

Косолапов В.Б.

ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИЧНИХ ЗАСАД БЕЗКОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ПОВЕРХОНЬ РУХОМИХ СПОЛУЧЕНЬ ГІДРОПРИВОДІВ МАШИН У ГРАНИЧНОМУ РЕЖИМІ ЗМАЩЕННЯ

Ефективна експлуатація будівельних та дорожніх машин, яка забирає значний час у несталих режимах навантаження, неодмінно викликає підвищений знос, що призводить до скорочення терміну служби агрегатів та загальної надійності машин. Особливо важливо аналізувати аспекти зносу поверхонь гідроприводу, який виявляється найбільш небезпечним у граничних режимах змащення. Граничний режим змащення виникає в умовах великих контактних навантажень, низьких швидкостей переміщення поверхонь та підвищених температур робочої рідини (РР). У таких умовах мастильна плівка РР піддається руйнуванню, що призводить до безпосереднього контакту поверхонь тертя через мікронерівності. Це, в свою чергу, призводить до підвищеного зносу. Враховуючи тенденцію до збільшення обсягів будівельно-дорожніх робіт, важливою стає задача забезпечення підвищеної надійності дорожніх машин шляхом визначення раціональних меж навантаження трибосполучень. Метою роботи було визначення фізичних засад безконтактної взаємодії поверхонь рухомих сполучень гідроприводів машин у граничному режимі змащення. Розв'язання поставлених задач передбачало формування моделі локальних джерел електростатичного поля шорстких металевих поверхонь; визначення енергії взаємодії локальних джерел електростатичного поля поверхонь з полярними молекулами ПАР, які входять до складу робочої рідини гідроприводів будівельних і дорожніх машин; аналітичне визначення залежності питомого тиску в контакті поверхонь трибосполучення від його фактичної площі, у присутності робочої рідини; аналітичне визначення фізичних засад, що визначають умови контактування сполучених поверхонь через адсорбований шар ПАР та відсутність їх безпосереднього контакту. За результатами дослідження сформовано фізичне уявлення про процес взаємодії поверхонь, покритих адсорбованим шаром ПАР, та розвиток процесу зміни його структури при зміні навантаження сполучення. Виконане аналітичне дослідження дозволяє виділити групу факторів, що впливають на процес формування зусилля, що виштовхує адсорбовану молекулу ПАР із зони контактування поверхонь. У роботі запропоновано фізичні засади формування виштовхувальної сили, що діє на полярну молекулу, адсорбовану на металеву поверхню, яка базується на фізичних принципах взаємодії локальних джерел електростатичного поля металеві поверхні з полярною молекулою ПАР. Використання запропонованої математичної моделі дозволяє розробити математичні моделі для вирішення питань оптимізації параметрів сполучення металевих поверхонь покритих адсорбційним шаром ПАР щодо гідроприводів машин у граничному режимі змащення. Зокрема, параметри мікрогеометрії металевих поверхонь та їх структура, розмір молекул ПАР та їх дипольні моменти, критичні навантаження у сполученнях гідроприводів будівельних і дорожніх машин.

Ключові слова: адсорбція, поверхнево-активні речовини (ПАР), мікронерівності, модель "желе", потенціал Леннарда-Джонса, напруженість електростатичного поля.

Актуальність дослідження (

Ефективна експлуатація будівельних та дорожніх машин, яка забирає значний час у несталих режимах навантаження, неодмінно викликає підвищений знос, що призводить до скорочення терміну служби агрегатів та загальної надійності машин. Особливо важливо аналізувати аспекти зносу поверхонь гідроприводу, який виявляється найбільш небезпечним у граничних режимах змащення.

Граничний режим змащення виникає в умовах великих контактних навантажень, низьких швидкостей переміщення поверхонь та підвищених температур робочої рідини (РР). У таких умовах мастильна плівка РР піддається руйнуванню, що призводить до безпосереднього контакту поверхонь тертя через мікронерівності. Це, в свою чергу, призводить до підвищеного зносу.

Перехід від помірного до підвищеного зносу визначається рівнем навантажень рухомих сполучень, мікрорельєфом їх поверхонь, несучою здатністю адсорбційної плівки ПАР на них та іншими факторами, які впливають на умови змащення. Розуміння цих параметрів відіграє ключову роль у розробці стратегій для покращення надійності машин та тривалості роботи їхніх механізмів.

Підвищення інтенсивності зносу трибосполучень призводить до серйозного зниження показників надійності машини та скорочення терміну служби її механізмів. Тяжкі умови роботи та динамічний, вібраційний характер навантаження значно підривають надійність та термін служби гідравлічних приводів цих машин.

Дослідження дефектів та втрат продуктивності гідروприводів визначають ключові аспекти розуміння та вирішення цих проблем для поліпшення надійності та тривалості служби техніки.

Враховуючи тенденцію до збільшення обсягів будівельно-дорожніх робіт, важливою стає задача забезпечення підвищеної надійності дорожніх машин шляхом визначення раціональних меж навантаження трибосполучень.

3. Теоретичний аналіз дослідження

У режимі граничного змащення контакт між поверхнями тертя відбувається як по адсорбованому на окремих мікронерівностях шару поверхнево-активних речовин, так і безпосередньо по поверхнях окремих мікронерівностей. Тому, фактичний майданчик контакту шорстких поверхонь трибосполучення, у присутності мастильної рідини, складається з суми контактів по площі адсорбованого на поверхнях мікронерівностей шару ПАР, що входять у склад мастильної рідини, та площі безпосереднього контакту поверхонь мікронерівностей. Місце контакту поверхонь трибосполучення, у найбільш точному форматі, визначається фактичним майданчиком контакту [1, 2]. Відповідно до контакту шорстких поверхонь, фактичний майданчик складається з суми контактів поверхонь окремих мікронерівностей. Іншими словами, сумою миттєвих площ контактів одиничних мікронерівностей.

Загальна картина шорсткості поверхні має вигляд показаний на рис. 1

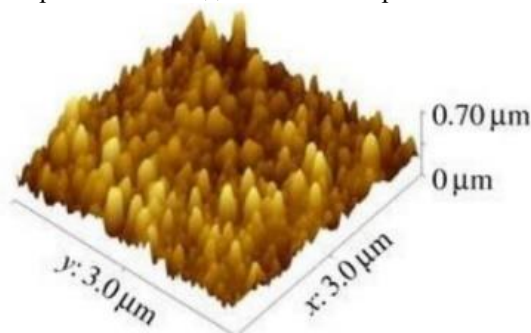


Рисунок 1 - Атомно-силова мікрофотографія наноструктурованої поверхні [3].

