

УДК 621.891

М.І. Суханов, М.М. Коноваленко, Д.В. Лебединський, А.Г. Селіверстов

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИКИ МОДЕЛЮВАННЯ СУМІСНОСТІ МОТОРНИХ ОЛИВ З МАТЕРІАЛАМИ ТРИБОСИСТЕМ

У статті запропонована методика оцінки сумісності моторних олив, яка розроблена на основі теоретичного системного аналізу та фізичного моделювання. Застосування цієї методики при виборі моторних олив скорочує час і вартість експлуатаційних випробувань.

**Ключові слова:** (моторні оливи, трибологічні процеси, властивості, дослідження, зношування).

### Вступ

Розвиток економіки України невід'ємно пов'язаний із розвитком комерційного транспорту в нашій країні. Успішне економічне процвітання вітчизняних автомобільних транспортних компаній напряму залежить від надійності і довговічності техніки. Розглядаючи дану проблему на сучасному рівні з різних позицій, як експлуатації, так і ремонту, необхідно відзначити головне – що такі важливі критерії як надійність і довговічність, а також експлуатаційні витрати залежать насамперед від якості моторної оливи. Протягом вже тривалого часу відслідковується чітка тенденція установки на комерційних автомобілях дизельних двигунів, внаслідок їх більших експлуатаційних та техніко-економічних показників.

### Результати досліджень

На ринку України з'явилася велика кількість імпортованих і вітчизняних моторних олив, і, судячи з рекламним даним, усі вони володіють однаково гарним рівнем якості, що не дозволяє судити про їхні дійсні особливості роботи. Існують різні методи випробувань цих олив, починаючи від лабораторних і закінчуючи експлуатаційними, які поєднуються в загальне поняття раціонального циклу випробувань. Скорочення часу і вартості таких випробувань є актуальною задачею сучасної науки.

Моторна олива в ДВЗ, як в складній динамічній системі, є його конструктивним елементом. Моторна олива визначається змістом і складом у ньому пакета присадок. Сучасні оливи мають стандартний пакет присадок, що забезпечує їхню сумісність у двигуні одну з одною (міжнародні вимоги API) і відрізняються характерною для виробника присадкою, що і відповідальна за особливості експлуатації оливи.

Найбільш важливі, з точки зору довговічності експлуатації двигуна, є трибологічні властивості моторної оливи. Інші показники якості моторної оливи: антиокислювальна (термоокислювальна) ста-

більність, миюче-диспергуюча здатність і антикорозійні властивості в більшій чи меншій ступені можуть впливати на протизносні та протизадирні властивості оливи та стан поверхонь тертя. Наприклад, від миюче-диспергуючих властивостей залежить такий критерій довговічності як полірування циліндрів, від термоокислювальної здібності – відкладення та термонапруженість основних трибосистем (ТС) ДВЗ. Але найважливіше те, що вони впливають на терміни зміни оливи в двигуні.

Ефективність та інтенсивність трибологічних процесів, що відбуваються на поверхнях тертя деталей ТС, залежать від фізичних і реологічних властивостей, хімічного складу, енергетичної структури, як поверхневого шару, так і моторної оливи. Результатом їх взаємодії є, так названа, вторинна структура – ВС [1] (або «третє» тіло), що і буде об'єктом зношування. Склад тієї чи іншої присадки в оливі, її концентрація, істотно впливає на процес зношування деталі, про що не можна судити по категорії експлуатації оливи. Тому у великих фірм виробників автотракторної техніки (MB, VW, MAN, Mack Truck, GM, Ford, Volvo, Caterpillar, Cummins, Renault та інших) існують свої специфікації, де моторні оливи підбирають під конкретний двигун і визначають терміни його заміни. У українських виробників таких напрацювань немає.

Як показує практика, вибір моторної оливи за трибологічними характеристиками, повинний визначатися його сумісністю з матеріалами ТС ДВЗ. Сумісність мастильного матеріалу, як складеного конструкційного елемента ТС, що складають ДВЗ, визначає зносостійкість, задиростійкість робочих поверхонь і механічні втрати на тертя, а отже, надійність і довговічність ТС і ДВЗ у цілому.

