

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

ЗАХАРЧЕНКО МИХАЙЛО БОРИСОВИЧ

УДК 621.891

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ В ПРЯМИХ  
ТА ЗВОРОТНИХ ТРІБОСИСТЕМАХ В УМОВАХ ГРАНИЧНОГО  
МАЩЕННЯ**

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка, Міністерство освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Войтов Віктор Анатолійович,**  
Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка,  
проректор з наукової роботи

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Дворук Володимир Іванович,**  
Національний авіаційний університет,  
професор кафедри теоретичної та прикладної фізики;

кандидат технічних наук,  
**Трошін Олег Миколайович,**  
Харківський університет Повітряних Сил  
ім. І. Кожедуба,  
старший викладач кафедри інженерно-авіаційного  
забезпечення

Захист дисертації відбудеться «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 року о \_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.832.03 в Харківському національному технічному університеті сільського господарства ім. Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, вул. Алчевських, 44.

Автореферат розісланий «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В.М. Власовець

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Фахівці по проектуванню і експлуатації нової техніки мають справу з системою керування низкою параметрів на різних рівнях, в основу якої покладена єдина мета – зносостійкість, мінімальні втрати на тертя і висока надійність. Для досягнення такої мети в трибології застосовуються різні методи моделювання, які дозволяють скоротити об'єм лабораторних і стендових випробувань нових машин в процесі їх проектування та доводки.

Необхідно відмітити, що на трибосистему, як об'єкт моделювання, діє великий потік вхідних параметрів та збуджень, які необхідно не тільки враховувати в моделях, а і проранжувати за ступенем впливу на процес, що досліджується. Це дозволить підвищити точність моделювання і запобігти виникненню подальших помилок в експлуатації.

Все більше значення при проектуванні знає поняття сумісності матеріалів в трибосистемі між собою та змащувальним середовищем. Це пов'язано з розробкою нових конструкційних та змащувальних матеріалів, що потребує подальших досліджень з розвитку критеріїв сумісності матеріалів та їх врахування при розробці моделей.

Тому розробка методів моделювання процесів тертя та зношування в трибосистемах, з урахуванням великої кількості вхідних параметрів та сумісності матеріалів в трибосистемі, є необхідною ланкою в системному підході розрахунку на зносостійкість на етапі проектування машин.

Огляд існуючих теорій тертя та зношування і моделей, побудованих на базі цих теорій, показує перспективність структурно-енергетичного підходу при побудові таких моделей. Такі моделі повинні враховувати значні зміни, які відбуваються в структурі матеріалів поверхневих шарів трибоелементів.

**Зв'язок роботи з науковими матеріалами, планами, темами.** Робота виконувалась у відповідності до Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» від 08.09. 2011 № 3715-VI та п.2 постанови Кабінету Міністрів України від 17.05. 2012 № 397 «Деякі питання визначення середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності галузевого рівня на 2012-2016 рр.», планом науково-дослідних робіт навчально-наукового інституту технічного сервісу ХНТУСГ ім. П. Василенка «Розробка біоолив на базі рослинних олій олеїнового типу та дослідження процесів, які відбуваються в мастильному шарі з урахуванням властивостей матеріалів трибосистем», ДР 0110U001958.

**Мета та завдання досліджень.** Мета роботи – розробка методики моделювання швидкості зношування та коефіцієнта тертя прямих та зворотних конструкцій трибосистем в умовах граничного навантаження.

Відповідно до цього необхідно вирішити наступні основні наукові та прикладні завдання.

1. Розробка методики моделювання контактної взаємодії поверхонь тертя та дослідження впливу фізико-механічних властивостей матеріалів і параметрів шорсткості на характеристики фактичної плями контакту.

2. Розробка математичної моделі зміни швидкості роботи дисипації в трібосистемі та її розподіл між трібоелементами з урахуванням трібологічних властивостей змащувального середовища.

3. Дослідження властивостей конструкційних матеріалів, які впливають на сумісність в трібосистемі, розробка критерія добротності трібосистеми та оцінка його впливу на швидкість зношування та коефіцієнт тертя.

4. Розробка математичної моделі розрахунку швидкості зношування та коефіцієнта тертя трібосистем, які працюють в умовах граничного мащення, та дослідження ступеню впливу вхідних факторів на функцію відгуку.

5. Розробка методики моделювання швидкості зношування та коефіцієнта тертя прямих та зворотних конструкцій трібосистем в умовах граничного мащення, експериментальна оцінка адекватності та точності моделювання.

6. Впровадження розробленої методики в конструкторських та проектних організаціях на етапі проектування нових машин, оцінка економічного ефекту.

**Об'єкт досліджень** – процеси тертя та зношування в трібосистемах машин, які працюють в умовах граничного мащення.

**Предмет досліджень** – моделювання процесів тертя та зношування в прямих та зворотних трібосистемах в умовах граничного мащення.

**Методи дослідження:** Теоретичні дослідження базувались на системному аналізі, механіці контактної взаємодії поверхонь тертя, термодинаміки необоротних процесів в механічних системах. Експериментальні дослідження базувались на теорії планування експеримента, математичної статистики. Лабораторні дослідження проводили за методами та методиками згідно стандартів та нормативно-технічної документації.

Обробка результатів експериментів виконувалась з застосуванням стандартних комп'ютерних програм розроблених на базі математичної статистики.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Положення, що характеризують наукову новизну дисертаційної роботи, полягають у наступному.

1. Вперше отримані залежності об'ємної швидкості зношування і коефіцієнта тертя прямих та зворотних конструкцій трібосистем від комплексного впливу параметрів шорсткості поверхонь тертя, фізико-механічних і реологічних властивостей структури матеріалів, трібологічних властивостей змащувального середовища, експлуатаційних параметрів. Для моделювання розподілу зносу між трібоелементами в зворотних конструкціях трібосистем вперше отримані залежності та математичні вирази для визначення вагових коефіцієнтів, які дозволяють розрахувати швидкість зношування у рухомих і нерухомих трібоелементах зворотних конструкцій трібосистем, які працюють в умовах граничного мащення.

2. Отримала подальший розвиток математична модель розподілу швидкості роботи дисипації між рухомих і нерухомих трібоелементами трібосистем, яка на відміну від відомих враховує сумарну кількість плям контакту на поверхні тертя, а також трібологічні властивості змащувального середовища. Отримані теоретичні залежності зміни глибини розповсюдження деформації в поверхневих шарах трібоелементів в залежності від матеріалів і змащувальних середовищ, які застосовуються, що дозволило розрахувати об'єм

матеріала, який приймає участь в роботі та врахувати перераховані параметри при моделюванні процесів тертя та зношування.

3. Отримало подальший розвиток поняття сумісності матеріалів в трібосистемі – добротність трібосистеми, яка характеризує здатність спряжених матеріалів в трібосистемі (змащувальне середовище і реологічні властивості матеріалів трібоелементів) перетворювати роботу сил тертя в теплову енергію, тим самим запобігати запасам енергії в поверхневих шарах. Встановлено, що величина добротності (критерій добротності) оберненопропорційна швидкості об'ємного зношування та коефіцієнту тертя, а функція добротності має експонентний характер.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблена методика моделювання швидкості зношування і втрат на тертя прямих та зворотних конструкцій трібосистем. Методика дозволяє на етапі проектування нових машин розрахунковим шляхом вибрати оптимальні варіанти комбінації матеріалів змащувальних середовищ, обробки поверхонь тертя та розраховувати ресурс трібосистем. Застосування розробленої методики в проектних організаціях дозволить скоротити витрати на лабораторні та стендові випробування дослідних зразків при одночасному збільшенні ресурса нових машин. Виконана оцінка економічного ефекту від впровадження розробленої методики в проектних організаціях. Річний економічний ефект склав 531600 грн. на проектувану модель гідромашини.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати роботи отримані здобувачем особисто. У наукових статтях, які виконані у співавторстві, особистий внесок здобувача наступний: теоретично обгрунтовані параметри та розроблена методика розрахунку швидкості роботи дисипації в трібосистемах, отримані теоретичні залежності зміни вказаних параметрів [1]; розроблена математична модель розрахунку швидкості зношування і коефіцієнта тертя в трібосистемах [2]; досліджена функція добротності трібосистеми та її функціональний зв'язок з швидкістю зношування та втратами на тертя [3]; розроблена методика оцінки реологічних властивостей структури спряжених матеріалів в трібосистемі; визначені коефіцієнти згасання ультразвукових коливань в конструкційних матеріалах [4]; виконана експериментальна оцінка ступеня впливу вхідних факторів на процес тертя та зношування в трібосистемах [5]; виконана оцінка трібологічних властивостей змащувальних матеріалів, запропоновано енергетичний параметр та методика його розрахунку [6]; отримані вагові коефіцієнти розрахунку швидкості зношування у зворотних трібосистемах за відомим значенням прямих трібосистем [7]; обгрунтовано та запропоновано критерій сумісності матеріалів в трібосистемі, отримано кореляційний зв'язок зі зносостійкістю [10].

