

**УДК 621.891:631.31:631.37**

**ВПЛИВ РЕЖИМУ МАЩЕННЯ НА ТРИБОТЕХНІЧНІ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНІ СПРЯЖЕНЬ ДЕТАЛЕЙ ДИЗЕЛІВ  
АВТОМОБІЛІВ**

**Диха О.В., д.т.н., проф.**

Хмельницький національний університет

**Аулін В.В., д.т.н., проф., Лисенко С.В., к.т.н., доц., Гриньків А.В., к.т.н.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Abstract**

In this paper, the results of the study of tribological processes in case of boundary wear of mates of parts are given modernized installations for such test schemes as a four-ball pyramid and a cone-three balls, as well as a device for heating engine oil. Using the method of mathematical planning of the experiment, a model was developed for the intensity of wear of samples and parts from three factors: temperature, contact pressure and additive content. The adequacy of the model is proved and the optimal parameters are determined: the content of the additive is 2.2%; temperature of the lubricant 50°C; contact pressure of 10 MPa. A method has been developed for testing oil and structural materials according to the "cone-three ball" scheme and presents the results of testing the width of the track from the friction path at various temperatures, the content of the additive and pressure. The corresponding graphical dependencies were obtained, approximated by power functions.

Keywords: friction conditions; engine oil, wear, four-ball test pattern, optimal parameters

**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 зміни їх стану подано в таблиці.

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 напруження, 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 трибоспрямижень 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 поршневого кільця, 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 зворотно-поступального 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 [77]. 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 мікрметра 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 негомогенно. 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.

### **Постановка проблеми**

Застосування високоякісних моторних оливи і примусова система охолодження дозволяє значно полегшити умови роботи трибоспрямижень 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 трибоспрямижень деталей або локальні ділянки контактних поверхонь від зношування: недостатня кількість оливи в зоні тертя у моменти холодних пусків дизеля, при забрудненні оливи каналів та змиві оливи шару паливом; локальне перегрівання оливи в окремих спрямиженнях деталей через підвищене тепловиділення або погіршений тепловідвід та ін.

Ударний характер взаємодії, вібрації поверхонь тертя поршня, пальця, кільця і гільзи циліндра, які збільшуються в залежності від зносу спрямижень, 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 напіврідинного тертя. При малих обертах зона напівсухого тертя розповсюджується на більшу частину циліндра, ніж при високих обертах. З підвищенням тиску на поршневі кільця температура спрямижених поверхонь "гільза циліндра-поршневе кільце" при сухому терті збільшується. Зазначене свідчить, що є потреба в підвищенні мастильної здатності моторної оливи, керуванні режимами в трибоспрямиженнях деталей

ЦПГ й розробці заходів, які підвищують їх зносостійкість та зменшують втрати на тертя.

**Таблиця 1 Швидкість зносу основних деталей дизелів при їх різних швидкості зміни стану**

| Деталь                                    | Швидкість зносу $v_u$ ,<br>мм/1000 год. |             | Середня зміна<br>швидкості зносу $\bar{v}_u$ , $\frac{\text{мм/с}}{\text{год}}$ |         |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------|
|                                           | 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   |

#### 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

##### 1. Лабораторні засоби дослідження трибологічних процесів.

Для експериментального дослідження процесів граничного змащування в роботі були використані і модернізовані 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

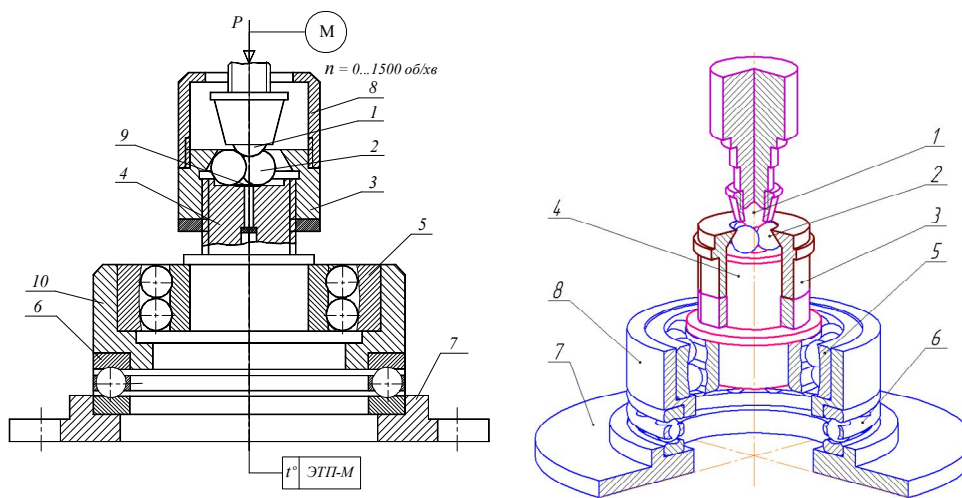
чотирикулькова схема випробувань. В усьому світі методики випробувань на чотирикульковій машині тертя стандартизовані в Росії та Україні – ГОСТ 9490-75; у США – ASTM D 2596, ASTM D 2783; у ФРН – DIN 51350; у Польщі – PN – 76/C – 04147; в Англії – IP 300; у Болгарії – БДС 14150-77). Відповідно до ГОСТ 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 вимірювальна 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 сферичним 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  $k = 3,25$ .



