



## ВІДГУК

офіційного опонента кандидата технічних наук, доцента Кубіча Вадима Івановича на дисертаційну роботу Бекірова Аблятіфа Шевкетовича «Моделювання перехідних процесів в трибосистемах машин та обґрунтування ефективної програми їх припрацювання», поданої до захисту у спеціалізовану вчену раду К 64.832.03 Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

### **Актуальність теми дисертації**

Подальше розкриття багатofакторності впливу на механізми структуроутворення в приповерхневих шарах трибологічних систем матеріалів об'єктів машинобудування для забезпечення їх високої готовності до прийняття повних діапазонів швидкісних та силових навантажень представляється однією із актуальних задач, що вирішується в трибології. Зменшення розрахункового ресурсу проєктованих механізмів та агрегатів машин до досягнення ними граничного стану може відбуватися у відповідності з досить широким колом поважних причин. До них слід віднести такі як: еволюційні обмеженості врахування вхідних даних по критеріям оцінки протікання супутніх процесів в приповерхневих шарах матеріалів елементів вищих та нижчих кінематичних пар, об'єктивність та точність оцінки зворотного зв'язку між параметрами навантаження та характеристиками тертя та зношування при модельованому відтворенні контактної взаємодії в парах тертя, особливості технологічних режимів обкатки машин у цілому, під час яких здійснюється припрацювання у трибологічних системах, що входять до їх складу. Передумови, які склалися у теперішній час серед напрямів розвитку трибологічних аспектів підвищення надійності об'єктів машинобудування та отримані наукові результати обумовлюють наступне. По-перше, можливість їх більш повного та комплексного міждисциплінарного поєднання для отримання нових відомостей. По-друге, необхідність проведення досліджень з подальшого вдосконалення математичних моделей узагальненого опису нестационарних процесів в парах тертя та їх окремих функціоналів, отримання найбільш точних даних по поточним параметрам тертя та зношування в натурних та модельованих трибологічних системах з використанням сучасних динамічних методів їх аналізу.

Виходячи з вищевикладеного, вважаю, що тема даної дисертаційної роботи є актуальною.

Актуальність дисертаційної роботи підтверджується її зв'язком з тематикою науково-дослідних робіт навчально-наукового інституту технічного сервісу ХНТУСГ ім. П.Василенка, пріоритетними напрямками інноваційної діяльності в Україні та подальшими перспективами розвитку отриманих

результатів в галузі управління процесами, які мають місце в трибологічних системах машин.

### **Ступінь обґрунтування наукових положень, висновків і рекомендацій**

Наведені в дисертації наукові узагальнення та висновки з теоретичного та експериментального підтвердження інформативності критеріїв перехідних процесів базуються на ретельному аналізі багатьох теоретичних і експериментальних досліджень, виконаних іншими авторами, та були досягнуті автором коректною постановкою завдань.

Побудування автором структурно-динамічних схем моделювання перехідного процесу швидкості зношування, коефіцієнта тертя з урахуванням передавальних функцій у вигляді співвідношень коефіцієнтів підсилення, постійних часу, які в свою чергу визначаються окремими параметрами трибосистем та отримання графічних закономірностей їх змін від часу триботехнічних випробувань виконано методологічно правильно, спираючись на методи системного аналізу, методи теорії ідентифікації динамічних об'єктів, аналізу розмірностей для отримання критеріїв подібності, випробувань на зносостійкість, обробки й аналізу експериментальних даних за допомогою методів математичної статистики.

Висновки за розділами певною мірою відображають отримані результати та узгоджуються із висновками по роботі, містять наукову новизну, розкривають сутність вирішення поставлених в роботі задач.

В цілому, обґрунтованість сформульованих теоретичних положень, висновків і рекомендацій не викликає сумнівів. Виконана дисертаційна робота надає наукове обґрунтування критеріям оцінки перехідних процесів при припрацюванні трибосистем у новому їх вигляді, що обумовлює подальше вдосконалення керованого впливу на їх стан.