Відомо, що кількість взаємодіючих мікронерівностей зростає зі збільшенням навантаження [1,2].

Загальний кількісний опис розподілу висот мікронерівностей по поверхні прийнято описувати опорною кривою поверхні [4]:

$$t_p(\varepsilon) = \int_0^x \psi_1(\varepsilon - x) \varphi'_1(x) dx, \quad (1)$$

де $\varepsilon = p/Rp$ - відносний рівень перетину; - функція розподілу виступів профілю за висотою; - функція форми виступу профілю, що виражає залежність довжини перетину від рівня перетину.

Глибокій систематизації щодо взаємодії молекул (ПАР) з поверхнею металу та вивченню будови граничних молекулярних плівок та їх властивостей виконано у робота А.С. Ахматова [5]. В роботі вказується, що молекули ПАР, які характеризуються ниткоподібною структурою та постійним електричним дипольним моментом, активно адсорбуються на поверхні металу під впливом силового поля цієї поверхні. Важливою характеристикою цієї взаємодії є електромагнітна природа, підтверджена іншими дослідженнями у галузі фізики та трибології. [6, 7-9].

Здатність адсорбованої плівки ПАР витримувати без руйнування зовнішнє навантаження визначається параметром несуча здатність. Взагалі, несуча здатність мастильної плівки, яка функціонує в зоні контакту, може бути визначена за законом Гука .як [10, 11, 12]:

$$N_{пл} = p_{пл}^{max} \cdot S_m, \quad (2)$$

де $p_{пл}^{max}$ - граничний тиск руйнування мастильної плівкиж $p_{пл}^{max} = 100 \cdot 10^6$ Па [13, 14]; S_m -площа контакту мікронерівностей по мастильній плівці.

Таким чином, площа контакту, за інших рівних умов, є головним чинником, що визначає несучу здатність мастильної плівки.

У роботі [9] запропоновано модель утворення багатшарового квазікристалічного шару ПАР як результат їхньої диполь-дипольної взаємодії біля безмежної поверхні з поверхневим зарядом q . За умови визначення діапазону висот мікровиступів, вкритих адсорбованою плівкою ПАР певної товщини, у межах якого відбувається контакт, можна визначити кількість мікронерівностей, що контактують. Розглянуто залежність інтенсивності зношування пар тертя вузлів гідроприводів машин від товщини змащувального шару за граничного режиму змащування. Згідно з цією залежністю інтенсивність зношування пар тертя обернено пропорційна квадрату товщини адсорбційного шару молекул ПАР на поверхнях тертя. Водночас у роботі не визначено зв'язок між геометричними параметрами, що характеризують мікронерівності шорсткої поверхні, і його розподілом на

поверхні мікронерівності (ступінь локалізації поля на поверхні нерівності) та енергією взаємодії локальних джерел поля поверхні нерівності з полярними молекулами ПАР.

У роботі [15] розглянуто механізм взаємодії окремих мікронерівностей вкритих адсорбційним шаром ПАР з урахуванням їх геометричних параметрів. У розглянутому дослідженні припускалось, що безпосередній контакт поверхонь мікронерівностей є критичним станом, при якому процес зносу різко наростає. У роботі зазначено, що у разі досягнення тиску на адсорбційний шарі ПАР величини, вище за граничне значення, відбувається руйнування зв'язку молекул ПАР із поверхнею, і вони будуть витиснуті з контакту. Це призводить до виникнення безпосереднього контакту мікронерівностей. Несуча здатність мастильної плівки фактичного майданчику контакту в контактні шорстких поверхонь була визначена у вигляді

$$N^{\text{пл}} = \sigma_{\text{пр}}^{\text{пл}} \cdot \sum_0^{n_r} \left[n_{ri} \cdot \pi \left(2\delta \cdot (R+h) - \delta^2 \right) \right], \quad (3)$$

де $\sigma_{\text{пр}}^{\text{пл}}$ – тиск руйнування мастильної плівки; δ – зближення поверхонь; n_{ri} – поточна кількість взаємодіючих виступів на номінальній площі контакту; R – радіус кривизни вершин мікронерівностей; h – товщина мастильної плівки.

Однак, у розробленій моделі визначення несучої здатності мастильної плівки в контактні шорстких поверхонь відсутня енергетична складова, яка визначає зв'язок поверхнево-активних молекул з полем поверхні. Таким чином, для визначення несучої здатності ПАР використовувалася емпіричне значення критичного тиску на плівку ПАР. Це значно знижує можливість розрахунку несучої здатності адсорбованого шару ПАР з різним дипольним моментом.

4. Мета статті

Метою цієї роботи є визначення фізичних засад безконтактної взаємодії поверхонь рухомих сполучень гідроприводів машин у граничному режимі змащення

5. Завданням дослідження були:

- формування моделі локальних джерел електростатичного поля шорстких металевих поверхонь;
- визначення енергії взаємодії локальних джерел електростатичного поля поверхонь з полярними молекулами ПАР, які входять до складу робочої рідини гідроприводів будівельних і дорожніх машин;
- аналітичне визначення залежності питомого тиску в контактні поверхонь трибосполучення від його фактичної площі, у присутності робочої рідини;
- аналітичне визначення фізичних засад, що визначають умови контактування сполучених поверхонь через адсорбований шар ПАР та відсутність їх безпосереднього контакту.

6. Основний матеріал дослідження

У першому наближенні можна уявити, що контакт мікронерівностей відбувається по їхніх вершинах. Аналіз досліджень показує, що вершини мікронерівностей мають деяку кривизну і в ідеальному випадку прагнуть до утворення сферичного сегмента при вершині, з характерним радіусом кривизни R_0 , який може бути визначений як [4].

$$R_0 = \frac{d^2}{8 \cdot a}, \quad (4)$$

де d - діаметр основи мікронерівності; a - висота мікронерівності.

Поверхні рухомих сполучень сучасного гідроприводу будівельних і дорожніх машин мають мікронерівності в діапазоні від 1,0 мкм до 0,1 мкм

Так, для аксіально-поршневого насоса R_a під час виготовлення втулки блока циліндрів $R = 0,8 \cdot 10^{-6}$ м, поверхня сполучення сталевого розподільника $R = 0,25 \cdot 10^{-6}$ м, поверхня сполучення плунжера $R = 0,125 \cdot 10^{-6}$ м.

