

**Р.Є. Костюнік, О.У. Стельмах, В.А. Радзівський, О.Г. Ковальчук, В.С. Бондар¹
С.П. Шимчук²**

¹Національний авіаційний університет

²Луцький національний технічний університет

НОВІ ПРИЛАДИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ГРАНИЧНИХ ШАРА ТРИБОСИСТЕМ

Розроблено і створено нові лабораторні методи і прилади для досліджень динамічних процесів у граничних шарах (ДПГШ).

Ключові слова: динамічні процеси, граничні шари, тертя, локальний тиск

**Р.Е. Костюник, А.У. Стельмах, В.А. Радзиевский, Е.Г. Ковальчук, В.С. Бондарь,
С.П. Шимчук**

НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ ТРИБОСИСТЕМ

Разработаны и созданы новые лабораторные методы и приборы для исследований динамических процессов в граничных слоях (ДПГС).

Ключевые слова: динамические процессы, граничные слои, трение, локальное давление

**R.E. Kostyunik, A.U. Stelmakh, V.A. Radzievsky, E.G. Kovalchuk, V.S. Bondar,
S.P. Shymchuk**

NEW DEVICES AND METHODS FOR STUDYING DYNAMIC PROCESSES IN BOUNDARY LAYERS OF TRIBOSYSTEM

New laboratory methods and instruments for studying dynamic processes in boundary layers (DPGS) have been developed and created.

Key words: dynamic processes, boundary layers, friction, local pressure

Постановка проблеми. Підвищення працездатності трибосистем з граничним тертям є одним з основних і актуальних напрямків сучасної трибології. Рішення проблем граничного тертя в значній мірі залежить від ефективності використовуваних методів дослідження граничних шарів. У граничних шарах трибосистем протікає комплекс взаємопов'язаних фізико-хімічних, фізико-механічних і гідродинамічних процесів, що надають домінуючий вплив на трибологічну поведінку контакту. Існуюча сучасна діагностика систем «тверде тіло – змащувальне середовище - тверде тіло» заснована, головним чином, на вивченні фізико-хімічних і фізико-механічних явищ на робочих поверхнях трибоконтакту з використанням традиційних матеріалознавчих методів аналізу їх складу та структури [1-3]. При цьому практично повністю ігнорується дослідження динамічних процесів у граничних шарах, що обумовлено існуючим традиційним адгезійно-деформаційним підходом до проблеми граничного тертя [4]. Разом з тим, останні дослідження граничних шарів [5,6] вказують на обмеженість такого підходу і на необхідність комплексного вивчення мікротечій у граничних шарах, термо- і кавітаційних ефектів в їх взаємозв'язку з адгезійно-деформаційними явищами на робочих поверхнях трибоконтакту, що вимагає використання нових методів і дослідницької апаратури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На переважній більшості існуючих приладів та машин тертя динамічні процеси у граничних шарів раніше не спостерігали, так як не було відомостей про них. Крім цього, всі модельні трибосистеми, як правило, складаються із непрозорих деталей, часто розташованих у непрозорих камерах, що не дозволяє проводити відеомоніторинг або візуально спостерігати динаміку течій деформованих граничних поверхневих шарів при їх відносному русі.

Деякі машини тертя, які дозволяють візуально спостерігати контакт [7,8], не застосовувались для дослідження динаміки вторинних течій граничних шарів у контакті через відсутність відомостей про них. Вони використовувались для визначення товщини змащувального шару в контакті непрямими оптичними, зокрема інтерференційними методами.

Таким чином, можна констатувати, що проведений аналіз існуючих лабораторних приладів тертя та методик досліджень гідродинамічних процесів у граничних шарах трибосистем показав

© Р.Є. Костюнік, О.У. Стельмах, В.А. Радзівський, О.Г. Ковальчук, В.С. Бондар, С.П. Шимчук

відсутність спеціального обладнання та методик досліджень динамічних процесів у граничних шарах, що виникають у модельних трибоконтактах.

