УДК 621.891:631.31 DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.148.2014.71933

ВИБІРКОВЕ ЗНОШУВАННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ ТА ЗЕМЛЕРИЙНИХ МАШИН ЯК ВІДОБРАЖЕННЯ СТОХАСТИЧНОЇ ПРИРОДИ ЇХ ВЗАЄМОДІЇ З ЧАСТИНКАМИ ҐРУНТУ

Канд. фіз.-мат. наук В.В. Аулін,
кандидати техн. наук В.А. Настоящий, А.А. Тихий

ВЫБОРОЧНЫЙ ИЗНОС РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ И ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН КАК ОТОБРАЖЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ЧАСТИЦАМИ ПОЧВЫ

Канд. физ.-мат. наук В.В. Аулин,
кандидаты техн. наук В.А. Настоящий, А.А. Тихий

SELECTIVE WEAR OF THE WORKING BODIES OF TILLAGE AND EARTHMOVING MACHINES AS A MAP OF THE STOCHASTIC NATURE OF THEIR INTERACTION WITH SOIL PARTICLES

Cand. of physics and mathematics sciences V. Aulin,
Cand. of techn. sciences V.Nastoyashchiy, A. Tihiy

У статті наведено результати дослідження механізму взаємодії робочих органів ґрунтообробних та землерийних машин (РОҐЗМ) з дисперсним середовищем ґрунту та побудовано математичну модель цього процесу. Показано, що взаємодія частинок ґрунту з робочою поверхнею РОҐЗМ, має стохастичний характер і під силовим впливом обумовлює вибіркове зношування. Зношування розглядається як необоротний дисипативний процес з густиною прикладеної зовнішньої енергії.

Ключові слова: *ґрунт, робочий орган ґрунтообробної землерийної машини, абразивна частинка, стохастична взаємодія, відлік випадкового процесу.*

В статье приведены результаты исследования механизма взаимодействия рабочих органов почвообрабатывающих и землеройных машин (РОГЗМ) с дисперсной средой грунта и построена математическая модель этого процесса. Показано, что взаимодействие частиц грунта с рабочей поверхностью РОҐЗМ, имеет стохастический характер и под силовым воздействием обуславливает избирательный износ. Износ рассматривается как необратимый диссипативный процесс с переменной плотностью приложенной внешней энергии.

Ключевые слова: *почва, рабочий орган почвообрабатывающей землеройной машины, абразивная частица, стохастическое взаимодействие, отсчет случайного процесса.*

The article describes the working mechanism of interaction of tillage and earthmoving machines WMIEM to disperse the soil environment and the mathematical model of the process. Showing accessories work surface WMIEM the terms of interaction with the soil under the influence of power, resulting in observed sample of abrasive wear. Correlation wear as irreversible dissipative process with applied external energy density. Revealed that the formation of geometric shapes WMIEM in friction and wear is based on changes in the characteristics of the environment and the soil round the nature of its speed and relative motion. We study the patterns of contact with soil particles in the medium lower and upper surfaces of WO WMIEM and distribution of particles in the layer adjacent to the surface. Research subject WMIEM and their designs with cutting elements pointed bottom, top, both sides and blunt placed in the vertical and horizontal planes. Calculations are carried out on a PC to identify varying the deterministic and random components of the process for hardened wear and serial WMIEM.

Keywords: *Soil, tillage working body digger, abrasive particles, stochastic interaction, count of a random process.*

Вступ. З теоретичної точки зору динаміка зношування РОҐЗМ в ґрунті остаточно не розкрита [1], особливо це стосується РОҐЗМ з РЕ. Не отримано рівняння, яке пов’язує фізико-механічні характеристики середовища ґрунту, матеріалу РЕ та умови експлуатації РОҐЗМ, відсутні адекватні фізико-математичні моделі зношування і формування геометрії РЕ [2].

Робоча поверхня РОҐЗМ, пристосовуючись до умов взаємодії з ґрунтом, під силовим впливом підлягає вибірковому зношуванню, яке має ймовірну природу і є необоротним дисипативним процесом при зниженні густини прикладеної зовнішньої енергії та формуванні стабільної форми [3].