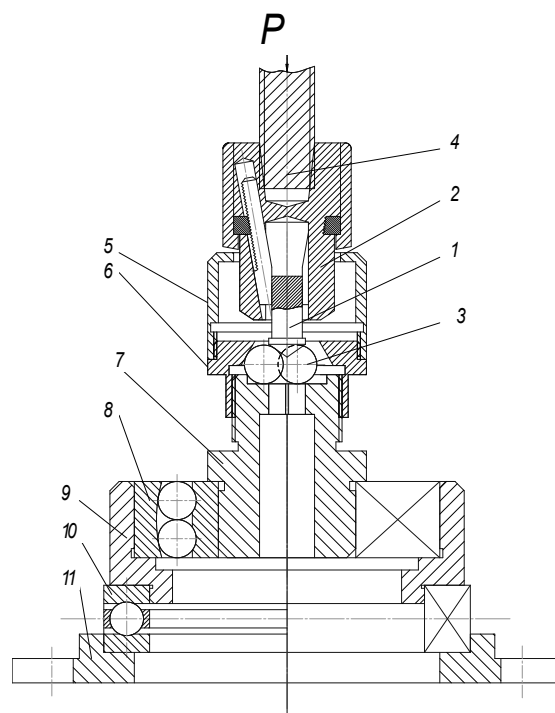
**Рисунок 1 Робочий вузол установки для чотирикулькової схеми**

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 (поз. 9, рис. 1) 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.

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 настраюється 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 різних 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 рисунку 2.



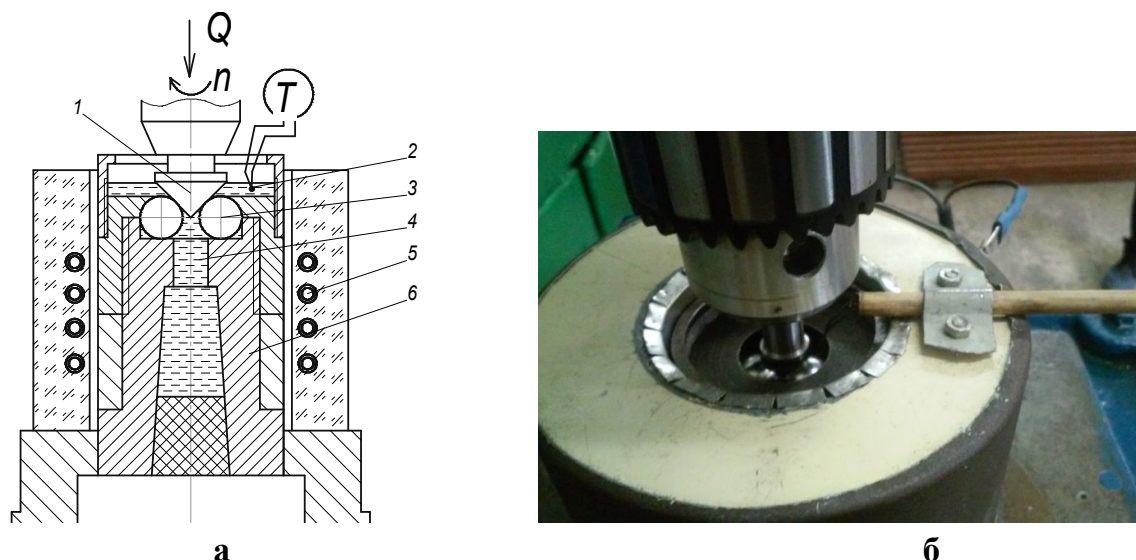
**Рисунок 2 Пристрій для випробувань за схемою "конус-три кульки"**

Випробуваний зразок 1 із зміцненою конічною поверхнею закріплюється в універсальному самоцентруючому свердлильному патроні.

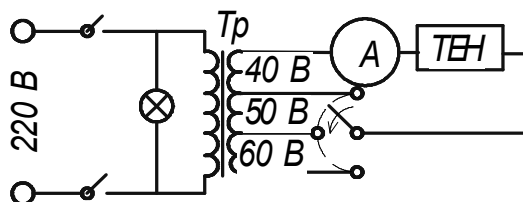
До нижніх трьох кульок із шарикопідшипникової сталі конічний зразок 1 притискається із вертикальною силою  $P$  та йому задається обертальний рух від шпинделю випробувальної установки 4. Кулькові зразки 3 розташовуються на плоскій поверхні загартованої опори 7 і центруються спеціальною гайкою 6 з конічною робочою поверхнею. При випробуваннях стакан 5 заповнений досліджуванним 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 притискалась до кульок 2 силою  $Q = 100$  Н і зразок обертався частотою  $n = 500$  об/хв. (рис. 3). 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 теплоізованим 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°C.



**Рисунок 3 Пристрій нагрівання моторної оливи: а – схема пристрою; б – його загальний вигляд**



**Рисунок 4 Електрична схема блоку управління нагрівачем**

Випробували знос зразків зі сталі 45, загартованих до твердості 40HRC за умови тертя в моторній оливі Magnum 15W-40 без присадки (досліди А) і з присадкою до оливи (досліди 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°C) оливи і нагрітої до 54°C і 96°C. 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.

