

Диха О.В.,*
Аулін В.В.,**
Лисенко С.В.,**
Гриньків А.В.**

*Хмельницький національний університет,
 м. Хмельницький, Україна,
 ** Центральноукраїнський національний
 технічний університет,
 м. Кропивницький, Україна
 E-mail: tribosenator@gmail.com

ВПЛИВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ НА РЕЖИМ ЗМАЩУВАННЯ І ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ДЕТАЛЕЙ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ АВТОМОБІЛІВ

УДК 621.891:631.31:631.37

DOI:10.31891/2079-1372-2018-90-4-41-53

Встановлено, що в реальних умовах експлуатації характерним є одночасна дія різних видів зношування, співвідношення яких залежать від конструкції, технології виготовлення деталей, якості використовуваних мастильних матеріалів та навантаження тертям. При описі процесів зношування вважають, що швидкість зносу залежить від виду мащення, але для оцінки зносостійкості деталей і спряжень дизеля, необхідно знати увесь спектр закономірностей розвитку та деградації процесів і станів. Показано, що для оцінки якості мастильних матеріалів на основі їх експлуатаційних властивостей доцільним є використання схеми випробування: чотирикулькова піраміда, конус-три кульки та пристроїв для нагріву оливи і вимірювання ширини сліду зносу конічної поверхні. З метою оптимізації складу присадки в моторну оливу використано математичне планування експерименту і розроблено методику його проведення за рототабельним плануванням другого порядку. За проведенням математичним плануванням експерименту отримано регресійну математичну модель інтенсивності зношування, визначено оптимальні параметри: вміст присадки – 2,2 %; температура мастильного середовища – 50°C; контактний тиск – 10МПа та здійснено перевірку моделі на адекватність.

Ключові слова: дизельні двигуни, режим змащення, експериментальні випробування, зносостійкість, планування факторного експерименту.

Вступ

Жорсткі умови експлуатації автомобілів у сільськогосподарських виробництвах (СГВ) приводять до того що, ресурс їх дизелів складає 26 .. 47 %, а знос деталей збільшується в 2,0 ... 5,0 разів у порівнянні з використанням автотранспортної техніки (АТТ) в звичайних умовах експлуатації. Величини швидкостей зносу основних деталей спряжень дизелів при повільній та швидкій зміні їх стану подано в табл. 1.

В таких умовах експлуатації характерним є одночасна дія різних видів зношування, співвідношення яких залежать від конструкції, технології виготовлення деталей, якості використовуваних мастильних матеріалів та навантаження тертям. При описі процесів зношування зазвичай вважають, що швидкість зносу залежить, в основному, від режиму мащення та напрацювання, але щоб адекватно протистояти втраті працездатності деталей і спряжень дизеля, необхідно знати увесь спектр закономірностей розвитку та деградації процесів і станів.

Аналіз попередніх досліджень

Дослідження А.Г. Кузьменка [1, 2], О.В. Дихи [3 - 5], В.В. Ауліна [6 - 13], А.Т. Кулакова [14], С.В. Путинцева [15, 16], Л.І. Погодаєва [17], В.В. Салміна [18], F.A. Davis, S. Korcet, R.A. Stanly та ін. підтверджують про необхідність створення моделей процесів тертя та зношування і дослідження закономірностей взаємодії спряжень деталей з оливою, врахування змін фізико-хімічних характеристик, властивостей та механізму впливу оливи в процесі експлуатації на зношування робочих поверхонь деталей. Разом з тим слід зауважити, що в науковій літературі недостатньо відображено питання підвищення зносостійкості трибоспряжень деталей дизелів і моторної оливи модифікуванням різними способами [19]. Особливу увагу викликають дослідження розвитку процесів і станів їх самоорганізації та самокерування [17], оскільки процеси при цьому можуть бути різними за природою і характером прояву, то їх закономірності потребують подальших ретельних досліджень. Способи керування процесами тертя та зношування і реалізація ефекту самоорганізації дозволяють спряженням деталей і дизелю в цілому в екстремальних умовах зберігати працездатність [20] і реалізувати стан квазібеззношуваності. Нерівномірний знос гільз циліндрів обумовлює підвищене зношування усіх деталей ЦПГ [21]. Усунення такого характеру зносу значно поліпшить умови роботи деталей дизелів і підвищить їх зносостійкість і надійність [10,11]. Серед факторів, що суттєво впливають на знос гільзи циліндрів і поршневих кілець, є три основні: тиск, швидкість руху і температура в кожній точці поверхні тертя. Ці фактори змінні вдовж твірної циліндра і

здійснюють відповідний вплив на зношування його поверхні. Не можна відкидати і правильну організацію процесів мащення та підбір оптимального сорту оливи [22]. Сучасні оливи є складними, оскільки можуть містити до 30 % різних присадок і добавок, що забезпечують поліпшення протизносних, протизадирних, протипінних, протикорозійних, протіокислювальних та інших властивостей [9, 10]. Розглядаючи процеси зношування спряжень деталей дизелів слід звернути увагу на режим тертя, оскільки деталі по різному зношуються при різних режимах тертя [13]. У процесах тертя, мащення і зношування беруть участь поверхневі шари (ПШ) деталей і плівки оливи різної товщини. Властивості моторних оливи й активних ПШ металу безперервно змінюються [9 - 11]. На межі поділу "метал-олива" відбуваються складні фізико-хімічні процеси, що впливають на структуру матеріалу деталей і їх довговічність. Слід також зазначити, що спряженні "гільза циліндра-поршневе кільце" в основному знаходиться в умовах граничного тертя [1, 2, 9, 10]. При цьому під впливом високої температури, підвищеного навантаження і зворотнопоступального руху гідродинамічна плівка оливи стає тонше 2 мкм і закономірності рідинного мащення порушуються. Коефіцієнт тертя в таких умовах залежить не від в'язкості оливи, а від наявності в ній полярно-активних компонентів. Одночасно змінюються властивості робочих поверхонь деталей через розвиток процесів пластифікування, окрихчування, квазірідкого стану, самоорганізації [7] та ін. При цьому мастильна дія граничних шарів визначається здатністю забезпечувати ковзання, зниження сил молекулярної адгезії і пластифікацію поверхонь та можливостей утворення плівки фізичної адсорбції і хемосорбції [7]. Виявлено здатність усіх плівок до саморегенерації при зберіганні зовнішніх умов тертя [8]. Їх товщина і міцність залежить від хімічного складу моторної оливи і присадок до неї, властивостей поверхні тертя і зовнішніх умов. Щодо товщини граничних шарів єдиної думки не існує. За деякими даними вона складає від частки мікрометра до декількох його десятків.

