

Харківській науково-дослідній та проектно-конструкторській
інститут промислових гідроприводів та гідравтоматики

На правах рукопису

ІСАКОВ Дмитро Ігорович

ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ
В УМОВАХ МЕЖОВОГО ЗМІЩУВАННЯ НА ЕТАПІ ПРОЕКТУВАННЯ ГІДРОМАШИН

Спеціальність 05.04.15

"Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати"

АВТОРЕЗЮМЕ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 1996

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Харківському інституті льотчимів Військово-Повітряних Сил України

Науковий керівник

- кандидат технічних наук,
доцент В. А. Войтов

Науковий консультант

- доктор технічних наук
Є. С. Венцель

Офіційні опоненти

- доктор технічних наук,
професор Подригало
Михайло Аббович,
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник Ачрунін
Григорій Авраамович

ЛННБ України ім. В. Стефаника



00752239 (S)

Провідна організація Харківський З-А Гідропривод

Захист відбудеться 17 липеня 1996 р. о 12 годині

на засіданні спеціалізованої вченої ради К 02.39.01

у Харківському НДІ Гідропривод

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці інституту

Адреса 310886 Харків, вул. Шатилова дача 4

Автореферат розісланий 16 серпня 1996 р.

Вчений секретар Спеціалізованої вченої ради

К. Т. Н.

В. Стефаника
СКРИЦЬКИЙ В. Я.
В. Стефаника
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

АКТУАЛЬНІСТЬ. Проектування вузлів тертя суцільних гідромашин особливо великої потужності пов'язане з глибокими чирпатами, тому на цій стадії істотно їх ретельна пр-роба. Медидно, що різноманітні варіанти доцільно досліджувати на малабаритних вразках (фізичних моделях), або за допомогою апарату математичного моделювання на обчислювальній техніці.

На даний час при проектуванні вузлів та деталей гідромашин оцінка їх триботехнічних показників використовується обмежено.

Розроблені методи ч фізичного моделювання процесів тертя та зношування накладають суттєві обмеження на умови проведення модельних та натурних випробувань. Існуючі математичні співвідношення щодо визначення триботехнічних характеристик спряжень часто мають прикладний характер тобто нема змоги їх використання для прогнозування триботехнічних характеристик різних конструкцій вузлів т. гя, або містять у с'єму складі величини, визначення яких потребує складних лабораторних досліджень. Крім цього, існуючі методики фізичного моделювання та математичні співвідношення не дозволяють у повній мірі використовувати інформацію трибологічних баз даних на етапі проектування вузлів гідроагрегатів.

Аналіз інформації, присвяченої моделюванню показав, що межове тертя є однією з найменш розроблених областей трибології, а створення розрахунково-експериментальних методів визначення триботехнічних характеристик спряжень, функціонуючих в умовах межового змалування, стало наарізью потреби.

У дисертаційній роботі викладені результати досліджень, присвячених розробці розрахунково-експериментальних методів визначення показників тертя та зношування при межовому змалуванні.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ. Цілью роботи стала розробка методик фізичного та математичного моделювання процесів тертя та зношування в умовах межового змалування щодо раціонального проектування вузлів тертя гідромашин.

Для досягнення цілі дослідження вирішувалися такі основні задачі:

- 1.Провести аналіз стану питання використання фізичного та математичного моделювання процесів тертя та зношування в різних циклах роботи гідромашини.

- 2.Прочести аналіз визначальних факторів процесів ч ме-

зовому змащуванні, - режимі максимальних навантажень .

3. Отримати критерії подібності процесів тертя та зношування.

4. Розробити методику фізичного моделювання трибологічних процесів зі змоєю моделювання за параметрами, які характеризують: масштабний фактор, умови навантаження, мастильне середовище та властивості матеріалів пари тертя.

5. Розробити математичні моделі показників тертя та зносу на стаціонарних та перехідних режимах.

НАУКОВА НОВИЗНА. Вперше запропоновані критерії подібності процесів тертя та зношування при межовому змащуванні, що містять у собі інтегральні фактори, які зумовлюють протікання явища. За допомогою отриманих критеріїв розроблена методика фізичного моделювання, яка дозволяє визначати трибологічні характеристики натурального sprzęження за даними випробувань його моделі, коли модель та натура різняться між собою не тільки геометричними розмірами, а й математичною схемою, умовами навантаження мастилами та матеріалами трибосистем.

На основі критеріального планування експерименту отримані математичні залежності для визначення триботехнічних характеристик вуалів тертя на стаціонарних режимах. Одержані залежності дозволяють виявити міру впливу факторів на тертя та зношування в умовах межового змащування, а також надають можливість раціонального вибору конструкції sprzęження та визначення критичних впливів на трибосистему.

На основі теорій подібності та моделювання, автоматичного регулювання та ідентифікації динамічних об'єктів отримані критеріальні диференціальні рівняння швидкості зношування та сили тертя. Аналіз отриманих диференціальних рівнянь дозволяє видати рекомендації щодо ефективних режимів припрацювання та оцінити запас стійкої роботи вуала тертя. Розв'язання рівнянь дозволяє визначити триботехнічні характеристики sprzęження у будь-який час.