### **Наукова новизна матеріалів дисертації**

Основою частину дисертаційної роботи автор присвятив подальшому дослідженню причинно-наслідкових зв'язків між складовими структурної та параметричної ідентифікації моделі перехідних процесів в трибосистемах, встановленню характеру їх прояву при теоретичному та експериментальному відтворенні тертя ковзання та зношування.

В роботі, на основі побудування та рішення диференціальних рівнянь другого порядку отримано математичні моделі для швидкості зношування і коефіцієнта тертя, які враховують коефіцієнти підсилення, постійні часу, декременти загасання їх коливань у представленому автором вигляді при протіканні перехідного процесу та вихід на стаціонарний процес в трибосистемах. Отримано залежності зміни часу припрацювання трибосистем від коефіцієнта їх форми, навантаження, шорсткості поверхонь, трибологічних властивостей мастильного матеріала середовища їх взаємодії, реологічних

властивостей структури сполучених матеріалів. Отримало подальший розвиток у математичному виразі та сенсі тлумачення визначення добротності трибосистеми за рахонку введення коефіцієнту форми. На підставі скорегованих критеріїв чутливості до зовнішніх впливів, припрацювання, інерційності, стаціонарності визначено їх рейтинг впливу на припрацювання та обґрунтовано шляхи вибору їх раціональних значень. Обґрунтовано та підтверджено зворотньо пропорційне змінювання швидкості ковзання та навантаження при застосуванні їх у ступінчастій програмі припрацювання трибосистем.

### **Практична значимість матеріалів дисертації**

Практична значимість отриманих результатів полягає в розробці програми припрацювання трибосистем, яка передбачає два режими параметрів силового та швидкісного навантаження, ефективність якої підтверджується стендовими випробуваннями і обумовлює зменшення часу припрацювання в 2,66 разів при однаковому лінійному зносі.

Практична спрямованість роботи підтверджується наявністю актів впровадження її наукових результатів, по-перше, для використання на етапі проектування та обкатки гідромашин у Державному підприємстві «Харківське агрегатне конструкторське бюро», по-друге, для використання основних положень у навчальному процесі Харківського національного університету сільського господарства ім. П. Василенка, що є доцільним для розширення знань та уявлень студентів, магістрантів, аспірантів про можливості керування процесом припрацювання трибосистем у машинах.

### **Достовірність матеріалів дисертації**

Достовірність матеріалів дисертаційного дослідження, наукових положень, висновків і практичних рекомендацій підтверджені наступним.

Розв'язання поставлених в роботі задач спирається на відомі закономірності зміни характеристик тертя та зношування в трибосистемах машин під час припрацювання та після нього, а також фреймів акустичної емісії для визначення потужності акустико-емісійного випромінювання в зоні тертя. При цьому, аналіз амплітуд імпульсів АЕ здійснювався за загальноприйнятою дисперсією, однорідністю і відтворюваністю їх значень при досить великому рівні значущості 0,95, і підтвердив можливість виміряти його потужність під час експерименту.

Експериментальні дослідження щодо визначення швидкості зношування, коефіцієнта тертя виконувались в лабораторних умовах на стаціонарній машині тертя промислового виробництва УМТ-1 у відповідності з класичними методиками, а їх результати не викликають сумнівів.

Розрахункові та експериментальні значення параметрів припрацювання перевірялись та оцінювались за загальноприйнятою похибкою фізичного моделювання, яка знаходилась у допустимих межах.