Об'єкти і методи дослідження. В якості основного модельного змащувального середовища використовувався авіаційний гас ТС-1, як прозоре, малов'язке середовище, що виключає при терті ковзання на малих швидкостях (0,2 ... 0,8 м / с) і малих навантаженнях (1 ... 10 Н) виникнення режиму гідродинамічного безконтактного тертя. Також вивчалася поведінка змащувальних шарів різних технічних товарних і модельних масел: гліцерину ХЧ, вакуумного масла ВМ-6, моторного синтетичного масла ПМ-10, холодильного масла ХФ 12-16, авіаційного гідравлічного масла АМГ-10, моторного мінерального масла МС-20, диалкілбензольного синтетичного масла, дистильованої води та ін.

При розробці приладів передбачалася можливість вимірювання сили тертя і величини зносу на модельному підшипнику ковзання, а також плавного регулювання умов тертя в діапазоні: лінійна швидкість ковзання від 0,2 до 2,0 м / с, осьове навантаження від 4,0 до 20,0 Н, максимальна об'ємна температура середовища не більше 60 0С.

Постановка завдань. З огляду на недостатню вивченість динамічних процесів у граничних шарах при їх терті в умовах граничного змащування, які зумовлюють виникнення областей квазісухого тертя в трибоконтакті й адгезійного зношування, в рамках даної роботи вирішувалися наступні завдання:

- розробити і створити лабораторні прилади з самовстановлюваним лінійним трибоконтактом ковзання відносно центру мас модельного вала;
- реалізувати на модельному трибоконтакті оптичний канал візуального вивчення течій граничних шарів у різних областях трибоконтакту (конфузорна - перехідна - дифузорна);
- реалізувати можливість вимірювання локального тиску в граничних шарах за допомогою приймального пристрою (прямокутного або круглого січення);
- розробити і створити систему сканування локального тиску в граничних шарах за допомогою шагового двигуна;
- розробити і створити драйвери і інтерфейс програми управління, контролю, реєстрації, зберігання та подальшої обробки сканування локального тиску граничних шарів з відповідним програмним забезпеченням;
- провести апробацію розроблених нових методів і приладів для експериментальних досліджень динамічних процесів у граничних шарах модельного трибоконтакту ковзання.

Викладення основного матеріалу. Прилади для візуального вивчення ДПГШ. Для візуального вивчення динамічних процесів, зокрема, інтенсивності зустрічних течій, що виникають в граничних шарах трибоконтакту, було розроблено кілька лабораторних приладів тертя з оптично-прозорим лінійним контактом [10]. З метою безпосереднього спостереження за виникаючими течіями мастила відносно лінії контакту в дифузорній області (ДО) і в конфузорній області (КО) контакту, в приладі АСБ-01 (рис. 1) контакт плоского модельного і прозорого підшипника ковзання з валом здійснювався зверху. Це дозволяє спостерігати за течіями змащувального середовища через поліровані грані прозорого паралелепіпеда. Матеріал модельного підшипника - оргскло, кристал парателуріта (TiO_2), сапфіра або кварцу. В якості модельного вала використовувався фторопластовий або сталевий (ШХ-15, НРС 59 ... 63) ролик з полірованою ($Ra < 0,04\mu m$) робочою поверхнею, що утворює циліндр. Діаметр модельного вала - 90мм, довжина модельного вала або ширина робочої поверхні, що утворює циліндр вала - 9 мм (фторопластові) і 16 мм (сталеві). Досліджуване середовище подавалося в контакт рухомою поверхнею шляхом підхоплення її нижнім сегментом, який занурювався в ванночку з рідиною.

Прилад тертя АСБ-02 відрізняється від АСБ-01 тим, що контакт плоского модельного підшипника з робочою поверхнею модельного вала створюється не зверху, а знизу, і змащування контакту проводиться шляхом його повного занурення в прозору ванночку з попередньо наповненою робочою рідиною (рис.2, а). У приладах АСБ-01 і АСБ-02 передбачено вимір локальних тисків у граничних шарах у процесі тертя. Для цього в прозорому модельному підшипнику (паралелепіпеді) на робочій поверхні тертя створювався приймальний пристрій у вигляді отвору або щілини (діаметр отвору - 0,2 мм, ширина щілини - 0,23 ... 0,3 мм, а довжина 6 мм). Такий приймальний пристрій через канали, виготовлені всередині зразка, штуцер і гнучкий шланг з'єднувався з вимірювальними приладами (манометри, вакуумметри, електромеханічні або тензометричні датчики тиску).

