

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.3(84).13860

А. В. ВОЙТОВ

Харківський національний технічний університет сільського господарства  
ім. П.Василенка, Харків

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЗВОРОТНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТРИБОСИСТЕМ

У роботі представлений методичний підхід в моделюванні об'ємної швидкості зношування в зворотних конструкціях трибосистем на підставі відомих значень для прямої конструкції. На підставі експериментальних даних отримані математичні вирази для моделювання об'ємної швидкості зношування. Отримало подальший розвиток визначення вагових коефіцієнтів в математичних виразах для визначення об'ємної швидкості зношування рухомих і нерухомих трибоелементів в зворотних конструкціях трибосистем. Показано, що величини коефіцієнтів є функцією різниці в твердості матеріалів в трибосистемі. Максимальне значення вагових коефіцієнтів характерно для зворотної трибосистеми за матеріалами і геометрії одночасно. Це дозволяє зробити висновок, що така трибосистема буде «слабкою ланкою» в загальній конструкції машини і обмежувати ресурс під час експлуатації

**Ключові слова:** трибосистема, математична модель, стаціонарні процеси, прямі і зворотні конструкції трибосистем, об'ємна швидкість зношування зворотних трибосистем, ваговий коефіцієнт, коефіцієнт тертя

**Вступ.** Різноманіття трибосистем, з яких складаються конструкції машин і механізмів відповідно до класифікації представленої в роботі [1], діляться на прямі і зворотні. До прямої конструкції трибосистеми (ПТ) відносяться такі конструкції, де рухомий трибоелемент виготовлений з більш твердого матеріалу, ніж нерухомий, і має більшу площу тертя, ніж у нерухомого. Якщо у прямої трибосистеми змінити розташування матеріалів за твердістю, отримаємо зворотну трибосистему за матеріалами (ЗТМ). Якщо у прямій трибосистемі змінити розташування площі тертя, отримаємо зворотну трибосистему за геометрією (ЗТГ).

Четвертий варіант конструкції відповідає одночасній зміні розташування матеріалів за твердістю і площами тертя, в порівнянні з ПТ, що відповідає зворотній трибосистемі за матеріалами і геометрією одночасно (ЗТМГ).

**Аналіз останніх досліджень та результатів.** В роботі [2] отримано вирази для розрахунку об'ємної швидкості зношування на стаціонарних режимах експлуатації трибосистем, які застосовуються тільки для прямих конструкцій трибосистем. При застосуванні зворотних конструкцій трибосистем, значення об'ємної швидкості зношування між трибоелементами зміниться. Даний факт необхідно враховувати при прогнозуванні ресурсу на етапі проектування нових машин [3].

В роботі [4] експериментальним шляхом були отримані залежності об'ємної швидкості зношування для зворотних конструкцій трибосистем. Показано, що різниця в твердості між рухомих і нерухомих трибоелементами ( $\Delta HB$ ), є функцією їх об'ємної швидкості зношування, при цьому коефіцієнт тертя у зворотних конструкцій, в порівнянні з прямими, не змінюється. В роботі наведені вагові коефіцієнти -  $G$ , які враховують збільшення об'ємної швидкості зношування у рухомих і нерухомих трибоелементів в залежності від різниці твердості матеріа-

лів, з яких виготовлені дані трибоелементи. Однак дані коефіцієнти вимагають уточнення, тому що дають велику похибку моделювання [4].

Аналізуючи накопичений досвід при вирішенні подібних завдань можна зробити висновок, що розробка математичних моделей і методів розрахунку швидкості зношування зворотних конструкцій трибосистем без попередніх тестових експериментів, є актуальним завданням.

**Мета роботи:** Дослідження проведені в даній роботі спрямовані на подальший розвиток методів моделювання стаціонарних процесів в трибосистемах в умовах граничного навантаження з урахуванням прямих і зворотних конструкцій трибосистем.

**Об'єкти та методи досліджень.** Цільовою функцією моделювання стаціонарних процесів в прямих і зворотних конструкціях трибосистем виступатиме об'ємна швидкість зношування  $I$ , м<sup>3</sup>/год. Відмінною особливістю моделі, що розробляється, від раніше відомих, є наявність в моделі функції різниці твердості матеріалів трибоелементів -  $\Delta HВ$ .

**Результати досліджень.** В роботі [2] представлені вирази для розрахунку об'ємної швидкості зношування рухомого і нерухомого трибоелементів прямої трибосистеми з урахуванням коливального процесу через утворення і руйнування вторинних структур.