Тоді поверхня вершин окремої мікронерівності може бути представлена моделлю у вигляді набору сходинок з висотою S (рис. 2). [4, 16] Висота сходинок S є функцією кристалічної решітки і в першому наближенні може бути прийнята const [17, 18] за величиною кратною відстані між атомами кристалічної решітки.

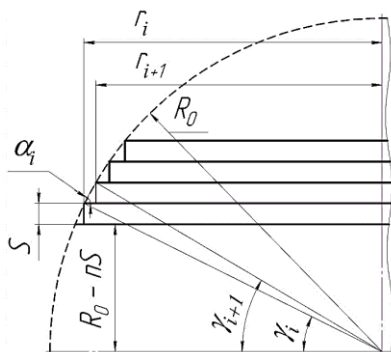


Рисунок 2 - Модель представлення поверхні при вершині мікронерівності [19]

З рис. 3 видно, що довжина сходинки, в такому поданні, дорівнюватиме

$$l_{\text{ст}i} = r_i - r_{i+1} = R_o (\cos \gamma_i - \cos \gamma_{i+1}), \quad (5)$$

де R_o - радіус умовної сферичного сегменту, який сформовано по вершинах сходинок; i - номер сходинки.

$$\gamma_i = \arcsin \left(\frac{i \cdot S}{R_o} \right) \quad (6)$$

За умови, що контакт мікронерівностей відбувається по їхніх вершинах, згідно з моделлю на рис. 2, контакт мікронерівностей відбувається по верхній сходинці, яка являє собою майданчик у вигляді кола, радіус якого можна визначити чисельним методом з виразу (9). За розрахунками, для мікронерівності з умовним радіусом при вершині $0,1 \cdot 10^{-6}$ м, діаметр сходинки на її вершині складає $\approx 9 \cdot 10^{-9}$ м.

Для аналізу утворення та поведінки локальних джерел поля на поверхні металу використовуються різні сучасні моделі, що ґрунтуються на теорії твердого тіла, електронній структурі та електродинаміці поверхні. Дана робота побудована на теоретичних положеннях теорії твердого тіла та використовує модель "желе", що описує атомну структуру металевої поверхні, включаючи атомну решітку та електронні хмари. Моделі цього типу досліджують взаємодію електронів і атомів на поверхні металу. Зазвичай модель "желе" використовується для якісного розуміння та узагальнення основних властивостей металів. У моделі "желе" електрони формують "море" або "желе" високої електронної густини, яке заповнює простір між іонами решітки поверхні і може легко переміщатися в цьому електронному "желе". Згідно з моделлю (рис. 3), на вершинах граней утворюється локалізація поверхневої енергії [20, 16], тому вони являють собою локальні центри поля, здатні взаємодіяти з молекулами ПАР і утворювати на металевій поверхні адсорбовані шари.

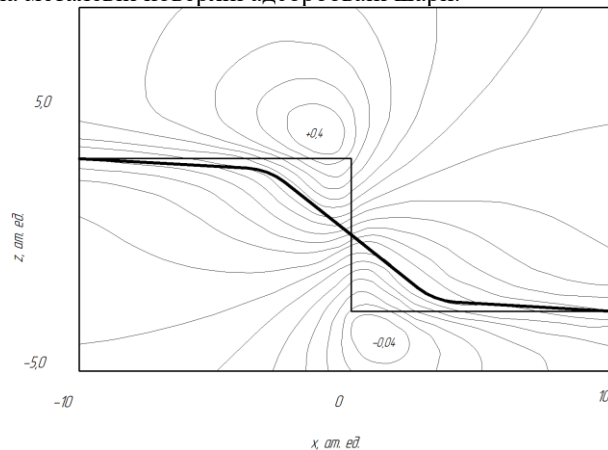


Рисунок 3- Електростатичний потенціал поблизу сходинки в моделі "желе".

Згладжена електронна "поверхня" зображена жирною суцільною кривою

Згідно з такою моделлю поверхня може бути представлена у вигляді послідовності сходинок "желе" з періодом c_0 (рис. 4).

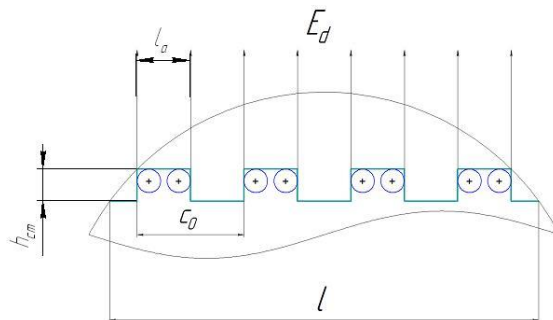


Рисунок 4- Модель поверхні сходинки мікронерівності металу у вигляді набору сходинок "желе"

Період появи сходинок c_0 на поверхні визначається з виразу

$$c_0 = a_0 \cdot n + a_0 \cdot k,$$

де n і k кількість атомів поверхні на полиці сходинки та у западинці відповідно

Міжатомна відстань у кристалічній решітці металевих сплавів становить від $a \sim 2 \text{ \AA}$ для сплавів на основі заліза і до $a \sim 3,2 \text{ \AA}$ для бронзи [9]

Поле такої поверхні може бути визначено як сумарне поле по всіх сходинках "желе".

Очевидно, що поле поверхні має електростатичний характер, а його величина визначає інтенсивність адсорбційних процесів на поверхнях. Відомо, що взаємодія між молекулою ПАР та полем поверхні відбувається на рівні Ван-дер-Ваальсових сил. Зона дії Ван-дер-Ваальсових взаємодій залежить від їх інтенсивності і визначається масштабами молекул і атомів. Ван-дер-Ваальсові сили проявляються на відстанях, близьких до радіусів атомів і молекул. [5, 21]

Оцінимо кількість молекул ПАР, які можуть розміститися на верхньому майданчику мікронерівності, відповідно до прийнятої моделі поверхні (рис. 4) на прикладі.

У якості ПАР приймаємо беззольну протизносну присадку БМА-5 (тіоефір діалкідітіофосфорної кислоти). Основні довідкові дані для БМА-5 такі: молекулярна маса - $\mu_{\text{ц}} = 0,172$ кг/моль; маса молекули $M_{\text{мо}} = 3,86 \cdot 10^{-25}$ кг; густина $\rho = 0,9 \cdot 10^3$ кг/м³; дипольний момент $P = 5,6 \cdot 10^{-29}$ Кл·м [9].