Конструкція приладів АСБ-01 і АСБ-02 дозволяє візуально спостерігати безпосередньо виникаючі зустрічні течії та ефекти кавітації в різних середовищах у процесі тертя [11,12]. В якості прикладу на рис. 3 представлені лінії току в гасі (а) і ефекти кавітації (б, в).

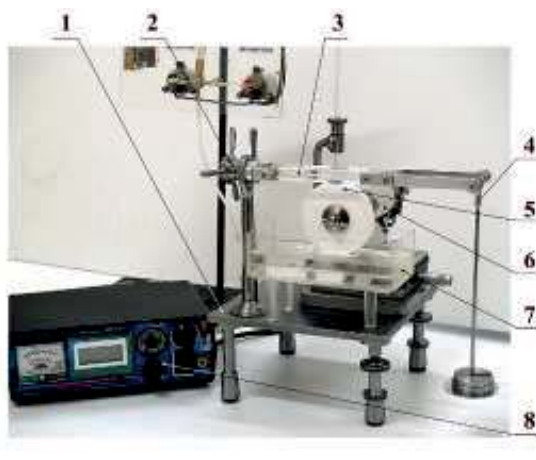


Рис. 1. Схема (а) і зовнішній вигляд приладу тертя ковзання АСБ-01 (б) з оптичним каналом дослідження динаміки граничних шарів та верхнім положенням контакту



а)



б)

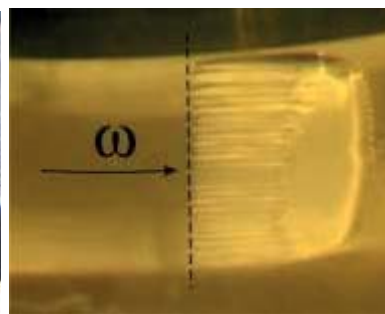
Рис. 2. Зовнішній вигляд приладів тертя АСБ-02(а), АСБ-02Т(б)



а)



б)



в)

Рис. 3. Лінії току зустрічних течій (а) і ефекти кавітації на приладі АСБ-01 (гас С-1) (б) і на приладі АСБ-02 (масло ИММ-10), (в)

Крім цього, розроблені прилади дозволяють досліджувати усі стадії нуклеації, росту та утворення газоповітряної порожнини, що знаходиться в стані динамічної рівноваги, процес кавітації, а також часткове розчинення мікропухирців у дифузійній області контакту (рис. 4).

Прямі вимірювання тиску в граничних шарах при терті. У рамках ЕГД-теорії розрахункові контактні напруги, що виникають в поверхнях при стисненні, ототожнюються з тиском, що розвивається в граничних шарах при терті. Тобто, тиск в мастильній плівці ЕГД-контакту завжди вище тиску навколишнього середовища. Таку ж думку прийнято і в адгезійно-деформаційному підході, де динамічні процеси в граничних шарах ігноруються. Разом з тим, для встановлення взаємозв'язку трибологічної поведінки контакту з динамікою граничних шарів

принципово важливим є прямий експериментальний вимір локального фактичного тиску в граничних шарах мастила трибоконтакту при терті в динаміці.

У приладах тертя АСБ-01, АСБ-02, АСБ-02 (Т) забезпечено сталість лінійного контакту і рівномірний розподіл миттєвих контактних напружень при переміщенні робочої поверхні модельного вала завдяки використанню системи самоустановки контакту. Це досягнуто тим, що вісь хитання модельного підшипника перетинає вісь навантаження і вісь обертання модельного вала в його центрі мас.