Для рухомого, твердого трибоелемента з більшою площею тертя:

$$I_{ПТ}^p = \left[ \frac{72 \cdot W_{ТР,p}}{Q_{max}} \cdot \exp\left(\frac{W_i}{W_{зад}}\right) \cdot A_I (\cos \omega_I \cdot t + \sin \omega_I \cdot t) \right], \text{ м}^3 / \text{год}. \quad (1)$$

Для нерухомого, м'якого трибоелемента, з меншою площею тертя:

$$I_{ПТ}^н = \left[ \frac{72 \cdot W_{ТР,н}}{Q_{max}} \cdot \exp\left(\frac{W_i}{W_{зад}}\right) \cdot A_I (\cos \omega_I \cdot t + \sin \omega_I \cdot t) \right], \text{ м}^3 / \text{год}, \quad (2)$$

де  $I_{ПТ}^p$  і  $I_{ПТ}^н$  – об'ємна швидкість зношування рухомого і нерухомого трибоелементів, м<sup>3</sup>/год;  $W_{ТР,p}$  і  $W_{ТР,н}$  – швидкість роботи дисипації в рухомому і нерухомому трибоелементах, Дж/с [2];  $Q_{max}$  – добротність трибосистеми після завершення припрацювання, Дж/м<sup>3</sup>[2];  $W_i$  – потужність, що підводиться до трибосистеми, Вт [2];  $W_{зад}$  – потужність, при якій починається прискорений режим зношування або настає задир, Вт[2];  $A_I$  – амплітуда коливань швидкості зношування відносно середнього значення, безрозмірна величина[2];  $\omega_I$  – циклічна частота коливань швидкості зношування, 1/с[2];  $t$  – поточний час роботи трибосистеми, с.

Сумарна об'ємна швидкість зношування прямої трибосистеми визначається як сума швидкостей зношування рухомого і нерухомого трибоелементів за виразом:

$$I_{ПТ} = I_{ПТ}^p + I_{ПТ}^н. \quad (3)$$

На підставі проведених експериментальних досліджень, які представлені в роботі [2], отримали подальший розвиток формули для визначення вагових коефіцієнтів, які відрізняються від представлених в роботі [3]. Дані вирази отримані за допомогою методу найменших квадратів при різному сполученні матеріалів в трибосистемі.

Для зворотної трибосистеми за матеріалами (ЗТМ) ваговий коефіцієнт для рухомого, більш м'якого трибоелемента з більшою площею тертя, визначається виразом:

$$G_{ЗТМ}^p = (1 + 3,04 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta HB), \quad (4)$$

де  $\Delta HB$  – різниця в твердості матеріалів у рухомого і нерухомого трибоелементів за шкалою  $HB$ , завжди позитивне число.

Ваговий коефіцієнт для нерухомого, більш твердого трибоелемента з меншою площею тертя, визначається виразом:

$$G_{ЗТМ}^n = (1 + 3,0 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta HB). \quad (5)$$

З урахуванням вагових коефіцієнтів, формул (4) і (5), об'ємну швидкість зношування для рухомого, більш м'якого трибоелемента з більшою площею тертя, представимо формулою:

$$I_{ЗТМ}^p = G_{ЗТМ}^p \left[ \frac{72 \cdot W_{TP,n}}{Q_{\max}} \cdot \exp\left(\frac{W_i}{W_{зад}}\right) \cdot A_l (\cos \omega_l \cdot t + \sin \omega_l \cdot t) \right], m^3 / год. \quad (6)$$

Для нерухомого, твердого трибоелемента з меншою площею тертя, представимо формулою:

$$I_{ЗТМ}^n = G_{ЗТМ}^n \left[ \frac{72 \cdot W_{TP,p}}{Q_{\max}} \cdot \exp\left(\frac{W_i}{W_{зад}}\right) \cdot A_l (\cos \omega_l \cdot t + \sin \omega_l \cdot t) \right], m^3 / год. \quad (7)$$

Сумарна об'ємна швидкість зношування зворотної трибосистеми за матеріалами визначається як сума швидкостей зношування рухомого і нерухомого трибоелементів виразом:

$$I_{ЗТМ} = I_{ЗТМ}^p + I_{ЗТМ}^n. \quad (8)$$

Для зворотної трибосистеми за геометрією ( $ЗТГ$ ) ваговий коефіцієнт для рухомого, більш твердого трибоелемента з меншою площею тертя, визначається виразом:

$$G_{ЗТГ}^p = (1 + 3,0 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta HB). \quad (9)$$

Ваговий коефіцієнт для нерухомого, м'якого трибоелемента з більшою площею тертя, визначається виразом:

$$G_{ЗТГ}^n = (1 + 3,04 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta HB). \quad (10)$$