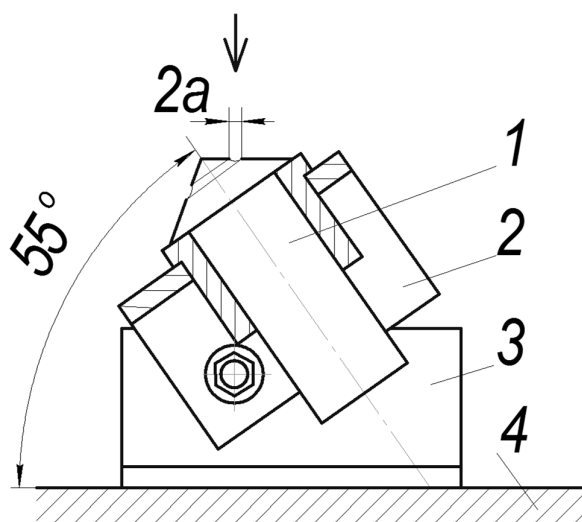
Для визначення твердості зразків використовувався напівавтоматичний твердомір Брінелля.

Для вимірювання ширини сліду використанням пристрій, у якому твірна конічної поверхні зразка 1, вільно вставленого в отвір втулки кронштейна 2, поворотом останнього відносно основи 3 виставлялась паралельно столу 4 мікроскопа (рис.5).

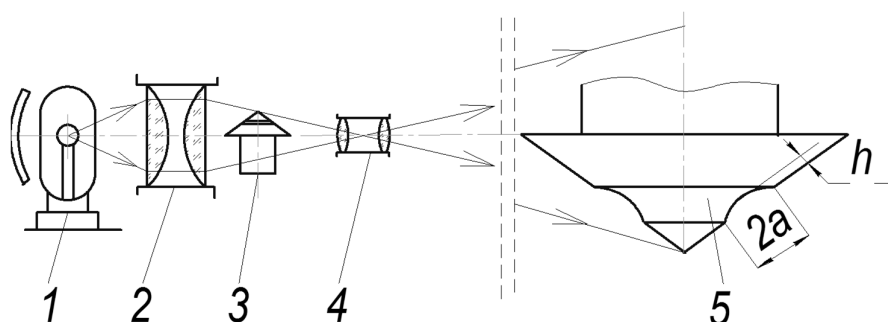
Для визначення форми січення криволінійної поверхні і глибини сліду визначали використовували проектор за умови 77-кратного збільшення (рис.6).

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.





**Рисунок 5 Пристрій для вимірювання ширини сліду зносу конічної поверхні мікроскопом МБС-10**



**Рисунок 6 Схема оптичної системи проектора: 1 – лампа освітлення; 2 – об’єктив; 3 – зразок; 4 – конденсор; 5 – проекція зразка на екрані.**

## *2. Методика планування багатofакторного експерименту.*

Виходячи з аналізу літературних джерел, планувати експеримент у даній роботі доцільно з використанням трьох факторного експерименту.

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

Задача планування експерименту математично формувалась наступним чином: необхідно отримати уяву про поверхню відклику 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 (в нашому випадку мікротвердість дискретно цементованої поверхні);  $x_i$  – змінні фактори, від яких залежить відклик і які можливо змінювати під час експерименту (значення струму, сили притискання та часу цементації). Відповідно задача зводиться 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 приймався поліном першої степені. Така модель добре передбачає напрямки покращення параметра оптимізації.

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

Повним факторним експериментом називається експеримент, що реалізує всі можливі комбінації рівнів незалежних факторів, що повторюються, кожен з яких змінюється на двох рівнях. Число цих комбінацій  $N = 2^k + 2k + n_0$ . Для трьох факторної задачі вибіркве рівняння регресії має 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  $b_0, b_1$ .

Знаходження моделі повного факторного експерименту (ПФЕ) складається з:

- планування експерименту;
- виконання експерименту;
- перевірки однорідності вибіркових 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 таблиці 2.

Стовбці  $x_1, x_2, x_3$  створюють матрицю плану. Ці стовбці задають планування, по ним безпосередньо визначаються умови дослідів. Далі розміщують 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 дозволять 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              |

3. Використання методу математичного планування експерименту при побудові моделі інтенсивності зношування зразків і деталей.

Матриця планування наведена в таблиці 3. Проведені додаткові дослідження 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, °C      | 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 |      | Інтенс. знош. |
|----|-------------|-------|-----------------|--------|----------------|------|---------------|
|    | Рівень      | T, °C | 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:

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

Для перевірки адекватності моделі були виконані наступні розрахунки.

Число ступенів свободи:

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

Сума квадратів відхилень  $S_R$  емпіричних значень:

$$S_R = (2,468^2 + 2,7918^2 + 1,962^2 + 1,4867^2 + 1,326^2 + 0,85^2 + 0,018^2 + 0,343^2 + 3,884^2 + 0,3318^2 + 3,115^2 + 1,019^2 + 2,306^2 + 2,056^2 + 0,214^2 + 0,025^2 + 0,095^2 + 0,003^2 + 0,563^2 + 0,664^2) \times 10^{-6} = 58,85 \times 10^{-6}.$$

Значення параметра  $\bar{y}_o$ :

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

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

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

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:

$$F_p = \frac{11,637}{0,1332} = 87,365.$$

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 пакету прикладної допомоги програми значення критерію Стюдента визначали за наступною схемою:

– вибрати розрахунок для випадку з незв'язними (незалежними) або зв'язковими (залежними) вибірками;

– ввести в першу колонку ("Вибірка 1") дані першої вибірки, а в другу колонку – "Вибірка 2" дані другої вибірки, дані вводяться по одному числу на рядок; без пробілів, пропусків і т.д., вводяться тільки цифри, а у випадку дробових чисел вони вводяться зі знаком "." (Крапка).