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ. Розроблена методика фізичного моделювання межового тертя, яка дозволяє визначати триботехнічні характеристики проєктованих трибосистем за інформацією трибологічних банків даних, за даними лабораторних досліджень та стендових випробувань ма-

шия-прототипів. Використання методики дозволяє скоротити час та матеріальні витрати на доводку нових машин, зменшуючи помилки конструктора щодо призначення матеріалів у вузол тертя, масляного середовища, геометрії трибоспряження.

Розроблена методика математичного моделювання процесів тертя та зношування на ustalеному режимі. Методика дозволяє на етапі створення машин розрахувати ресурс, швидкість об'ємного зношування та силу тертя проєктованих трибосистем, а також проєкти оптимізацію рішення конструкції та визначити величини параметрів, коли можлива зміна видів зношування на недопустимі в експлуатації.

Розроблена методика математичного моделювання нестационарних процесів. Методика дозволяє визначити оптимальні режими експлуатації, запас стійкості проєктованої трибосистеми, призначити оптимальні режими обкаточних випробувань, що значно скорочує витрати при створенні нової техніки.

Результати дисертаційної роботи використані відділом гідравлічних машин НДГідропривод при розробці технічної документації на зразки насосів серії АН-П-500/35. Наведені рекомендації використані при виготовленні та випробуваннях названих насосів на стендах інституту та промислових умовах на заводі-виготовувачі. Результати випробувань позитивні і запроваджені у виробництво насосів.

АТРОБАЦІЯ РОБОТИ. Основні результати дисертаційної роботи доведені та схвалені на таких конференціях та семінарах: республіканській науково-технічній конференції "Сучасні матеріали, обладнання технології зміцнення та відновлення деталей машин", (м.Новополоцьк, квітень 1993р.); міжнародному симпозиумі з трибології (м.Гемель, вересень 1993р.); міжнародному науково-практичному семінарі "Аналіз та раціональне використання трибосистем" ("Триболог-10М"), (Рибінськ - Москва, вересень 1993р.); міжнародному симпозиумі з проблеми "Перспективні комплекси сільськогосподарських машин", (м.Харків, вересень 1994р.); спільному семінарі кафедр Харківської Державної академії залізничного транспорту (м.Харків, липень 1995р.); науково-технічному семінарі факультету загальної авіаційної підготовки Харківського інституту льотчиків ВПС України (м.Харків, вересень 1995р.).

ПУБЛІКАЦІЇ. За результатами виконаних досліджень

опубліковано 7 друкованих робіт.

СТРУКТУРА ТА ОБСЯГ РОБОТИ. Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, основних результатів та висновків, списку літератури (159 найменувань). Загальний обсяг роботи складає 157 сторінок, з них 142 сторінки друкованого тексту, 16 малюнків, та 10 таблиць.

ЗМІСТ РОБОТИ. У вступі обґрунтовується актуальність вибраної теми, наведена анотація роботи, показані її наукова новизна та практичне значення.

У першому розділі проведений огляд публікацій присвячених основним фізичним моделям трибологічної взаємодії та розрахунків показників тертя та зносу. Аналіз робіт О.С.Ахматова, П.П.Буудена та Д.Тейбора, В.В.Дерзігіна, Є.Ернста, М.М.Данилюкова, В.Д.Кузнецова, І.В.Крагельського, В.І.Костецького, Р.М.Матвієвського, Мак-Грегора, П.О.Рабіндера, Г.Фляйше та інших вчених-трибологів вказує на необхідність використання структурно-енергетичного підходу щодо розробки розрахунково-експериментальних методів визначення показників тертя та зносу.

На підставі робіт Т.Акагакі, Л.І.Вершадського, Н.О.Буше, В.І.Володимирова, І.І.Іарбара, В.В.Запорожця, В.І.Костецького, В.В.Шевелі та інших дослідників розглянуті механізми зміни структури поверхневих шарів, спряжених тертям матеріалів та сформульовані вимоги щодо їх врахування під час досліджень. Проведено аналіз використання теорії подібності та моделювання при вирішенні питань трибології. Показано, що однією з найменш розпрацьованих галузей моделювання в трибологічній процесі при межовому зм'ягчуванні.

На підставі робіт Е.Д.Брауна, В.А.Венікова, Ю.М.Дроздова, Ю.А.Євдокімова, Л.І.Седова, Х.Чихоса, А.В.Чичинадзе сформульовані вимоги до розрахунково-експериментальних методів визначення триботехнічних характеристик.

На основі наведеного аналізу визначені цілі та задачі дослідження.

У другому розділі згідно з задачами розглядаються питання, пов'язані з методичним боком проведення досліджень. Описані установки, об'єкти досліджень, методика проведення експериментів та порядок обробки їх результатів.

Показані шляхи використання системного підходу щодо роз-

робки методик фізичного та математичного моделювання показників тертя та зносу при межовому змащуванні.

