

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**НАХАЄВ МИКОЛА ПЕТРОВИЧ**

УДК 665.753

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВАЖКИХ  
ПАЛИВ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Нахаєв М.П.

**Керівник роботи**

Грабар І.Г.

доктор технічних наук, професор

**Житомир – 2023**

## АНОТАЦІЯ

**Нахаєв Микола Петрович. Підвищення експлуатаційних властивостей дизельних двигунів при використанні важких палив.** – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

В магістерській роботі визначено, що оптимальним способом видалення сірки дизельного палива є його ультразвукова обробка, проведення якої необхідно виконувати в малорухомих умовах, для чого найбільш підходить видаткова паливна цистерна.

За результатами експериментів з'ясовано, що ультразвукова обробка палива для його десульфуризації супроводжується викидом сірководню  $H_2S$  в газову фазу над поверхнею палива. Рівень  $H_2S$  у газовій фазі палива з початковим вмістом сірчаних домішок до 3,5% не перевищує  $0,04 \text{ мг/м}^3$ , що дозволяє використовувати ультразвуковий блок у системах підготовки палива. Додавання до системи підготовки палива блоку для ультразвукової обробки, застосування додаткової системи ультразвукової підготовки у паливних системах низького тиску, введення системи ультразвукової обробки та гідродинамічної активації для важкого палива, а також використання двоступеневого модуля ультразвукової підготовки сприяють зменшенню зносу поршневих кілець та циліндрових втулок дизеля в 2,4...3,8 рази, зниженню вмісту оксидів сірки у вихлопних газах дизеля в 2,2...2,7 рази, та покращенню економічних показників на 3,6...4,9 % і енергетичних показників на 7,4...9,8 %.

*Ключові слова:* сірка, двигун, дизельне паливо, знос, ультразвукова обробка.

## ANNOTATION

**Nakhayev Nikolay Petrovich. Improving the performance of diesel engines when using heavy fuels.** – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering.  
– Polissia National University, Zhytomyr, 2023.

In the master's thesis, it was determined that the optimal way to desulfurise fuel in production conditions is its ultrasonic treatment, which must be carried out in a stationary environment, for which a fuel tank is most suitable.

It has been experimentally established that the process of fuel desulfurisation by ultrasonic treatment is accompanied by the release of hydrogen sulphide  $H_2S$  in the gas phase formed above the fuel surface. The concentration of  $H_2S$  in the gas phase for fuel with an initial sulphur content of up to 3.5% does not exceed 0.04 mg/m<sup>3</sup>, which makes it possible to use the ultrasonic fuel treatment unit as part of fuel treatment systems.

Equipping the fuel treatment system with an additional unit for its ultrasonic treatment, using an additional ultrasonic fuel treatment system in the low-pressure fuel system, introducing a system for ultrasonic treatment and hydrodynamic activation of heavy fuel, as well as a two-stage ultrasonic fuel treatment module, help to reduce sulphurous wear of diesel piston rings and cylinder bushings by 2.4...3.8 times; reduce the content of sulphur oxides in diesel exhaust gases by 2.2...2.7 times, and also lead to an improvement of economic and 7.4...9.8 % of energy performance of diesel engines by 3.6...4.9 %.

*Keywords: sulphur, engine, diesel fuel, wear, ultrasonic treatment.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗМІНИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПАЛИВ ПІД ЧАС ЇХ ПІДГОТОВКИ.....	8
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	18
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СІРЧИСТИХ ДОМІШОК У ПАЛИВІ НА РОБОТУ ДИЗЕЛІВ .....	23
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	50

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Основним джерелом, що забезпечує роботу енергетичних установок (ЕУ), зокрема двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), є паливо.

ДВЗ належать до найпоширенішого типу теплових двигунів. Порівняно з іншими типами енергетичних установок (паротурбінних і газотурбінних), що використовуються для забезпечення енергією, дизелі характеризуються мінімальними витратами палива як на одиницю потужності (кг/кВт×год), так і на одиницю пройденого шляху (кг/км). Найбільшого поширення набули середньооборотні дизелі (СД), які забезпечують необхідною потужністю у разі, їхньої роботи як приводів генераторів електричного струму).

Під час експлуатації ДВЗ нерідко виникають різні дилеми, до однієї з яких належить використання в СД високов'язких палив з високим вмістом сірки. Ці палива мають знижену вартість, тому їх застосування в енергетиці, розпочате з котельних установок і поширене на малооборотні дизелі (МОД), наразі дедалі ширше відбувається і для СД. Підвищена частота обертання цих моделей дизелів знижує час, що відводиться на впорскування, сумішоутворення і згорання палива (порівняно з МОД), що є причиною сірчистої корозії і сірчистого зносу деталей циліндропоршневої групи (ЦПГ).

