

**Дворук В.І.,\*****Борак К.В.\*\***\*Національний авіаційний університет,  
м. Київ, Україна.\*\*Житомирський агротехнічний коледж,  
м. Житомир, Україна

E-mail: vidvoruk@gmail.com

**ФІЗИКО - МАТЕМАТИЧНЕ  
МОДЕЛЮВАННЯ ТРИБОСИСТЕМИ  
«РОБОЧИЙ ОРГАН - ҐРУНТ»**

531.43:631.3

Приведено результати фізико-математичного моделювання трибосистеми «робочий орган - ґрунт». Розглянуто процеси, що відбуваються в динамічному стані трибосистеми та поставлено завдання для подальших досліджень.

**Ключові слова:** трибосистема, ґрунт, робочий орган, моделювання, системний аналіз.

**Постановка проблеми**

Втрати розвинутих країн світу від абразивного зношування становлять 1 – 4 % національного продукту [1]. Серед деталей сільськогосподарської техніки найбільше піддаються зношуванню робочі органи ґрунтообробних машин (РОГМ). Отже, забезпечення надійності вказаної техніки за рахунок підвищення зносостійкості РОГМ - одна з основних проблем машинобудування.

Для розв'язання цієї проблеми в сучасній сільськогосподарській техніці застосовуються різні методи підвищення зносостійкості РОГМ, зокрема: зносостійкі матеріали, локальне зміцнення, термічна обробка та ін. В умовах експлуатації традиційні методи дослідження абразивного зношування неприйнятні, оскільки термін служби РОГМ доволі тривалий (наприклад, для дискових робочих органів він складає 3 ... 4 роки).

Для опису трибологічних процесів запропоновано [2] поняття “трибологічна система” (ТС), під яким розуміють складну термодинамічну систему, що утворюється при взаємодії тертьових тіл, проміжного середовища і частини доквілля. В ТС протікає безліч складних явищ, аналіз яких зручно проводити із залученням методів фізико - математичного моделювання. Вказані явища описуються змінними, що в загальному випадку залежать від просторових координат та часу і характеризують фізичний стан ТС [3].

Для дослідження механізму зношування ТС доцільно залучати моделі, які дозволяють визначити її слабкі місця без проведення довготривалих стендових або експлуатаційних випробувань.

**Мета роботи** – аналіз ТС «робочий орган - ґрунт».

**Результати досліджень**

Суттєвою характеристикою будь-якої моделі є ступінь її подібності об'єкту моделювання. За цією ознакою всі моделі можна розділити на ізоморфні та гомоморфні. При моделюванні складних ТС необхідно використовувати ізоморфні моделі оскільки вони містять у собі основні параметри об'єкту моделювання і за суттю здатні замінити його.

Метою фізико - математичного моделювання ТС «робочий орган - ґрунт» є встановлення такої функціональної залежності зношування РОГМ:

$$I = f(V, p, E, H_m, L, G_3, A, K_\phi, P(\Delta H), C_V, W, H_a, P_c, \Psi, f_t), \quad (1)$$

де  $I$  – інтенсивність зношування робочого органу ґрунтообробних машин, м<sup>3</sup>/м;

$E$  – модуль пружності матеріалу робочого органу, Н/м<sup>2</sup>,

$f_t$  – коефіцієнт тертя;

$V$  – швидкість переміщення робочого органу відносно ґрунту м/с;

$p$  – тиск на поверхні робочого органу Н/м;

$H_m$  – мікротвердість поверхні робочого органу Па;

$L$  – шлях тертя, м;

$G_3$  – ступінь закріплення абразивних частинок;

$P(\Delta H)$  – ймовірність виникнення ударного навантаження;

$C_V$  – відсотковий вміст кварцового піску в ґрунті (механічний склад ґрунту);

$\Psi$  – кислотність ґрунту;

$W$  – вологість ґрунту, %;

$H_a$  – мікротвердість абразиву;

$P_c$  – твердість ґрунту кг/м<sup>2</sup>;

$A$  – середній розмір абразивних частинок, м;

$K_\phi$  – коефіцієнт форми абразивних частинок.

ТС «робочий орган - ґрунт» і модель, що їй відповідає складаються з елементів, представлених на рис. 1.

