ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцев Б.Ф., Шевченко В.А., Резников А.А. Методика численного анализа динамического нагружения основной рамы автогрейдера // Сборник материалов Международной научно-технической конференции „ИНТЕРСТРОЙМЕХ 2010”. – Белгород, 2010. - С. 161-167.

2. Палеев В.А., Тимков С.Ю., Палеев А.В. Кинематические характеристики устройств подвеса и выноса отвала автогрейдера // Строительные и дорожные машины. 2009. №5. С. 47 – 51.

3. А.с. 785427 СССР. Подвеска тяговой рамы автогрейдера / В.С. Танин – Шахов, Я.Н. Куликовский, Р.С. Петров, Н.К. Фаст, А.С. Шейнин. Опубл. 07.12.80. Бюл. № 45.

4. Палеев В.А., Гидромеханические системы стабилизации положения рабочего органа дорожных и строительных машин // Строительные и дорожные машины. 2002. №10. С. 42 – 24.

5. Палеев В.А., Исламов В.А. Результаты сравнительных испытаний автогрейдера, оснащенного системами стабилизации положения отвала // Строительные и дорожные машины. 2004. №3. С. 34 – 36.

УДК 621.869.98

Є. С. ВЕНЦЕЛЬ, докт. техн. наук, О. В. ОРЕЛ, аспірант

Харьковский национальный автомобильно-дорожный університет

ВЗАЄМОЗВ`ЯЗОК МІЖ КОЕФІЦІЄНТОМ ПРОТИЗНОШУВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОБОЧИХ РІДИН ТА ШВИДКІСТЮ ЗНОШУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ГІДРОПРИВОДУ

Вступ. Незважаючи на відсутність аналітичного зв’язку між характеристиками процесу зношування, між ними існує певна кореляція, про яку йшлося, наприклад в [1]. Така кореляція обумовлена тим, що усе розмаїття окремих аспектів тертя є проявом єдиного дисипативного процесу, що впливає як на структуру поверхней тертя [2], так і на наслідки їхньої взаємодії. Останнє в значної мірі залежить від властивостей робочих рідин, які використовуються в гідроприводах. Особливу роль при цьому грає гранулометричний склад частинок забруднень в робочих рідинах. Відомо, що частинки, які мають розмір 5 мкм та менше, здібні покращити характеристики тертя, тобто зменшити знос поверхней [3 і ін]. Але до цього часу немає зв`язку між гранулометричним складом часто і швидкістю зношування поверхонь.

Аналіз публікацій. Ступінь дисперсності частинок в робочих рідинах, їхня концентрація і характер розподілу концентрації за їх розміром здійснює суттєвий вплив на трибологічніі характеристики пар тертя (головним чином на силу тертя і інтенсивність зношування) [1, 3, 5, 6].

Протизношувальні властивості робочих рідин в значній мірі залежать від кількості частинок забруднень розміром 5 мкм і менше наряду з частинками більших розмірів [1, 3 і ін.]. Тому в [3] було запропоновано введення коефіцієнта протизношувальних властивостей робочих рідин, який враховує вплив на ці властивості частинок забруднень всіх розмірів.

Мета роботи. Встановити аналітичний взаємозв`язок між коефіцієнтом протизношувальних властивостей та швидкістю зношування пар тертя гідроприводу.

Основна частина. Метод дослідження дисипативних процесів різної природи, що здійснюються в парах тертя, базується на відомій теоремі І. Пріґожіна про мінімізацію продукування ентропії.

У вузлі тертя відбуваються процеси переносу ентропії та речовини, для яких узагальнені рівняння балансу набувають вигляду

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + div\vec{J}_S = ps\,; \tag{1}$$

$$\frac{\partial n_v}{\partial t} + div\vec{J}_N = Wn\,, \tag{2}$$

де ρ_s – об’ємна густина ентропії, $\vec{J}_S$ – густина потоку ентропії, p_s – продукування ентропії, n_v – об’ємна концентрація частинок забруднення, $\vec{J}_N$ – густина потоку частинок зношування, Wn – кількість частинок, що виникає у одиниці об’єму вузла тертя за одиницю часу.

