

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

**Суранов Олексій Олексійович**

УДК 621.891

**ПОКРАЩЕННЯ МАСТИЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ІНДУСТРІАЛЬНИХ ОЛИВ  
ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ПРОДУКТІВ ВИПАРОВУВАННЯ ГРАФІТУ**

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Українському державному університеті залізничного транспорту, Міністерство освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, доцент  
**Воронін Сергій Володимирович,**  
Український державний університет залізничного транспорту, завідувач кафедри будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Дворук Володимир Іванович,**  
Національний авіаційний університет, професор кафедри теоретичної та прикладної фізики

кандидат технічних наук, с.н.с.  
**Кубіч Вадим Іванович,**  
Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри автомобілів

Захист дисертації відбудеться «5» грудня 2018 року о 13<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.832.03 в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: просп. Московський, 45, ауд. 204, м. Харків, Україна, 61050.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, 61002.

Автореферат розісланий « 1 » листопада 2018 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Ю. О. Градиський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Досвід експлуатації транспортно-технологічних та енергетичних машин (ТТЕМ) показав, що їх ресурс обмежується інтенсивністю зношування деталей, які працюють при граничному навантаженні. Одною з головних причин зношування є недостатня мастильна здатність оливи. Ця проблема має місце при експлуатації гідравлічних приводів колійних машин, будівельної та автотранспортної техніки, де використовуються індустріальні оливи без присадок. Вирішення вказаного завдання лежить у площині пошуку та застосування протизносних присадок, які б при малих концентраціях мали високу мастильну здатність та сприяли розширенню діапазону нормального тертя та зношування до меж діючих навантажень. Вказаним вимогам відповідають речовини, які за малих концентрацій змінюють структуру поверхневого шару металу - є концентраторами та переносниками молекул поверхнево-активних речовин (ПАР) на поверхню тертя, та проникають у більш м'яку поверхню, зміцнюючи її поверхневі шари. До таких речовин відносяться: мікро- та наночастинки вуглецю (МНЧВ).

Враховуючи те, що в більшості гідравлічних систем ТТЕМ використовуються гідравлічні оливи які в своїй більшості не містять присадок, як наслідок, підвищення їх мастильної здатності полягає у пошуку економічно-обґрунтованих методів покращення протизносних та антифрикційних властивостей, які засновані на додаванні не найбільш коштовних, але високоякісних, з точки зору тертя та зношування, конгломератів мікро- та наночастинок вуглецю, собівартість яких на порядок менша ніж собівартість чистої складової - фулеренів та нанотрубок.

Саме тому пошук закономірностей впливу концентрації конгломератів частинок випаровування графіту на процеси тертя та зношування в ТТЕМ є актуальною науковою задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана відповідно до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», зі змінами від 16.10.2012, № 5460-VI; «Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року», розпорядження КМУ № 1555-р від 16.12.2009.

Робота виконана в рамках досліджень кафедри будівельних, колійних, та вантажно-розвантажувальних машин Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ), а саме госпдоговірної теми НДРС «Удосконалення, виготовлення та впровадження стаціонарної системи змащування рейок» № ДР 0114U005598, де здобувач був співвиконавцем.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дослідження є покращення антифрикційних і протизносних властивостей індустріальних оливи шляхом додавання вуглецевої сажі (ВС), яка містить в собі мікро- та наночастинки вуглецю, отриманої методом випаровування графіту, та встановлення закономірностей впливу концентрації ВС на характеристики тертя та зношування в трібосистемах.

Для досягнення вказаної мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Виконати теоретичні дослідження впливу концентрації мікро- та наночастинок вуглецю на процес зношування деталей ТТЕМ.

2. Виконати теоретичні дослідження процесу фізичної адсорбції мікро- та наночастинок вуглецю на металеві поверхні тертя.

3. Провести мікрофотографічні дослідження вуглецевої сажі, отриманої електродуговим методом та доданої до індустріальної оливи.

4. Встановити закономірності впливу концентрації вуглецевої сажі на трибологічні властивості індустріальних олив при їх використанні в парі тертя "сталь-сталь" на машині тертя ЧКМ.

5. Встановити закономірності впливу концентрації вуглецевої сажі на трибологічні властивості індустріальних олив при їх використанні в парі тертя "сталь-бронза" на машині тертя СМЦ-2.

6. Розробити практичні рекомендації по впровадженню результатів досліджень та виконати оцінку їх економічної ефективності.

**Об'єкт дослідження.** Процеси фізичної адсорбції мікро- та наночастинок вуглецю, тертя та зношування в трибосистемах ковзання транспортно-технологічних та енергетичних машин при додаванні до оливи вуглецевої сажі.

**Предмет дослідження.** Закономірності впливу концентрації вуглецевої сажі в індустріальних оливах на тертя та зношування в механізмах транспортно-технологічних машин.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження проводились із застосуванням основних положень трибології, електростатики, колоїдної хімії. Лабораторні та стендові випробування виконані із застосуванням апробованих методик та на основі теорії моделювання і планування експерименту.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- *удосконалена* залежність для визначення інтенсивності зношування деталей ковзання транспортно-технологічних та енергетичних машин, яка на відміну від існуючої враховує вплив концентрації мікро- та наночастинок вуглецю на механізм зношування при пружному контакті та механізм абразивного зношування, і дозволяє встановити значення концентрації мікро- та наночастинок вуглецю в оливі на рівні 0,12 %, при якому досягається мінімум зношування деталей ковзання транспортно-технологічних та енергетичних машин;

- *удосконалена* залежність для визначення рівняння руху мікро- та наночастинок вуглецю під дією силового поля поверхні тертя, яка на відміну від існуючого, враховує механізм електризації частинки під дією силового поля поверхні тертя та дозволяє визначити час фізичної адсорбції мікро- та наночастинок вуглецю з урахуванням її електричного дипольного моменту, що залежить від розміру частинки, її відстані до поверхні та напруженості силового поля поверхні;

- *вперше* встановлені закономірності впливу концентрації вуглецевої сажі в індустріальних оливах на їх протизношувальні та протизадирні властивості при роботі в модельних парах тертя ковзання "сталь - сталь" та "сталь - бронза";

- *набув подальшого розвитку* метод покращення мастильної здатності індустріальних олив, який, на відміну від існуючих, враховує отримане значення раціональної концентрації вуглецевої сажі в індустріальних оливах.

#### **Практичне значення одержаних результатів.**

1. Розроблена нова конструкція реактору для випаровування графіту та виготовлений на цій конструкції дослідницький стенд для отримання ВС який

підтверджений патентом України №105616 від 26.05.2014 "Пристрій для отримання наночастинок вуглецю електродуговим способом".

2. Розроблена методика введення вуглецевої сажі до індустриальних олив, яка враховує значення раціональної концентрації вуглецевої сажі за критерієм мінімуму тертя та зношування в трібосистемах ковзання транспортно-технологічних та енергетичних машин.

3. Результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальному процесі Українського державного університету залізничного транспорту при підготовці бакалаврів та магістрів по спеціальності 133 - "Галузеве машинобудування".

4. Результати дослідження впроваджені у Харківській дистанції колії Південної залізниці ПЧ-3 при застосуванні індустриальних олив в системах змащування колійної та будівельної техніки. Економічний ефект від впровадження результатів досліджень, на прикладі машини ВПР-1200 складає 262036,3 грн. на рік.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові положення та практичні результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, одержані здобувачем особисто. Постановка задачі та аналіз отриманих результатів виконано разом з науковим керівником. Роботи, виконані разом зі співавторами, наведені в переліку публікацій. З основних праць, опублікованих у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем а саме: виконаний огляд та аналіз технологій отримання високоструктурованих наночастинок вуглецю [1]; проведений аналіз конструкцій установок для отримання наночастинок вуглецю електродуговим методом [2]; розроблений та виготовлений лабораторний пристрій для отримання наночастинок вуглецю [3]; проведений аналіз властивостей робочих рідин гідроприводів колійної техніки залізниць України [4]; вивчений вплив нанодобавок вуглецю на характер тертя пари ковзання [5]; запропонована математична модель та виконано теоретичні і експериментальні дослідження по підвищенню мастильної здатності індустриальних олив шляхом додавання в них продуктів електродугового випаровування графіту [6]; вивчений вплив концентрації нанодобавок на протизношувальні властивості И-30А [7]; проведені мікрофотографічні дослідження наночастинок вуглецю отриманих електродуговим методом [8]; експериментально оцінений вплив нанодобавок вуглецю на трібологічні властивості індустриальних олив [9].

