

**Марчук В.Є.,  
Морозов В.І.,  
Духота О.І.,  
Морозова І.В.**

Національний авіаційний університет,  
м. Київ, Україна

**ПРОЦЕСИ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ  
У ТРИБОСИСТЕМАХ З ДИСКРЕТНО -  
ОРІЄНТОВАНОЮ СТРУКТУРОЮ.  
ПОВІДОМЛЕННЯ 1. МАГНІТНІ ЯВИЩА  
ПРИ ТЕРТІ ПОВЕРХОНЬ З ДИСКРЕТНО -  
ОРІЄНТОВАНОЮ СТРУКТУРОЮ**

**Загальна постановка проблеми та її зв'язок з науково - практичними задачами**

В даний час, незважаючи на значний прогрес науки про тертя та зношування, питання підвищення зносостійкості і зменшення втрат у трибологічних системах залишаються багато в чому невирішеними. Це пояснюється складністю процесів і явищ, які відбуваються в тонких поверхневих шарах трибосполучень.

В останні роки процеси тертя та зношування досліджуються з урахуванням енергетичних позицій з метою найбільш повного врахування різних факторів, які можуть вплинути на цей процес. Відомо, що тертя розглядається як пружно - коливальний процес генерації тепла в поверхневому шарі і утворення вторинних структур. Поряд з генеруванням тепла при терті є і інші перетворення енергії, серед яких має місце збудження електричних і магнітних полів, створення термострумів, трибохімічні реакції та ін. Ці фактори відіграють важливу роль у процесах тертя та зношування.

**Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем**

Як відомо, міжфазні гетерогенні процеси, що протікають в граничних шарах, ускладнюються термо-електромагнітними явищами, що виникають при терті. При цьому зону тертя розглядають як джерело електромагнітного випромінювання, яке сприяє утворенню поверхнево-активних речовин, які мають підвищену мастильну здатність, сприяючого зниженню зносу деталей.

Встановлено [1], що після впливу на масло МК-8 постійним магнітним полем знос пари тертя зі сталі ШХ15 при терті ковзанні в умовах граничної мастильної плівки зменшується в 2,0 - 2,5 рази, а вплив на масло електрофізичним способом призводить до зменшення зносу в 3,0 - 3,5 рази. Одночасно з цим встановлено збільшення осьового навантаження на 20 % і зменшення температури масла і зразка на 25 - 30 %. Відзначено зменшення моменту тертя на 12 - 16 %.

Аналогічні результати було отримано після впливу на масло МК-8 постійного магнітного поля напруженістю 340 кА/м в умовах фретинг-корозії, що дозволило зменшити знос  $\alpha$  - заліза в 1,8 - 2,0 рази. Проведення випробувань через 24 і 48 годин після впливу магнітного поля приводить до зменшення зношування контактуючих деталей тільки на 20 - 22 % і 14 - 16 % відповідно [2].

Для покращення параметрів роботи вузлів тертя широко використовується метод магнітно-імпульсної обробки. Імпульсне магнітне поле, взаємодіючи з матеріалом деталі, змінює її теплові та електромагнітні властивості, покращує структуру та експлуатаційні характеристики деталі. За допомогою магнітно-імпульсної обробки можна не менш ніж на 25 % підвищити працездатність вузлів тертя, збільшити на 20 - 50 % ефективність мастила і швидкість охолодження підшипників, прискорити (в потрібному напрямку) протікання хімічних реакцій в зоні тертя між компонентами мащення. Це дозволяє з ймовірністю 60 - 70 % прогнозувати характер очікуваного руйнування деталі (вузла). Технологія магнітної обробки механізмів і машин в спеціальних магнітних камерах (великого обсягу) підвищує надійність складання і монтажу агрегатів, збільшує економічність роботи двигунів внутрішнього згоряння, реактивних двигунів, вузлів атомних реакторів, вузлів літаків, робочих блоків і устаткування криогенної апаратури, турбін, клапанів та ін. [3, 4, 5].