Постановка проблеми. Робочі органів ґрунтообробних та землерийних машин (РОГЗМ) під час взаємодії з ґрунтом підлягають різним видам зношування: абразивному, корозійному, адгезійному та втомному. При цьому переважає абразивне зношування (АЗ) [4]. Природа АЗ, його механізм на сьогодні остаточно не з'ясовано. Це обумовлено складністю процесу взаємодії локальних ділянок поверхні РОГЗМ з абразивними частинками (АЧ), що знаходяться в прилеглому шарі ґрунту. На характер і величину зносу впливають фізико-механічні, фізико-хімічні, трибологічні та реологічні характеристики поверхневих шарів РОГЗМ і ґрунту, їх напружено-деформовані стани (НДС) та зношувальна здатність. Для характеру взаємодії важливим є концентрація, форма і твердість АЧ в прилеглому шарі до РОГЗМ ґрунту, а також ймовірність їх співударяння, з робочою поверхнею РОГЗМ, тобто важливим є дослідження закономірностей процесів контактної взаємодії та законів розподілу АЧ в триботехнічній системі (ТТС) "РОГЗМ-грунт"[5]. Знаючи це та, керуючи умовами взаємодії в ТТС, можна реалізувати процеси і стани самоорганізації, при яких інтенсивність зносу робочої поверхні РОГЗМ буде мінімальною, а коефіцієнт тертя в ТТС "РОГЗМ-грунт" оптимальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В сучасному сільськогосподарському, дорожньому та будівельному машинобудуванні велику увагу приділяють проблемі підвищення зносостійкості деталей та їх робочих органів, оскільки в процесі експлуатації в ґрунті вони підлягають інтенсивному абразивному зношуванні, механізм і природа якого потребує більш ретельного дослідження. В науковій літературі розповсюджене пояснення механізму АЗ, розглянуті в роботах В.Ф. Лоренца, А.К. Зайцева, В.Н. Кащеєва, як результат дряпання матеріалу робочої поверхні деталей АЧ, яке викликає її

мікрорізання. М.М. Хрущов і М.А. Бабичев вважати, що руйнування поверхні металу АЧ мінерального походження, а Б.І. Костецький [6] стверджував, що руйнування при АЗ відбувається унаслідок зминання й зрізання мікрооб'ємів металу та утворення стружки сколювання й спостерігається одночасно процес зміцнення поверхневих шарів.

Разом з тим відсутній чіткий математичний опис по цим видам зношування, тобто математичне моделювання АЗ та процесу взаємодії в ТТС "РОГЗМ-грунт". Питання математичного моделювання процесу зношування в абразивному середовищі відображені в роботах У.А. Ікрамова [7], М.М. Севернєва [8], Б.І. Костецького [6] та ін.

У.А. Ікрамов запропонував математичну модель визначення величини зносу при мікрорізанні початково-вільними АЧ в якій зношування в реальній абразивній масі має змішаний характер. Визначено, що навіть при малій кількості зерен, які ріжуть поверхню, вони зношують її більше, ніж в результаті пластичної деформації. М.М. Севернев запропонував математичну залежність для визначення величини зносу деталей ґрунтообробних машин, яка враховує питомий знос еталонним абразивом при відносній швидкості переміщення за час з площею тертя і тиском абразиву.

Б.І. Костецький запропонував з мікроскопічної точки зору описувати зношування різальних елементів (РЕ) ґрунтообробних машин на основі класичної схеми протікання процесу й отримав стохастичне диференціальне рівняння. Розв'язок стохастичних диференціальних рівнянь розглянуто в роботах Кузнєцова Д.Ф. [9] та Kloede P.E. [10] Milstein G.N. [12] та Ауліна В.В. [13]. Розглядається фізична природа і сутність відображення взаємодії АЧ, з робочею поверхнею деталей, зв'язок АЗ з НДС поверхневого шару деталі і прилеглого шару ґрунту.