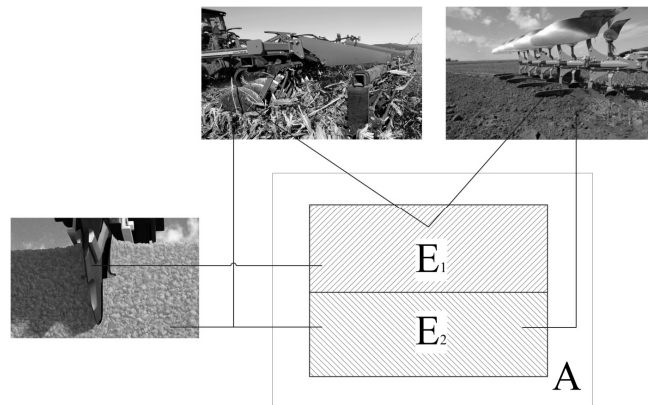


Рис. 1 – Трибологічна система і трибологічна модель.  
 $A$  – довкілля;  $E_1$  – РОГМ;  $E_2$  – ґрунт

Відомо [3], що властивості елементів ТС впливають на її структуру. У випадку, що розглядається елементи ТС суттєво відрізняються за своїми фізико - хімічними властивостями.

Особливостями ТС «робочий орган - ґрунт» є:

- 1) інтенсивному зношуванню підлягає лише один з її елементів - робочий орган;
- 2) джерелом проміжного середовища є другий елемент ТС - ґрунт за певної вологості;
- 3) ґрунт, як елемент ТС, неоднорідний за своїм складом і містить у собі ряд компонентів (пісок, глина, рослинна маса, живі організми, повітря, вода, солі, кислоти). Кожний з цих компонентів чинить вплив на інтенсивність зношування РОГМ;
- 4) в окремих випадках дану ТС доцільно розділити на дві підсистеми, оскільки механізми зношування різних ділянок поверхні робочого органу відрізняються (залежно від ступеня закріплення абразиву в ґрунті).

Згідно запропонованої моделі, взаємодія елементів  $E_1$  і  $E_2$  трибосистеми відбувається за відсутності мастильного матеріалу. Хоча у глинистих та суглинчастих ґрунтах після досягнення граничного вмісту вологості на робочій поверхні з'являється вільна вода, що виконує функції змазки [4]. Це підтримують результати експериментальних досліджень (рис. 2), звідки видно, що коефіцієнт тертя суттєво зменшується в супіщаних ґрунтах за вологості 20 % для важких суглинків і глини – 30 %. За такої вологості технологічна обробка ґрунту стає неможливою. У зв'язку з цим ТС з мастильним матеріалом (водою) нами не розглядалися.

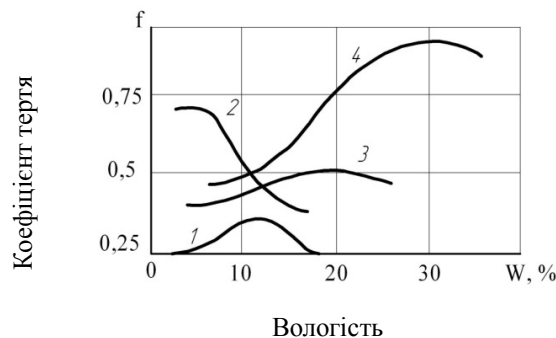


Рис. 2 – Зміна коефіцієнту тертя  $f_i$  ґрунту по сталі, залежно від вологості.  
 1 – піщаний ґрунт; 2 – супіщаний зв'язаний ґрунту;  
 3 – середній суглинок; 4 – важкі суглинки та глини

В процесі взаємодії елементи ТС чинять вплив одне одного. Така взаємодія відбувається лише в динамічному стані ТС «робочий орган – ґрунт», тоді як в статичному стані вона відсутня. Процеси, що протікають в динамічному стані ТС зображено на рис. 3.

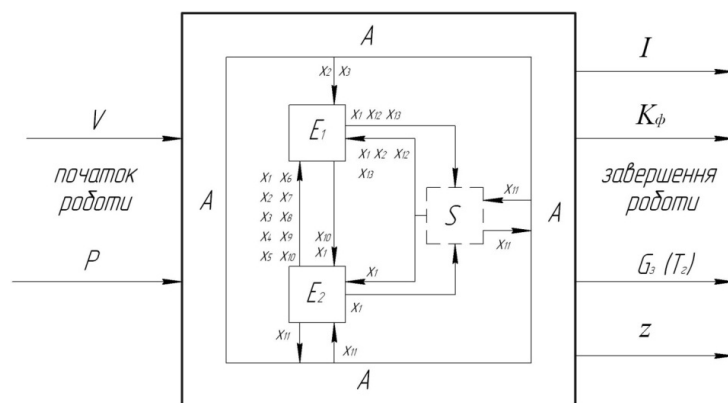


Рис. 3 – Модель ТС «робочий орган - ґрунт» в динамічному стані.