В роботі [6] показано, що в умовах фретинг - корозії інтенсивність руйнування контактуючих металів залежить від їх електрохімічних і електрофізичних явищ. Термоелектричні струми, супутні фретинг-корозії, не грають основної ролі в її виникненні, але, вони є одним з факторів, що впливають на дифузійні процеси на границі контакту. Зовнішнє електричне поле, взаємодіючи з полем термо е.д.с., також впливає на адсорбційні та дифузійні процеси, прискорюючи чи сповільнюючи їх. Результатом такого впливу є зміна швидкості окислення контактуючих поверхонь, що приводить до зміни інтенсивності розвитку процесів схоплювання.

Магнітні явища широко використовуються для абразивної обробки широкого класу металів і сплавів. Магнітно-абразивна обробка забезпечує отримання параметрів шорсткості  $R_a = 0,01 - 1,0$  мкм, зниження хвилястості у 8 - 10 разів, збільшення контактної міцності і зносостійкості деталей у 2 - 3 рази. Дана технологія використовується для обробки м'яких та в'язких, так і неметалевих матеріалів [7, 8].

Теоретично обґрунтовано вплив електромагнітного поля дискретних поверхонь на процеси тертя та зношування трибосистеми [9]. Показано, що на кромках дискретних ділянок (лунок) буде виникати найбільша напруженість магнітного поля, у порівнянні з виступами нерівностей поверхні тертя у між лу-

нковому просторі. В результаті на них будуть накопичуватися парамагнітні частки (продукти деструкції масла) і продукти зношування (феромагнетики), які притягуються до магнітного поля з найбільшим градієнтом напруженості. Ці процеси будуть сприяти вилученню часток з поверхні тертя, їх накопичуванню на кромках лунок, що запобігатиме виникненню недопустимих процесів пошкодження поверхневого шару у між лунковому просторі в місцях фактичного контакту. Але ці твердження потребують експериментальної перевірки.

У зв'язку з вищевикладеним наукові дослідження магнітних явищ у трибоконтракту з дискретними поверхнями є актуальними. Крім того, необхідно відмітити, що дослідження магнітних явищ у дискретних поверхнях в літературі майже відсутні.

### Мета дослідження

Дослідження магнітних явищ у трибосистемах з текстурованими лунковими поверхнями та їх вплив на закономірності зношування в умовах граничного мащення.

### Методика досліджень

Дослідження напруженості магнітного поля здійснювали на виготовленому макеті за допомогою приладу вимірювання магнітної індукції – тесламетра ЭМ4305/1 (клас точності 2,5). Для виготовлення зразків, на поверхні яких формувалися дискретні ділянки (лунки), використовували сталі 30, 45, 30ХГСА, 14Х17Н2 та чавун. Робоча поверхня зразків шліфувалася до  $R_a = 0,32$  мкм.

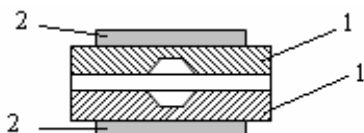


Рис. 1 – Схема пристосування для дослідження напруженості магнітного поля дискретних поверхонь:  
1 – зразки з дискретними ділянками;  
2 – пластини постійного магніту

Дослідження впливу постійного магнітного поля на діелектричну проникність  $\epsilon$  і тангенс кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  мінерального масла МК-8 проводили за допомогою триелектродного ємнісного перетворювача в діапазоні температур 293–423К зі швидкістю нагрівання зразка два градуси за хвилину. Вибір  $\epsilon$  і  $\text{tg}\delta$  для досліджень обумовлений їх високою чутливістю, що значно перевищує широко відомі властивості, як густина, в'язкість, показник заломлення та ін., які широко застосовуються у фізико-

хімічному аналізі. Вимірювання  $\epsilon$  і  $\text{tg}\delta$  проводили автоматичним мостом змінного струму Е8-4. Похибка вимірювання ємності конденсатора  $C$  становила  $\Delta C = 0,001C + 0,02n\Phi$  і  $\text{tg}\delta = \pm (0,02\text{tg}\delta + 5 \cdot 10^{-4})$ .

Тангенс кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  знаходили за формулою:

$$\text{tg}\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

де  $\epsilon'$  і  $\epsilon''$  – дійсна та уявна діелектрична проникність відповідно.

Комплексна діелектрична проникність  $\epsilon$  визначалась ємністю конденсатора:

$$C = \epsilon \cdot C_0,$$

де  $C_0$  – ємність вакуумного конденсатора.

### Результати досліджень та їхній аналіз

На рис. 2 представлені результати досліджень напруженості магнітного поля поверхні з дискретними ділянками.