Для стаціонарного процесу вузла тертя похідні за часом дорівнюють нулю, і попередні рівняння набувають вигляду

$$div\vec{J}s = ps\,; \tag{3}$$

$$div\vec{J}n = Wn\,. \tag{4}$$

Для стаціонарного режиму тертя можна сформулювати рівняння балансу для частинок зношування, виходячи з таких уявлень:

1. Якщо поверхні тертя генерують за одиницю часу у одиниці об'єму n_0 частинок, і у той же час з вузла тертя виноситься n_{ex} частинок, а всередині вузла генерується за рахунок внутрішніх процесів n_{gi} частинок, то у зазорі вузла тертя знаходиться n_v частинок, число яких задовільняє рівнянню

$$n_v = n_0 - n_{ex} + n_{gi} \ . \tag{5}$$

2. Наявність у вузлі тертя заряджених частинок, потребує враховувати їхню концентрацію n_q у загальному балансі концентрації частинок зношування. Концентрація заряджених частинок у тонко дисперсних системах за даними [2] складає від 0,4 до 0,75 загальної концентрації у діапазоні розмірів частинок 0,3 – 0,7 ммк, отже можна вважати, що

$$n_q = k_q n_V \,, \tag{6}$$

де коефіцієнт пропорційності k_q приймає характерні значення від 0,4 до 0,75 у вказаному діапазоні розмірів [2].

Величина заряду q дисперсної частинки пов'язана з їх розміром a формулою [4]

$$q = 4\Pi\pi\varepsilon_0\varepsilon\varphi_0 a \cdot \exp\left(-\frac{a}{D}\right), \tag{7}$$

де ε – діелектрична проникність середовища (ε_0 = 8,854·10^{-12} Ф/м – електрична стала); φ_0 – потенціал виходу, В; а – розмір частинок забруднень, м; D – радіус дебаєвскго екранування заряджених частинок, м.

Продукування ентропії відповідно до загального змісту цієї величини можна надати у вигляді

$$p_s = \int \vec{X}_q d\vec{j}_q \,, \tag{8}$$

де $\vec{j}_q$ – густина струму заряджених частинок зносу;

$\vec{X}_q$ – термодинамічна сила, що спричинює цей струм.

Згідно із [1], термодинамічна сила для цього випадку визначається згідно з рівнянням

$$\vec{X}_q = -\frac{grad\varphi}{T} \,, \tag{9}$$

де φ – електричний потенціал поля сил електростатичного зображення.

При цьому можна вважати, що частинка-зображення створює електричне поле, яке описується дебаєвським потенціалом

$$\varphi_D = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r}\exp\left(-\frac{r}{D}\right). \qquad (10)$$

При цьому частинка-оригінал рухається в цьому полі.

З огляду на швидке зменшення дебаєвського потенціалу його можна покласти рівним нулю, починаючи з відстані z′ від поверхні тертя, для якої z′ >>d. в усіх точках, що задовольняють цій умові, швидкість v_z частинки-оригінала, яка обумовлена електростатичною взаємодією, дорівнює нулю, бо така взаємодія між частинкою-оригіналом і частинкою-зображенням є зневажливо малою. під дією дебаєвського поля частинка-оригінал рухається перпендикулярно до площини тертя, наближаючись до неї на мінімальну відстань δ, яка визначається товщиною поверхневого адсорбованого прошарку, приблизно дорівнює розміру заряджених об’єктів – дрібнодисперсних частинок домішок, тобто

$$\delta \approx a\,. \qquad (11)$$

Оскільки розгін частинки-оригіналу відбувається на малій відстані, роботою сил в'язкого тертя можна знехтувати. Тоді різниця дебаєвських потенціалів між точкою z′, де φ (z′) = 0 і точкою, яка віддалена на величину δ від номінальної поверхні трибосполучення, дорівнює кінетичній енергії частинки, поділеної на заряд, тобто

$$q\Delta\varphi = \frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon\cdot 2\delta}\exp\left(-\frac{2\delta}{D}\right) = \frac{mv_z^2}{2}. \qquad (12)$$