Взаємодію поверхонь деталей при граничному терті можна розглядати як взаємодію випадкових коливальних механічних полів. Це приводить до середньо- і високошвидкісного імпульсного пружного і непружного деформування локальних мікрооб'ємів. Зазначимо, що незважаючи на велику гомогенність орієнтовної пластичної деформації тонкого ПШ, його руйнування відбувається негетогенно. Як правило, руйнування ВС [7], що утворюються з вихідного матеріалу шляхом його структурної перебудови і взаємодії із оливою, починається і розвивається в локальних областях матеріалу ТЕ з розвинутими недосконаlostями і мікроспотвореннями, які є концентраторами напружень. Характерним є й те, що процес руйнування і відновлення ВС при терті відбувається періодично [6]. При цьому найбільш тривалою є перша стадія – утворення сітки мікротріщин. Наступні стадії – розвиток мікротріщин, початок відшаровування і "скидання" ВС з оголенням матричного матеріалу відбуваються з наростаючим темпом.

Таблиця 1

Швидкість зносу основних деталей дизелів при їх різних швидкості зміни стану

Деталь	Швидкість зносу v_u , мм/1000 год.		Середня зміна швидкості зносу \bar{v}_u , (мм/с)/год	
	характер зміни стану			
	повільний	швидкий	повільний	швидкий
Гільза циліндра	0,01 ... 0,1	0,5 ... 1,0	0,001	0,025
Канавки першого поршневого кільця	0,002 ... 0,01	0,03...1,0	0,002	0,01
Перше хромоване кільце	0,15 ... 0,30	0,30...0,90	0,001	0,015
Наступні поршневі кільця	0,03 ... 0,05	0,30 ... 0,90	0,001	0,02
Напрямні втулки впускних клапанів	0,03 ... 0,05	0,06...0,10	0,003	0,02
Напрямні втулки випускних клапанів	0,05 ... 0,06	0,08 ... 0,10		
Вкладиші шатунних та корінних підшипників	0,005 ... 0,020	0,01 ... 0,05	0,008	0,015
Шийка колінчастого вала	0,002 ... 0,008	0,02 ... 0,04	0,009	0,020

Постановка проблеми

Застосування високоякісних моторних оливи і примусова система охолодження дозволяє значно полегшити умови роботи трибоспрязень деталей автомобілів. По оцінках експертів тільки в результаті поліпшення якості моторних оливи є можливість підвищити в 1,5 рази ресурс дизелів автомобілів без істотної зміни їхньої конструкції. Однак у будь-якому агрегаті неминучі ситуації, які не можуть захистити трибоспрязень деталей або локальні ділянки контактних поверхонь від зношування: недостатня кількість оливи в зоні тертя у моменти холодних пусків дизеля, при забрудненні оливних каналів та змиві

оливного шару паливом; локальне перегрівання оливи в окремих спряженнях деталей через підвищене тепловиділення або погіршений тепловідвід та ін.

Ударний характер взаємодії, вібрації поверхонь тертя поршня, пальця, кілець і гільзи циліндра, які збільшуються в залежності від зносу спряжень, ускладнюють умови роботи дизеля. В області ВМТ спостерігається повне руйнування оливної плівки. В області підвищених швидкостей ковзання поршня несуча спроможність оливної плівки підвищується і може реалізуватися режими напіврідного тертя. При малих обертах зона напівсухого тертя розповсюджується на більшу частину циліндра, ніж при високих обертах. З підвищенням тиску на поршневі кільця температура спряжених поверхонь "гільза циліндра-поршневе кільце" при сухому терті збільшується. Зазначене свідчить, що є потреба в підвищенні мастильної здатності моторної оливи, керуванні режимами в трибоспряженнях деталей ЦПГ й розробці заходів, які підвищують їх зносостійкість та зменшують втрати на тертя.

Мета та завдання

Метою роботи є дослідження трибологічних процесів при граничному зношуванні спряжень деталей.

Основні завдання, які вирішуються:

- з'ясувати лабораторні дослідження трибологічних процесів при граничному змащуванні;
- для вирішення оптимізації за відсотковим складом присадки в оливі розробити методику проведення експерименту на основі математичного рототабельного планування другого порядку;
- теоретично обґрунтувати метод випробувань мастильних і конструкційних матеріалів за схемою "конус-три кульки";
- провести трибологічні випробування.

Результати вирішення основних завдань

Для експериментального дослідження процесів граничного змащування можуть бути використані лабораторні установки для наступних схем випробувань: чотирикулькова піраміда, конус-три кульки. Найбільшого поширення набули дослідження мастил на конструктивно нескладних машинах тертя із застосуванням зразків, що мають просту геометричну форму. Як зразки можуть бути використані кулі, циліндри, прямокутні призми, ролики. При цьому найбільшого поширення набула чотирикулькова схема випробувань. В усьому світі методики випробувань на чотирикульковій машині тертя стандартизовані в Росії та Україні – ГОСТ 9490-75; у США – ASTM D 2596, ASTM D 2783; у ФРН – DIN 51350; у Польщі – PN – 76/C – 04147; в Англії – IP 300; у Болгарії – БДС 14150-77). Відповідно до ГОСТ 9490-75 "Матеріали мастильні рідкі та пластичні. Метод визначення мастильних якостей на чотирикульковій машині" визначаються наступні характеристики: показник зношування, критичне навантаження, навантаження зварювання, індекс задиру. У сучасних умовах експлуатації машин, коли значно збільшилася номенклатура мастил та присадок до них, а також розширилася сфера їх застосування, перелічені показники вже не можуть дати вичерпної характеристики трибологічних властивостей мастил у всіх можливих умовах експлуатації. Важливим стає фактор швидкості ковзання, який часто не враховують при проведенні випробувань мастил. Чотирикулькова схема має обмеження щодо випробувань конструкційних матеріалів, оскільки кульки приймаються стандартними з шарикопідшипникової сталі. Виготовлення кулькових зразків для випробувань матеріалів практично недоцільне і складно реалізуєме. В даній роботі для випробувань різних конструкційних матеріалів пропонується схема випробувань "конус-три кульки", яка дає можливість застосовувати в якості досліджуваних конічні зразки з різних матеріалів.