Аналіз літературних джерел показує, що такої методики оцінки сумісності моторних олив з матеріалами ТС ДВЗ, заснованої на послідовних етапах раціонального циклу випробувань та що включає лабораторні випробування, немає. Тому розробка

методики оцінки сумісності моторної оливи з матеріалами основних вузлів тертя ДВЗ є актуальною та важливою задачею.

Умовою для таких випробувань є застосування методики фізичного моделювання умов роботи моторної оливи у ДВЗ [2]. Методика фізичного моделювання заснована на теорії системного аналізу. Вхідний параметр цієї моделі – тип моторної оливи, вихідні – швидкість зношування, коефіцієнт тертя, температура, час приробляння. У результаті перерахування за допомогою фізичної моделі можна оцінити швидкість зношування і механічні втрати в трибосистемах реального ДВЗ. Необхідною умовою методики являється відповідність конструкційних матеріалів і видів зношування в модельних ТС матеріалам ТС двигуна. Достатньою умовою є відповідність кінематичних схем модельних зразків реальним вузлам тертя ДВЗ (при дотриманні правила розбивки трибовузлів на прямі і зворотні з обліку масштабового фактора).

Для рішення такої складної задачі з використанням системного підходу потрібно врахувати 4 основні положення, які можна звести до наступного [3]:

- виявляється ТС, як сукупність взаємозалежних елементів;
- визначається структура ТС (вузла ковзання) як відкритої динамічної дисипативної системи;
- встановлюються входи і виходи ТС;
- визначається технічна функція ТС.

Встановлення зв'язку між зовнішніми впливами на ТС і їхніми результатами є основною метою трибологічних досліджень. Визначається вплив складу і структури системи на знос і опір тертя з урахуванням властивостей деталей, що сполучаються, і навколишнього середовища.

Умови роботи моторної оливи, як складового елемента ТС, залежать від:

1. Конструктивно технологічних особливостей двигуна, а саме:

- літрової потужності двигуна і ємності системи змащення. (проаналізувавши відношення цих двох показників, можна сказати про здатність системи змащення виконувати свої основні функції. Якщо обсяг мастильної системи буде недостатнім для даного ступеня форсування двигуна, то моторна олива буде занадто рано втрачати свої експлуатаційні якості, а робота двигуна буде скрутною);
- особливостей процесу сумішоутворення і горіння в двигуні, (що можна оцінити по відношенню зміни тиску згоряння до кута повороту колінчатого вала у ВМТ і питомій витраті палива. Рішення питань про організацію руху робочої суміші істотно

впливають на такі параметри двигуна, як “жорсткість”, швидкість згоряння суміші, коефіцієнт тепловикористання, коефіцієнт наповнення, що у свою чергу, впливають на теплонапруженість деталей двигуна і ступінь окислювання моторної оливи);

- ступеню зносу ТС двигуна, (яку побічно можна оцінити по витраті оливи на чад, падінню тиску в масляній системі. При збільшенні зазору в газовому стику гільза-кільце в картер двигуна буде попадати більша кількість високотемпературних газів, і на деталях відкладатися більша кількість продуктів окислювання оливи. Підвищений зазор у підшипниках колінчатого вала підвищить небезпека заклинювання двигуна, а в кращому випадку – підвищений знос вкладишів через неможливість утворення гідродинамічного клина);

- матеріалів, що використовуються при виготовленні ТС двигуна, способів їхньої обробки, особливостей їхньої конструкції. (Це визначається сумісністю моторної оливи з матеріалами ТС двигуна. Конструктивні рішення, прийняті при створенні двигуна, наприклад, кількість і форма поршневих кілець, відношення довжини шатуна до радіуса кривошипа, розташування циліндрів двигуна, способи обробки робочих поверхонь тертя, забезпечення допусків і посадок істотно впливають на процес роботи моторної оливи);