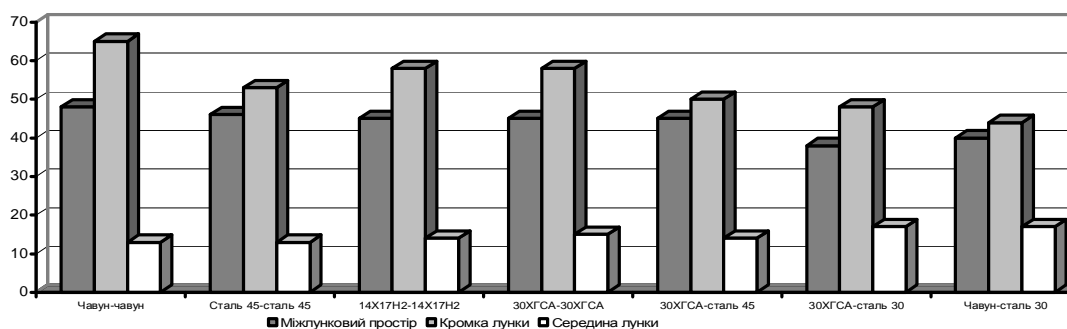


Рис. 2 – Залежність напруженості магнітного поля на поверхні контакту зразків з дискретними ділянками

Встановлено, що на кромках лунок напруженість магнітного поля різко збільшується і в залежності від пари контакту на 10 - 26 % вища, у порівнянні з напруженістю магнітного поля у між лунковому просторі, яка становить 44 - 65 мТл. Поза межами кромки (у лунці) величина напруженості магнітного поля різко зменшується до 13 - 17 мТл.

Загальна картина розподілу напруженості магнітного поля на поверхні дискретної ділянки (на підставі рис. 3) представлена на рис. 3 а. Інша картина спостерігається в процесі зношування дискретної ділянки, коли кромки лунок поступово згладжуються. В результаті досліджень встановлено, що величина напруженості магнітного поля на зношених кромках падає до величини напруженості магнітного поля між лункового простору (рис. 3, б).

Отримані результати підтверджують теоретичне обґрунтування впливу магнітного поля дискретних ділянок на процеси тертя та зношування трибосистеми [9]. Тому можна стверджувати, що продукти зношування (феромагнетики) будуть концентруватися (контактувати) спочатку з великими виступами на поверхні (кромками лунок), які є концентратором найбільших магнітних силових ліній, у порівнянні з шорсткістю поверхні у між лунковому просторі (рис. 4). Кожна частка продуктів зношування у магнітному полі буде направлена до вершини кромки лунки більшою віссю. В залежності від навантаження пари тертя, швидкості ковзання та інших факторів здійснюється зношування вершин кромок лунок і затуплення вершин частинок зношування та їх переорієнтація таким чином, щоб знову створена найбільша вісь направлялася уздовж найбільших магнітних силових ліній. Тобто здійснюється механічне зношування (згладжування) виступів кромок лунок і частинок продуктів зношування на субмікроскопічному (нано) рівні. При зношуванні кромок лунок силові лінії магнітного поля зменшуються до величини напруженості магнітного поля у між лунковому просторі і продукти зношування в подальшому вилучаються у лунки. Ці процеси дозволяють усунути ймовірність появи у зоні тертя критичних навантажень і температур та запобігатиме виникненню недопустимих процесів пошкодження поверхневого шару у між лунковому просторі в місцях фактичного контакту та покращити триботехнічні характеристики пар тертя.

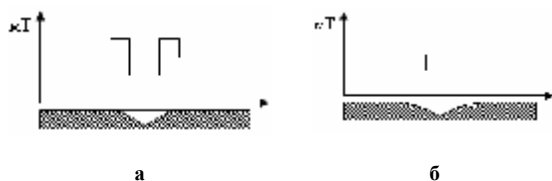


Рис. 3 – Загальна картина зміни величини напруженості магнітного поля на поверхні дискретної ділянки:  
а – вихідний розмір дискретної ділянки;  
б – після зношування кромок дискретної ділянки