Виходячи з цього рівняння, у роботі [5] було знайдено продукування ентропії dp_{sq} у діапазоні розмірів da заряджених дисперсних частинок, що рухаються під дією індукованих у металі зарядів:

$$dp_{sq} = \frac{4\pi(\varepsilon_0\varepsilon)^2\varphi_0^3 a^{3/2}\left(\frac{1}{\delta}+\frac{1}{D}\right)\exp\left(-3\frac{a}{D}-2\frac{\delta}{D}\right)\sqrt{\frac{3}{\varepsilon_0\varepsilon\rho}}}{\delta^{3/2}T} f(a)da, \qquad (13)$$

де $f(a) = \frac{dn_V}{n_V da}$ – функція розподілу частинок забруднень за розмірами.

Розглянемо процес зношування, що обумовлений винесенням частинок знсу концентрацією n_{ex} з вузла тертя. За даними роботи [3] густина потоку частинок зношування уздовж вісі z

$$d\vec{J}_N = n_{ex}\left(\frac{\sigma_{fr}}{2\pi\rho n_0 I a^3}\right)^{1/2}\vec{k}f(a)da. \qquad (14)$$

Термодинамічна сила, що спричинює цей потік, має визначатися за рівнянням

$$\vec{X}_N = -\frac{\sigma_{fr}}{ITn_{ex}^2} gradn \ , \qquad (15)$$

де I – інтенсивність зношування, σ_{fr} питома сила тертя.

При кількісній оцінці величини **grad n** будемо вважати, що концентрація частинок домішок на виході з вузла тертя набагато менша за концентрацію $\mathbf{n_0}$ біля поверхні тертя, у зв'язку з чим величина **grad n** мала вигляд

$$gradn = \frac{n_0}{2R_{\max}\left[1-\left(\frac{a_0}{b_0}\cdot\frac{p_C}{HB}\right)^{1/v}\right]} , \qquad (16)$$

де p_C – контурний тиск, HB – твердість, $R_{\max}$ – максимальна відстань між поверхнями зношування, a_0, b_0 – параметри кривої опорної поверхні.

Але слід мати на увазі, що у потоку частинок зношування беруть участь не усі частинки, що містяться у вузлі тертя (n_V) а ті, що виносяться з нього, і концентрація останніх дорівнює n_{ex}. Щодо оцінки величини $gradn$, слід відмітити, що вона буде більш точною, якщо враховувати частинки, що виходять за межі вузла тертя (їх концентрація дорівнює n_{ex}, і тоді співвідношення для оцінки величини $gradn$ набуває вигляду

$$gradn = \frac{n_0 - n_{ex}}{2R_{\max}\left[1-\left(\frac{a_0}{b_0}\cdot\frac{p_C}{HB}\right)^{1/v}\right]} . \qquad (17)$$

Згідно з рівнянням (8) унаслідок процесу зношування за рахунок частинок, що виносяться з вузла тертя, виникає продукування ентропії, яке визначається рівнянням

$$dp_{sN} = -\left(\frac{\sigma_{fr}}{Ia}\right)^{3/2} \frac{n_0 - n_{ex}}{2R_{\max}\left[1-\left(\frac{a_0}{b_0}\cdot\frac{p_C}{HB}\right)^{1/v}\right]\sqrt{2\pi\rho n_0}\cdot n_V T} f(a)da . \qquad (18)$$

