

УДК 532; 533, 621.001.63; 621.001.66; 621.001.24; 658.512, 621.8.532.5

DOI 10.36910/6775.24153966.2020.70.10

О.У. Стельмах¹, Р.С. Костюнік², В.А. Радзієвський², О.Г. Ковальчук², О.В. Стельмах²¹*Пекінський технологічний інститут*²*Національний авіаційний університет***МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПОТОЧНОГО АГРЕГАТНО-ФАЗОВОГО СТАНУ РОБОЧОЇ РІДИНИ У ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ЗМАЩЕННЯ***Розроблено метод визначення поточного агрегатно-фазового стану робочої рідини у циркуляційних системах змащування.**Ключові слова: агрегатно-фазовий стан, змащення, циркуляція, рідини, масло-парогазова суміш, двохфазний.***А.У. Стельмах, Р.Е. Костюник, В.А. Радзиевский, Е.Г. Ковальчук, А.В. Стельмах
МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕКУЩЕГО АГРЕГАТНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ В ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ СМАЗКИ***Разработан метод определения текущего агрегатно-фазового состояния рабочей жидкости в циркуляционных системах смазки.**Ключевые слова: агрегатно-фазовое состояние, смазка, циркуляция, жидкости, масло-парогазовая смесь, двухфазный.***A.U. Stelmakh, R.E. Kostyunik, V.A. Radzievsky, E.G. Kovalchuk, A.V. Stelmakh
METHOD FOR DETERMINING THE CURRENT AGGREGATE-PHASE STATE OF THE WORKING FLUID IN CIRCULATING LUBRICATION SYSTEMS***A method has been developed for determining the current aggregate-phase state of a working fluid in circulating lubrication systems.**Key words: aggregate-phase state, lubrication, circulation, liquids, oil-vapor-gas mixture, two-phase.*

Постановка проблеми. Україна є авіаційною державою та займає лідируючі позиції серед світових брендів по розробці та випуску літаків різного призначення (ДП «Антонов») з власними авіаційними двигунами (ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес», ПАТ «Мотор Січ»).

Нагальною потребою усіх підприємств-виробників авіаційної техніки є підвищення її ресурсу. Сучасні енергосилові установки (ЕСУ), у тому числі авіаційні газотурбінні двигуни останнього покоління, у контактах трибосистем реалізують режим гідродинамічного тертя шляхом організації в них рясного змащення. Аналіз робіт вітчизняних та зарубіжних трибологів показав, що змащувальна рідина при терті традиційно розглядається, як суцільна рідина, трибологічні властивості котрої визначаються лише в'язкістю-температурними характеристиками за відомими методиками в умовах сталого стану рідини. Але такий підхід не вирішує проблем у цілому.

З використанням нового та перспективного підходу до змащення високонавантажених гвинтових редукторів виникла гостра потреба у розробці і створенні методів та пристроїв, здатних об'єктивно та кількісно оцінювати поточний агрегатно-фазовий стан мастильного середовища в циркуляційних системах ЕСУ в процесі їх експлуатації. Така поточна інформація є важливою характеристикою, необхідною для постійного моніторингу стану та поточного діагностування всієї системи, що є надзвичайно актуально як на транспорті, так і в енергетиці (електростанції різного типу та ін.), де використовуються циркуляційні системи змащення основних поверхонь тертя.

Відомо, що від 60% до 80% зносу двигуна відбувається під час його запуску при низьких температурах «холодний запуск», у процесі приробітку та нераціональне застосування мастил, що в багатьох випадках визначає працездатність і довговічність машин та механізмів у цілому. Складні умови експлуатації сучасних машин різко підвищили вимоги до змащувальних матеріалів, у результаті чого виникла необхідність глибокого вивчення механізмів і закономірностей механічного та фізико-хімічного впливу мастильного матеріалу на зношування, особливо в умовах граничного тертя. Значну увагу при цьому приділяють створенню сучасних автоматизованих систем змащування технічних засобів і машин.