Трибологічні дослідження проводились на доскональчій машині тертя 2070 СМУ-1, яка обладнана системою змащування замкнутого типу. Вивчаючи різні станами випробувачів при проведенні експериментальних досліджень з'явилися: "диск-диск", "диск-шарик", "шарик-шарик" ("торці кілець") з різними коефіцієнтами взаємного перекриття, "чотирикулькова схема".

Матеріалами об'єктів досліджень були: термооброблені сталі 20Х, 40Х, ХК11 зразки однаково термообробленого чавуну ФЧ15, бронза БрАЖ 9-4, алюмінієвий сплав АЛ-25.

Як мастильні матеріали з широкого переліку, використаних у вимірах тертя, для проведення досліджень був вибраний ряд рідин, які мають різні фізико-хімічні та трибологічні властивості: гідромасло "ВНИИ НП-403", моторне мастило "А-10Г₂", турбінне мастило "Т-22", індустриальне мастило "ІПІ-30", гідроемульсія "Гідром-2", авіаційне гідравлічне мастило "АМР-10", авіаційний гас "ТС-1".

При проведенні експериментів реєстрували момент сили тертя, визначали лінійний знос з перерахуванням у сумарну об'ємну швидкість зношування, шорсткість поверхонь тертя, температуру в зоні тертя.

Планування та обробка результатів експериментів здійснювалися відомими методами математичної статистики.

Третій розділ присвячений пошуку критеріїв подібності та розробленню методики фізичного моделювання процесів тертя та зношування в умовах межового змащування.

На підставі проведеного у першій главі аналізу, як обумовлюючі протікання трибологічних процесів при межовому терті, розглядалися такі фактори та параметри, що їх відбивають.

1. Швидкість відносного переміщення v , м/с та нормальне навантаження N , Н, як фактори зовнішнього механічного впливу.

2. Масштабний фактор пари тертя, виражений коефіцієнтом форми, який розраховують за формулою:

$$K_{\text{Ф}} = A_{\text{дн}} / (V_{\text{р}} + V_{\text{н}} / K_{\text{вз}}), 1/\text{м}$$

де: $A_{\text{дн}}$ - площа тертя нерухомого елемента, м²; $V_{\text{р}}, V_{\text{н}}$ - об'єми рухомого та нерухомого елементів пари тертя відповідно, м³;

$K_{\text{вз}}$ - коефіцієнт взаємного перекриття пари.

3. Мазильне середовище зберігувалося трибологічними властивостями та масовою витратою крізь вузол тертя Q , кг/с. Трибологічні властивості мазильного середовища відобрались параметром питомої роботи зношування A_n , Дж/м³ як відношення \int істи витраченої на відлучення об'єму тестового матеріалу (сталь ШХ15) до величини цього об'єму у досліджуваному мазильному середовищі. Параметри, необхідні для розрахунку A_n , визначають за ГОСТ 9480-75 на чотирьохваловій машині відповідно до пункту визначення показника зносу. Для деяких мазильних середовищ, використаних при проведенні досліджень, визначені величини цього параметру (табл. 1).

Таблиця 1
Величини параметру A_n мазильних середовищ, Дж/м³

Мазильні середовища	$A_n \times 10^{13}$
Гідравлічне масло "Е Ю НН 403"	4530
Моторне мастило "И-10 Г2"	3920
Гідравлічна рідина "АН-10"	270
Гідромасло "Турбо-2"	300
Індустріальне мастило "ИГ-20"	795
Авіаційний гас "ТБ-1"	1200

4. Білінко-механічні властивості матеріалів спряжених елементів виражені структурно-чужбюю величиною - діапазоном зміни коефіцієнту зчепання ультразвукових коливань матеріалів трибоспряження, який розраховується за формулою

$$\alpha_{\text{ст}} = \alpha_{\text{сп}}(\text{max}) - \alpha_{\text{вих}}(\text{min}),$$

де: $\alpha_{\text{сп}}(\text{max})$, $\alpha_{\text{вих}}(\text{min})$ - максимальне та мінімальне значення коефіцієнта зчепання ультразвукових коливань у матеріалах елементів вузла тертя. Величини $\alpha_{\text{сп}}(\text{max})$, $\alpha_{\text{вих}}(\text{min})$ визначають на примірниках виготовлених з матеріалів об'єктів досліджень, причому $\alpha_{\text{вих}}(\text{min})$ для вихідної структури матеріалів, а $\alpha_{\text{сп}}(\text{max})$ - на примірниках при їх навантаженні під час трибологічних випробувань. Величини параметрів $\alpha_{\text{сп}}$ та $\alpha_{\text{вих}}$ для матеріалів об'єктів досліджень у мазильних середовищах з найгіршими, проміжними та найкращими трибологічними властивостями наведені у табл. 2.

5. Для моделювання стаціонарних та нестаціонарних проц...

цесів враховували фізичний час t, c .