### **Оцінка змісту дисертації ті її завершеності**

У першому розділі «Огляд літератури за темою та вибір напряму досліджень» автор шукає та показує можливі причинно-наслідкові зв'язки між такими науковими категоріями як: «сумісність матеріалів» - «структура трибосистеми» - «структурно-енергетична пристосованість» на підставі оцінки розвитку принципів нерівноважної термодинаміки і теорії самоорганізації в трибології. При цьому він показує необхідність прийняття до уваги та узагальнення в категорії «перехідні процеси» такі відокремлені процеси як: процеси перебудови структури; процеси з негативним виробництвом ентропії; самоорганізаційні процеси адаптації; механічні процеси; процеси руйнування фрикційних зв'язків тощо. Тим самим дослідник в аналізі стану питань за напрямком обраного дослідження показує підґрунтя для розкриття і оцінки процесу припрацювання. При цьому цей процес розглядається як деяка сукупність прояву перехідних процесів у трибологічній системі від її початкового стану до сталого, стаціонарного стану. Автор обґрунтовує необхідність введення у апарат моделювання перехідних процесів величини, які є характеристикою внутрішнього тертя в матеріалах та здатності їх адаптуватися до зовнішніх впливів. Певний акцент автор ставить на аналізі існуючих режимів припрацювання за параметрами навантажень та відгуку на механічному стані поверхонь – переходи від напружено-деформованого стану в пружно-пластичний. При цьому показується необхідність розробки більш поширених, об'єктивних критеріїв оцінки припрацювання, ніж існуючі на цей час: час, знос, коефіцієнт тертя, експлуатаційне навантаження, температура. Разом з цим автором підкреслюється, що для оцінки перехідних процесів сучасними дослідниками вже визначено і обґрунтовано специфічні критерії їх оцінки і їх можна використовувати для всебічної оцінки процесів, які супроводжують припрацювання поверхонь тертя. Виконуючі аналіз застосування акустичної емісії при дослідженні процесів тертя і зношування дисертантом наводяться передумови для використання спектрального аналізу сигналів АЕ, як ефективнішого та єдино можливого метода виміру та оцінки зносу. Хоча, це питання спірне.

На підставі розглянутих відомостей, даних, проміжних власних суджень, автором були сформульовані мета, задачі дослідження, які дозволили отримати адекватні результати.

У другому розділі «Методика проведення досліджень» автором наведено структуру методики досліджень, яка складається з трьох частин. При цьому він обирає вхідні параметри впливу на трибологічний стан поверхонь тертя у модельному трибоз'єднанні «кільце, що обертається – нерухоме кільце», та визначається з характеристиками для оцінки характеру протікання несталих та сталого (перехідного, стаціонарного) процесів у контакті матеріалів трибосистем. Автор визначається з необхідним на його думку складом матеріалів, з яких виготовлені досліджувані зразки, з мастильним середовищем їх взаємодії та їх фізико-механічними, реологічними характеристиками. Це

метали: бронза БрАЖ 9-4, сірий чавун СЧМ, сталь 40Х, оливи: МГП-10, М-10Г2к, ESSO ULTRON SL/CF. Для проведення триботехнічних випробувань автором обрана машина тертя УМТ-1. Автор обґрунтовує можливість оцінки окремих процесів на проміжних відрізках часу нестационарного процесу за рахунок змін інтервалу інтегрування фреймів сигналів акустичної емісії (АЕ). Це покладено автором в методику визначення амплітуди імпульсів для розрахунку потужності акустико-емісійного випромінювання із зон тертя під час випробувань. При цьому автором показано, що по сигналу АЕ можливо визначати величини швидкості зношування трибосистеми на перехідних процесах, тобто при її припрацюванні. Для цього він запропонував та провів попередні триботехнічні випробування тільки для стаціонарного режиму роботи, відокремив його від припрацювання. Для статистичної оцінки даних експериментальних досліджень автором обрані: критерій Кохрена (однорідність результатів), критерій Стюдента (значимість результатів), критерій Фішера (адекватність результатів). Автором наведено обраний план багатofакторного експерименту Бокса-Бенкина, до якого входять три фактора з п'ятьма рівнями.

В цілому сукупність наведеної інформації розкриває особливості методичного забезпечення теоретичних й експериментальних досліджень автора наукової праці.