На сьогодні проблема полягає у відсутності принципів виробництва високоефективних двофазних мастильних матеріалів нового покоління та методів контролю їх поточного агрегатно-фазового стану у циркуляційних системах змащення, що досі є невирішеною та актуальною

проблемою нової галузі знань про такі нестабільні середовища, як двофазні масло-парогазової суміші.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз робіт вітчизняних та зарубіжних трибологів показав, що змащувальна рідина при терті традиційно розглядається, як суцільна рідина, трибологічні властивості котрої визначаються лише в'язкісно-температурними характеристиками за відомими методиками в умовах сталого стану рідини. Тим фактом, що в нормальних атмосферних умовах у мастильних матеріалах присутні розчинені гази повітря (близько 12%), як правило, нехтують. Традиційно вважається, що утворення газових пухирців у змащувальних рідинах є шкідливим фактором та ототожнюють його з пінами, утворення котрих пояснюють як гідродинамічний барботаж, тобто «захоплення» повітря рідиною, що рухається на границях розділу фаз. Тому використовують антипінні присадки [1]. Утворення пухирців у робочих гідравлічних системах дійсно є дуже небажаним явищем через високі вимоги щодо гідравлічної рідини, що не повинна стискатись. У інших системах, наприклад, при нафтогазодобуванні, навпаки, використовуються пухирці в якості транспортера за технологіями, котрі постійно розробляються та широко застосовуються, наприклад Р.М. Кондратом [2, 3, 4].

Еластогідродинамічна теорія тертя (О.Рейнольдс, Г.Елрод, Л.Флоберг та ін.) досі (Lloid, D.Rijkema та ін.) притримується припущення про нерозривність змащувальної плівки, а наявність виникнення та наявність нано- та мікропухирців у середовищі тертя не розглядається, хоча у дифузійних областях усіх трибоконтактів в умовах всебічного розтягу вони утворюються та генеруються в об'єм [6]. Цікавими є недавні дослідження японських учених Nakano, T. Takahashi, M. Zimmerman W.B. [7-10], котрі ретельно вивчають властивості, склад та механізми утворення мікропухирців у масляних рідинах.

Постановка завдань. В роботі поставлена мета – розробити метод визначення поточного агрегатно-фазового стану робочої рідини у циркуляційних системах змащування.

Викладення основного матеріалу. Розроблена колективом авторів даної статті експрес-методика випробувань паливно-мастильних матеріалів (ПММ) і присадок до них з відповідною модифікацією була застосована для дослідження експлуатаційних властивостей товарних трансмісійних, гідравлічних та моторних груп масел зі штатними присадками [11]. Методика складається з чотирьох або шести етапів, в залежності від умов роботи досліджуваної групи товарних масел. Поетапне проведення випробувань дає можливість контролювати в процесі тертя утворення вторинних структур (ВС) на робочих поверхнях випробувальних зразків і шляхом трибовипробувань оцінити властивості товарних масел зі штатними присадками у часі, а саме:

- після того, як у контакті модельного вузла тертя лабораторного приладу АСК-01 здійснено обране осьове навантаження (табл. 1) і приводом ведучого вала необхідна швидкість тертя, починається відлік часу випробування до проходження контрзразком 500 метрів шляху в зоні контакту. Цей етап відображає початок формування ВС на робочій поверхні контрзразка в процесі тертя;

- другий, третій, четвертий та п'ятий (для трансмісійних масел) етапи проводяться тим же контрзразком, по новій поверхні нерухомого зразка на протязі 500 м шляху тертя. Ці етапи визначають завершення утворення ВС;

- четвертий (або шостий для трансмісійних масел) етап тертя відбувається при тих же початкових умовах, що й попередні, але на протязі 3000 м шляху, моделюючи більш довготривалі випробування напрацьованих в перших трьох (або п'яти) етапах тертя ВС, і випробування їх на протизносні властивості в трибохімічно-зміненому змащувальному середовищі.

Таблиця 1.