Разом з тим в існуючих математичних моделях зносу деталей машин, що працюють в абразивному середовищі, не враховано вибірковий характер зношування, зв'язок його зі стохастичною природою взаємодії, слід розширити набір параметрів, які впливають на знос, врахувати в процесах моделювання АЗ такі негативні процеси як мультиколініарність, гетероскедастичність та автокореляцію, і вилучити їх з математичних моделей врахувати також детерміністську та ймовірністну складові стохастичного характеру взаємодії АЧ ґрунту з РОГЗМ та зв'язок його характеристик з триботехнічними параметрами системи "РОГЗМ-грунт".

Постановка завдання. З'ясувати механізм взаємодії РОГЗМ з АЧ середовища ґрунту, вибіркове зношування РОГЗМ та побудувати математичну модель цього процесу.

Виклад основного матеріалу. Експериментальне дослідження характеру взаємодії РОГЗМ з ґрунтом та його вибіркове зношування. Для дослідження характеру взаємодії РОГЗМ з ґрунтом і його вибіркового зношування була спроектована і виготовлена установка [14] та розроблена методика досліджень. Дослідженню підлягали РОГЗМ з різальними елементами (РЕ) та їх зразки. Фрагменти результатів досліджень огинання РЕ РОГЗМ, загострених знизу, зверху, з обох сторін та затуплених, розміщених у вертикальній і горизонтальній площинах в процесі взаємодії з ґрунтом, наведені на рис. 1.

Виявлено, що при збільшенні відносної швидкості руху РОГЗМ від 0,2 м/с до її експлуатаційної величини 3м/с потоки ґрунту зверху і знизу РЕ різні за інтенсивністю. Характерним є те, що інтенсивність потоку ґрунту відображає ступінь гостроти РЕ. Якщо РЕ загострений зверху або знизу, то швидкість руху частинок ґрунту по одній з поверхонь РЕ дещо менша ніж по іншій (рис. 1, а-в, г-е). При загостренні з обох сторін швидкість огинання потоком ґрунту у вертикальній (рис. 1, є-з) і у горизонтальній площині (рис. 1, і-к) практично однакова до настання затупленого стану.

Контакт частинок середовища ґрунту з нижньою поверхнею РЕ (при загостренні зверху), відбувається в основному в області різальної крайки через те, що РЕ має певний кут нахилу до напрямку руху. Аналогічна картина спостерігається при взаємодії середовища ґрунту з верхньою поверхнею РЕ (при загостренні знизу). Це свідчить про те, що в даних областях процеси зношування більш інтенсивні, а тому доцільно зміцнювати ці поверхні.

Зі зміною геометричної форми профілю і наявності затуплення РЕ (рис. 1,б,д,ж) інтенсивності потоків ґрунту, які огинають його нижню і верхню поверхні, все ще

відрізняються між собою. При появі затилкової фаски (рис. 1, в,е,з) РЕ виштовхується ґрунтом вгору, оскільки вертикальна складова дії на нього рівнодійної сили збільшується, а отже порушується стійкість руху РЕ РОГЗМ на даній глибині.

