

Мельник О.В., Сорока В.В., Довгаль І.І.

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ЗМАЩУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СУДНОВИХ ДИСТИЛЯТНИХ ПАЛИВ

У дослідженні проведено комплексний аналіз, що включає дослідження фізико-хімічних та трибологічних властивостей сумішевих палив, а також проведений моторний експеримент дозволили встановити оптимальну концентрацію ПО в СДП. Вона становить 1-3%. Подальше збільшення вмісту ПО недоцільне, оскільки дає незначний триботехнічний ефект, але при цьому погіршуються фізико-хімічні показники композиційного суднового палива. Проведено моторний експеримент на розроблених сумішевих паливах з додаванням ПО, який засвідчив, що їх застосування в СДВЗ не викликає будь-яких значущих змін параметрів робочого процесу двигуна і вони можуть використовуватися без обмежень. Досліджено натурний стенд для випробування ПНВТ, на якому виконано оцінку стану плунжерних пар ПА при роботі на різних типах СДП. Вимірами шорсткості поверхонь у нанометровому діапазоні методами інтерферометрії високої роздільної здатності встановлено негативний вплив НМДП на стан поверхні плунжерних пар ПНВТ. Додавання ПО до НМДП сприяє покращенню їх змащувальної можливості. Знос плунжера знизився на 63,7% порівняно зі втратою маси деталі, що працювала на вихідному НМДТ, а параметри шорсткості  $R_a$  та  $R_z$  відповідно зменшилися у 2,75 та 4,44 разів. Розроблено високоефективну систему паливної підготовки при роботі на НМДТ, яка за рахунок реалізації комплексу науково-технічних заходів дозволяє мінімізувати процес зношування прецизійних пар ПА за рахунок добавки ПО та одночасного охолодження НМДП АБХМ.

**Ключові слова:** енергетичні установки, математична модель, дистилятні палива, екологічність.

Постановка проблеми. Підвищення вимог до екологічності суднових енергетичних установок (СЕУ) призводить до переходу з важких сірчастих палив до дистилятних палив, з низьким (до 0,5% вмістом сірки). Крім того дистилятні палива є мастильним матеріалом для рухомих деталей паливної апаратури. Надійна робота суднового дизеля багато в чому залежить від ступеня зносу вузлів та агрегатів паливної апаратури (ПА).

Найбільш схильні до зносу прецизійні вузли паливного насоса високого тиску (ПНВТ) та форсунок [1]. Однак численні експерименти та результати експлуатації двигунів з використанням низькосірчастих дистилятних палив виявили високу інтенсивність зношування прецизійних пар ПА. Зниження вмісту сірки в паливі призводить до погіршення їх протизносних властивостей [2, 3], внаслідок чого відбувається збільшення зносу пар тертя ПА двигунів. Крім того, видалення сірки з палива в процесі гідроочищення проводиться до видалення поверхнево-активних речовин (ПАР), які сприяють утворенню змащувальних плівок на поверхні металу.

При експлуатації дизелів на таких паливах йде інтенсивне зношування як плунжера, так і втулки ПНВТ. Зношування цих деталей призводить до збільшення зазорів. При збільшенні зазорів плунжерних пар знижується тиск подача палива, погіршується якість розпилювання, порушується регулювання паливного насоса, виникають перебої в роботі двигуна та його зупинка [1, 4].

Існує ряд способів регулювання протизносних властивостей палив відповідно до сучасних вимог. Перший – це застосування спеціальних протизносних присадок. Іншим є покращення триботехнічних характеристик палив за рахунок додавання до дистиляту

палива олії рослинного походження (рапсова, соєва, соняшникова, пальмова та ін.), біодизеля або мінеральної олії у певних співвідношеннях [2].

Отримання значень даних співвідношень для підвищення екологічності та економічності судових дизелів і є **метою даного дослідження**

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання роботи автотракторних двигунів внутрішнього згоряння на низькосірчистих ДП та їх впливу на надійність роботи ПА цих дизелів докладно розглянуті у наукових працях учених Т. М. Мітусової, В. Г. Спіркіна, А. М. Данілова, та ряду інших дослідників, а також знайшли своє відображення в роботах зарубіжних вчених, таких як М. А. Hazrat, P. I. Lacey, D. Cooper, Danping Wei та інших. В результаті виконаних робіт було запропоновано різні шляхи для підвищення надійності роботи та покращення протизносних властивостей дизельного палива.

Питання підвищення експлуатаційної надійності роботи ПА судових двигунів внутрішнього згоряння (СДВЗ) знайшли своє відображення в роботах Л. Б. Леонтєва, Г. Б. Гореліка, Г. С. Юра та ін. Однак ці дослідження не були пов'язані безпосередньо з оцінками впливу судових низькосірчистих малов'язких дистилатних палив на роботу ПА.

Виклад основного матеріалу. На сьогоднішній день існують суперечливі відомості про вплив в'язкості СДП на їхню змащувальну здатність. Відповідно до вимог стандартів на судові бункерні палива (ISO 8217) фізико-хімічні показники СДП повинні відповідати вимогам, зазначеним у табл. 1.

Таблиця 1 – Вимоги до судових дистилатних палив

Найменування показника	Марка			
	DMX	DMB	DMZ	DMB
Кінематична в'язкість при температурі 40 °С, сСт	1,4–5,5	2,0–6,0	3,0–6,0	2,0–11,0
Масова частка сірки %, не більше	1,0	1,50	1,50	1,50
Щільність при 1,5 °С кг/м <sup>3</sup>	–	890,0	890,0	900,0
Змащувальна здатність скоригований ДПЗ при 60 °С, мкм, не більше	520	520	520	520

Як видно з табл. 1, нижня межа в'язкості СДП варіюється в діапазоні від 1,4 до 6 сСт до 6 сСт при температурі 40 °С для марок DMX і DMA. Нова марка DMZ має нижню межу в'язкості 3,0 сСт при температурі 40 °С [7].

У зв'язку з погіршенням протизносних СДП були поставлені завдання встановити залежність змащувальної здатності СДП з низьким вмістом сірки від в'язкості, а також визначити її нижнє граничне значення, що забезпечує задовільну змащувальну здатність.

