

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

О.У. Стельмах¹, Р.С. Костюнік², В.А. Радзієвський², О.Г. Ковальчук², О.В. Стельмах²

¹Пекінський технологічний інститут

²Національний авіаційний університет

МЕТОДИКА КЕРУВАННЯ ПОТОЧНИМ АГРЕГАТНО-ФАЗОВИМ СТАНОМ ЗМАЩУВАЛЬНИХ РІДИН РІЗНОЇ В'ЯЗКОСТІ

Розроблено методику керування поточним агрегатно-фазовим станом 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 МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ ТЕКУЩИМ АГРЕГАТНО-ФАЗОВЫМ СОСТОЯНИЕМ СМАЗОЧНОЙ ЖИДКОСТИ РАЗЛИЧНОЙ ВЯЗКОСТИ

Разработана методика 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 METHODS OF CONTROL OF THE CURRENT AGGREGATE-PHASE STATE OF LUBRICANT LIQUIDS OF DIFFERENT VISCOSITY

A method for determining the current aggregate-phase state of the working fluid in circulating lubrication systems has been developed.

Key words: aggregate-phase state, lubrication, circulation, liquids, oil-vapor-gas mixture, two-phase.

Постановка проблеми. Розроблення нових експрес-методів лабораторних випробувань модельних трибосистем, мастильних матеріалів та присадок до них за їх триботехнічними властивостями, що дозволять моделювати процеси тертя в реальних умовах експлуатації машин та механізмів та прогнозувати її технічний стан - надзвичайно важлива та актуальна проблема для промислового комплексу України. Розроблювані нові методики повинні відображати певні критерії в залежності від типу та класу створюваних нових чи існуючих товарних мастильних матеріалів та технічних умов експлуатації.

Методики випробувань мастильних матеріалів необхідно змінювати, наприклад, в залежності від показників в'язкості, щільності, діелектричної проникності при дійсній поточній температурі та застосовувати відповідні початкові умови тертя для моторних, гідравлічних, трансмісійних, турбінних, індустріальних мастил із використанням відповідних присадок.

Після вибору основи мастильних матеріалів фахівці складають експлуатаційні вимоги до кінцевого продукту, згідно з якими модифікують вибрану основу відповідними присадками: антиокислювальними, антипінними, депресорними та іншими. При цьому підбирають протизносні, антифрикційні та протизадирні присадки. Кожна з введених присадок так чи інакше впливає на властивості інших. Тому при розробці нових мастильних композицій фахівці завжди шукають збалансовані концентрації введених присадок до мастильної основи. Однак критерію такої збалансованості досі немає.

Колективом авторів даної роботи вперше виявлений суттєвий вплив поточного агрегатно-фазового стану змащувальних рідин на зносостійкість та ресурс енергосилових установок, що дозволило підвищити ресурс головного редуктора ГТД ТВ3-117 ВМА-СБМ1 більш ніж у 7 разів [1]. Тому виникла необхідність у створенні методики керування поточним агрегатно-фазовим станом серійних товарних мастильних матеріалів різної в'язкості, при котрому реалізується мінімальне тертя та зношування трибосистем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зарубіжні та вітчизняні науковці розглядають змащувальну рідину в процесі тертя, як суцільну. За відомими методиками трибологічні властивості таких рідин визначаються лише в'язкісно-температурними характеристиками при умовах їх постійного стану в нормальних атмосферних умовах, не враховуючи місткість розчинених газів повітря (близько 12%). Зазвичай вважається, що утворення газових пухирців у

змащувальних рідинах є шкідливим фактором та ототожнюється з піноутворенням, тому використовуються антипінні присадки [2].

В еластогідродинамічній теорії тертя (Г.Елрод, Л. Флоберг, О. Рейнольдс та ін.) до теперішнього часу виникнення та наявність нано- та мікропухирців у змащувальних середовищах не розглядається, а притримуються припущення про нерозривність змащувальної плівки, хоча у дифузійних областях усіх трибоконтактів в умовах всебічного розтягу вони утворюються та генеруються в об'єм [3,4].

У роботах японських учених Nakano T., Takahashi M., Zimmerman W.B.J., Hosoda E. досліджуються властивості, склад та механізми утворення мікропухирців у масляних рідинах [5-8].