Об'єм молекули визначимо з виразу:

$$V_{\text{ПАР}} = \frac{M_{\text{ПАР}}}{\rho} = \frac{3,86 \cdot 10^{-25}}{0,9 \cdot 10^3} = 3,18 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3. \quad (7)$$

Вважаємо, що молекула має форму сфероїда (рис. 5), і її об'єм дорівнюватиме

$$V_{\text{ПАР}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot k \cdot b^3, \quad (8)$$

де $k = a / b$

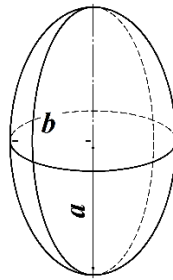


Рисунок 5- Молекула ПАР

Якщо $k = 5$, тоді
$$b = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_{\text{ПАР}}}{4 \cdot \pi \cdot k}} = 2,4 \text{ \AA}, \quad (9)$$

$k = 1$, тоді
$$b = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_{\text{ПАР}}}{4 \cdot \pi \cdot k}} \approx 4,2 \text{ \AA}. \quad (10)$$

Таким чином, на одну молекулу ПАР припадає кілька локальних джерел електростатичного поля (рис. 6).

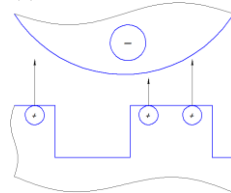


Рисунок 6 Схема взаємодії локальних джерел електростатичного поля поверхні з адсорбованими молекулами ПАР

Еквілібріумне розташування молекули ПАР, відносно локальних джерел поля поверхні, визначається їх взаємодією на рівні Ван-дер-Ваальсових сил [22]. Таким чином, енергія зв'язку між поверхнею та полярною молекулою, при формуванні адсорбованого шару, може бути визначена за допомогою різних методів, але одним з популярних підходів є використання потенціалу Леннарда-Джонса (Lennard-Jones potential), особливо для опису Ван-дер-Ваальсової взаємодії між локальними джерелами поля на поверхні та полярними молекулами. Потенціал Леннарда-Джонса має вигляд [23]:

$$\varphi(r) = 4 \cdot \epsilon \cdot \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right], \quad (11)$$

де ϵ - глибина потенційної ями, яка визначає величину тяжіння між молекулами,
 σ - параметр, який визначає відстань між зарядами в диполі полярної молекули ПАР,
 r - відстань між центрами молекули та поверхнею метала.

Якщо знехтувати кінетичною енергією атомів, енергія зв'язку поверхні та полярною молекулою може бути визначена як величина потенціалу Леннарда-Джонса. Енергія зв'язку еквілібріумному розташуванню полярної молекули біля локального центру поля поверхні (E_b) може бути визначена, якщо розглядати мінімум потенціалу Леннарда-Джонса:

$$E_b = \varphi(r_{\min}), \quad (12)$$

де $r_{\min}$ - відстань між центрами молекули та поверхні при мінімальній енергії.

Рівноважна відстань молекули від поверхні (еквілібріум) визначається за умови мінімуму виразу (11), тобто за умови

$$\frac{d\varphi(r)}{dr} = 0.$$

Звідси випливає, що

$$\left(\frac{\sigma^{12}}{r_{\min}^{13}} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma^6}{r_{\min}^7} \right) = 0, \quad (13)$$

або

$$r_{\min} = \sigma \cdot \sqrt[3]{2} \approx 1,122 \cdot \sigma.$$

Таким чином, видно, що відстань на якій відбувається взаємодія між локальними джерелами поля на поверхні та полярними молекулами, з утворенням адсорбованого шару ПАР, співрозмірна з її розміром, а використання для визначення сили взаємодії між полярною молекулою та поверхнею метала Ван-дер-Ваальсових сил цілком виправдане.

Для визначення критичного навантаження, за яким відбувається витискання з контакту адсорбованого на поверхні шару ПАР, розглянемо модель, у якій адсорбований шар ПАР сформований одним шаром молекул. За таких умов, взаємодія між полярною молекулою ПАР і локальними центрами поля поверхні відбувається на відстані r в діапазоні $r_{\min} \geq r > 0$. Ця відстань відповідає взаємодії завдяки Ван-дер-Ваальсовим силам між локальними центрами поля поверхні та полярною молекулою ПАР.

У загальному вигляді сила взаємодії між полярною молекулою та поверхнею метала може бути визначена як градієнт роботи електростатичного поля вздовж напрямку взаємодії між локальними джерелами поля на поверхні та полярними молекулами. Таким чином, сила буде визначена як від'ємна перша похідна від потенціалу Леннарда-Джонса щодо координати полярної молекули:

$$F(r) = -\frac{d\varphi(r)}{dr} = 48 \cdot \epsilon \cdot \left[\left(\frac{\sigma^{12}}{r^{13}} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma^6}{r^7} \right) \right]. \quad (14)$$

Енергія взаємодії молекули ПАР з адсорбційним центром визначає міцність зв'язку ПАР із поверхнею, а отже, визначає міцність адсорбційного шару ПАР.

Межа сил взаємодії між полярною молекулою та поверхнею для $r \rightarrow 0$, може бути виражена наступним чином:

$$\lim_{r \rightarrow 0} F(r) = \lim_{r \rightarrow 0} 48 \cdot \epsilon \cdot \left[\left(\frac{\sigma^{12}}{r^{13}} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma^6}{r^7} \right) \right]. \quad (15)$$

Щоб обчислити цю межу, скористаємося методом Лопітала для виявлення виду невизначеності. Для цього проведемо заміну змінної:

$$\frac{\sigma}{r} = x.$$

Тоді при $r \rightarrow 0$, $x \rightarrow +\infty$

Після заміни змінної вираз буде виглядати так:

$$\lim_{r \rightarrow 0} F(r) = \lim_{r \rightarrow 0} 48 \cdot \epsilon \cdot \left[\left(\frac{x^{12}}{r} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{x^6}{r} \right) \right] = \lim_{r \rightarrow 0} 48 \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{x^{12}}{r} \right) - \lim_{r \rightarrow 0} 24 \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{x^6}{r} \right). \quad (16)$$

Оскільки обидва члени прямує у нескінченність, можна стверджувати, що ця межа також націлена на нескінченність. Таким чином, молекули пари (ПАР) не можуть безпосередньо осідати на поверхні і завжди перебувають у стані еквілібріуму, незалежно від тиску, який на них діє ззовні.

