Jet A-1}}$ (вільної енергії одиниці поверхні).

Згідно з одержаною залежністю $\ddot{P}^{E}_{\text{об.}} f(\sigma)$, зниження поверхневого натягу супроводжується підвищенням ймовірності коалесценції (злипання) молекул авіаційного палива JET A-1, зорієнтованих за лініями напруженості електростатичного поля. Додатково варто підкреслити вплив напруженості поля на дипольні моменти молекул базового середовища та поверхнево-активних речовин. Зі збільшенням напруженості електромагнітного поля підвищується ступінь орієнтаційної впорядкованості молекул уздовж напрямку дії поля.

Висновки. На підставі аналізу розглянутих джерел обґрунтовано, що під дією зовнішнього електричного поля дипольні моменти молекул базової оливи та

ПАР орієнтуються вздовж силових ліній поля. На основі розподілу Максвелла - Больцмана сформовано функцію розподілу молекул за кутами орієнтації в силовому полі. Показано, що орієнтаційна поляризація молекул збільшує ймовірність їх міжмолекулярного притягання та сприяє підвищенню локальної концентрації ПАР у зоні трибологічного контакту.

Зазнала подальшого розвитку модель впливу електричного поля на вуглеводневі МС через корекцію залежностей між напруженістю поля, поверхневим натягом та тензором напружень Максвелла. На цій основі виведено модельні співвідношення, які пояснюють фізичний механізм взаємодії елементів трибологічних систем із зовнішнім електричним полем.

Проведено розрахунок середньої ймовірності злипання (коалесценції) молекул авіаційного пального JET A-1 за робочої температури. Зростання напруженості електричного поля підсилює орієнтаційну впорядкованість молекул, сприяючи формуванню товщої й міцнішої мастильної плівки, що знижує зношування та коефіцієнт тертя.

Виведені модельні співвідношення пояснюють фізичний механізм взаємодії елементів трибологічних систем із зовнішнім електричним полем. Отримані результати створюють теоретичну базу для розробки та вдосконалення технологій електрофізичної обробки паливно-мастильних матеріалів з метою підвищення надійності та довговічності трибосистем.

Список літератури

1. Wang X., Wang Q. J., Ren N., England R. Lubrication subjected to effects of electric and magnetic fields: recent research progress and a generalized MEMT-field Reynolds equation. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 9. Art. 1334814. DOI: https://doi.org/10.3389/fmech.2023.1334814.

2. Zhang Q., Li J., Wang Y., Chen X. A review of research on the effect of electromagnetic field on friction and wear. *Lubricants*. 2023. Vol. 11, No. 10. Art. 435. DOI: https://doi.org/10.3390/lubricants11100435.

3. Xi X., Zhao Z., Li H. et al. A comprehensive review of electro-tribological behavior in conductive lubricants. *Friction*. 2025. Art. 9440957. DOI: https://doi.org/10.26599/FRICT.2025.9440957.

4. Wang X., Zhao Y., Liu H. et al. Influence of external magnetic field on the tribological performance of magnetic fluids in different lubrication regimes. *Friction*. 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s40544-024-0900-x.

5. Głogowski M., Smykowski D., Pietrowicz S. The Effect of an Electric Field on the Sliding Friction of the Silicone Rubber against Selected Metals in Motor Base Oils. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 11. Art. 4381. DOI: https://doi.org/10.3390/en16114381.

6. Cao-Romero-Gallegos J. A. et al. The effect of electrical current on lubricant film thickness in boundary and mixed lubrication contacts measured with ultrasound. *Friction*. 2024. Vol. 12. DOI: https://doi.org/10.1007/s40544-023-0850-x.

7. Marchenko D., Matvyeyeva K., Lymar O., Kurepin V. Enhancing the reliability and wear resistance of high-speed cutting tools through the use of ionized air-oil lubrication media in machine part restoration. *Problems of Tribology*. 2025. Vol. 30, No. 4/118. P. 72–78. DOI: https://doi.org/10.31891/2079-1372-2025-118-4-72-78.

8. Зінченко Р. О., Матвєєва О. Л. Зміна екологічних та фізико-хімічних властивостей вуглеводневих палив під дією магнітного поля. *Тези доповідей конференції «Екологічна безпека та хіммотологія»*. 2018. С. 17-18.

9. Ramar K., Subbiah G. A study of magnetic field influence on performance and emission using biodiesel in DI diesel engine. *AIP Conference Proceedings*, 2024. №3192(1). P.020082. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0241518ю

10. Трофімов І. Л., Свирид М. М., Циганенко В. П., Макаров А. С. Вплив електромагнітного поля на протизносні властивості альтернативних дизельних палив. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. №4 (101). С. 42–51. DOI: https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(101).18078/

11. Verma ML, Dhanya BS, Wang B, Thakur M, Rani V, Kushwaha R. Bio-Nanoparticles Mediated Transesterification of Algal Biomass for Biodiesel Production. *Sustainability*, 2024. Vol. 16(1):295. DOI: https://doi.org/10.3390/su16010295

12. Wenchao W., Fashe L., Ying L. Effect of Biodiesel Ester Structure Optimization on Low Temperature Performance and Oxidation Stability. *Journal of Materials Research and Materials*. 2020. Vol. 9. Issue 3. P. 2727-2736. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.005

13. Mythili, R., Venkatachalam, P., Subramanian, P., & Uma, D. (2014). Production characterization and efficiency of biodiesel: a review. *International Journal of Energy Research*, 38, P. 1233 – 1259. DOI: https://doi.org/10.1002/er.3165

14. Кравец І.А. Репаративна регенерація трибосистем. – Т.: Видавництво Бережанського агротехнічного інституту, 2003. – 284 с.