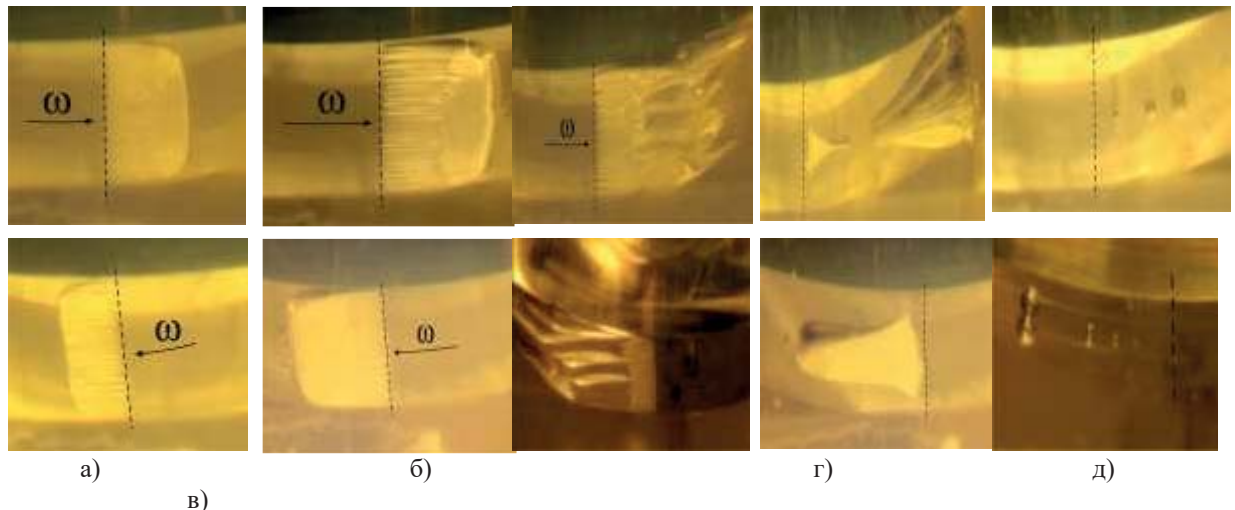


Рис. 4. Стадії утворення газової порожнини розрідження граничних шарів в дифузійній області трибоконтакту ковзання (ШХ-15 - TiO_2 , масло ШМ-10) при різних напрямках ковзання (вгорі - проти годинникової стрілки, внизу - за годинниковою стрілкою): а) - нуклеація в початковий момент тертя; б) зростання і динамічна рівновага зі збільшенням швидкості; в) - кавітація; г, д) - часткове розчинення газової порожнини після припинення тертя

Крім того, в цих приладах реалізовано електромеханічне сканування контактних областей прийомними пристроями (отворами круглого або прямокутного січення у вигляді щілин), розташованими на контактній поверхні модельного підшипника, шляхом переміщення електроприводу модельного вала з контрольованою швидкістю шаговим двигуном. Розроблені і створені спеціальні АЦП, ЦАП і програма управління параметрами тертя забезпечують їх стабільність завдяки зворотним зв'язкам з відповідними датчиками. Інтерфейс програми (рис. 5, а) дозволяє реєструвати локальний тиск (рис. 5, б) на зрізі приймального отвору, його координату, швидкість сканування та інші параметри.

Інтерфейс програми (рис. 5, а) дозволяє реєструвати локальний тиск (рис. 5, б) на зрізі приймального отвору, його координату, швидкість сканування та інші параметри.

Графічний інтерфейс у сукупності з програмними модулями математичної обробки експериментальних даних дозволяють створити наочну, зручну і відносно просту автоматизовану систему реєстрації параметрів і управління режимами тертя ковзання.

Використання модернізованого приладу АСБ-02 дозволило вперше провести прямі експериментальні вимірювання локального тиску в контактних областях і встановити наявність різнополярного градієнта тиску в граничних шарах мастила при терті ковзання по обидві сторони контакту (позитивний в КО і негативний в ДО).

Багаторазові вимірювання розподілу тиску в контактній області на приладі АСБ-02 у середовищі масла ХФ 12-16 при скануванні в напрямку (рис. 6, а) і проти (рис. 6, б) напрямку ковзання вала показали, що відносна похибка не перевищує 5 %. При максимальних розрахункових контактних напруженнях 0,615 МПа по Г. Герцу (діаметр вала - 0,08 м, ширина валу - 0,009 м, модуль пружності фторопласта 4 - 450 МПа, модуль пружності оргскла неорієнтованого - 2900 МПа) модельний вал обертався з частотою 15 об / хв., тобто з лінійною швидкістю ковзання в контакті 0,06 м / с, а швидкість сканування, тобто переміщення контрзразка (оргскло), становила 0,011 мм / с. При таких умовах були отримані розподіли тиску в контактній області з постійними швидкістю і напрямком ковзання вала і різним напрямком сканування (рис. 6).