#### **Апробація результатів дисертації.**

Основні положення та результати доповідалися на наукових конференціях та семінарах: міжнародній науково-технічній конференції "Нові технології, обладнання, матеріали в будівництві та на транспорті", 26-28 листопада 2014 р.; науково-технічній конференції "Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті" №76, 77, 78 (2014, 2015, 2016 р.). - Харків; XVI міжнародній науково-технічній конференції АС ПГП "Промислова гідравліка і пневматика". (Харків, 19-21 жовтня 2016 р.). В повному обсязі дисертація доповідалась на розширеному засіданні кафедри «Будівельні, колійні та вантажно-розвантажувальні машини» УкрДУЗТ (Харків, 2015 р.); науково-технічному семінарі асоціації спеціалістів промислової гідравліки та пневматики (Винниця, 2017 р.); науково-технічному семінарі зі спеціальності 05.02.04 – тертя та зношування в машинах при НАУ

(Київ, 2017 р.); розширеному засіданні кафедри «Транспортних технологій і логістики» ХНТУСГ ім. П. Василенка (Харків, 2017 р.).

**Публікації.** За темою дисертації всього опубліковано 10 наукових праць, у тому числі: 6 статей у фахових виданнях переліку МОН України, з них 5 видань, що входять до міжнародних науко-метричних баз; 1 стаття у закордонному періодичному виданні, що входить до НМБ Scopus; 3 тези доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях; 1 патент України.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації на 10 сторінках, вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел із 165 найменувань на 18 сторінках та 5 додатків на 37 сторінках. Основний обсяг роботи викладено на 147 сторінках і містить 56 рисунків та 26 таблиць. Загальний обсяг роботи складає 202 сторінки.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ** до дисертаційної роботи містить такі положення: актуальність теми; зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; мету та завдання досліджень; наукову новизну одержаних результатів; практичне значення одержаних результатів; особистий внесок здобувача; інформацію про апробації та публікації; відомості про структуру роботи.

**У першому розділі** проведено аналіз робіт, які присвячені вивченню змащувальної дії мастильних матеріалів. Проведено аналіз та розглянуті загальні підходи до зменшення тертя та зношування в трібосистемах. Встановлено, що найбільш енергоємним є процес тертя при граничному мащенні, яке характеризується високим значенням коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування. Виходячи з аналізу існуючих досліджень з вивчення граничного тертя можна виділити декілька методів підвищення мастильної здатності за механізмом дії, саме: фізичний, хімічний та комбінований.

Визначено, що одним із можливих методів підвищення мастильної здатності індустріальних олив є застосування в якості протизношувальних та антифрикційних добавок штучних вуглецевих сполук: фулеренів та нанотрубок. Їх застосування приводить до суттєвого зменшення тертя та зношування, що встановлено раніше попередніми дослідниками.

З іншого боку також встановлено, що вуглецева сажа, яка містить різні наночастинки вуглецю, може забезпечувати аналогічні результати, але вона є значно дешевшою, ніж «чисті» фулерени та нанотрубки, однак її протизношувальна та антифрикційна дія залишається не вивченою. На основі виконаного аналізу літературних джерел у першому розділі сформульована мета та завдання дослідження.

**У другому розділі** запропонована структурно-логічна схема дисертаційного дослідження, яка вказує на першочерговість вивчення впливу концентрації частинок ВС на процес тертя та зношування деталей ТТЕМ. В частині теоретичних досліджень викладена гіпотеза подвійного впливу мікро- та наночастинок вуглецю на процес зношування деталей тертя ковзання. В межах гіпотези сумарна інтенсивність зношування трібосистем ковзання при додаванні в базову оливу мікро- та наночастинок вуглецю в загальному вигляді визначиться як:

$$I_{\Sigma} = I_H + I_A, \quad (1)$$

де  $I_H$  – лінійна інтенсивність зношування при пружному контакті;  $I_A$  – лінійна інтенсивність абразивного зношування.

Для розкриття першої складової залежності (1) в якості базової обрана залежність І.В. Крагельського для лінійної інтенсивності зношування при пружному контакті поверхонь. Друга складова залежності (1) розкрита в повному обсязі у розділі 3.

При виконанні досліджень взаємодії МНЧВ з поверхнею тертя вважається, що основною силою взаємодії є електростатична сила:

$$F_E = \frac{dW_E}{dh}, \quad (2)$$

де  $W_E$  – енергія взаємодії МНЧВ із поверхнею, Дж;  $h$  – відстань МНЧВ до поверхні, м.

Така сила залежить від кристалічної будови поверхні тертя та властивостей МНЧВ, в роботі вона розраховується з урахуванням моделі однорідного фону металу – моделі «желе». Встановивши сили, що діють на агрегат присадки при її фізичній адсорбції, було запропоновано рівняння руху МНЧВ до поверхні в загальному вигляді:

$$m\ddot{x} = F_E - F_C, \quad (3)$$

де  $F_C$  – сила Стокса, яка визначає опір руху МНЧВ у в'язкій рідині.

У розділі наводиться інформація щодо методу отримання та підготовки МНЧВ в лабораторних умовах для їх подальшого використання в трібологічних випробуваннях. Обґрунтовані режими випаровування графіту, які складають  $I=90$  А,  $P=0,05$  МПа. На цих режимах вихідний продукт – фулерени різного гомологічного ряду, одно- та багаточарові нанотрубки, мікро- та наночастинки графіту. Встановлений розмір конгломератів ВС, що містить МНЧВ, які застосовуються в подальших дослідженнях, знаходиться в діапазоні 0,5-2 мкм.

Наведені методики експериментальних досліджень кінематичної в'язкості індустріальної оливи И-30А та випробувань її мастильної здатності на машинах тертя ЧКМ і СМЦ-2.

У **третьому розділі** теоретично досліджений вплив концентрації ВС в індустріальній оливі на її мастильну здатність. За умови, що контакт поверхонь реалізується через адсорбційні шари молекул оливи, глибина занурення буде залежить від товщини таких шарів. Якщо припустити, що контактуючі поверхні мають напівсферичні нерівності однакового радіусу  $R$ , розташовані із однаковим кроком  $t_R$ , та вкриті граничною плівкою товщиною  $h$ , тоді величина занурення  $H$  залежить від зовнішнього навантаження  $F$  і визначає фактичну площу дискретного контакту, як показано на рисунку 1. Номінальна площа контакту залежить від кроку нерівностей і дорівнює  $t_R^2$ , а фактична обчислюється геометрично, згідно схеми на рисунку 1. В кінцевому вигляді залежність для визначення інтенсивності зношування має вигляд:

$$I_H = \frac{0,3}{\pi n} \sqrt{\frac{H}{(R+h)}} \cdot \frac{R^2}{(R+h)^2} \cdot \arccos\left(\frac{R-H}{R}\right), \quad (4)$$

Як видно з отриманої залежності, інтенсивність зношування нелінійно залежить як від товщини граничної плівки, так й від глибини занурення. Запишемо залежність товщини граничної плівки від концентрації полярної фази  $C$  в базовій оливі у вигляді:

$$h(C) = K_I + K_C \cdot C^m, \quad (5)$$

де  $K_I$  – розмірний коефіцієнт, м;  $K_C$  – розмірний коефіцієнт, м;  $m$  – показник ступеня.

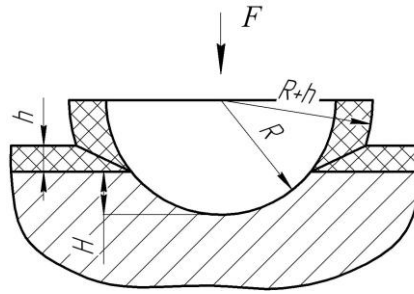


Рис. 1. Схема до визначення фактичної площі дискретного контакту «тверда напівсфера – м'яка площина»

Глибина занурення для схеми на рисунку 1 може бути визначена як глибина відбитку при зануренні твердої кульки в «м'яку» поверхню:

$$H(p_K) = \frac{0,102 \cdot \left( \frac{P_K}{1/4R^2} \right)}{2\pi R \cdot HBW}, \quad (6)$$

де  $R$  – радіус закруглення, м;  $p_K$  – контактний тиск, МПа;  $HBW$  – твердість матеріалу по Брінеллю.

Підставивши (5) і (6) в (4) отримаємо залежність для лінійної інтенсивності зношування при пружному контакті:

$$I_H(C, p_K) = \frac{0,3}{\pi n} \sqrt{\frac{\left( \frac{0,102 \cdot \left( \frac{P_K}{1/4R^2} \right)}{2\pi R \cdot HBW} \right)^2}{(R + (K_I + K_C \cdot C^m))^2}} \cdot \frac{R^2}{(R + (K_I + K_C \cdot C^m))^2} \cdot \arccos\left( \frac{R - \left( \frac{0,102 \cdot \left( \frac{P_K}{1/4R^2} \right)}{2\pi R \cdot HBW} \right)}{R} \right). \quad (7)$$

Отримана залежність (7) описує вплив концентрації МНЧВ та зовнішнього навантаження на інтенсивність зношування трібосистем, в яких використовуються різні за твердістю матеріали, наприклад плунжерні пари аксіально-поршневих насосів та моторів.