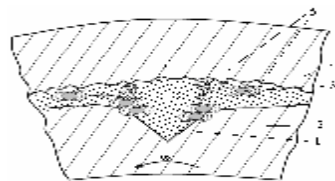


Рис. 4 – Фізична модель зношування окремої дискретної ділянки в умовах граничного мащення:  
1 – лунка; 2 – контртіло; 3 – продукти зношування;  
4 – зразок; 5 – лінії магнітного поля

Це підтверджуються даними, отриманими в результаті проведення експериментальних досліджень дискретних поверхонь в умовах граничного мащення. Встановлено високу зносостійкість текстурованих лункових поверхонь як без, так і додатково зміцнених методом іонно-плазмового термоциклічного азотування (ПТА). Вони перевищують зносостійкість сталей 45 у 3,1 - 5,3 рази і 30ХГСА - 1,9 - 3,25 рази, сталі 30ХГСА, поверхневий шар якої зміцнений методом ПТА у 1,3 - 2,3 рази [9]. Також покращились умови припрацювання пар тертя з дискретними поверхнями. Встановлено зменшення як тривалості припрацювання, так і величини коефіцієнта тертя зразків з дискретними поверхнями [10, 11].

В роботі [12] показано, що характер розподілу температури на дискретній поверхні по глибині практично однаковий. Розкид температур становить 4 - 10 °С. Найбільша температура спостерігається в зоні трибоконтакту біля лунок і становить 30 - 95 °С в залежності від тимчасового інтервалу. Температурне поле у між лунковому просторі носить випадковий характер, оскільки джерелами нагрівання є мікронерівності на контактуючих поверхнях, які мають різну мікрогеометрію і твердість. При високій якості обробки поверхні щільність розташування мікронерівностей надзвичайно висока і одночасно в контакт вступають приблизно 100 - 1000 мікронерівностей на 1 мм. При вказаній щільності розташування мікронерівностей тривалість існування температурного спалаху складає  $10^{-1}$  -  $10^{-8}$  с (при швидкості тертя 10 м/с) [13]. Випадковий характер розташування мікронерівностей в сукупності з неоднорідністю властивостей поверхневого шару, зокрема, твердості і мікродфектів структури, приводить до того, що розподіл температур у мікронерівностях також є випадковим. У процесі тертя спалахи температур відводяться у лунковий простір і у глибину матеріалу основи. Різниця температур у лунці і на поверхні трибоконтакту забезпечує постійне відведення тепла із зони тертя, що запобігає інтенсифікації процесів руйнування поверхневого шару елементів трибоконтакту.

Значний вклад у покращення триботехнічних властивостей пар тертя забезпечують мастильні матеріали. Вуглеводні мастильні матеріали являють собою неполярні рідкі діелектрики з розведеними в них полярними молекулами невеликої концентрації. неполярні рідини, в яких основну роль відіграє поляризованість електронного зсуву, мають невисоку діелектричну проникність в межах  $\epsilon = 1,8 - 2,5$ .

Діелектрична проникність і тангенс кута діелектричних втрат вуглеводневих рідин залежать від температури. Мазильні матеріали можна розглядати як розчин кисневих, сірчистих, азотистих та інших

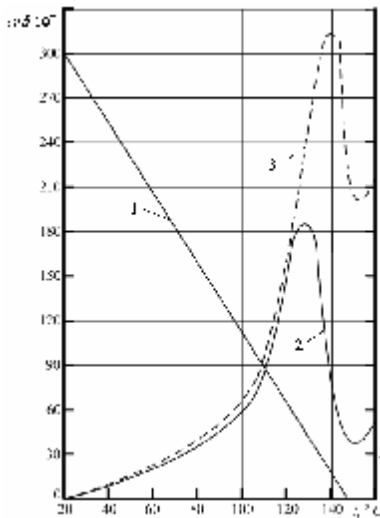


Рис. 5 – Залежність діелектричної проникності  $\epsilon'$  і тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  мінерального масла МК-8 від температури і магнітного поля:  
1 –  $\epsilon'$ ; 2 –  $\text{tg}\delta$ ;  
3 –  $\text{tg}\delta$  після впливу магнітного поля

з'єднань у вуглеводному середовищі. У певних умовах при підвищенні температури і взаємодії з киснем нестабільні вуглеводні і гетерогенні органічні сполуки окислюються, що призводить до збільшення їх молекулярної ваги, а отже і до зміни діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат.