Корекція експрес-методики в залежності від умов роботи різних груп товарних масел

Групи масел	Осьове навантаження, Н	Швидкість ковзання, м/с	Кількість етапів
Моторні	230	0,4	4
Трансмісійні	300	0,6	6
Гідравлічні	230	0,4	4
Холодильні	300	0,6	4
Трансформаторні	230	0,4	4

У результаті трьох або п'яти короткочасних та одного довготривалого етапів тертя на поверхні плоского зразка утворюються чотири сліди зносу. Критерієм зносу є лінійний знос матеріалу і об'єм зношеного матеріалу з урахуванням пластичної деформації (доріжка тертя) та його щільності. Об'єм зношеного матеріалу вимірюється профілографом-профілометром ЛСДФМП, а лінійний знос – на профілографі - профілометрі «Калібр М – 201».

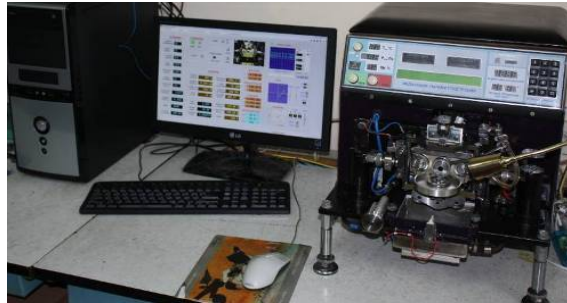


Рис. 1. Лабораторна машина тертя АСК-01

Отримані дані автоматично оброблюються бортовим контролером блока управління приладу тертя АСК-01, за якими за відповідною запрограмованою формою будуються таблиці і графіки, котрі зберігаються у вигляді файлу бібліотеки на персональному комп'ютері (ПК) (рис.2). Після цього є можливість корекції та додавання не вистачаючих та необхідних для подальшого аналізу даних, таблиць та графічних зображень. При цьому програмне забезпечення працює за алгоритмом, що забезпечує обробку та аналіз даних на всіх етапах проведення триботехнічних випробувань. Критеріями роботи випробувальних ПММ та присадок до них являються максимальне, мінімальне або середнє значення визначених їх трибохарактеристик, а саме: сили тертя, температури, зношення у часі, максимального зносу та ін.

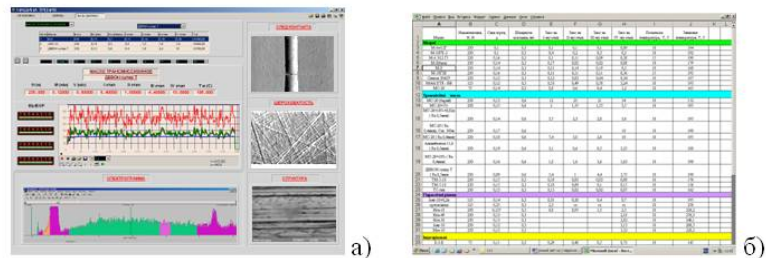


Рис. 2. Зовнішній вигляд інтерфейсу робочої панелі (а), та банку даних (б) трибологічних даних ПММ та присадок до них

Керування поточним агрегатно-фазовим станом змащувальних мастильних середовищ при визначенні головних споживчих параметрів (в'язкість, щільність, діелектрична проникність і поточну робоча температура) для подальшої оптимізації їх стану та урахування типу застосованих товарних мастильних матеріалів різної в'язкості відбувалось за допомогою розробленого та створеного макету пристрою контролю поточного агрегатно-фазового стану робочої рідини (рис. 3).



Рис. 3. Макет пристрою контролю поточного агрегатно-фазового стану робочої рідини у циркуляційних системах змащування

Для проведення трибологічних досліджень з метою визначення оптимального поточного агрегатно-фазового стану робочої рідини у циркуляційних системах змащення макет пристрою контролю поточного агрегатно-фазового стану робочої рідини підключено до лабораторного приладу тертя АСК-01 наступним чином (рис. 4):

- ротор приладу трибомолекулярного генератора (ТМГ) через приймальні отвори нагнітає утворену масло-парогазову суміш у камеру баку (модель картеру енергосилової установки) за допомогою трубопроводу, через трійник з сенсором FPS;
- у дифузорних областях трибоконтактів ТМГ відбувається мимовільне вакуумне всмоктування масла з камери лабораторного приладу АСК-01, що стікає з камери баку по відповідному трубопроводу через вихідний трійник з сенсором FPS у ванночку приладу тертя АСК-01.