Аналіз останніх досліджень та публікацій свідчить, що існуючі гіпотези, теорії та положення про природу тертя переважно мають описовий характер і дають загальні уявлення про фізичні процеси, що відбуваються в трибоконтактах, котрі відрізняються умовами навантаження, видом та матеріалом змащування, а фактичний двофазний стан змащувальних рідин у циркуляційних системах змащення ЕСУ взагалі не враховується.

Авторами даної статті вперше встановлено явище закономірної нуклеації та виникнення у крапельних маслах, паливах, спеціальних та інших рідинах парогазових мікропухирців під час тертя в дифузійних областях трибоконтактів [9-11].

Застосування двофазних масло-парогазових мастильних матеріалів в циркуляційних системах змащування двигунів внутрішнього згорання, газотурбінних двигунів цивільного та військового призначення, генераторах електростанцій (ГРЕС, АЕС, ТЕС), що є основою енергетичної та транспортної безпеки держави, потребує керування поточним агрегатно-фазовим станом змащувальних рідин (мастильних матеріалів) різної в'язкості.

Постановка завдань. Розробити методику керування поточним агрегатно-фазовим станом змащувальних рідин повинна визначати головні споживчі параметри (в'язкість, щільність, діелектричну проникність і поточну робочу температуру) з метою подальшої оптимізації їх стану та урахуванням типу застосованих товарних мастильних матеріалів різної в'язкості.

Викладення основного матеріалу. Найбільш близьким технічним рішенням для усунення перелічених недоліків є застосування у циркуляційних системах змащування пристрою контролю поточного агрегатно-фазового стану робочої рідини, для чого на даному етапі роботи був виготовлений його макет (рис. 1).

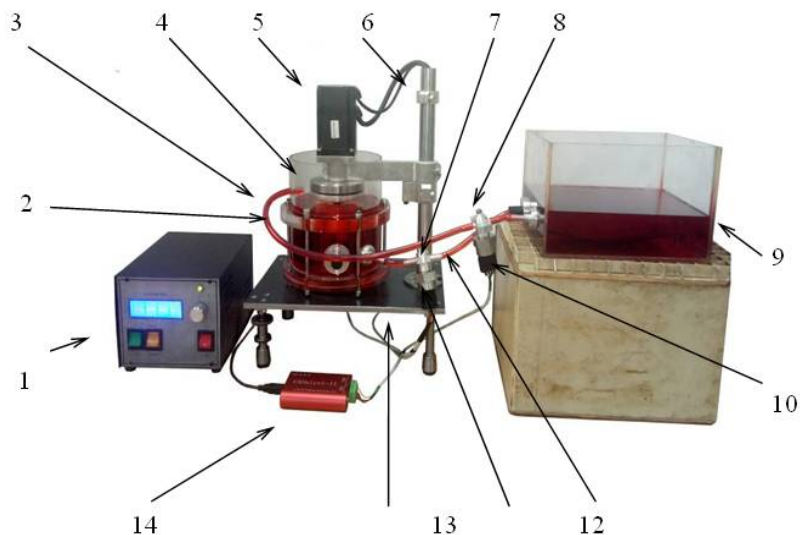


Рис.1. Макет пристрою контролю поточного агрегатно-фазового стану робочої рідини у циркуляційних системах змащування:

1- блок управління; 2-ТМГ; 3- вхідний штуцер з трубопроводом для підводу мастильного середовища; 4-магнітна муфта; 5-електродвигун; 6-поворотний стіл-штатив; 7- штуцерний трійник для вхідного сенсору FPS; 8- штуцерний трійник для вихідного сенсору FPS; 9- камера баку (модель картеру ЕСУ); 10- вихідний багато-параметричний вихідний сенсор FPS; 11- трубопровід для двофазної масло-парогазової суміші з ТМГ в модель картеру ЕСУ; 12- вхідний багато-параметричний сенсор FPS; 13- станина поворотного столу-штатива; 14- аналізатор CANalyst-II

На створеному макеті пристрою контролю поточного агрегатно-фазового стану робочої рідини у циркуляційних системах змащування проводились порівняльні випробування мастильних середовищ різної в'язкості та визначались найбільш чутливі параметри і критерій оптимізації їх поточного агрегатно-фазового стану для реалізації мінімального тертя і зношування трибосистем.

Підготовка до випробувань.

1. Визначається, до якого класу відноситься випробувана речовина (трансмійне, моторне, холодильне, індустріальне масло, змащувально-охолоджуюча речовина, присадка та ін.). За ДСТУ (далі - ТУ) визначаються усі реологічні параметри та експлуатаційні властивості мастильного середовища, котрі заносяться в таблицю робочої програми макету пристрою контролю.