Звертає на себе увагу закономірне зниження тиску в конфузійній області та підвищення ступеня розрідження - в дифузійній при зміні напрямку сканування зі зустрічного на зворотне.

Симетричний щодо вертикальної осі розподіл тиску в граничних шарах і його характерну зміну в КО і ДО областях контакту при різних напрямках сканування з однаковою швидкістю пояснюється певними змінами динамічних процесів, котрі протікають у граничних шарах у разі чистого ковзання і кочення з проковзуванням.

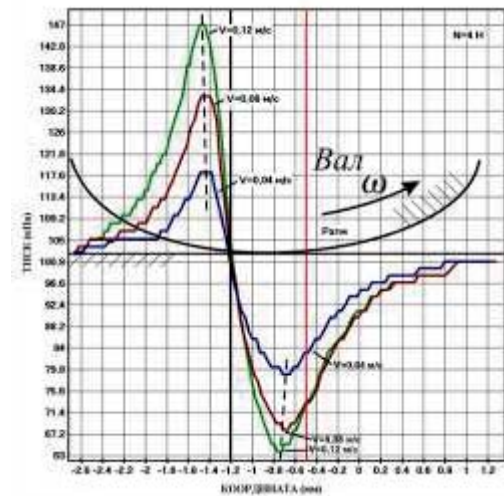


Рис. 5. Графічний інтерфейс програмного забезпечення (а), де плавна крива відображає розподіл тиску (підвищення і зниження) при скануванні перпендикулярно контакту, а також результати експорту з первинною обробкою вимірних параметрів (б) після серії експериментів при лінійній швидкості ковзання 0,251 м / с і різних осьових навантаженнях

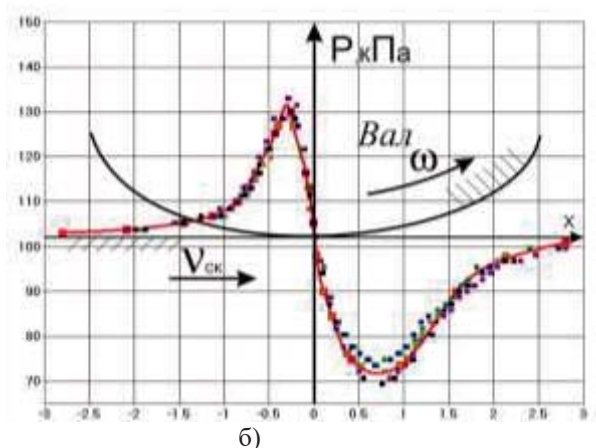
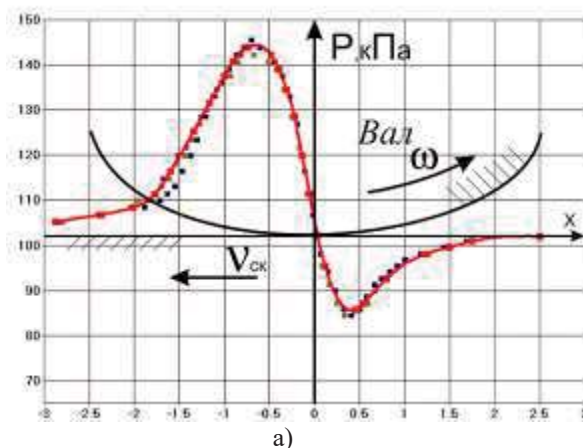


Рис. 6. Розподіл тиску в контактній області при ковзанні валу з лінійною швидкістю 0,251 м / с та скануванні зі швидкістю $V_{СК} = 0,00036$ м / с: а - в напрямку обертання валу; б - проти напрямку обертання валу

Для непрямого вимірювання коефіцієнта тертя була проведена доробка приладу АСБ-02 (рис. 7). Модернізація приладу АСБ-02 полягала в установці додаткових електронних датчиків тиску ДД і розрідження ДР для вимірювання відповідних параметрів у зоні контакту модельного вала з поверхнею плоского нерухомого прозорого модельного підшипника, оптичного датчика частоти обертів вала ДЧВ і датчика визначення споживання струму ДТ основного двигуна АД, доопрацюванні механізму позиціонування на базі шагового двигуна ШД. Розроблені схеми модуля вимірювання напруги ДН і споживання струму ДТ дозволяють отримувати вихідні дані для розрахунку потужності втрат АД у процесі тертя ковзання при фіксованій частоті обертання і різних навантаженнях.