Під впливом електростатичного поля поверхні вектор поля диполів молекул ПАР переорієнтується. Унаслідок цього утворюється співнаправлена орієнтація молекул ПАР, що супроводжується їх злипанням і формуванням полімолекулярної структури з молекул ПАР на поверхні металу (рис. 7). [9]

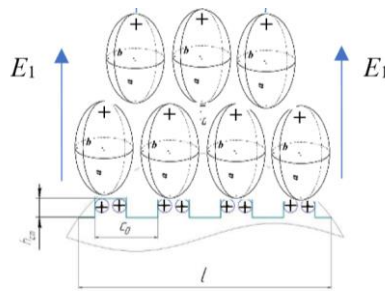


Рисунок 7 - Схема полімолекулярної структури з молекул ПАР на поверхні металу

Адсорбційні шари на поверхні металу формуються через електростатичну взаємодію поля поверхні та молекул поверхнево-активних речовин. Локальні джерела поля поверхні орієнтують молекули поверхнево-активних речовин вздовж вектору поля поверхні та притягують їх до поверхні, створюючи полімолекулярну квазікристалічну структуру адсорбційного шару (рис. 8).

Кожен наступний шар молекул ПАР, який адсорбується на поверхні, формується на більшій відстані від локальних джерел поля поверхні, зменшуючи сили взаємодії між молекулами та локальними джерелами поля поверхні (частково екранує поле локальних джерел поверхні). Отже, кожен нижче розташований адсорбований шар молекул ПАР має більшу енергію зв'язку і руйнування цього шару відбувається за умови дії більшої зовнішньої збурювальної енергії.

При наближенні поверхонь, покритих адсорбційним шаром ПАР, відбувається збільшення тиску в адсорбційному шарі, що призводить до зменшення його товщини. Це призводить до перебудови квазікристалічного адсорбційного шару на поверхні металу.

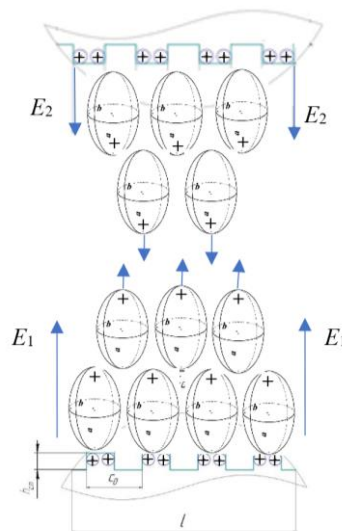


Рисунок 8 - Схема взаємодії поверхонь вкритих адсорбованими молекулами ПАР

Таким чином, найбільша енергія, необхідна для руйнування адсорбційного шару між сполученими поверхнями, буде досягнута тоді, коли між ними залишиться лише один шар адсорбованих молекул ПАР.

Відомо, що під впливом зовнішнього тиску на адсорбційний шар молекул ПАР відбувається зменшення його товщини до мономолекулярного стану, за яким слідує витискання молекул із зазору між контактуючими поверхнями.

Для визначення умов виштовхування молекул ПАР з мономолекулярного адсорбованого шару з контакту розглянемо детальніше процес взаємодії молекули з однією з поверхонь трибосполучення. Припустимо, що сполучені поверхні мають однакову поверхневу структуру, а саме утворені сукупністю сходинок "желе", згідно з рис. 6.

Розглянемо молекулу ПАР, поміщену в зовнішнє електростатичне поле, як показано на рис. 9.

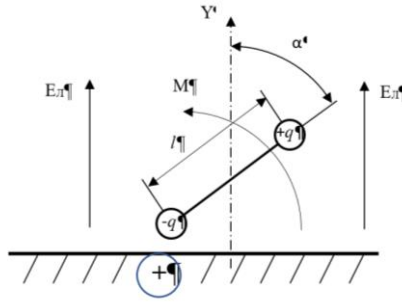


Рисунок 9 – Схема взаємодії електричного диполя ПАР (молекули присадки) з локальним електростатичним полем

Потенційна енергія диполя буде пов'язана з потенціалом силового поля таким рівнянням [9]

$$\begin{aligned} \varphi &= q \left[\varphi_n \cdot \left(\frac{l}{2} \cos \alpha \right) - \varphi_n \cdot \left(-\frac{l}{2} \cos \alpha \right) \right] = \\ &= q \cdot l \cdot \cos \alpha \cdot \frac{d\varphi_n}{d\alpha} = \vec{p} \cdot \vec{E} = p \cdot E \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (17)$$

де φ - потенціал локального електростатичного поля;

$\vec{p} = q \cdot \vec{l}$ - електричний дипольний момент молекули присадки;

$\vec{E}$ - напруженість локального поля.

Відповідно до схеми взаємодії, зображеної на рис. 10, молекула ПАР, адсорбована на одній із поверхонь, зазнає силового впливу з боку поля локальних центрів протилежної поверхні сполучення.

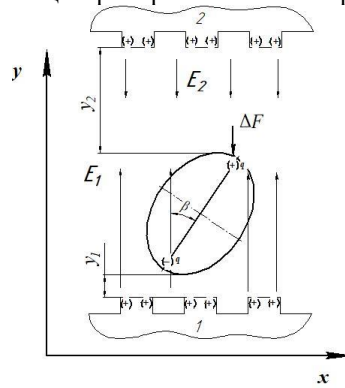


Рисунок 10 - Схема взаємодії адсорбованої молекули ПАР з полем поверхонь 1 і 2

Взаємодія відбувається в разі наближення поверхні 2 до молекули ПАР на такій відстані, за якої поля поверхні та молекули ПАР вступають у взаємодію на рівні Ван-дер-Ваальсових сил.

Якщо врахувати різну відстань зарядів диполя від джерела локального поля поверхні r_1 і r_2 , то енергія їхньої взаємодії з урахуванням цієї відстані дорівнюватиме:

$$\begin{aligned} U &= -q \cdot E_{local}(r_1) - (-q) \cdot E_{local}(r_2) = \\ &= q \cdot [E_{local}(r_2) - E_{local}(r_1)] \end{aligned} \quad (18)$$

де E_{local} - локальне електричне поле поверхні.