6. Як розміри параметри моделювання визначена сума рва об'ємна швидкість зношування рухомого та нерухомого елементів ларя тертя $i_v, m^3/c$ та сила тертя F_{TP}, N .

Таблиця 2

Величини параметрів $\alpha_{np}(\max)$ та $\alpha_{виз}(\min)$ матеріалів об'єктів дослідження у деяких мастильних середовищах, ДБ/

Матеріал	$\alpha_{виз}$	α_{np} у мастильних середовищах		
		"TC-1"	"АМГ-10"	"ВНИИ НП 403"
трибоелементу				
АЛ 26 (80НВ)	2417	2450	2489	2556
ст. 40X(52HRC)	2644	2744	2900	3222
ШХ15(62HRC)	2700	2804	2894	3200
СЧ15(ферит)	3178	3461	3587	3890
СЧ15(перліт)	3317	3561	3668	4000
Вр. АБ 9-4	3222	3445	3611	4445
ст. 20X(30HRC)	1945	2080	2370	2644

Методом аналізу розмірностей на підставі другої теореми теорії подібності та моделювання (π -теореми) були отримані такі критерії подібності:

-критерій часу

$$\pi_t = \frac{t \cdot N^{2/3} \cdot v^{2/3} \cdot \alpha_{виз}^{7/3}}{A_n^{1/3} \cdot Q^{1/3} \cdot R_o^{2/3}}; \quad (1)$$

-критерій швидкості зношування

$$\pi_i = \frac{i_v \cdot A_n^{1/3} \cdot Q^{1/3} \cdot R_o^{2/3} \cdot \alpha_{виз}^{2/3}}{N^{2/3} \cdot v^{2/3}}; \quad (2)$$

-критерій сили тертя

$$\pi_F = \frac{F_{TP} \cdot R_o^{1/3} \cdot \alpha_{виз}^{1/3}}{N^{1/3} \cdot v^{1/3} \cdot A_n^{1/3} \cdot Q^{1/3}}; \quad (3)$$

Теоретична перевірка правильності отримання критеріїв подібності, у тому числі, шляхом їх співставлення з відомою методикою моделювання процесів межового тертя, що розроблена Ю.А.Євдокимовим, дала позитивні результати.

Забезпечуючи рівність визначальних критеріїв у моделі та природи, на підставі першої теореми подібності теорії подібності та моделювання можна, дорівняв отримані критерії, здобути співвідношення для визначення триботехнічних характеристик натурального спряження за даними випробування його моделі:

- для розрахунку швидкості зношування природи $v_{\text{н}}$ за відомими даними моделі $v_{\text{м}}$

$$v_{\text{н}} = v_{\text{м}} \left(\frac{N_{\text{н}}}{N_{\text{м}}} \right)^{2/3} \left(\frac{v_{\text{н}}}{v_{\text{м}}} \right)^{2/3} \left(\frac{K_{\text{зм}}}{K_{\text{змн}}} \right)^{2/3} \left(\frac{\alpha_{\text{втм}}}{\alpha_{\text{втн}}} \right)^{2/3} \left(\frac{A_{\text{пм}}}{A_{\text{пн}}} \right)^{1/3} \left(\frac{Q_{\text{м}}}{Q_{\text{н}}} \right)^{1/3}; \quad (4)$$

- для розрахунку сили тертя на натурному трибоспряженні $F_{\text{трн}}$ за відомими даними моделі $F_{\text{трм}}$

$$F_{\text{трн}} = F_{\text{трм}} \left(\frac{N_{\text{н}}}{N_{\text{м}}} \right)^{1/3} \left(\frac{v_{\text{н}}}{v_{\text{м}}} \right)^{1/3} \left(\frac{K_{\text{зм}}}{K_{\text{змн}}} \right)^{1/3} \left(\frac{\alpha_{\text{втм}}}{\alpha_{\text{втн}}} \right)^{1/3} \left(\frac{A_{\text{пн}}}{A_{\text{пм}}} \right)^{1/3} \left(\frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{м}}} \right)^{1/3}; \quad (5)$$

- для розрахунку часу коли на натурному трибоспряженні буде досягнуто величину зносу, що дорівнює зносу отриманому на моделі, під час модельних випробувань

$$t_{\text{н}} = t_{\text{м}} \left(\frac{N_{\text{м}}}{N_{\text{н}}} \right)^{2/3} \left(\frac{v_{\text{м}}}{v_{\text{н}}} \right)^{2/3} \left(\frac{K_{\text{змн}}}{K_{\text{зм}}} \right)^{2/3} \left(\frac{\alpha_{\text{втн}}}{\alpha_{\text{втм}}} \right)^{7/3} \left(\frac{A_{\text{пн}}}{A_{\text{пм}}} \right)^{1/3} \left(\frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{м}}} \right)^{1/3}; \quad (6)$$

де: індекси "н" та "м" відповідають значенням параметрів моделі та природи відповідно.