**Апробація результатів дисертації.** Результати роботи доповідалися та обговорювалися на: Міжнародній науковій сесії «Інноваційні проекти в галузі технічного сервісу машин» (Харків, ХНТУСГ, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Технічний прогрес в АПК» (Харків, ХНТУСГ, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва» (Харків, ХНТУСГ, 2015 р.); ІХ Всеукраїнській науково-практичній конференції

студентів, аспірантів та молодих учених «Підвищення надійності машин і обладнання» (Кіровоград, КНТУ, 2015 р.); 25-й Международной специализированной выставке «Белагро-2015», Международной научно-практической конференции (Минск, 2015 г.).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 8 наукових праць (1 одноосібна), з них 7 статей у фахових виданнях, 1 – у закордонному виданні, 2 публікації матеріалів і тез конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, який налічує 158 найменування, та 2 додатків. Роботу викладено на 165 сторінках, з них 150 сторінок основного тексту, на яких розміщено 49 рисунків та 18 таблиць.

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**Вступ** до дисертаційної роботи містить такі положення: актуальність теми; зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; мету та завдання досліджень; наукову новизну одержаних результатів; практичне значення одержаних результатів; особистий внесок здобувача; інформацію про апробації та публікації; відомості про структуру роботи.

**У першому розділі** проведено аналіз робіт, які присвячені розробці моделей тертя та зношування, а також методів розрахунку на тертя та знос. На основі робіт Г. Фляйшера, А. Тросса, І.В. Крагельського, Б.І. Костецького, робиться висновок, що в основу розробки моделей та методів розрахунку на тертя та знос покладено енергетичний підхід.

Подальший розвиток методів розрахунку на тертя та знос, а також моделювання процесів тертя та зношування отримало в роботах С.Б. Айбиндера, М.Ф. Семенюка, А.Г. Кузьменка, О.В. Дихи, В.І. Дворука. Методи ґрунтуються на визначенні величин фактичних плям контакту та швидкості деформації матеріалу під фактичними плямами контакту. Перераховані показники увійшли в розрахункові моделі визначення швидкості роботи дисипації, як енергетичного параметра для оцінки зносостійкості та втрат на тертя в трібосистемах.

Вивченню певних аспектів сумісності матеріалів трібосистем присвячені роботи М.О. Буше, Д.М. Гаркунова, Р.М. Матвієвського, М.М. Хрущова, Р.М. Олексієва, І.І. Карасика. По суті, при розгляді сумісності вирішуються задачі оптимізації.

Вибору критеріїв сумісності матеріалів трібосистем присвячені роботи Б.І.Костецького та Л.І.Бершадського, що залучили до вивчення процесів тертя та зношування закони термодинаміки незворотних процесів.

В.В.Шевеля спільно з О.М. Гладченко та П.В. Назаренко в своїх роботах показали, що релаксаційні процеси проявляють більш високу структурну чутливість до зміни напружено-деформованого стану матеріалу при динамічному навантаженні.

Проведений аналіз вибору методів моделювання показав, що найбільш доцільним буде використання методик розрахунків швидкості роботи дисипації в матеріалах трібоелементів з урахуванням структури матеріалів та трібологічних властивостей змащувального середовища. Висвітленню

методології такого напрямку присвячені роботи Р.М. Матвієвського, Г.І. Фукса, М.Ф. Дмитриченка, Р.Г. Мнацаканова, В.А. Войтова.

На основі виконаного аналізу літературних джерел у першому розділі сформульована мета та завдання дослідження.

**У другому розділі** роботи описується методичний підхід, який застосовується при розробці математичних моделей та моделюванні процесів тертя та зношування в трібосистемах в умовах граничного мащення.

На першому ієрархічному рівні визначаються межі трібосистеми: трібосистема функціонує в умовах граничного мащення на режимах, які не викликають пошкодження поверхонь тертя. Вхідні параметри, які впливають на трібосистему і на процес тертя та зношування, можна розділити на три групи:

- технологічні: шорсткість  $Ra$  та  $Sm$ ;

- конструктивні: модуль пружності  $E$  та коефіцієнт Пуассона  $\nu$  матеріалів трібоелементів; реологічні властивості матеріалів (коефіцієнт згасання ультразвукових коливань в структурі матеріалів)  $\delta$ ; трібологічні властивості мастильного середовища  $E_y$ ; величина меншої площі тертя одного із трібоелементів  $F_{min}$ ;

- експлуатаційні: навантаження  $N$  та швидкість ковзання  $v_{ск}$ ;

$\sigma_n = N/F_{min}$  – номінальне напруження при контактуванні трібоелементів, Па.

Вихідними параметрами є: об'ємна швидкість зношування рухомого і нерухомого трібоелементів  $I$  і коефіцієнт тертя трібосистеми  $f$ .

Другий ієрархічний рівень даної роботи становить теоретичні дослідження по розробці математичних моделей визначення об'ємної швидкості зношування і коефіцієнта тертя. В основу розробки математичних моделей покладені: визначення характеристик фактичної плями контакту; напруження в матеріалі на плямі контакту; діаметр плями контакту і кількість плям контакту на поверхні; швидкість роботи дисипації рухомим і нерухомим трібоелементами трібосистеми.

Третій ієрархічний рівень роботи складають експериментальні дослідження тріботехнічних характеристик різних кінематичних схем контакту трібосистем.

Четвертий ієрархічний рівень досліджень спрямований на розробку методики моделювання процесів тертя та зношування в прямих та зворотних конструкціях трібосистем з урахуванням функції добротності, а також дослідження функції добротності та встановлення функціонального взаємозв'язку між значенням добротності  $Q$ , Дж/м<sup>3</sup> та об'ємною швидкістю зношування і коефіцієнтом тертя в трібосистемах.

У процесі експериментальних досліджень використовувалися три кінематичні схеми випробувань: «диск-диск», «диск-колода», що реалізуються на машині тертя СМТ-1 і «кільце-кільце», що реалізується на машині тертя УМТ-1. Дані схеми випробувань моделюють більшість опорних і упорних вузлів ковзання в конструкціях радіально-поршневих і аксіально-поршневих гідромашин. Геометричні параметри трібоелементів для випробування за різними кінематичними схемами відповідають технічній документації до машин тертя СМТ-1 і УМТ-1.

В якості сталей були обрані: сталь 20Х; сталь 40Х; сталь ШХ 15; сталь 38Х2МЮА. В якості чавунів були обрані: сірий модифікований чавун СЧ і високоміцний чавун ВЧ 70. В якості бронз були обрані: Бр. ОЦС 6-6-4; Бр. АЖ 9-4. В якості латуней: ЛЗ 62-1,5; ЛМцСКА 58-2-2-1-1.

**Третій розділ** дисертаційної роботи присвячений розробці математичної моделі зміни коефіцієнта тертя і швидкості зношування. Як метод дослідження використовується математичне моделювання, а основним принципом в моделюванні є декомпозиція складної системи на простіші підсистеми. При такому підході математична модель будується за блоковим принципом.

Структура математичної моделі складається з наступних блоків:

1. Блок моделювання характеристик фактичної плями контакту (ФПК) поверхонь тертя.
2. Блок моделювання зміни швидкості роботи дисипації трібосистеми.
3. Блок моделювання зміни коефіцієнта тертя.
4. Блок моделювання об'ємної швидкості зношування.
5. Блок перевірки адекватності математичної моделі за критерієм Фішера і розрахунок похибки моделювання.

При розробці математичної моделі були прийняті наступні допущення:

1. Контакт поверхонь тертя рухомого і нерухомого трібоелементів дискретний, плями контакту рівномірно розподілені по площі тертя, взаємодії виступів шорсткостей випадкові.
2. Вид контакту на одиничній плямі – пружний.
3. Температура, яка генерується на фактичних плямах контакту, не змінює модуль пружності і коефіцієнт Пуассона матеріалів трібоелементів, а суттєво впливає на хід термоокислювальних процесів на поверхнях тертя.
4. За характером процесів тертя та зношування, що протікають, розглядаються сталі режими, тобто після завершення припрацювання.

Обмеження, які прийняті при розробці математичної моделі:

1. Трібосистема функціонує в режимі граничного навантаження.
2. Трібосистема функціонує в діапазоні, де не виникає пошкодження поверхонь тертя, при цьому, енергії активації достатньо для перебудови поверхневих шарів.