Рис. 4. Зовнішній вигляд комплексу лабораторних приладів для проведення триботехнічних випробувань двофазних масло-парогазових мастильних матеріалів з метою визначення їх оптимального поточного агрегатно-фазового стану

Трибологічні випробування на приладі тертя АСК-01 проводились наступним чином: ковзання здійснюється обертанням ролика (контрзразка), закріпленого перпендикулярно нерухомому плоскому зразку, тобто контакт контрзразка зі зразком відбувається по утворюючій циліндр контрзразка, що в свою чергу реалізує так званий лінійний контакт пари тертя. Доведений до шорсткості $R_a \leq 0,02 \mu\text{м}$, яка попередньо визначається і контролюється ЛСДФМП, зразок розташовується в камері, заповненій мастильним середовищем, протизносні властивості якого потрібно визначити. Зразок, контрзразок і всі деталі кріплення перед постановкою випробувань промиваються розчинником (ацетоном) та осушуються при кімнатній температурі. При випробуваннях швидкість обертання контрзразка підтримується постійною і становить 0,2 м/с. Осьове навантаження відбувається з певним прискоренням до попередньо визначеного експериментальним шляхом значення, наведеного у (табл. 1), і підтримується на цьому рівні. Кожне масло випробовувалось по п'ять разів.

При збільшенні лінійної швидкості обертового модельного валу ротору ТМГ до 0,2-0,3 м/с дослідні масла тривалий час знаходились у прозорому стані. При подальшому збільшенні лінійної швидкості (до 0,4-0,6 м/с) розпочиналось їх помутніння, при цьому візуально спостерігалось накопичення мікропухирців. Після досягнення розрахункової за методикою випробувань швидкості масло стрімко набуває непрозорого вигляду за рахунок насичення мікропухирцями двох типів: одні з яких виникають внаслідок барботажу, а інші – внаслідок трибокавітації в дифузорних областях всіх зазорів трибомолекулярного насоса.

Таким чином, при проведенні лабораторних випробувань в залежності від зносу матеріалу плоского нерухомого зразка, знаючи параметри досліджуваного масла (за Технічними умовами) та з огляду на його поточні параметри (в'язкість, щільність та діелектрична проникність), експериментально визначено оптимальний робочий діапазон швидкостей обертів ТМГ для кожного мастильного середовища в залежності від його типу та в'язкості (рис. 5).

У момент початкового зрушення контрзразка у двофазному середовищі в автоматичному режимі фіксувались поточні значення сили тертя та спостерігалось незначне стрибкоподібне її зростання. Це пояснюється зростанням коефіцієнта стиску мастильного середовища завдяки

наявності у базовому маслі утворених парогазових мікробульбашок. Так само пояснюється і зменшення у 2,5 рази рівня осциляцій сили тертя в ході випробувань та у 2 рази – інтенсивності зношування поверхонь тертя, що відбувається саме у дифузійній зоні контакту, де завдяки наявності парогазових порожнин зменшується ступінь розрідження, величина додаткового навантаження та рівень десорбції змащувальних шарів.

В ході численних випробувань товарних мастил різної в'язкості відбувалась зміна їх агрегатно-фазового стану (від рідкого – до оптимально насиченого пухирцями), що оцінювалась як візуально, так і за визначеними поточними критеріями та параметрами вхідного сенсору FPS при певних значеннях швидкості обертання ротору ТМГ. Найбільш чутливим критерієм (K , кг/мс) до поточного агрегатно-фазового стану мастильних рідин визначено добуток в'язкості, щільності та діелектричної проникності. Відомо, що мастильні матеріали мають відносну діелектричну проникність 2,5...3,5, а у повітря приблизно 1,0 (тоді як у води 81). У процесі насичення масла масло-парогазовими трибокавітаційними мікробульбашками діелектрична проникність природно зменшується до значень 1,5...1,8, тобто майже у 2 рази. Відповідно зменшуватиметься в'язкість та щільність, а їх добуток у абсолютних величинах для кожного масла буде прагнути до певної величини. Наприклад, для масла МС-20 (рис. 4) поточний оптимальний агрегатно-фазовий стан, при якому критерій $K=32$, визначений за результатами трибологічних випробувань, швидкістю обертання ротору ТМГ ($V=5700$ об/хв), що супроводжується зменшенням сили тертя до $F_{тр} = 0,15$, і мінімальним лінійним зношуванням матеріалу нерухомого зразка модельного вузла тертя ($I=0,01$ мкм за годину).