– після заповнення колонок натиснути на кнопку "Крок 2", щоб зробити автоматичний розрахунок t-критерію Стюдента.



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

Таблиця 7 Результати при  $t=0,1$

| №      | Выборка 1<br>(В.1) | Выборка 2<br>(В.2) | Отклонения<br>(В.1 - В.2) | Квадраты отклонений<br>(В.1 - В.2) <sup>2</sup> |
|--------|--------------------|--------------------|---------------------------|-------------------------------------------------|
| 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.

Критические значения

| $t_{кр}$      |               |
|---------------|---------------|
| $p \leq 0.05$ | $p \leq 0.01$ |
| <b>2.09</b>   | <b>2.86</b>   |

а



б

**Рисунок 7 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.

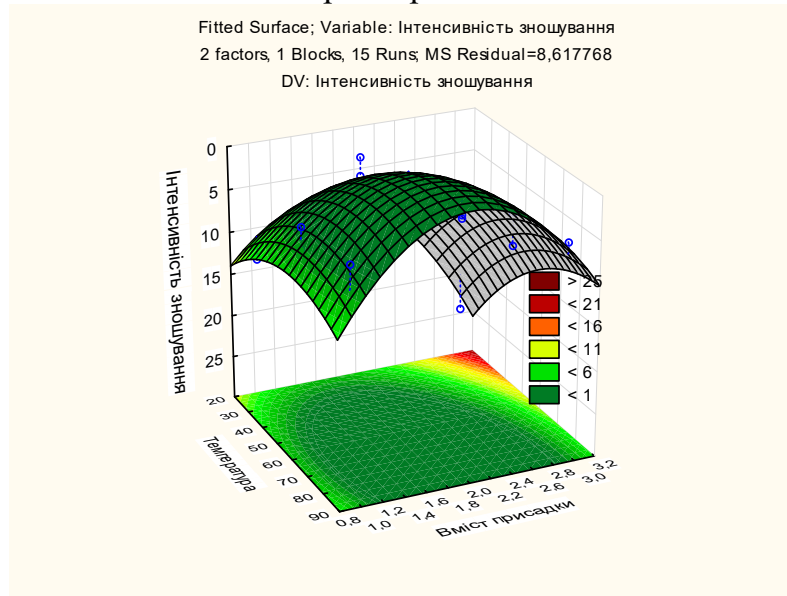


Рисунок 8 3D Surface Plot of Інтенсивність against Контактний тиск and Вміст присадки Spreadsheet31 20v.20c

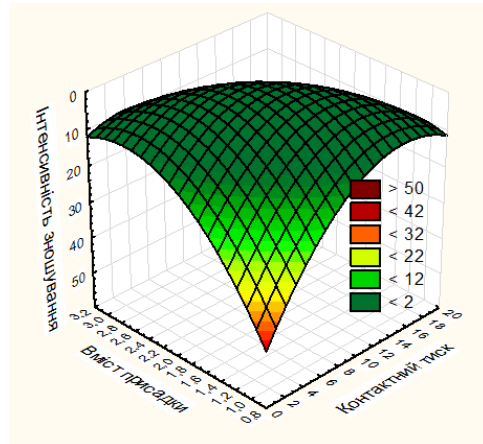


Рисунок 9 Інтенсивність зношування =  $80,4891 - 6,043 \cdot x - 53,1614 \cdot y + 0,161 \cdot x \cdot x + 1,4787 \cdot x \cdot y + 9,9279 \cdot y \cdot y$

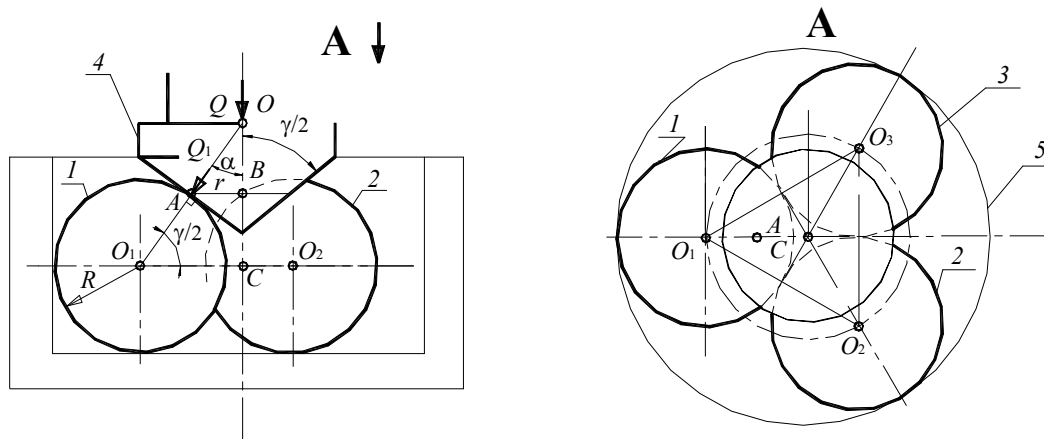
Аналізуючи отримані результати зробили висновок, що оптимальними параметрами для даної моделі зношування являються: вміст присадки 2,2%; температура мастильного середовища 50°C; контактний тиск 10 МПа.

4. Метод випробувань мастильних і конструкційних матеріалів за схемою "конус-три кульки".

Розглянемо розрахункову схему "конус-три кульки", наведену на рис.10.