У третьому розділі «Математична модель перехідних процесів в трибосистемах в умовах граничного навантаження» наведені результати теоретично-експериментальних досліджень автора. Ці результати, по-перше, базувалися на математичній моделі роботи трибосистеми на стаціонарному режимі, запозиченої у інших авторів: швидкості зношування  $I_{cm} = f(E_y, \delta_p, \delta_n, W_{mp})$  і коефіцієнту тертя  $f = (W_{mp}, W)$ , по-друге, отримали подальший розвиток у вигляді використання математичних виразів сукупності передавальних функцій також інших авторів, а саме: функції, що враховує реакцію трибосистеми на вплив вхідного сигналу; функції, що враховує здатність трибосистеми до припрацювання. Такий підхід дозволив авторові отримати математичні вирази для описання динаміки перехідного процесу за вказаними характеристиками тертя та зношування у вигляді диференціальних рівнянь в натуральних змінних. При цьому, робота запозичених передавальних функцій пояснюється складеними структурно-динамічними схемами моделювання перехідного процесу як для швидкості зношування, так і для коефіцієнту тертя, що представляється собою як одне єдине. Отримало також подальший розвиток у математичному описі раніше розроблений іншими авторами показник добротності трибосистеми шляхом додавання в його склад коефіцієнта форми  $K_\phi$ , приведенного коефіцієнта температуропровідності  $a_{np}$ , приведена швидкість деформації в поверхневих шарах  $\dot{\epsilon}_{np}$ . Завдяки цьому значно поширився спектр врахування геометричних, температурних і деформаційних станів в контакті поверхонь тертя зразків-кілець. Отримана автором нова сукупність параметрів дозволила йому провести теоретичне і експериментальне моделювання процесів при варіюванні визначеними параметрами трибологічного стану

позначених матеріалів зразків-кілець и параметрами їх силового і швидкісного навантаження. На підставі цього автором отримано графічні закономірності для швидкості зношування, коефіцієнта тертя, часу припрацювання для досліджених систем матеріалів, за результатами експериментів визначена похибка моделювання (для  $I_{cm}$  і  $f$ ), коефіцієнту варіації (для часу припрацювання). При цьому автором оцінений вплив складових вдосконалених функціоналів нових диференційних рівнянь: коефіцієнтів підсилення, постійних часу, та побудований рейтинг факторів впливу на процес припрацювання.

В цілому сукупність наведеної інформації розкриває заявлені автором підходи щодо математичного опису динаміки перехідних процесів (припрацювання) у модельних трибосистемах.

У четвертому розділі «Критерії оцінки процесу припрацювання трибосистем в умовах граничного навантаження» автор продовжує розгляд параметрів ідентифікації динамічної моделі перехідних процесів, однак увага приділяється встановленню закономірностей їх зміни в залежності від складових, що входять до їх математичного виразу. При цьому дослідження спрямовані на детальну оцінку впливу кожної із геометричних, фізико-механічних, реологічних характеристик матеріалів трибосистеми та режимів швидкісного та силового навантаження. Процедура досліджень підпорядкована одній логічній схемі: побудування графіків за розрахунками у відповідності з попередньо визначеними діапазонами фізичних величин → встановлення рейтингу впливу → отримання експериментальних значень → визначення відносної похибки → формулювання фізичної суті критерію та порядку його застосування. Проведені дослідження дали авторові можливість дати нове тлумачення наступним критеріям оцінки модельних трибосистем: добротності, чутливості, припрацювання, інерційності, стаціонарності. Крім того, виявлені автором протиріччя між окремими поточними результатами та попередньо сформульованими висновками стали підґрунтям для застосування різних програм припрацювання, що обумовило подальший розвиток досліджень викладених у п'ятому розділі наукової праці. Протиріччя торкаються впливу швидкості ковзання на значення критерію інерційності зміні шорсткості (швидкість необхідно збільшувати), критерію чутливості до вхідних впливів і припрацювання (швидкість необхідно зменшувати).

Розділ за наведеною інформацією представляється змістовним і завершеним.

П'ятий розділ «Розробка програми припрацювання трибосистем. Експериментальна перевірка програми припрацювання» присвячений розкриттю особливостей прояву впливу значень силового та швидкісного навантаження на швидкість зношування і коефіцієнта тертя у модельних трибосистемах матеріалів «40Х – Бр.АЖ 9-4», «40Х – 40Х» на визначених режимах. Це дозволило побудувати перехідні характеристики процесу припрацювання та обґрунтувати програму припрацювання, яка забезпечує

виконання умов:  $U_i \rightarrow \min$ ,  $t_{\text{прі}} \rightarrow \min$ . Автор розвинув раніше відомий, дуже простий підхід до активування стану поверхневих шарів при їх контактній взаємодії, при якому підводиться енергія на рівні активації 90% заїдання та зворотно пропорційно змінюються швидкість зношування та швидкість ковзання. За результатами проведених експериментів автором виконана оцінка похибки відносно розрахунків, яка підтверджує їх збіг. Значимість та доцільність встановлених режимів програми припрацювання автором перевірена на прикладі розробки програми обкатки шестеренних насосів НШ-10. При цьому ним встановлено, що розроблене має практичний вихід. Також слід відмітити сміливість автора наукової праці, який на початку цього розділу формулює нове тлумачення наукової категорії «припрацювання», яке більш ширше та глибше за сутністю і відрізняється від ДСТУ 2823-94 року.