$x_1$  – адгезія;  $x_2$  – корозія;  $x_3$  – окиснення;  $x_4$  – пружна деформація;  $x_5$  – пластична деформація;

$x_6$  – мікрорізнання;  $x_7$  – дряпання;  $x_8$  – відривання;  $x_9$  – руйнування поверхні тертя;

$x_{10}$  – фазові та структурні перетворення;  $x_{11}$  – дифузія;  $x_{12}$  – адсорбція;  $x_{13}$  – хемосорбція;

$V$  – відносна швидкість переміщення;  $P$  – тиск на поверхні тертя;

$I$  – інтенсивність зношування;  $G_z$  – ступінь закріплення абразивних частинок;  $P_z$  – твердість ґрунту;

$K_\phi$  – коефіцієнт форми абразивних частинок;  $z$  – супутні процеси;  $A$  – довкілля;

$E_1, E_2$  – елементи системи;  $S$  – мастильний матеріал (вода)

До виходу ТС відносяться такі супутні процеси ( $z$ ), як наклеп поверхні тертя, старіння, термо-механічні, електричні процеси та ін. [7].

Як видно, найбільшому впливу в ТС піддається елемент 1 (робочий орган ґрунтообробних машин) з боку елемента 2 (ґрунту). Інтенсивність вказаних процесів залежить від величини вхідних характеристик ( $V, P$ ) та початкового стану елементів системи.

Мету існування ТС «робочий орган – ґрунт» на фундаментальному рівні можна розглядати як трансформацію  $\{X\}^T \rightarrow \{Y\}$ . Головний вхід ( $X$ ) в ТС це відповідно рух та робота, яку виконує елемент  $E_1$ , головний вихід – структура елемента  $E_1$ . В реальних умовах отримуємо багато інших вихідних показників, які є побічними і в більшості випадків небажаними.

З роботи [8] відомо, що енергетичний баланс трибосистеми можна представити залежністю:

$$\sum E_x = \sum E_y + \sum E_z + \sum E_s + \sum E_t, \quad (2)$$

де  $E_x$  – підведена енергія;

$E_y$  – корисна енергія (для трибосистеми «робочий орган – ґрунт» корисна енергія витрачається на формування структури елемента  $E_2$ );

$E_z$  – витрати системи;

$E_s$  – накопичення енергії (деформація);

$E_t$  – теплота.

Теплота, яка виділяється при взаємодії елемента  $E_1$  з елементом  $E_2$  доволі швидко розсіюється в другому елементі, що пов'язано з відносно великим його об'ємом, порівняно з першим елементом і суттєвою різницею температур із довкіллям.

Так як масовому зносу піддається лише один елемент ТС, то баланс маси системи можна виразити таким рівнянням:

$$\sum m = \left( \sum m_{E_1} - \sum m_{E_{1a}} - \sum m_{E_{1c}} \right) + \left( \sum m_{E_2} + \sum m_{E_{1a}} + \sum m_{E_{1c}} \right), \quad (3)$$

де  $m$  – маса трибосистеми;

$m_{E_1}$  – маса елемента  $E_1$  до виконання роботи;

$m_{E_{1a}}$  – маса матеріалу елемента  $E_1$ , яка переноситься в елемент  $E_2$  під час виконання роботи;

$m_{E_{1c}}$  – маса всіх продуктів хімічної реакції елемента  $E_1$ , яка переноситься в елемент  $E_2$  під час виконання роботи;

$m_{E_2}$  – маса елемента  $E_2$  до виконання роботи.

Сума  $(\sum m_{E_{1a}} + \sum m_{E_{1c}})$  характеризує величину інтенсивності зношування і залежить від умов функціонування системи  $(V, P)$ , властивостей елемента  $E_1$  ( $E, H_m$ , хімічний склад матеріалу), властивостей елемента  $E_2$  ( $G_s, A, K_\phi, P(\Delta H), C_V, W, H_a, P_2, \Psi$ ), коефіцієнту тертя  $f_t$  матеріалу елемента  $E_1$  матеріалом елемента  $E_2$  ( $f_t$ ), а також шляху тертя ( $L$ ).

В більшості випадків трибологи намагаються однобічно розв'язати проблему підвищення зносостійкості за рахунок покращення властивостей робочої поверхні елемента  $E_1$ . Насправді для вирішення даної проблеми доцільніше застосовувати системний аналіз ТС «робочий орган - ґрунт».

Пріоритет застосування системного аналізу в трибології належить німецькому трибологу Х. Чихосу. Основи цього підходу викладено в монографії «Tribology – a system approach to science and technology of friction, lubrication and wear» (на пострадянському просторі, в зв'язку з помилковим перекладом, дана робота відома як «Системный анализ в трибонике») [7].

Проведений раніше системний аналіз існуючих трибосистем не можливо повною мірою застосувати для ТС «робочий орган – ґрунт», оскільки вона має специфічні особливості, які не дозволяють їй повною мірою підпадати під класифікацію [7].