При розробці математичної моделі був застосований методичний підхід, який розроблений М.Ф. Семенюком і його учнями. Методичний підхід базується на методі випадкових полів, на базі якого розроблено математичну модель чисельного моделювання.

Модель враховує середнє арифметичне відхилення точок профілю (еквівалентні параметри шорсткості)  $Ra$ , середній крок нерівностей по середній лінії  $S_m$  і приведений модуль Юнга контактуючих матеріалів рухомого і нерухомого трібоелементів.

З урахуванням градієнта поверхні і комплексу умов контактування поверхонь  $K$ , формули для розрахунку яких представлені в дисертації, отримано вираз для визначення відносної фактичної площі контакту:

$$\eta = 1 - \exp(-K). \quad (1)$$

Фактичне напруження в зоні контакту, з урахуванням номінального напруження при контактуванні трібоелементів  $\sigma_n$ , Па:



$$\sigma_{\text{фпк}} = \frac{\sigma_n}{\eta}, \text{ Па.} \quad (2)$$

Середня площа одиної плями контакту з урахуванням щільності плям контакту  $d_c$ :

$$A_c = \frac{\eta}{d_c}, \text{ м}^2. \quad (3)$$

Середній діаметр одиної фактичної плями контакту:

$$d_{\text{фпк}} = \sqrt{\frac{4A_c}{\pi}}, \text{ м.} \quad (4)$$

Кількість плям контакту на меншій поверхні тертя:

$$n = \frac{F_{\text{min}}}{A_c} \eta. \quad (5)$$

Результати моделювання представлені на рис. 1 і 2.

Як впливає з графіків, залежності мають нелінійний характер. Збільшення параметра  $Ra$  в 2 рази призводить до збільшення  $\sigma_{\text{фпк}}$  в 2,2 рази. Аналогічні залежності і за впливом параметра  $Sm$ .

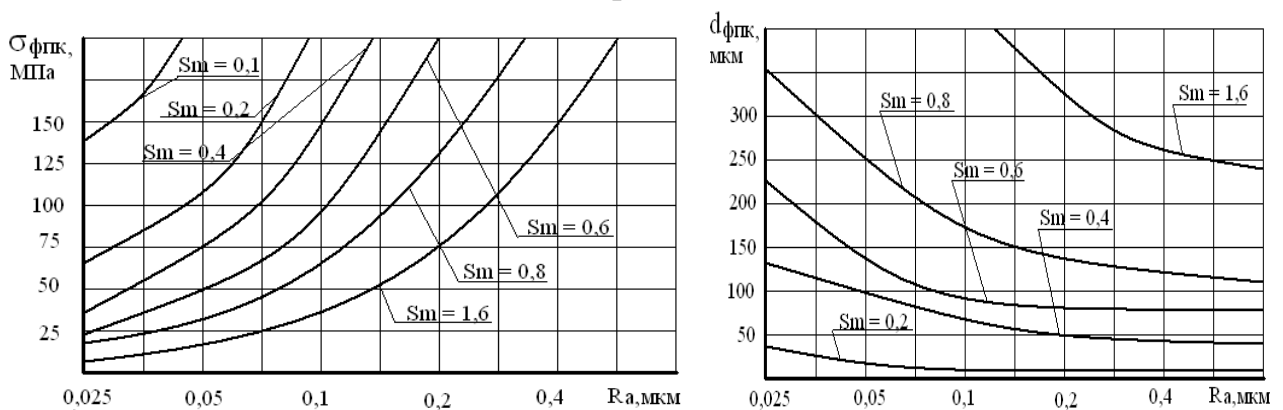


Рис. 1. Залежності величини напруження і діаметру одиної ФПК від величини параметра  $Ra$  та середнього шагу нерівностей  $Sm$

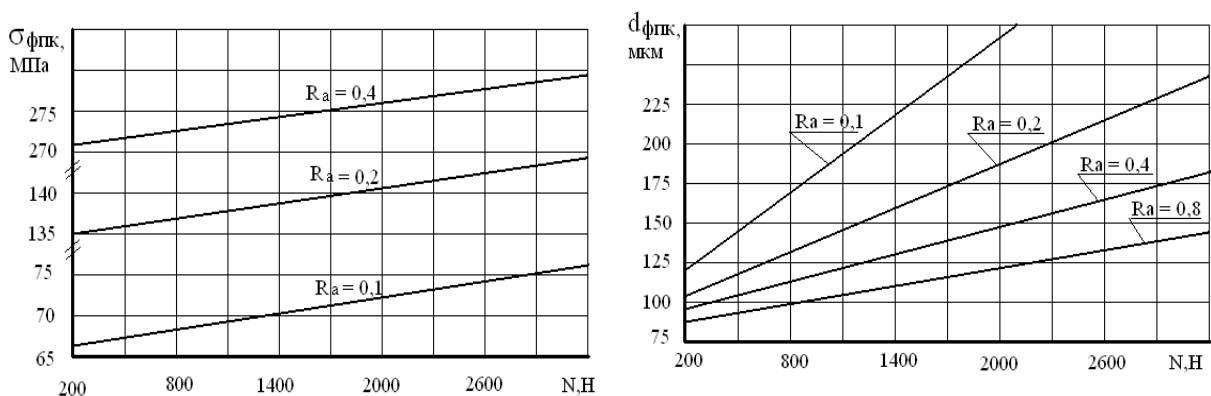


Рис. 2. Залежності величини напруження і діаметру одиної ФПК від навантаження  $N$  та параметра шорсткості  $Ra$

Ступінь впливу навантаження  $N$  на характеристики фактичної плями контакту дозволяє зробити висновок, що залежності носять лінійний характер.

При цьому, зміна параметра шорсткості  $Ra$  має більший ступінь впливу на  $\sigma_{фнк}$  і  $d_{фнк}$ , ніж параметр навантаження  $N$ .

Швидкість роботи дисипації в трібосистемах характеризує перетворення механічної енергії тертя в теплову енергію, за величиною якої можна судити про «завантаження» трібосистеми і кожного з трібоелементів в ній.

Швидкість роботи дисипації  $W$  на одиничному ФПК визначається за виразом:

$$W = \sigma_{фнк} \dot{\epsilon} V_{\partial} n, \text{ Дж/с}, \quad (6)$$

де  $\dot{\epsilon}$  - швидкість деформації матеріала на одиничній ФПК, 1/с;

$V_{\partial}$  - об'єм матеріалу одиничної ФПК, яка бере участь в деформації, м<sup>3</sup>,

$n$  - кількість плям контакту на меншій площі тертя.

Швидкість деформації матеріалу рухомого трібоелемента на одиничному ФПК розраховується за формулою:

$$\dot{\epsilon}_p = 75(1 + \nu_p)(0,86 - 1,05\nu_p) \frac{\sigma_{фнк} \cdot \nu_{ск}}{E_p \cdot d_{фнк}}, \text{ 1/с}, \quad (7)$$

для матеріалу нерухомого трібоелемента:

$$\dot{\epsilon}_H = 75(1 + \nu_H)(0,86 - 1,05\nu_H) \frac{\sigma_{фнк} \cdot \nu_{ск}}{E_H \cdot d_{фнк}}. \quad (8)$$

Об'єм матеріалу рухомого і нерухомого трібоелементів, який бере участь у деформації, виразимо як добуток площі фактичного контакту на глибину поширення деформації  $h$ . Узагальнюючи експериментальний матеріал щодо впливу мастильного середовища на глибину наклепаного шару, нами були отримані залежності з визначення глибини деформації в матеріалі рухомого трібоелемента:

$$h_p = 0,5d_{фнк}(1 - e^{-D_p}), \text{ м}, \quad (9)$$

в матеріалі нерухомого трібоелемента:

$$h_H = 0,5d_{фнк}(1 - e^{-D_H}), \text{ м}, \quad (10)$$

де  $D_p$  і  $D_H$  - коефіцієнти, які враховують здатність матеріалу до деформації під дією поверхнево-активних речовин, для рухомого і нерухомого трібоелементів відповідно.

На підставі експериментальних даних були отримані вирази для розрахунку коефіцієнтів  $D_p$  і  $D_H$ :

$$D_p = \frac{6,5 \cdot 10^8 \sigma_{фнк}^2}{E_p \cdot E_y}, \quad (11)$$

$$D_H = \frac{6,5 \cdot 10^8 \sigma_{фнк}^2}{E_H \cdot E_y}, \quad (12)$$

коефіцієнти  $D_p$  і  $D_H$  безрозмірні.

На підставі отриманих виразів (9) і (10) було виконано моделювання зміни глибини деформації при зміні трібологічних властивостей мастильного середовища, які враховувалися параметром  $E_y$  в формулах (11) і (12).