З рівнянь (13) і (18) можна визначити частинні похідні від обох компонентів продукування ентропії p_{sq} і p_{sN} за розміром частинок:

$$\frac{\partial p_{sq}}{\partial a} = \frac{4\pi(\varepsilon_0\varepsilon)^2\varphi_0^3 a^{3/2}\left(\frac{1}{\delta}+\frac{1}{D}\right)\exp\left(-3\frac{a}{D}-2\frac{\delta}{D}\right)\sqrt{\frac{3}{\varepsilon_0\varepsilon\rho}}}{\delta^{3/2}T} f(a); \qquad (19)$$

$$\frac{\partial p_{sN}}{\partial a} = -\left(\frac{\sigma_{fr}}{Ia}\right)^{3/2} \frac{n_0 - n_{ex}}{2R_{\max}\left[1-\left(\frac{a_0}{b_0}\cdot\frac{p_C}{HB}\right)^{1/v}\right]\sqrt{2\pi\rho n_0}\cdot n_V T} f(a)da \,. \quad (20)$$

Сума частинних похідних від продукування ентропії p_{sq} і p_{sN} є частиною похідною від їхньої суми:

$$p_s = p_{sq} + p_{sN}\,. \quad (21)$$

Рівняння $\frac{\partial p_s}{\partial a}$ є необхідною умовою екстремума функції декількох змінних (для продукування ентропії цей екстремум у відповідності до теореми І. Пріґожіна є мінімумом). У зв'язку з цим з рівнянь (19) - (21) з урахуванням $\frac{\partial p_s}{\partial a}$ можна визначити інтенсивність зношування, яка дорівнює

$$I = \frac{\sigma_{fr}\left(n_0 - n_{ex}\right)^{1/3} \lambda^{2/3} \delta^{5/3} \exp\left(2\frac{a}{D} + \frac{4\delta}{3D}\right)}{2{,}28\varepsilon_0 \varepsilon a^2 \varphi_0^2 \left(\lambda + \delta\right)^{2/3} \cdot R_{\max}^{2/3}\left[1-\left(\frac{a_0}{b_0}\cdot\frac{p_C}{HB}\right)^{1/v}\right]^{2/3} n_{ex}^{4/3}} \,. \quad (22)$$

Як відомо, крім інтенсивності застосовується також швидкість зношування i_v. остання характеристика є у даному випадку більш зручною, ніж інтенсивність і, оскільки швидкість зношування визначається як швидкість зменшення товщини поверхні тертя з часом

$$i_v = \frac{dh}{dt}\,.$$

Зменшення концентрації частинок зношування з часом також є похідною за часом. між цими двома характеристиками процесу зношення існує очевидний зв'язок:

$$I = \frac{i_v}{u}\,, \quad (23)$$

де u є відносною швидкістю ковзання поверхней тертя.

При аналізі процесів, що перебігають у механічному вузлі при відносному русі поверхонь, будемо виходити з найбільш загального визначення сили тертя F_{fr}, як похідної від дисипативної функції D* по узагальненій швидкості $\dot{l}$:

$$F_{fr} = \frac{dD^*}{d\dot{l}} . \tag{24}$$

Таке визначення сили тертя використовується, наприклад, в [3; 5], що з урахуванням співвідношення між дисипативною функцією, продукуванням ентропії p_S і температурою Т, має вигляд

$$D^* = p_s \cdot T \ . \tag{25}$$

Це рівняння дозволяє отримати зв'язок між питомою силою тертя σ_{fr} і продукуванням ентропії у вигляді:

$$d\sigma_{fr} = \frac{hT}{u} dp_s , \tag{25}$$

де h – товщина деформованого шару тертя, м.