При розкритті другої складової залежності (1) розглядається тертя ковзання плунжера аксіально-поршневого насосу або мотору, як абсолютно твердого тіла по «м'якій» гільзі. В цьому випадку тверді абразивні частинки, які є складовими ВС, потрапляючи в зазор, за один хід плунжера утворюють одиничну ділянку зношування, рисунок 2.

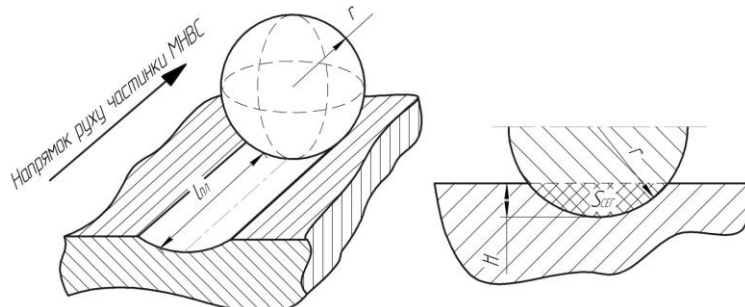


Рис. 2. Схема утворення одиничної ділянки абразивного зношування



Лінійну інтенсивність абразивного зношування «м'якої» гільзи запишемо як:

$$I_A(C) = \frac{N(C) \cdot S_{СЕГ} \cdot l_{Х.ПЛ}}{S_{ПЛ} \cdot l_{ТР}}, \quad (8)$$

де  $N(C)$  – кількість частинок ВС, що потрапляють у зазор плунжерної пари;  $S_{СЕГ}$  – площа сегменту, що вирізається, м<sup>2</sup>;  $l_{Х.ПЛ}$  – хід плунжера, м;  $S_{ПЛ}$  – площа плунжера, м<sup>2</sup>;  $l_{ТР}$  – шлях тертя, м.

Площа сегменту дорівнює:

$$S_{СЕГ} = r^2 \cdot \arccos\left(1 - \frac{h_{ЗАН}}{r}\right) - (r - h_{ЗАН}) \sqrt{2 \cdot r \cdot h_{ЗАН} - h_{ЗАН}^2}, \quad (9)$$

де  $r$  – радіус частинки, м;  $h_{ЗАН}$  – величина занурення частинки, м.

Кількість частинок, що потрапляють в зазор:

$$N(C) = \frac{C \cdot \pi \cdot l_{Х.ПЛ} \cdot \partial(D - \partial)}{\frac{3}{4} r^3}, \quad (10)$$

де  $C$  – концентрація МНЧВ в оливі, %;  $l_{Х.ПЛ}$  – хід плунжера, м;  $\partial$  – зазор в контакті поверхонь тертя, м;  $D$  – діаметр плунжера, м.

Отримані залежності сумарної інтенсивності зношування від концентрації МНЧВ та контактного тиску наведені на рисунках 3а, 3б.

Аналіз графіків 3а, 3б показує, що існує область раціональних значень концентрації МНЧВ, яка має значення близько 0,12%, при якій сумарна інтенсивність зношування мінімальна. Слід відзначити, що контактний тиск в парах тертя ковзання лінійно впливає на сумарну інтенсивність зношування при додаванні до оливи МНЧВ.

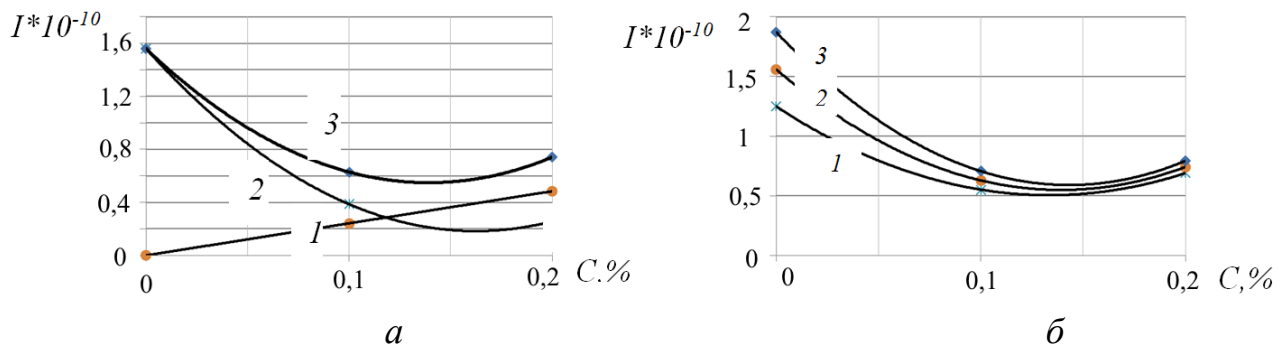


Рис. 3. Закономірність зміни інтенсивності зношування в залежності від концентрації МНЧВ: а) при контактному тиску 6,45 МПа: 1 – інтенсивність абразивного зношування, 2 – інтенсивність зношування при пружному контакті, 3 – сумарна інтенсивність зношування; б) при різних контактних тисках: 1 – контактний тиск  $p_K = 5,16$  МПа, 2 – контактний тиск  $p_K = 6,45$  МПа, 3 – контактний тиск  $p_K = 7,74$  МПа.

Для побудови моделі фізичної адсорбції частинок МНЧВ була розроблена розрахункова схема сил, що діють на частинку, рисунок 4.

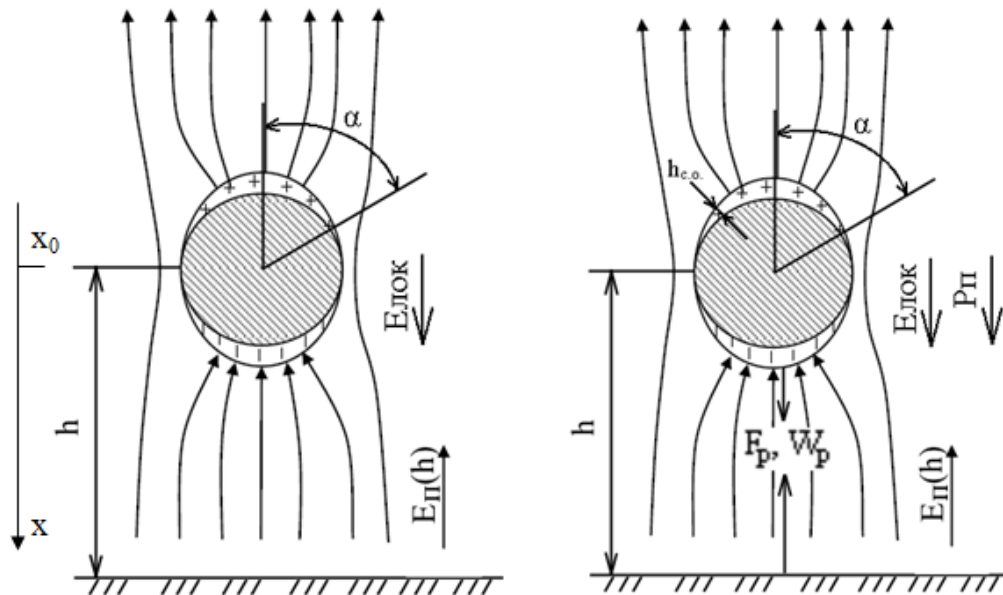


Рис. 4. Розрахункова схема взаємодії частинки з поверхнею тертя:  $OX$  – вісь, що вказує на напрямок руху елемента;  $x_0$  – початкова відстань до поверхні, м;  $F_E$  – сила електростатичної взаємодії (тяжіння), Н;  $F_C$  – сила опору руху (сила Стокса), Н;  $E_П$  – напруженість силового поля металеві поверхні, В/м,  $E_{ЛОК}$  – напруженість локального поля навколо частинки, В/м.

Якщо на частинку діють лише сили  $F_E$  і  $F_C$ , а силою тяжіння та архимедовою силою знехтувати, то рівняння руху елемента буде мати вигляд залежності (3), в якій сила тяжіння частинки визначається залежністю (2), а сила опору руху визначається вирішенням рівняння Нав'є - Стокса для руху "дуже малих" частинок у нерозривній в'язкій рідині. Сила електростатичної взаємодії частинки із поверхнею залежить від двох основних факторів, а саме, від ступеня її поверхневої активності та величини силового поля поверхні тертя. Згідно рисунку 4:

$$h = x_0 - x. \quad (11)$$

З урахуванням (10) та (5) залежність (6) для сили електричної взаємодії буде мати вигляд:

$$F_E = -P \frac{dE_П}{dh} = \frac{P\sigma}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{(1 - \frac{h}{\sqrt{r^2 + h^2}})}{dh} = \frac{P\sigma}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{r^2 + (x_0 - x)^2}} - \frac{x(x_0 - x)}{3\sqrt{r^2 + (x_0 - x)^2}} \right). \quad (12)$$

Виходячи з положень класичної електростатики, взаємодія наночастинки МНЧВ з металевію поверхнею тертя протікає у 3 етапи, а саме: потрапляння частинки в область дії силового поля та її електризація (ліва частина рисунок 4); частинки вкриті сольватної оболонкою молекул оливи із формуванням «жорсткого» електричного диполя; адсорбція «жорсткого» електричного диполя – частинки, вкриті молекулами оливи, на поверхню металу (права частина рисунок 4).