Продукти деструкції мазильних матеріалів (парамагнетика) завжди полярні і мають значний дипольний момент. Ці частинки несуть, як правило, певний електромагнітний заряд. Дослідження, проведені з мазильними матеріалами, показали, що діелектрична проникність мазильних матеріалів залежить від температури і з її підвищенням лінійно зменшується, що повністю узгоджується з теорією діелектриків [14]. При нагріванні масла розширюються, внаслідок чого на одиницю об'єму виявляється менше молекул і діелектрична проникність рідини падає (рис. 5).

Особливого розгляду заслуговує залежність тангенса кута діелектричних втрат мазильних матеріалів. Температура, склад суміші та хімічні властивості мазильних матеріалів впливають на стабільність утворення вільних радикалів і напрямок окисного процесу в цілому [15]. Як видно з рис. 5 залежність  $\text{tg}\delta$  від температури масла МК-8 має екстремальний характер, який проявляється в діапазоні температур 373 - 423 К. Завдяки різному впливу складу мазильних матеріалів на процес їх окислення із зростанням температури вище певної межі, спостерігається зниження швидкості окислення і в певному інтервалі швидкість зміни тангенса кута діелектричних втрат має від'ємне значення. Таким

чином, із зростанням температури швидкість утворення полярних з'єднань у визначеному інтервалі температур зменшується. При подальшому підвищенні температури відбувається різке збільшення  $\text{tg}\delta$ , тобто середня швидкість окислення масла приймає позитивне значення і збільшення  $\text{tg}\delta$  збільшується. Тобто, можна стверджувати, що при підвищенні температури молекули набувають теплову енергію і отримують можливість орієнтуватися в електромагнітному полі, що призводить до появи дипольно-орієнтаційної поляризації. По мірі звільнення молекул дипольно-орієнтаційна поляризація зростає з температурою. Потім, коли всі молекули набувають можливість орієнтуватися в електромагнітному полі, дипольно-орієнтаційна поляризація проходить через максимум. При подальшому зростанні температури дипольно-орієнтаційна поляризація зменшується через те, що тепловий рух заважає молекулам орієнтуватися в електромагнітному полі.

Екстремальний характер температурної залежності швидкості утворення продуктів окислення відзначався в літературі [16]. Можливою причиною даного ефекту є екстремальна температурна залежності швидкості реакції зародження ланцюгів по гомогенному механізму.

Таким чином, вплив магнітного поля на мазильні матеріали, при якому відбувається поглинання енергії магнітного поля, створює сприятливі умови для переходу молекул у збуджений стан утворюючи при цьому міжмолекулярні асоціати і комплекси, які сприяють збільшенню швидкості окислення мазильних матеріалів в об'ємі рідкої фази.

З отриманих даних видно, що після впливу магнітного поля діелектричні втрати в кілька разів збільшуються, залишаючись практично незмінними при кімнатній температурі. Різке збільшення тангенса кута діелектричних втрат при зростанні температури мазильних матеріалів можна пояснити, очевидно, формуванням іон-радикальних комплексів і комплексів з переносом заряду, що сприяє збільшенню релаксаційних втрат за рахунок збільшення числа дипольних молекул і слабо зв'язаних іонів.

## Висновки

1. Експериментальними дослідженнями встановлено, що найбільша напруженість магнітного поля виникає на кромках лунок дискретної поверхні, яка на 10 - 26 % вища, у порівнянні з величиною напруженості магнітного поля у між лунковому просторі. В процесі зношування дискретної поверхні, коли кромки лунок поступово згладжуються, напруженість магнітного поля на зношених кромках падає до величини напруженості магнітного поля між лункового простору.

2. Встановлено закономірності впливу напруженості магнітного поля на триботехнічні характеристики поверхонь з дискретно - орієнтованою структурою в умовах граничного мащення, яка забезпечує вилучення з поверхні трибоконтракту парамагнітних і феромагнітних часток і тим самим



запобігатиме виникненню недопустимих процесів пошкодження поверхневого шару у між лунковому просторі в місцях фактичного контакту. Це підтверджуються даними, отриманими в результаті проведених експериментальних досліджень дискретних поверхонь в умовах граничного мащення.