Розв'язання задачі зниження сірчистого зносу деталей ДВЗ нині повністю виконано для МОД, що мають окрему циліндрову систему змащування. При цьому завданням є встановлення оптимального співвідношення між вмістом в паливі сірки та вмістом лужних присадок в оливі. Так, для палив із вмістом сірки до 2% рекомендується використання циліндрових олив, що включають до свого складу 40...50 мг КОН/г оливи (де КОН – вміст лугу в оливі); для високов'язких палив, що містять до 3% сірки, значення КОН може становити 70...80 мг/г.

Таким чином, питання підвищення якості палив з високим вмістом сірки шляхом оптимізації системи підготовки палива для двигунів вимагає подальшого дослідження та розв'язання.

**Об'єкт наукового дослідження:** процес функціонування середньооборотного дизеля, що працює на високосірчистому паливі.

**Предмет наукового дослідження:** закономірності зміни техніко-економічних показників середньооборотних дизельних двигунів від характеристик палива.

**Мета наукового дослідження.** Метою дослідження є підвищення екологічної ефективності та збереження працездатності дизелів шляхом зменшення вмісту сірки в дизельному паливі.

Основне завдання дослідження полягає в розробленні способу, засобів та ефективного режиму десульфуризації високов'язкого палива системою паливopідготовки СД. Для досягнення мети роботи необхідно виконати наступні завдання:

- 1) провести аналіз процесів паливopідготовки високов'язких важких палив, що використовуються для роботи дизелів;
- 2) визначити способи і засоби контролю вмісту сірки в паливі після його десульфуризації;
- 3) встановити діапазон оптимальних характеристик ультразвукового генератора при видаленні сірки з палива.

**Методи наукового дослідження.** Аналітичні дослідження виконано з використанням методів класичної механіки, механіки суцільних деформованих середовищ, гідродинаміки, дискретних елементів. Теоретичні, лабораторні, та виробничі експерименти були виконані з використанням стандартних і розроблених приватних методик, із застосуванням методів планування експерименту. Отримані експериментальні дані оброблено методами математичної статистики в програмах Microsoft Excel, Statistica.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Грабар І. Г., **Нахаєв М. П.** Ультразвукова обробка важкого палива. Збірник тез доповідей XXIV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2023 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ.. 2023.С. 285-287.

2. **Нахаєв М.П.** Аналіз зміни експлуатаційних властивостей палив під час їх підготовки. Студентські читання–2023: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 25 жовтня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 80-82.

3. Грабар І., **Нахаєв М.** Загальна характеристика способів захисту деталей дизеля під час роботи на сірчистих паливах. Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки». Кропивницький: ЦНТУ. 2023. С. 419-420.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практичний інтерес для АПК представляє розроблена конструкція пристосування для зниження вмісту сірки у дизельному паливі.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 21 найменування. Загальний обсяг роботи становить 52 сторінки комп'ютерного тексту, містить 11 рисунків та 2 таблиці.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ЗМІНИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПАЛИВ ПІД ЧАС ЇХ ПІДГОТОВКИ

Оперативні характеристики палив оцінюються за допомогою індикаторів, які відображають процеси подачі палива, утворення суміші, згоряння, а також їх потенціал утворювати нагар та спричиняти знос деталей дизельного двигуна. [3].

Різні джерела визначають різні експлуатаційні властивості пального, при цьому всі вони до основних показників відносять такі: фракційний склад, температури спалаху, займання і самозаймання, цетанове число, густину, в'язкість, температури помутніння та застигання, вміст механічних домішок, алюмосилікатів, води, коксу та асфальтенів, солей натрію та оксидів ванадію, зольність, вміст сірки, кислотність, теплота згоряння [3].

Складові частини палива визначаються через вміст різних нафтових фракцій у відсотках об'єму, які випаровуються в певних температурних діапазонах. Цей фракційний склад встановлюється за допомогою процесу дистиляції палива. Важливість фракційного складу палива полягає в його впливі на якість, дозволяючи оцінювати леткість парів палива і встановлювати взаємозв'язок між температурою та об'ємом палива, який дистилюється при цій температурі. Фракційний склад (від якого залежить займистість палива на пускових режимах і особливо в умовах екстреного пуску) важливий під час використання палива в середньооберткових дизелях (СД), в яких згоряння відбувається за менший проміжок часу.

