

У статті наведена модель трибологічної системи при використанні рідких кристалів в якості присадок. Розроблена математична модель для визначення сили тертя і інтенсивності зношування трибосистем. Наведені результати випробувань трибосистем на машинах тертя при використанні рідкокристалічних присадок в базових оливах

Ключові слова: трибосистема, базова олива, рідкокристалічна присадка, мастильна здатність, тертя, зношування

В статье приведена модель трибологической системы при использовании жидких кристаллов в качестве присадок. Разработана математическая модель для определения силы трения и интенсивности изнашивания трибосистем. Приведены результаты испытаний трибосистем на машинах трения при использовании жидкокристаллических присадок в базовых маслах

Ключевые слова: трибосистема, базовое масло, жидкокристаллическая присадка, смазочная способность, трение, изнашивание

1. Вступ

При формуванні граничної плівки на поверхнях тертя первісним процесом є фізична адсорбція молекул мастильного матеріалу, як полярних, так й неполярних. Ще у першій половині ХХ-го сторіччя Ф. Боуден, спираючись на власні дослідження та дослідження В. Гарді, запропонував поділяти існуючі змащувальні матеріали на такі, що не змінюють коефіцієнт тертя від зовнішнього навантаження та такі, для яких коефіцієнт тертя зменшується на початковому етапі, по мірі зростання навантаження [1]. До останніх відносять спирти, жирні кислоти та деякі інші речовини. Механізм їх змащувальної дії пов'язаний із властивістю утворювати на поверхнях тертя полімолекулярну плівку кристалічної будови, однак це не пояснює отриманої раніше залежності коефіцієнту тертя від зовнішнього навантаження. Якщо припустити, що такий характер тертя обумовлений шаруватою будовою граничної плівки, кожен з шарів якої має власні трибологічні властивості, тоді результати, отримані Ф. Боуденом, В. Гарді та іншими, пояснюються низькою несучою здатністю та високим коефіцієнтом тертя верхніх шарів, а нижні шари мають зворотні властивості. Вказаним вимогам відповідають шари органічних речовин у рідкокристалічному (РК) стані, особливо смектичного холестеричного та нематичного типу [2, 3]. Внаслідок високого ступеня впорядкованості, ці шари мають значну несучу здатність, а тангенціальний зсув відбувається по міжшаровій границі де діють малі Ван-дер-Ваальсові сили, що робить перспективним використання РК речовин в якості протизношувальних та антифрикційних присадок до базових олив.

УДК 621.89

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.44389

РОЗРОБКА ТРИБОФІЗИЧНИХ ОСНОВ МАСТИЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ РІДКОКРИСТАЛІЧНИХ ПРИСАДОК ДО БАЗОВИХ ОЛИВ

С. В. Воронін

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра будівельних, колійних та
вантажно-розвантажувальних машин
Український державний університет
залізничного транспорту
пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050
E-mail: voronin.sergey@inbox.ru

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

При використанні РК речовин в якості присадок актуальними завданнями трибології постають: встановлення взаємозв'язку між фазовим станом рідкокристалічної присадки у неполярному розчині та характеристиками процесу її фізичної адсорбції на металевих поверхнях тертя; вивчення властивостей РК шарів граничної плівки, а саме їх товщини, несучої здатності, сил когезії та тертя. Такі завдання вирішувались в різних роботах шляхом узагальнення фізичних уявлень про фазові перетворення РК присадок у водяних розчинах [2, 4], в неполярних вуглеводневих розчинах [5, 6], розробки теоретичних основ фізичної адсорбції РК присадок на поверхнях тертя [2, 7], а також розробки удосконаленої теорії граничного тертя, а саме його молекулярної складової, з урахуванням взаємодії РК шарів граничної плівки [8]. Незважаючи на численну кількість робіт з вивчення трибологічних властивостей РК присадок, залишається відкритим питання науково обґрунтованого прогнозування характеристик тертя та зношування в трибосистемах із врахуванням фазового стану РК присадок в базових оливах. Таке прогнозування стане можливим за наявності фізичних та теоретичних основ тертя та зношування в умовах застосування РК присадок. Вирішенню таких питань присвячене дане дослідження.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є розробка трибофізичних основ мастильної здатності РК присадок на основі отри-