Чотирикулькова схема реалізована на лабораторній установці, спроектованій згідно положень ГОСТ 9490-75. Експериментальна лабораторна установка змонтована на базі універсального настільного свердлильного верстату. Для приводу обертання шпинделя використаний двигун постійного струму типу П22У4, з номінальною частотою обертання 1500 об/хв, потужністю 1 кВт, із змішаним збудженням. Блок живлення, який складається з випрямляча постійного струму і автотрансформатора, дозволяє плавно регулювати частоту обертання двигуна від номінальної до нуля.

Основним вузлом чотирикулькової машини тертя є робочий вузол (рис. 1). Верхня кулька 1 базується безпосередньо у спеціально зцентрованій виточці кінця шпинделя (без проміжних ланок), що виключає биття кульки при обертанні і підвищує жорсткість привідного вузла. Нижні три кульки 2 діаметром 12,7 мм встановлюються на загартовану і шліфовану поверхню опори 4. Надійне закріплення і центрування нижніх кульок здійснюється гайкою 3 з конічною робочою поверхнею. Конструкція вузла передбачає розташування верхніх точок нижніх куль в одній площині з верхньою площиною гайки 3, яка використовується як вимірвальна база. Така конструкція робить зону нижніх кульок максимально відкритою і зручною для дослідження геометрії зношуваних поверхонь без розбирання вузла. Виключення перекосів та самовстановлення при контакті верхньої і нижніх кульок забезпечується радіальним сфери-

чним дворядним шарикопідшипником 5 серії 1309 за ГОСТ 5720-75. Для сприйняття осьових навантажень та можливості вимірювання коефіцієнта тертя використовується кульковий упорний однорядний підшипник 6 серії 8118 за ГОСТ 6874-75. Весь вузол базується і закріплюється на столі машини тертя за допомогою основи 7. Верхня кулька навантажується за допомогою важільної системи з передаточним відношенням $k = 3,25$.

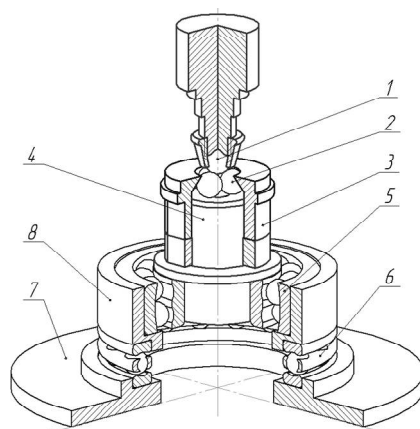


Рис. 1 – Робочий вузол установки для чотирикулькової схеми

Для вимірювання температури мастила в зоні нижніх кульок застосовується термометр ЕТП-М, який працює за методом одинарного неврівноваженого моста постійного струму. Чутливий вимірювальний елемент термометра при цьому розміщується через центральний отвір в опорі під нижніми кульками. Отже, під час випробувань є можливість постійного контролю за температурою мастила в зоні випробувань.

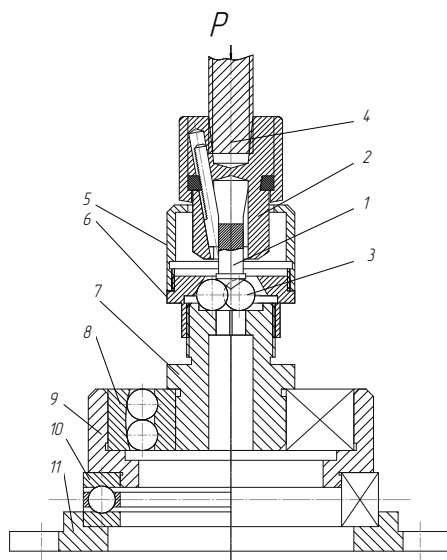


Рис. 2 – Пристрій для випробувань за схемою "конус-три кульки"

Для вимірювання розмірів плям зношування на нижніх кульках використовується мікроскоп МПБ-2 з ціною поділки 0,05 мм. Після відведення верхньої кульки мікроскоп встановлюється на вимірювальну площину гайки 3 і наструюється на чітке зображення плями зношування (мастило попередньо видаляють з вимірювальних поверхонь). Оскільки зношені поверхні знаходяться під деяким кутом, зображення буде мати форму еліпса. Діаметр плями зношування можна оцінювати як півсуму осей еліпса. Після проміжних вимірювань зношування без розбирання робочого вузла випробування продовжуються за прийнятою програмою. Робочий вузол установки може бути модернізований для проведення випробувань за схемами: "кулька-кільце", "конус-кільце".

Чотирикулькова схема має обмеження щодо випробувань конструкційних матеріалів, оскільки кульки приймаються стандартними з шарикопідшипникової сталі. Виготовлення кулькових зразків для випробувань матеріалів практично недоцільне і складно реалізуєме. В даній роботі для випробувань різ-

них конструкційних матеріалів запропонована нова схема випробувань "конус-три кульки", яка дає можливість застосовувати в якості досліджуваних конічні зразки з різних матеріалів.

Для проведення випробувань за схемою "конус-три кульки" була модернізована конструкція робочого вузла наведеної вище лабораторної установки. Модернізована конструкція робочого вузла показана на рис. 2.

Випробуваний зразок 1 із зміцненою конічною поверхнею закріплюється в універсальному самоцентруючому свердлильному патроні. До нижніх трьох кульок із шарикопідшипникової сталі конічний зразок 1 притискається із вертикальною силою P та йому задається обертальний рух від шпинделю випробувальної установки 4. Кулькові зразки 3 розташовуються на плоскій поверхні загартованої опори 7 і центруються спеціальною гайкою 6 з конічною робочою поверхнею. При випробуваннях стакан 5 заповнений досліджуваним мастильним матеріалом.

Випробування залежності зношування конічних зразків від температури моторної оливи проводили на експериментальній установці за схемою тертя "конус-три кульки". Конічна поверхня зразка 1 притискала до кульок 2 силою Q = 100 Н і зразок обертався частотою n = 500 об/хв. (рис. 3).