Визначення дипольного моменту частинки МНЧВ виконаємо на основі рекомендацій як:

$$P = 4\pi\varepsilon_0(R_v + h) \cdot E_{II}(h), \quad (13)$$

де  $R_v$  – радіус частинки, м;  $h$  – товщина сольватної оболонки, м.

Одною з головних задач також є визначення щільності поверхневого заряду  $\sigma$ . Ця задача вирішується із застосуванням моделі «желе». Враховуючи положення такої моделі, для поверхневого заряду запишемо:

$$\sigma = \frac{q^+ - |q^-|}{\lambda^2}, \quad (14)$$

де  $q^+$ ,  $q^-$  – заряди, відповідно, іонного вузла поверхні та електронного газу поблизу іонного вузла, Кл;  $\lambda$  – період атомарної шорсткості поверхні (приблизно дорівнює періоду кристалічної решітки металу), м.

Поєднавши залежності (13–14) отримаємо залежність для сили електростатичної взаємодії частинки з металевою поверхнею:

$$F_E = \frac{P(q^+ - |q^-|)}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0\lambda^2} \left( \frac{1}{\sqrt{r^2 + (x_0 - x)^2}} - \frac{x(x - x_0)}{\sqrt[3]{r^2 + (x_0 - x)^2}} \right). \quad (15)$$

У кінцевому вигляді рівняння руху частинки диполя (3) отримаємо:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{P(q^+ - |q^-|)}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0\lambda^2} \left( \frac{1}{\sqrt{r^2 + (x_0 - x)^2}} - \frac{x(x - x_0)}{\sqrt[3]{r^2 + (x_0 - x)^2}} \right) - 6\pi R\mu \frac{dx}{dt}. \quad (16)$$

Залежність (16) враховує як властивості частинок МНЧВ – розмір та дипольний момент, так й в'язкість базової оливи та властивості металевої поверхні тертя, на якій адсорбується частинка. До таких властивостей відноситься період кристалічної решітки металу та його валентність. Звичайно, мова іде про «ювенільну» ділянку поверхні тертя, що утворюється в процесі зношування та екранується частинками МНЧВ та молекулами оливи. На рисунку 5 наведені результати часткового рішення рівняння (16), якими встановлена закономірність зміни часу адсорбції частинок МНЧВ в залежності від їх радіусу та початкової відстані до поверхні.

Отримані закономірності розкривають механізм фізичної адсорбції частинок МНЧВ у вигляді електричних диполів. Як видно з графіків, рисунок 5, час адсорбції нелінійно залежить як від радіусу мікро- та наночастинок МНЧВ, так й від початкової відстані частинок до поверхні. Наприклад, при зміні радіусу з 2 до 500 нанометрів і при початковій відстані 1 мкм, час змінюється приблизно в 40 разів, а при початковій відстані 2 мкм – приблизно в 60 разів. Час адсорбції, згідно виконаних розрахунків, складає від  $10^{-7}$  до  $10^{-4}$  секунди, залежно від радіусу, що підтверджує отримані раніше експериментальні дані інших дослідників. В цілому, розроблена фізична та математична модель (залежність 16) процесу фізичної адсорбції електропровідних частинок МНЧВ дозволяє отримати практичні дані щодо їх розміру та потрібної концентрації в базовій оливі в залежності від швидкості відносного переміщення нано- та мікроскопічних ділянок зношування поверхонь тертя.

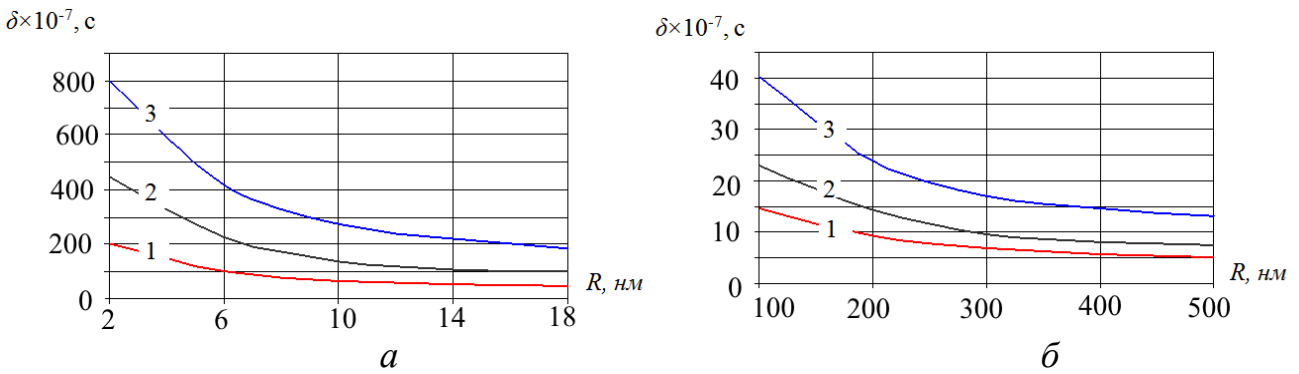


Рис. 5. Зміна часу адсорбції частинок МНЧВ в залежності від радіусу та початкової відстані: 1 –  $x_0 = 1$  мкм; 2 –  $x_0 = 1,5$  мкм; 3 –  $x_0 = 2$  мкм; а)  $R=2-18$  нм; б)  $R=100-500$  нм

Слід відзначити також, що згідно експериментальних даних інших дослідників отримані дані щодо часу фізичної адсорбції окремих молекул та їх агрегатів складають близько  $10^{-9}$  до  $10^{-6}$  секунди, що підтверджує першочерговість формування сольватної оболонки, а вже потім прояв адсорбції частинок МНЧВ.

Таким чином, розроблена математична модель процесу фізичної адсорбції електропровідних частинок МНЧВ на металевій поверхні дозволяє отримати практичні дані щодо їх розміру та потрібної концентрації в базовій оливі в залежності від швидкості відносного переміщення нано- та мікроскопічних ділянок зношування поверхонь тертя.

Встановлено, що при додаванні МНЧВ до оливи сумарна інтенсивність зношування пар тертя ковзання на початковому етапі зменшується, та при досягненні концентрації 0,12% спостерігається мінімум, а при подальшому зростанні концентрації інтенсивність зношування зростає. Це пояснюється тим, що процес абразивного зношування за більших концентрацій переважає позитивний вплив МНЧВ, як фактора зростання товщини граничної плівки.

**В четвертому розділі** наведені результати експериментальних досліджень трибологічних характеристик мастильних матеріалів при додаванні до них продуктів випаровування графіту.

Проведені дослідження кінематичної в'язкості оливи И-30А показали, що додавання, в якості присадки вуглецевої сажі приводить до підвищення в'язкості. Встановлено, що кількість ВС не повинна перевищувати 0,38%, щоб не вийти за межі вимог ДСТУ 20799–88.

Випробування мастильних матеріалів на машині тертя ЧКМ показали, що з ростом концентрації від 0 до 0,15% спостерігається зменшення діаметра плями зносу на 8,7% – 9%, збільшення значення індексу задиру на 13,4%, збільшення критичного навантаження на 16,5% та збільшення навантаження зварювання на 14,2%. При подальшому збільшенні значення концентрації до 1 % ВС основні трибологічні показники погіршуються, крім навантаження зварювання, яке не змінюється.

Для отримання залежностей у вигляді рівнянь регресії було проведено чотири одно-факторних експерименти, в кожному з яких проводилось по 11 дослідів, які дозволили визначити коефіцієнти рівнянь при заданій довірчій

ймовірності. Результати експериментальних досліджень на машині тертя ЧКМ наведені на рисунках 6 та 7.