Метод визначення базується на критерії, що включає в себе три фізичні величини, котрі характеризують електричну проникність, щільність та в'язкість. Добуток цих величин дозволяє оцінювати фактичну наявність мікробульбашок з пониженим тиском. У залежності від природи та фізико-хімічних властивостей різних робочих рідин кожний параметр, що входить до критерію, є більше або менше чутливим до фактичного агрегатно-фазового стану. Тому комплекс методик випробувань по визначенню даного критерію дозволяє переконливо стверджувати, що даний метод і запропонований критерій є науково-обґрунтованими та експериментально доведеними.

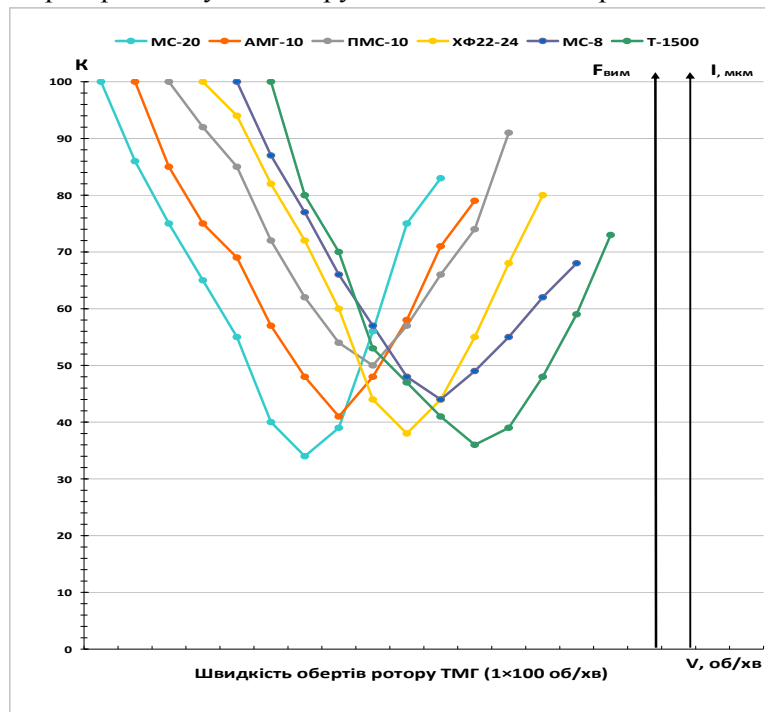


Рис. 5. Результати порівняльних випробувань мастил різного типу і в'язкості

В основу метода взяті положення адгезійно-гідродинамічно-деформаційної теорії тертя та зношування, розроблені авторами даної роботи. Зокрема, конфузорні зворотно-зустрічні течії та дифузійні всебічні розтягування фрагментів мастила в пружно-деформаційних областях контакту, які привносять найбільший внесок в сумарну силу тертя, і де створюються умови для адгезійного

первинного зношування внаслідок повторного деформаційного мікрорізання поверхонь тертя, що визначає ефективність мастильного середовища та ресурс трибосистем [12,13].

