

Аулін В.В.Кіровоградський національний технічний
університет
м. Кіровоград, Україна**ВПЛИВ МОДИФІКУЮЧИХ ФІЗИЧНИХ
ПОЛІВ НА СТРУКТУРУ ТА РЕОЛОГІЧНІ
ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНОЇ
МОТОРНОЇ ОЛИВИ****Вступ**

Додавання присадок до оливи є процесом формування композиційної оливи, яка є дисперсною системою, принаймні двох фаз [1]. Композиційні оливи володіють складними реологічними властивостями. Вважається, якщо реологічні властивості кожної з їх фаз є відомими, то задача буде полягати у визначенні властивостей суміші цих фаз [2], тобто композиційної оливи в цілому. При цьому вона характеризується пружністю, міцністю і в'язкістю, може змінюватися як реологічна константа (в'язкість) оливи, так і закон деформації [3, 4]. Реологічні константи таких дисперсних систем дозволяють говорити про структуру композиційних олив та взаємодію в ній частинок присадки, залежно від їх складу та концентрації [5].

Зазначене свідчить, що реологія є не тільки важливим елементом оптимізації технологічних процесів приготування композиційних олив, розробці способів їх транспортування, спрацювання в процесі обкатки та експлуатації, але одним з основних фізико-хімічних та трибологічних методів експериментальних досліджень композиційних олив як дисперсних середовищ та вплив їх на робочі поверхні деталей трибоспряджень двигуна [6, 7]. В зв'язку з цим є необхідність уточнення та розвитку теоретичних уявлень про вплив зовнішніх фізичних полів та вмісту присадок в композиційній моторній оливі на її структуру та реологічні властивості.

Постановка задачі

Теоретично обґрунтувати зміну структури та реологічних властивостей моторних олив при їх модифікуванні додаванням присадки та обробкою фізичними полями.

Кількісна теорія передусім спирається на моделюванні досліджуваних процесів та структурних змін в композиційній оливі. Тому для спрощеного аналізу дисперсної системи оливи приймемо, що частинки присадки зважені в базовій оливі, розташовані на однаковій відстані між собою і не змочуються нею та мають сферичну форму. Кожна з таких частинок переміщується зі швидкістю потоку оливи в тій площині, в якій лежить її центр (рис. 1, а).

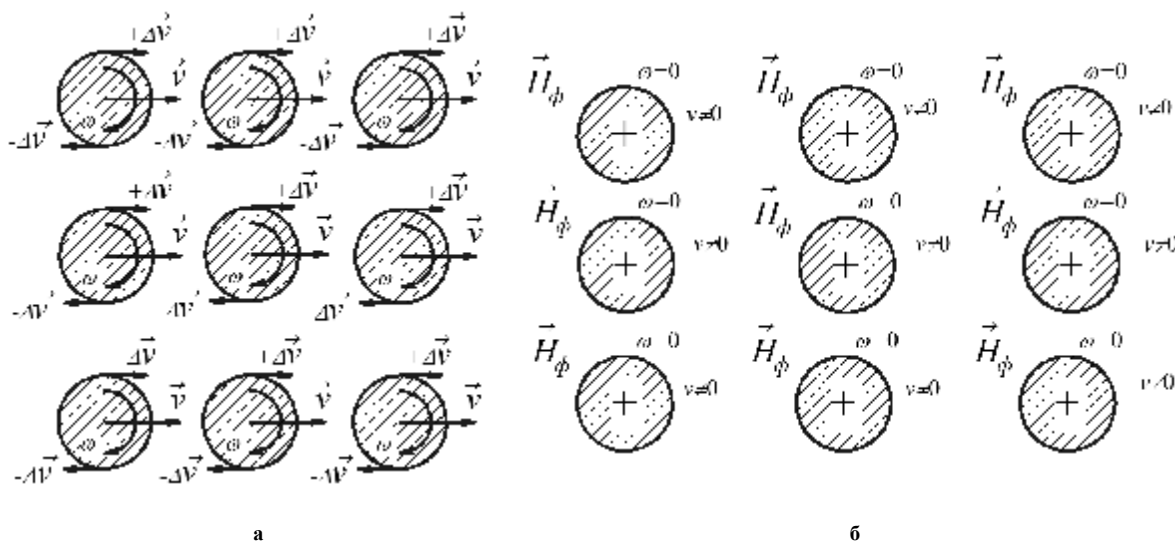


Рис. 1 – Рух частинок присадки у зсувному потоці оливи без накладання зовнішніх полів (а) та з їх накладанням (б)