З метою оцінки впливу в'язкості на протизносні властивості СДП були досліджені зразки палив з різною в'язкістю, які незначно відрізняються як за вмістом сірки, так і за іншими показниками. Результати експериментальних досліджень СДП на чотирикульковій машині тертя представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Діаметр плями зносу різних зразків

№ зразка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
В'язкість, сСт	7,26	6,82	5,64	5,43	5,14	4,40	3,39	3,06	2,82	2,76	2,58	1,93	1,90
ДПЗ, мкм	433	463	438	400	443	464	496	437	580	445	492	592	683

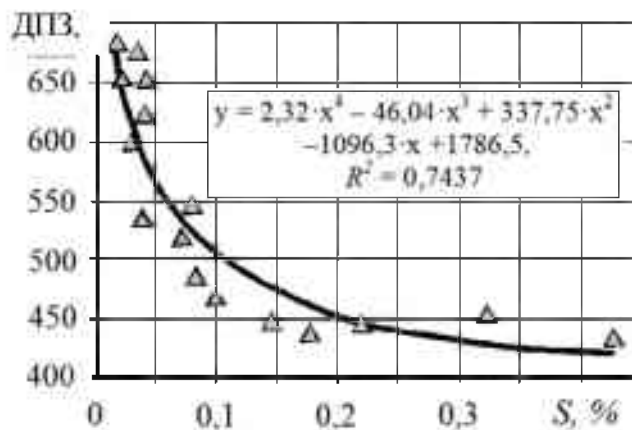


Рисунок 1 – Залежність ДПЗ від в'язкості СДП

Отримані експериментальні дані показують, що коефіцієнт детермінації рівняння кореляції між ДПЗ та в'язкістю досить високий і становить  $R^2 = 0,744$ , що вказує на те, що в'язкість СДП істотно впливає на його змащувальну здатність.

Зі зменшенням в'язкості палива з 7,26 до 1,9 сСт ДПЗ збільшується з 433 до 682 мкм (рис. 1). Це пов'язано з тим, що більш в'язкі палива містять більшу кількість природних поверхнево-активних речовин, ніж мало-в'язкі, що покращує умови тертя та зношування.

Проте, вплив в'язкості СДП на його трибологічні характеристики стає вкрай незначним, якщо величина цього показника перевищує 3 сСт. Зменшення в'язкості призводить до зниження товщини мастильного шару між сполученими поверхнями, що змінює режим змащення від рідинного до граничного, тому і зростає величина ДПЗ.

В'язкість палива нижче 3 сСт серйозно впливає на ресурс і надійність роботи паливних насосів високого тиску. Коли в'язкість палива дуже низька, гідродинамічна змащувальна плівка в плунжерних парах судових ПНВТ може бути недостатнім, в результаті чого йде підвищений знос і виникають задирки ПНВТ [7].

При розробках технологій виробництва низькосірчастих СДП велика увага приділяється вивченню розподілу сіркоорганічних сполук в залежності від інтервалу температур кипіння нафтових і газоконденсатних фракцій і реакційної здатності окремих сірчастих з'єднань.

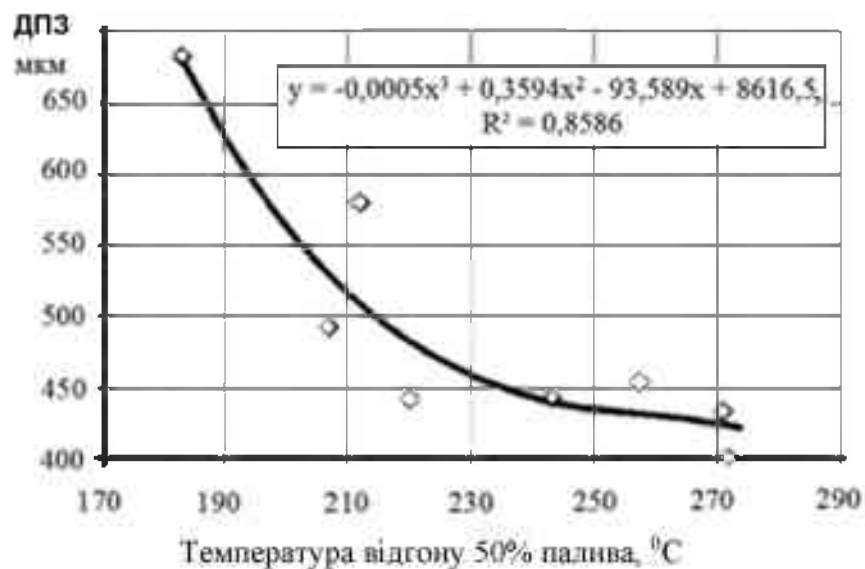
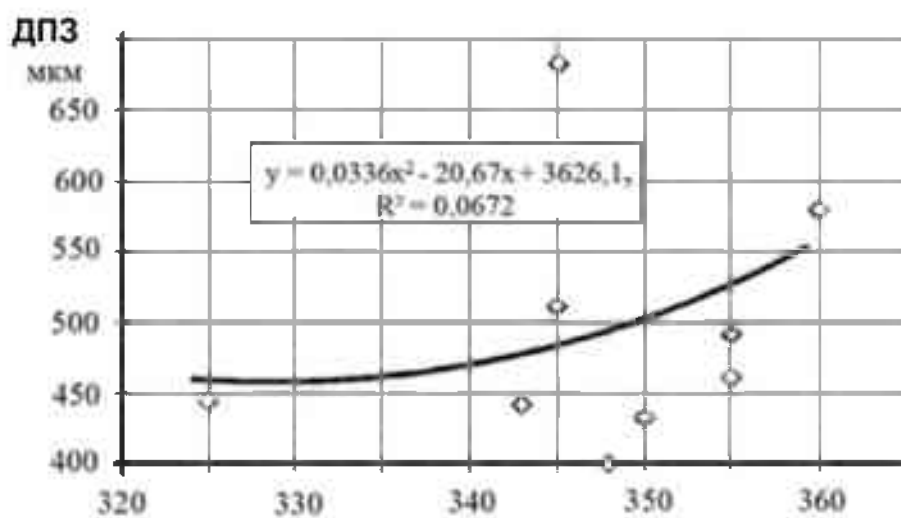


Рисунок 2 – Залежність ДПЗ від температури відгону 50% палива



Температура відгону 95% палива, °C

Рисунок 3 – Залежність ДПЗ від температури відгону 95% палива

На протизносні властивості СДП великий вплив має не лише вміст сірки, а й фракційний склад, який визначається двома показниками: температура відгону 50% та 95% палива. Як встановлено в результаті експериментального моделювання, перший з аналізованих показників надає значний вплив на величину ДПЗ [7].