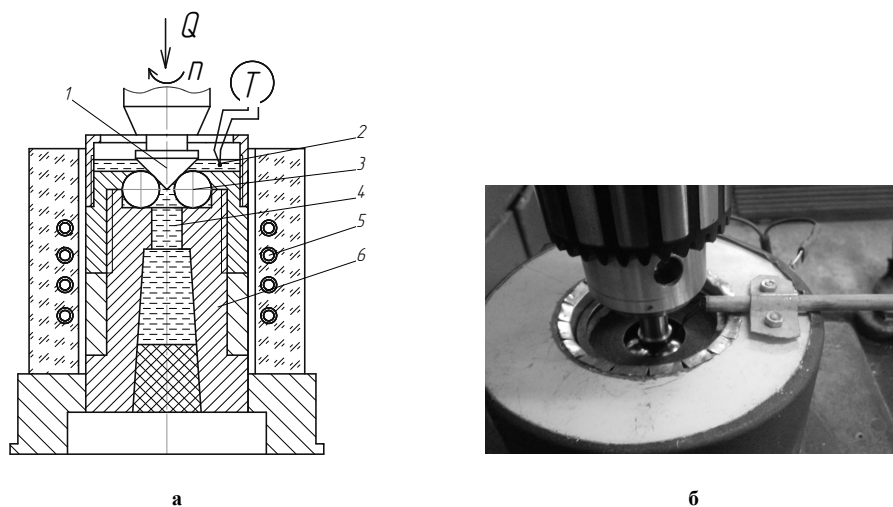


Рис. 3 – Пристрій нагрівання моторної оливи:
а – схема пристрою;
б – його загальний вигляд

Швидкість ковзання поверхонь тертя кульок і зразка становила 0,19 м/с. Тертя відбувалося у ванні моторної оливи. Нагрівання оливи до заданої температури здійснювалися спеціально виготовленим нагрівачем 5 з вмонтованим термоелектричним елементом Т 220-0.6/13 ELECTRON, встановленим і теплоізолюваним азбестовою набивкою в закритому сталевому кожусі, який одівався на корпус 6 вузла тертя. Температуру моторної оливи ми вимірювали датчиком з хромель-алюмелієвою термопарою 2.

Встановлення сталого температурного режиму тертя здійснювали розробленим блоком управління нагрівачем, який містить трансформатор типу ЛАТР 220 В 2 А (рис. 4), за допомогою до клем термоелектричного елемента (ТЕН) подавалася напруга 40, 50 і 60 В, що після прогрівання протягом 2-х годин забезпечувало сталу температуру моторної оливи 54, 73 і 96 °С.

Випробували знос зразків зі сталі 45, загартованих до твердості 40HRC за умови тертя в моторній оливі Magnum 15W-40 без присадки (дослід А) і з присадкою до оливи (дослід Б), яка містила олеїнову кислоту, гліцерин, мідний пудру і мідний купорос відповідно 65, 13, 20 і 2 об. %. Досліди А і Б проводили за нормальної температури (24°С) оливи і нагрітої до 54°С і 96°С. Тривалість безперервного тертя за кожним режимом складала 30 хв., після чого слід зношування поверхні зразка у формі сегментної канавки шириною 2а (мм) вимірювали мікроскопом МБС-10 з точністю 0,05 мм. Випробування кожного зразка проводилось протягом 3-х годин, що відповідало шляху тертя 2052 м.

Для визначення твердості зразків використовувався напівавтоматичний твердомір Брінелля. Для визначення форми січення криволінійної поверхні і глибини сліду визначали використовували проектор за умови 77-кратного збільшення. Таким чином за проекцією зображення виявлено, що твірна криволінійної конічної поверхні сліду описується радіусом кульки, а ширина сліду 2а практично співпадає з її величиною з вимірами мікроскопом МБС-10.

На наступному етапі роботи була розроблена методика планування багатofакторного експерименту для побудови моделі зношування в залежності від визначальних факторів.

Для рішення оптимізаційної задачі стосовно відсоткового складу присадки в мастилі ми використали рототабельне планування другого порядку.

Задача планування експерименту математично формулювалась наступним чином: необхідно отримати уяву про поверхню відгуку факторів, яку можливо показати у вигляді функції або математичної моделі:

$$M\{y\} = \eta = \phi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k), \quad (1)$$

де y – параметр оптимізації (інтенсивність зношування);

x_i – змінні фактори, від яких залежить відгук і які можливо змінювати під час експерименту (температура, тиск, вміст присадки).

Отже задача зводилась до визначення залежності математичного очікування результату процесу від параметрів (факторів). Математична модель необхідна для передбачення напрямку градієнту, тобто напрямку, при русі по якому параметр оптимізації збільшується швидше, ніж в будь-якому іншому напрямку. Діє припущення, що функція відклику безперервна і має не більше одного екстремуму. При даних умовах можливо використовувати процедуру пошуку оптимуму, що основана на покроковому принципі: на основі випробувань будується математична модель, що використовується для оцінки градієнту, потім виконуються нові дослідження тільки в цьому напрямку. Зображення невідомої функції відклику поліномом є найбільш зручним. Для скорочення числа дослідів на першій стадії дослідження приймалася поліном першої степені. Така модель добре передбачає напрямок покращення параметра оптимізації.

Математичний опис об'єкту навколо точки, що відповідає основним значенням факторів, отримано зміною кожного з факторів на двох рівнях, що відрізняються від основного (нульового) рівня на величину кроку зміни.

Використовується повний факторний експеримент. Число комбінацій дорівнювало $N = 2^k + 2k + n_0$. Для трьох факторної задачі вибіркоче рівняння регресії мало вигляд:

$$\tilde{y} = \tilde{M}\{y\} = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i,j} b_{i,j} x_i x_j + b_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (2)$$

Повний факторний експеримент дає можливість визначити роздільні оцінки коефіцієнтів b_0, b_1 .

Реалізація моделі повного факторного експерименту (ПФЕ) складалася з:

- планування експерименту;
- виконання експерименту;
- перевірки однорідності вибіркочових дисперсій;
- отримання математичної моделі об'єкту з перевіркою статистичної значимості виморочних коефіцієнтів регресії;
- перевірки адекватності математичного опису.