Блок управління БУ виконує наступні функції:

- обробку сигналів датчиків ДР, ДД, ДЧВ, ДТ, ДН;
- формування і передачу масиву даних в ПК;
- прийом даних з ПК для формування сигналів управління АТ і ШД.

Програмне забезпечення виконує функції формування алгоритму управління виконавчими пристроями, відображення в цифровому або в графічному вигляді робочих параметрів і режимів лабораторної установки АСБ-02.

Управління швидкістю позиційно-скануючого механізму при дослідженні процесу тертя ковзання автоматизовано. Передбачена ручне юстирування зони контакту. Частота обертання основного двигуна стабілізована і автоматично підтримується на заданому рівні незалежно від впливу навантаження і швидкості сканування.

Формування даних таблиці 1 здійснюється в ручному або в автоматичному режимі з попередньою установкою періоду запису. Передбачена можливість експорту даних у програму EXCEL з метою подальшої статистичної обробки.

Графічний інтерфейс (рис. 7) програми дає можливість візуально спостерігати в реальному часі необхідні графічні залежності зі збереженням зображень у пам'яті ПК.

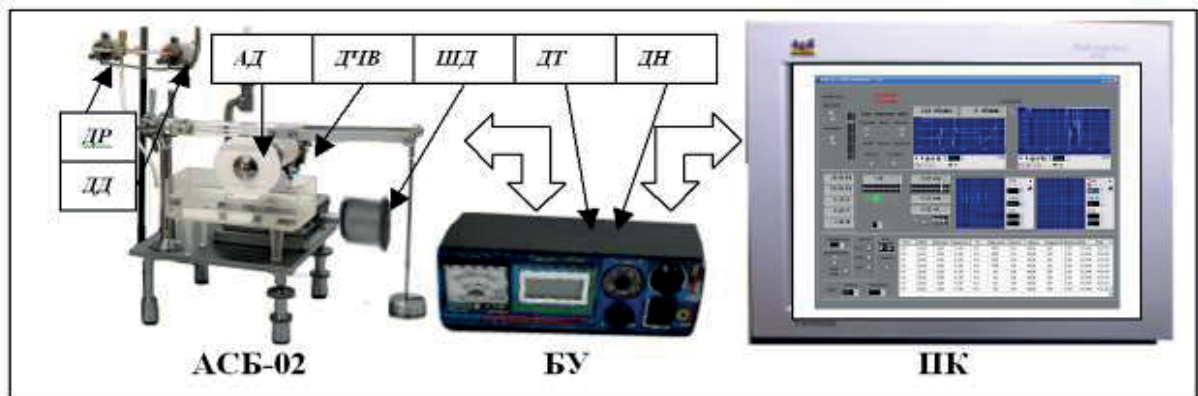


Рис. 7. Структура автоматизованої вимірювально-випробувальної системи: АСБ-02 - лабораторна установка для вимірювання компресійно-вакуумних процесів; БУ - блок управління; ПК - персональний комп'ютер; АТ - асинхронний двигун; ШД - шаговий двигун; ДР - датчик розрідження; ДД - датчик тиску; ДЧВ - датчик частоти обертання; ДТ - датчик струму; ДН - схема вимірювання напруги

Таблиця 1. Масив даних, отриманих у ході випробувань на приладі АСК-01

№ пп	Частота об/хв,	Надлишко-вий тиск, кПа	Розрідження, кПа	Струм, А	Напру-га, В	Потуж-ність, Вт	Осьове наванта-ження	Коорди-ната, мм	Темпе-ратура, °С	Час	Дата
0	100	255	255	2,55	60	153	0	-1	0	20:02:41	19.03.2011
1	115,5	255	255	2,55	60	153	0	-0,91	0	20:02:59	19.03.2011
2	132,03	255	255	2,55	60	153	0	-0,65	0	20:03:13	19.03.2011
...
12	187,83	255	255	2,55	60	153	0	-0,23	0	20:04:32	19.03.2011
13	211,6	255	255	2,55	60	153	0	0,01	0	20:04:49	19.03.2011

Висновки: 1. Розроблено прилади з оптичними каналами знімання інформації (АСБ-01, АСБ-02, АСБ-02Т), що дозволяють спостерігати:

- фазові перетворення в граничних шарах мастила (нуклеацію, зростання пароповітряних порожнин, їх еволюцію та схлопування бульбашок у дифузійній області контакту);
- розшарування граничних шарів у конфузійній області трибоконтакту;
- виникнення вторинних зворотних течій і вихрових потоків у граничних шарах;
- розподіл теплових потоків у динаміці при терті.