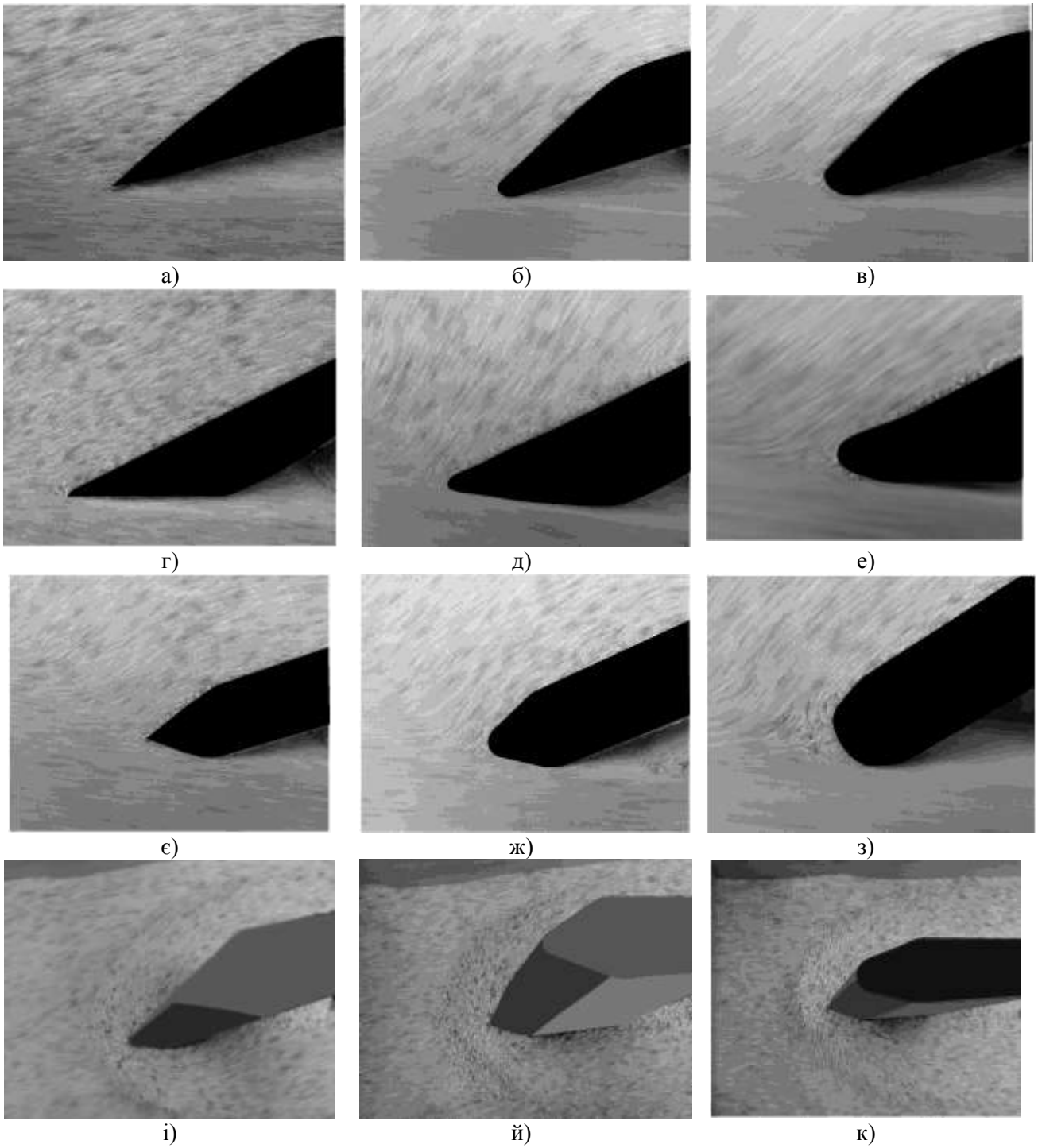

Рис. 1. Фрагменти зміни характеру процесу огинання потоками середовища ґрунту РЕ РОГЗМ, геометрія яких змінюється з напрацюванням від загостреного до затупленого стану: а,б,в – загострені зверху; г,д,е – загострені знизу; є,ж,з – горизонтальні, загострені з двох сторін; і,й,к – вертикальні, загострені з двох сторін

Крім цього виявлено, що перед РЕ в процесі його затуплення утворюється так звані "зони застою" (рис. 1, в,е,к) як у вертикальній, так і горизонтальній площинах, в яких збільшена концентрація АЧ. АЧ прилягають до заокругленої різальної крайки, здійснюючи при цьому на неї максимальний силовий вплив. Наявність "зони застою" обумовлює й різке підвищення величини сили опору переміщенню РЕ в ґрунті, тобто при затуплені РЕ зростає тяговий опір РОГЗМ.

Формування геометричної форми РОГЗМ в процесі тертя і зношування експлуатації залежить від зміни стану середовища ґрунту, характеру його огинання та швидкості відносного руху.

Аналізуючи зміну характеру процесу огинання потоками середовища ґрунту РЕ РОГЗМ, із зосередженням на окремих частинках грунту, їх характеру руху [13], спостерігається випадкова взаємодія, що призводить до локального вибіркового зношування.