Силу взаємодії зарядів диполя і джерела локального поля поверхні F можна знайти як градієнт цієї енергії:

$$\vec{F} = -\nabla U = -\frac{dU}{dr} \cdot \vec{r} \quad (19)$$

Враховуючи залежність поля E_{local} від відстані джерела локального поля поверхні до зарядів диполя r_1 і r_2 і розкриваючи похідну, отримаємо:

$$\vec{F} = -q \cdot \left[\frac{dE_{local}(r_2)}{dr_2} - \frac{dE_{local}(r_1)}{dr_1} \right] \cdot \vec{r} \quad (20)$$

Використовуючи вираз для заряду диполя q у термінах постійного дипольного моменту полярної молекули p і відстані між зарядами l

$$q = \frac{p}{l} . \quad (21)$$

отримаємо вираз, який визначає силу взаємодії між полярною молекулою з постійним дипольним p моментом і локальним полем поверхні, з урахуванням відстані зарядами у диполі

$$\vec{F} = -\frac{p}{l} \left[\frac{dE_{local}(r_2)}{dr_2} - \frac{dE_{local}(r_1)}{dr_1} \right] \cdot \vec{r} . \quad (22)$$

Локальне електричне поле поверхні (E_{local}) зумовлене локальною густиною електричних зарядів на ній. У загальному випадку, електричне поле визначається градієнтом електричного потенціалу (V) у точці. Для локального джерела поля на поверхні можна використовувати формулу:

$$E_{local} = -\nabla V_{local} , \quad (23)$$

де: E_{local} - локальне електричне поле,

- V_{local} - локальний електричний потенціал.

Якщо на поверхні є розподілений заряд, то локальний електричний потенціал можна виразити як:

$$V_{local} = -\int \frac{k\sigma}{|\mathbf{r}|} dS , \quad (24)$$

де: k - електростатична постійна,

$|\mathbf{r}|$ - радіус-вектор від точки на поверхні до точки в просторі.

Для плоскої однорідно зарядженої поверхні з поверхневою густиною заряду σ .

$$V_{local} = -\int \frac{k\sigma}{|\mathbf{r}|} dS . \quad (25)$$

Градієнт цього потенціалу запишемо у вигляді:

$$\nabla V_{local} = \frac{\partial V_{local}}{\partial x} \cdot \vec{i} + \frac{\partial V_{local}}{\partial y} \cdot \vec{j} + \frac{\partial V_{local}}{\partial z} \cdot \vec{k} , \quad (26)$$

де $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - одиничні вектори вздовж координатних осей x, y, z .

Вектор $|\mathbf{r}|$ - це вектор радіуса від точки на поверхні до точки в просторі, і він визначається як $r = (x, y, z)$. Для обчислення його довжини $|\mathbf{r}|$, ми використовуємо формулу для евклідової норми в тривимірному просторі:

Тепер візьмемо похідні від E_{local} за координатами. Оскільки $|\mathbf{r}|$ входить у знаменник, ми будемо використовувати правило диференціювання складної функції.

За координатою x

$$\frac{\partial V_{local}}{\partial x} = \frac{k \cdot \sigma}{2 \cdot (x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \cdot \vec{i} . \quad (27)$$

За координатою y :

$$\frac{\partial V_{local}}{\partial y} = \frac{k \cdot \sigma}{2 \cdot (x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \cdot \vec{j} . \quad (28)$$

а координатою z :

$$\frac{\partial V_{local}}{\partial z} = \frac{k \cdot \sigma}{2 \cdot (x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \cdot \vec{k}. \quad (29)$$

Таким чином, у виразі для градієнта потенціалу присутній вираз, який відповідає кубу довжини вектора $|\mathbf{r}|$. Оскільки інтегрування виконується тільки за поверхневими зарядами, координата z не впливає на потенціал. Тоді:

$$\frac{\partial V_{local}}{\partial x} = \frac{k\sigma}{2|\mathbf{r}|^3} \vec{i}. \quad (30)$$

$$\frac{\partial V_{local}}{\partial y} = \frac{k\sigma}{2|\mathbf{r}|^3} \vec{j}. \quad (31)$$

$$\frac{\partial V_{local}}{\partial z} = 0. \quad (32)$$

Таким чином, локальне електричне поле поблизу однорідно зарядженої площини знаходиться з рівняння:

$$E_{local} = -\nabla V_{local} = \frac{k\sigma}{2|\mathbf{r}|^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma}{|\mathbf{r}|^3}, \quad (33)$$

де $|\mathbf{r}|$ - вектор спрямований у бік зменшення потенціалу.

Відповідно до схеми взаємодії, зображеної на рис. 10, молекула ПАР, адсорбована на одній із поверхонь, зазнає силового впливу з боку поля локальних центрів протилежної поверхні сполучення і відбувається в разі наближення поверхні 2 до молекули ПАР на такій відстані, за якої поля поверхні та молекули ПАР вступають у взаємодію на рівні Ван-дер-Ваальсових сил.

Якщо до полярної молекули прикласти зовнішнє навантаження зі сторони поверхні 2, то у взаємодії між поверхнями 1 і 2 виникає доданок N до електростатичної сили F_2 . Таким чином, сила, що діє на заряд $+q_p$ поміщений між поверхнями 1 і 2 буде дорівнювати

$$\Delta F = \left\{ q \cdot \frac{dE_{local}(r_1)}{dr_1} \cdot \vec{r} - \left[q \cdot \frac{dE_{local}(r_2)}{dr_2} \cdot \vec{r} + N \right] \right\}. \quad (34)$$

За умови, що сила тиску ΔF недостатня для зменшення відстані між зарядами в полярній молекулі ПАР, виникає її нахилу на деякий кут β щодо вектора поля поверхні 1 (рис. 11 а, б)