Товарні сорти палив зазвичай отримують змішуванням продуктів прямої перегонки нафти з продуктами її вторинної переробки [3].

Прямогонні дистиляти нафти (бензини, легроїни, гаси, газойлі) отримують шляхом нагрівання і випаровування нафти за атмосферного тиску [3].

Нафтовий залишок – прямогонний мазут, що містить фракції нафти, які закипають при температурі понад 300...350 °С – використовується для



отримання масляних погонів і є компонентом товарних сортів мазуту, а також, поряд з іншими прямогонними дистилятами нафти, слугує сировиною для вторинної переробки нафтопродуктів. Вторинне перероблення нафти, метою якого є отримання з нафти додаткової кількості світлих нафтопродуктів і поліпшення окремих показників прямогонних дистилятів, здійснюють за високих температур 500...700 °С і тиску 5...7 МПа методами термічного або каталітичного крекінгу, гідрокрекінгу тощо [3].

Отримувані в результаті цих процесів нафтопродукти відрізняються від прямогонних значною зміною групового і хімічного складу внаслідок деструкції (розпаду) вуглеводнів [3].

У дистилятних продуктах крекінгу, особливо в залишкових крекінг-мазутах, міститься велика кількість ненасичених і ароматичних вуглеводнів і неуглеводневих сполук, а в частці залишкових палив, (як прямогонних, так і отриманих вторинною переробкою) крім того, підвищена кількість мінеральних домішок [3].

Високов'язке паливо має і складніший фракційний склад. Важкі палива, які використовують для малообертових двигунів МОД і СД, отримують, як правило, компаундуванням залишкових палив, що містять фракції, які киплять при температурі 400...500 °С, з дизельними паливами, температура кипіння яких 200...300 °С. Останні додають у паливо для отримання необхідної в'язкості та зниження температури застигання, що і визначає фракційний склад високов'язкого палива [3].

Широкий фракційний склад для палива, що використовується в СД і особливо у високооборотних дизелях (ВОД), спричиняє погіршення якості розпилювання, випаровування і сумішоутворення. Крім того, при цьому зменшується повнота згоряння палива і, як наслідок, збільшується його питома витрата [3].

Для палив, що використовуються в СД із частотою обертання до 500 об/хв, температурні межі кипіння не мають важливого значення, тому вони не

регламентовані стандартами. Час, що відводиться на сумішоутворення і горіння, достатній для повного згорання палива найширшого фракційного складу. Однак застосування палива з якомога вузьким фракційним складом сприяє рівномірному випаровуванню крапель у період самозаймання та інтенсивному розвитку полум'я в період горіння палива в циліндрі дизеля [3].

Розшифрувати, тобто ідентифікувати "повний" хімічний склад пального сучасними засобами поки що не є можливим (оскільки нині отримують і вивчають хімічний склад нафти тільки до температур кипіння вузьких фракцій у максимальних межах 500...580 °С), тому хімічний склад нафтових палив виражають двома способами – елементним хімічним складом і груповим хімічним складом [3].

Хімічний аналіз елементного складу палив не виявляє хімічних характеристик компонентів, які входять до їх складу, і тому не може забезпечити повне розуміння їхніх властивостей. Однак такий аналіз дозволяє обчислити тепловий та матеріальний баланси під час горіння палива. Елементний хімічний склад - кількісний склад хімічних елементів, що входять у паливо, виражений у масових частках або масових відсотках. Кількість хімічних елементів у складі палива дуже велика, але, незважаючи на це, елементний хімічний склад палива виражається залежністю [3]:

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100\%,$$

що може визначити його основні горючі речовини: вуглець С, водень Н, сірку S, а також кисень О та азот N, що перебувають у складних високомолекулярних сполуках, і негорючі мінеральні домішки, які під час спалювання палива перетворюються на золу А і вологу W [3].

Головним елементом, що забезпечує горіння в паливі, є вуглець, від якого залежить викид основної частини тепла під час горіння. Вуглець міститься в паливах різного складу в кількості 83...88 % за масою, причому чим важча нафта за густиною і фракційним складом, тим вищий вміст вуглецю. Вуглець входить до складу всіх хімічних сполук палива [3].

Другим за відсотковим вмістом у паливі є водень, який становить 10...14 % маси палива, у важчих паливах водню менше. Також як і вуглець водень є складовою частиною всіх хімічних сполук палива. Водень і вуглець є основними горючими елементами палива і носіями теплової енергії [3].