Побудова моделі взаємодії частинок ґрунту з РОГЗМ та його вибіркового зношування з урахуванням їх складових стохастичної природи. Процес побудови моделей зношування РОГЗМ під час взаємодії з ґрунтом передбачає наступні етапи:

- накопичення та обробка бази даних про домінуючі процеси в ТТС "РОҐЗМ - грунт" і представлення її в більш компактній формі;
- оцінка впливу визначальних факторів на процеси зношування та формування підходів цілеспрямованого впливу на них з вилученням мультиколінеарності, гетероскедастичності та автокореляції отриманих даних на ПК;
- прогнозування, організація розвитку та саморозвитку процесів у поверхневому шарі незміцнених і зміцених РОҐЗМ та прилеглому до них шарі ґрунту.

Робоча поверхня РОҐЗМ, пристосовуючись до умов взаємодії з ґрунтом, під силовим впливом підлягає вибірковому АЗ. При цьому зношування є необоротним дисипативним процесом при якому знижується густина прикладеної зовнішньої енергії, а поверхня набуває стабільної форми, в деяких випадках наближаючись до оптимальної.

Протікання процесу зношування РОҐМ в середовищі ґрунту можна описати стохастичним диференціальним рівнянням:

$$dU(t) = \varphi\left[U(t), t\right]dt + \psi\left[U(t), t\right]dw(t), \tag{1}$$

де $U(t)$ – функція відносного зносу: $U(t) = u(t)/u_{гр}$, де $u(t)$ –поточний знос; $u_{гр}$ – граничний знос; $\varphi\left[U(t), t\right]$, $\psi\left[U(t), t\right]$ – детерміновані функції, що характеризують інтенсивність зносу; $w(t)$ – функція випадкової складової, що являє собою стандартний вінеровський процес.

За умови незалежності випадкових величин $w(t_1/t_{гр})$ і $w(t_2/t_{гр})$, при $t_1/t_{гр} \neq t_2/t_{гр}$, $t_1/t_{гр}$, і $t_2/t_{гр} \in [0; T]$, функція $U(t)$ описує неперервний марківський процес [11,13] на цьому проміжку. Випадковий характер марківського процес повністю визначається щільністю умовної імовірності переходу $\omega(U, t/t_{гр})$ і задовольняє узагальненому інтегральному рівнянню Маркова, яке згідно роботи [9], зводиться до рівняння Колмогорова – Фоккера – Планка [9]:

$$\frac{\partial\omega(U,t)}{\partial t} = -\frac{\partial\left[v(U,t)\omega(U,t)\right]}{\partial U} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2\left[c(U,t)\omega(U,t)\right]}{\partial U^2}, \tag{2}$$

де $\nu(U,t)$, $c(U,t)$ - функціональні коефіцієнти, що описують середню швидкість зношування та швидкість зміни умовної дисперсії цього процесу. Враховуючи рівняння (1), рівняння (2) набуває вигляду:

$$\frac{\partial\omega(U,t)}{\partial t}=-\frac{\partial\left(\varphi\left[U(t),t\right]\omega(U,t)\right)}{\partial U}+\frac{1}{2}\frac{\partial^2\left[\left(\psi\left[U(t),t\right]\right)^2\omega(U,t)\right]}{\partial U^2}. \quad (3)$$

Оскільки, зносостійкість РОҐМ визначається величиною зносу, то доцільно визначити закон його розподілу. Якщо рівняння кінетики зношування має вигляд:

$$dU(t)=D_U dt+S_U dw(t), \quad (4)$$

де D_U, S_U – сталі величини, що характеризують інтенсивність детермінованої і випадкової складової процесу зношування, то розв'язок рівняння (3) матиме випадкову природу:

$$U(t)=U_0+\int_0^{t/t_{гр}} D_U d\tau+\int_0^{t/t_{гр}} S_U dw(\tau)=U_0+D_U t/t_{гр}+S_U\int_0^{t/t_{гр}} dw(\tau), \quad (5)$$