Зі зниженням температури відгону 50% палива ДПЗ значно збільшується (рис. 3). Зниження точки 50% відгону палива пов'язане зі зменшенням в СДП гетероатомних сполук і ароматичних вуглеводнів, в результаті чого відбувається полегшення фракційного складу, а це викликає погіршення триботехнічних характеристик СДП.

Експерименти також проводилися для СДП з різним значенням щільності. Залежність ДПЗ від щільності представлена на рис. 4.

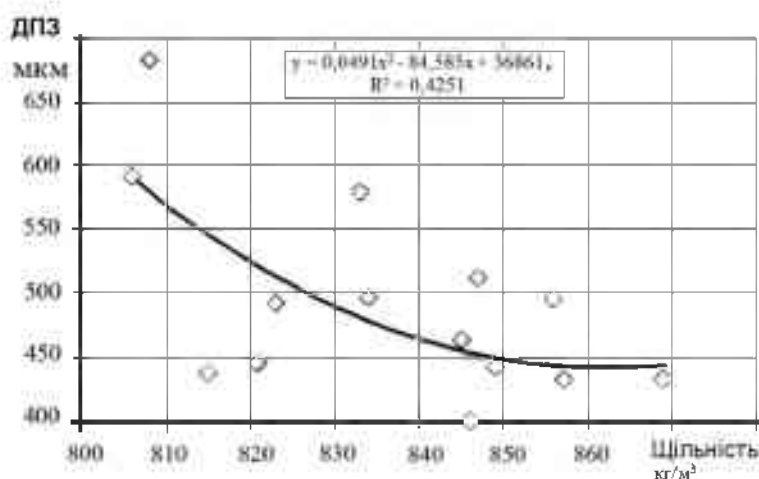


Рисунок 4 – Залежність ДПЗ від щільності СДП

Між щільністю та протизносними властивостями ДП взаємозв'язку не виявлено (рис.4). Квадрат коефіцієнту множинної кореляції має для цього показника досить низьке значення. Однак можна стверджувати, що добрі протизносні властивості мають палива з щільністю більше 850 кг/м³ при 20 °C [7].

Були проаналізовані фактори, що впливають на протизносні властивості СДП. Встановлено, що визначальними є в'язкість та вміст сірки. Всі інші показники СДП практично не впливають на їхню змащувальну здатність. Проте в реальності в пробах палива СДП, що надходять для дослідження, відсутнє поєднання щодо високої в'язкості з низьким вмістом сірки. Для того, щоб охопити всі області факторного простору потрібно розробити і відпрацювати методику знесірчування СДП, з тим щоб можна було отримати високов'язкі палива з низьким вмістом сірки.

Були проаналізовані різні методи знесірчування і проведений вибір найбільш ефективної та реалізованої в лабораторних умовах методики з тим, щоб досягти різних поєднань факторів, що впливають на змащувальну здатність СДП.

Сірка вважається одним із найважливіших гетероелементів нафти через її велику поширеність і широке коло ефектів, що викликаються наявністю сіркоорганічних сполук у сирих нафтах і нафтопродуктах. В елементному складі нафт сірка може містити від 0,2 до 8% мас., іноді до 10% мас. і навіть 14% мас. (нафти США, штат Юта). Сірковмісні сполуки в нафті нерівномірно розподілені за її фракціями і зазвичай їх вміст збільшується з підвищенням температури кипіння [8].

У складі СДП, сполуки сірки (СС) представлені меркаптанами, дисульфідами, сульфідами, гомологами та бензологами тіофену. У фракції 200-360 °С міститься до 7,33% їх маси [8, 9, 10].

У СДП зустрічаються такі сульфіді:

1) аліфатичні (ді-н-бутил сульфід, ді-н-гексил сульфід, ді-(2,4-диметилбутил)-сульфід та ін.;

2) ароматичні (етилфенілсульфід, дибензилсульфід, дифенілсульфід та ін.);

3) жирноароматичні (наприклад, бензилфенілсульфід);

4) циклічні сульфіді – тіациклани (тіациклопентан, тіациклогексан, тіациклогептан та ін. та їх алкіл-і алкілпохідні), що містять у своєму складі 1-4 цикли.

Основні способи видалення сірчистих сполук з СДП можна розділити на дві групи: каталітичне знесірчування нафтопродуктів і некаталітичні способи.

Гідрознесірчування засноване на гідруванні СС у середовищі водню на каталізаторах з утворенням сірководню та вуглеводнів. Цей метод використовується для усіх нафтопродуктів від бензинів до котельного палива. Технологічні режими та каталізатори, що використовуються при гідроочищенні, залежать від складу сірчистих сполук та їх вмісту у нафтопродуктах. Процес ведуть при 350-450 °С та 2,5-20 МПа. Як каталізатори використовують оксиди або сульфіді кобальту, молібдену, нікелю, заліза на оксиди алюмінію.

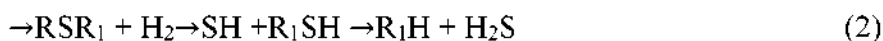
Принциповий механізм утворення первинних продуктів при гідрогенолізу сірчистих сполук відомий лише для простих сполук. Меркаптани руйнуються через зв'язок С-S з утворенням сірководню, вуглеводню, сульфіді [11]:

меркаптани:

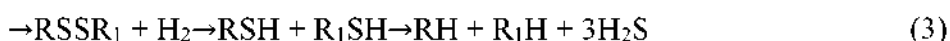


Сульфіді та дисульфіді гідруються через стадію утворення меркаптанів. У циклічних сульфідідах спочатку руйнується кільце, потім відщеплюється сірководень і утворюється відповідний вуглеводень. Тіофен, бенз- і дибензтіофен спочатку гідруються до похідних тетрагідротіофену, які потім перетворюються на алкани і алкілпохідні аренів:

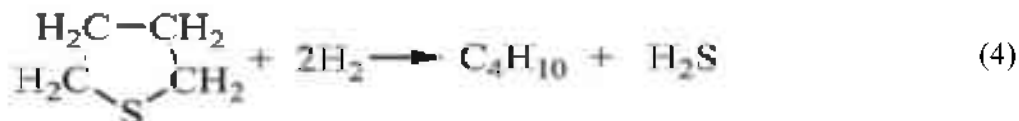
сульфіді:



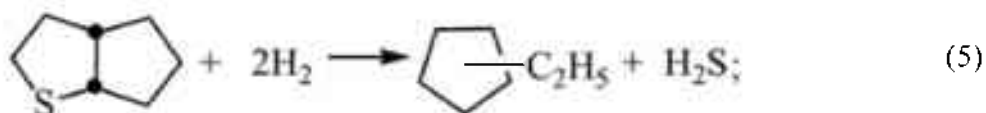
дисульфіди:



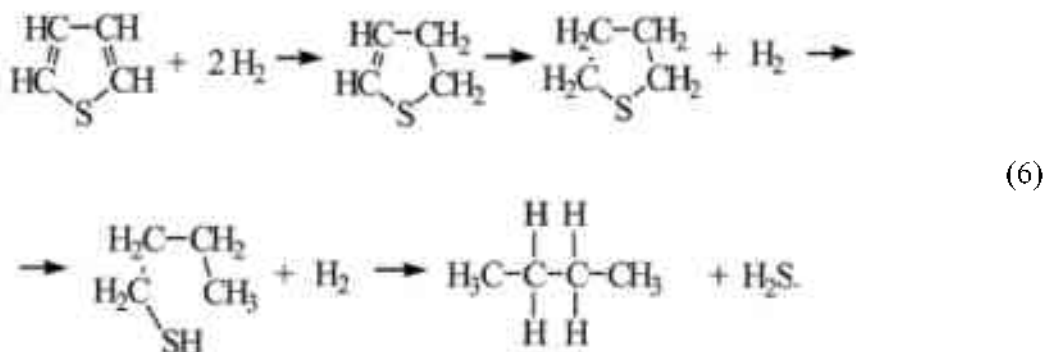
тіофани (моноциклічні сульфіди):



біциклічні сульфіди:



тіофени:



Стійкість сірчистих сполук зростає у ряду: меркаптани – дисульфіди – сульфіди – тіофани – тіофени [12].

У процесах гідронессіювання, що проводяться на сучасних сульфідованих алюмокобальтмолібденових або алюмонікельмолібденових каталізаторах, меркаптани, сульфіди, дисульфіди, тіофени та бензтіофени видаляються, отже моторні дистилати, що містять сполуки сірки тільки цих типів, можуть бути досить глибоко очищені від них, причому тіофени і бензтіофени легко розщеплюються [12].

Проте у зв'язку з тим, що гідроочищення є дорогим процесом, потрібна підвищена витрата водню (співвідношення водень – сировина зазвичай становить 300–600:1), потрібне високоякісне обладнання, високий тиск та температура, каталізатори: реалізувати його в лабораторних умовах неможливо.

Лужне очищення застосовується для видалення СС (переважно  $\text{H}_2\text{S}$  нижчих меркаптанів) із бензино-лігроїнових фракцій. Сірководень реагує з утворенням кислих та середніх солей. Меркаптани утворюють при взаємодії з лугом меркаптиди. До недоліків лужного очищення слід віднести безповоротну втрату дорогого реагенту та утворення побічних продуктів, які важко утилізуються [20]. Крім того, цей метод не застосовується до СДП.

Сутність методу полягає в тому, що сировину у спеціальному апараті змішують із екстрагентом. Під впливом сил тяжіння або відцентрових сил екстрактна та рафінатна фази розшаровуються. З екстрактної фази виділяють (екстрагують) розчинену в ній речовину. Екстрагент повертають на змішання з новою порцією сировини. У лабораторних умовах з ДП екстракцією діетиленгліколем виділені сірчисті з'єднання разом з ароматичними. За розрахунками, витрати на отримання 1 тони ДП (даним способом), що містить 0,2% мас.

загальної сірки, вдвічі менше, ніж при гідроочищення [8]. Запропоновано ряд екстракційних способів знесірювання палив з використанням як розчинників ацетон-етанольних сумішей, суміші тетраетиленгліколю з метокситригліколем, азотовмісних речовин та інших екстрагентів [2]. Ці способи дозволяють знизити вміст сірки у продукті на 50-90%.

В роботі [8] наведено спосіб десульфуризації з використанням іонних рідин (солей з кватернізованими атомами азоту в катіоні, що плавляться при температурі нижче за кімнатну). Іонна рідина не переходить у ДП навіть у слідових кількостях. В даному методі селективність екстракції сульфоксидів у 3-4 рази вище, ніж сульфонів, і в 10-20 разів вище, ніж сульфідів.

Даний метод так само не застосовується, оскільки вимагає спеціалізованого обладнання. Для можливості ефективного використання СДП необхідна оперативна оцінка їх протизносних властивостей. Метою проведених досліджень є виявлення основоположних фізико-хімічних показників, що визначаються при стандартному лабораторному аналізі, які впливають на змащувальну здатність СДП, і отримання експериментальної моделі взаємозв'язку між цими показниками й змащувальною здатністю СДП.

В результаті проведених лабораторних досліджень здійснено відбір факторів, пов'язаних з триботехнічними властивостями СДП. Встановлено, що найбільший вплив на змащувальну здатність СДП надає вміст сірки  $S$  та в'язкість  $\nu$ . Всі інші показники СДП або чинять несуттєвий вплив, або взагалі не впливають на їх протизносні властивості.

Область факторного простору для  $\nu$  знаходилася в діапазоні від 0,93 до 6,25 сСт, а для  $S$  становила 0,017-0,22% мас. Експериментальні дані охоплюють практично весь можливий діапазон характеристик СДП.

Виконати планування експерименту та реалізувати його в нашому випадку неможливо, тому що необхідного поєднання факторів  $S$  і  $\nu$  досягти навіть при використанні методики окисного знесірювання не вдається. Домогтися точного влучення в точки факторного простору з жорстко заданим поєднанням  $S$  та  $\nu$  неможливо. Тому використовували пасивний експеримент, а обробки експериментальних даних застосовували різного виду нелінійні регресійні моделі.

Аналіз апріорної інформації дозволив вибрати кілька моделей апроксимації, які були досліджені:

– степенева:

$$\text{ДПЗ} = b_0 x_1^{b_1} x_2^{b_2}$$

– показова:

$$\text{ДПЗ} = b_0 b_1^{x_1} b_2^{x_2}$$

– експоненційна:

$$\text{ДПЗ} = e^{(b_1 x_1^{c_1} + b_2 x_2^{c_2})}$$

– поліноміальна:

$$\text{ДПЗ} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1 x_2 + b_4 x_1^2 + b_5 x_2^2,$$

де ДПЗ – діаметр плями зношування;  $b_0, b_1, \dots, b_5$  – коефіцієнти регресії;  $c_1, c_2$  – ступінь коефіцієнта.