Використовуючи кодовані значення факторів, умови експерименту можливо записати у вигляді таблиці або матриці планування експерименту, де ряди відповідають різним дослідом, а стовбці – значенням факторів. Матриця планування наведена в табл. 2. Стовбці x_1, x_2, x_3 створюють матрицю плану. Ці стовбці задавали планування експерименту, по ним безпосередньо визначались умови дослідів. Далі розміщували стовбці з можливими комбінаціями добуток факторів $x_1 x_2, x_1 x_3, x_3 x_2, x_1 x_2 x_3$, що дозволяло оцінити ефекти взаємодії факторів. Фіктивна змінна x_0 необхідна для оцінки вільного члену b_0 . Значення x_0 у всіх стрічках однакове і дорівнює +1. Кількість незалежних факторів $r = 3$ і кількість точок плану $n = 20$.

Поставимо задачу визначення залежності інтенсивності зношування від таких технологічних параметрів як: температура, контактний тиск та вміст присадки. В якості математичної моделі приймаємо:

$$y = b_0 + b_1 \tilde{x}_1 + b_2 \tilde{x}_2 + b_3 \tilde{x}_3 + b_{12} \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 + b_{13} \tilde{x}_1 \tilde{x}_3 + b_{23} \tilde{x}_2 \tilde{x}_3 + b_{11} \tilde{x}_1^2 + b_{22} \tilde{x}_2^2 + b_{33} \tilde{x}_3^2 + b_{123} \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \tilde{x}_3. \quad (3)$$

Розрахунок коефіцієнтів регресії проводився згідно зі стандартними формулами.

Таблиця 2

Матриця планування

№	Температура	Контактний тиск	Вміст присадки
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	1
3	-1	1	-1

4	-1	1	1
5	1	-1	-1
6	1	-1	1
7	1	1	-1
8	1	1	1
9	-1,68	0	0
10	1,68	0	0
11	0	-1,68	0
12	0	1,68	0
13	0	0	-1,68
14	0	0	1,68
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0

Матриця планування наведена в табл. 3. Проведені додаткові досліді при основному рівні (0) та зіркових точках (+1,68; -1,68).

Таблиця 3

Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактори	Інтервал	Рівні				
		1,68	+1	0	-1	-1,68
Температура, °С	30	104,4	84	54	24	3,6
Контактний тиск, МПа	5	18,4	15	10	5	1,6
Вміст присадки, %	0,5	2,34	2,0	1,5	1	0,66

Обробку даних експерименту та пошук оптимальних значень виконано в програмному середовищі Microsoft Excel та Statistica.

Таблиця 4

Матриця планування та результати досліджень експерименту

№	Температура		Контактний тиск		Вміст присадки		Іntenс. знош.
	рівень	T , °С	рівень	P , МПа	Рівень	C , %	
1	-1	24	-1	5	-1	1	20,703
2	-1	24	-1	5	1	2	15,8492
3	-1	24	1	15	-1	1	27,599
4	-1	24	1	15	1	2	17,6403
5	1	84	-1	5	-1	1	46,057
6	1	84	-1	5	1	2	28,179
7	1	84	1	15	-1	1	73,195
8	1	84	1	15	1	2	48,612
9	-1,68	3,6	0	10	0	1,5	12,87
10	1,68	104,4	0	10	0	1,5	54,711
11	0	54	-1,68	1,6	0	1,5	16,432
12	0	54	1,68	18,4	0	1,5	36,442
13	0	54	0	10	-1,68	0,66	65,213
14	0	54	0	10	1,68	2,34	40,781
15	0	54	0	10	0	1,5	27,691
16	0	54	0	10	0	1,5	27,452
17	0	54	0	10	0	1,5	27,572
18	0	54	0	10	0	1,5	27,48
19	0	54	0	10	0	1,5	26,914
20	0	54	0	10	0	1,5	26,813

Таблиця 5

Значення коефіцієнтів рівняння, отримані в програмному середовищі Microsoft Excel

b0	b1	b2	b3	b12	b13	b23	b11	b22	b33
27,477	13,51	1,49	6,579	-1,101	-7,197	8,269	4,86	-3,456	-1,467

Отримана математична модель має наступний вигляд:

$$I_w(x_1, x_2, x_3) = 27,477 + 13,51x_1 + 1,49x_1^2 + 6,579x_2^2 - 1,101x_2^2 - \\ - 7,197x_3 + 8,269x_3^2 + 4,86x_1x_2 - 3,456x_1x_3 - 1,467x_2x_3.$$

Для перевірки адекватності моделі були виконані наступні розрахунки.

Число ступенів свободи:

$$f = 20 - 10 - (6 - 1) = 5.$$

Сума квадратів відхилень S_R емпіричних значень:

$$S_R = (2,468^2 + 2,7918^2 + 1,962^2 + 1,4867^2 + 1,326^2 + 0,85^2 + 0,018^2 + \\ + 0,343^2 + 3,884^2 + 0,3318^2 + 3,115^2 + 1,09^2 + 2,306^2 + 2,056^2 + 0,214^2 + \\ + 0,025^2 + 0,095^2 + 0,003^2 + 0,563^2 + 0,664^2) \cdot 10^{-6} = 58,85 \cdot 10^{-6}.$$

Значення параметра \bar{y}_0 в [мм]:

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{6} \cdot (27,691 + 27,452 + 27,572 + 27,48 + 26,914 + 26,813) = 27,32.$$

Отримане значення \bar{y}_0 використаємо для отримання значення критерію S_E :

$$S_E = \left[(27,691 - 27,32)^2 + (27,452 - 27,32)^2 + (27,572 - 27,32)^2 + \\ + (27,48 - 27,32)^2 + (26,914 - 27,32)^2 + (26,813 - 27,32)^2 \right] \cdot 10^{-6} = 0,666 \cdot 10^{-6}.$$

Дисперсії адекватності S_{AD}^2 дорівнює:

$$S_{AD}^2 = \frac{58,85 - 0,666}{5} = 11,637.$$

Дисперсія відтворюваності експерименту S_y^2 :

$$S_y^2 = \frac{0,666}{6 - 1} = 0,1332.$$

Враховуючи значення дисперсії відтворюваності експерименту та значення дисперсії адекватності знаходимо критерій Фішера:

$$F_p = \frac{11,637}{0,1312} = 87,365.$$

Отримане значення критерію Фішера порівнюють з табличним відповідно до ступенів свободи $f_i = 5$ і судять про адекватність.