маних раніше закономірностей зміни фазового стану присадки в базовій оливі.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

- розробити модель досліджуваної трібосистеми, що враховує функціональні зв'язки між характеристиками фазового стану присадки, трибологічними властивостями граничної плівки РК будови та вихідними характеристиками трібосистеми;
- розробити математичну модель для прогнозування тертя та зношування в трібосистемах за різних умов контакту та навантаження;
- провести випробування трібосистем на машинах тертя.

4. Модель трібосистеми за наявності РК присадок в оливі

При розробці моделі досліджуваної трібосистеми слід встановити в загальному вигляді основні функціональні залежності, що дозволяють визначати вхідні та вихідні параметри системи, а також параметри її внутрішнього стану. Такі залежності та зв'язок між головними параметрами трібосистеми наведені на рис. 1.

Головними характеристиками «входу», за рис. 1, є число агрегації молекул присадки, розчинених в базовій оливі, параметр порядку молекул ПАР в агрегатах та дипольний момент агрегату. Ці характеристики залежать від типу присадки, її концентрації в розчині та температури. Такі характеристики досліджувались в роботах [6, 7] де були отримані наступні базові залежності:

$$n_A = \frac{C_M}{e^{\frac{\Delta C_{KKK}}{RT}}} + 1, \quad (1)$$

$$L = \text{cth} \left(\frac{n_A p E_{BH}}{kT} \right) - \frac{kT}{n_A p E_{BH}}, \quad (2)$$

$$P = L \sum_{i=1}^{n_A} p_i. \quad (3)$$

Встановлено, що для впорядкованих РК агрегатів присадки $n_A > 2$; $L \rightarrow 1$, $P > 2p$. Для поодинокі молекули – мономеру $n_A = 1$ та $L = 1$, тоді $P = p$. Для димеру $n_A = 2$, а $L = 0$ внаслідок взаємної компенсації векторів дипольних моментів, тоді $P = 0$. Для сферичної міцели $n_A > 2$, а $L \rightarrow 0$ внаслідок взаємної компенсації векторів дипольних моментів, тоді $P \rightarrow 0$. Тобто, фазовий стан присадки якісно змінює характеристики «входу» за рис. 1.

Головними характеристиками «внутрішнього стану» трібосистеми є час фізичної адсорбції рідкокристалічної присадки та властивості граничної плівки, а саме: її поляризованість, локальне електричне поле в ній, товщина плівки, несуча здатність, сили когезії та тертя в шарах плівки. Крім того, для встановлення взаємозв'язку між процесом фі-

зичної адсорбції та розвитком інших ведучих процесів, що протікають при граничному мащенні, пропонується увести характеристику, що визначає властивості утворених вторинних структур при терті. в роботах [6, 7] для цих характеристик отримані наступні залежності:

$$m_x = \frac{P(q^+ - |q^-|)}{2\pi\epsilon\epsilon_0\lambda^2} \left(\frac{1}{\sqrt{\Gamma^2 + (x_0 - x)^2}} - \frac{x(x - x_0)}{\sqrt[3]{\Gamma^2 + (x_0 - x)^2}} \right) - 6\pi\mu x, \quad (4)$$

$$L \sum_{i=1}^{n_A} p_i \times \left[\left(\frac{\sigma}{2\pi K\epsilon_0} (\sqrt{h} - \frac{h\sqrt{h}}{\sqrt{\Gamma^2 + h^2}}) + \frac{L \sum_{i=1}^{n_A} p_i}{3\epsilon_0 (a^2 b n_A)^{2/3} h} \right) \right] = W_T. \quad (5)$$

$$\tau_{PK} = \frac{A_t}{(tx/2)} = \frac{\int_0^{tx/2} F_k(k) \frac{d}{dk} - F_{kmin} tx}{(tx/2)}. \quad (6)$$

Залежність (4) є математичною моделлю, що визначає час фізичної адсорбції РК присадки, залежність (5) дозволяє визначати товщину РК шарів граничної плівки, а залежність (6) встановлює молекулярну складову питомої сили тертя, яке відбувається в РК шарах.