Підставляючи у рівняння (25) $p_s = p_{sq}$, з рівнянням (13), і інтегруючи, що одержане, отримаємо:

$$\sigma_{fr} = \frac{4\pi h}{u} \int_0^{a_{MAX}} n_q \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\delta} \right)^{3/2} \varphi_0^3 \left(\frac{a}{\delta} + \frac{a}{\lambda} \right) \sqrt{\frac{3a}{\rho}} \cdot \exp\left(-3\frac{a}{D} - 2\frac{\delta}{D} \right) f(a) da . \tag{26}$$

Зробимо оцінку підінтегральної функції, зважаючи на те, що $\frac{a}{\delta} \approx 1$, а величина радіуса d дебаєвського екранування згідно з [8] визначається формулою

$$D = \frac{1}{2q} \sqrt{\frac{\varepsilon_0 kT}{\pi n_V}} . \tag{27}$$

При цьому треба мати на увазі, що згідно з рівнянням (7), заряд q є функцією d. числове розв’язання рівнянь (7) й (27), що наведене у [7], показало, що відношення $\frac{a}{D} << 1$ і практично не залежить від розміру тонкодисперсних частинок. ці обставини наводить до висновку про слабку залежність величини $\exp\left(-3\frac{a}{D} - 2\frac{\delta}{D} \right)$ від a. оскільки у діапазоні субмікронних розмірів густина частинок лінійно зменшується з їхнім розміром [2], то $\sqrt{\frac{a}{\rho}}$ також можна розглядати як величину, що слабко змінюється, і тоді маємо

$$\begin{aligned} &\int_0^{a_{MAX}} n_q \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\delta} \right)^{3/2} \varphi_0^3 \left(\frac{a}{\delta} + \frac{a}{\lambda} \right) \sqrt{\frac{3a}{\rho}} \cdot \exp\left(-3\frac{a}{D} - 2\frac{\delta}{D} \right) f(a) da \approx \\ &\approx n_d \left(\frac{1}{\delta} + \frac{1}{D} \right) \exp\left(-3\frac{a}{D} - 2\frac{\delta}{D} \right) \sqrt{\frac{3a}{\rho}} \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\delta} \right)^{3/2} \varphi_0^3 \int_0^{a_{\max}} a f(a) da \end{aligned} \tag{28}$$

Через швидке зменшення функції розподілу $f(a)$ після максимального розміру частинок можна вважати, що

$$\int_0^{a_{MAX}} af(a)da \approx \int_0^{\infty} af(a)da \ . \quad (29)$$

Тут інтеграл у правій частині є середнім розміром $\bar{a}$ частинок.

Таким чином маємо таке наближення для питомої сили тертя:

$$\sigma_{fr} = \frac{4\pi h}{u} n_q \left(\frac{1}{\delta} + \frac{1}{\lambda}\right) \exp\left(-3\frac{a}{D} - 2\frac{\delta}{D}\right) \sqrt{\frac{3a}{\rho}} \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\delta}\right)^{3/2} \varphi_0^3 \cdot \bar{a} \quad . \quad (30)$$

Підставляючи рівняння (23) у (22) з урахуванням (2.20),

маємо наступне рівняння для швидкості зношування:

$$i_v = \frac{4\pi h\bar{a}\left(\frac{1}{\delta} + \frac{1}{D}\right)\exp\left(-3\frac{a}{D} - 2\frac{\delta}{D}\right)\sqrt{\frac{3a}{\rho}}\varphi_0 D^{2/3}\delta^{5/3}\exp\left(2\frac{a}{D} + \frac{4\delta}{3D}\right) n_q \left(n_0 - n_{ex}\right)^{1/3}}{2{,}28\varepsilon_0\varepsilon\left(\frac{\varepsilon_0\varepsilon}{\delta}\right)^{-3/2} a^2 \left(D+\delta\right)^{2/3} R_{\max}^{2/3}\left[1 - \left(\frac{a_0}{b_0}\cdot\frac{p_c}{HB}\right)^{1/v}\right]^{2/3} n_{ex}^{4/3}} \ . \quad (31)$$