Сірка входить до складу численної групи сірковмісних гетероатомних сполук. Палива сильно відрізняються за вмістом сірки: у малосірчистих сірка становить 0,01 ... 0,5 % за масою, а у високосірчистих до 3,5 % за масою. У висококиплячих фракціях нафти (вище 400 °С) сірки зазвичай міститься значно більше, ніж у низькокиплячих. Сірка є одним із небажаних елементів палива [3].

Азот у паливі міститься в значно менших, ніж сірка, кількостях (0,01...0,6 % за масою і лише в окремих випадках до 1,5 % за масою). Азотовмісні сполуки концентруються здебільшого у важких фракціях нафти (вище 400°С) [3].

Кисень у паливі представлений у вигляді карбонових і нафтових кислот, вміст його може бути від 0,05 до 0,85 % за масою. Кисень концентрується у важких фракціях нафти і є небажаним елементом [3].

Кисень та азот у складі палива виступають як органічний баласт, адже їх присутність знижує концентрацію горючих компонентів у паливі. Коли кисень утворює сполуки з воднем або вуглецем у паливі, це призводить до окислення частини горючих елементів, тим самим знижуючи тепловий ефект згоряння палива. Азот під час спалювання в повітряному середовищі не вступає в окисні реакції та виходить у відпрацьованих газах у незміненому стані [3].

У складі палива встановлено понад 500 індивідуальних і близько 350 сірковмісних, азотовмісних і кисневмісних вуглеводнів, у ньому виявлено понад 50 хімічних елементів. Вміст зазначених сполук і домішок у паливі насамперед залежить від родовища нафти, з якої його отримано, тому говорити про середній хімічний склад палива можна тільки умовно [3].

Крім сірки в паливах найпоширеніші вуглеводневі домішки, вода і механічні домішки. Вуглеводневі домішки – це здебільшого гетероорганічні сполуки, що входять до складу вихідної сировини. Це найхарактерніше для

дизельного палива, внаслідок їх високої молярної маси і високих температур кипіння. Насамперед це сірчисті сполуки, вуглеводневі кислоти і смолисто-асфальтові речовини. Волога може проникати в паливо під час його транспортування, зберігання або перекачування, що сприяє корозійним процесам у металевих частинах двигуна. Механічні домішки погіршують прокачуваність пального системою паливоподачі, слугують основою для утворення смолистих відкладень, збільшують механічне зношування і корозію металу. Особливо великої шкоди механічні домішки завдають системам паливоподачі дизелів, викликаючи підвищений знос прецизійних деталей. Основним джерелом механічних домішок є атмосферний пил [3].

Структурний склад палива визначає одну з основних його характеристик - нижчу теплоту згоряння  $Q_n$ , чисельне значення якої може бути визначено за формулою Д.І. Менделєєва:

$$Q_n = 339,15C^p + 1256H^p - 108,86(O^p - S^p) - 25,12(9H^p + W^p). \quad (1.1)$$

Від нижчої теплоти згоряння палива  $Q_n$  залежить його питома ефективна витрата  $b_e$ :

$$b_e = \frac{3600}{\eta_e \cdot Q_n}, \quad (1.2)$$

де  $\eta_e$  – ефективний коефіцієнт корисної дії (ККД) дизеля.

За фіксованого значення ефективного ККД  $\eta_e = 0,45$  зміна структурного складу палива призводить до таких змін нижчої теплоти згоряння і питомої ефективної витрати палива [3].

Таблиця 1.1 – Вплив структурного складу палива на його нижчу теплоту згоряння та питому ефективну витрату [3].

Зміна структурного складу палива					$Q_n$ , кДж/кг	$b_e$ , кг/(кВт·год)
$C^p$	$H^p$	$S^p$	$C^p$	$W^p$		
86,9	11,4	1,0	0,4	0,3	41203	0,194
87,4	11,2	1,0	0,5	0,3	41870	0,191
87,1	12,5	0,2	0,04	0,06	42556	0,188

Зазвичай, хімічний склад нафтових палив описують через присутність основних груп вуглеводнів та інших хімічних сполук. Вуглеводні компоненти нафти включають три головні групи: парафіни (алкани), нафтени (циклани або циклоалкани) та ароматичні сполуки (арени). [3].