З урахуванням вагових коефіцієнтів, формул (9) і (10), об'ємну швидкість зношування для рухомого, більш твердого трибоелемента з меншою площею тертя, представимо формулою:

$$I_{ЗТГ}^p = G_{ЗТГ}^p \left[ \frac{72 \cdot W_{TP,p}}{Q_{\max}} \cdot \exp\left(\frac{W_i}{W_{зад}}\right) \cdot A_l (\cos \omega_l \cdot t + \sin \omega_l \cdot t) \right], m^3 / год. \quad (11)$$

Для нерухомого, м'якого трибоелемента з більшою площею тертя, представимо формулою:

$$I_{ЗТГ}^n = G_{ЗТГ}^n \left[ \frac{72 \cdot W_{TP,n}}{Q_{\max}} \cdot \exp\left(\frac{W_i}{W_{зад}}\right) \cdot A_l (\cos \omega_l \cdot t + \sin \omega_l \cdot t) \right], m^3 / год. \quad (12)$$

Сумарна об'ємна швидкість зношування зворотної трибосистеми за геометрією визначається як сума швидкостей зношування рухомого і нерухомого трибоелементів виразом:

$$I_{ЗТГ} = I_{ЗТГ}^p + I_{ЗТГ}^n. \quad (13)$$

Для зворотної трибосистеми за матеріалами і геометрією одночасно ( $ЗТМГ$ ) ваговий коефіцієнт для рухомого, більш м'якого трибоелемента з меншою площею тертя, визначається виразом:

$$G_{ЗТМГ}^p = (1 + 4,57 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta HB). \quad (14)$$

Ваговий коефіцієнт для нерухомого, твердого трибоелемента з більшою площею тертя, визначається виразом:

$$G_{ЗТМГ}^h = (1 + 1,49 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta HB). \quad (15)$$

З урахуванням вагових коефіцієнтів, формул (14) і (15), об'ємну швидкість зношування для рухомого, м'якого трибоелемента з меншою площею тертя, представимо формулою:

$$I_{ЗТМГ}^p = G_{ЗТМГ}^p \left[ \frac{72 \cdot W_{TP,h}}{Q_{\max}} \cdot \exp\left(\frac{W_i}{W_{зад}}\right) \cdot A_l (\cos \omega_l \cdot t + \sin \omega_l \cdot t) \right], m^3 / год. \quad (16)$$

Для нерухомого, твердого трибоелемента з більшою площею тертя, представимо формулою:

$$I_{ЗТМГ}^h = G_{ЗТМГ}^h \left[ \frac{72 \cdot W_{TP,p}}{Q_{\max}} \cdot \exp\left(\frac{W_i}{W_{зад}}\right) \cdot A_l (\cos \omega_l \cdot t + \sin \omega_l \cdot t) \right], m^3 / год. \quad (17)$$

Сумарна об'ємна швидкість зношування зворотньої трибосистеми за матеріалами і геометрією одночасно визначається як сума швидкостей зношування рухомого і нерухомого трибоелементів виразом:

$$I_{ЗТМГ} = I_{ЗТМГ}^p + I_{ЗТМГ}^h \quad (18)$$

Отримані вирази для моделювання об'ємної швидкості зношування у рухомих і нерухомих трибоелементів зворотних конструкцій трибосистем, (4) - (18), були перевірені експериментально в лабораторних умовах на машині тертя за схемою «кільце-кільце».

Адекватність теоретичних значень отриманих за виразами (4) - (18) з експериментальним даним була перевірена за F-критерієм Фішера. Для цього були розраховані дисперсії адекватності та відтворюваності. Порівняння розрахункового значення критерію і табличного дозволяють зробити висновок, що залежності (4) - (18) адекватно відображають процеси тертя і зношування в зворотних конструкціях трибосистем в умовах граничного мащення на стаціонарних режимах і враховують, на відміну від отриманих раніше, різницю в твердості матеріалів трибоелементів.

**Обговорення результатів.** Аналіз отриманих формул дозволяє стверджувати, що зносостійкість зворотних конструкцій трибосистем поступається прямим конструкціям. Сумарна об'ємна швидкість зношування ЗТМ в 2,43 рази перевищує об'ємну швидкість зношування ПТ. Аналогічний результат отримано для ЗТГ - 2,43 рази. Отримані значення дозволяють зробити висновок, що ЗТМ і ЗТГ рівноцінні по зносостійкості і поступаються ПТ. Коефіцієнт тертя у таких конструкцій трибосистем, в порівнянні з ПТ, не змінюється.

Зносостійкість ЗТМГ має найнижчий результат з усіх представлених конструкцій трибосистем. Сумарна об'ємна швидкість зношування збільшується в 2,9 рази в порівнянні з ПТ. Коефіцієнт тертя у ЗТМГ, в порівнянні з ПТ, не змінюється.