Обробка експериментальних даних здійснювалася у програмі Математика. Результати обчислювального експерименту у вигляді різних типів нелінійних регресійних моделей представлені нижче:

– степенева:

$$\text{ДПЗ} = 351,5401 * S^{-0.1875} * \nu^{-0.06144},$$

– показова:

$$\text{ДПЗ} = 744,8906 * 0,10917^S * 0.96337^\nu;$$

– експоненційна:

$$\text{ДПЗ} = e^{(4.6142 \cdot s^{-0.03655} + v^{-0.04333})},$$

– поліноміальна:

$$\text{ДПЗ} = 808,536 - 3704,785 S - 20,486v + 28,817Sv + 10667,460S^2.$$

Адекватність експериментальних моделей оцінювали за такими критеріями: відносна середня помилка апроксимації  $A$ , коефіцієнт детермінації  $R^2$ , критерій Фішера  $F$  [13].

Фактичні значення результативної ознаки відрізняються від теоретичних, розрахованих за рівнянням регресії. Величина відхилень по кожному спостереженню є помилкою апроксимації. Їх число відповідає обсягу сукупності  $k$ . В окремих випадках помилка апроксимації може виявитися рівною нулю. Для порівняння використовуються величини відхилень, виражені у відсотках до фактичних значень.

Середня помилка апроксимації  $A$  показує відсоткове значення відхилення розрахункових значень від експериментальних:

$$A = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y - y_t}{y} \right| \cdot 100\% \quad (7)$$

де  $n$  – кількість досліджень;  $y$  – результативне експериментальне значення;  $y_t$  – розрахункове значення.

Якщо  $A \leq 5\%$ , то вважається, що модель має достатньо високу точність, при від 5 до 10% точність моделі гарна, при 10-15% – задовільна, а більш 15 – незадовільна.

Найбільш ефективною оцінкою адекватності регресійної моделі, мірою якості рівняння регресії, характеристикою прогностичної сили аналізованої регресійної моделі є коефіцієнт детермінації, визначаємо за формулою:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_t - \bar{y}_t)^2}{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2} \quad (8)$$

Коефіцієнт детермінації показує частку варіації результативної ознаки, що знаходиться під впливом вивчаємих факторів, тобто визначає, яка доля варіації ознаки у врахована в моделі і обумовлена впливом на нього факторів. Чим ближче до 1, тим вище якість моделі [13].

Оцінка значимості рівняння регресії в загальному виробляється на основі  $F$ -критерія Фішера, яка передуює дисперсійний аналіз. Згідно основної ідеї дисперсійного аналізу, загальна сума квадратів відхилень змінної  $y$  від середнього значення  $\bar{y}$  у розкладається на дві частини – «пояснену» та «не пояснену» [9]:

$$\sum (y - \bar{y})^2 = \sum (\bar{y}_t - \bar{y})^2 + \sum (y - \bar{y}_t)^2 \quad (9)$$

де  $\sum (y - \bar{y})^2$  – загальна сума квадратів відхилень;  $\sum (\bar{y}_t - \bar{y})^2$  сума квадратів відхилень, пояснена регресією (або факторна сума 12-ти квадратів відхилень);  $\sum (y - \bar{y}_t)^2$  остаточна сума квадратів відхилень, що характеризується впливом неврахованих в моделі факторів. Схема дисперсійного аналізу має вигляд, який представлений в табл. 3 ( $n$  – кількість спостережень,  $m$  – число параметрів).

Таблиця 3 – Схема дисперсійного аналізу

Компоненти дисперсії	Сума квадратів	Число ступенів свободи	Дисперсія на одну ступінь свободи
----------------------	----------------	------------------------	-----------------------------------



Загальна	$\sum (y - \bar{y})^2$	n-1	$S_{\text{заг}}^2 = \frac{\sum (y - \bar{y})^2}{n - 1}$
Факторна	$\sum (\bar{y}_t - \bar{y})^2$	m	$S_{\text{фак}}^2 = \frac{\sum (\bar{y}_t - \bar{y})^2}{m}$
Остаточна	$\sum (y - \bar{y}_t)^2$	n - m - 1	$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum (y - \bar{y}_t)^2}{n - m - 1}$

Визначення дисперсії на одну ступінь свободи призводить дисперсію до порівнювального вигляду (ступені свободи – це числа, які показують кількість елементів варіювання, які можуть приймати довільні значення, які не змінюють задані характеристики). Зіставляючи факторну та залишкову дисперсії в розрахунку на одну ступінь свободи, отримаємо величину  $F$ - критерія Фішера:

$$F = \frac{S_{\text{факт}}^2}{S_{\text{ост}}^2} \quad (10)$$

Величина  $F$  – критерія у нелінійній парній регресії, яка пов'язана з індексом детермінації:

$$F = \frac{R^2/k}{(1 - R^2)/(n - m - 1)} \quad (11)$$

Фактичне значення часткового  $F$ -критерія порівнюється з табличним  $F_{\text{табл}}(\alpha; k_1; k_2)$  при рівні значимості  $\alpha$  та числі ступенів свободи:  $k_1 = m$  та  $k_2 = n - m - 1$ . Розраховане значення  $F$ -критерія визначається достовірним, якщо воно більше табличного, тобто  $F_{\text{роз}} > F_{\text{табл}}$ . В цьому випадку висунута гіпотеза відхилена та робиться висновок про суттєвість статичного зв'язку між ДПЗ та значеннями вмісту сірки й в'язкості. Якщо  $F_{\text{роз}} < F_{\text{табл}}$ , то рівняння регресії вважається статично значущим і зв'язок між цими факторами і результатами відсутній.

Таблиця 4 – Узагальнена характеристика математичної моделі

Модель	Коефіцієнт детермінації $R^2$	Середня помилка апроксимації $A$	Критерій Фішера $F$
Статична регресійна модель	0,751	7,14	18,17
Показова регресійна модель	0,671	0,671	0,671
Експоненційна регресійна модель	0,741	0,741	0,741
Поліноміальна регресійна модель	0,856	0,856	0,856

Аналіз даних табл. 4 свідчить, що найбільш високі значення показників якості моделі знаходяться у поліноміальній регресійній моделі. Так коефіцієнт детермінації  $R^2$  має 0,856. Середня помилка апроксимації цієї експериментальної моделі дорівнює 4,39%, а критерій Фішера майже в 10 разів вище табличного.