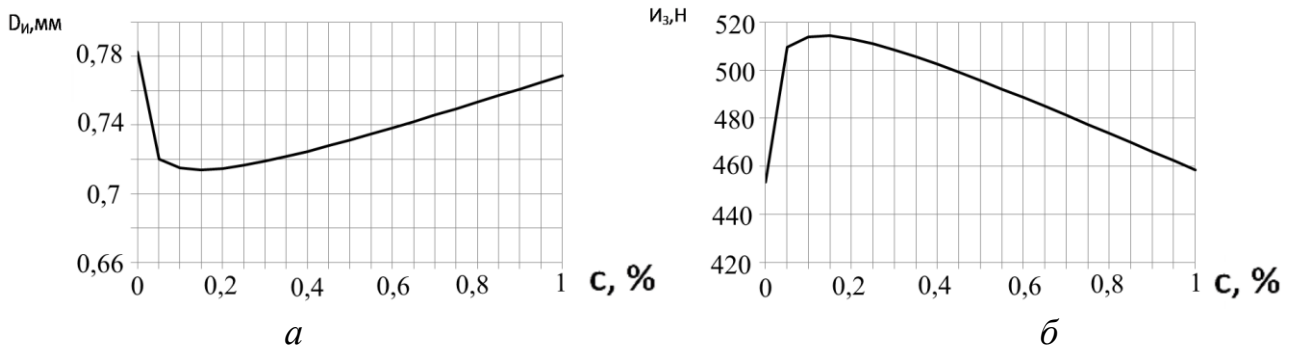


Рис. 6. Графіки зміни плями зносу (*a*) та індексу задиру (*б*) в залежності від концентрації ВС в оливі И-30А

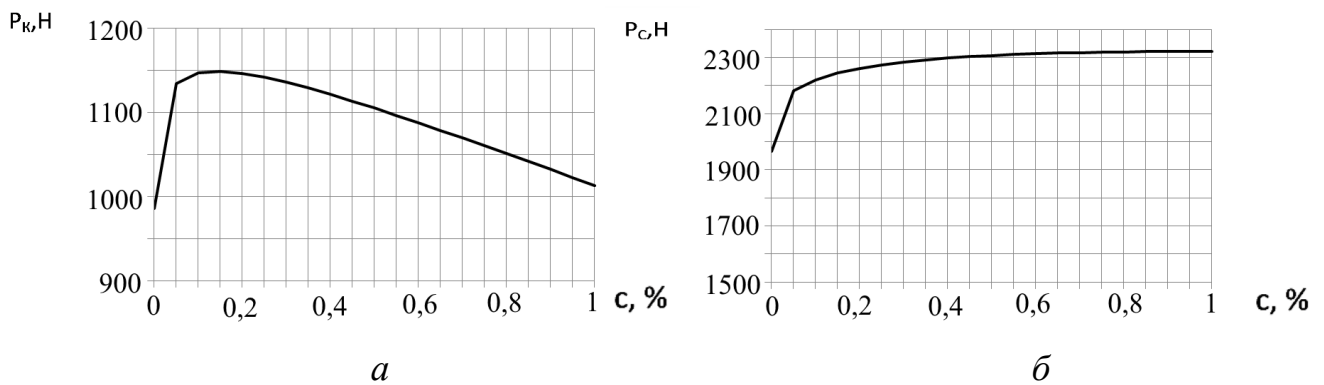


Рис. 7. Графіки зміни критичного навантаження (*a*) та навантаження зварювання (*б*) в залежності від концентрації ВС в оливі

По результатам проведених досліджень одержані рівняння регресії, які описують закономірність зміни індексу задиру та діаметра плями зносу від концентрації ВС в оливі И-30А:

– діаметр плями зносу в залежності від концентрації ВС в оливі

$$D_{II} = 0,246148 c^{\frac{2}{3}} - 0,260028 c^{\frac{1}{3}} + 0,78267; \quad (17)$$

– індекс задиру в залежності від концентрації ВС в оливі

$$I_3 = -233,659 c^{\frac{2}{3}} + 238,921 c^{\frac{1}{3}} + 453,318. \quad (18)$$

Результати перевірки на відтворюваність та адекватність одержаних залежностей (17-18) наведені в наступних рівняннях:

– визначення діаметра плями зносу

$$G_K = 0,363636 \leq 0,541, \quad F_\phi = 0,501922 \leq 5,59;$$

– визначення індекс задиру

$$G_K = 0,347759 \leq 0,541, \quad F_\phi = 0,309924 \leq 5,59.$$

– критичне навантаження в залежності від концентрації ВС в оливі

$$P_K = -594,098 c^{\frac{2}{3}} - 621,206 c^{\frac{1}{3}} + 986,152; \quad (19)$$

– навантаження зварювання в залежності від концентрації ВС в оливі

$$P_c = -362,338c^{\frac{2}{3}} + 718,139c^{\frac{1}{3}} + 1965,858. \quad (20)$$

Перевірка на відтворюваність та адекватність одержаних залежностей наведена в наступних рівняннях:

– визначення критичного навантаження

$$G_K = 0,399102 \leq 0,541, \quad F_\phi = 0,356149 \leq 5,59;$$

– визначення навантаження зварювання

$$G_K = 0,25 \leq 0,541, \quad F_\phi = 0,096321 \leq 5,59.$$

Випробування мастильних матеріалів на машині тертя СМЦ-2.

Незалежними факторами при проведенні експериментальних досліджень були вибрані: концентрація ВС в індустріальній оливі И-30А та зовнішнє навантаження. Концентрація ВС вибиралась в діапазоні 0–0,2%. Цій вибір обумовлений результатами теоретичних та експериментальних досліджень, в яких були визначені раціональні значення концентрації. Матеріали випробуваних зразків: ролик виготовлений з легованої сталі 38Х2МЮА, а колодка - з багатокомпонентної бронзи Бр.АЖ 9-4.

Враховуючи той факт, що гідродинамічний мастильний шар виключає безпосередній контакт поверхонь і є діелектриком, в такому режимі змащення електричний опір рухомого контакту зразків мав значення більше 1 МОм. При руйнуванні гідродинамічного мастильного шару пара тертя переходить в режим граничного змащення, а опір контакту різко падає і досягає значень 0,2 - 1 Ом, що відповідає контакту зразків без змащувального матеріалу.

У результаті комбінації контактних тисків, а також аналізу електричного опору змащеного контакту зразків були встановлені значення контактного тиску, при яких має місце перехід від гідродинамічного змащення пари тертя в граничне. Зовнішнє навантаження було прийняте в діапазоні від 800 до 1200 Н (5,16МПа – 7,74 МПа).

По результатам проведених досліджень одержані рівняння регресії, які описують закономірність зміни моменту тертя між колодкою та роликом та зносу пари тертя «колодка – ролик» в залежності від обраних факторів із застосуванням оливи И-30А:

– момент тертя між колодкою та роликом, Н\*м

$$M_{TP} = 6,2333334c^2 + 0,0000002p_H^2 - 1,8533334c - 0,0002496p_H + 0,000375c \cdot p_H + 1,149278, \quad (21)$$

– знос ролика

$$U = 27,7501c^2 + 0,0007p_H - 8,3834c + 0,0009c \cdot p_H + 0,0701, \quad (22)$$

– знос колодки

$$U = 125,1667c^2 + 0,0048p_H - 31,1501c - 0,0038c \cdot p_H - 0,1467. \quad (23)$$

де  $c$  – концентрація ВС в індустріальній оливі И-30А, %;

$p_H$  – зовнішнє навантаження, Н.

Графічне зображення результатів випробувань пари "колодка-ролик" на машині тертя СМЦ-2 щодо зміни моменту тертя від концентрації ВС та зовнішнього навантаження при температурі оливи 40<sup>0</sup>С наведені на рисунках нижче.

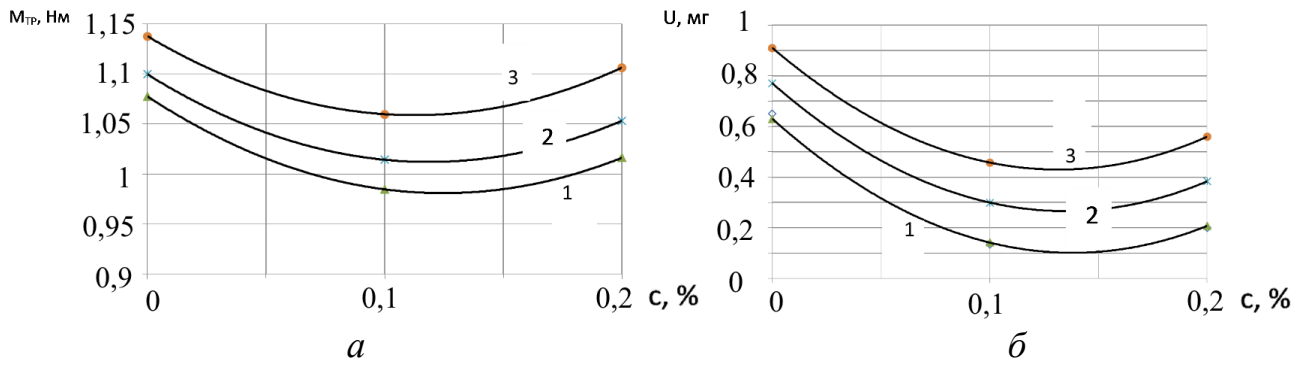


Рис. 8. Зміна моменту тертя (*a*) та зносу ролика (*б*) в залежності від концентрації ВС в індустріальній оливі И-30А: 1 – зовнішнє навантаження  $P_H = 800\text{Н}$  (5,16МПа); 2 –  $P_H = 1000\text{Н}$  (6,45МПа); 3 –  $P_H = 1200\text{Н}$  (7,74МПа)

Згідно отриманих результатів по впливу концентрації ВС на зміну моменту тертя в парі "колодка-ролик" з ростом концентрації від 0 до 0,1% спостерігається зменшення моменту тертя на 7% – 8,4% при зовнішньому навантаженні від 800Н до 1200Н. При подальшому збільшенні значення концентрації момент тертя починає зростати. Мінімальний момент тертя, в усьому діапазоні зовнішніх навантажень, спостерігається при значенні концентрації ВС приблизно 0,11–0,12%.