Парафінові вуглеводні (алкани або метанові вуглеводні, гомологи метану, насичені вуглеводні метанового ряду) - основна частина вуглеводнів палива. Вони мають хімічну формулу  $C_nH_{2n+2}$ , де С – вуглець, Н – водень,  $n$  - кількість атомів вуглецю. Алкани з числом атомів вуглецю від 1 до 4 є газоподібними і перебувають у розчиненому стані тільки в сирій нафті. Рідкі парафінові вуглеводні від С5 (температура кипіння 36 °С) до С18 (температура кипіння 320 °С) є основою рідкого нафтового палива. Тверді парафінові вуглеводні починають вважати такими з вуглеводнів С<sub>19</sub> або С<sub>20</sub> і до максимально можливих у нафті. Такий термін у цьому випадку відноситься до нормальних алканів, що представляють дійсно тверді мікрочастинки. Тверді парафіни - найбільш високозастигаючі вуглеводні палива, що визначають його температуру застигання, тому їхній вміст у паливах обмежений. Їхній вміст є класифікаційною ознакою, за якою палива відносять до трьох видів: до 1,5 % - мал.опарафіністі, 1,5...6 % - парафіністі, понад 6 % - високопарафіністі [3].

Нафтеніві вуглеводні (циклани) є моноциклічними і поліциклічними за будовою і мають хімічну формулу  $C_nH_{2n}$ . нафтени – бажаний компонент усіх нафтових палив, вони мають високі теплоту згоряння і густину та низьку температуру застигання [3].

Ароматичні вуглеводні (арени) є ненасиченими циклічними вуглеводнями, їхній вміст у нафті та нафтопродуктах різний. У легких фракціях їхня присутність є бажаною (у певних межах) і необхідною для поліпшення експлуатаційних характеристики (зокрема для підвищення детонаційної стійкості). Ароматичні вуглеводні мають підвищену термічну стабільність, внаслідок чого для їхнього самозаймання потрібна вища температура і триваліший період затримки самозаймання, ніж для нафтових і парафінових

вуглеводнів. Процес згоряння ароматичних вуглеводнів відбувається з великою швидкістю і супроводжується різким наростанням тиску в циліндрі, що викликають "жорстку" роботу дизеля [3].

Негативний вплив ароматичних вуглеводнів на протікання робочого процесу в МОД позначається значно менше, ніж у СД і ВОД. Це пояснюється тим, що в МОД на сумішоутворення і згоряння палива відводиться досить тривалий час і згоряння відбувається за високого коефіцієнта надлишку повітря ( $\alpha > 1,9$ ) [3].

Гетерогенні сполуки – це хімічні сполуки вуглеводнів з одним або кількома атомами різних хімічних елементів: сірки, азоту, кисню, хлору і металів. Небажані гетероатомні сполуки істотно ускладнюють технологію перероблення сирової нафти, впливають на експлуатаційні властивості кінцевих нафтопродуктів і рівень забруднення навколишнього середовища.

Неграничні вуглеводні – сполуки, які містяться в дистилатних і залишкових продуктах крекінгу і відсутні в сирій нафті та продуктах її прямої перегонки. Додавання до палива прямої перегонки, наприклад, 20...30 % продуктів термічного крекінгу призводить до отримання палива з вмістом ненасичених вуглеводнів близько 10...12 % [3].

Ненасичені вуглеводні швидко окислюються, і палива, що їх містять, мають низьку стабільність. Так, під час зберігання палив, у яких міститься лише 1 % цих вуглеводнів, утворюються опади, збільшується їхня коксованість. У циліндрі дизеля ненасичені вуглеводні окислюються в передполум'яному періоді, утворюючи смолисті речовини, що спричиняє закоксування соплових отворів форсунок, посилені відкладення лаку і нагару на деталях ЦПГ. Нагари вирізняються високою абразивністю, що посилює зношування деталей [3].

Важливим компонентом як сирової нафти, так і продуктів нафтопереробки є сірка та сірковмісні сполуки. Сірка в сирій нафті міститься у зв'язаному вигляді в кількості від 0,02 до 6 % за масою. За вмістом загальної сірки нафту умовно поділяють на малосірчисту (до 0,5 %), сірчисту (0,5...1,9 %) і високосірчисту

(1,9...3 % і більше). Ідентифіковано близько 300 сірковмісних сполук у нафті, які виділяють у кілька груп. Найпростіша сполука – сірководень  $H_2S$ , хоча його зазвичай визначають окремо від інших сірковмісних речовин. Меркаптани - сірковмісні речовини (тіоспірити, тіоли), що становлять 2...10 % від усіх сірковмісних речовин. Меркаптани акумулюються в легких фракціях, дуже корозійні й токсичні. Крім меркаптанів розрізняють також сульфіді, тіофени та ін. [3].