На підставі співвідношень (4)-(6) у дисертаційній роботі запропонована методика фізичного моделювання процесів межового тертя. Методика дозволяє визначати трибологічні характеристики натурних трибосистем на їх моделях не тільки при зміні геометричного масштабу спряження, а й при зміні умов навантаження, кінематичної схеми вузла тертя, матеріалів трибоелементів, мастильного середовища.

Проведена експериментальна перевірка працездатності запропонованої методики фізичного моделювання. Перевірку проведено, для матеріалів та об'єктів досліджень наведених у другому розділі, за параметрами які характеризують масштабний фактор (кінематичну схему) спряження, навантаження та швидкість ковзання, трибологічні властивості мастильного середовища, властивості спряжених матеріалів та при комбінації

цих факторів. Аналіз результатів перевірки свідчить про здобуття достатньої точності, що прийнята для трибологічних випробувань. Найменша похибка, не більше 15%, досягається при моделюванні за параметром, який відбивав умови навантаження, спряження, найбільшу, але у всяк випадок не більше 40%, отримуємо, коли моделювання проводиться при комбінації варіюваних факторів.

Отримані результати дозволяють зробити висновок щодо можливості використання розробленої методики на етапі проектування вузлів тертя машин, що працюють в умовах межового змащування, з метою визначення показників тертя та зносу за результатами лабораторних випробувань і за даними експлуатації машин-прототипів. Методика дозволяє широко користатися трибологічними базами даних інформації яких можливо використовувати як дані моделі.

У четвертому розділі розроблена методика математичного моделювання стаціонарних процесів тертя та зношування в умовах межового змащування.

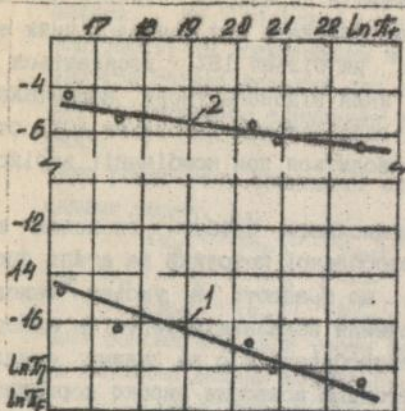
Основою методики складають математичні співвідношення для визначення показників швидкості зношування, сили тертя та ресурсу трибоспрямлення. Виведення співвідношень проводилося на підставі використання критеріїв подібності, що були отримані у третьому розділі.

Теорія подібності та моделювання дозволяє підійти до задачі визначення зв'язку між вхідними та вихідними параметрами трибосистеми з позиції критеріального планування експерименту, коли факторами є критерії подібності.

Під час отримання математичної моделі триботехнічних процесів межового тертя як визначальний фактор використовувався критерій часу, як функції відгуку критерій швидкості змащування та критерій сили тертя.

На підставі аналізу можливого діапазону зміни критерія часу за даними лабораторних випробувань та реальних вузлів тертя був сформований факторний критеріальний простір, та експериментальним шляхом визначені величини критеріїв швидкості зношування та сили тертя у точках факторного простору.

Отримані результати зручно для розгляду нагадати у декартових координатах (мал.1). Регресійний аналіз цих даних показує, що критеріальні залежності швидкості зношування та



Мал.1. Залежності критеріїв швидкості об'ємного зношування (1) та сили тертя (2) від критерію часу ресурсу:

сили тертя від визначального фактора з достатньою мірою адекватності можна подати у вигляді:
 $\ln p_t = -6,9 - 0,468 \cdot \ln p_r$, (7)
 $\ln p_r = 0,198 - 0,287 \cdot \ln p_t$. (8)
 пропонується ввести рівняння (7), (8) та підставив замість критеріїв їх формули мул. (1)-(3), провівши необхідні перетворення, отримуємо вирази для визначення ресурсу (9) а також співвідношення для показників швидкості зношування (10) та сили тертя (11) протягом цього ресурсу:

$$t = 732691,5 \cdot (\Delta \cdot A_a \min)^{1,96} \alpha_{вт}^{3,53} (N \cdot v / K_{\Phi})^{-0,67} (A_p \cdot Q)^{0,33}; \quad (9)$$

$$l_v = 1,36 \cdot 10^{-6} (\Delta \cdot A_a \min)^{-0,96} \alpha_{вт}^{-3,53} (N \cdot v / K_{\Phi})^{0,67} (A_p \cdot Q)^{-0,33}; \quad (10)$$

$$F_{тр} = 0,025 \cdot (\Delta \cdot A_a \min)^{-0,56} (N \cdot v / K_{\Phi})^{0,33} \alpha_{вт}^{-2,01} (A_p \cdot Q)^{0,33}, \quad (11)$$

де: Δ - гранично допустимий знос; $A_a \min$ - менша площа одного з елементів пари тертя; t - ресурс спраження.

Ці залежності були покладені в основу викладеної у дисертаційній роботі методики математичного моделювання показників тертя та зносу на стаціонарному режимі та дозволили оцінити міру впливу вхідних параметрів на триботехнічні характеристики спраження.