2. Проводиться підготовка макету пристрою контролю поточного агрегатно-фазового стану робочої рідини у циркуляційних системах змащування:

- ретельно протирається попередньо змоченим у розчиннику ганчір'ям камера баку (модель картеру енергосилової установки) і камера трибомолекулярного генератора (ТМГ) двофазної масло-парагазової суміші, що одночасно є насосом нагнітання, та 10-15 хвилин виконується осушування;

- акуратно з невеликою швидкістю заповнюються камери баку та ТМГ до відповідних рівнів попередньо підготовленим випробувальним мастильним середовищем. Після того, як мастильне середовище пройде через трубопровід до штуцерних трійників з вмонтованими вхідним і вихідним вимірювальними багато-параметричними сенсорами FPS, шляхом послаблення відповідних гвинтів, розташованих на верхній частині трійників (рис. 2), видаляється зайве повітря.

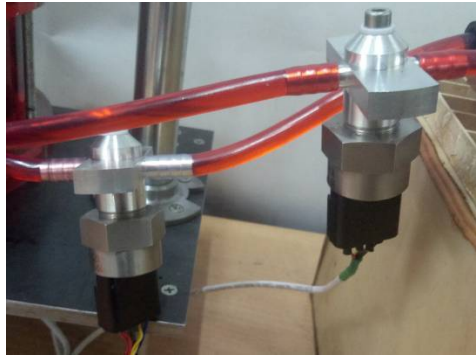


Рис. 2 Зовнішній вигляд штуцерних трійників з вмонтованими вхідним і вихідним вимірювальними сенсорами FPS

3. Після вмикання ПК та завантаження операційної системи запускається спеціалізоване програмне забезпечення «CANPro.exe» адаптеру інтерфейсу шини USB-CAN для аналізатора CANalyst-II (рис. 3).



Рис. 3. Зовнішній вигляд універсального аналізатора CANalyst-II

При запуску програмного забезпечення з'явиться діалогове вікно «Start system», заповнене початковими параметрами, що включають в себе: настройку швидкості передачі, налаштування фільтра (частково сумісні), стандартні рамки\екстерн кадрів\віддалення кадрів\кадр даних передачі і прийому і так далі (рис. 4).

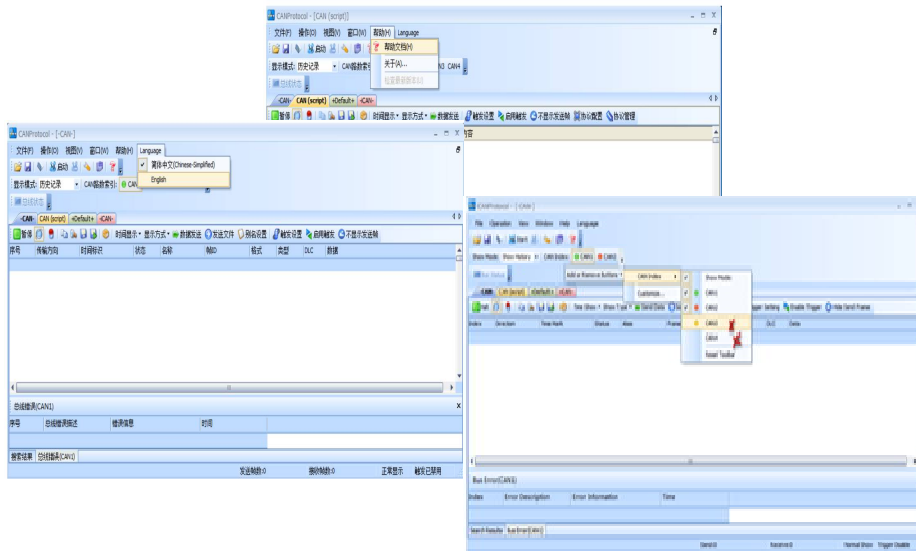


Рис. 4. Інтерфейс програмного забезпечення CANPro

Поточні параметри дослідного мастильного середовища оцінюються спеціалізованими вхідним та вихідним сенсорами FPS 2800B1 (FPS). Сенсор дозволяє одночасно проводити вимірювання в'язкості, щільності, температури та діелектричної проникності мастильного середовища. Калібровані на заводі сенсори FPS 2800B1 (FPS) за стандартами NIST мають високу чутливість та хорошу кореляцію із сучасними лабораторними кваліфікаційними методами вимірювань. В якості чутливого елементу сенсора використовується камертон-механічний резонатор. На точність вимірювання сенсору не впливає стан дослідного середовища (статичне, динамічне при протіканні, чи рідина знаходиться під тиском, що перевищує 5000 фунт/кв. дюйм). Завдяки широкому діапазону робочих температур сенсорів FPS 2800B1 (від -60°C до $+150^{\circ}\text{C}$) ці датчики є привабливими для використання у реальних енергосилових установках.