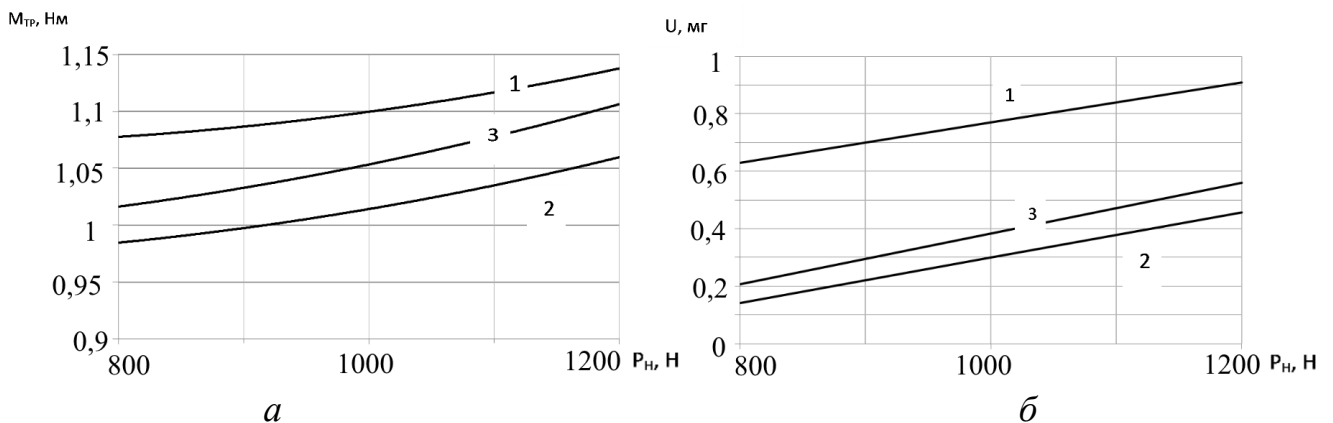


Рис. 9. Зміна моменту тертя (*a*) та зносу ролика (*б*) в залежності від зовнішнього навантаження при різних концентраціях ВС в оливі: 1 – індустріальна олива И-30А без застосування ВС; 2 – концентрація ВС 0,1% в оливі; 3 – концентрація ВС 0,2% в оливі

Результати випробувань встановлення впливу концентрації ВС на змінення зносу пари тертя "колодка-ролик" при зовнішньому навантаженні (800-1200Н) на машині СМЦ-2 зображені на рисунку 10.

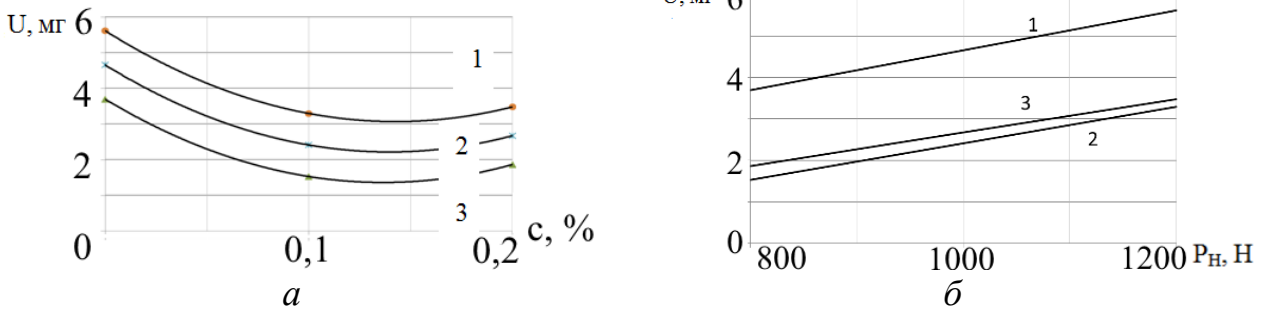


Рис. 10. Зміна величини зносу колодки в залежності від концентрації ВС в індустріальній оливі И-30А (а) та зовнішнього навантаження (б): а) 1 –  $P_H = 800\text{Н}$  (5,16МПа); 2 –  $P_H = 1000\text{Н}$  (6,45МПа); 3 –  $P_H = 1200\text{Н}$  (7,74МПа), б) 1 – індустріальна олива И-30А без застосування ВС; 2 – концентрація ВС 0,1% в оливі; 3 – концентрація ВС 0,2% в оливі

Порівняння теоретичних та експериментальних досліджень впливу концентрації ВС та зовнішнього навантаження на інтенсивність зношування наведені на рисунку 11.

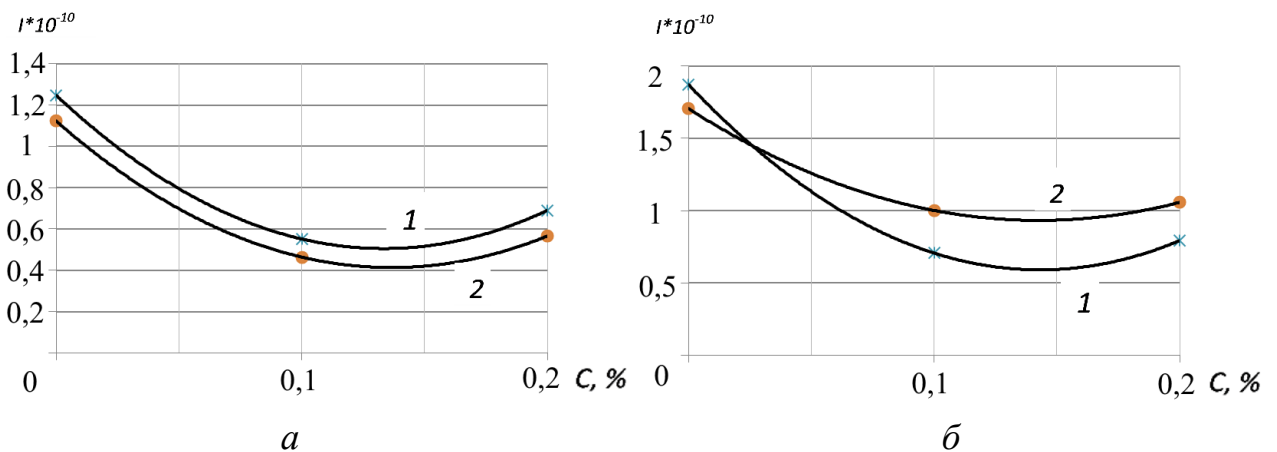


Рис. 11. Порівняння теоретичних та експериментальних досліджень зміни інтенсивності зношування в залежності від концентрації ВС при контактному тиску: а) 5,16 МПа та б) 7,74 МПа: 1 – теоретична крива; 2 – експериментальна крива.

Зразки пар тертя отримані після випробувань мастильних матеріалів на машині СМЦ-2 були досліджені на атомно-силовому мікроскопі (рисунок 12).

Аналіз зображень з атомно-силового мікроскопу, показав наявність на поверхнях тертя нанорозмірних включень, як на сталі так і на бронзі. Це говорить про те, що наночастинки вуглецевої сажі занурюються в поверхневий шар, що призводить до його дискретного зміцнення.

Таким чином, згідно проведених експериментальних досліджень на машині тертя СМЦ-2 встановлено, що вміст ВС в індустріальній оливі И-30А сприяє зменшенню інтенсивності зношування пари тертя «колодка-ролик». З ростом концентрації ВС від 0 до 0,1% спостерігається зменшення інтенсивності зношування колодки на 48,5% – 65,2%, а ролика на 52% – 84% при зовнішньому навантаженні від 800Н до 1200Н. При подальшому збільшенні концентрації інтенсивність зношування починає зростати, що пояснюється



перевагою абразивного зносу. Мінімальна інтенсивність зношування, в усьому діапазоні зовнішніх навантажень, спостерігається при значенні концентрації ВС приблизно 0,12–0,13%.