«Вихід» трібосистеми характеризується, в першу чергу, сумарною питомою силою тертя та інтенсивністю зношування, які залежать від «входу» трібосистеми та визначаються через зв'язок між ним та «внутрішнім станом». В подальшому, розглянемо їх більш детально.

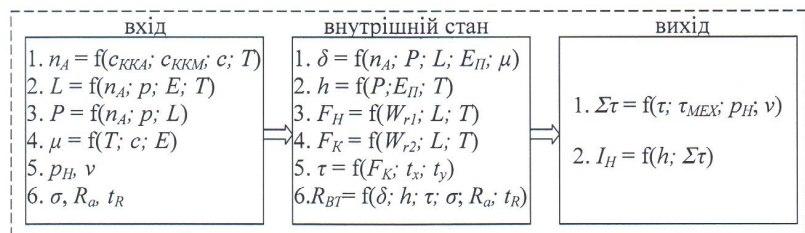


Рис. 1. Модель досліджуваної трібосистеми: c_{KKK} ; c_{KKM} ; c – критична концентрація асоціації, міцелоутворення, поточне значення концентрації присадки; T – температура; n_A – число агрегації молекул ПАР в розчині; p , P – дипольний момент молекули та агрегату; E , E_H , – напруженість зовнішнього поля та силового поля поверхні; μ – динамічна в'язкість змащувального матеріалу із присадкою; p_H, v – відповідно, зовнішнє навантаження та швидкість; h – товщина граничної плівки; δ – час фізичної адсорбції агрегату; ϵ – відносна діелектрична проникність граничної плівки; F_H – питома несуча здатність шару граничної плівки; F_K – питома сила когезії між шарами граничної плівки; W_{r1}, W_{r2} – відповідно, енергія взаємодії молекул в рідкокристалічному шарі плівки, енергія взаємодії молекул сусідніх рідкокристалічних шарів; $t_x; t_y$ – параметри кристалічної решітки шару граничної плівки; $\tau, \tau_{MEK}, \Sigma\tau$ – питома сила тертя в шарах граничної плівки, механічна складова тертя, загальна питома сила тертя; R_{BT} – параметр, що характеризує розвиток вторинних структур; I_H – лінійна інтенсивність зношування; $\sigma; R_a; t_R$ – параметри поверхневого шару металу та шорсткості поверхні

5. Математична модель для прогнозування тертя та зношування в трібосистемах

Для отримання математичних моделей, що описують силу тертя та інтенсивність зношування в трібосистемах, скористаємося наведеними вище залежностями, а також загальноприйнятими підходами в трибології. Так, для опису загальної сили тертя скористаємося підходом, запропонованим в роботі [9], однак з урахуванням тертя в РК шарах запишемо у вигляді

$$\sum \tau = \tau_{PK} + \tau_{TK} + \tau_{MEX}, \tag{7}$$

або

$$\sum F = \alpha \Sigma \tau_{PK} + \beta \Sigma \tau_{TK} + \gamma \Sigma \tau_{MEX}, \tag{8}$$

де τ_{PK} , τ_{TK} , τ_{MEX} – питома сила тертя, відповідно, в РК шарі, в твердому кристалічному (ТК) шарі та її механічна складова, МПа; $\Sigma \tau$ – сумарна питома сила тертя, МПа; ΣF – сумарна сила тертя, Н.