Результати моделювання представлені на рис.3. Початкове значення глибини деформації прийнято  $0,5 d_{фнк}$ .

З аналізу представлених залежностей випливає, що трибологічні властивості мастильного середовища до значень  $E_y = 1,8 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup> не впливають на глибину деформації у рухомого і нерухомого трибоелементів. Подальше збільшення  $E_y$  призводить до швидкого зменшення глибини деформації, а отже і об'єму матеріалу, що пов'язано з наявністю в мастильному середовищі поверхнево-активних речовин, які сприяють прояву ефекту Ребіндера.

Використовуючи вираз (6) можна виконати моделювання зміни швидкості роботи дисипації для рухомого  $W_p$ , нерухомого  $W_n$  трибоелементів і трибсистемі в цілому  $W_{TP}$ . Результати моделювання представлені на рис.4 і 5.

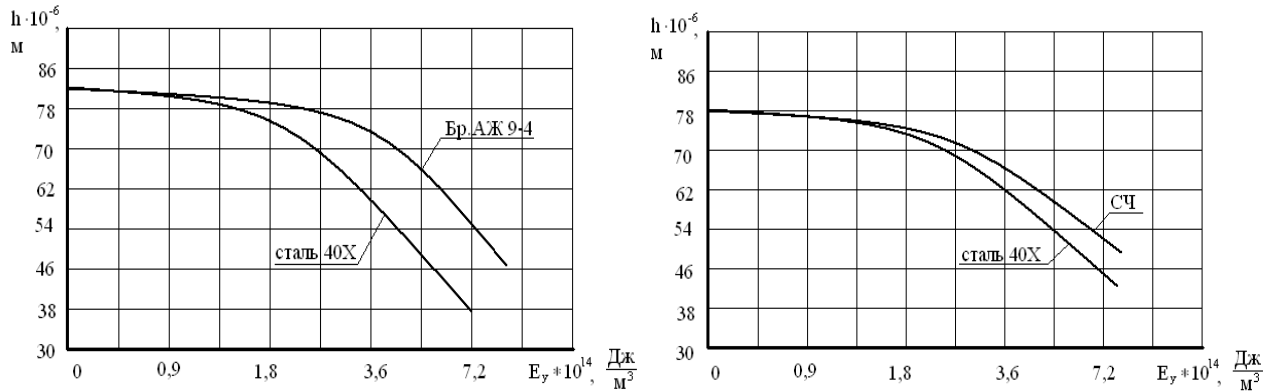


Рис. 3. Залежності зміни глибини деформації від трибологічних властивостей мастильного середовища для трибосистем: сталь 40X+Бр.АЖ 9-4 і сталь 40X+СЧ

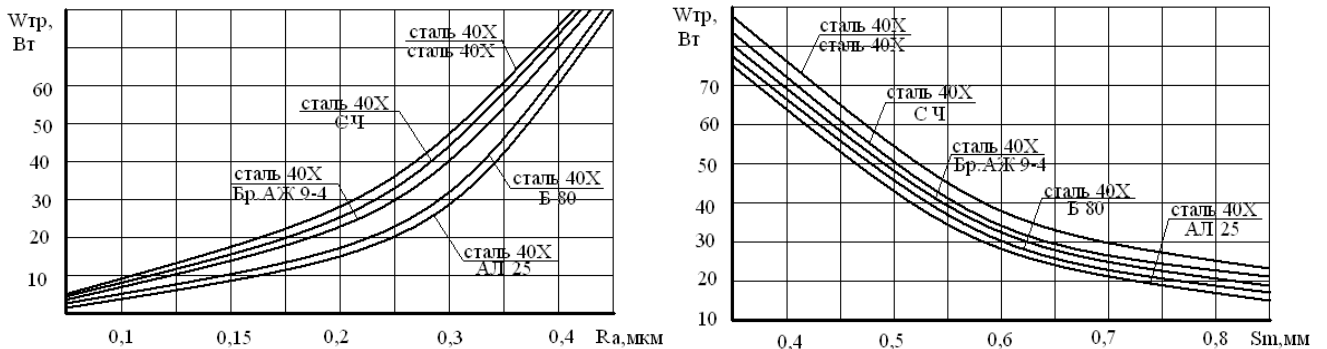


Рис. 4. Залежності зміни швидкості роботи дисипації від шорсткості  $Ra$  і шагу нерівностей  $Sm$  поверхонь тертя для різновиду матеріалів в трибосистемі

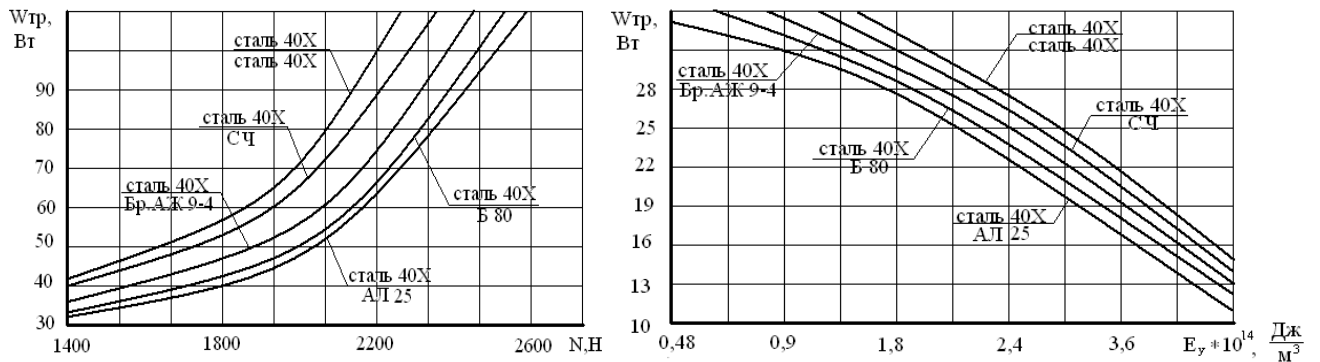


Рис. 5. Залежність зміни роботи дисипації від навантаження та трибологічних властивостей мастильного середовища для різновиду матеріалів в трибосистемах

Аналіз отриманих теоретичних залежностей дозволяє зробити висновок про нелінійність впливу перерахованих вище параметрів на швидкість роботи дисипації в трібосистемах.

Моделювання зміни коефіцієнта тертя представлено на рис.6. Добуток навантаження  $N$  на швидкість ковзання  $v_{ск}$  визначає потужність, яка «підводиться» до трібосистеми:

$$W = N \cdot v_{ск}, \text{ Н} \cdot \text{м/с} = \text{Вт}.$$

Отже, коефіцієнт тертя, який визначає втрати на тертя в трібосистемі, можна розрахувати за такою залежністю:

$$f = \frac{W_{TP}}{W} = \frac{W_p + W_n}{N \cdot v_{ск}}. \quad (13)$$

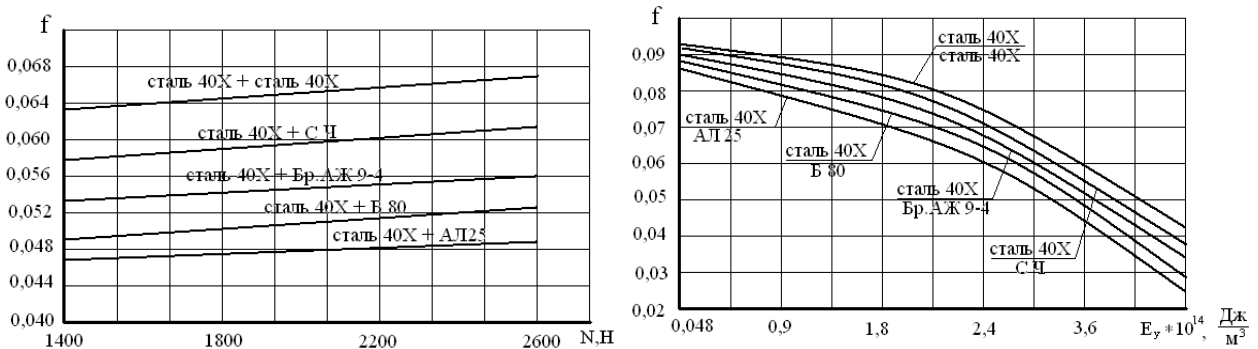


Рис. 6. Залежності зміни коефіцієнта тертя від навантаження і трибологічних властивостей мастильного середовища для різновиду матеріалів

Залежність для розрахунку і подальшого моделювання зміни об'ємної швидкості зношування  $I$  отримаємо на основі функціональної залежності між  $I$  та  $W_{TP}$ :

$$I = Q^{-1} W_{TP}, \quad (14)$$

де  $Q^{-1}$  – коефіцієнт пропорційності, тобто добротність трібосистеми:

$$Q = E_y \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}}, \text{ Дж/м}^3. \quad (15)$$

Добротність трібосистеми – це розмірна величина, яка оцінює здатність сполучених матеріалів в трібосистемі (мастильне середовище  $E_y$  і реологічні властивості структури матеріалів рухомого і нерухомого трібоелементів  $\delta_p$ ,  $\delta_n$ ) перетворювати роботу сил тертя в теплову енергію, тим самим перешкоджати запасам енергії в поверхневих і підповерхневих шарах трібоелементів, які можна оцінити деформуючим об'ємом.