Смоли й асфальтени – складна суміш найбільш високомолекулярних вуглеводнів і гетероатомних сполук із числом атомів вуглецю від 50 до 100. Асфальто-смолисті речовини являють собою в'язкі високомолекулярні неуглеводневі органічні сполуки темного кольору, які перебувають у вуглеводневому середовищі у вигляді розчину або колоїдної системи, з розмірами часток менше 1 мкм. Ці речовини можуть також перебувати у вуглеводневому розчині у вигляді другої рідкої фази. Смоли мають густину 990...1080  $кг/м^3$  і тому сепарацією палива майже не відокремлюються. Смоли утворюються в паливі в процесі його переробки, зберігання і використання внаслідок низки складних перетворень нестабільних вуглеводнів, а також неуглеводневих сполук, що містяться в нафтопродуктах. Смоли термічно і хімічно нестійкі та легко окислюються і ущільнюються, а при нагріванні розширюються. За ставленням до різних розчинників виділяють такі групи смолистих речовин. Нейтральні смоли, які становлять більшу частину смолистих речовин, що містяться в паливі [3].

Ці смоли розчиняються в легкому бензині, але не розчиняються в лугах і кислотах. Вони гальмують окислення палива, подовжуючи тим самим процеси його займання і згоряння [3].

Використання в дизелях палива з високим вмістом смол вимагає досконалішої організації паливопідготовки, процесів розпилування і сумішоутворення, ніж під час роботи на малосмолистих паливах. Смоли слугують основним джерелом відкладень у вигляді осадів і шламу в цистернах,

трубопроводах і фільтрах; лакових плівок на плунжерних парах ПНВТ та голках форсунок; коксу біля соплових отворів форсунок; лаків і нагару на деталях ЦПГ. Смоли значно погіршують деемульгуючі властивості палива, за їх високого вмісту створюються стійкі водопаливні емульсії. Непрямим показником вмісту смол та інших високомолекулярних сполук у паливі слугує його коксованість, яка регламентується стандартами на паливо [3].

Асфальтени – нейтральні речовини, розчинні в бензолі, хлороформі та інших розчинниках, але не розчинні в легкому бензині. У нафтопродуктах асфальтени перебувають у вигляді колоїдних систем. У присутності сірки асфальтени здатні ущільнюватися в ще більш високомолекулярні речовини – карбени і карбоїди. Асфальтогенні кислоти – кислоти, що розчиняються в спирті, бензолі та хлороформі. Реагують з лугами до температур, не вищих за 120 °С.

Мінеральні домішки, що містяться в нафтопродуктах, залежно від походження можливо поділити на дві групи. До першої групи належать забруднення, що потрапляють у паливо в процесі переробки, транспортування, зберігання і застосування. Сюди належать продукти корозії та зносу технологічного обладнання нафтоперегінних установок, цистерн, трубопроводів, а також ґрунтовий пил і мінеральні солі, які потрапляють у паливо з води під час промивання товарних продуктів або під час обводнення пального в процесі зберігання і використання. Більша частина мінеральних домішок першої групи відокремлюється під час відстоювання, сепарації та фільтрації палива. Другу, значно меншу групу, складають зольні елементи нафти, що перейшли в товарні сорти палива в процесі її переробки. У золі нафтових палив міститься велика кількість елементів (понад 25), головним чином солей металів, які в сирій нафті перебувають у розчиненому вигляді або колоїдному стані [3].

Вміст золи в нафті коливається в широких межах – від 0,01 до 0,3 %. Під час перегонки нафти більша частина зольних елементів концентрується в залишковому паливі, в асфальто-смолистій частині [3].



Більшу частину нафтової золи складають натрій, ванадій, нікель, кальцій, залізо, алюміній. П'ятиокис ванадію  $V_2O_5$ , також як оксид заліза  $Fe_2O_3$ , є сильним каталізатором окиснення  $SO_2$  і  $SO_3$ , тому присутність ванадію в паливі посилює корозійний знос деталей ЦПГ [3].

Зольність палива є одним із важливих показників його якості, нормованих міжнародними стандартами та ДСТУ. У високов'язкого палива, що використовується в МОД, зольність може досягати 0,15 %, а в дизельних палив, що застосовуються в ВОД, вміст золи не повинен перевищувати 0,01...0,02 % [3].

## РОЗДІЛ 2

### ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

З огляду на тему дослідження, було сформульовано мету роботи – підвищення екологічної ефективності та збереження працездатності СД шляхом зниження вмісту сірки високов'язкого палива.