Розділ за наведеною інформацією представляється змістовним і завершеним.

В цілому наукова праця виглядає цілісною та логічно зв'язаною по змісту.

### **Характеристика дисертації в цілому**

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, який містить 178 найменувань на 20 сторінках і 3 додатків на 16 сторінках. Загальний об'єм дисертації складає 205 сторінок комп'ютерного набору, у тому числі 55 рисунків і 12 таблиць. Основний текст праці викладено на 151 сторінках.

Назва дисертаційної роботи відображає її зміст. Тематика та зміст дисертації відповідає паспорту спеціальності 05.02.04 – тертя та зношування в машинах і відображає логічну послідовність вирішення науково-технічного завдання.

За темою дисертації опубліковано 9 наукових праць, з них: 2 статті у закордонних періодичних виданнях, що входять до науко-метричної бази Scopus; 7 статей у фахових виданнях переліку МОН України; 3 тези доповідей і матеріалів на міжнародних науково-практичних конференціях.

Дисертація добре оформлена та багато ілюстрована, структура роботи логічна, підпорядкована меті і задачам, які сформульовані у вступі. Оформлення і структура дисертації та автореферату в цілому відповідають вимогам до оформлення дисертацій, які викладені в наказі МОУ №40 від 12.01.2017 року «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації». Однак відповідно до нього є наступні технічні зауваження.

1. У відповідності до п.7 у змісті та наприкінці основної частини повинна бути назва елемента дисертації «Висновки», але написано «Загальні висновки».

2. У відповідності до п.8 у вступі та у першому розділі при наведенні методів дослідження змістовно не зазначається, що саме досліджувалось кожним методом та не обґрунтовується їх вибір.

3. У відповідності до п.10 у висновках не наведено можливі напрями продовження досліджень за тематикою дисертації.

4. У відповідності з п.7 додатки не відносяться до основної частини дисертації, отже і їх таблиці не слід враховувати до кількості таблиць основної частини. Їх кількість в авторефераті наведено як 24, а потрібно вказувати 12.

Автореферат обсягом 1,9 ум. друк. арк. оформлено згідно сучасних вимог, основні положення викладено достатньо повно і співпадають зі змістом дисертації.

В цілому дисертаційна робота Бекірова Аблятіфа Шевкетовича заслуговує позитивної оцінки. Однак виникає ряд дискусійних питань та зауважень.

1. За текстом автором використано термін «перехідні процеси» для дослідження припрацювання, що є собою вже процес. На мій погляд, варто було б застосувати термін «несталі процеси». Більш того, автором ще використано термін «перехідний режим». Тобто має місце синонімальне застосування термінології при розгляді одного й того ж, або до «перехідних процесів» ще додаються й режими. Так з якою метою це необхідно розуміти і коли, оскільки на початку п.1.4 «Висновки до першого розділу...» зв'язок між «перехідними процесами» і «припрацюванням» прямо не простежується?

2. За замислом розгляду підрозділу 1.1 незрозуміло чому автор розпочинає з поняття «сумісності матеріалів», оскільки з погляду на визначення теми дослідження доцільності моделювання перехідних процесів – як таких при несумісності матеріалів не має.

3. У п.1.1 на с.22 автор робить проміжне висловлювання про те, що «...по суті, при розгляді сумісності вирішуються завдання оптимізації структури трибосистеми». Це ствердження суперечливе, оскільки мова повинна йти не про структуру трибосистеми, а про властивості її матеріалів, типи зв'язків на контакті, параметри молекулярної (адгезійної) складової тертя тощо. Тобто мова повинна йти про структуру поверхневих (приповерхневих) шарів.