2. Умов експлуатації:

- температури навколишнього середовища. (цей показник впливає, в основному, на в'язкість мастильного матеріалу, тобто прокачиваемість моторної оливи при низьких температурах і теплонапруженість підшипників ковзання колінчатого вала при високих температурах);

- запиленість повітря, що впливає на ступінь забруднення оливи і отже, на інтенсивність абразивного зношування деталей двигуна;

- якості палива, особливо відсотка змісту в ньому сірки. (при збільшенні її змісту в паливі різко підвищується корозійний знос робочої поверхні гільзи циліндра й окислювання моторної оливи);

- вантажно-швидкісного режиму і культури експлуатації, (що насамперед впливає на питому витрату палива, а отже, і на інтенсивність процесів окислювання моторної оливи на стінках циліндра в двигуні. Навантаження і швидкості ковзання в ТС ДВЗ впливають також на несучу здатність масляної плівки і визначають у них режими змащення);

Значна частина трибологічних досліджень стосується впливу зовнішніх факторів на довговічність і ефективність дії мастильного матеріалу. ТС може змінювати свої функціональні характеристики під час роботи, що і відбувається в ДВЗ при «старінні» моторної оливи під дією окислювання його продук-

тами неповного згоряння паливно-повітряної суміші і високотемпературних потоків газів, які дрослюють в картер через поршневі кільця з високими швидкостями. При цьому моторна олива поступова утрачає свої властивості що змазують і миють, при цьому зростає його корозійна активність, що приводить до зниження довговічності ДВЗ і його вихідних параметрів.

ДВЗ є найскладнішою системою, яку за допомогою теорії системного аналізу можна розбити на більш прості – ТС (наприклад, циліндро-поршнева група, газорозподільний механізм), які визначають функціональні характеристики двигуна в цілому. Структура кожної з ТС складається з наступних елементів: рухливого елемента (кільце, вал), нерухомого елемента (гільза, штовхальник, вкладиш), мастильного матеріалу (моторна олива) і навколишнього середовища (паливно-повітряної суміші, картерних газів, абразивних часток).

Як показує аналіз конструкцій і досвід експлуатації дизельних автотракторних ДВЗ будь-яких конструктивних виконань, його надійність і довговічність обмежують чотири ТС, працездатність яких залежить від якості моторної оливи, як конструктивного елемента двигуна.

Відповідно до результатів експертного опитування фахівців і аналізу відповідної літератури, вони розставлені по ступені впливу на величину моторесурса в наступному порядку:

- верхнє компресійне поршневе кільце – гільза циліндра;
- шийку колінчатого вала – вкладиш;
- кулачок приводного вала форсунки (розподільного вала) – штовхальник (клапан);
- поршневе кільце – поршень.

На підставі цього як предмет дослідження були обрані два перші з перерахованих вище вузли тертя, що складають разом з моторною оливою ТС, чотирьохтактного дизельного ДВЗ. А об'єктом дослідження є трибологічні процеси сумісності моторних олив з матеріалами цих ТС.

Вибір предметів дослідження проводиться з умови максимального наближення умов роботи модельних ТС до умов роботи реальних вузлів тертя ДВЗ, що є сутністю фізичного моделювання. Перемінним фактором моделі являється тільки марка моторної оливи. Параметри навантаження, масштабний фактор, матеріали і витрата мастильного матеріалу залишалися незмінними.