Зазначимо, що основною задачею теоретичної реології є встановлення зв'язку між напруженням в дисперсній системі τ , і швидкістю її деформації $\dot{\epsilon}$ [2]. Найпростіша загальна схема розв'язку цієї задачі базується на адитивності дисипації енергії в різних елементах дисперсної системи: в самому дисперсному середовищі (композиційна олива); його основі (базова олива); на окремих його фазах (частинка присадки) та елементах структури (композиції частинок присадки). При цьому, перш за все необхідно

знати дисипативну функцію Φ , яка визначає опір деформації основи (базової оливи) і дає можливість встановити закон деформації:

$$\Phi = \eta \dot{\gamma}^2, \quad (1)$$

де Φ – втрата енергії на подолання сил тертя (дисипація) в одиниці об'єму деформованого матеріалу оливи в одиницю часу;

$\dot{\gamma} = d\gamma / dt$ – швидкість деформації;

η – динамічна в'язкість оливи.

Для цього найпростішого випадку закон Ньютона має вигляд:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} = \Phi / \dot{\gamma}, \quad (2)$$

де $\eta = \tau / \dot{\gamma}$ – ньютонівська в'язкість, яка не залежить від напруження зсуву і швидкості деформації, тобто є постійним коефіцієнтом.

Якщо композиційні оливи являють собою стійку розбавлену дисперсну систему, то взаємодію частинок присадок в ній можна знехтувати. Поведінка кожної окремої частинки присадки в потоці рідини є незалежною і дисипацію енергії в системі можна знайти простим підсумуванням втрат енергії на окремих частинках присадки композиційної оливи.

В площинах, що знаходяться на відстані радіусу від центру частинки присадки, швидкість оливи відрізняється на величину:

$$\pm \Delta v = 0,5 \dot{\gamma} \bar{d},$$

де \bar{d} – усереднений діаметр частинки. При цьому частинка присадки крім поступального руху здійснює обертальний рух зі швидкістю $\omega_c = 0,5 \dot{\gamma}$.

Дисипація енергії в такому середовищі відбувається в наслідок тертя поверхні частинки присадки в середовищі оливи, що її охоплює, при обертальному русі. При поступальному русі, оскільки центр частинок нерухомий відносно потоку, то дисипація енергії відсутня.

Частинка присадки середнім об'ємом \bar{V}_c при обертанні з кутовою швидкістю ω_c в середовищі оливи в'язкістю η_c , зазнає дії моменту сил тертя:

$$M_\omega = P_\phi \bar{V}_c \eta_c \omega_c^2, \quad (3)$$

де P_ϕ – фактор форми частинки. Для сферичних частинок ($P_\phi = 6$), маємо:

$$M_\omega = 2\pi \bar{d}^3 \eta_c \omega_c^2 = 8\pi \bar{d} \eta_c v^2, \quad (4)$$

де v – швидкість руху потоку оливи з частинками присадки;

η_c – в'язкість середовища композиційної оливи.

Враховуючи (3) і вираз для кутової швидкості частинки присадки, потужність на підтримку її обертання дорівнює:

$$\Phi_1 = 0,25 P_\phi \bar{V}_c \eta_c \dot{\gamma}^2, \quad (5)$$

а для сферичної форми частинок маємо:

$$\Phi_1 = 0,5\pi \bar{d}^3 \eta_c \dot{\gamma}^2.$$

Відповідно при концентрації сферичних частинок n_c ця величина складає:

$$\Phi = 0,5\pi \bar{d}^3 n_c \eta_c \dot{\gamma}^2. \quad (6)$$

Оскільки $n_c V_c = c_v$ – об'ємна частка (вміст) присадки в оливі, то отримаємо:

$$\Phi = 1,5 c_v \eta_c \dot{\gamma}^2. \quad (7)$$

В базовій оливі, як середовищі, що підлягає деформації зі швидкістю $\dot{\gamma}$, дисипація в одиниці об'єму дорівнює $\eta_c \dot{\gamma}^2$, а дисипація композиційної оливи становить:

$$\Phi = \eta_c \dot{\gamma}^2 + 1,5 c_v \eta_c \dot{\gamma}^2 = \eta_c \dot{\gamma}^2 (1 + 1,5 c_v). \quad (8)$$

Враховуючи (2), опір зсуву композиційної оливи дорівнює:

$$\tau = \eta_c (1 + 1,5 c_v) \dot{\gamma}, \quad (9)$$

Якщо частинки присадки мають сферичну форму, то в'язкість композиційної оливи дорівнює:

$$\eta = \tau / \dot{\gamma} = \eta_c (1 + 1,5 c_v). \quad (10)$$

Використовуючи модель Ейнштейна для дисперсного середовища [2] в'язкість композиційної оливи з сферичними частинками присадки дорівнює:

$$\eta = \eta_c \left[1 + 1,5c_v \frac{\eta_i + 0,4\eta_c}{\eta_i + \eta_c} \right], \quad (11)$$

де η_i – в'язкість матеріалу присадки.