На підставі великого масиву експериментальних досліджень різних конструкцій трібосистем методом найменших квадратів отримана наступна залежність:

$$I = 6 \cdot 10^{-10} \exp \left( 0,795 \cdot 10^{16} \cdot \frac{1}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{(\delta_p \cdot \delta_n)}} \cdot W_{TP} \right), \text{ м}^3/\text{ГОД}. \quad (16)$$

Отриманий вираз (16) є кінцевою формулою для моделювання зміни об'ємної швидкості зношування в залежності від вхідних факторів. Результати моделювання представлені на рис. 7 і 8. Залежності є теоретичними і будуть перевірені на адекватність експериментальними даними в четвертому розділі.

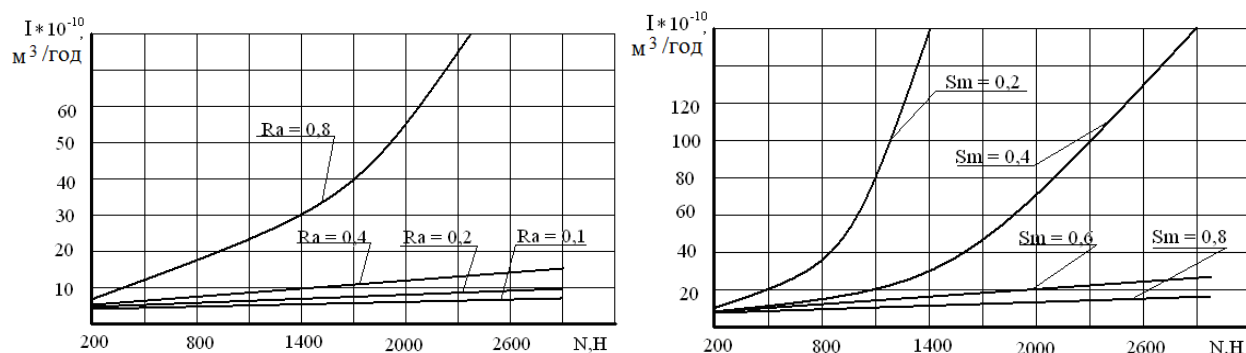


Рис. 7. Залежності швидкості зношування від навантаження і параметрів шорсткості поверхонь  $Ra$  і  $Sm$

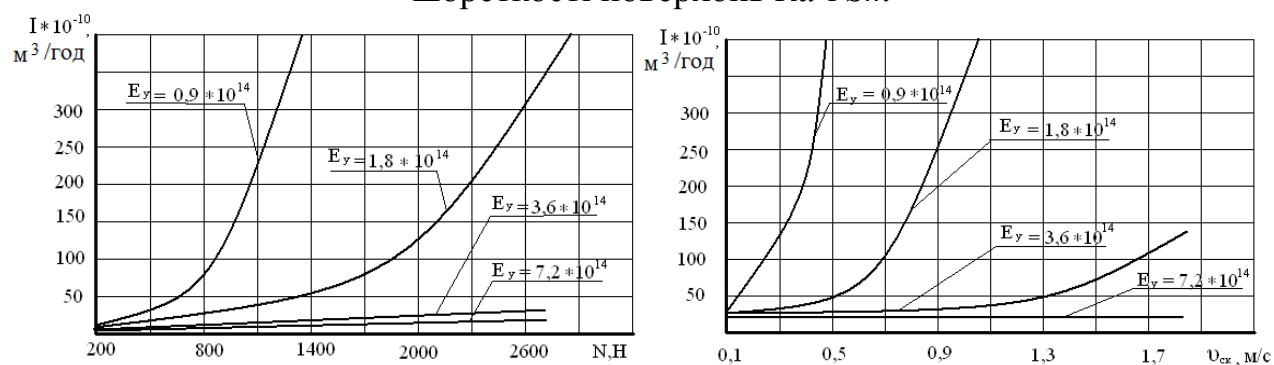


Рис. 8. Залежності швидкості зношування від навантаження і швидкості ковзання для різних трибологічних властивостей мастильного середовища  $E_y$

**В четвертому розділі** виконано експериментальні дослідження з оцінки трибологічних властивостей мастильних середовищ  $E_y$  і внутрішнього тертя структури сполучених матеріалів  $\delta$ . Як впливає з експериментальних досліджень інтегральний параметр  $E_y$  змінюється для гідравлічних олів в межах  $(1,886...3,26) \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>, для моторних олів  $(3,209...9,411) \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>. У роботі також представлені трибологічні характеристики згідно ГОСТ 9490: показник зносу; критичне навантаження; навантаження зварювання і індекс задиру. Аналіз зазначених характеристик для моторних олів, показує, що в залежності від класифікації по API показник зносу відрізняється на 31%, критичне навантаження на 37,5%, навантаження зварювання на 50%, індекс задиру на 52%. При цьому інтегральний показник трибологічних властивостей олів відрізняється на 65%, що підтверджує більшу чутливість  $E_y$  в порівнянні з показниками згідно ГОСТ 9490.

Експериментально одержані дані величин логарифмічного коефіцієнта загасання ультразвукових коливань для різних конструкційних матеріалів: сталі, чавуна, бронзи, латуні. Отримані дані будуть використовуватися при проведенні моделювання зміни об'ємної швидкості зношування і коефіцієнта тертя.

Експериментальні дослідження об'ємної швидкості зношування,  $I$ , м<sup>3</sup>/год і коефіцієнта тертя  $f$  проводили у вигляді трьохфакторного експерименту з подальшим розрахунком зазначених вище характеристик і за методикою моделювання, яка розроблена в третьому розділі даної роботи. Метою даних досліджень є підтвердження адекватності результатів математичного

моделювання з експериментальними даними та розрахунком похибки моделювання.

Обсяг вибірки по вимірюванню об'ємної швидкості зношування і коефіцієнта тертя при проведенні експериментальних досліджень був перевірений на відповідність нормальному закону розподілу.

Теоретичні та експериментальні поверхні відгуку для об'ємної швидкості зношування і коефіцієнта тертя при різному сполученні матеріалів в трібосистемах представлені на рис. 9.

Аналіз теоретичних і експериментальних поверхонь відгуку при різних значеннях досліджуваних факторів дозволяє зробити висновок, що при великих значеннях швидкості зношування, а також коефіцієнта тертя, теоретичні (розрахункові) значення менше експериментальних.

При малих значеннях швидкості зношування і коефіцієнта тертя, навпаки, теоретично отримані значення більше, ніж експериментальні. При цьому похибка моделювання зміни об'ємної швидкості зношування не перевищує 14,03%, що можна визнати задовільним при моделюванні процесів тертя та зношування. Похибка моделювання коефіцієнта тертя не перевищує 12,8%.