Гіпотеза наукового дослідження полягає в тому, що десульфуризація високов'язкого палива в умовах АПК досяжна шляхом впливу на його сірковмісні молекули.

Головне завдання дослідження полягає в розробленні способу, засобів та ефективного режиму десульфуризації високов'язкого палива системою паливопідготовки СД.

На жаль, нині проблемі десульфуризації палива, не приділяється належної уваги. Національні та міжнародні стандарти на паливо дозволяють використовувати в практиці експлуатації ЕУ сорти палива з широким діапазоном концентрації сірчистих домішок. При цьому, з огляду на тривалу автономну роботу ЕУ, експлуатація теплових двигунів відбувається на сортах палива з максимально допустимим вмістом сірчистих домішок, що насамперед пов'язано з питаннями економічної ефективності. Використання подібних палив є однією з причин погіршення технічного стану деталей СД і зниження їхньої енергетичної ефективності.

У складних системах підготовки палива питання ефективності ультразвукової обробки часто не отримує достатньої уваги, головним чином через брак досліджень щодо вибору оптимальних частот ультразвукових хвиль, які б забезпечували високу ефективність процесу з мінімальним енергоспоживанням. Крім того, не вистачає досліджень щодо підсилення ультразвукової обробки шляхом створення додаткових зон кавітації, зокрема, за допомогою впровадження повітря в оброблюване паливо.

Для вирішення головного завдання необхідне вирішення низки допоміжних завдань, а саме:

- 1) аналіз процесів паливопідготовки високов'язких важких палив, що використовуються для роботи дизелів;
- 2) Виявлення методів та інструментів для моніторингу рівня сірки у паливі після проведення десульфуризації;
- 3) Визначення оптимального спектру характеристик ультразвукового генератора для ефективного видалення сірки з палива;
- 4) аналіз зміни корозійного стану ЦПГ СД від вмісту сірки високов'язкого палива.

Першим допоміжним завданням дослідження передбачається визначення оптимальної ділянки системи паливопідготовки, у межах якої найдоцільніше проводити додаткову ультразвукову обробку палива.

Друге вторинне завдання полягає у встановленні критеріїв, які описують процес десульфуризації палива під впливом ультразвукової обробки.

Третя допоміжна задача пов'язана з експериментальними дослідженнями щодо визначення діапазону оптимальних частот ультразвукового сигналу, який забезпечує максимальне зниження концентрації сірчистих сполук у паливі за мінімальних витрат енергії.

Четверте вторинне завдання зосереджено на встановленні впливу ультразвукової обробки палива на ступінь корозійного зношування циліндрових втулок та поршневих кілець дизельних двигунів.

При розв'язанні кожної допоміжної задачі отримано відповідні наукові результати, а саме:

- 1) необхідно проводити ультразвукову десульфуризацію у стабілізованому об'ємі палива, яке було попередньо відфільтроване від води та механічних домішок, що є типовим для використання у резервуарах витрат системи підготовки палива;

2) контроль вмісту сірки в паливі після його десульфуризації необхідно здійснювати за об'ємною концентрацією сульфїду водню, що утворюється під час ультразвукової обробки палива і виділяється з його відкритої поверхні;

3) оптимальна десульфуризація високосірчистих палив під час ультразвукової обробки відбувається в діапазоні частоти ультразвукового сигналу 22...26 кГц за амплітуди ультразвукової хвилі 0,36...0,68 мкм;

4) ультразвукова десульфуризація палива зі спільною інтенсифікацією процесу ультразвукової обробки шляхом примусової подачі повітря в об'єм оброблюваного палива сприяє 1,15...1,35-кратному зниженню концентрації сірковмісних компонентів палива та більш ніж трикратному зниженню корозійного зносу деталей СД.

Розв'язання головного завдання дослідження виконано шляхом синтезу наукових результатів вирішення допоміжних завдань.

З урахуванням загальної теорії систем методології наукових досліджень і системного підходу до проблеми, СД можна уявити як складну багатокомпонентну систему, з параметрами, що динамічно змінюються, контрольованими і регульованими параметрами, що складається з додаткових підсистем. Функціонування цих підсистем здійснюється від енергії палива, що виробляється СД. Дослідження процесів, що протікають в окремих підсистемах, призводить до розв'язання завдань щодо забезпечення екологічної, економічної, енергетичної ефективності роботи двигуна або енергетичної установки.

Тезою розв'язання основного завдання є інтелектуальний прогноз про те, що вдосконалення системи паливопідготовки СД може бути досягнуто за рахунок ультразвукової кавітаційної обробки палива, що сприяє зниженню концентрації сірковмісних компонентів.