Три кульки 1,2,3 однакового радіусу  $R$  розташовані на площині так, щоб вони контактували за схемою рисунку 6, при цьому їх центри утворюють рівносторонній трикутник  $O_1O_2O_3$ . Конус 4 с кутом при вершині  $\gamma$  розташовується на трьох нижніх кульках так, що контактує з кожною в точках  $A_1A_2A_3$ . До верхнього конусу прикладена сила  $Q$ , яка передається до кожної з

трьох нижніх кульок по перпендикулярам від твірної конуса в точках дотику з кульками, створюючи рівні сили  $Q_1 = Q_2 = Q_3$ .



**Рисунок 10 Розрахункова схема "конус-три кульки"**

Наявність обойми 5 забезпечує стійке нерухоме положення нижніх кульок при вертикальному навантаженні силою  $Q$  і обертанні конуса моментом навколо вертикальної осі.

З'ясуємо геометрію контакту і характер навантаження в зазначеній схемі (рис.10).

Для визначення сил, що діють між конусом та кульками, необхідно визначити їх напрямки і кут  $\alpha$ :

$$\alpha = 90^\circ - \gamma / 2, \quad (3)$$

де  $\gamma$  – кут при вершині конуса.

Сили, що діють вздовж по нормалі до кожної кульки, виражаються через загальну силу співвідношенням:

$$Q_1 = \frac{Q}{3 \cos \alpha} = \frac{Q}{3 \cos(\gamma / 2)}, \quad (4)$$

Величину  $r$ , що визначає відстань від осі обертання конуса до точки контакту з кульками, визначаємо з подібності трикутників  $OO_1C$  и  $OAB$ :

$$r = O_1C \frac{OA}{OO_1} = O_1C \left( 1 - \frac{R}{OO_1} \right), \quad (5)$$

Величина  $O_1C$  знаходиться як радіус кола, описаного навколо правильного трикутника  $O_1O_2O_3$  (рис. 10):  $O_1C = \frac{2\sqrt{3}}{3} R$ .

З прямокутного трикутника  $OO_1C$ :

$$OO_1 = \frac{O_1C}{\cos \gamma / 2} = \frac{2\sqrt{3}R}{3 \cos \gamma / 2}. \quad (6)$$

Отже після проміжних підстановок отримаємо:

$$r = R \left( \frac{2\sqrt{3}}{3} - \cos(\gamma / 2) \right). \quad (7)$$

При визначенні шляху тертя приймемо, що розміри  $\bar{a}$  площадки контакту на кульках малі порівняно з розміром  $r$  площадки контакту верхнього конуса:  $\bar{a} \ll r$ . Розрахунок шляху тертя будемо здійснювати за середнім радіусом.

Шлях тертя  $S$  для площадки контакту конусу:

$$S_{mp} = 3(2\bar{a})nt, \quad (8)$$

де  $n$  – кількість обертів конуса за одиницю часу;  $t$  – тривалість випробувань;  $\bar{a}$  – середній радіус площадки контакту конуса і кульки.

Для оцінки зношування досліджуваного конічного зразка за схемою конус-три кульки приймемо модель у вигляді залежності інтенсивності зношування від безрозмірних параметрів контактного тиску і температури у вигляді:

$$\frac{du_w}{dS} = fK_w \left( \frac{\sigma}{HB} \right)^m \left( \frac{T}{T^*} \right)^p, \quad (9)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя;  $\sigma$  – тиск у контакті, МПа;  $HB$  – твердість за Брінелем, МПа;  $u_w$  – лінійне зношування конусної поверхні, м;  $S$  – шлях тертя для конуса, м;  $K_w$ ,  $m$ ,  $p$  – параметри закономірності зношування;  $T, T^*$  – відповідно температура випробувань і базова температура, К.

Приймемо форму зношеної поверхні у вигляді колового жолоба з радіусом профілю  $\bar{a}$ . Припустимо що контактний тиск під жорсткою кулькою по зношеній поверхні жолоба конуса розподілений рівномірно. Тоді справедливо співвідношення:

$$\sigma = \frac{Q_1}{\pi \bar{a}^2}, \quad (10)$$

де  $Q_1$  – сила, що діє по нормалі до кожної нижньої кульки;  $\bar{a}$  – радіус колової площадки контакту спряжених кульок і конуса.

Сила  $Q_1$  у відповідності до (10) виражається через загальну силу  $Q$ , що діє на верхню конус:  $Q_1 = \frac{Q}{3 \cos \alpha}$ .

Зв'язок максимального зносу  $u_w$  і розміру площадки контакту  $\bar{a}$  центрі площадки визначається:

$$u_w(S) = \frac{a(S)^2}{2R^*}, \quad (11)$$

де  $R^* = \frac{Rr}{R+r}$  – приведений радіус в контакті конуса і кульки.

Експериментальна залежність радіусу колового жолобу зносу конуса від шляху тертя представляється у вигляді степеневої апроксимації:

$$\bar{a}(S) = cS^\beta, \quad (12)$$

де  $c$ ,  $\beta$  – параметри апроксимації, які визначаються за наслідками випробувань.