15. Підвищення ресурсу технічних систем шляхом використання елеткричних та магнітних полів / Є.Є. Александров, І.А. Кравець, Є.П. Лисиков, О.В. Соловьов, А.А. Тропіна. – Харьків: НТУ „ХПІ”, 2006. – 544 с.

16. Trofimov I. Influence of electric field on antiwear properties of Jet aviation fuels reformulated by biocomponents / I. Trofimov, M. Svirid, L. Hetmanenko, Ternovenko S // *International independent scientific journal*, Vol. 1, №. 20, 2020. p. 23-30.

17. Trofymov I.L. Influence of electromagnetic treatment of fuels and oils on the formation of wear resistance of friction pairs / I.L. Trofymov I.L., M.M. Svyryd, O.L. Matveyeva, O.Y. Sydorenko // Selected aspects of providing the chemmotological reliability of the engineering. Monograph – Kyiv-Paris, 2019., pp. 141-153. https://doi.org/10.18372/38236.

18. Поплавко Ю. М. Фізика діелектриків : підручник. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 572 с. ISBN 978-966-622-709-2.

19. Akhmatov A. S. Molecular Physics of Boundary Friction. – Jerusalem : Israel Program for Scientific Translations, 1966. – 472 p.

20. Трофімов І.Л. Теоретичне обгрунтування впливу електричного поля на мастильні середовища. *Східно-Європейський журнал передових технологій (Прикладна фізика і матеріалознавство*). 2013. вип. 1/5№61. С. 13–17.

21. Трофімов І.Л. Моделювання впливу електричного поля на протизносні властивості мастильних матеріалів. *Проблеми тертя та зношування*. 2013. Вип. 59. С. 89-92.

Отримано: 16 серпня 2026
Прийнято: 25 серпня 2026
Опубліковано: 18 жовтня 2026

Трофімов Ігор Леонідович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри екології, хімії та хімічної технології, Національнй університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: troffi@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-5539-1166

Мікосянчик Оксана Олександрівна – докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: oksana.mikos@ukr.net, https://orcid.org/0000-0002-2438-1333

Башта Олександр Васильович – кандидат технічних наук, доцент, кафедра прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний університет “Київський авіаційний інститут”, пр-т Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: oleksandr.bashta@npp.kai.edu.ua , https://orcid.org/0000-0001-7914-897X.

Ihor Trofimov – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology, Chemistry and Chemical Technology, National University "Kyiv Aviation Institute", 1 Liubomyra Huzara Ave., Kyiv, 03058, Ukraine, tel.: +38 044 406 77 70, e-mail: troffi@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5539-1166

Oksana Mikosianchyk - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: oksana.mikos@ukr.net, https://orcid.org/0000-0002-2438-1333

Oleksandr Bashta - PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National University “Kyiv Aviation Institute”, 1, Lubomyr Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: oleksandr.bashta@npp.kai.edu.ua , https://orcid.org/0000-0001-7914-897X

I. TROFIMOV, O.MIKOSIANCHYK, O. BASHTA

MATHEMATICAL MODEL OF THE EFFECT OF AN ELECTRIC FIELD ON THE ANTI-WEAR PROPERTIES OF LUBRICANTS

The physical principles of enhancing the anti-wear properties of lubricants using an electric field have been investigated. It has been established that the key physical factor in the interaction between a lubricating medium and an electric field is the dipole moment of its molecules. A mathematical model of the electric field's effect on hydrocarbon lubricating media has been further developed by correcting the relationships between field strength, surface tension, and the Maxwell stress tensor, which describes the mechanical tensile or compressive forces acting on the liquid surface layer under the influence of the field. Based on the Maxwell–Boltzmann distribution, a mathematical framework and a system of differential equations describing the probability of molecular coalescence and dissociation under an external field have been constructed. It has been confirmed that the alignment of dipole molecules along the field lines increases the local concentration of surfactants in the tribocontact zone, promotes the formation of a thicker lubricant film, reduces specific contact pressure, and decreases wear.

Keywords: lubricant, lubricating medium, anti-wear properties, electric field, mathematical model

References

1. Wang X., Wang Q. J., Ren N., England R. Lubrication subjected to effects of electric and magnetic fields: recent research progress and a generalized MEMT-field Reynolds equation. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 9. Art. 1334814. DOI: https://doi.org/10.3389/fmech.2023.1334814.