Дослідження [8, 9] показують, що в'язкість композиційної оливи невзаємодіючих частинок присадки не залежить від їх розміру. Така дисперсна система є ньютонівською рідиною ($c_v = \text{const}$, $\eta = \text{const}$).

Якщо дисперсна фаза є частинками присадки і $\eta_i < \eta_c$, то потік композиційної оливи гальмується, а в'язкість збільшується, тобто спостерігаються неньютонівські властивості композиційної оливи внаслідок залежності орієнтації частинок від Φ .

Якщо на потік композиційної оливи накласти зовнішнє фізичне поле (електричне, магнітне, електромагнітне та ін.), то композиційна олива структурується, маючи переважну орієнтацію частинок присадки відносно напрямку поля і можна компенсувати обертання частинок, тобто $\Delta v = 0$ (рис. 1, б).

Зазначимо, що в'язкість композиційної оливи за моделлю Ейнштейна формула (11) не враховує наявність на поверхні частинок присадки обволікаючої оболонки базової оливи та різного роду захисних оболонок: подвійного іонного, адсорбційного, сольватного шарів. Але в межах моделі Ейнштейна це можна врахувати, додаючи до об'єму частинок присадки об'єм захисних чи обволікаючих оболонок товщиною $\bar{\delta}$. Якщо оболонка тонка $\bar{\delta} \ll \bar{d}$, то вміст таких частинок присадки в моторній оливі можна уточнити за виразом:

$$c_{v\delta} \cong c_v (1 + 6\bar{\delta}/\bar{d}). \quad (12)$$

В цьому випадку в'язкість η зростає лінійно із збільшенням дисперсності частинок $1/\bar{d}$:

$$\eta_\delta = \eta_c \left[1 + 1,5c_v \left(1 + \frac{6\bar{\delta}}{\bar{d}} \right) \left(\frac{\eta_i + 0,4\eta_c}{\eta_i + \eta_c} \right) \right]. \quad (13)$$

Моделю Ейнштейна можна поширити і на більш концентровані стійкі дисперсні системи мастильних середовищ, оливи можна розглядати як розчинник, в який додатково введена мала dc_v кількість дисперсної фази (присадки):

$$\eta + d\eta = \eta(1 + 2,5dc_v). \quad (14)$$

Оскільки $\eta = \eta_c$, то

$$\eta = \eta_c \exp(2,5c_v) \approx \eta_c \left(1 + \sum_{i=1}^n \beta_i c_v^i \right), \quad (15)$$

де β_i – коефіцієнт розкладу в степеневий ряд. Якщо $\beta_1 \approx 2,5$, то система залишається ньютонівською, а в інших випадках – вона проявляє неньютонівський характер властивостей.

Використовуючи модель Ейнштейна, можна пояснити зміну в'язкості композиційної оливи, спостережувану при дії електричного, магнітного, електромагнітного, або інших фізичних полів, за структурованістю дисперсної фази в них.

Механізм зміни в'язкості композиційних олив, з урахуванням змочуваності оливою частинок присадки при накладанні фізичних полів можна уявити наступним чином (рис. 2, а).

У відсутності зовнішнього фізичного поля частинка присадки вільно пересувається між двома площинами зсуву оливи, які дотикаються до її поверхні і рухаються з швидкостями $\Delta v = 0,5\bar{d}\dot{\Phi}$ і $\Delta v = -0,5\bar{d}\dot{\Phi}$. В такому наближенні шари рідини не проковзують відносно поверхні частинки присадки і не гальмуються нею. При накладанні фізичного поля частинки присадки, маючи постійний дипольний момент, жорстко зв'язаний з ними зорієнтовуються вздовж поля і будуть утримуватимуться ним від обертання (рис. 2, б). Це приведе до проковзування шарів рідини відносно поверхні нерухомої частинки присадки і їх гальмування, до зміни в'язкості системи і форми оливної оболонки навколо частинок. У випадку магнітного поля вона дорівнює:

$$\eta = \eta_c (1 + 4c_{v\delta}). \quad (16)$$

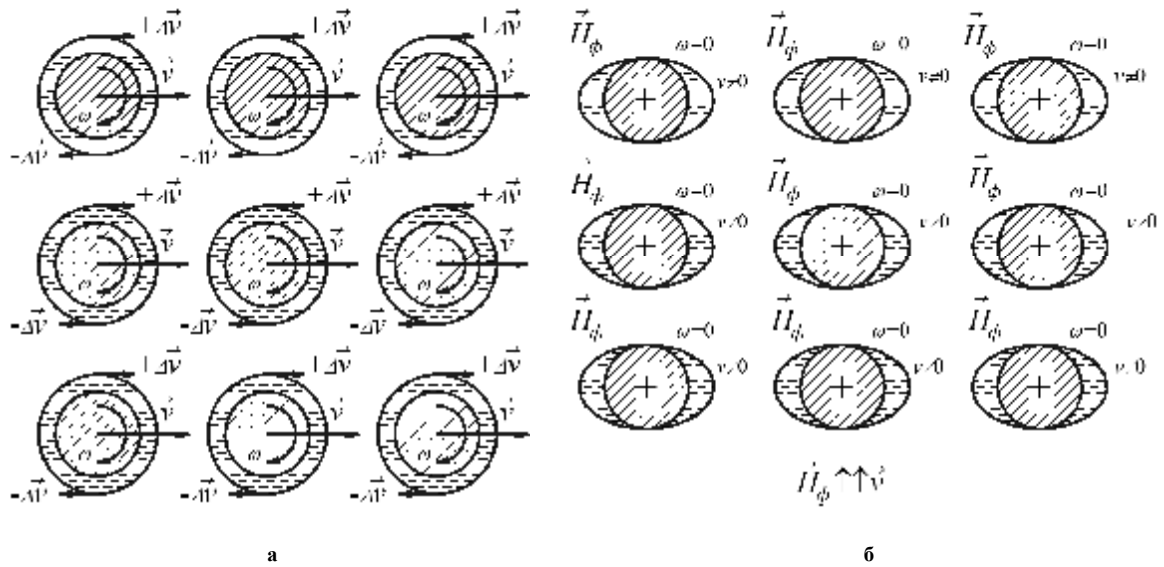


Рис. 2 – Рух частинок присадок з обволаючими оболонками у зсувному потоці оливи без накладання зовнішнього фізичних полів ($\vec{H}_\phi = 0$) (а) та з його накладанням ($\vec{H}_\phi \neq 0$) (б)

Обертання частинок присадки може повністю припинитися при умові, що величина крутного моменту сил в'язкого тертя буде менше максимуму орієнтуючого моменту зовнішнього поля, тобто для сферичних частинок присадки маємо:

$$M_{\text{ч}, H_\phi} > 3\eta_c \Phi, \quad (17)$$

де $M_{\text{ч}, H_\phi}$ – крутний момент сил в'язкого тертя, для напруженості H_ϕ фізичного поля.

У зв'язку з цим, обертальна в'язкість досліджуваних композиційних оливи залежить від концентрації присадки і є причиною появи їх неньютоновських властивостей, наприклад у випадку слабomagнітних присадок та слабких полів (геомагнітне) і високої в'язкості η_c . Умова (17) може порушуватися при помірних швидкостях зсуву композиційної оливи, оскільки при цьому в деякій мірі зникне орієнтуюча дія поля і зменшить його вплив на в'язкість.

Згідно формули (16), додаткова дисипація енергії в фізичному полі Φ_{H_ϕ} , обумовлена повним гальмуванням обертання частинок, $\Phi_H = 1,5c_{V_s} \eta_c \Phi^2$. При цьому загальна дисипація Φ дорівнює:

$$\Phi = \eta_c (1 + 2,5c_{V_s}) \Phi^2 + \Phi_H (\Phi)^2. \quad (18)$$

За таких умов в рівнянні обертального руху частинки присадки:

$$\omega - \frac{d\alpha}{dt} = \omega_\phi \sin \alpha, \quad (19)$$

де α_0 – кут між дипольним моментом $\vec{P}_{\text{мч}}$ частинки і напрямом плинину потоку \vec{v} ;

відсутність повного гальмування враховується швидкістю повороту частинки присадки $d\alpha/dt$, яка залежить від кута α між дипольним моментом $\vec{P}_{\text{мч}}$ частинки і напруженістю фізичного (електричного, магнітного, електричного та ін.) поля \vec{H}_ϕ ;