Проведення перевірки працездатності каналів прийому-передачі сенсорів FPS та адаптера USB-CAN здійснюється шляхом комутації аналізатора CANalyst-II із інтерфейсом USB, при цьому на його лицьовій панелі мигатиме червоний індикатор, і програмне забезпечення відтворить повідомлення з вхідного та вихідного сенсорів FPS по шині CAN (рис. 5). Цей режим роботи використовується в якості поточного монітору щодо стану шини і сенсорів.

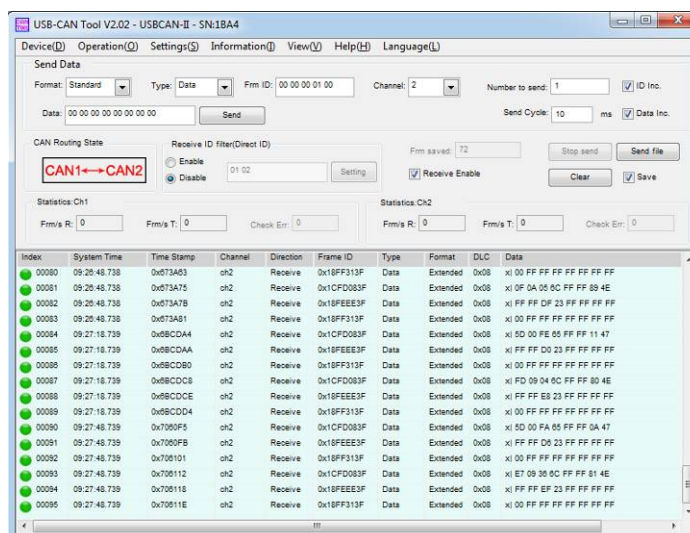


Рис. 5. Інтерфейс програми CANPro під час роботи в режимі приймання-передачі

Проведення випробувань. По закінченню підготовчих робіт виконуються випробування дослідних мастильних матеріалів різної в'язкості з метою визначення найбільш чутливих та ефективних параметрів і критеріїв для подальшого пошуку оптимальних значень поточних характеристик та реалізації подальшого автоматизованого керування агрегатно-фазовим станом в циркуляційних системах змащування реальних машин і механізмів.

До складу макету пристрою контролю поточного агрегатно-фазового стану робочої рідини у циркуляційних системах змащування входить ТМГ мікропухирців. Ротор приладу ТМГ виконує три функції:

- у дифузорних областях контактів генерує мікропухирці у відповідності до адгезійно-гідродинамічної моделі тертя та зношування трибосистем ;
- у конфузних областях через приймальні отвори нагнітає утворену масло-парагазову суміш у камеру баку (модель картеру енергосилової установки);
- у дифузорних областях трибоконтактів ТМГ відбувається мимовільне вакуумне всмоктування масла, що стікає з камери баку по відповідному трубопроводу через вихідний трійник з сенсором FPS.

Таким чином, трибоконтакт ТМГ, окрім генерації мікропухирців, виконує функцію безконтактного трибомолекулярного насосу, забезпечуючи циркуляцію дослідного мастильного середовища у різних фазових станах – від однорідного рідинного до високодисперсного мікропухирцевого стану.

Наприклад: при збільшенні лінійної швидкості обертового модельного валу ротору ТМГ до 0,2 м/с дослідне масло (АМГ-10) тривалий час знаходиться в прозорому стані. Подальше збільшення лінійної швидкості (до 0,3 м/с) масло починається мутніти, візуально спостерігається накопичення мікропухирців. Після досягнення швидкості 0,5 м/с 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 насосу.