Деталі циліндро-поршневої групи працюють під дією високих тисків газів, сил інерції і температури в умовах недостатнього змащення. Максимальний тиск згорання для двигунів із примусовим запаленням з турбонаддувом досягає  $12 \div 14 \text{ МН/м}^2$ , а

питоме навантаження за першим поршневим кільцем наприкінці такту стиску-розширення складає  $9-11 \text{ МН/м}^2$ . Аналіз середніх температур на поверхнях гільзи ( $220 - 240 \text{ }^\circ\text{C}$ ), кільця ( $230 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ) і бокової поверхні поршня (до  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ) у верхній мертвій точці (ВМТ) показують, що при таких температурах відбувається інтенсивне окислювання мастильного матеріалу. Олива що попадає на стінки гільзи і залишається в канавках поршня і між поршневими кільцями, є середовищем, у якій відбувається постійний теплообмін, однак через низьку теплоємність оливи в процесі роботи воно може утратити свої мастильні здібності, що приводить до процесу западання поршневих кілець. Труднощі підведення змащення до деталей циліндро-поршневої групи (ЦПГ) відомі. Унаслідок своїх конструктивних особливостей ці деталі, як правило, змазуються лише шляхом розбризкування оливи. Найбільший знос гільзи спостерігається в місці зупинки першого компресійного кільця у ВМТ (швидкість дорівнює нулю). Такий факт порозумівається порушенням гідродинамічного режиму змащення між кільцем і гільзою через падіння швидкості кільця до нуля, росту температури і різкого зростання навантаження на кільця від тиску газів. Механізм зношування пари гільза – кільце містить у собі процес зношування пари кільце - поршнева канавка. Процес зношування ЦПГ збільшується таким явищем, як дроселювання високотемпературних токсичних газів з великою швидкістю в зазорах гільза – кільце – поршень, високочастотною вібрацією поршневого кільця від сумарної дії сил тертя, тиску газів, сили інерції і сили пружності кільця. При зниженні температурного режиму двигуна, швидкість зношування робочої поверхні гільзи циліндра збільшується. Зазначене спостереження відбувається через зміст у продуктах неповного згоряння палива парів води, двоокису вуглецю і продуктів окислювання сірки, при з'єднанні яких з молекулами води (що скондесувалася на стінках циліндрів) утвориться сірчана, сірчиста, азотна і вугільна кислоти. Ці агресивні з'єднання можуть при контакті з металевими поверхнями ініціювати процеси електрохімічної корозії.

Основним видом зношування робочої частини внутрішньої поверхні гільзи є абразивний і корозійно-механічний. Абразивні частки, що потрапили в ДВЗ із навколишнього середовища, викликають ріст зносу у верхній частині гільзи, кілець, порушення гідродинамічного режиму змащення між поверхнями кільця і гільзи циліндра.

Підшипники колінчатого вала в основному працюють в умовах гідродинамічного режиму змащення при максимальних температурах, що досягають  $130 - 150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Отже, антифрикційні і протизносні

властивості оливи визначаються в цій парі в основному тільки його в'язкістю. Порушення гідродинамічного режиму можливі в процесі пуску, при миттєвих перевантаженнях, а також при зниженні в'язкості оливи, порушенні її подачі. У процесі нормальної роботи в гідродинамічному режимі при визначених кутах повороту колінчатого вала, як правило, відбуваються небезпечні зближення шийки з вкладишами. При наявності стабільного гідродинамічного режиму знос поверхонь тертя не виключається, оскільки тиск, що розвиваються масляним клином, у 2,5 – 3 рази перевищують середній тиск зовнішніх сил

(до 9 – 13 МПа). У зв'язку з цим можлива пластична деформація приповерхніх шарів, наявність масляної плівки визначає поява різниці потенціалів між шийками і вкладишами. Швидкість обертання колінчатого вала на холостих обертах близька до значення 0,5 м/с. Надійність роботи підшипникових вузлів у значній мірі визначається якістю оливи. Крім правильно обраної в'язкості оливи і його положистості в'язкісно-температурної залежності, чимале значення мають його трибологічні й антикорозійні властивості.

У відповідності з теорією системного аналізу, усі фактори по ступені впливу на досліджуване явище умовно поділяються на визначальні і не визначальні, останні хоча і впливають на процес але для даної задачі їх розглядом зневажають.