Інтегруючи вираз (9), отримаємо інтегральну форму моделі зношування конуса:

$$u_w(S) = fK_w \int_0^S \left( \frac{\sigma(S)}{HB} \right)^m \left( \frac{T}{T^*} \right)^p dS. \quad (13)$$

Далі, підставляючи в ліву частину рівняння вираз для зносу через радіус площадки контакту, а в праву – вираз для контактного тиску, після перетворень отримаємо:

$$\frac{c^2 S^{2\beta}}{2R^*} = fK_w \left( \frac{Q_1}{c^2 \pi HB} \right)^m \left( \frac{T}{T^*} \right)^p \frac{S^{1-2\beta m}}{1-2\beta m}. \quad (14)$$

З умови виконуваності даного рівняння слідує:

$$m = \frac{1-2\beta}{2\beta}. \quad (15)$$

Для знаходження параметра  $P$  проводимо випробування при двох значеннях температури  $T_1$  і  $T_2$ . Тоді на основі (14) отримаємо систему з двох рівнянь. Розділивши перше рівняння на друге, після перетворень отримаємо:

$$p = (2m+2) \frac{\lg(c_1 / c_2)}{\lg(T_1 / T_2)}. \quad (16)$$

Для знаходження коефіцієнта  $K_w$  скористаємось одним з вище вказаних рівнянь:

$$K_w = \frac{\beta c_1^{2m+2}}{fR^*} \left( \frac{3\pi HB \cos \alpha}{Q} \right)^m \left( \frac{T^*}{T} \right)^p. \quad (17)$$

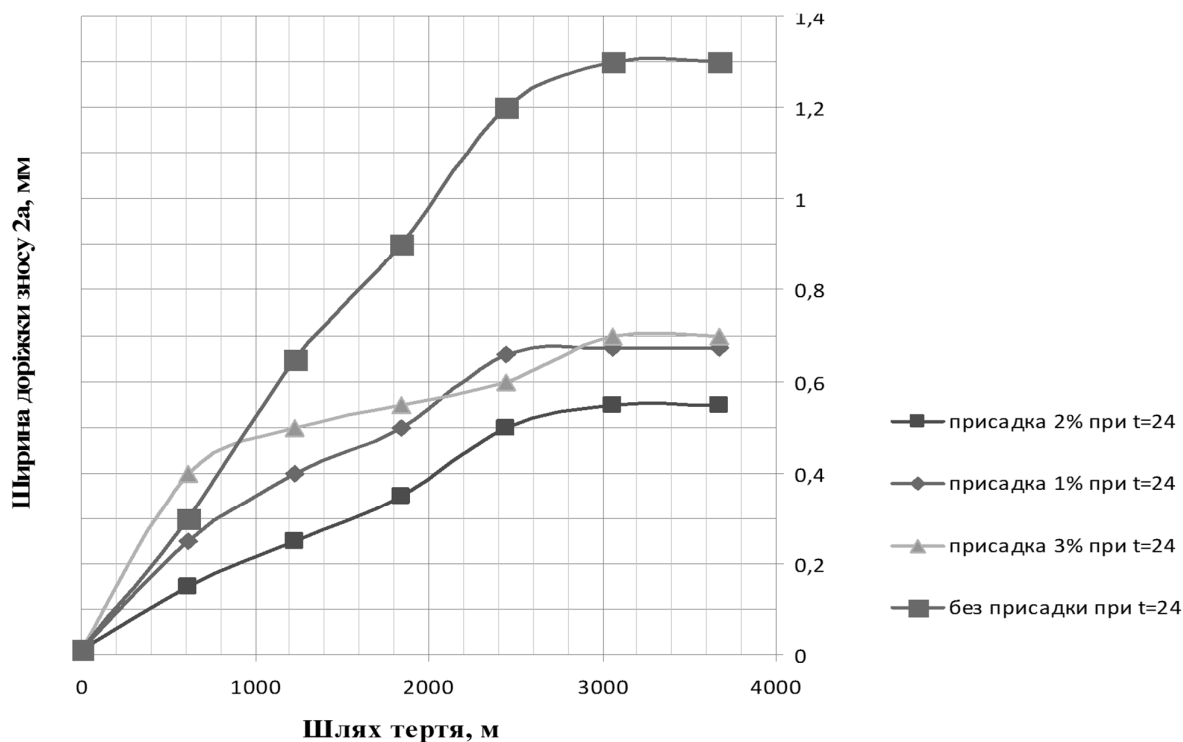
### 5. Результати трибологічних випробувань.

Результати вимірювань ширини доріжки зношування для конічних зразків зі сталі 45 при її змащуванні моторною оливою Magnum 15W-40 при різному вмісті присадки і температури оливи наведені в таблиці 8.