По параметру питомої роботи зруйнування за допомогою залежностей швидкості зношування (10) та сили тертя (11) можлива оптимізація конструкторських рішень та визначення величини параметрів щодо недопустимих в експлуатації видів зношування.

Працездатність залежностей швидкості зношування (10) та сили тертя (11) була перевірена експериментально в оцінюваннях максимальної помилки моделювання, яка при моделюванні по параметру навантаження трибоспраження не перевищувала 15%, швидкості ковзання - 20%, трибологічних властивостей мастиль-

ного середовища - 40%, властивостей структури спряжених матеріалів - 45%, масштабного фактора спряження - 25%.

Аналіз результатів перевірки показав, що отримані розрахункові залежності мають характер експериментальних при задовільній точності моделювання (15-45%). Це надає можливість використання отриманих математичних залежностей, щодо оцінювання величин швидкості зношування, сили тертя та ресурсу на етапі проектування трибоспряження, скорочуючи лабораторні та стендові випробування.

У п'ятому розділі дисертації розроблена методика математичного моделювання нестационарних процесів тертя та зношування в умовах межового змащування.

Основою методики складають критеріальні диференціальні рівняння швидкості зношування та сили тертя, які були отримані в використанні правил теорії автоматичного регулювання та теорії ідентифікації динамічних об'єктів.

Визначальним фактором, як і в попередньому розділі, використовували критерій часу, а вихідними параметрами швидкість зношування та силу тертя.

Створення математичної моделі нестационарних процесів складається з двох етапів: структурної та параметричної ідентифікації. Метою структурної ідентифікації є одержання інформації щодо виду диференціальних рівнянь процесу.

З аналізу реакції трибосистеми на вхідний пробний вплив, урахувавши фізику явища, були побудовані структурно-динамічні схеми перехідних процесів (мал.2).

Схеми дозволяють отримати передаточні функції:

- для швидкості зношування

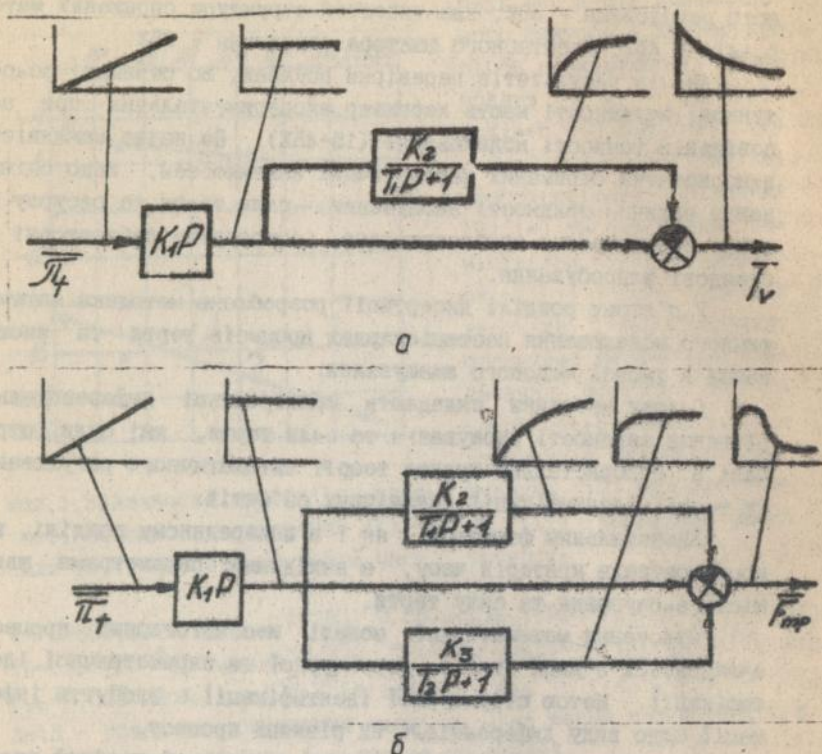
$$W_1(P) = K_1 P \cdot [1 - K_2 / (T_1 P + 1)];$$

- для сили тертя

$$W_F(P) = K_1 P \cdot [1 - K_2 / (T_1 P + 1) + K_3 / (T_2 P + 1)],$$

де: $W_1(P)$, $W_F(P)$ - відношення зображень Лапласа функції вихідного параметра, швидкості зношування та сили тертя відповідно, до зображення Лапласа вхідного параметру, - критерію часу; P - оператор диференціювання; K_1 та T_1 - динамічні параметри, коефіцієнти підсилення та сталі часу відповідно.

На підставі передаточних функцій можна записати диференціальні рівняння:



Мал.2 Структурно-динамічні схеми моделювання нестационарних процесів для швидкості об'ємного зношування (а) та сили тертя (б)

- для швидкості зношування

$$\dot{a}_1 v + v - b_1 \dot{\pi} + b_2 \ddot{\pi}; \quad (12)$$

- для сили тертя

$$a_2 \ddot{F}_{TP} + a_1 \dot{F}_{TP} + F_{TP} - b_3 \ddot{\pi} + b_2 \dot{\pi} + b_1 \pi; \quad (13)$$

де: a, b - коефіцієнти, лінією зверху позначені відносні відхилення параметрів.