Якщо знайдене значення критерію F_p менше табличного при прийнятому рівні значимості та відповідних чисел ступенів свободи, то гіпотеза адекватності отриманої моделі приймається.

В нашому випадку:

$$F_p < F_p^{табл}, 87,365 < 230,2.$$

Таке значення показника критерію Фішера говорить про адекватність даної математичної моделі.

При використанні прикладного пакету значення критерію Стьюдента визначали за наступною схемою. Вибірало розрахунок для випадку з незв'язними (незалежними) або зв'язковими (залежними) вибірками. Далі вводили в першу колонку ("Вибірка 1") дані першої вибірки, а в другу колонку – "Вибірка 2" дані другої вибірки. Після заповнення колонок проводили автоматичний розрахунок t -критерію Стьюдента.

Таблиця 6

Двовибірковий критерій

Двухвыборочный критерий:
для связанных выборок

Выборка 1	Выборка 2
20.703	23.171
15.8492	18.641
27.599	29.561
17.6403	19.127
46.057	47.383
28.179	29.029
73.195	73.213
48.612	48.955
12.87	8.985576
54.711	54.379176
16.432	13.3168176
36.442	35.4222576
65.213	62.9063856
40.781	38.7244656
27.691	27.477
27.452	27.477
27.572	27.477
27.48	27.477
26.914	27.477
26.813	27.477

Шаг 2 Сброс

Таблица 7

Результати при $t=0,1$

№	Выборка 1 (В.1)	Выборка 2 (В.2)	Отклонения (В.1 - В.2)	Квадраты отклонения (В.1 - В.2) ²
1	20.703	23.171	-2.47	6.1
2	15.8492	18.641	-2.79	7.78
3	27.599	29.561	-1.96	3.84
4	17.6403	19.127	-1.49	2.22
5	46.057	47.383	-1.33	1.77
6	28.179	29.029	-0.85	0.72
7	73.195	73.213	-0.02	0
8	48.612	48.955	-0.34	0.12
9	12.87	8.985576	3.88	15.05
10	54.711	54.379176	0.33	0.11
11	16.432	13.3168176	3.12	9.73
12	36.442	35.4222576	1.02	1.04
13	65.213	62.9063856	2.31	5.34
14	40.781	38.7244656	2.06	4.24
15	27.691	27.477	0.21	0.04
16	27.452	27.477	-0.02	0
17	27.572	27.477	0.09	0.01
18	27.48	27.477	0	0
19	26.914	27.477	-0.56	0.31
20	26.813	27.477	-0.66	0.44
Суммы:	668.2055	667.6766784	0.53	58.86

Згідно розрахунків, модель виявилася адекватною.



Рис. 4 – Критичне значення (а) та вісь значимості (б), яка знаходиться в зоні незначимості

Провівши заплановану серію експериментів та визначившись з адекватною математичною моделлю процесу, використали пакет Statistica і визначили оптимальні значення параметрів.

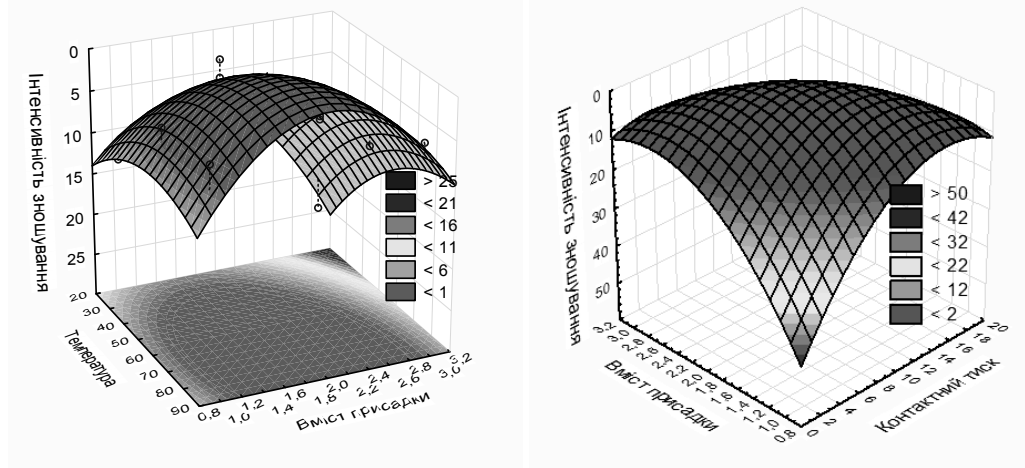


Рис. 5 – Залежність інтенсивності зношування від контактного тиску, температури і вмісту присадки

Аналізуючи отримані результати зробили висновок, що оптимальними параметрами для даної моделі зношування являються: вміст присадки 2,2 %; температура мастильного середовища 50 °С; контактний тиск 10 МПа. Аналіз отриманих залежностей свідчить про наявність оптимального вмісту мідьвмісної присадки за критерієм найменшої інтенсивності зношування для всього досліджуваного діапазону контактного тиску. Із збільшенням температури і контактного тиску інтенсивність зношування зростає майже лінійно.

Висновки

1. Показано, що для оцінки якості мастильних матеріалів на основі їх експлуатаційних властивостей доцільним є використання схеми випробування: чотирикулькова піраміда, конус-три кульки та пристроїв для нагріву оливи і вимірювання ширини сліду зносу конічної поверхні.
2. З метою оптимізації складу присадки в моторну оливу використано математичне планування експерименту і розроблено методику його проведення за рототабельним плануванням другого порядку.
3. За проведеним математичним плануванням експерименту отримано регресійну математичну модель інтенсивності зношування, визначено оптимальні параметри: вміст присадки – 2,2 %; температура мастильного середовища – 50 °С; контактний тиск – 10 МПа та здійснено перевірку моделі на адекватність.