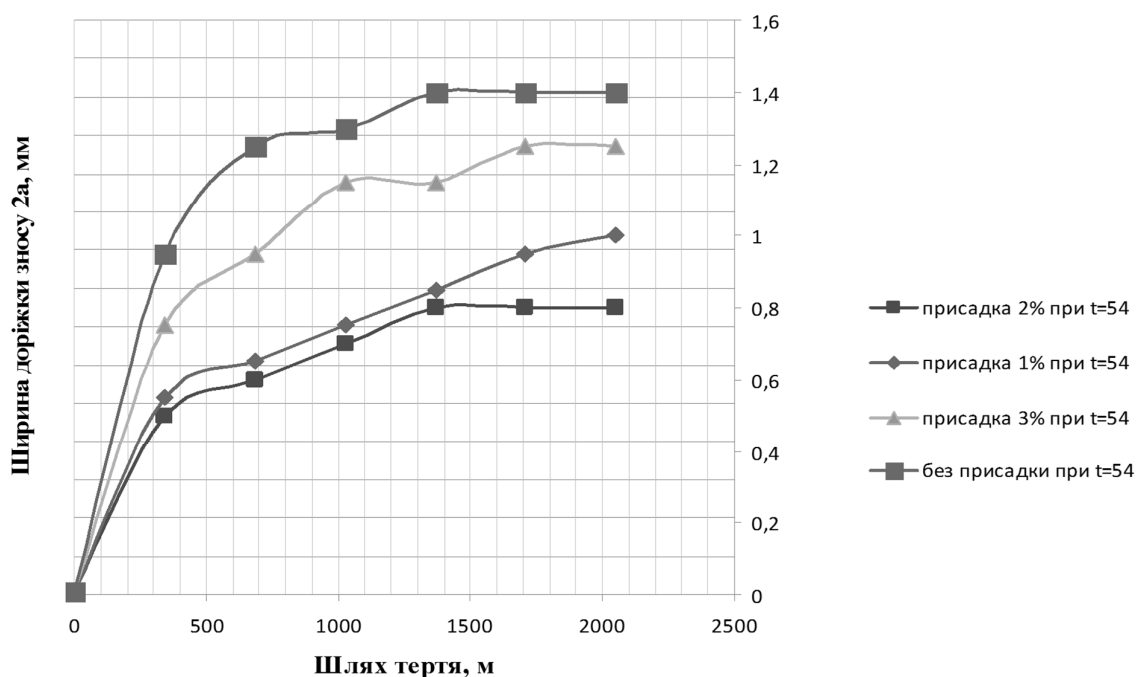
**Таблиця 8 Зміна ширини доріжки зношування 2а (мм) конічних зразків зі сталі 45 при змащуванні моторною оливою Magnum 15W-40**

| S, м | Т = 24 °С         |       |      |      | Т = 54 °С |      |      |      |
|------|-------------------|-------|------|------|-----------|------|------|------|
|      | вміст присадки, % |       |      |      |           |      |      |      |
|      | б/п               | 1 %   | 2 %  | 3 %  | б/п       | 1 %  | 2 %  | 3 %  |
| 342  | 0,30              | 0,25  | 0,15 | 0,4  | 0,95      | 0,55 | 0,50 | 0,75 |
| 684  | 0,65              | 0,4   | 0,25 | 0,5  | 1,25      | 0,65 | 0,60 | 0,95 |
| 1026 | 0,90              | 0,50  | 0,35 | 0,55 | 1,40      | 0,75 | 0,70 | 1,15 |
| 1368 | 1,20              | 0,66  | 0,50 | 0,60 | 1,40      | 0,85 | 0,80 | 1,15 |
| 1710 | 1,30              | 0,675 | 0,55 | 0,70 | 1,40      | 0,95 | 0,80 | 1,25 |
| 2052 | 1,30              | 0,675 | 0,55 | 0,70 | 1,40      | 1    | 0,80 | 1,25 |

Графічна інтерпретація результатів випробувань представлена на рисунках 11 та 12.



**Рисунок 11 Залежність ширини доріжки зносу конічного зразка від шляху тертя при температурі оливи 24 °C**



**Рисунок 12 – Залежність ширини доріжки зносу конічного зразка від шляху тертя при температурі оливи 54 °C**

Отримані графічні залежності були апроксимовані степеневими функціями за допомогою програми Excel і в подальшому використані для розрахунку параметрів моделі інтенсивності зношування. В таблиці 9 наведені результати розрахунку параметрів моделі інтенсивності зношування.



**Таблиця 9 Результати розрахунку параметрів степеневої апроксимації та параметрів інтенсивності зношування при різному вмісті присадок і температурі оливи**

| Параметр моделі зношування |       | $c$    | $\beta$ | $m$    | $p$    | $K_w$                   |
|----------------------------|-------|--------|---------|--------|--------|-------------------------|
| Присадка 1%                | 24 °C | 0,043  | 0,3269  | 0,4217 | 0,9882 | 2,9559·10 <sup>-3</sup> |
|                            | 54 °C | 0,057  | 0,3765  |        |        |                         |
| Присадка 2%                | 24 °C | 0,037  | 0,3028  | 0,4963 | 1,436  | 1,1455·10 <sup>-3</sup> |
|                            | 54 °C | 0,0546 | 0,3655  |        |        |                         |
| Присадка 3%                | 24 °C | 0,0464 | 0,3326  | 0,36   | 1,1409 | 4,9983·10 <sup>-3</sup> |
|                            | 54 °C | 0,0652 | 0,4027  |        |        |                         |
| Без присадки               | 24 °C | 0,0514 | 0,3741  | 0,2957 | 0,7255 | 0,01                    |
|                            | 54 °C | 0,0706 | 0,4162  |        |        |                         |