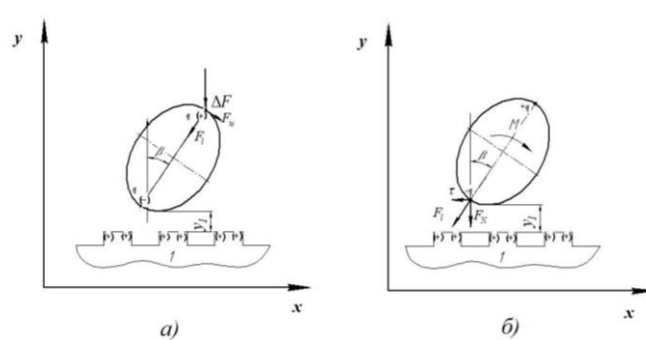


Рисунок 11 - Схема сил взаємодії адсорбованої молекули ПАР з полем поверхонь

У результаті цього з'являється сила τ , яка прагне виштовхнути молекулу із зони дії поля сполучених поверхонь. Вираз для сили, що діє на диполь у зовнішньому електростатичному полі, під час його повороту в площині xy на кут β , у проекції цієї сили на вісь x (перпендикулярну вектору поля) (рис. 12 б), матиме вигляд

$$d\tau = \Delta F \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta \cdot d\beta. \quad (35)$$

У цьому виразі: $d\tau$ - диференціал проекції сили на вісь x ; p - величина дипольного моменту; E - величина напруженості електростатичного поля; β - кут між дипольним моментом і напрямком вектора електростатичного поля поверхні металу $\vec{E}$.

7. Висновки

Сформовано фізичне уявлення про процес взаємодії поверхонь, покритих адсорбованим шаром ПАР, та розвиток процесу зміни його структури при зміні навантаження сполучення

Виконане аналітичне дослідження дозволяє виділити групу факторів, що впливають на процес формування зусилля, що виштовхує адсорбовану молекулу ПАР із зони контактування поверхонь

На основі виконаного дослідження передбачається розробка математичної моделі для вирішення питань оптимізації параметрів сполучення металевих поверхонь покритих абсорбційним шаром ПАР щодо гідроприводів машин у граничному режимі змащення. Зокрема, параметри мікрогеометрії металевих поверхонь та їх структура, розмір молекул ПАР та їх дипольні моменти, критичні навантаження у сполученнях гідроприводів будівельних і дорожніх машин.

Література

1. Чичинадзе А. В. Справочник по смазочным материалам. Т.1 / А. В. 1. Чичинадзе, М. Хебда. // Машиностроение. – 1989. – С. 400..
2. Johnson K. L., Contact Mechanics. – Cambridge: Cambridge University Press, 1985. – 452 p.
3. K. Nowlin, A. Boseman, A. Covell, D. LaJeunesse, J. Royal Soc. Interface 12, 20140999 (2014)..
4. Дёмкин Н. Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей / Н. Б. Дёмкин. – М.: Наука, 1970. – 266 с.
5. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.
6. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм: учеб. пособие. / А. Н. Матвеев. – М.: Высш. школа, 1983. — 463с.
7. Заславский Ю. С. Механизм действия противоизносных присадок к маслам / Ю. С. Заславский, Р. Н. Заславский. – М.: Химия, 1978. – 224 с.
8. Ефимовский С. Е. Взаимодействие диполя с поверхностью металла / С. Е. Ефимовский, Г. Г. Владимиров // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1987. – №4. – С. 44 – 49.
9. Лысков Е. Н. Надмолекулярные структуры жидких смазочных сред и их влияние на износ технических систем: монография / Е. Н. Лысков, В. Б. Косолапов, С. В. Воронин. – Харьков: ЭДЭНА, 2009. – 274 с.
10. Чичинадзе А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / Чичинадзе А.В., Берлинер Э.М., Браун Э.Д. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
11. Гаркунов Д. Н. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин / Д.Н. Гаркунов, П.И. Корник. – М.: Изд-во МСХА, 2003. – 344 с
12. Хусу А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный поход) / Хусу А. П., Витенберг Ю. Р., Пальмов В. А. – М.: Наука, 1975. – 344 с.
13. Гаркунов Д.Н. Триботехника / Гаркунов Д.Н. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с
14. Крагельский И.В. Основы расчета на трение и износ / Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. – М.: Машиностроение, 1977. – 525 с.
15. Літовка С. В. Розробка методу прогнозування технічного стану об'ємних гідроприводів трансмісій сільськогосподарських машин : дис. канд. техн. наук : 05.05.11 / Літовка Сергій Володимирович – Харків, 2011. – 264 с.
16. Zenguil E. Physics of Surfaces / Zenguil. – Cambridge: Cambr. Univ., 1988. – 327 с.
17. Суворов А. Л. Структура и свойства поверхностных атомных слоев металлов / А. Л. Суворов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 296 с.
18. Потапов Л. Г. Автоионная микроскопия сплавов / Л. Г. Потапов. – М.: Металлургия, 1981. – 193 с.
19. Косолапов В. Б. Исследование влияния микрогеометрии металлических поверхностей на процесс адсорбции ПАВ / В. Б. Косолапов, Ю. В. Рукавишников. // Вестник ХНАДУ : сб. научн. тр. – Харьков. – 2015. – №69. – С. 29 – 32.
20. Lundqvist, S. & N. H. March, eds. Theory of the Inhomogeneous Electron Gas New York: Plenum Press, 1983.. 395 pp.
21. Hirschfelder J. O. Molecular theory of gases and liquids. J. O. Hirschfelder, C. F. Curtiss, and R. B. Bird. Wiley, New York, 1954. xxvi + 1219 pp.
22. Xin-zheng Li; En-Ge Wang. Computer Simulations of Molecules and Condensed Matter: From Electronic Structures To Molecular Dynamics. Publisher: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2018
23. Quantum theory of crystalline solids Alexander O. E. Animalu Staff Member Lincoln Laboratory Massachusetts Institute of Technology Prentice'Hall of India Privat Limited New Delhi-110001 1978 516 pages

Reference

1. Chichinadze A. V. Spravochnik po smazochnym materialam. T.1 / A. V. 1. Chichinadze, M. Hebda. // Mashinostroenie. – 1989. – S. 400..
2. Johnson K. L., Contact Mechanics. – Cambridge: Cambridge University Press, 1985. – 452 p.
3. K. Nowlin, A. Boseman, A. Covell, D. LaJeunesse, J. Royal Soc. Interface 12, 20140999 (2014)..
4. Dyomkin N. B. Kontaktirovanie sherohovatykh poverhnostey / N. B. Dyomkin. – M.: Nauka, 1970. – 266 s.
5. Ahmatov A. C. Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya / A.S. Ahmatov. – M.: Fizmatgiz, 1963. – 472 s.
6. Matveev A. N. Elektrichestvo i magnetizm: ucheb. posobie. / A. N. Matveev. – M.: Vyssh. shkola, 1983. — 463 s.
7. Zaslavskij Yu. S. Mehanizm dejstviya protivovoiznosnyh prisadok k maslam / Yu. S. Zaslavskij, R. N. Zaslavskij. – M.: Himiya, 1978. – 224 s.
8. Efimovskij S. E. Vzaimodejstvie dipolya s poverhnostyu metalla / S. E. Efimovskij, G. G. Vladimirov // Poverhnost.