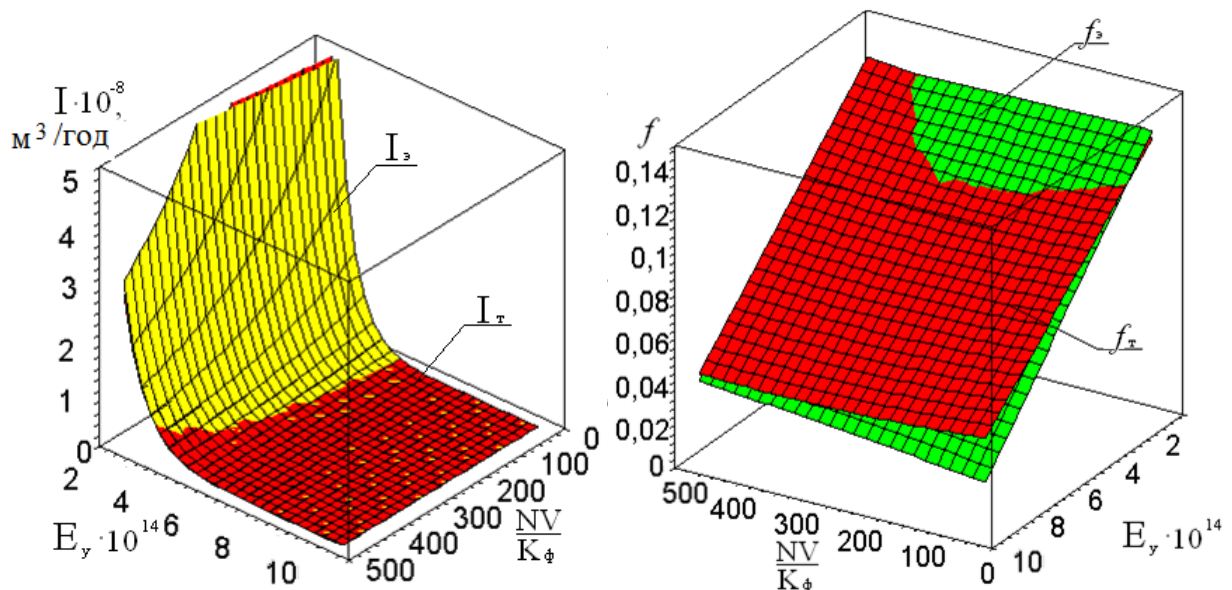


Рис. 9. Теоретичні та експериментальні поверхні відгуку для об'ємної швидкості зношування  $I$  та коефіцієнта тертя  $f$  для сполучення матеріалів в трібосистемі 40X+Бр.АЖ 9-4

**У п'ятому розділі** виконано експериментальну оцінку ступеня впливу факторів, які входять до математичної моделі, на результати моделювання. На підставі багатофакторного експерименту встановлено, що на величину об'ємної швидкості зношування, в першу чергу, впливають параметри шорсткості  $Ra$  і  $Sm$ , а потім трібологічні властивості мастильного середовища, експлуатаційні параметри та структура сполучених матеріалів.

На величину коефіцієнта тертя, в першу чергу, впливають параметри шорсткості, потім мастильне середовище, структура сполучених матеріалів та експлуатаційні параметри. Отриманий рейтинг впливу факторів відповідає висновкам теоретичних досліджень третього розділу даної роботи.

Для дослідження функції добротності трібосистеми було сплановано трьохфакторний експеримент. Перший фактор – трібологічні властивості мастильного середовища. Другий фактор – коефіцієнт загасання ультразвукових коливань в матеріалі рухомого трібоелемента. Третій фактор – коефіцієнт загасання ультразвукових коливань в матеріалі нерухомого трібоелемента.

В якості функцій відгуку обрані два параметри: середньоарифметичне значення швидкості зношування  $I$ , м<sup>3</sup>/год; середньоарифметичне значення коефіцієнта тертя  $f$ , які були отримані експериментально за результатами трьох повторів. Значення добротності трібосистеми  $Q$ , було отримано розрахунковим шляхом за виразом (15).

За результатами експериментальних досліджень за допомогою методу найменших квадратів отримані залежності:

- для швидкості зношування:

$$I = 60 \cdot 10^{-10} \exp\left(-\frac{Q}{50 \cdot 10^{16}}\right), \quad \text{м}^3/\text{год}, \quad (17)$$

для коефіцієнта тертя:

$$f = 0,11 \exp\left(-\frac{Q}{110 \cdot 10^{16}}\right). \quad (18)$$

Графічну інтерпретацію отриманих залежностей наведено на рис. 10.

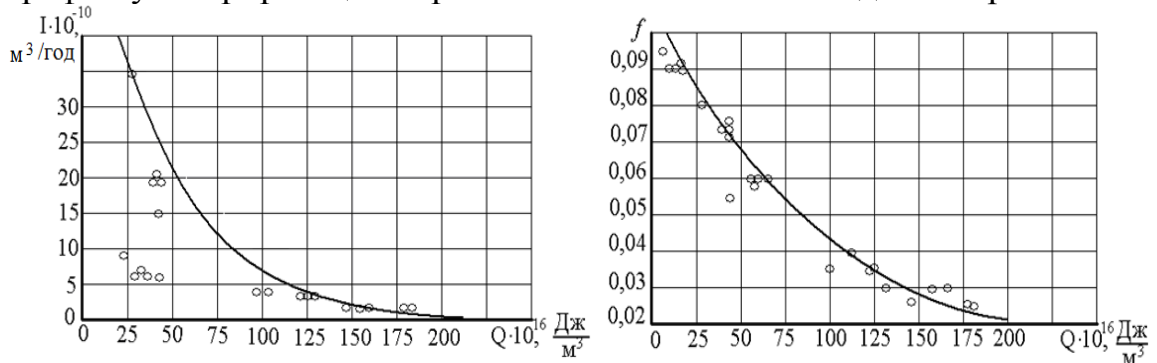


Рис. 10. Залежність об'ємної швидкості зношування та коефіцієнта тертя від добротності трібосистеми  $Q$

Коефіцієнт кореляції між швидкістю зношування  $I$  і добротністю трібосистеми  $Q$  склав  $r = 0,88$ , а між коефіцієнтом тертя  $f$  і  $Q$ ,  $r = 0,90$ .

Проведені експериментальні дослідження прямих і зворотних конструкцій трібосистем дозволили отримати залежності вагових коефіцієнтів  $G$  для рухомих і нерухомих трібоелементів. Ваговий коефіцієнт  $G$  враховує у скільки разів збільшується об'ємна швидкість зношування у трібоелементів зворотних трібосистем, в порівнянні з прямими. Отримані залежності враховують різницю в твердості за шкалою  $HB$  між матеріалами трібоелементів  $\Delta HB$ .

Для м'якого трібоелемента зворотної трібосистеми за геометрією  $ЗТГ$ , або для зворотної трібосистеми за матеріалами  $ЗТМ$  розрахунок коефіцієнта виконується за формулою:

$$G_{зтм(зтг)}^M = 18,44 \cdot 10^{-3} \Delta HB, \quad (19)$$

де  $\Delta HB$  – різниця в твердості матеріалів в трібосистемі по шкалі  $HB$ .

Для твердого трибоелемента зворотної трибосистеми за геометрією *ЗТГ*, або для зворотної трибосистеми за матеріалами *ЗТМ* розрахунок коефіцієнта виконується за формулою:

$$G_{зтм(зтг)}^T = 6,33 \cdot 10^{-3} \Delta H B. \quad (20)$$

Для м'якого трибоелемента зворотної трибосистеми за матеріалами та геометрією одночасно *ЗТМГ*, розрахунок коефіцієнта виконується за формулою:

$$G_{зтме}^M = 7,91 \cdot 10^{-3} \Delta H B. \quad (21)$$

Для твердого трибоелемента зворотної трибосистеми за матеріалами та геометрією одночасно *ЗТМГ*, розрахунок коефіцієнта виконується за формулою:

$$G_{зтме}^T = 4,66 \cdot 10^{-3} \Delta H B. \quad (22)$$

За допомогою отриманих виразів для визначення вагових коефіцієнтів і рівнянь для розрахунку об'ємної швидкості зношування рухомого і нерухомого трибоелемента прямої трибосистеми *ПТ*:

- для рухомого трибоелемента:

$$I_{p\text{ нт}} = \left[ 6 \cdot 10^{-10} \exp \left( 0,795 \cdot 10^{16} \cdot \frac{1}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{(\delta_p \cdot \delta_n)}} \cdot W_{TP} \right) \right] \frac{W_p}{W_{TP}}, \frac{M^3}{\text{сод}}, \quad (23)$$

- для нерухомого трибоелемента:

$$I_{n\text{ нт}} = \left[ 6 \cdot 10^{-10} \exp \left( 0,795 \cdot 10^{16} \cdot \frac{1}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{(\delta_p \cdot \delta_n)}} \cdot W_{TP} \right) \right] \frac{W_n}{W_{TP}}, \frac{M^3}{\text{сод}}, \quad (24)$$

отримані формули для розрахунку об'ємної швидкості зношування трибоелементів зворотних трибосистем.