В ході численних випробувань масла АМГ-10 зміна фазового стану (від рідкого до оптимально насиченого пухирцями) оцінювалася як візуально так і за визначеними поточними критеріями і параметрами вхідного сенсору FPS при певних значеннях швидкості обертання ротору ТМГ. Найбільш чутливим критерієм 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). В процесі насичення масла масло-парагазовими трибокавітаційними мікропухирцями діелектрична проникність природньо 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. (Розмірність: кінематична в'язкість при даній температурі ($\text{м}^2/\text{с}$) діелектрична проникність (безрозмірна величина) та щільність $\text{кг}/\text{м}^3$ – [$\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$]).

Таким чином, при проведенні лабораторних випробувань в залежності від призначення масла, знаючи параметри за (ТУ) та з огляду на його поточні параметри (в'язкість, щільність та діелектрична проникність) необхідно експериментально вибирати оптимальний робочий діапазон швидкості обертів ТМГ для даного типу мастильного середовища (рис. 6-7).

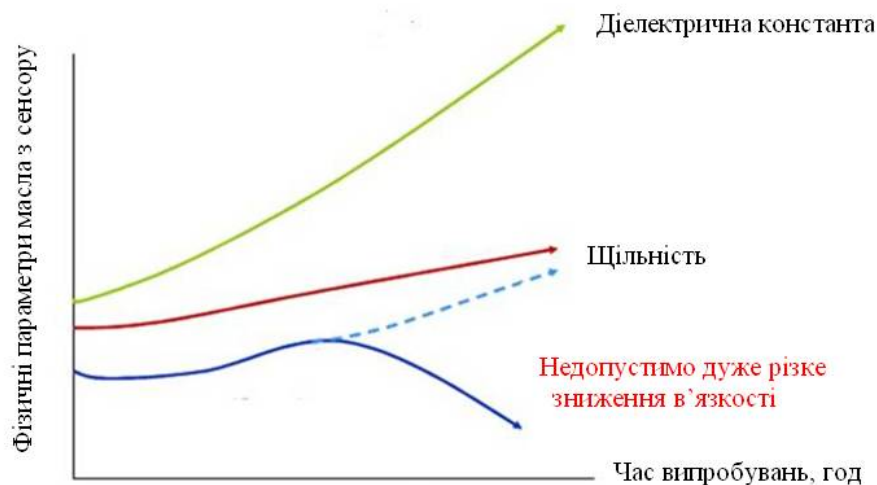


Рис. 6. Не оптимізовані поточні параметри масла АМГ-10

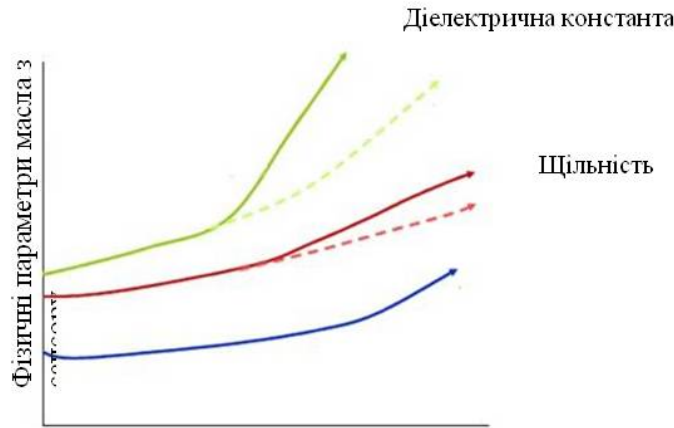


Рис. 7. Поточні параметри масла АМГ-10

Оптимізація параметрів проводиться шляхом отримання інформації з відповідних сенсорів (рис. 2) та її обробки спеціалізованим програмним забезпеченням (рис. 8) щодо поточного агрегатно-фазового стану мастильного середовища безпосередньо на виході та вході в ТМГ (в зоні нагнітання та всмоктування масло-парогазової суміші).

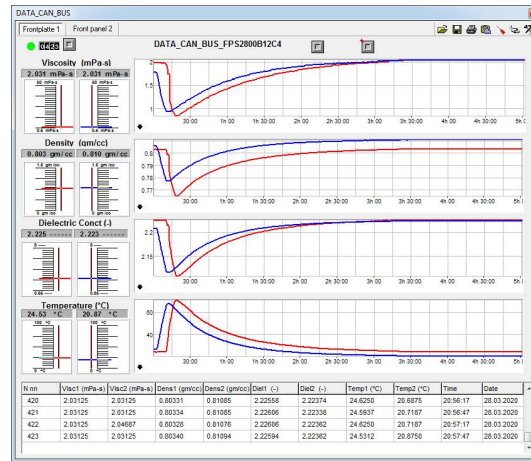


Рис. 8. Інтерфейс розробленого спеціалізованого програмного забезпечення DATA_CAN_BUS

Обробка результатів. Після випробувань отримані дані експортуються у вигляді таблиці в Microsoft Excel для подальшої обробки, побудови графіків та аналізу (рис. 9).