На підставі цього можна робити висновок, що дана модель найбільш повно описує зв'язок між змащувальною здатністю СДП та його показниками - в'язкістю й вмістом сірки, тому вона обрана для подальшого дослідження. Показники якості інших моделей, як це свідчать дані у табл. 7, значно гірше.

Графічна ілюстрація поверхні відгуку, отриманої нелінійної багатофакторної експериментальної регресійної моделі зміни величини ДПЗ від  $S$  та  $v$ , представлена на рис. 5. Отримана поверхня відгуку дозволяє визначити значення ДПЗ у будь-якій точці вибраного факторного простору.

Як видно з графіка, значення ДПЗ зменшується зі збільшенням вмісту сірки та в'язкості СДП. Навпаки, при зменшенні вмісту сірки або в'язкості значення ДПЗ збільшується, тобто погіршується змащувальна здатність палива. Величина ДПЗ значно збільшується, коли концентрація сірки в СДП менше 0,05% мас., а в'язкість менше 2 сСт. У зв'язку з цим при такому поєднанні параметрів необхідні спеціальні заходи для покращення змащувальної здатності НМДП.

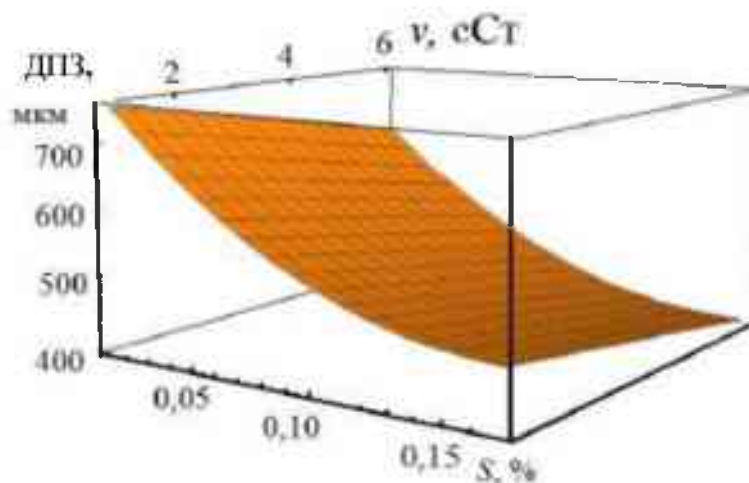


Рисунок 5 – Факторна модель

На підставі отриманої нелінійної регресійної моделі змащувальної здатності СДП можна оцінити вплив величини  $v$  та  $S$  на інтенсивність зношування плунжерних пар ПА.

Як слідує з результатів виконаного моделювання, найбільший вплив на величини ДПЗ надає вміст сірки. При її зниженні з 0,15 до 0,02% інтенсивність зношування значно зростає.

Величина ДПЗ збільшується в 1,52 рази за фіксованого значення в'язкості. У той же час ДПЗ знижується в 1,14 рази при вмісті сірки в паливі, що дорівнює 0,02% та збільшення в'язкості з 1,5 до 6 ст.

Це не компенсує змащувальної здатності, обумовленої зниженням вмісту сірки в СДП, але тим не менш, за рахунок цього можна зменшити величину зносу деталей ПА. Тому в експлуатації слід рекомендувати додатково проводити охолодження палива перед ПА з тим, щоб максимально збільшити значення СДП.

При аналізі експериментальних даних, що задаються набором  $N$  пар  $\{x_i; y_i\}$ , розглянемо таку проблему: у припущенні монотонної теоретичної залежності регресійної функції  $y(x; p_1, p_2)$  на досліджуваному інтервалі потрібно знайти критичну точку  $x_{\text{крит}}$ , на околицях якої вплив  $x$  на  $y$  починає істотно зростати. ( $x$  – це вміст сірки в паливі при фіксованому значенні в'язкості СДП, а  $y$  – ДПЗ).

Це завдання актуальне під час розгляду процесу, перебіг якого описується величиною  $y$ , що характеризує задовільний або критичний режим зношування. Ця величина  $y$  свою чергу істотно залежить від деякої величини  $x$ , що описує колективний ефект зовнішніх впливів на процес, а також деяких додаткових параметрів  $\{p_1; p_2\}$ , якими є величина

в'язкості. Як правило, в цих випадках околиця  $x_{\text{крит}}$  відповідає перехідній області між критичним та задовільним режимами протікання процесу зношування, і пошук  $x_{\text{крит}}$  стає дуже актуальним завданням. Очевидно, для різних залежностей  $y(x)$  методики пошуку таких критичних точок можуть суттєво відрізнятись. В разі, коли похідна  $y'(x)$  також монотонна на допустимому інтервалі  $[a; b]$ , в якості такого критерію можна вибрати умову мінімуму радіусу кривизни:

$$R = \frac{(\sqrt{1 + (y'')^2})^3}{y^n} \quad (12)$$

з лінії тренду  $y(x)$ . Наприклад, в окремому випадку експоненціальної залежності:  $y(x) = A \exp(-\alpha x)$  маємо  $x_{\text{крит}} = \frac{1}{\alpha} \ln(\sqrt{2}\alpha A)$ . Однак навіть цей простий приклад показує, що якщо параметри регресії такі, що  $\alpha A < 1/\sqrt{2}$ , виходить:  $x_{\text{крит}} < 0$ , а якщо величина  $x$  може приймати тільки позитивні значення, то критерій мінімуму кривизни тут не спрацьовує, оскільки  $x_{\text{крит}} \notin [a; b]$

Ефективним першим кроком у пошуку  $x_{\text{крит}}$  є розбиття набору попередньо впорядкованих за зростанням  $x$  експериментальних пар значень  $\{x_i; y_i\}$ ,  $i = \overline{1, N}$  на два піднабори  $A$  та  $B$  зі значеннями індексів  $1 \leq i_A \leq N_A$  і  $N_B \leq i_B \leq N$ , де в загальному випадку, крім варіанта не пересікаються піднаборів ( $N_B = N_A + 1$ ), слід також розглянути варіанти з декількома спільними парами у перетині піднаборів, коли  $N_A \geq N_B$ .