Для розрахунку об'ємної швидкості зношування рухомого (більш м'якого) трибоелемента *ЗТМ* з більшою площею тертя:

$$I_{p\text{ зтм}} = G_{зтм(зтг)}^M \cdot \left[ 6 \cdot 10^{-10} \exp \left( 0,795 \cdot 10^{16} \cdot \frac{1}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{(\delta_p \cdot \delta_n)}} \cdot W_{TP} \right) \right] \frac{W_n}{W_{TP}}, \frac{M^3}{\text{сод}}, \quad (25)$$

для розрахунку об'ємної швидкості зношування нерухомого (більш твердого) трибоелемента *ЗТМ* з меншою площею тертя:

$$I_{n\text{ зтм}} = G_{зтм(зтг)}^T \cdot \left[ 6 \cdot 10^{-10} \exp \left( 0,795 \cdot 10^{16} \cdot \frac{1}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{(\delta_p \cdot \delta_n)}} \cdot W_{TP} \right) \right] \frac{W_p}{W_{TP}}, \frac{M^3}{\text{сод}}. \quad (26)$$

Для розрахунку об'ємної швидкості зношування рухомого (більш твердого) трибоелемента *ЗТГ* з меншою площею тертя:

$$I_{p\text{ зтг}} = G_{зтм(зтг)}^T \cdot \left[ 6 \cdot 10^{-10} \exp \left( 0,795 \cdot 10^{16} \cdot \frac{1}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{(\delta_p \cdot \delta_n)}} \cdot W_{TP} \right) \right] \frac{W_p}{W_{TP}}, \frac{M^3}{\text{сод}}, \quad (27)$$

для розрахунку об'ємної швидкості зношування нерухомого (більш м'якого) трибоелемента *ЗТМ* з більшою площею тертя:

$$I_{n\text{ зтг}} = G_{зтм(зтг)}^M \cdot \left[ 6 \cdot 10^{-10} \exp \left( 0,795 \cdot 10^{16} \cdot \frac{1}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{(\delta_p \cdot \delta_n)}} \cdot W_{TP} \right) \right] \frac{W_n}{W_{TP}}, \frac{M^3}{\text{сод}}. \quad (28)$$

Для розрахунку об'ємної швидкості зношування рухомого (більш м'якого) трибоелемента *ЗТМГ* з меншою площею тертя:



$$I_{p \text{ зтмг}} = G_{\text{зтмг}}^M \cdot \left[ 6 \cdot 10^{-10} \exp \left( 0,795 \cdot 10^{16} \cdot \frac{1}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{(\delta_p \cdot \delta_n)}} \cdot W_{TP} \right) \right] \frac{W_n}{W_{TP}}, \frac{M^3}{\text{год}}, \quad (29)$$

для розрахунку об'ємної швидкості зношування нерухомого (більш твердого) трібоелемента ЗТМГ з більшою площею тертя:

$$I_{n \text{ зтмг}} = G_{\text{зтмг}}^T \left[ 6 \cdot 10^{-10} \exp \left( 0,795 \cdot 10^{16} \cdot \frac{1}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{(\delta_p \cdot \delta_n)}} \cdot W_{TP} \right) \right] \frac{W_p}{W_{TP}}, \frac{M^3}{\text{год}}. \quad (30)$$

Для підтвердження точності моделювання було виконано розрахунок за отриманими формулами і виконані експериментальні дослідження. Розрахункові та експериментальні дані показують, що результати моделювання адекватні експериментальним дослідженням, похибка моделювання не перевищує 12,5%.

Розроблені математичні моделі дозволили отримати алгоритм або процедуру виконання розрахункових операцій, що є практичним значенням даної роботи. Методика дозволяє на етапі проектування нових машин розрахунковим шляхом вибрати оптимальні варіанти сумісних матеріалів, мастильних середовищ, обробки поверхонь тертя і розрахувати ресурс проєктованих трібосистем. Застосування розробленої методики в проєктних організаціях дозволить скоротити витрати на лабораторні та стендові випробування дослідних зразків, при одночасному збільшенні ресурсу нових машин.

Виконано оцінку економічного ефекту від впровадження розробленої методики в проєктних організаціях. Річний економічний ефект склав 531 600 грн. на проєктовану модель гідромашини.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено теоретичні узагальнення і нове рішення наукового завдання – розробка методів моделювання процесів тертя та зношування в трібосистемах на етапі проектування нових машин. Результати моделювання дають можливість раціонального вибору конструкцій трібосистем, матеріалів, змащувальних середовищ, а також прогнозувати ресурс в експлуатації.

1. Аналіз існуючих теорій тертя та зношування, методів та моделей розрахунку зносу, методів розрахунку характеристик контактної взаємодії поверхонь тертя та облік реологічних характеристик матеріалів, показує, що дані питання недостатньо відображені при моделюванні процесів тертя та зношування. Такі моделі повинні враховувати зміни, які відбуваються в матеріалі поверхневих шарів, зв'язані з деформаційними процесами та глибиною розповсюдження таких процесів, сумісність та їх функціональний зв'язок зі зносом, що дає можливість оцінити функцію добротності трібосистеми в розроблюваних моделях прогнозування ресурсу.

2. Розроблена методика визначення характеристик фактичної плями контакту поверхонь тертя при взаємодії матеріалів в трібосистемі. За допомогою математичного моделювання встановлено, що середнє арифметичне

відхилення точок профілю поверхонь тертя та середній шаг нерівностей по середній лінії мають більший вплив на величину напруження в матеріалі та діаметр фактичної плями контакту, ніж фізико-механічні властивості матеріалів, з яких виготовлені трібоелементи, їх конструктивні та експлуатаційні параметри.

3. Використовуючи характеристики фактичної плями контакту та трібологічні властивості змащувального середовища розроблена математична модель розподілу швидкості роботи дисипації між трібоелементами трібосистеми, яка на відміну від відомих, враховує глибину поширення деформації в матеріалі рухомого і нерухомого трібоелементів. За допомогою математичного моделювання встановлено ступінь впливу трібологічних властивостей змащувального середовища на величину швидкості роботи дисипації в трібоелементах трібосистеми, що дозволяє підвищити точність моделювання.

4. Отримало подальший розвиток поняття сумісності матеріалів в трібосистемах – добротність трібосистеми, яка характеризує здатність сполучених матеріалів в трібосистемі (змащувальне середовище та реологічні властивості структури матеріалів рухомого та нерухомого трібоелементів) перетворювати роботу сил тертя в теплову енергію, тим самим перешкоджаючи утворенню запасів енергії в поверхневих і підповерхневих шарах трібоелементів. Досліджена функція добротності та її вплив на швидкість зношування та коефіцієнт тертя. Експериментально показано, що при перевищенні значення добротності більше, ніж  $Q > 100 \cdot 10^{16} \text{ Дж/м}^3$  зниження швидкості зношування та коефіцієнта тертя трібосистеми підбором матеріалів в трібосистему та змащувального середовища до них стає малоефективним.

5. Розроблена математична модель розрахунку коефіцієнта тертя та об'ємної швидкості зношування рухомого та нерухомого трібоелементів в трібосистемі, яка працює в умовах граничного мащення. Вхідними параметрами для розрахунку є: шорсткість поверхонь тертя, фізико-механічні властивості матеріалів трібоелементів, трібологічні властивості змащувального середовища, особливості конструкції трібосистеми (величина меншої площі тертя), реологічні властивості структури спряжених матеріалів, експлуатаційні параметри – навантаження та швидкість ковзання. Теоретичним шляхом встановлений ступінь впливу наведених вище параметрів на об'ємну швидкість зношування. Параметри шорсткості поверхні тертя є найбільш вагомим фактором, потім, за ступенем спадання впливу – трібологічні властивості змащувального середовища і, в останню чергу, структура матеріалів та експлуатаційні параметри.

6. Виконана експериментальна оцінка адекватності розроблених математичних моделей за результатами експерименту, а також ступінь впливу вхідних в математичні моделі факторів на результати моделювання. За допомогою критерія Фішера встановлено, що результати моделювання об'ємної швидкості зношування та коефіцієнта тертя адекватні результатам експерименту з довірчою ймовірністю 0,9. Розрахована похибка моделювання по кожній серії експериментів, показано, що при моделюванні швидкості зношування похибка не перевищує 14,03%, при моделюванні коефіцієнта тертя

– 12,8%, що можна визнати задовільним при дослідженні процесів тертя та зношування.

7. Для моделювання розподілу зносу між трибоелементами в зворотних конструкціях трибосистем отримані математичні вирази для визначення значень вагових коефіцієнтів збільшення об'ємної швидкості зношування у трибоелементах зворотних конструкцій трибосистем в порівнянні з прямими конструкціями. Виконана експериментальна перевірка точності моделювання об'ємної швидкості зношування в рухомих та нерухомих трибоелементах зворотних конструкцій трибосистем, похибка моделювання не перевищує 12,5%.

8. Розроблена методика моделювання об'ємної швидкості зношування та втрат на тертя прямих та зворотних конструкцій трибосистем. Методика дозволяє на етапі проектування нових машин розрахунковим шляхом вибрати оптимальні варіанти спряжених матеріалів, змащувальних середовищ, обробки поверхонь тертя та розрахувати ресурс проектованих трибосистем. Застосування розробленої методики в проектних організаціях дозволить скоротити витрати на лабораторні та стендові випробування дослідних зразків при одночасному збільшенні ресурсу нових машин. Виконана оцінка економічного ефекту від впровадження розробленої методики в проектних організаціях. Річний економічний ефект склав 531600 грн. на проектувану модель гідромашини.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **У фахових виданнях**

1. Захарченко М.Б. Моделирование процессов трения изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 1. Расчет скорости работы диссипации в трибосистемах / В. А. Войтов, М. Б. Захарченко // Проблемы трибологии. – 2015. – № 1. – С. 49-57.