Системний аналіз ТС «робочий орган - ґрунт» повинен містити у собі такі етапи:

- побудувати фізико-математичну модель трибосистеми в динамічному і статичному стані, яка адекватно описує явища, процеси та субпроцеси, що відбуваються в ТС;
- побудувати феноменологічну модель процесів, які відбуваються в ТС;
- проаналізувати індивідуальні властивості елементів та агрегатні властивості ТС;
- математично описати функціональні перетворення вхідних величин  $X$  у вихідні величини  $Y$ ;
- визначити основні критерії ефективного функціонування ТС «робочий орган - ґрунт», а також обмеження та умови її функціонування.

Застосування системного підходу до вирішення задачі моделювання ТС «робочий орган - ґрунт» дозволить:

- синтезувати знання з різних наук (фізика, хімія, математика, трибологія теорія систем, теорія управління, матеріалознавство, ґрунтознавство та ін.);
- суттєво скоротити час на проведення трудомістких та дорогих лабораторних, стендових і експлуатаційних досліджень для прийняття об'єктивних рішень з підвищення зносостійкості складових частин трибосистеми.

## Висновок

Проведений аналіз трибосистеми «робочий орган – ґрунту» дозволив виявити особливості даної системи, вхідні та вихідні величини, а також процеси, які відбуваються в даній системі. Подальші дослідження ТС «робочий орган – ґрунт» повинні бути спрямовані на встановлення функціональної залежності трибологічних процесів з синтезом знань усіх суміжних наук.

## Література

1. Кіндрачук М.В., Лабунець В.Ф., Пашечко М.І., Корбут Є.В. Трибологія: підручник/ МОН. – К.: НАУ-друк, 2009. – 392 с.
2. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин [Текст] : словарь / В.Д. Зозуля [и др.]; отв. ред. И.М. Федорченко; Ин-т проблем материаловедения АН УССР. – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Наук. думка, 1990. – 258 с.
3. Носко А.Л., Носко А.П. Математическое моделирование трибологических систем (применительно к тормозным устройствам ПТМ) // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – Машиностроение. – 2006. – № 1. – С. 83-98.
4. Синеоков Г.Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г.Н. Синеоков, И.М. Панов. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.
5. Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин / М.М. Тененбаум. – М.: Машиностроение, 1966. – 332 с.
6. Дворук В.І. Трибофізика: підруч. / В.І.Дворук, В.А. Войтов. – Харків: ФЛП. – 2014. – 374 с.
7. Чихос Х. Системный анализ в трибонике. A Systems Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear: монографія / Х. Чихос; пер. С.А. Харламов; ст. науч. ред. О.Н. Вишнякова; мл. науч. ред. Е.П. Орлова. – М.: Мир, 1982. – 351 с.
8. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хебты, А.В. Чичинадзе. В 3 т. Т1. Теоретические основы. – М.: машиностроение, 1989. – 400 с.

Поступила в редакцію 14.09.2015

Dvoruk V.I., Borak K.V. **Physical and mathematical model tribosystem «working tool - land».**

The results of physical and mathematical modeling tribosystem "working tool – land". The processes that occur in a dynamic state in tribosystem and objectives for further research.

**Key words:** tribosystem, land, working tool, modeling, systems analysis.

### Refereces

1. Kindrachuk M.V., Labunets V.F., Pashechko M.I., Korbut E.V. Tribology: pidruchnik. MON. Kiyiv: NAU-druk, 2009. 392 p.
2. Slovar-spravochnik po treniyu, iznosu i smazke detaley mashin [Tekst]: slovar. V.D. Zozulya [i dr.] ; otv. red. I. M. Fedorchenko; In-t problem materialovedeniya AN USSR. 2-e izd., pererab. i dop. K.: Nauk. dumka, 1990. 258 p.
3. Nosko A.L., Nosko A.P. Matematicheskoe modelirovanie tribologicheskikh sistem (primenitelno k tormoznyim ustroystvam PTM). Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Mashinostroenie. 2006. 1. P. 83-98.
4. Sineokov G.N. Teoriya i raschet pochvoobrabatyivayuschih mashin. G.N. Sineokov, I.M. Panov. M.: Mashinostroenie, 1977. 328 p.
5. Tenenbaum M.M. Iznosostoykost konstruktsionnyih materialov i detaley mashin. M.M. Tenenbaum. M.: Mashinostroenie, 1966. 332 p.
6. Dvoruk V.I. Tribofizika: pidruch. V.I.Dvoruk, V.A. Voytov. Harkiv: FOP Tomenko Yu. I., 2014. 374 p.
7. Chihos H. Sistemnyiy analiz v tribonike. A Systems Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear: monografiya. H. Chihos; per. S.A. Harlamov; st. nauch. red. O.N. Vishnyakova; ml. nauch. red. E.P. Orlova. Moskva: Mir, 1982. 351 p.
8. Spravochnik po tribotekhnike. Pod obsch. red. M. Hebtyi, A.V. Chichinadze. V 3 t. T1. Teoreticheskie osnovyi. M.: mashinostroenie, 1989. 400 p.