Виходячи з аналізу літератури, до числа визначальних факторів, що обумовлюють трибологічні процеси у вузлах тертя ДВЗ, відносять:

- фізико-механічні властивості матеріалів деталей, що сполучаються;
- фактори зовнішнього механічного впливу, тобто навантаження і швидкість відносного переміщення;
- трибологічні властивості моторної оливи і його витрата у вузлі тертя;
- температура поверхні тертя і теплонапруженість двигуна;
- геометричні розміри деталей, шорсткість поверхні;
- якість застосовуваного палива;
- кількість і розмір абразивних часток що надходять у вузол тертя.

При модельних випробуваннях температура поверхонь тертя визначається навантаженням, швидкістю ковзання і витратою оливи через ТС. Теплонапруженість ДВЗ і якість палива впливають, насамперед, на терміни зміни моторної оливи, що визначаються в цьому випадку термоокислювальною стабільністю і миючим потенціалом оливи. Терміни

заміни встановлюються при експлуатаційних іспитах за обраними показниками якості моторної оливи. За інших рівних умов, при порівняльних випробуваннях моторних оливи, у випадку своєчасної заміни оливи в двигуні факторами теплонапруженості, якістю палива і наявністю абразивних часток можна зневажити, тому що вони залишаються незмінними в процесі експлуатації для всіх типів моторних оливи.

При розробці фізичної моделі роботи основних вузлів тертя ДВЗ у режимі граничного змащення використовувався критеріальний підхід, заснований на теорії розмірностей. Математичний вираз приведено у роботі [4]. Визначальними параметрами моделі являються: навантаження, масштабний фактор (площа тертя та об'єм матеріалу тертя), матеріал та витрата моторної оливи в ТС.

У результаті проведеного аналізу умов роботи 2-х пар тертя була складена табл. 1, що відбиває умови фізичного моделювання.

Класифікація вимог трибосопрядень двигуна на прямої і зворотні [5], особливості їхнього взаємного розташування і кінематичних схем виконано в табл. 1. З таблиці видно, що пари гільза – поршневе кільце і колінчатий вал - вкладиш є нижчою кінематичною парою.

Даний розподіл на вищі і нижчі кінематичні пари можна робити за коефіцієнтом взаємного критерія –  $K_{вз}$ . Пари гільза – поршневе кільце є зворотною парою по геометрії, а пари вкладиш – колінчатий вал є прямою парою.

При дослідженні зворотно-поступального руху в лабораторних умовах кінематичну пару гільза – кільце можна звести до моделі кільце – кільце з обертальним рухом.

Виходячи з цих положень, призначалися кінематичні схеми модельних вузлів тертя.

## Висновки

У розробленій фізичній моделі є ряд недоліків, через неможливість і недоцільність (через надзвичайну складність) відтворення всіх тонкостей робочого процесу в ТС ДВЗ. Керуючись положеннями німецького промислового стандарту DIN 50 322, можна сказати, що ніяке моделювання процесів зношування деталей двигуна не може відтворити все різноманіття факторів, що обумовлюють у сукупності знос і вплив на нього властивостей оливи, що не залишаються незмінними, а погіршуються в міру його старіння. Розроблена фізична модель не враховує вплив продуктів згорання палива на процес окислювання, хоча температури робочих поверхонь зразків відповідають температурам поверхні ТС ДВЗ, які модулюються.

Вона не може врахувати повною мірою впливу влучення пилу в моторну оливу через складність моделювання і класифікації абразивних часток у повітрі, витрати моторної оливи на чад. Тобто, усі ці фактори знижують терміни заміни моторної оливи, підвищують напруженість його роботи, тому тест на

сумісність має мету порівняльного аналізу запропонованих марок оливи за результатами першого етапу, свідомо обмовляючи, що система фільтрації повітря і масляної системи, технічний стан ДВЗ близько до ідеального.