**Висновок.** Отримано математичні вирази для моделювання об'ємної швидкості зношування зворотних конструкцій трибосистем на стаціонарних режимах. Встановлено, що зносостійкість зворотних конструкцій трибосистем менше, ніж

прямих конструкцій. Коефіцієнт тертя у зворотних конструкцій, в порівнянні з прямими трибосистемами, не змінюється.

Отримало подальший розвиток визначення вагових коефіцієнтів в математичних виразах для визначення об'ємної швидкості зношування рухомих і нерухомих трибоелементів в зворотних конструкціях трибосистем. Показано, що величини коефіцієнтів є функцією різниці твердості матеріалів в трибосистемі.

Максимальне значення вагових коефіцієнтів характерно для зворотної трибосистеми за матеріалами і геометрією одночасно. Це дозволяє зробити висновок, що така трибосистема буде «слабкою ланкою» в загальній конструкції машини і обмежувати ресурс під час експлуатації

#### *Список літератури*

1. Войтов В.А., Яхно О.М., Аби Сааб Ф.Х. Принципы конструктивной износостойкости узлов трения гидромашин. – К.: Нац. техн. ун-т «Киев. политехн. ин-т», 1999. – 190 с.
2. Войтов А.В. Разработка математической модели стационарных процессов в трибосистемах в условиях граничной смазки. /Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів.- 2019, - №16, - С. 16-28.
3. Буше Н.А. Решенные и переменные задачи по совместимости трибосистем / Н.А. Буше // Трение и износ. – 1993. – Т. 14, № 1. – С. 25 – 34.
4. Vojtov V.A. Zakharchenko M.B. Modeling of wear distribution between triboelements of different stand inverse structures of tribosystems. /Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2015, вип. 163, с. 96 – 104.

Стаття надійшла до редакції 23.09.2019.

**Войтов Антон Вікторович** – канд. техн. наук, старший викладач кафедри деревооброблювальних технологій та системотехніки лісового комплексу Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка, [K1kavoitov@gmail.com](mailto:K1kavoitov@gmail.com)

A.V. VOJTOV

### MODELING OF THE RUBBER PROCESSING AND WEARING AT USE OF REVERSE PIPE STRUCTURES

The paper presents a methodological approach to modeling volumetric velocity wear in reverse tribosystem designs based on known values for direct construction. Based on experimental data obtained mathematical expressions for modeling volumetric wear rate. It is shown that the total volumetric wear rate of the reverse tribosystem over materials is 2.43 times the total volumetric wear rate of a straight line tribosystems. It was found that an increase in the total space velocity wear occurs due to an equal increase in wear rate mobile and motionless triboelements. A similar result was obtained for inverse tribosystem in geometry. The friction coefficient of such structures tribosystems, in comparison with a direct, does not change. It is established that wear resistance the inverse tribosystem for materials and geometry at the same time has the lowest result from all presented designs. Total space velocity wear increases by 2.9 times compared with the direct tribosystem. Got further development of the definition of weights in mathematical expressions for determining the volumetric wear rate of moving and motionless triboelements in reverse tribosystem designs. Shown, that coefficient values are a function of the difference in hardness of materials in tribosystem. The maximum value of the weight coefficients is typical for inverse tribosystem for materials and geometry at the same time. This allows to conclude that such a tribosystem will be a "weak link" in the overall design machines and limit the resource during operation.

**Key words:** tribosystem, mathematical model, stationary processes, direct and inverse tribosystem designs, volumetric wear rate of inverse tribosystems, weight coefficient, coefficient of friction.

### References

1. Voytov V.A., Yakhno O.M., Abi Saab F.K.H. Printsipy konstruktivnoyi znosostoykosti uzlov treniya gidromashin. – K.: Nats. tekhn. un-t «Kiyev. politekhn. in-t», 1999. – 190 s.
2. Voytov A.V. Razrabotka matematicheskoy modeli statsionarnykh protsessov v tribosistemakh v usloviyakh granichnoy smazki. /Tekhnichniy servis agropromislovogo, lisovogo ta transportnogo kompleksiv. - 2019, - №16, - S. 16-28.
3. Bushe N.A. Reshennyye i peremennyye zadachi po sovmestimosti tribosistem / N.A. Bushe // Treniye i iznos. – 1993. – T. 14, № 1. – S. 25 – 34.
4. Vojtov V.A. Zakharchenko M.B. Modeling of wear distribution between triboelements of direct and inverse structures of tribosystems. /Visnik Kharkivs'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu sil'skogo gospodarstva im. P. Vasilenka. – Kharkiv: KHNTUSG, 2015, vip. 163, s. 96 – 104.