3. Встановлено зменшення температури в зоні трибоконтакту з дискретними поверхнями, що дозволяє усунути ймовірність появи у зоні тертя критичних навантажень і температур та запобігатиме виникненню недопустимих процесів пошкодження поверхневого шару у між лунковому просторі в місцях фактичного контакту, покращити триботехнічні властивості пар тертя за рахунок їх відведення у лунки.

4. Проведені дослідження впливу постійного магнітного поля на діелектричну проникність і тангенс кута діелектричних втрат масла МК-8. Встановлено, що у певних умовах при підвищенні температури і взаємодії з киснем нестабільні вуглеводні і гетерогенні органічні сполуки окислюються, що призводить до збільшення їх молекулярної ваги, а отже і до зміни діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат.

### Література

1. Канарчук В.Е. Исследование противоизносных свойств топлив и масел после ЕФВ / В.Е. Канарчук, В.И. Морозов, Н.Н. Дмитриев // Эксплуатация автомобильной техники : межвузов. науч.-техн. зб. – М.: МАМИ, 1991.
2. Краля В.А. Влияние магнитного поля на износ  $\alpha$  - железа при фреттинг-коррозии / В.А. Краля, В.И. Морозов // Материалы IV научно-технической конференции. – Эксплуатационные свойства топлив, смазочных материалов и спецжидкостей. – К., 1977.
3. Малыгин Б.В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин / Б.В. Малыгин – М. : Машиностроение, 1989. – 120 с.
4. Малыгин Б.В. Магнитное упрочнение изделий (теория и практика) / Б.В. Малыгин, А.П. Бень. – Херсон: Изд-во ХГМИ, 2009. – 352 с.
5. Макаренко А.С. Влияние электромагнитного поля, проходящего через зону фрикционного контакта, на износ при высокоскоростном трении / А.С. Макаренко, В.Д. Евдокимов // Проблемы техники : научно-виробничий журнал. – Одеса: Диол-Принт, 2005. – №1. – С. 77-84.
6. Голего Н.Л. Фреттинг-коррозия / Н.Л. Голего, А.Я. Алябьев, В.В. Шевеля – К. : Техніка, 1974. – 272 с.
7. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущегося инструмента / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.
8. Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич – Мн.: Наука и техника, 1981. – 328 с.
9. Марчук В.Є. Зносостійкість текстурованих лункових поверхонь з дискретно-орієнтованою структурою в умовах граничного мащення / В.Є. Марчук, О.І. Духота, В.І. Морозов //Проблеми тертя та зношування : наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2012. – Вип. 57. – С. 128-138.
10. Марчук В.Є. Дослідження зносостійкості електроіскрових покриттів в умовах фреттинг-зношування / В.Є. Марчук, О.І. Духота, Н.О. Науменко // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 56. – С. 84-93.
11. Фретингостійкість дискретних поверхонь в умовах граничного тертя [Марчук В.Є., Духота О.І., Градиський Ю.О., Снін О.М.] // Вісник Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка. – Харків: Вид-во Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка, 2010. – Вип. 100. – С. 147-152.
12. Цыбанев Г. В. Управление свойствами поверхностей трения при приработке дискретных покрытий в условиях фреттинга / Г.В. Цыбанев, В.Е. Марчук, В.И. Калиниченко // Проблемы трибологии. – 2011. – №1. – С. 52-57.
13. Корндорф С.Ф. Исследование возможности определения всплесков температуры в зоне трения, используя нормальный закон распределения значений температуры / С.Ф. Корндорф, Е.В. Кузнецова // Физика, химия и механика трибосистем. Межвуз. сб. науч. тр.; Под ред. В.Н. Латышева. – Иваново: Иван.гос.ун-т, 2005. – Вып. 4. – С. 56-60.
14. Богородицкий Н.П. Теория диэлектриков / Н.П. Богородицкий, Ю.М. Волокобинский, А.А. Воробьев, Б.М. Тареев – М.: Энергия, 1965. – 341 с.
15. Третьяков И.Г. Влияние примесей дизельного топлива и бензина на диэлектрические потери топлива РТ / И.Г. Третьяков, В.И. Морозов // Исследование процессов подготовки, применения и контроль качества ГСМ и спецжидкостей : зб. науч. праць. – К., 1988. – С. 40-43.
16. Браткова А.А. Теоретические основы химмотологии / Браткова А.А. – М.: Химия, 1985. – 320 с.

Надійшла 24.10.2012