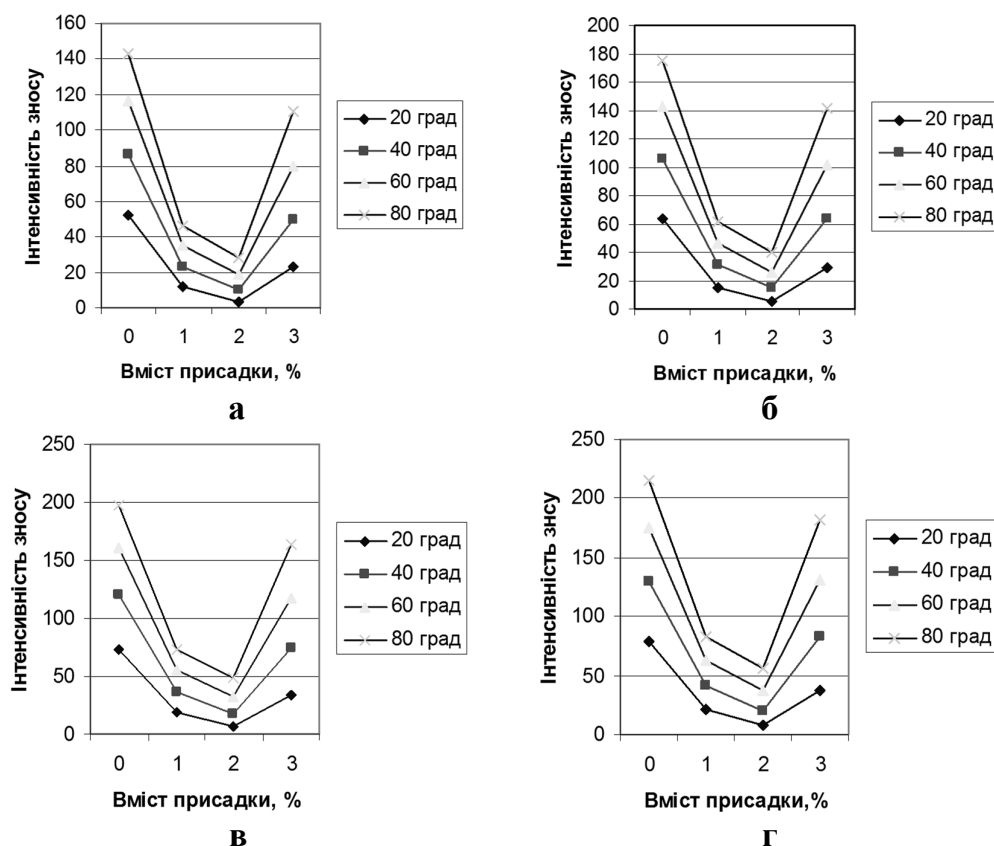
Отримані параметри повністю ідентифікують модель зношування, яка дозволяє розраховувати кількісні значення інтенсивності зношування.

В таблиці 10 приведені результати розрахунку інтенсивності зношування за допомогою програми MathCad за результатами експериментальних випробувань при вмісті присадки до моторної оливи від 1 до 3 відсотків.

**Таблиця 10 Результати розрахунку значень інтенсивності зношування**

| $\sigma$ , МПа<br>$T$ , °C | Конц.<br>прис. | 5      | 10     | 15     | 20     |
|----------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| 20                         | 0 %            | 52,266 | 64,154 | 72,325 | 78,746 |
|                            | 1 %            | 11,703 | 15,676 | 18,599 | 20,998 |
|                            | 2 %            | 3,8492 | 5,4298 | 6,6403 | 7,6594 |
|                            | 3 %            | 22,662 | 29,085 | 33,656 | 37,328 |
| 40                         | 0 %            | 86,418 | 106,07 | 119,59 | 130,2  |
|                            | 1 %            | 23,217 | 31,098 | 36,897 | 41,655 |
|                            | 2 %            | 10,415 | 14,691 | 17,967 | 20,724 |
|                            | 3 %            | 49,976 | 64,14  | 74,22  | 82,318 |
| 60                         | 0 %            | 115,97 | 142,35 | 160,48 | 174,73 |
|                            | 1 %            | 34,66  | 46,426 | 55,082 | 62,186 |
|                            | 2 %            | 18,643 | 26,299 | 32,161 | 37,097 |
|                            | 3 %            | 79,373 | 101,87 | 117,88 | 130,74 |
| 80                         | 0 %            | 142,89 | 175,39 | 197,73 | 215,28 |
|                            | 1 %            | 46,057 | 61,692 | 73,195 | 82,634 |
|                            | 2 %            | 28,179 | 39,751 | 48,612 | 56,073 |
|                            | 3 %            | 110,21 | 141,45 | 163,67 | 181,53 |

За отриманими в таблиці 10 значеннями побудовані графічні залежності інтенсивності зношування від вмісту присадки при різних значеннях фіксованого тиску (рис.13).



**Рисунок 13** Залежності інтенсивності зношування від вмісту присадки, контактного тиску і температури оливи при фіксованому тиску: а –  $p=5$  МПа; б –  $p=10$  МПа; в –  $p=15$  МПа; г –  $p=20$  МПа.

Аналіз отриманих залежностей свідчить про наявність оптимального вмісту мідьвмісної присадки за критерієм найменшої інтенсивності зношування для всього досліджуваного діапазону контактної тиску. Із збільшенням температури і контактної 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 –  $50^{\circ}\text{C}$ ; контактний тиск – 10МПа та здійснено перевірку моделі на адекватність.

4. Теоретично обґрунтовано метод випробування мастильних і конструкційних матеріалів за схемою "конус-три кульки". Отримано аналітичну

формулу шляху тертя для площадки контакту конуса, рівняння залежності інтенсивності зношування від безрозмірних параметрів контактного тиску і температури та визначено його параметри.

5. Наведені результати випробувань ширини доріжки зношування для конічних зразків за сталей 45 при їх змащуванні моторної оливи 15W40 при різному вмісті присадки і температури. Отримані графічні залежності апроксимовані степеневими функціями. Апроксимація дала можливість знайти параметри моделі зношування.

### **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. Хмельницкий: 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 електротрибохімічному 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 олів 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 олів 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 гидротермодинамических 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, Лысков 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.