З урахуванням залежностей для сили тертя в шарах ТК або РК, залежність (7) прийме наступний вигляд:

$$\sum \tau = \left(\frac{\int_0^{tx/2} F_K^{CPK}(k) \frac{d}{dk} - F_{Kmin} tx}{(tx/2)} \right) + \left(\frac{\int_0^{tx/2} F_K^{HPK}(k) \frac{d}{dk} - F_{Kmin} tx}{(tx/2)} + \frac{1}{(r_0 + dr)^2} \cdot \frac{\rho E_{л} \cos(\Theta_2)}{L_p} \right) + \left(\frac{\int_0^{tx/2} F_K^{TK}(k) \frac{d}{dk} - F_{Kmin} tx}{(tx/2)} \right) + \tau_{MEX},$$

де СРК, НРК – відповідно, смектичний та нематичний РК.

Для встановлення аналітичного зв'язку між інтенсивністю зношування та властивостями граничної плівки РК будови використаємо моделі роботи [10]. Тоді для пружного контакту де переважним видом є утомне зношування

$$I_H = \frac{0,15}{\pi n} \sqrt{\frac{H}{R}} \cdot \frac{t_R^2}{2RH + 2hH - H^2}, \tag{10}$$

де n – число циклів навантажень до відділення частинки зносу; H – глибина занурення, м; R – радіус закруглення, м; h – товщина граничної плівки, м.

Для пружно-пластичного контакту отримана наступна залежність, що враховує загальну силу тертя,

$$I_H = \frac{\tau_{PK} + \tau_{TK} + \tau_{MEX}}{2(v+1)HB}, \tag{11}$$

де чисельник розраховується по залежності (9).

Залежності (7)–(11) використовуються для прогнозування величин тертя та зношування в дослі-

джуваній трібосистемі, однак для повного розкриття закономірностей впливу РК присадок на тертя та зношування, а також з метою підтвердження розроблених теоретичних основ слід виконати серію випробувань на машинах тертя.

6. Випробування трібосистем на машинах тертя

Випробування трібосистем виконувались на модернізованій машині тертя СМЦ – 2 та на чотирьохкульковій машині (ЧКМ) відповідно до ГОСТ 9490-75. Модернізація машини тертя полягала у запровадженні частотно-регульованого приводу електродвигуна та заміні штатного самописця на комп'ютеризований блок для виміру моменту тертя. Такі технічні рішення дозволили плавно змінювати швидкість ковзання контрольних зразків, що випробовуються, а також підвищити чутливість вимірів моменту тертя. При дослідженні сили тертя визначався момент тертя M_T , а питома сила тертя перераховувалась по залежності:

$$\tau = \frac{M_T}{R_p A_a}, \tag{12}$$

де R_p – радіус ролика, м.

При дослідженні процесу зношування зразків визначався ваговий знос колодки, m , за певний час δ , а лінійна інтенсивність зношування визначалася як

$$I_H = \frac{m}{\gamma A_a L_T} = \frac{m}{\gamma A_a v \delta}. \tag{13}$$

де L_T – шлях тертя, м; v – швидкість ковзання ролика, м/с.

Результати випробувань наведені на рис. 2, 3. Встановлено, що питома сила тертя зменшується із збільшенням концентрації присадки (рис. 2, а), при цьому для стеаринової кислоти існує область мінімуму сили тертя при концентраціях близьких до ККМ. При вищих концентраціях, без попередньої обробки електричним полем, для такого типу присадок спостерігається зростання інтенсивності зношування (криві 1 і 3), а з обробкою – інтенсивність зношування продовжує монотонно зменшуватися (криві 2 і 4). Такі дані підтверджують результати попередніх досліджень зміни товщини граничної плівки від концентрації, а також теоретичний зв'язок сили тертя із товщиною плівки у випадку, коли молекули присадки знаходяться у впорядкованому рідкокристалічному стані, що досягається обробкою зовнішнім електричним полем. Для трикомпонентної присадки мінімуму сили тертя не спостерігається (криві 5 і 6), тобто присадка зберігає впорядкований стан із максимальною поверхневою активністю.

При збільшенні навантаження нелінійно збільшується питома сила тертя (рис. 2, б). При використанні стеаринової кислоти в якості присадки, по досягненні питомого навантаження 4 МПа, сила тертя починає стрімко зростати (криві 1 і 2), тобто зовнішнє навантаження перевищило несучу здатність рідкокристалічного шару. При використанні трикомпонентної присадки в дослідному діапазоні навантажень таке явище спостерігається при більших навантаженнях (криві 3 і 4).