Розв'язок рівняння (19) являє собою залежність часу t повороту частинок присадки на деякий кут $\alpha - \alpha_0$ від початкового положення:

$$t = \frac{2}{(\omega^2 - \omega_\phi^2)^{0,5}} \left[\arctg \frac{\omega \cdot \text{tg}(\alpha/2) - \omega_\phi}{(\omega^2 - \omega_\phi^2)^{0,5}} - \arctg \frac{\omega \cdot \text{tg}(\alpha_0/2) - \omega_\phi}{(\omega^2 - \omega_\phi^2)^{0,5}} \right], \quad (20)$$

де $\omega = 0,5\Phi$;

$\omega_\phi = M_{\text{ч}, H} / (\pi \eta_c \bar{d}^3)$.

При відсутності дії зовнішнього фізичного поля на оливу: $H=0$; $t = t_0 = 2\pi / \omega$.

При впливі фізичного поля час повороту частинок присадки в потоці оливи складе:

$$t = \frac{2\pi}{\omega} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\omega_{\phi}^2}{\omega^2} \right). \quad (21)$$

Отже спостерігається час запізнювання частинок по їх обертанню. З урахуванням (21), маємо:

$$\Delta t = t - \frac{2\pi}{\omega} = \frac{\pi\omega_{\phi}^2}{\omega^3} = \frac{2\pi\phi_{\phi}^2}{\phi^3}. \quad (22)$$

Можна вважати, що частинки присадки за час Δt під дією фізичного поля можуть припинювати обертання, внаслідок чого і з'являється запізнення. Протягом цього проміжку часу додаткове розсіяння енергії буде практично таким як при повному гальмуванні обертання: $\phi_{H_{\phi}} = 1,5c_{V_8} \eta_c \phi^2$, а середня за період швидкість дисипації енергії $\bar{q}_{H_{\phi}} = 0,75c_{V_8} \eta_c \phi^2$ – не залежить від швидкості зсуву. Це означає, що в зовнішньому фізичному полі, при $\phi > \phi_{\phi}$, структурна частина опору $\tau_{H_{\phi}}$ і в'язкість $\eta_{H_{\phi}}$ знижуються із зростанням ϕ , асимптотично наближаючись до величин τ і η , що відповідає відсутності зовнішнього поля:

$$\tau = \eta_c \left(1 + 2,5c_{V_8} \right) + 0,75\eta_c c_{V_8} \left(\frac{\phi_{\phi}^2}{\phi} \right); \quad (23)$$

$$\eta = \eta_c \left[1 + \left(5 + 3 \frac{\varepsilon - \text{th}(\alpha - \alpha_0)}{\varepsilon + \text{th}(\alpha - \alpha_0)} \sin^2(\alpha - \alpha_0) \right) \frac{c_{V_8}}{2} \right], \quad (24)$$

де ε – відносна деформація композиційної оливи.

Зазначимо, що згідно ідеї Ребіндера [2] зміну в'язкості може спричинити зміна структури в потоці оливи. У випадку композиційної оливи структуроутворення полягає у фіксації орієнтації частинок присадки в оливі, а руйнування структури – в переході до некогерентного обертання цих частинок потоком оливи.

У композиційних оливах основним структуроутворюючим фактором є вплив зовнішніх фізичних полів, а дезорієнтуючим фактором є обертова дифузія частинок присадки, яка враховується в теорії, розробленій Шлюмісом [10].

Причиною зміни в'язкості композиційної оливи може бути і анізотропія поляризованості (намагніченості) частинок присадки, а також будь-які інші чинники, що впливають та фіксують її орієнтацію. До таких факторів можна віднести і гідростатичні диполі – агрегати із частинок присадок різної густини, які в оливі будуть орієнтовані важкою частинкою вниз [5].

Слід мати на увазі і те, що дисперсна система зважених частинок у діелектричному середовищі оливи, якщо вона є неполярною рідиною може при достатньо високих напруженостях електричного поля переносити струм між електродами за рахунок контактної або безконтактної перезарядки частинок присадки у зонах прилеглих до електродів. Частинки присадки при цьому будуть безперервно циркулювати в оливі від електроду до електроду, а створена композиція переходить в псевдозріджений стан.