Оскільки, згідно з даними, що наведені вище, було визначено, що $\frac{a}{D} << 1$ і $a \approx \delta$ добуток експонент у чисельнику є близьким до одиниці. крім того, враховуючи, що товщина δ поверхневого адсорбованого молекулярного шару суттєво менше радіуса d дебаєвського екранування, приходимо до висновку, що $\frac{1}{\delta} >> \frac{1}{D}$. ці обставини дозволяють надати попереднє рівняння після відповідних спрощень і підстановки ε_0 = 8,854·10^{-12} ф/м у вигляді

$$i_v = 2{,}8\cdot 10^{-5} h \frac{\varphi_0\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\rho a}\cdot\delta^{5/6} R_{\max}^{2/3}\left[1 - \left(\frac{a_0}{b_0}\cdot\frac{p_c}{HB}\right)^{1/v}\right]^{2/3}} \cdot \frac{n_q\left(n_0 - n_{ex}\right)^{1/3}}{n_{ex}^{4/3}} \ . \quad (32)$$

Розглянемо структуру й властивості останнього множника цього рівняння, що є функцією лише самої концентрації:

$$f(n) = \frac{n_q\left(n_0 - n_{ex}\right)^{1/3}}{n_{ex}^{4/3}} \ . \quad (33)$$

Враховуюче рівняння (6), отримаємо:

$$f(n)=\frac{k_q\left(1-\frac{n_{gi}}{n_V}\right)^{1/3}}{\left(n_{ex}/n_V\right)^{4/3}} . \tag{34}$$

Як видно з (34), $f(n)$, а з нею й швидкість зношування зменшується зі збільшенням величин концентрацій n_{gi} й n_{ex}, що належать до тонкодисперсної області частинок зношування. навпаки, зростання загальної концентрації n_V призводить до збільшення швидкості зношування. такий характер залежності i_v від концентрації окремих груп частинок дозволяє розглядати величину $\theta=\frac{n_{ex}}{n_V}$ в якості коефіцієнта протизношувальних властивостей змащувального середовища [4]. при цьому рівняння для швидкості зношування набуває вигляду

$$i_v = 2{,}8\cdot 10^{-5}\, h \frac{\varphi_{0\sqrt{\varepsilon}}}{\sqrt{\rho a}\cdot \delta^{5/6} R_{\max}^{2/3}\left[1-\left(\frac{a_0}{b_0}\cdot\frac{p_c}{HB}\right)^{1/v}\right]^{2/3}}\cdot k_q \frac{\left(1-\frac{n_{gi}}{n_V}\right)^{1/3}}{\theta^{3/4}} . \tag{35}$$

Як видно з (35), на швидкість зношування вирішальний вплив здійснює концентрація частинок забруднень різних типів, причому найбільше значення мають величини $\frac{n_{gi}}{n_V}$ та θ

Розмір частинок не суттєво впливає на цю величину через те, що діелектрична проникність ε, що знаходиться у чисельнику, збільшується зі зростанням а [5], яке знаходиться у знаменнику. як видно з (35), зростання частки частинок, що генеруються усередині вузла тертя, може зменшити швидкість зношування до скільки завгодно малих значень. але якщо практична оцінка цієї величини зіштовхується з певними труднощами, то величину $\theta=\frac{n_{ex}}{n_V}$ можна трактувати як частку дрібнодисперсних частинок в повному ансамблі частинок домішок і забруднень, через те що з вузла тертя виноситься головним чином дрібнодисперсні частинки. цю величину можна пов'язати з практично застосованою величиною коефіцієнта протизншувальних властивостей k_j, як відношення кількості дрібнодисперсних частинок до кількості решти частинок, тобто

$$k_j=\frac{n_d}{n_V-n_d}, \tag{36}$$

де $n_d \approx n_{ex}$ – об'ємна концентрація дрібнодисперсних частинок.