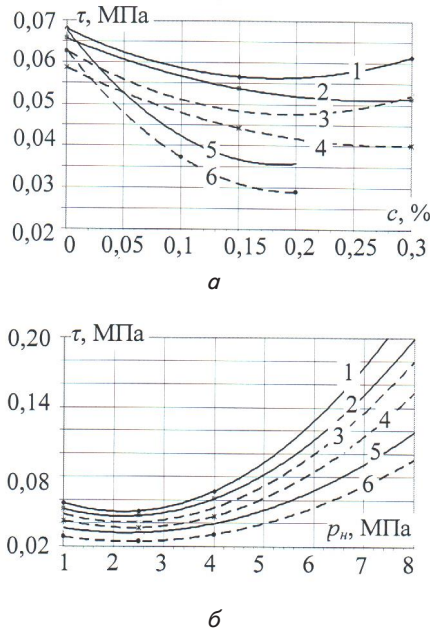


Рис. 2. Результати випробувань по встановленню питомої сили тертя: *а* – зміна питомої сили тертя в парі «38Х2МЮА–БрАЖ 9-4» в залежності від концентрації присадки при температурі оливи 60 °С, тиску 1 МПа, швидкості 0,25 м/с; *б* – зміна питомої сили тертя в парі «38Х2МЮА–БрАЖ 9-4» в залежності від тиску при температурі оливи 60 °С, концентрації 0,3 % та швидкості 0,25 м/с: 1 – И-20А+стеаринова кислота при $E_{ВН}=0$; 2 – те ж саме при $E_{ВН}=0,25 \cdot 10^6$ В/м; 3 – ольова олива «Л»+стеаринова кислота при $E_{ВН}=0$; 4 – те ж саме при $E_{ВН}=0,25 \cdot 10^6$ В/м; 5 – И-20А+трикомпонентна присадка; 6 – ольова олива «Л»+трикомпонентна присадка

Із зростанням концентрації інтенсивність зношування нелінійно зменшується. Так при зміні концентрації стеаринової кислоти до 0,3 % інтенсивність зношування зменшується в 4...4,5 рази в умовах зміни фазового стану присадки під дією зовнішнього електричного поля (рис. 3, *а*), (криві 1 і 2). Аналогічний результат отриманий для трикомпонентної присадки (рис. 3, *а*), криві 3 і 4), однак, в даному випадку електричне поле не застосовувалось. На рис. 3, *б* наведені результати зміни інтенсивності зношування в залежності від швидкості ковзання при зберіганні ступеня навантаженості випробуваних пар тертя. Встановлено, що при концентраціях стеаринової кислоти менших за ККМ по досягненню швидкості 0,2 м/с інтенсивність зношування швидко зростає.

Проведеними випробуваннями встановлено, що із зростанням концентрації стеаринової кислоти зменшуються діаметр плями зносу d_H та індекс задиру I_3 , збільшується критичне навантаження $R_{кр}$, а при подальшому збільшенні концентрації ці показники змінюються зворотно (криві 1 і 2). При застосуванні обробки зовнішнім електричним полем зворотній хід кривих при концентраціях більших за ККМ відсутній (криві 3 і 4). Встановлено, що концентрація присадки найбільше впливає на діаметр плями зносу (рис. 4, *а*), ніж на індекс задиру (рис. 4, *б*). Зважаючи на отримані результати

можна рекомендувати випробувані присадки в якості протизношувальних та антифрикційних для пар тертя ковзання.