Література

1. Кузьменко А.Г., Дудчак В.П. Шляхи підвищення зносостійкості гільз циліндрів (Огляд). Частина II. Проблеми трибології (Problems of tribology). 2005. №3. С.13-24.
2. Кузьменко А.Г., Дыха А.В. Контакт, трение и износ смазанных поверхностей. Монография. Хмельницький: ХНУ. 2007. 344 с.
3. Дыха О.В. Методи контактної трибомеханіки мастильних шарів і моделі зношування при граничному терті: автореф. дис. на здобуття наукового ступеня д-ра техн. наук: 05.02.04 "Тертя та зношування в машинах" – 2009. – 36с.
4. Dykha O.V., Gedzuk T.V. Rated and experimental modeling of tribological properties of constructional and lubri-cating materials. Проблеми трибології (Problems of Tribology). 2014. № 1. С. 84-87.
5. Дыха О. В., Вельбой В.П., Гедзюк Т.В. Результати випробувань на знос конічних зразків зі сталі 45 в моторній оливі. Проблеми трибології. 2014. №2. С. 111-115.
6. Аулін В.В., Лисенко С.В., Кузик О.В. Теоретичне обґрунтування зміни режимів тертя в циліндро-поршневій групі ДВЗ. Проблеми трибології (Problems of tribology). Хмельницький: ХНУ, – 2010. – №3 – С.46-54.
7. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: Монографія. Кіровоград: Видавець Лисенко В.Ф. 2014. 370с.
8. Аулін В.В., Лисенко С.В., Лисенко В.М. Триботехнічне відновлення протягом строку служби дизелів //Проблеми трибології (Problems of tribology). Хмельницький: ХНУ, 2007. – №2 (44) – С. 60-62.

9. Аулін В.В., Семенюк М.Ф., Лисенко С.В., Кузик О.В. Зміна властивостей оливи при електро-трибохімічному відновленні робочих поверхонь деталей дизелів // Проблеми трибології (Problems of tribology). Хмельницький: ХНУ, 2009. – №1 – С.68-70.
10. Аулін В.В., Лисенко С.В., Кузик О.В. Зміна технічного стану основних сполучень двигуна та моторної оливи в процесі його експлуатації // Проблеми трибології (Problems of tribology). Хмельницький: ХНУ, 2009. – №4 – С.118-122.
11. Аулін В.В., Лисенко С.В., Кузик О.В. Підвищення експлуатаційної надійності машин шляхом модифікування моторної оливи // Вісник Харківського нац. техн. університету сільск. господарства. /Вип. 100. Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва. – Харків. – 2010.-С.127-133.
12. Аулін В.В., Слонь В.В., Лисенко С.В. Експрес-оцінка впливу моторних оливо і присадок до них на характеристики зносу робочих поверхонь деталей двигунів вантажних автомобілів // Теоретичний і науково-практичний журнал інженерної академії України Вісник інженерної академії України. – 2013. – №2. – С. 166-170.
13. Аулін В.В., Лисенко С.В., Кузик О.В. Керування характеристиками і властивостями моторних оливо комбінованим модифікуванням. Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. 2014. Вип. 148. С. 148-155.
14. Кулаков А.Т. Повышение надежности автотракторных дизелей путем усовершенствования процессов смазки, очистки и технологии ремонта основных элементов: автореф. дисс. д-ра. техн. наук: спец. 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве". Саратов, 2007. 40с.
15. Путинцев С.В. Механизм потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчет и испытания. М.: МГТУ, 2011. 288с.
16. Путинцев С.В., Аникин С.А., Иванов О.В. Моделирование параметров динамики, гидродинамики и трибологии поршня двигателя внутреннего сгорания. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Спец. выпуск. 2007. С.150-156.
17. Погодаев Л.И. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин. СПб.: Академия транспорта, 2006. 608 с.
18. Салмин В.В. Улучшение эксплуатационных показателей автотранспортных двигателей совершенствованных трибохимических и гидро-термодинамических процессов в смазочных системах: дис. ... д-ра. техн. наук: спец. 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве". Саранск, 2003. 475 с.
19. Александров Е.Е., Кравец И.А., Лысиков Е.П. Повышение ресурса технических систем путём использования электрических и магнитных полей: монография. Х.: НТУ "ХПИ", 2006. 544 с.
20. Берёзина Е.В. Самоорганизация присадок в граничном смазочном слое трибосопряжений машин: автореф. дисс. на соискание науч. степени д-ра техн. наук: спец. 05.02.04 "Трение и износ в машинах". Иваново: ИГУ, 2007. 461 с.
21. Кузьменко А.Г., Дудчак В.П. Тертя та зношування деталей циліндро-поршневої групи (Огляд). Частина I. Проблеми трибології (Problems of tribology). 2005. №1 С.48-54.
22. Венцель Е.С., С.Г. Жалкин, Данько Н.И. Улучшение качества и повышение сроков службы нефтяных масел. Харьков: УкрГАЗТ, 2003. 168 с.

Надійшла в редакцію 02.01.2019

Dykha O.V., Aulin V.V., Lysenko S.V., Gryn'kiv A.V. **Influence of operating factors on lubrication mode and wear resistance of parts of diesel engines of cars.**

It is established that in the real conditions of operation characteristic of simultaneous action of different types of wear, the relationship of which depends on the design, technology of manufacturing parts, the quality of used lubricants and the load of friction. When describing the processes of wear, it is believed that the wear rate depends on the type of lubrication, but to assess the wear resistance of the parts and connections of the diesel engine, it is necessary to know the whole spectrum of patterns of development and degradation of processes and states. It is shown that in order to assess the quality of lubricants on the basis of their operational properties, it is expedient to use the test scheme: four-headed pyramid, cone-three balls and devices for heating the oil and measuring the width of the trace of wear of the conical surface. In order to optimize the composition of the additive in motor oil, the mathematical planning of the experiment was used and the method of its implementation was developed for rootable planning of the second order. According to the mathematical planning of the experiment, a regression mathematical model of wear intensity was obtained, optimal parameters were determined: the content of the additive - 2,2 %; lubricating fluid temperature - 50 °C; the contact pressure is 10 MPa and the model is checked for adequacy.

Key words: diesel engines, lubrication mode, experimental tests, wear resistance, planning of factor experiment.