Таблиця 1

Умови фізичного моделювання процесів тертя та зношування пар тертя ДВЗ

ТС двигуна	Гільза циліндра – перше поршневе кільце	Шийка колінчастого валу – вкладиш
Вид руху	Зворотно-поступальний, що супроводжується високочастотними коливаннями кільця відносно поверхонь гільзи і поршня	Обертальний при коливальних рухах валу, викликаних його нестійкістю в підшипникові
Максимальне питоме навантаження у вузлі тертя, Мпа	10	10
Швидкість відносного переміщення, м/с	0,2 – середня в зоні граничного змащення робочої поверхні гільзи – кільця	1,5 – при мінімально стійких обертах колінчастого валу
Матеріали деталей вузлів тертя ДВЗ	СЧ модифікований – ВЧ+тв.хром	Сталь 45 – бронза свинцево-олов'яниста
Класифікація вузла тертя за матеріалами та геометрією, коефіцієнт взаємного перекриття	Зворотна пара за геометрією; $K_{ВЗ} = 0,016$	Пряма пара; $K_{ВЗ} = 0,33$
Кінематична схема моделюючої пари, коефіцієнт взаємного перекриття	Кільце-кільце; $K_{ВЗ} = 0,25$	Кільце-кільце; $K_{ВЗ} = 0,33$
ТС двигуна	Гільза циліндра – перше поршневе кільце	Шийка колінчастого валу – вкладиш
Навантаження в модельній ТС, Н	1500	900
Швидкість ковзання в модельній ТС, м/с	0,5	0,5
Витрати оливи в модельній ТС, кг/с	$7,75 \cdot 10^{-8}$	$7,75 \cdot 10^{-8}$

Безумовно, на сьогоднішній день, остаточними і самими об'єктивними показниками є результати експлуатаційних випробувань, але використовуючи запропоновану методику, можна оцінити трибологічні властивості оливи і ресурс реальних ТС ДВЗ зі значною економією матеріальних і витрат часу.

### Список літератури

1. Костецкий Б.И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения, смазочного действия и изнашивания / Б.И. Костецкий // *Трение и износ.* – 1980. – Т.1, № 4. – С. 622-637.
2. Шаповалов В.В. Применение методов физическо-го моделирования / В.В. Шаповалов // *Трение и износ.* – 1988. – Т.9, № 2. – С. 280-285.

3. Czihos H. *Tribology – a system approach to science and technology of friction, lubrication and wear.* Elsevier Publ. Co. Amsterdam, 1978.

4. Войтов В.А. Конструктивная износостойкость узлов трения гидромашин. Ч. II. Методологии моделирования граничной смазки в гидромашинах: монограф. / В.А. Войтов. – Х.: Центр Леся Курбаса, 1997. – 152 с.

5. Войтов В.А., Яхно О.М., Аби Сааб Ф.Х. Принципы конструктивной износостойкости узлов трения гидромашин: монограф. / В.А. Войтов, О.М. Яхно, Аби Сааб Ф.Х. – К., 1999. – 192 с.

Надійшла до редколегії 5.06.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.А. Войтов, Національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка, Харків.

### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОВМЕСТИМОСТИ МОТОРНЫХ МАСЕЛ С МАТЕРИАЛАМИ ТРИБОСИСТЕМ

М.И. Суханов, М.М. Коноваленко, Д.В. Лебединский, А.Г. Селиверстов

*В статье предложена методика оценки совместимости моторных масел, которая разработана на основе теорий системного анализа и физического моделирования. Применение этой методики при выборе моторных масел сокращает время и стоимость эксплуатационных испытаний.*

**Ключевые слова:** *моторные масла, трибологические процессы, свойства, исследования, изнашивания.*

**RESEARCH OF METHOD OF DESIGN OF COMPATIBILITY OF MOTOR OILS  
WITH MATERIALS OF TRIBOSYSTEM**

M.I. Sukhanov, M.M. Konovalenko, D.V. Lebedinskiy, A.G. Seliverstov

*The method of estimation of compatibility of motor oils, which is developed on the basis of theories of analysis of the systems and physical design, is offered in the article. Application of this method at the choice of motor oils abbreviates time and cost of operating tests.*

**Keywords:** *motor butters, frictional processes, properties, researches, wears.*

---