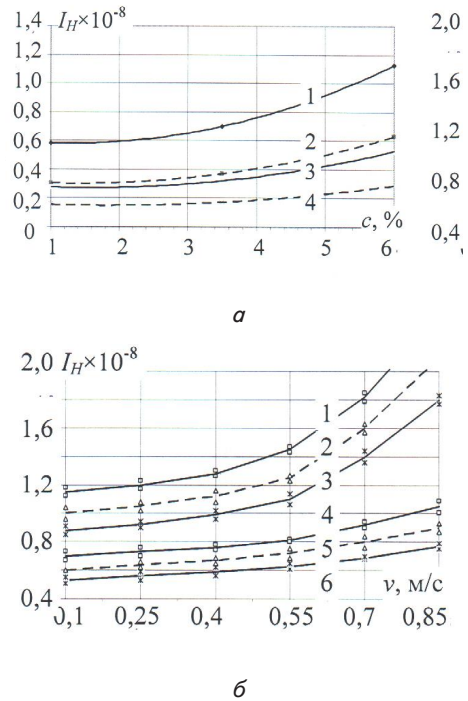


Рис. 3. Результати випробувань по встановленню інтенсивності зношування: *а* – Зміна інтенсивності зносу пари «38Х2МЮА–БрАЖ 9-4» в залежності від зовнішнього навантаження при $T=60$ °С, $c=0,2$ % та швидкості 0,25 м/с: 1 – И-20А+стеаринова кислота при $E_{ВН}=0,25 \cdot 10^6$ В/м; 2 – ольова олива «Л»+стеаринова кислота при $E_{ВН}=0,25 \cdot 10^6$ В/м; 3 – И-20А+трикомпонентна присадка; 4 – ольова олива «Л»+трикомпонентна присадка; *б* – Зміна інтенсивності зносу колодки в залежності від швидкості ковзання при температурі 60 °С оливи И-20А із стеариновою кислотою та $E_{ВН}=0,25 \cdot 10^6$ В/м: 1 – колодка бронза ЛЦ14К3К3, концентрація присадки $c=0,1$ %; 2 – те ж саме при концентрації присадки $c=0,3$ %; 3 – колодка бронза Бр04Ц4С17, концентрація присадки $c=0,1$ %; 4 – те ж саме при концентрації присадки $c=0,3$ %; 5 – колодка бронза БрАЖ 9-4, концентрація присадки $c=0,1$ %; 6 – те ж саме при концентрації присадки $c=0,3$ %

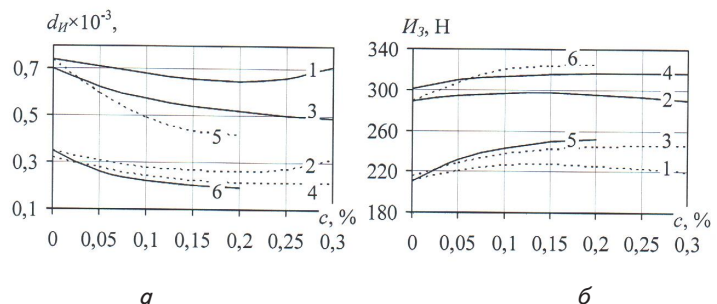


Рис. 4. Результати випробувань на машині ЧКМ: *а* – зміна діаметру плями зносу; *б* – зміна індексу задиру; 1 – И-20А+ стеаринова кислота $E_{ВН}=0$; 2 – ольова Л+стеаринова кислота $E_{ВН}=0$; 3 і 4 – те ж саме $E_{ВН}=0,25 \cdot 10^6$ В/м; 5 – И-20А+трикомпонентна присадка $E_{ВН}=0$; 6 – ольова Л + трикомпонентна присадка $E_{ВН}=0$

Із зростанням концентрації інтенсивність зношування нелінійно зменшується. Так при зміні концентрації стеаринової кислоти до 0,3 % інтенсивність зношування зменшується в 4...4,5 рази в умовах зміни фазового стану присадки під дією зовнішнього електричного поля (рис. 3, *a*), (криві 1 і 2). Аналогічний результат отриманий для трикомпонентної присадки (рис. 3, *a*), (криві 3 і 4), однак, в даному випадку електричне поле не застосовувалось. На рис. 3, *б* наведені результати зміни інтенсивності зношування в залежності від швидкості ковзання при зберіганні ступеня навантаженості випробуваних пар тертя. Встановлено, що при концентраціях стеаринової кислоти менших за ККМ по досягненню швидкості 0,2 м/с інтенсивність зношування швидко зростає.