2. Розроблено прилади безпосереднього вимірювання локального тиску в граничних шарах шляхом сканування прийомними пристроями (контактні АСБ-01, АСБ-02), що дозволили виявити загальну закономірність виникнення різнополярних градієнтів тиску в граничних шарах: позитивний - у конфузійній області контакту і негативний - у дифузійній.

3. Апробація приладів АСБ-01, АСБ-02 показала високу відтворюваність отриманих результатів прямих вимірювань розподілу тиску шляхом безпосереднього сканування на

приймальному пристрої, розташованому в поверхні модельного підшипника ковзання, в напрямку тертя.

4. Високий ступінь автоматизації приладу тертя АСБ-02, досягнутої використанням спеціально розроблених драйверів і програм, дозволила підвищити ефективність наукових досліджень більш ніж на порядок, а використання сучасних пакетів програм математичної обробки даних дозволило отримувати результати в зручному графічному вигляді.

5. Оптичний канал знімання інформації в мікротечіях, що виникають у трибоконтакті, дозволяє візуально спостерігати і вивчати процеси нуклеації газової фази в дифузійній області контакту, збільшення кількості бульбашок, утворення газових порожнин та їх еволюцію в стані динамічної рівноваги, тобто всі стадії трибокавітації.

Література

1. Костецкий Б. И. Износостойкость деталей машин / Б. И. Костецкий. – М. ; К : Машгиз, 1950. – 168 с.
2. Крагельский И. В. Основы расчетов на тертя и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
3. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. – М. : Физматгиз, 1963. – 472 с.
4. Чихос Х. Системный анализ в трибонике /Х.Чихос. – М.: Мир, 1982. – 351 с.
5. Прибор для непрерывного измерения толщины смазочного слоя в подшипнике скольжения. Авторское свидетельство №91589 на изобретение. Бюллетень изобретений, 1950, № 16. Авт. Д.С.Коднир, Л.М.Ронин, М.Д.Медвинский, Э.Ф.Зоммер.
6. Дмитриченко Н.Ф. Мнацаканов Р.Г., Белоус В.С., Грабчак В.Г. Установка для измерения толщины смазочного слоя в подшипниках. Патент РФ №RU 2972. Оpubл. 15.05.1992.
7. Дмитриченко Н.Ф. Эластогидродинамика. – Львов: Изд-во Национального университета «Львовская политехника», 2000. – 224 с.
8. Dowson D. and Taylor, C.M., 1974, “Fundamental Aspects of Cavitation in Bearings,” Cavitation and Related Phenomena in Lubrication, ImechE, England, pp. 15-26.
9. Luis San Andres, Cavitation in Liquid Bearings. ©- Notes 6. - 2009.
10. Стельмах А. У. Исследование динамических процессов в граничных слоях смазки на приборах трения с оптическим каналом съема информации / А. У. Стельмах, К. К. Бадир // Моделювання та інформаційні технології : зб. наук. пр. / НАН України, Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова. – Київ, 2012. – Вип. 63. – С. 214–224.
11. Кияшко С.Н., Стельмах А.У., Костюник Р.Е., Терновая Т.В., Сидоренко А.Ю. Способ определения противоизносных и (или) антифрикционных свойств трибосистемы с одним линейным контактом постоянной протяженности и устройство для его осуществления // Патент РФ на изобретение №2279660, приоритет от 30.09.04.Опубликовано: 10.07.2006. Бюл. №19.– 10 с.
12. Стельмах А. У. Адгезионно-деформационные и динамические процессы в граничных слоях. Сообщение IV. Физическая адгезионно-гидродинамическая (АГД) модель трения управление работоспособностью трибосистем в условиях граничной смазки / Стельмах А. У. // Проблеми трибології , 2012. – № 4. – С. 68–88.