Аналіз залежностей (рис. 4) свідчить про позитивний вплив мікропухирців на ефективність трибосистем: зменшується сила тертя та суттєво зменшується інтенсивність зношування. Ці результати узгоджуються з основними положеннями адгезійно-гідродинамічної теорії тертя, а саме:

- зменшення інтенсивності зношування та критичного навантаження поверхонь тертя пов'язано зі зростанням коефіцієнта стиснення двофазного масла у порівнянні з його рідинним станом, що призводить до зменшення ступеню розрідження граничних шарів у дифузійній області контакту;

- сила тертя зменшується у зв'язку зі зростанням модуля стиснення двофазного масла у порівнянні з його рідинним станом, що призводить до зменшення швидкості зворотних течій у конфузійній області контакту та зменшення дифузійної вакуумної складової опору тертя

Наявність мікропухирців із зниженим тиском в мастильному середовищі, що виникають у дифузійних областях ТМГ та доставляються до всіх вузлів тертя ЕСУ, призводить до їх схлопування та демпфірування течій в конфузійних областях і до їх легкого розширення – у дифузійних областях кожного трибоконтакту.

Висновок. Розроблений метод визначення поточного агрегатно-фазового стану робочої рідини у циркуляційних системах змащення є принципово новим, теоретично обґрунтованими і експериментально доведеним.

Література

1. Фінкельштейн З.Л., Андренко П.М., Дмитрієнко О.В. Експлуатація, обслуговування та надійність гідравлічних машин і гідроприводів: навч. посіб. / під ред. проф. П.М. Андренка. – Х. : Видавничий центр НТУ «ХП», 2014. – 308 с.
2. Кондрат Р. М. Розробка та експлуатація газових і газоконденсатних родовищ: курс. проектування / Р. М. Кондрат, О. Р. Кондрат. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. - 102 с.
3. Бошнятов Б.В. Микропузырьковые газожидкостные среды и технологии // Фундаментальные исследования. – 2008. – № 5. – С. 44-45.
4. Бошнятов Б.В. О перспективах применения микропузырьковых газожидкостных сред в технологических процессах // Изв. ВУЗ. Физика. – 2005. –Т.48. № 11– С. 49-54.
5. Попов В.В. Микропузырьковая газожидкостная среда / Автореферат дисс. на соиск. ст. канд. физ.-мат. наук. – Долгопрудный: МФТИ, 1991. – 18 с.
6. Кравченко І.Ф., Ананьєв В.Г., Колесник П.А., Єдинович А.Б., Аксьонов О.Ф., Стельмах О.У. Збільшення ресурсу редукторів ГТД з використанням двофазної масло-повітряної суміші// Міжвузівський збірник "Наукові Нотатки". Луцьк, –2013. – Випуск №42. – С. 129.134.
7. Hosoda, E. (2011). Meeting for the study: Improvement of sewage treatment population diffusion rate for reduction of the water pollution by the life drainage. taka-hashi.pdf. United Nations (2003). World water development report.
8. Nakano, T. (2011). Dynamics: Liberty physics textbook series (2). Maruzen.
9. Takahashi, M. (2009). Study on micro-bubble and nanobubble, <http://unit.aist.go.jp/emtech-ri/26env-uid/pdf/>.
10. Zimmerman W.B. J, Tesař V.: «Bubble generation for aeration and other purposes», European Patent EP2081666. granted 19th Oct. 2011, published 26th Sept. 2012
11. Стельмах О. У. Вплив агрегатного стану мастильного середовища на параметри трибоконтакту / О.У. Стельмах, С.П. Шимчук, В.А. Радзівський // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки» за галузями знань «Технічні науки». Випуск № 54. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2016. – С. 309 – 315.
12. Стельмах А.У. Влияние агрегатно-фазового состояния смазки на эффективность трибосистем / А.У. Стельмах, К.К. Бадир, А. В. Сидельников // Проблеми хімотології. Теорія та практика раціонального використання традиційних і альтернативних паливно-мастильних матеріалів. – Монографія / за заг. ред. проф. С. Бойченка. – К.: Центр учбової літератури, 2017. – С. 60-64.
13. Стельмах А.У. Механизм образования масло-парогазовой суспензии смазочной среды в процессе эксплуатации двигателей / А.У. Стельмах, А. В. Сидельников, И.В. Матвеев // Проблеми хімотології. Теорія та практика раціонального використання традиційних і альтернативних паливно-мастильних матеріалів / за заг. ред. проф. С. Бойченка. – К.: Центр учбової літератури, 2017. – С. 70-73.