4. На сторінці 55 автор наводить схему випробування «кільце-кільце». Це тільки одна схема. А як же бути з комплексним дослідженням з відтворенням різних конструкцій трибосистем і різного поєднання елементів, про що автор оговорює на с.51 у преамбулі розділу 2? Геометричні розміри зразків-кільця не наведено.

5. На сторінці 57 автор визначає, що на його думку «...найбільш прийнятним для вирішення поставлених завдань є метод штучних баз...». Але пояснення саме чому цей метод – автор не наводить. У зв'язку з чим не зрозуміло, чому саме цей метод, який складний, дуже місткий по обсягу робіт, якщо можливо було б просто виміряти втрати маси з точністю до четвертого знака? Також автор цей метод застосовує для визначення лінійної швидкості зношування, а за усіма результатами мова йде про об'ємну швидкість зношування.



6. На сторінці 63 (абзац знизу) наведені параметри навантаження  $N=800$  Н, швидкість ковзання 0,5 м/с. Не зрозуміло, що було підставою для обрання саме таких значень.

7. Не зрозуміло, як пояснити те, що на рис.3.9 для системи матеріалів 40Х-Бр.АЖ 9-4 швидкість зношування для  $E_y=3.6 \cdot 10^{14}$  Дж/с з часу випробувань  $t \approx 1400$  с має слабкий коливальний характер, в той же час на рисунку 3.7 для цієї ж системи й умов – сталий? При тому, що інші гілки графіка аналогічні.

8. На сторінці 100 (абзац знизу) наводяться результати моделювань при зміні коефіцієнта форми  $K_\phi$ . Однак за текстом не зрозуміло, яким чином забезпечувалась зміна параметрів за формулою 3.31, тобто яким чином змінювались площі тертя зразків-кілець, бо мова, з мого порозуміння йде про отримання даних для перевірки похибки?

9. Автор за текстом не звертає увагу на практичний збіг графіків коефіцієнтів тертя  $f_{cm}$  і  $f_{max}$ , що наведено на рисунку 4.4, та не надається цьому відповідна оцінка, хоча вона заслуговує уваги.

10. На с.123 автор наводить інформацію про «...припрацювання трибосистеми...» і що під цим розуміється, з посиланням на ДСТУ 2823 -94 і ГОСТ ISO 4378-1-2001. Вважаю, що по-перше, про це потрібно було б наводити ще у розділі 1, по-друге, у ГОСТ ISO 4378-1-2001 мова йде про термін «прирабатываемость (рос.)», а «припрацювання (укр.) – приработка (рос.)» і «припрацьовуваність (укр.) – прирабатываемость (рос.)» - це різні терміни.

11. За режимами обкатування насосів, с.157 абзац знизу, мова йде про рідинний тиск навантаження, який, як реакція гідростатично передається на спряжені поверхні, у тому числі і на робочі поверхні торців букс і шестерень. Наскільки і як це враховувалось за перерахунком на силовий параметр за отриманими диференційними рівняннями для швидкості зношування та коефіцієнту тертя?

### **Загальні висновки по дисертаційній роботі**

Здобувачем отримано нові науково обґрунтовані результати з використанням сучасного теоретичного й експериментального матеріалу, які дають змогу, керуючись попередньо встановленими математичними моделями отриманого виду для швидкості зношування, коефіцієнта тертя у трибосистемах матеріалів «40Х – Бр.АЖ 9-4», «40Х – 40Х», «40Х – СЧМ», визначати потрібні значення навантаження та швидкості ковзання на обґрунтованих за часом їх дії етапах припрацювання, що обумовлює скорочення загального часу обкатки машин, наприклад, шестеренних гідравлічних насосів, та економічний ефект.

Результати досліджень, висновки і рекомендації представляють цінність для науки «Трибологія», оскільки вони за своїм сенсом, виглядом та тлумаченням розширюють раніше встановлені іншими вченими – трибологами.

Недоліки, які відзначено в зауваженнях, не мають суттєвого впливу на якість виконаної роботи і скеровані на подальше її продовження з розширенням