На наступному кроці обмежимося лінійними апроксимаціями для кожного з піднаборів:

$$y_A = k_A x + b_A; y_B = k_B x + b_B \quad (13)$$

де регресійні параметри  $\{k_A; b_A\}$  та  $\{k_B; b_B\}$  знаходяться за методом найменших квадратів для кожного з піднаборів. В якості основного критерію при порівнянні різних розбиттів виберемо загальне відхилення  $S_{\{A; B\}}$  експериментальних значень від регресійної залежності, яке розраховується за формулою:

$$S_{\{A; B\}} = \sqrt{S_A^2 + S_B^2},$$

$$S_A = t_{N_A; 0.95} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_A} (y_i - k_A x_i - b_A)^2}{N_A(N_A - 1)}};$$

$$S_B = t_{N_B; 0.95} \sqrt{\frac{\sum_{i=N_B}^N (y_i - k_B x_i - b_B)^2}{(N - N_B)(N - N_B + 1)}} \quad (14)$$

де  $t_{N, 0.95}$  - коефіцієнт Стюдента при заданій довірчій ймовірності 0,95, необхідний для корекції величини відхилення при малій кількості  $N$  експериментальних точок. Тут  $S_A$  і  $S_B$  мають сенс відхилень експериментально спостерігаємих даних від лінійних трендів (3.12) для відповідних піднаборів.

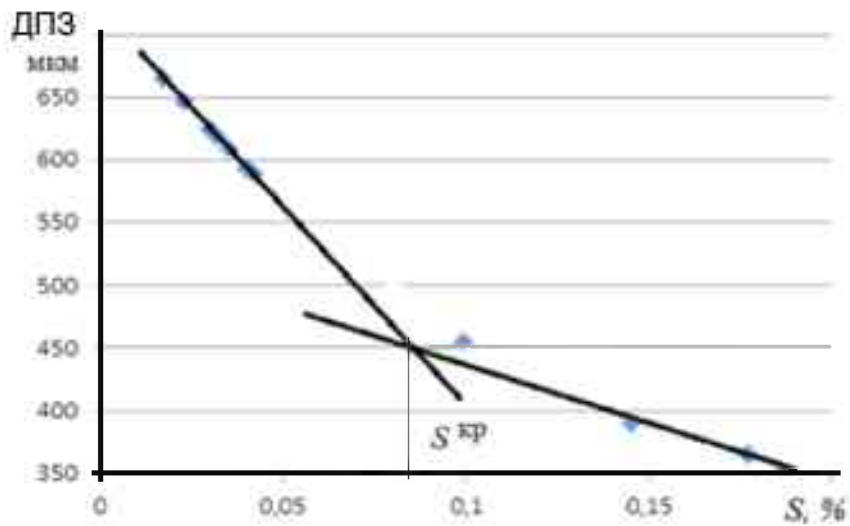


Рисунок 6 – Розподіл експериментальних точок

На заключному етапі з усіх можливих розбиттів із заданою кількістю загальних пар виберемо варіант з найменшим значенням  $S_{\{A, B\}}$  та відповідними регресійними параметрами  $\bar{k}_A, \bar{b}_A, \bar{k}_B, \bar{b}_B$ . Тоді шукана величина  $x_{\text{крит}}$  може бути оцінена співвідношенням:

$$x_{\text{крит}} = \frac{\bar{b}_B - \bar{b}_A}{\bar{k}_A - \bar{k}_B} \quad (15)$$

На рис. 7 наведена графічна інтерпретація застосування цього методу до конкретного набору даних, отриманих при аналізі СДП при фіксованому значенні в'язкості СДП.

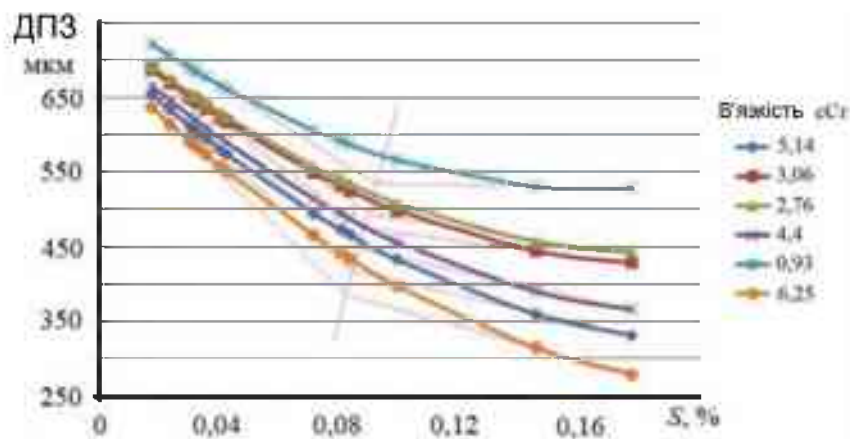


Рисунок 7 – Залежність ДПЗ від S при фіксованому  $v$

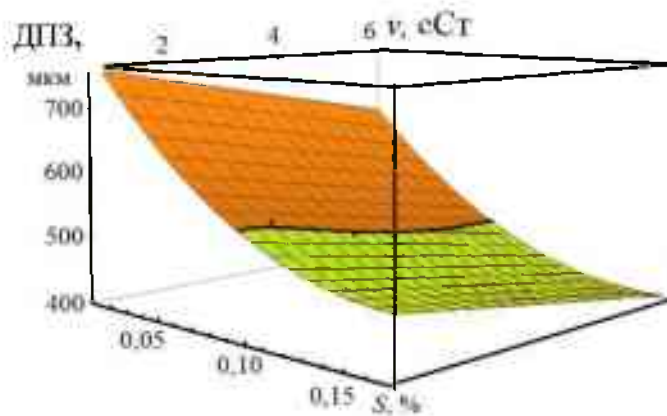


Рисунок 8 – Зони протікання процесу зношування

За цим методом було оброблено відібрані для аналізу дані. На рис. 8 представлено сімейство кривих залежності ДПЗ від вмісту сери при фіксованому значенні в'язкості. Для кожної кривої отримано значення критичної точки  $S_{\text{крит}}$  при відповідному значенні в'язкості.

Таким чином, розрахований набір параметрів  $S$  і  $v$ , що забезпечують розподіл області факторного простору на дві зони – задовільного та критичного перебігу процесу зношування. Їх перенесення на площину, отриману в результаті розрахунку за розробленою моделлю і розділив її факторний простір на дві шукані зони (рис. 8).