У такому разі очевидно, що між протизносним параметром θ й коефіцієнтом протизношувальних властивостей k_j існує зв'язок, що має вигляд співвідношення

$$\theta = \frac{k_j}{1+k_j}. \quad (37)$$

При цьому рівняння для швидкості зношування вузла тертя набуває вигляду

$$i_v = 2{,}8 \cdot 10^{-5} h \frac{\varphi_0 \sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\rho a} \cdot \delta^{5/6} R_{\max}^{2/3} \left[1 - \left(\frac{a_0}{b_0} \cdot \frac{p_c}{HB}\right)^{1/v}\right]^{2/3}} \cdot k_q n_V^{1/3} \left(1 - \frac{n_{gi}}{n_V}\right)^{1/3} \left(1 + \frac{1}{k_j}\right)^{4/3}. \quad (38)$$

Це рівняння корелюється із результатами досліджень [8], які свідчать про зниження інтенсивності зношування вузлів тертя гідросистеми, що обумовлено покращенням протизношувальних властивостей робочої рідини гідроприводів з більш високим значенням коефіцієнта k_j.

Висновки.

1. Показником протизношувальних властивостей робочої рідини гідроприводів може бути коефіцієнт їх протизношувальних властивостей, який представляє собою відношення кількості дрібнодисперсних розміром (5 мкм і менше) до грубо дисперсних (більше 5 мкм) частинок.

2. Швидкість зношування пар тертя гідроприводів має вигляд спадаючої функції коефіцієнта протизношувальних властивостей.

ЛІТЕРАТУРА

1. Березняков А. И., Венцель Е. С. Комплексная структурная приспособляемость трибосопряжений в аспекте теоремы И. Пригожина // Трение и износ.–1993 (14), №1, С. 194 – 202

2.Green H., Lane W. Particulate clouds: dusts smokes and mists, London, 1964. Русский перевод: Аэрозоли - пыли, дымы и туманы. - Л.: Химия, 1969. - 427 с.

3. Венцель Е. С. Гранулометрический состав загрязнений как один из факторов, определяющих противоизносные свойства масел // Трение и износ.–1992(13), №4, С. 684–688.

4. Березняков А.И. Уравнение интенсивности изнашивания узла трения при наличии частиц загрязнений в смазочном материале // Трение и износ, 17 (1996), №1, С. 43 – 48.

5. Goertz C.K. Dusty plasmas in the Solar system // Reviews of Geophysics, 27, 2 (May 1992), С. 271-272.

6. Березняков А. И., Венцель Е. С., Кравец А. М. О корреляции между триботехническими и электрическими параметрами узла трения // Трение и износ.–2003(24), №5, С. 469–476.

7 . Громаковский Д.Г. Система понятий и структура моделей изнашивания//Трение и износ. 1997. Т.18. № 1. С. 53-62.

8. Венцель Е.С. Коефіцієнт протизношувальних властивостей як критерій визначення строків служби робочих рідин гідроприводів будівельних машин / Е.С. Венцель, О.В. Орел // Сб. научн. Тр. №57 – Днепропетровск: ПГАСА, 2010. – 290с.

УДК 534.1

В.С. ЛОВЕЙКІН, докт. техн. наук, Ю.В. ЧОВНЮК, канд. техн. наук.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

М. Г. ДІКТЕРУК, канд. техн. наук, К. І. ПОЧКА, канд. техн. наук.

Київський національний університет будівництва і архітектури

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, МАТЕМАТИЧНЕ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ САПР ВІБРОУДАРНИХ (СУТТЄВО НЕЛІНІЙНИХ) МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Постановка проблеми. При дослідженні динаміки машин та механізмів, створенні фізико-механічних моделей, математичному та інформаційно-аналітичному забезпеченні САПР віброударних (суттєво нелінійних) механічних систем, як правило, слід мати справу з нелінійними коливними системами. Це пояснюється тим, що без врахування існуючих фізичних та геометричних нелінійностей не завжди можна визначити динамічні характеристики машини й правильно оцінити її міцність та надійність. Нелінійність пружних характеристик зустрічається у багатьох механізмах. Вона є причиною виникнення суб- та супергармонічних коливань, великих амплітуд коливань у нелінійних резонансних зонах при стаціонарних та перехідних режимах, багаторежимності на одній частоті вимушеної