- Fizika, himiya, mehanika. – 1987. – №4. – S. 44 – 49.
9. Lysikov E. N. Nadmolekulyarnye struktury zhidkih smazochnyh sred i ih vliyanie na iznos tehniceskikh sistem: monografiya / E. N. Lysikov, V. B. Kosolapov, S. V. Voronin. – Harkov : EDENA, 2009. – 274 s.
 10. Chichinadze A.V. Trenie, iznos i smazka (tribologiya i tribotekhnika) / Chichinadze A.V., Berliner E.M., Braun E.D. – M.: Mashinostroenie, 2003. – 576 s.
 11. Garkunov D. N. Vidy treniya i iznosa. Ekspluatatsionnye povrezhdeniya detalej mashin / D.N. Garkunov, P.I. Kornik. – M.: Izd-vo MSHA, 2003. – 344 s.
 12. Husu A.P. Sherohovatost poverhnostej (teoretiko-veroyatnostnyj pohod) / Husu A. P., Vitenberg Yu. R., Palmov V. A. – M: Nauka, 1975. – 344 s.
 13. Garkunov D.N. Tribotekhnika / Garkunov D.N. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 328 s.
 14. Kragelskij I.V. Osnovy rascheta na trenie i iznos / Kragelskij I. V., Dobychin M. N., Kombalov V. S. – M: Mashinostroenie, 1977. – 525 s.
 15. Litovka S. V. Rozrobka metodu prognozuvannya tehnicnogo stanu ob'yemnih gidroprivodiv transmisij silskogospodarskikh mashin : dis. kand. tehn. nauk : 05.05.11 / Litovka Sergij Volodimirovich – Harkiv, 2011. – 264 s.
 16. Zenguil E. Physics of Surfaces / Zenguil. – Cambridge: Cambr.Ubiv, 1988. – 327 s.
 17. Suworov A. L. Struktura i svojstva poverhnostnyh atomnyh sloev metallov / A. L. Suworov. – M: Energoatomizdat, 1989. – 296 s.
 18. Potapov L. G. Avtoionnaya mikroskopiya splavov / L. G. Potapov. – M: Metallurgiya, 1981. – 193 s.
 19. Kosolapov V. B. Issledovanie vliyaniya mikrogeometrii metallicheskih poverhnostej na process adsorbicii PAV / V. B. Kosolapov, Yu. V. Rukavishnikov. // Vestnik HNADU : sb. nauchn. tr. – Harkov. – 2015. – №69. – S. 29 – 32.
 20. Lundqvist, S. & N. H. March, eds. Theory of the Inhomogeneous Electron Gas New York: Plenum Press, 1983.. 395 pp.
 21. Hirschfelder J. O. Molecular theory of gases and liquids. J. O. Hirschfelder, C. F. Curtiss, and R. B. Bird. Wiley, New York, 1954. xxvi + 1219 pp.
 22. Xin-zheng Li; En-Ge Wang. Computer Simulations of Molecules and Condensed Matter: From Electronic Structures To Molecular Dynamics. Publisher: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2018
 23. Quantum theory of crystalline solids Alexander O. E. Animalu Staff Member Lincoln Laboratory Massachusetts Institute of Technology Prentice'Hall of India Privat Limited New Delhi-110001 1978 516 pages

The efficient operation of construction and road-building machines, which takes up a considerable amount of time in unstable load conditions, inevitably causes increased wear, which leads to a reduction in the service life of the units and the overall reliability of the machines. It is particularly important to analyse aspects of wear on hydraulic drive surfaces, which proves to be the most dangerous in extreme lubrication regimes. The limiting lubrication regime occurs under conditions of high contact loads, low speeds of movement of surfaces and increased temperatures of the working fluid (WF). Under such conditions, the lubricating film of the WF undergoes destruction, which leads to direct contact of friction surfaces through microroughnesses. This, in turn, leads to increased wear. Taking into account the tendency to increase the volume of construction and road works, the task of providing increased reliability of road machines by determining the rational load limits of tribo-conjugations becomes important.

The aim of the work was to determine the physical bases of non-contact interaction of surfaces of moving mating surfaces of hydraulic drives of machines in the limiting lubrication mode.

The solution of the set tasks provided the formation of the model of local sources of electrostatic field of rough metallic surfaces; determination of the energy of interaction of local sources of electrostatic field of surfaces with polar molecules of surfactants, which are part of the working fluid of hydraulic drives of construction and road machines; analytical determination of the interaction of local sources of electrostatic field of surfaces with polar molecules of surfactants, which are part of the working fluid of hydraulic drives of construction and road machines, analytical determination of the dependence of the specific pressure in the contact of the surfaces of the tribo-joint on its actual area, in the presence of the working fluid; analytical definition of physical principles determining the conditions of contact of mating surfaces through the adsorbed SAW layer and the absence of their direct contact

Based on the results of the study, a physical representation of the interaction process of surfaces covered with adsorbed SAW layer and the development of the process of changing its structure under changing the load on the mating surfaces is formed.

The carried out analytical research allows to allocate a group of factors influencing the process of formation of the force pushing out the molecule of adsorbed SAW from the contact zone of surfaces.

In the work physical principles of formation of the ejection force acting on the polar molecule adsorbed on the metal surface, which are based on the physical principles of interaction of local sources of electrostatic field of the metal surface with the polar SAW molecule, are proposed.

The use of the proposed mathematical model allows to develop mathematical models for solving the issues of optimisation of parameters of mating metal surfaces covered with adsorbing layer of SAW, as applied to hydraulic drives of machines in the regime of boundary lubrication. In particular, parameters of microgeometry of metal surfaces and their structure, sizes of SAW molecules and their dipole moments, as well as critical loads in mating hydraulic drives of construction and road machines.

Keywords: adsorption, surface active substances (SAS), micronuria, jelly model, Lennard-Jones potential, electrostatic field strength.

Косолапов В. Б. - канд. техн. наук., доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, dr.tribolog@gmail.com