**Висновки.** В результаті проведеного експериментального моделювання встановлено вплив різних показників якості СДП на їх протизносні властивості. Виявлено, що найбільший вплив на триботехнічні характеристики СДП надає його в'язкість і вміст у ньому сірки. Фракційний склад і значення щільності надає несуттєвий вплив на змащувальну здатність палива.

2. Виконаний аналіз різних методів знесірювання встановив, що в лабораторних умовах для видалення сірчистих сполук СДП найбільш раціональним є використання методу окислювального знесірювання.

3. Застосування методу окисного знесірювання дозволило досягти 90% зниження вмісту сірки в СДП. Для регулювання концентрації сірки в паливі експерименти можна проводити при різних молярних співвідношеннях і часі окислення, що дозволяє отримати зразки палива з різним вмістом сірки для подальших досліджень.

4. Проаналізовано різні види нелінійних багатофакторних регресійних моделей. Встановлено, що за показниками якості найкращі результати досягнуті при застосуванні нелінійної поліноміальної регресійної моделі. Розроблена експериментальна нелінійна поліноміальна регресійна модель змащувальної здатності СДП має високий рівень достовірності, що підтверджується відповідним критерієм адекватності.

5. За допомогою розробленої експериментальної моделі ідентифікації функції змащувальної здатності СДП було знайдено закономірності, що описують ступінь зміни протизносних властивостей при зменшенні вмісту сірки та в'язкості у СДП. Встановлено, що вміст сірки в СДП має найбільший вплив на величину ДПЗ.

6. Розрахований набір параметрів  $S$  та  $v$ , що забезпечують розподіл області факторного простору на дві зони – задовільного та критичного перебігу процесу зношування. При поєднанні параметрів  $S$  та  $v$  СДП, що знаходяться в критичній зоні, необхідно проводити спеціальні заходи для поліпшення змащувальної здатності СДП в умовах експлуатації.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Cooper, D. Laboratory screening tests for low sulfur diesel fuel lubricity / D. Cooper // Lubricity Scientific. – 1995. – 7(2). – P. 133–148.
2. Galbraith Rob M. C. The ROCLE test for diesel and biodiesel fuel lubricity / Galbraith Rob M. C., Hertz P. Barry // Soc. Automot. Eng., [Spec. Publ.], SP 1997, SP-1303, P. 61 – 66.
3. Занько О. Н. Технология использования рабочих веществ в судовых энергетических установках / О. Н. Занько, В. Н. Калугин, И. В. Логишев. – Одесса : Фенікс, 2005. – 508 с.
4. Wang, J. Predicting Lubricity of Low Sulfur Diesel Fuel / J. Wang, C. Cusano // SAE Technical Paper, 1995. – 10 p.
5. Cooper, D. Laboratory screening tests for low sulfur diesel fuel lubricity / D. Cooper // Lubricity Scientific. – 1995. – 7(2). – P. 133–148.
6. Danping Wei. The lubricity of diesel fuels / Danping Wei, H. A. Spikes // Wear, 111 (1986) 217–235. 135 Demirbas A. Progress and recent trends in biodiesel fuels. Energy Conversion and Management. – 2009(50). – P. 14–34.
7. Danping Wei. The lubricity of diesel fuels / Danping Wei, H. A. Spikes // Wear, 111 (1986) 217–235. 135 Demirbas A. Progress and recent trends in biodiesel fuels. Energy Conversion and Management. – 2009(50). – P. 14–34.
8. Corrosion attacks on marine centrifuges used in fuel operation / Alfa Laval, Bulletin № 32390, 2016. – 3 p.
9. Hazrat, M. A. Lubricity Improvement of the Ultra-low Sulfur Diesel Fuel with the Biodiesel / M. A. Hazrat, M. G. Rasul, M. M. K. Khan // The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE. – 2015. – P. 111–117.
10. Спиркин В.Г. Экологические проблемы применения топлив с присадками / В.Г. Спиркин, И.И. Ткачев, П.А. Татарышкина // Вестник национального авиационного университета. – 2009. – Т. 1. – № 38. – С. 68-79.
11. Zabloysky Yu. V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of Marine Diesel When using Fuel Additives / Yu. V. Zabloysky, S. V. Sagin // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol 9(46). – P. 353-362. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i46/107516.
12. Guoxian, Yu. Oxidative desulfurization of diesel fuels with hydrogen peroxide in the presence of activated carbon and formic acid / Shangxiang Lu, Hui Chen, Zhongnan Zhu // Energy&Fuels. – 2005. – V. 19. – P. 447–452.
13. Пеэ Дэсин. Биодизель для улучшения смазывающих свойств дизельных топлив с низким содержанием серы / Дэсин Пеэ // Химия и технология топлив и масел. – 2016. – № 6. – С. 46-48.

*Melnik O., Soroka V., Dovhal I.*

#### **MATHEMATICAL MODEL FOR ASSESSING THE LUBRICATING CAPACITY OF SHIP DISTILLATE FUELS**

*In the study, a comprehensive analysis was carried out, including the study of the physio-chemical and tribological properties of mixed fuels, as well as the conducted motor experiment, which made it possible to establish the optimal concentration of PO in SDP. It is 1-3%. A further increase in the PO content is impractical, as it gives an insignificant tribotechnical effect, but at the same time, the physical and chemical indicators of the composite marine fuel deteriorate. An engine experiment was carried out on the developed mixed fuels with the addition of PO, which proved that their use in SDVZ does not cause any significant changes in the parameters of the engine's work process and they can be used without restrictions. A full-scale test stand for PNT was studied, on which the condition of PA plunger pairs was evaluated when working on different types of SDP. Measurements of surface roughness in the nanometer range using high-resolution*

*interferometry methods established the negative influence of NMDP on the surface condition of PNT plunger pairs. Adding PO to NMDP helps to improve their lubricating ability. Plunger wear decreased by 63.7% compared to the mass loss of the part working on the original NMDT, and the roughness parameters Ra and Rz decreased by 2.75 and 4.44 times, respectively. A highly efficient system of fuel preparation during work at NMDT has been developed, which, due to the implementation of a complex of scientific and technical measures, allows to minimize the process of wear of precision PA pairs due to the addition of PO and simultaneous cooling of NMDP ABHM.*

*Keywords: power plants, mathematical model, distillate fuels, environmental friendliness.*