Наступним етапом досліджень є параметрична ідентифікація, яка містить пошук коефіцієнтів K та сталих часу T диференціальних рівнянь. Розрахункові формули та порядок їх вдобуття наведені у тексті дисертації.

Аналіз диференціальних рівнянь, показує, що згідно критерію стійкості трибосистема буде стійкою за параметрами швидкості зношування та сили тертя за умови позитивних величин сталих часу. Фізичної суті негативні значення T , певно не мають, а трибосистема така функціонує у режимі нормального окислювального зношування природньо стійка. Таким чином, під час аналізу роботи трибосистеми мова повинна йти не про її стійкість, а про запас усталеної роботи. Існує граничний рівень вхідного параметру, при досягненні якого трибосистема змозе перейти до недопустимих видів зношування. Величину цього рівня можливо визначити експериментально, або розрахунковим шляхом.

Чаявність коеф. ієнтів поряд з похідними вищих степеней у правих частинах диференціальних рівнянь дозволяє видати рекомендації щодо ефективних режимів припрацьовування, які повинні бути із змінним впливом на трибосистему. До таких режимів можна віднести припрацьовування зі збільшенням навантаження або з навантажуванням на межі заїдання.

Є запропонована у дисертаційній роботі методика математичного моделювання нестационарних процесів, що розроблена на основі диференціальних рівнянь (12) та (13), дозволяє оцінити запас усталеної роботи трибосистеми та вилати рекомендації про доцільні режими припрацьовування, а також визначати триботехнічні характеристики спряжень на нестационарних режимах.

Проведена перевірка працездатності розробленої методики моделювання нестационарних процесів для конкретного трибоспряження. Похибка моделювання не перевищала 15%.

Б. ЛЮВКИ ПО РОБОТІ.

1. В результаті аналізу літератури, присвяченої моделюванню трибологічних процесів, показано, що факторами, які умовляють протікання процесів при межовому змашуванні є умови навантаження пари тертя, масштабний фактор, властивості структур: спряжених матеріалів, витрати та якість мастила.

2. На підставі використання другої теорії подібності та моделювання методом аналізу розмірностей отримані критерії подібності процесів тертя та зношування при межовому змашуванні. На основі отриманих критеріїв запропонована методика фізичного моделювання межового тертя. Результати експериментальної перевірки працездатності якої довели, що методика

дозволяє визначати триботехнічні характеристики натурального спряження за даними випробування його моделі не тільки при зміні геометричних розмірів, а й кінематичної схеми, умов навантаження, властивостей мастила та конструкційних матеріалів елементів трибоспряження.

3. На підставі використання теорії подібності та моделювання, критеріального планування експерименту отримані залежності критерія швидкості зношування та критерія сили тертя від критерію часу. Аналіз отриманих залежностей показав, що на зміну ш. дкості зношування в першу чергу впливають властивості структури спряжених матеріалів та їх сумісність, в меншій мірі - геометричні розміри вузла тертя, навантаження та швидкість ковзання, та найменший вплив чинять якість мастила та їх витрати крізь вузол тертя. На зміну сили тертя в першу чергу впливають релаксаційні властивості спряжених матеріалів та їх сумісність, потім у значно меншій та майже однаковій мірі, решта розглянутих факторів.

4. Наведена експериментальна перевірка отриманих залежностей для моделювання швидкості зношування та сили тертя. Результати перевірки показали, що розрахункові залежності мають характер експериментальних при задовільній точності. Це надає можливість використання отриманих математичних залежностей щодо оцінювання величин швидкості зношування та сили тертя на етапі проектування, скорочуючи обсяг лабораторних та стендових випробувань.

5. Розроблена методика математичного моделювання стаціонарних процесів тертя в умовах межового змащування, яка дозволяє досліджувати триботехнічні характеристики різних трибосистем з оптимізацією конструкційних рішень та визначати межі параметрів, при досягненні яких трибологічні процеси можуть вийти за межу допустимих у експлуатації.

6. Проведена структурна ідентифікація трибосистеми, що працює в умовах межового змащування. Побудовані структурно-динамічні схеми та отримані диференціальні рівняння процесів тертя та зношування. Проведено аналіз структурно-динамічних схем та динамічних коефіцієнтів за їх впливом на перехідні процеси. Отримані диференціальні рівняння дозволяють реалізувати усі можливі види перехідних характеристик швидкості зношування та сили тертя.

7. У результаті проведеної параметричної ідентифікації трибосистеми запропоновані співвідношення щодо визначення коефіцієнтів диференціальних рівнянь. Розв'язування рівнянь надає можливість визначення характеру поведінки та величин швидкості зношування та сили тертя за часом.