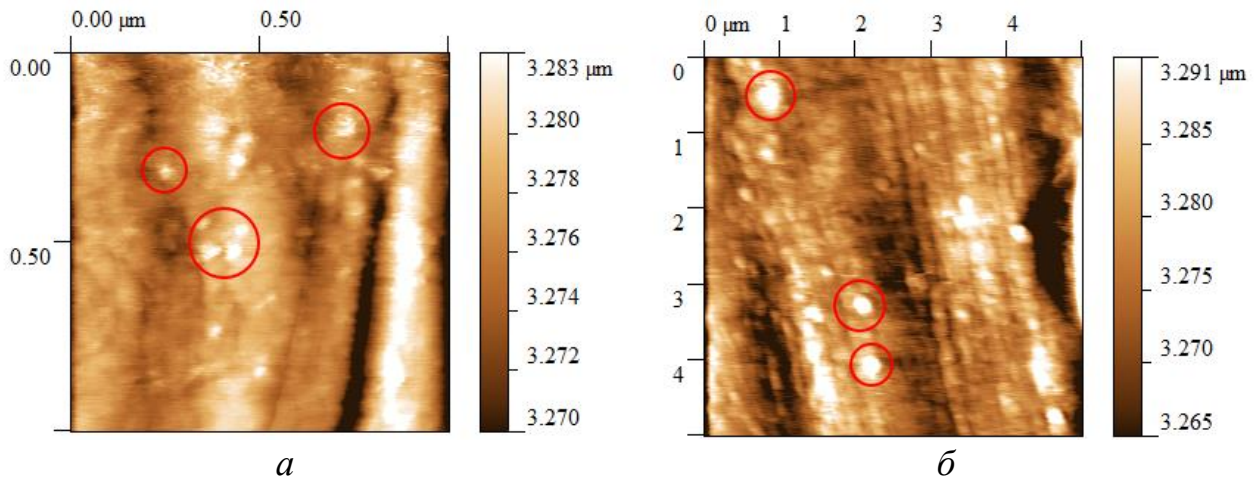


Рис. 12. Поверхня ролика (а) та колодки (б) після випробувань на машині тертя СМЦ-2

Аналіз отриманих результатів показав, що розбіжність теоретичних та експериментальних досліджень в середньому складає 16% в усьому дослідженому діапазоні навантажень та концентрацій ВС в оливі.

У п'ятому розділі подано практичні рекомендації щодо застосування результатів дослідження.

Проведений розрахунок економічної ефективності використання пропонованої присадки у гідравлічних оливах.

### ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання - покращення антифрикційних та протизношувальних властивостей індустріальних олив шляхом додавання вуглецевої сажі, яка містить в собі мікро- та наночастинки вуглецю, отриманої електродуговим методом випаровування графіту, на основі встановлення закономірностей впливу концентрації вуглецевої сажі на характер тертя та зношування в трібосистемах.

1. Проведений аналіз науково-технічної літератури, а також досвіду інших дослідників показав, що одним з перспективних методів покращення мастильної здатності індустріальних олив є додавання до них наночастинок вуглецю, фулеренів та нанотрубок. Однак, такі частинки у чистому вигляді мають високу вартість та з цієї позиції не виправдовують себе. Саме тому, частина дослідників пропонує використовувати менш кошовну вуглецеву сажу, не розділюючи на фракції. Існуючі дослідження трібологічних характеристик вуглецевої сажі показали її антифрикційну та протизношувальну дію, але в цих дослідженнях не вирішувалось питання з встановлення раціональної концентрації вуглецевої сажі в індустріальних оливах з урахуванням режимів отримання сажі.

2. При додаванні мікро- та наночастинок вуглецю до індустріальних олив механізм зношування деталей ковзання транспортно-технологічних та енергетичних машин має подвійну природу і складається з механічного та абразивного зношування. Перша складова нелінійно зменшується із зростанням

концентрації мікро- та наночастинок вуглецю, що пов'язано з заповненням мікронерівностей частинками, збільшенням фактичної площі контакту та товщини граничної плівки на поверхнях тертя. Абразивне зношування пов'язано з високою твердістю мікро- та наночастинок вуглецю та лінійно зростає з ростом їх концентрації. Сума інтенсивностей зношування обох видів дозволила встановити раціональне значення концентрації вуглецевої сажі на рівні 0,12-0,13% від маси оливи, при якій лінійна інтенсивність зношування мінімальна та складає  $0,5 \times 10^{-10}$ .

3. Мікро- та наночастинок вуглецю вуглецевої сажі, при потраплянні у силове поле поверхні тертя, приймають участь у фізичній конкурентній адсорбції поруч із молекулами оливи. Рішення отриманого у роботі рівняння руху мікро- та наночастинок вуглецю під дією силового поля молекул показало, що час адсорбції мікро- та наночастинок вуглецю на 2-3 порядки меншій, ніж у поодиноких молекул оливи. Тобто, механізм взаємодії мікро- та наночастинок вуглецю з поверхнею тертя протікає у три етапи: електризація частинки, формування сольватної оболонки навколо частинки, та її першочергової адсорбції на поверхню металу. Враховуючи отримані розрахункові данні мікро- та наночастинок вуглецю являються концентраторами та транспортерами поверхнево-активних речовин до поверхні тертя, що сприяє збільшенню товщини граничної плівки.

4. Вуглецева сажа, отримана електродуговим методом в лабораторних умовах, являє собою конгломерати мікро- та наночастинок вуглецю, розміри яких знаходяться у широкому діапазоні - від нанометрів до десятих долей міліметрів. Мікрофотографічні дослідження частинок вуглецевої сажі після їх попереднього відстоювання та подрібнення показали, що при введенні у індустриальну оливу досягається розмір від 0,5 мкм до 2 мкм. Такі частинки не випадають в осад, не фільтруються у стандартних фільтрах, легко потрапляють у зазор деталей ковзання транспортно-технологічних та енергетичних машин, як наслідок, приймають участь у формуванні мастильного шару.

5. Випробування мастильних матеріалів на машині тертя ЧКМ показали, що з ростом концентрації вуглецевої сажі від 0 до 0,15% спостерігається зменшення діаметра плями зносу на 8,7% – 9%, збільшення значення індексу задиру на 13,4%, збільшення критичного навантаження на 16,5% та збільшення навантаження зварювання на 14,2%. При подальшому збільшенні концентрації до 1 % ВС основні трибологічні показники погіршуються, крім навантаження зварювання, яке не змінюється.

6. Експериментальні дослідження на машині тертя СМЦ-2 показали, що концентрація вуглецевої сажі в індустриальній оливі сприяє зменшенню зносу деталей транспортно-технологічних та енергетичних машин. Із зростанням концентрації вуглецевої сажі від 0 до 0,12% інтенсивність зношування бронзової колодки зменшується на 48,5% – 65,2%, а сталюого ролика на 52-84% при зовнішньому навантаженні 800-1200 Н. При подальшому збільшенні концентрації вуглецевої сажі інтенсивність зношування зростає, що пояснюється перевагою абразивного зносу. Отримані результати дослідження дозволили встановити раціональне значення концентрації вуглецевої сажі в оливі на рівні 0,12-0,13%, що підтверджує результати теоретичних досліджень. Середнє відхилення теоретичних даних від експерименту не перевищує 16%.

7. Запропонована методика покращення мастильної здатності індустріальних олив у виробничих підприємствах залізничного транспорту. Головною складовою методики є дотримання середнього розміру мікро- та наночастинок вуглецю, розчинених у індустріальній оливі на рівні 1 мкм та в концентрації 0,12-0,13%. Економічні розрахунки показали, що уведення вуглецевої сажі до індустріальної оливи И30-А у вказаній концентрації призводить до збільшення вартості оливи на 21 грн/кг, тобто порівняно з ринковою вартістю 1 кг оливи И-30А на 2018 р., її ціна зросте з 50 грн до 72 грн.. Враховуючи отримані дані, а також результати дослідження протизносних властивостей оливи при додаванні до неї вуглецевої сажі приріст економічного ефекту від експлуатації машини ВПП-1200 складає 262036,3 грн на рік роботи.

#### ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1 Суранов О.О., Воронін С.В., Суранов О.В. Аналитический обзор технологий получения высокоструктурированных наночастиц углерода// Науковий вісник будівництва. - Харків: ХНУБА (ХОТВ АБУ), 2013.- Вип. 73.- С. 212-223;

2 Суранов О.О., Воронін С.В., Онопрейчук Д.В., Амінов Д.О. Огляд та аналіз конструкцій установок для отримання наночастинок вуглецю електродуговим методом // Збірник наукових праць УкрДАЗТ.- Харків: УкрДАЗТ, 2013.- Вип. 141.- С.253-258;

3 Суранов О.О., Воронін С.В., Суранов О.В., Куц В.М. Лабораторний пристрій для отримання наночасток вуглецю// Збірник наукових праць УкрДАЗТ.-Харків: УкрДАЗТ, 2014.- Вип. 148.- Ч.1.- С. 74-78;

4 Суранов О.О., Воронін С.В., Сафонюк І.Ю., Онопрейчук Д.В., Стефанов В.О. Аналіз властивостей робочих рідин гідроприводів колійної техніки залізниць України // Збірник наукових праць УкрДУЗТ.- Харків: УкрДУЗТ, 2016.- Вип. 165.- С. 90-98;

5 A.A. Suranov, S.V. Voronin, A.V. Suranov The effect of carbon nano-additives on the tribological properties of industrial oils Journal of Friction and Wear.- Allerton Press, Inc., 2017.- Vol. 38.- № 5.- pp. 359-363.

6. Суранов О.О. Підвищення мастильної здатності індустріальних олив шляхом додавання в них продуктів електродугового випаровування графіту / О.О. Суранов // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів – 2018. – № 13. – С. 158 -164.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Суранов О.О., Воронін С.В., Суранов О.В. Вплив нанодобавок на протизношувальні властивості гідравлічної рідини И-30А/ XVII Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика. м. Харків, 19-21 жовтня 2016 р.: матеріали конференції. - Вінниця: »ГЛОБУС-ПРЕС», 2016.- С. 102;

8. Суранов О.О. Мікрофотографічні дослідження наночастинок вуглецю, отриманих електродуговим методом/ Збірник наукових праць УкрДУЗТ.// Матеріали доповідей 78 міжнародної науко-во-технічної конференції «Развитие научной и инновационной деятельности на транспорте».-Харьків: УкрДУЗТ, 2016.- Вип.160.- С. 99;

9. Суранов О.О., Воронін С.В., Суранов О.В. Вплив нанодобавок вуглецю на трибологічні властивості індустриальних олив // XVIII Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика. Вінниця, 3-6 жовтня 2017 р.: матеріали конференції. - Вінниця: »ГЛОБУС-ПРЕС», 2017.- С. 115.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

10. Пристрій для отримання наночасток вуглецю електродуговим способом Патент на винахід № 105616 Україна: МПК С01В 31/02, В82В 3/00 заявник УкрДАЗТ. - заявл. 30.09.2013; опубл. 25.05.2014, Бюл. №10. - 9 с.

### АНОТАЦІЯ

**Суранов О. О. - Покращення мастильної здатності індустриальних олив шляхом використання продуктів випаровування графіту. - Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 - Тертя та зношування в машинах. - Український державний університет залізничного транспорту МОН України. - Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка МОН України, Харків, 2018.

Дисертаційна робота спрямована на покращення антифрикційних і протизносних властивостей індустриальних олив шляхом додавання вуглецевої сажі, яка містить в собі мікро- та наночастинки вуглецю, отриманої методом випаровування графіту, та встановлення закономірностей впливу концентрації вуглецевої сажі на характеристики тертя та зношування в трібосистемах.

Встановлено що, при додаванні мікро-наночастинок вуглецю до індустриальних олив механізм зношування деталей ковзання має подвійну природу і складається з механічного та абразивного зношування. Сума інтенсивностей зношування обох видів дозволила встановити раціональне значення концентрації наночастинок вуглецю.

В роботі розроблена математична модель, що розкриває механізм фізичної адсорбції частинок вуглецю, які поляризуються під дією силового поля поверхні тертя та набувають електричного дипольного моменту.

Розроблено методику введення вуглецевої сажі до індустриальних олив, яка враховує значення раціональної концентрації ВС за критерієм мінімуму тертя та зношування в трібосистемах ковзання ТТЕМ.

**Ключові слова:** індустриальна олива, вуглецева сажа, концентрація вуглецевої сажі, мастильна здатність, тертя, інтенсивність зношування.

### АНОТАЦІЯ

**Суранов А. А. - Улучшение смазочной способности и индустриальных масел путем использования продуктов испарения графита. - Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 - Трение и износ в машинах. - Украинский государственный университет железнодорожного транспорта МОН Украины. - Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко МОН Украины, Харьков, 2018.

Диссертационная работа направлена на улучшение антифрикционных и противоизносных свойств индустриальных масел путем добавления углеродной

сажи, которая содержит в себе микро- и наночастицы углерода, полученной методом испарения графита, и установление закономерностей влияния концентрации углеродной сажи на характеристики трения и износа в трибосистемах. Установлено, что при добавлении микро-наночастиц углерода в индустриальные масла механизм износа деталей скольжения имеет двойственную природу и состоит из механического и абразивного износа. Сумма интенсивностей изнашивания обоих видов позволила установить рациональное значение концентрации наночастиц углерода.

В работе разработана математическая модель, которая раскрывает механизм физической адсорбции частиц углерода, которые поляризуются под действием силового поля поверхности трения и приобретают электрический дипольный момент. Решение полученного в работе уравнения микро- и наночастиц углерода под действием силового поля показало, что время адсорбции микро- и наночастиц углерода на 2-3 порядка меньше, чем у отдельных молекул масла. То есть, механизм взаимодействия микро- и наночастиц углерода с поверхностями трения протекает в три этапа: электризация частицы, формирование сольватной оболочки вокруг частицы и ее первоочередная адсорбция на поверхность металла. Учитывая полученные расчетные данные, микро- и наночастицы углерода являются концентраторами и транспортерами поверхностно-активных веществ на поверхности трения, что способствует увеличению толщины граничной пленки.

Углеродная сажа, полученная электродуговым методом в лабораторных условиях, представляет собой конгломераты микро- и наночастиц углерода, размеры которых находятся в широком диапазоне - от нанометров до десятых долей миллиметров. Микрофотографические исследования частиц углеродной сажи после их предварительного отстаивания и измельчения показали, что при введении в индустриальную масло достигается размер от 0,5 мкм до 2 мкм. Такие частицы не выпадают в осадок, не фильтруются в стандартных фильтрах, легко попадают в зазор деталей скольжения транспортно-технологических и энергетических машин, как следствие, принимают участие в формировании смазочного слоя.

Разработана методика введения углеродной сажи в индустриальные масла, которая учитывает значение рациональной концентрации углеродной сажи по критерию минимума трения и износа в трибосистемах скольжения машин.

**Ключевые слова:** индустриальное масло, углеродная сажа, концентрация углеродной сажи, смазочная способность, трение, интенсивность износа.

## ABSTRACT

**Suranov A.A.** - Improving the lubricity of industrial oils through the use of graphite evaporation products. - Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.02.04 - Friction and wear in machines. - Ukrainian State University of Railway Transport of the Ministry of Education and Science of Ukraine. - Kharkiv National Technical University of Agriculture named after P. Vasilenko MES of Ukraine, Kharkov, 2018.

The thesis is aimed at improving the anti-friction and anti-wear properties of industrial oils by adding carbon soot, which contains micro- and carbon nanoparticles obtained by the method of graphite evaporation, and establishing patterns of influence of carbon soot concentration on friction and wear characteristics in the tribosystems. It has been established that when micro-nanoparticles are added to industrial oils, the mechanism of wear of sliding parts has a dual nature and consists of mechanical and abrasive wear. The sum of the wear rates of both types made it possible to establish a rational value of the concentration of carbon nanoparticles.

The paper developed a mathematical model that reveals the mechanism of physical adsorption of carbon particles, which are polarized under the action of the force field of the friction surface and acquire an electric dipole moment. The solution of the micro and nanoparticles carbon obtained in the work under the action of a force field showed that the time of adsorption of micro and carbon nanoparticles is 2-3 orders of magnitude shorter than for individual oil molecules. That is, the mechanism of interaction of micro- and nanoparticles of carbon with friction surfaces proceeds in three stages: electrification of the particle, formation of a solvation shell around the particle and its primary adsorption on the metal surface. Considering the obtained calculated data, micro- and nanoparticles of carbon are concentrators and transporters of surface-active substances on the friction surface, which contributes to an increase in the thickness of the boundary film.

A technique has been developed for introducing carbon soot into industrial oils, which takes into account the value of a rational concentration of carbon soot according to the criterion of minimum friction and wear in machine tribosystems.

Key words: industrial oil, carbon black, carbon black concentration, lubricity, friction, wear rate.

.

Підп. до друку 00.00.2018. Формат паперу 60x84, 1/16.  
Папір офсетний. Гарнітура «Times New Roman». Друк ризографічний.  
Обл. - вид арк. 0,9. Наклад 100 прим. Замов. №000-00.

Навчально-методичний відділ Харківського державного університету  
залізничного транспорту  
м. Харків, майдан Фейербаха 7.