де $U_0=U(0)$ початкова умова; $w(t/t_{гр})$ - величина, яку можна подати через нормально розподілену випадкову величину $\zeta(t/t_{гр})$ з нульовим математичним сподіванням й одиничною дисперсією:

$$w(t/t_{гр})=\zeta(t/t_{гр})\sqrt{t/t_{гр}};\ dw(t/t_{гр})=\zeta(t/t_{гр})\sqrt{dt/t_{гр}}. \quad (6)$$

Застосувавши для випадкової величини $\zeta(t/t_{гр})$, чисельну процедуру [7-9] визначення L відліків випадкового процесу взаємодії абразивної частини з поверхнею РОГЗМ, отримаємо:

$$\left\{\zeta_j=\zeta(\tau_j)\right\}_{j=1}^{L} \text{ при } \tau_1=\frac{T}{L} \text{ і } \tau_L=T. \quad (7)$$

тоді розв'язок рівняння (5) набуває вигляду:

$$U(\tau_j)=U_0+D_U\tau_j+\sqrt{\frac{T}{L}}S_U\sum_{i=1}^{j}\zeta_i \text{ для } j=\overline{1,L}. \quad (8)$$

Для моделювання процесу, взаємодії що описується функцією (8), слід визначити константи D_U й S_U за проміжок часу t_2-t_1 і при величині зносу $\Delta u(t_2,t_1)$. При цьому математичне сподівання і дисперсія дорівнює:

$$M\left[\Delta u(t_2,t_1)\right]=M\left[u(t_2)\right]-M\left[u(t_1)\right];\ D\left[\Delta u(t_2,t_1)\right]=D\left[u(t_2)\right]+D\left[u(t_1)\right]. \quad (9)$$

З урахуванням (9) коефіцієнти $\varphi\left[U(t),t\right]$ та $\psi\left[U(t),t\right]$ рівнянь (1) та (3) для умовного граничного зношування $\Delta u_{гр}$, мають вигляд:

$$\varphi\left[U(t),t\right]=\frac{M\left[u(t_2)\right]-M\left[u(t_1)\right]}{(t_2-t_1)(\Delta u_{гр})};\qquad \psi\left[U(t),t\right]=\sqrt{\frac{D\left[u(t_2)\right]+D\left[u(t_1)\right]}{(t_2-t_1)(\Delta u_{гр})^2}}, \quad (10)$$

а коефіцієнти D_U і S_U відповідно дорівнюють:

$$D_U = \frac{M\left[\Delta u\left(t_2, t_1\right)\right]}{\left(t_2 - t_1\right)\left(\Delta u_{гр}\right)}, \qquad S_U = \frac{\sqrt{D\left[\Delta u\left(t_2, t_1\right)\right]}}{\Delta u_{гр}\sqrt{t_2 - t_1}}. \tag{11}$$

Враховуючи це функцію (8) можна подати у вигляді:

$$U\left(\tau_j\right) = U_0 + \frac{M\left[\Delta u\left(t_2, t_1\right)\right]}{\left(t_2 - t_1\right)\left(\Delta u_{гр}\right)}\tau_j + \frac{\sqrt{D\left[\Delta u\left(t_2, t_1\right)\right]T}}{\Delta u_{гр}\sqrt{L\left(t_2 - t_1\right)}}\sum_{i=1}^{j}\zeta_i \text{, для } j = \overline{1, L}. \tag{12}$$

За допомогою виразу (12) і пакетів прикладних програм на ПК можна здійснити обчислення відліків випадкового процесу (5) та візуалізувати їх на фоні детермінованої складової:

$$M\left[U\left(t / t_{гр}\right)\right] = U_0 + D_U t / t_{гр}. \tag{13}$$

Програмна функція при цьому має такі параметри: T − відносний проміжок спостереження; U_0 − початкове значення відносного зносу; D_U, S_U − інтенсивності детермінованої та випадкової складових процесу зношування; L − відносна довжина реалізації випадкової величини $\zeta\left(t / t_{гр}\right)$. Вихідними параметрами є відліки *U(τ)* випадкового процесу *U(t)* та відліки детермінованої складової *M*[*U(t)*] цього процесу. Набори відліків повертаються у командне вікно програми і результат подається у вигляді графічного відображення випадкового процесу.