8. Проведено аналіз стійкості трибосистеми за показниками швидкості зношування та сили тертя. Показано, що трибосистема яка функціонує в області нормального еквівалентного зношування природньо стійка. Надані рекомендації щодо доцільних режимів припрацювання, які повинні оптимізувати при змінному впливі на трибосистему.

9. На підставі отриманих диференціальних рівнянь розроблена методика математичного моделювання нестационарних процесів в умовах межового тертя. Методика дозволяє призначати оптимальні режими припрацювання та оцінювати запас стійкої роботи трибоспряження, а також визначати триботехнічні характеристики у будь-який час.

10. Використання отриманих результатів дозволить:

- на етапі проектування забезпечити відповідність створюваної конструкції вимогам до чей;
- виключити вольовий підхід до призначення геометричних розмірів, матеріалів, робочих середовищ у конструкцію;
- скоротити час на проектно-конструкторські роботи, випробування дослідних зразків та пов'язані з цим зміни у технічній документації, у тому числі робочих та складальних кресленнях;
- у галузях виробництва та експлуатації скоротити обсяг опрацювання доведень;
- зменшити працездатність слюсарно-складальних робіт;
- підвищити надійність за рахунок зменшення числа параметричних відказів.

Основний зміст дисертації наведено у таких роботах:

1. Войтов В. А., Суханов М. І., Ісаков Д. І. Шляхи оптимального проектування вузлів тертя гідромашин. - Теми звітів республіканської науково-технічної конференції "Сучасні матеріали, обладнання, технології зміщення та відновлення деталей машин". - Новополюцьк, 1993, с. 38-39, рос. мовою.
2. Войтов В. А., Суханов М. І., Ісаков Д. І. Дослідження про

стимальне проектування вузлів тертя машин. - Тези звітів республіканської наукової конференції з трибології. "Тертя, зношування, втомленість". -Гомель, 1993. с.24-25, рос. мовою.

3. Войтов В. А., Суханов М. І., Ісаков Д. І., Давидовський В. І. Облік масштабного фактору при випробуваннях на тертя та зношування. Додаток наукових праць Харківського ВВАІУ. -Харків, 1994. с.25-30, рос. мовою.

4. Войтов В. А., Ісаков Д. І., Суханов М. І., Давидовський В. І. Методика фізичного моделювання межового тертя у трибосистемах. Додаток наукових праць Харківського ВВАІУ. -Харків, 1994. с.31-36, рос. мовою.

5. Войтов В. А., Суханов М. І., Ісаков Д. І., Давидовський В. І. Зносостійкість прямих та зворотніх пар тертя та конструктивні засоби підвищення зносостійкості. Додаток наукових праць Харківського ВВАІУ. -Харків, 1994. с.37-42, рос. мовою.

6. Войтов В. А., Суханов М. І., Ісаков Д. І., Давидовський В. І. Про взаємозв'язок зносостійкості з реологічними параметрами трибосистеми. Додаток наукових праць Харківського ВВАІУ. -Харків, 1994. с.43-48, рос. мовою.

7. Шевеля В. В., Войтов В. А., Суханов М. І., Ісаков Д. І. Закономірності зміни внутрішнього тертя у процесі роботи трибосистеми та його облік при виборі сумісних матеріалів. -Трение и износ, 1995, т.16, N4, рос. мовою.

Л. С. С.

АННОТАЦІЯ

Исаков Д.И. Применение моделирования процессов трения и изнашивания в условиях граничной смазки на этапе проектирования гидромашин.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.04.13 - Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты, НИИгидропривод, Харьков, 1996.

Защищается диссертация в виде рукописи, которая содержит теоретические и экспериментальные исследования, посвященные разработке расчетно-экспериментальных методов определения параметров трения и изнашивания при граничной смазке.

Получены критерии подобия исследуемого явления, установлена степень влияния входных воздействий на трение и изнашивание, получены критериальные дифференциальные уравнения процессов.

Осуществлено внедрение разработанных методик физического и математического моделирования в научно-исследовательской и проектно-конструкторской организации.

Ключові слова: Межове змащування, моделювання, критерій подібності, диференціальні рівняння.

ABSTRACT

Isakov D.I. Application modelling of friction and wear processes under the conditions of boundary lubrication in design of hydraulic machines.

The dissertation on scientific degreeachelor of technical sciences with specialization 05.04.13 - Hydraulic machines and hydraupneumatic units, NIIGidropriwod, Kharkov, 1996.

Thesis is defended in the form of a manuscript, which contains theoretical and experimental research for calculation-experimental methods of the definition of friction and wear characteristics under the conditions of boundary lubrication.

Criteria of similarity for friction and wear processes were defined. We have analyzed the conduct of tribological system under the alterations of external factors. The criterion differential equations of friction and wear processes have been built.

The method of physical and mathematical modelling have been used in research and undertaking enterprises.

Keywords: boundary lubrication, modelling, criteria of similarity, differential equations.

Исаков Д.И. Використання моделювання процесів тертя та зношування в умовах межового змащування на етапі проектування гідромашин // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. - Харків, 1996. - 17 с. Стефанюк

АН України

AB 35.261