Проведеними випробуваннями встановлено, що із зростанням концентрації стеаринової кислоти зменшуються діаметр плями зносу d_M та індекс задиру I_3 , збільшується критичне навантаження P_{KR} , а при подальшому збільшенні концентрації ці показники змінюються зворотно (криві 1 і 2). При застосуванні обробки зовнішнім електричним полем зворотній хід кривих при концентраціях більших за ККМ відсутній (криві 3 і 4). Встановлено, що концентрація присадки найбільше впливає на діаметр плями зносу (рис. 4, *a*), ніж на індекс задиру (рис. 4, *б*). Зважаючи на отримані результати можна

рекомендувати випробувані присадки в якості протизношувальних та антифрикційних для пар тертя ковзання.

7. Висновки

1. Наведена модель трібосистеми в якій запропоновані функціональні залежності, що пов'язують між собою головні параметри фазового стану РК присадки на «вході» із головними параметрами «внутрішнього стану» системи та вихідними параметрами, а саме загальною силою тертя та лінійною інтенсивністю зношування в трібосистемі.

2. На основі встановлених раніше закономірностей розроблена математична модель для прогнозування сили тертя та інтенсивності зношування в трібосистемі з урахуванням фазового стану РК присадки в базовій оливі, процесу фізичної адсорбції агрегатів присадки та трібологічних властивостей РК шарів граничної плівки.

3. Випробуваннями трібосистем на машинах тертя встановлені закономірності зміни питомої сили тертя та інтенсивності зношування в залежності від концентрації та фазового стану присадки в базовій оливі. Доведена доцільність використання РК речовин в якості протизношувальних та антифрикційних присадок до олив.

Література

1. Ахматов, А. С. Молекулярная физика граничного трения [Текст] / А. С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.
2. Березина, Е. В. Молекулярное моделирование процесса формирования граничного смазочного слоя. Т. 2 [Текст]: Матер. междунар. науч.-практ. школы-конф. / Е. В. Березина, В. А. Годлевский, С. А. Жуковский, А. С. Павлов // «Славянтрибо – 7а». – СПб: Пушкин, 22–25 сент., 2006. – С. 112–116.
3. Ермаков, С. Ф. Трибология жидкокристаллических наноматериалов и систем [Текст] / С. Ф. Ермаков. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 380 с.
4. Казначеев, А. В. Флексоэлектрический эффект в двухосных нематиках [Текст] / А. В. Казначеев, А. С. Сонин // Кристаллография. – 1988. – Т. 33, Вып. 1. – С. 252–253.
5. Evans, G. T. Viscosity coefficients of nematic hard particle fluids [Text] / G. T. Evans // The Journal of Chemical Physics. – 1998. – Vol. 108, Issue 3. – P. 1089–1093. doi: 10.1063/1.475470
6. Воронін, С. В. Вплив фазового стану присадки на товщину рідкокристалічних шарів граничної плівки [Текст] / С. В. Воронін // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2015. – Вып. 151, Т. 2. – С. 56–62.
7. Лысиков, Е. Н. Влияние наноструктур присадки на трение и износ в технических системах [Текст]: матер. VIII междунар. симпозиума / Е. Н. Лысиков, С. В. Воронин // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. Том 1.– М.: РАН, 2013. – С. 143–151.
8. Voronin, S. V. The research of tribological characteristics of smectic layer of boundary film [Text] / S. V. Voronin, V. O. Stefanov // Проблеми трибології: міжнар. наук. журн. – 2014. – № 2(72). – С. 58–64.
9. Фукс, Г. И. Адсорбция и смазочная способность масел [Текст] / Г. И. Фукс // Трение и износ. – 1983. – Т. 4, № 3. – С. 398–412.
10. Крагельский, И. В. Трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.