Програмна підтримка у визначені залежності зношування від часу використовує нормоване зношування U_r та $U_{NO} = U_N(0) = 0$ - відповідає новій поверхні РОГЗМ, $u_N = 1$ - граничному стану, $u_N > 1$ достроковому спрацюванню поверхні та нормативний час T_N на проміжку [0;1]. Залежність нормованого зносу від нормованого часу у формі відліків та їх зображень можна використати у порівняльному аналізі різних об'єктів зношування.

При моделюванні випадкового процесу зношування серійних РОҐЗМ замість параметра D_U будуть два параметри, які визначатимуть нелінійний характер функцій $D_U\left(t / t_{гр}\right)$ і детермінована складова має вигляд:

$$M\left[U\left(t / t_{гр}\right)\right] = U_0 + \alpha(t / t_{гр})^{\beta}, \tag{14}$$

при $\alpha \in \left(0; 1\right)$ та $\beta \in \left(0; 1\right)$.

При моделюванні випадкового процесу зношування зміцнених РОҐЗМ

Отже, з урахуванням детермінованої складової випадкового процесу зношування зміцнених РОҐЗМ дорівнює:

$$M\left[U\left(t / t_{гр}\right)\right] = \begin{cases} U_0 + \dfrac{at_{c1}^2 / t^2{}_{гр} + bt_{c1} / t_{гр} + c}{t_{c1}} t / t_{гр},\ t / t_{гр} \in \left[0; t_{c1} / t_{гр}\right], \\ U_0 + at^2 / t^2{}_{гр} + bt / t_{гр} + c,\ t / t_{гр} \in \left[t_{c1} / t_{гр}; T\right]. \end{cases} \tag{15}$$

Таким чином, з отриманих результатів математичного моделювання закон динаміки зношування для серійних РОҐЗМ характеризується монотонним і безперервним триваючим до граничного зносу збільшенням інтенсивності зношування, що пов'язано зі швидким зменшенням товщини РЕ РОҐЗМ та відповідною зміною епюри навантажень.

Розрахунками, проведеними на ПК виявлено, що зміни величини випадкової складової S_U процесу зношування для зміцнених РОҐЗМ значно менші у порівнянні з серійними. Для зміцнених РОҐЗМ через неоднорідність матеріалу закон динаміки зношування і відображає пошарову зміну зносостійкості матеріалу. Зазначене свідчить, що для підвищення зносостійкості РОҐЗМ необхідно зміцнювати поверхню на площі, яка дорівнює площі, що формується при граничному стані, оскільки в іншому випадку після зношування зміцненого шару інтенсивність суттєво підвищиться, що зменшить тривалість існування ефекту самозагострювання РЕ РОҐЗМ.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Математичним моделюванням виявлено, що зміни величини випадкової складової S_U процесу зношування для зміцнених РОҐЗМ значно менші у порівнянні з серійними. Для зміцнених РОҐЗМ через неоднорідність матеріалу закон динаміки зношування і відображає пошарову зміну зносостійкості матеріалу.

Дослідження свідчать, що для підвищення зносостійкості РОҐЗМ необхідно зміцнювати поверхню на площі, яка дорівнює площі, що формується при граничному стані, оскільки в іншому випадку після зношування зміцненого шару інтенсивність суттєво підвищиться, що зменшить тривалість існування ефекту самозагострювання РЕ РОҐЗМ.