References

1. Kuz'menko A.G., Dudchak V.P. SHlyahi pidvishchennya znosostijkosti gil'z cilindriv (Oglyad). CHastina II. Problemi tribologii (Problems of tribology). 2005. №3. S.13-24.
2. Kuz'menko A.G., Dyha A.V. Kontakt, trenie i iznos smazannyh poverhnostej. Monografiya. Hmel'nickij: HNU. 2007. 344 s.
3. Diha O.V. Metodi kontaktnoi tribomekhaniki mastil'nih shariv i modeli znoshuvannya pri granichnomu terti: avtoref. dis. na zdobuttya naukovoogo stupenya d-ra tekhn. nauk: 05.02.04 "Tertya ta znoshuvannya v mashinah" – 2009. – 36s.
4. Dykha O.V., Gedzuk T.V. Rated and experimental modeling of tribological properties of constructional and lubricating materials. Problemi tribologii (Problems of Tribology). 2014. № 1. S. 84-87.
5. Diha O. V., Vel'boj V.P., Gedzyuk T.V. Rezul'tati viprobuvan' na znos konichnih zrazkiv zi stali 45 v motornij olivi. Problemi tribologii. 2014. №2. S. 111-115.
6. Aulin V.V., Lisenko S.V., Kuzik O.V. Teoretichne obruntuvannya zmini rezhimiv tertya v cilindroporshnevij grupi DVZ. Problemi tribologii (Problems of tribology). Hmel'nic'kij: HNU, – 2010. – №3 – S.46-54.
7. Aulin V.V. Fizichni osnovi procesiv i staniv samoorganizacii v tribotekhnichnih sistemah: Monografiya. Kirovograd: Vidavec' Lisenko V.F. 2014. 370s.
8. Aulin V.V., Lisenko S.V., Lisenko V.M. Tribotekhnichne vidnovlennya protyagom stroku sluzhbi dizeliv // Problemi tribologii (Problems of tribology). Hmel'nic'kij: HNU, 2007. – №2 (44) – S. 60-62.
9. Aulin V.V., Semenyuk M.F., Lisenko S.V., Kuzik O.V. Zmina vlastivostej olivi pri elektrottribohimichnomu vidnovlenni robochih poverhon' detalej dizeliv. Problemi tribologii (Problems of tribology). Hmel'nic'kij: HNU, 2009. – №1 – S.68-70.
10. Aulin V.V., Lisenko S.V., Kuzik O.V. Zmina tekhnichnogo stanu osnovnih spoluchen' dviguna ta motornoj olivi v procesi jogo ekspluatacii // Problemi tribologii (Problems of tribology). Hmel'nic'kij: HNU, 2009. – №4 – S.118-122.
11. Aulin V.V., Lisenko S.V., Kuzik O.V. Pidvishchennya ekspluatacijnoi nadijnosti mashin shlyahom modifikuvannya motornoj olivi // Visnik Harkivs'kogo nac. tekhn. universitetu sil'sk. gospodarstva. /Vip. 100. Problemi nadijnosti mashin ta zasobiv mekhanizacii sil'skogospodars'kogo virobniictva. – Harkiv. – 2010.-S.127-133.
12. Aulin V.V., Slon' V.V., Lisenko S.V. Ekspres-ocinka vplivu motornih oliv i prisadok do nih na charakteristiki znosu robochih poverhon' detalej dviguniv vantazhnikh avtomobiliv // Teoretichnij i naukovopraktichnij zhurnal inzhenernoj akademii Ukraini Visnik inzhenernoj akademii Ukraini. – 2013. – №2. – S. 166-170.
13. Aulin V.V., Lisenko S.V., Kuzik O.V. Keruvannya karakteristikami i vlastivostyami motornih oliv kombinovanim modifikuvannjam. Zbirnik naukovih prac' Ukraïns'koï derzhavnoj akademii zaliznichnogo transportu. 2014. Vip. 148. S. 148-155.
14. Kulakov A.T. Povyshenie nadezhnosti avtotraktornyh dizelej putem usovershenstvovaniya processov smazki, ochistki i tekhnologii remonta osnovnyh ehlementov: avtoref. diss. d-ra. tekhn. nauk: spec. 05.20.03 "Tekhnologii i sredstva tekhnicheskogo obsluzhivaniya v sel'skom hozyajstve". Saratov, 2007. 40s.
15. Putincev S.V. Mekhanizm poteri v porshnevnyh dvigatelej: special'nye glavny konstruirovaniya, raschet i ispytaniya. M.: MGTU, 2011. 288s.

-
16. Putincev S.V., Anikin S.A., Ivanov O.V. Modelirovanie parametrov dinamiki, gidrodinamiki i tribologii porshnya dvigatelya vnutrennego sgoraniya. Vestnik MGTU im. N.EH. Baumana, Spec. vypusk. 2007. S.150-156.
 17. Pogodaev L.I. Strukturno-ehnergeticheskie modeli nadezhnosti materialov i detalej mashin. SPb.: Akademiya transporta, 2006. 608 s.
 18. Salmin V.V. Uluchshenie ehkspluatatsionnykh pokazatelej avtotransportnykh dvigatelej sovershenstvovannykh tribohimicheskikh i gidro-termodinamicheskikh processov v smazochnykh sistemah: dis. ... d-ra. tekhn. nauk: spec. 05.20.03 "Tekhnologii i sredstva tekhnicheskogo obsluzhivaniya v sel'skom hozyajstve". Saransk, 2003. 475 s.
 19. Aleksandrov E.E., Kravec I.A., Lysikov E.P. Povyshenie resursa tekhnicheskikh sistem putyom ispol'zovaniya ehlektricheskikh i magnitnykh polej: monografiya. H.: NTU "HPI", 2006. 544 s.
 20. Beryozina E.V. Samoorganizaciya prisadok v granichnom smazochnom sloe tribosopryazhenij mashin: avtoref. diss. na soiskanie nauch. stepeni d-ra tekhn. nauk: spec. 05.02.04 "Trenie i iznos v mashinah". Ivanovo: IGU, 2007. 461 s.
 21. Kuz'menko A.G., Dudchak V.P. Tertya ta znoshuvannya detalej cilindro-porshnevoi grupi (Oglyad). CHastina I. Problemi tribologii (Problems of tribology). 2005. №1 S.48-54.
 22. Vencel' E.S., S.G. ZHalkin, Dan'ko N.I. Uluchshenie kachestva i povyshenie srokov sluzhby neftyanykh masel. Har'kov: UkrGAZHT, 2003. 168 s.