2. Захарченко М.Б. Моделирование процессов трения изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 2. Результаты моделирования / В. А. Войтов, М. Б. Захарченко // Проблемы трибологии. – 2015. – № 2. – С. 36-45.

3. Захарченко М.Б. Моделирование процессов трения изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 3. Добротность трибосистемы / В. А. Войтов, М. Б. Захарченко // Проблемы трибологии. – 2015. – № 3. – С. 45-53.

4. Захарченко М.Б. Методика оценки реологических свойств структуры сопряженных материалов в трибосистеме / М. Б. Захарченко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2015. – Вип. 158: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві. – С. 64-69.

5. Захарченко М.Б. Экспериментальная оценка степени влияния входящих в математические модели факторов на результаты моделирования процессов трения и изнашивания / В. А. Войтов, М. Б. Захарченко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2015. – Вип. 156: Механізація сільськогосподарського виробництва. – С. 420 – 425.

6. Захарченко М.Б. Интегральный параметр оценки трибологических свойств смазочных материалов / В. А. Войтов, М. Б. Захарченко // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. Том 2. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 151. – С. 5 – 10.

7. Zakharchenko. M.B . Modeling of wear distribution between triboelements of direct and inverse structures of tribosystems /V.A. Voitov, M.B.Zakharchenko // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2015. – Вип. 163: Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва. – С. 96 – 104.

#### **Матеріали і тези конференцій**

8. Захарченко М.Б. Степень влияния факторов на результаты моделирования процессов трения и изнашивания / В.А. Войтов, М.Б. Захарченко // Підвищення надійності машин і обладнання: ІХ Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених, 15-17 квітня 2015 р.: Збірник тез доповідей. – Кіровоград: КНТУ, 2015, - С. 55.

9. Захарченко М.Б. Критерий оценки совместимости материалов в трибосистеме / В.А. Войтов, М.Б. Захарченко // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК: материалы Международной практической конференции на 25-й Международной специализированной выставке «Белагро-2015». – Минск: Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2015. – С. 148 – 154.

#### **У закордонних виданнях**

10. Захарченко М.Б. Добротность трибосистемы, как функция износостойкости и потерь на трение / В. Войтов, М. Захарченко // MOTROL, LUBLIN-RZESZOW – 2015, Vol. 17, - № 7. – С. 93 – 98.

#### **АНОТАЦІЯ**

**Захарченко М.Б. Моделювання процесів тертя та зношування в прямих та зворотних трібосистемах в умовах граничного мащення.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах. – Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка Міністерства освіти і науки України, Харків, 2016.

Дисертаційна робота спрямована на розробку методики моделювання швидкості зношування і коефіцієнта тертя прямих і зворотних конструкцій трібосистем в умовах граничного мащення.

Розроблено методику визначення характеристик фактичної плями контакту поверхонь тертя при взаємодії матеріалів в трібосистемах. Використовуючи характеристики фактичної плями контакту і трибологічні властивості мастильного середовища розроблено математичну модель розподілу швидкості роботи дисипації між трібоелементами трібосистеми.

Отримало подальший розвиток поняття сумісності матеріалів в трібосистемах – добротність трібосистеми, яке характеризує здатність

сполучених матеріалів в трибосистемах (мастильне середовище та реологічні властивості структури матеріалів рухомого і нерухомого трибоелементів) перетворювати роботу сил тертя в теплову енергію, тим самим перешкоджати запасам енергії в поверхневих і підповерхневих шарах трибоелементів.

Розроблено методику моделювання об'ємної швидкості зношування і втрат на тертя прямих і зворотних конструкцій трибосистем. Методика дозволяє на етапі проектування нових машин розрахунковим шляхом вибрати оптимальні варіанти спряжених матеріалів, мастильних середовищ, обробки поверхонь тертя і розрахувати ресурс проєктованих трибосистем.

*Ключові слова:* трибосистема, швидкість зношування, сила тертя, моделювання процесів тертя та зношування, фактична пляма контакту, швидкість роботи дисипації, добротність трибосистеми, прямі і зворотні трибосистеми.

## АННОТАЦИЯ

**Захарченко М.Б. Моделирование процессов трения и изнашивания в прямых и обратных трибосистемах в условиях граничной смазки.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 – трение и износ в машинах. – Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2016.

Диссертационная работа направлена на разработку методики моделирования скорости изнашивания и коэффициента трения прямих и обратных конструкций трибосистем в условиях граничной смазки.

Разработана методика определения характеристик фактического пятна контакта поверхностей трения при взаимодействии материалов в трибосистеме. С помощью математического моделирования установлено, что среднее арифметическое отклонение точек профиля поверхностей трения и средний шаг неровностей по средней линии имеют большее влияние на величину напряжений в материале и диаметр фактического пятна контакта, чем физико-механические свойства материала, из которых изготовлены трибоэлементы, их конструктивные и эксплуатационные параметры.

Используя характеристики фактического пятна контакта и трибологические свойства смазочной среды разработана математическая модель распределения скорости работы диссипации между трибоэлементами трибосистемы.

Получило дальнейшее развитие понятие совместимости материалов в трибосистеме – добротность трибосистемы, которая характеризует способность сопряженных материалов в трибосистеме (смазочная среда и реологические свойства структуры материалов подвижного и неподвижного трибоэлементов) превращать работу сил трения в тепловую энергию, тем самым препятствовать запасам энергии в поверхностных и подповерхностных слоях трибоэлементов.

Разработана методика моделирования объемной скорости изнашивания и потерь на трение прямих и обратных конструкций трибосистем. Входными

параметрами для расчета являются: шероховатость поверхностей трения, физико-механические свойства материалов трибоэлементов, трибологические свойства смазочной среды, особенности конструкции трибосистемы (величина меньшей площади трения), реологические свойства структуры сопряженных материалов, эксплуатационные параметры – нагрузка и скорость скольжения. Методика позволяет на этапе проектирования новых машин расчетным путем выбрать оптимальные варианты сочетания материалов, смазочных сред, обработки поверхностей трения и рассчитать ресурс проектируемых трибосистем.

*Ключевые слова:* трибосистема, скорость изнашивания, сила трения, моделирование процессов трения и изнашивания, фактическое пятно контакта, скорость работы диссипации, добротность трибосистемы, прямые и обратные трибосистемы.

### ABSTRACT

**Zakharchenko M.B. Modelling of processes of friction and wear in direct and reverse tribosystems in the conditions of boundary lubrication.** – Manuscript.

The dissertation for the degree of candidate of technical sciences by specialty 05.02.04 – friction and wear in machines. – Kharkiv National Technical University of Agriculture. P. Vasilenko Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2016.

The dissertation directed at methodology development of modeling the wear rate and friction coefficient of direct and reverse designs of tribosystems in the conditions of boundary lubrication.

A method of determining the actual characteristics of the contact surfaces of friction materials in the interaction tribosystem. Using the actual characteristics of the contact and tribological properties of the lubricant developed a mathematical model of the distribution of the speed of the dissipation between triboelements of tribosystem.

Has been further developed the concept of material compatibility in tribosystem – the quality factor of tribosystem, which characterizes the ability of conjugated materials tribosystem (lubricating environments and rheological properties of the material structure of the movable and stationary triboelements) converting the work friction forces into heat energy, thereby discourage energy reserves in the surface and subsurface layers of triboelements.

A method of modeling capacity wear rate and friction losses of direct and reverse designs of tribosystems. The technique allows the design stage of new cars through calculations select the optimal combination of materials options, lubricating environment, surface treatment of friction and calculate the projected resource in tribosystems.

*Keywords:* tribosystem, the rate of wear, friction force, modeling processes of friction and wear, the actual contact patch, the speed of dissipation, the quality factor of tribosystem direct and reverse tribosystems.

Відповідальні за випуск Шерстюк В.С.

Підписано до друку «26» травня 2016р.

Комп'ютерний набір та верстка Постољна В.В.

Формат паперу 60x84 1/16. Умов. друк. арк. 0,9. Папір офсетний 80 г/м.

Тираж 120 пр.

Замовлення №

Різограф TR 1510 № 80654645

Навчально-методичний відділ Харківського національного технічного  
університету сільського господарства імені Петра Василенка

Адреса редакції та поліграфпідприємства:  
61002, м. Харків, вул. Артема 44, кім. 101.