Список використаних джерел

1. Аулін, В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах [Текст]: монографія / В.В. Аулін. – Кіровоград: Вид. Лисенко В.Ф., 2014. – 370 с.
2. Аулін, В.В. Закономірності взаємодії робочих органів ґрунтообробних машин з ґрунтом в процесі його обробітку [Текст] / В.В. Аулін, А.А. Тихий // Вісник інженерної академії України. – 2011. – №2. – С.144-149.
3. Аулін, В.В. Теоретичні основи самозагострювання, міцності і зношування різальних елементів РОГМ та напрямки підвищення їх довговічності [Текст] / В.В. Аулін, В.М. Бобрицький, А.А. Тихий // Вісник інженерної академії України. – 2010. – №1. – С. 149-154.
4. Аулін, В.В. Характер та інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин [Текст] / В.В. Аулін, В.М. Бобрицький // Проблеми трибології (Problems of Triboblogy). – Хмельницький: ХДУ, 2004. – №2. – С. 107-112.
5. Аулін, В.В. Теоретичні основи самозагострювання, міцності і зношування різальних елементів РОГЗМ та напрямки підвищення їх довговічності [Текст] / В.В. Аулін, В.М. Бобрицький, А.А. Тихий // Вісник інженерної академії України. – 2010. - №1. – С. 149-154.
6. Костецкий, Б.И. Трение, смазка и знос в машинах [Текст] / Б.И. Костецкий. – К.: Техніка, 1970. – 396 с.
7. Икрамов, У.А. Расчетные методы оценки абразивного износа [Текст] / У.А. Икрамов. – М: Машиностроение, 1987. – 288 с.
8. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин [Текст] / М.М. Севернев, Н.Н. Подлекарев, В.Ш. Сохадзе, В.О. Китиков; под ред. М.М. Севернева. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 333 с.
9. Кузнецов, Д.Ф. Стохастические дифференциальные уравнения: теория и практика численного решения [Текст] / Д.Ф. Кузнецов. – 4-е изд., испр. и доп. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010. – 816 с.
10. Kloeden P.E. Numerical solution of stochastic differential equations: [monograph] / P.E. Kloeden, E. Platen. – Berlin : Springer-Verlag, 1992. – 632 p.
11. Kloeden P.E. Numerical Solution of SDE Through Computer Experiments : [monograph] / P.E. Kloeden, E. Platen, H. Schurz. – Berlin : Springer-Verlag, 1994. – 292 p.
12. Milstein G.N. Stochastic numerics for mathematical physics / G.N. Milstein, M. V. Tretyakov. – Berlin : Springer-Verlag, 2004. – 596 p.
13. Аулін, В.В. Стохастична модель динаміки процесу абразивного зношування різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин [Текст] / В.В. Аулін, В.М. Бобрицький // Зб. наук. праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2007. - №76(99). – С. 15-18.

14. Установка для дослідження взаємодії абразивного середовища з робочими органами машин [Текст]: Пат. 69735 Україна, МПК(2012) G01N 3/56 / Аулін В.В., Тихий А.А. та ін.; КНТУ. - №u 2011 12831; заявл. 01.11.2011; опубл. 10.05.2012; Бюл.№ 9, 2012 р.

Рецензент д-р техн. наук, професор Є.К. Солових

Аулін Віктор Васильович, канд. фіз.-мат. наук, професор кафедри експлуатації та ремонту машин, Кіровоградський національний технічний університет, Україна, пр-кт. Університетський 8, м. Кіровоград, Україна, 25030. тел. +38-052-390-473. E-mail: aulin52@mail.ru.
Настоящий Владислав Анатолійович, канд. техн. наук, професор, завідувач кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва, Кіровоградський національний технічний університет, Україна, пр-кт. Університетський 8, м. Кіровоград, Україна, 25030. тел. +38-052-390-471.
Тихий Андрій Анатолійович, канд. техн. наук, кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва, Кіровоградський національний технічний університет, Україна, пр-кт. Університетський 8, м. Кіровоград, Україна, 25030. тел. +38-052-390-471.

V.Aulin, Cand. of phisic. mathem. sciences, professor; Department of " operation and repair machines "; Kirovograd National Technical University; Kirovograd, Ukraine, University Avenue 8, 25030, phone 0522-390-473, E-mail: aulin52@mail.ru.
V.Nastoyashchiy, Cand. of techn. sciences, professor department of, "building, road machines and construction"; Kirovograd National Technical University; Kirovograd, Ukraine, University Avenue 8, 25030, phone 0522-390-471.
A.Tihiy, Cand. of techn. sciences, department of, "building, road machines and construction"; Kirovograd National Technical University; Kirovograd, Ukraine, University Avenue 8, 25030, phone 0522-390-471, 0989373366. E-mail: tihiy-andrey@mail.ru.