2. Zhang Q., Li J., Wang Y., Chen X. A review of research on the effect of electromagnetic field on friction and wear. *Lubricants*. 2023. Vol. 11, No. 10. Art. 435. DOI: https://doi.org/10.3390/lubricants11100435.

3. Xi X., Zhao Z., Li H. et al. A comprehensive review of electro-tribological behavior in conductive lubricants. *Friction*. 2025. Art. 9440957. DOI: https://doi.org/10.26599/FRICT.2025.9440957.

4. Wang X., Zhao Y., Liu H. et al. Influence of external magnetic field on the tribological performance of magnetic fluids in different lubrication regimes. *Friction*. 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s40544-024-0900-x.

5. Głogowski M., Smykowski D., Pietrowicz S. The Effect of an Electric Field on the Sliding Friction of the Silicone Rubber against Selected Metals in Motor Base Oils. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 11. Art. 4381. DOI: https://doi.org/10.3390/en16114381.

6. Cao-Romero-Gallegos J. A. et al. The effect of electrical current on lubricant film thickness in boundary and mixed lubrication contacts measured with ultrasound. *Friction*. 2024. Vol. 12. DOI: https://doi.org/10.1007/s40544-023-0850-x.

7. Marchenko D., Matvyeyeva K., Lymar O., Kurepin V. Enhancing the reliability and wear resistance of high-speed cutting tools through the use of ionized air-oil lubrication media in machine part restoration. *Problems of Tribology*. 2025. Vol. 30, No. 4/118. P. 72–78. DOI: https://doi.org/10.31891/2079-1372-2025-118-4-72-78.

8. Zinchenko, R. O., & Matvieieva, O. L. (2018). Changes in the environmental and physicochemical properties of hydrocarbon fuels under the influence of a magnetic field. Abstracts of the Conference "Environmental Safety and Chemmotology", pp. 17–18.

9. Ramar K., Subbiah G. A study of magnetic field influence on performance and emission using biodiesel in DI diesel engine. *AIP Conference Proceedings*, 2024. №3192(1). P.020082. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0241518ю

10. Trofimov, I. L., Svyryd, M. M., Tsyhanenko, V. P., & Makarov, A. S. (2023). Influence of electromagnetic field on anti-wear properties of alternative diesel fuels. *Problems of Friction and Wear*, (4), 42–51. DOI: https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(101).18078

11. Verma ML, Dhanya BS, Wang B, Thakur M, Rani V, Kushwaha R. Bio-Nanoparticles Mediated Transesterification of Algal Biomass for Biodiesel Production. *Sustainability*, 2024. Vol. 16(1):295. DOI: https://doi.org/10.3390/su16010295

12. Wenchao W., Fashe L., Ying L. Effect of Biodiesel Ester Structure Optimization on Low Temperature Performance and Oxidation Stability. *Journal of Materials Research and Materials*. 2020. Vol. 9. Issue 3. P. 2727-2736. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.005

13. Mythili, R., Venkatachalam, P., Subramanian, P., & Uma, D. (2014). Production characterization and efficiency of biodiesel: a review. *International Journal of Energy Research*, 38, P. 1233 – 1259. DOI: https://doi.org/10.1002/er.3165

14. Kravets, I. A. (2003). Reparative regeneration of tribosystems. Ternopil: Publishing House of Berezhany Agrotechnical Institute. 284 p.

15. Aleksandrov, Ye. Ye., Kravets, I. A., Lysykov, Ye. P., Soloviov, O. V., & Tropina, A. A. (2006). Increasing the service life of technical systems through the use of electric and magnetic fields. Kharkiv: NTU "KhPI". 544 p.

16. Trofimov I. Influence of electric field on antiwear properties of Jet aviation fuels reformulated by biocomponents / I. Trofimov, M. Svirid, L. Hetmanenko, Ternovenko S // *International independent scientific journal*, Vol. 1, №. 20, 2020. p. 23-30.

17. Trofymov I.L. Influence of electromagnetic treatment of fuels and oils on the formation of wear resistance of friction pairs / I.L. Trofymov I.L., M.M. Svyryd, O.L. Matveyeva, O.Y. Sydorenko // Selected aspects of providing the chemmotological reliability of the engineering. Monograph – Kyiv-Paris, 2019., pp. 141-153. https://doi.org/10.18372/38236.

18. Poplavko, Yu. M. (2015). *Physics of Dielectrics*: textbook. Kyiv: NTUU "KPI". 572 p. ISBN 978-966-622-709-2.

19. Akhmatov A. S. Molecular Physics of Boundary Friction. – Jerusalem : Israel Program for Scientific Translations, 1966. – 472 p.

20. Trofimov, I. L. (2013). Theoretical substantiation of the electric field effect on lubricating media. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(5(61)), 13

21. Trofimov, I. L. (2013). Modeling the effect of an electric field on the anti-wear properties of lubricants. *Problems of Friction and Wear*, (59), 89–92.