Крім цього має місце циркуляційна в'язкість коли швидкість частинок присадки вздовж потоку незмінна в просторі і часі і відрізняється на величину Δv від швидкості того шару в якому знаходиться. Під дією фізичного поля в такому випадку спостерігається прискорення частинки присадки $a = \dot{\phi} = \omega \phi$. Сила, що викликає прискорення, чисельно дорівнює силі гальмування шару, в якій переходить частинка з усередненою масою \bar{m}_q . При цьому швидкість розсіяння енергії $\dot{\phi}$ на одній частинці присадки дорівнює добутку сили $F_{mp} = 3\pi\eta_c \bar{d} \Delta v$ на шлях, який частинка проходить відносно свого шару оливи за 1 с: $\dot{\phi} = 3\pi\eta_c \bar{d} (\Delta v)^2$. Швидкість дисипації енергії в одиниці об'єму, очевидно, дорівнює:

$$\dot{\phi} = n \dot{\phi}_1 = \frac{2c_{V_8} (\omega m_q \phi)^2}{\pi^2 \eta_c d^4} = \frac{8c_{V_8} (v m_q \phi)^2}{\pi^2 \eta_c d^6}. \quad (25)$$

Використовуючи це, зміну структурної частини опору композиційної оливи і її в'язкості, обумовлені циркуляцією частинок присадки між електродами, дорівнюють:

$$\Delta\tau = \frac{4c_{V_8} v^2 \bar{m}_c^2 \Phi}{\pi^2 \eta_c \bar{d}^6}; \quad (26)$$

$$\Delta\eta = \frac{4c_{V_8} v^2 \bar{m}_c^2}{\pi^2 \eta_c \bar{d}^6}. \quad (26)$$

З останніх формул видно, для композиційної оливи можна застосувати модель Ейнштейна, тобто – модель невзаємодіючих частинок присадки, але циркуляційна в'язкість є невеликою, оскільки:

$$\frac{12c_{V_8} m_c^2}{\eta_c \bar{d}^4} \ll 1.$$

Висновки

Розглянуті реологічні ефекти, що стосуються циркулярної, обертальної та ейнштейнівської в'язкості (при $\Phi < \frac{M_H}{3\eta_c}$) свідчать, що в'язкість композиційної оливи залишається незмінною до тих пір, поки не змінюється її структура. Зміна орієнтації частинок присадки у фізичних полях відбувається при $\Phi > \frac{M_H}{3\eta_c}$. Зазначимо, що орієнтація частинок присадки входить в число факторів, що визначають структуру такої дисперсної системи в процесі її модифікації обробкою фізичними полями.

Література

1. Аулін В.В. Фізико-хімічні процеси, що відбуваються в композиційній оливі при припрацюванні сполучень деталей / В.В. Аулін, С.В. Лисенко, О.В. Кузик // Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми триботехніки" 7 - 9 жовтня 2009 р. – Миколаїв: НУК, 2009. – С. 65-67.
2. Бибик Е.Е. Реология дисперсных систем / Е.Е. Бибик. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 172 с.
3. Mac Tagne J.P. – J. Chem. Phys., 1969. – Vol. 51. – P. 133-136.
4. Аулін В.В. Дослідження властивостей моторної оливи в процесі експлуатації дизелів / В.В. Аулін, С.В. Лисенко, О.В. Кузик // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво, експлуатація сільськогосподарських машин. – Вип. 39. – Кіровоград: КНТУ, 2009. – С. 274-280.
5. Hall W.F., Busenberg S.N. – J. Chem. Phys., 1969. – Vol. 51. – P. 137-144.
6. Аулін В.В. Зміна властивостей оливи при електрохімічному відновленні робочих поверхонь деталей дизелів / В.В. Аулін, С.В. Лисенко, М.Ф. Семенюк, О.В. Кузик // Проблеми трибології. – 2009. – №1. – С. 68-70.
7. Аулін В.В. Заміна технічного стану основних сполучень двигуна та моторної оливи в процесі його експлуатації / В.В. Аулін, С.В. Лисенко, О.В. Кузик // Проблеми трибології. – 2009. – №4. – С. 118-122.
8. Электрореологический эффект / Под ред. А.В. Лыкова – Минск: 1972. – 176 с.
9. Шульман З.П. Магнитореологический эффект / З.П. Шульман, В.И. Кордонский. – Под. ред. академика АНБССР Р.И. Солоухина. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 184 с.
10. Шлиомис М.И. Журн. exper. и теор. физики / М.И. Шлиомис. – 1971. – т. 61. – С. 2411-2418.

Надійшла 10.10.2012