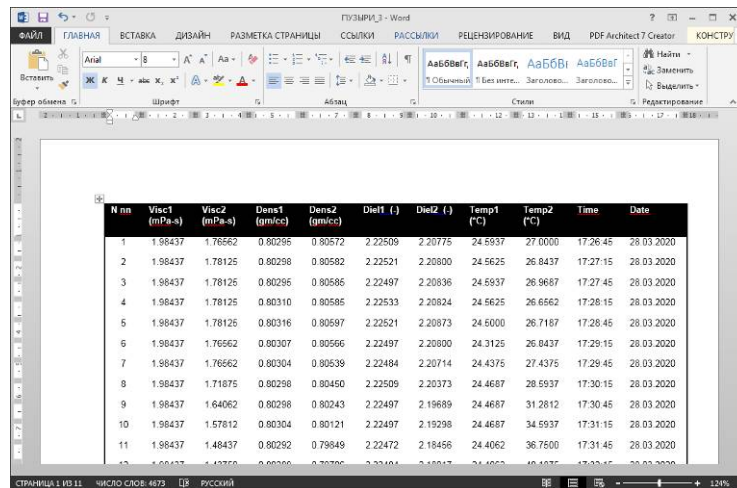


Рис. 9. Поточні дані, що визначені за допомогою програми DATA_CAN_BUS та експортуються у вигляді таблиці в Microsoft Excel

Динаміка режимів роботи та агрегатно-фазового стану того чи іншого мастильного середовища визначається побудовою графіка, на осі абсцис якого відкладається час роботи, а на ординаті – динамічна в'язкість; щільність; діелектрична проникність та температура.

Висновок. Дана методика дозволяє визначати оптимально ефективний поточний агрегатно-фазовий стан, при котрому реалізується мінімальне тертя та зношування для низки серійних товарних мастильних матеріалів різної в'язкості, що використовуються у реальних трибосистемах енергосилових установок.

Література

1. Увеличение ресурса редукторов ГТД с использованием двухфазной масло-воздушной смеси / И. Ф. Кравченко, В. Г. Ананьев, П. А. Колесник, А. Б. Единолич, А. Ф. Аксенов, А. У. Стельмах // Наукові нотатки. – 2013. – № 42. – С. 129–133.
2. Бошняков Б.В. О перспективах применения микропузырьковых газожидкостных сред в технологических процессах // Изв. ВУЗ. Физика. – 2005. –Т.48. № 11– С. 49-54.
3. Elrod H. G. A Cavitation Algorithm / Elrod H. G. // ASME Journal of Lubrication Technology. – 1981. – Vol. 103. – P. 350–354.
4. Floberg L. Cavitation Boundary Conditions with Regard to the Number of Streamers and Tensile Strength of the Liquid / L. Floberg // Cavitation and Related Phenomena in Lubrication, ImechE, 1974. – P. 31–36.
5. Nakano T. (2011). Dynamics: Liberty physics textbook series (2). Maruzen.
6. Takahashi M. (2009). Study on micro-bubble and nanobubble, http://unit.aist.go.jp/emtech-ri/26env-_uid/pdf/.
7. Zimmerman W.B. J, Tesař V.: «Bubble generation for aeration and other purposes», European Patent EP2081666, granted 19th Oct. 2011, published 26th Sept. 2012.
8. Hosoda E. (2011). Meeting for the study: Improvement of sewage treatment population diffusion rate for reduction of the water pollution by the life drainage. takahashi.pdf. United Nations (2003). World water development report.
9. Звіт з НДР №989-ДБ15 «Визначення наукових основ та принципів виробництва високоефективних двофазних масло-парогазових мастильних матеріалів», № державної реєстрації 0115U002465, Київ: НАУ, 2015. – 97 с.
10. 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.
11. Стельмах А. У. Влияние фазового состояния смазки на эффективность трибосистем с ЭГД-контактом / А. У. Стельмах, К. К. Бадир, Д. Д. Хуссейн // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми хімотології», (Київ, 24–28 вересня 2012 р.) / Нац. авіац. ун-т. – Одеса : Астропринт, 2012. – С. 239–244.