Як основні наукові результати дослідження прийнято таке:

- виконано аналіз способів підготовки високов'язкого палива і визначено ділянку паливної системи, яка найбільше підходить для проведення ультразвукової обробки палива;

- розроблено методику визначення оптимальної частоти ультразвукового сигналу під час десульфуризації палива за об'ємною концентрацією сульфїду водню, що утворюється і виділяється з відкритої поверхні палива під час його ультразвукової обробки;
- визначено оптимальні частоти й амплітуди ультразвукового кавітаційного сигналу, що забезпечують максимальне зниження концентрації сірчистих сполук у паливі за мінімальних витрат енергії;
- визначено характер зміни технічного стану ЦПГ, а також енергетичних, економічних та екологічних показників СД при проведенні ультразвукової кавітаційної обробки палива.

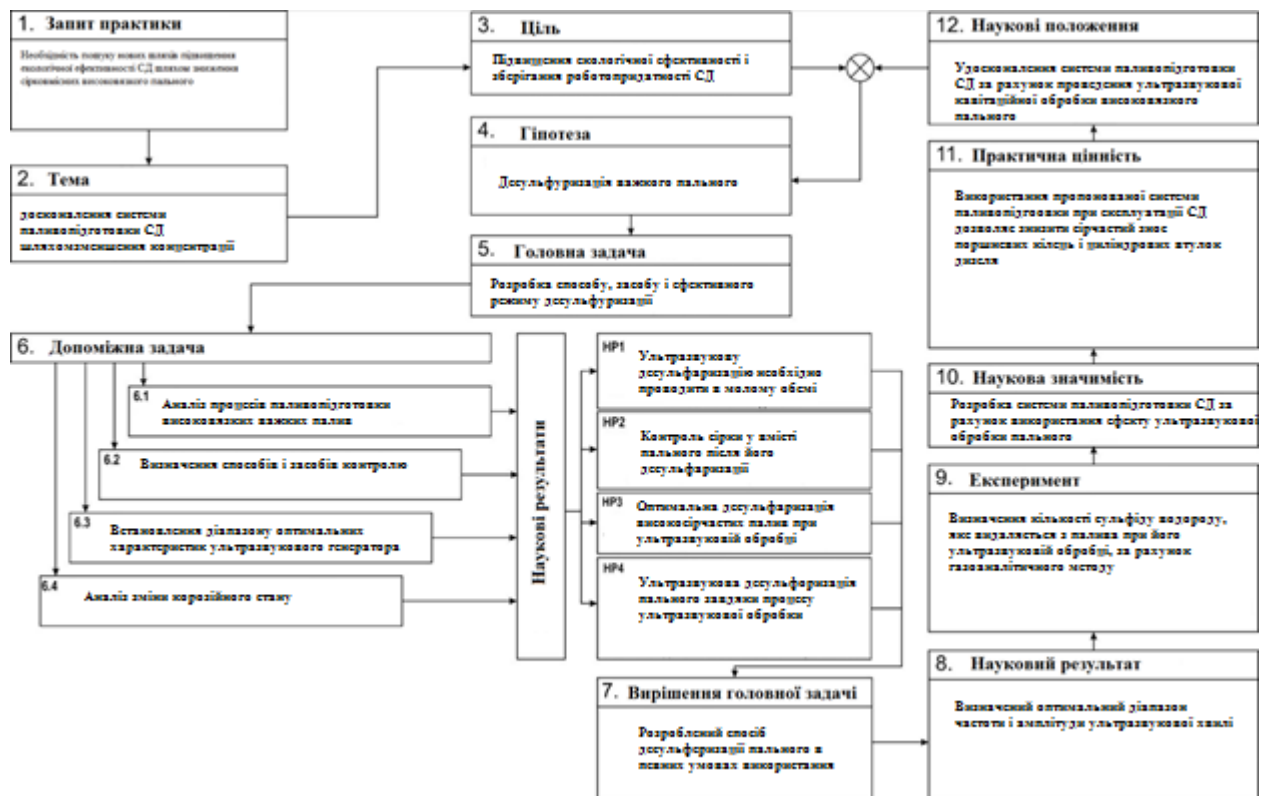


Рис. 2.1. Технологічна карта наукового дослідження

В умовах наукової лабораторії за допомогою газоаналітичного методу визначали кількість сульфїду водню, що виділяється з палива під час його ультразвукової обробки; за допомогою вивчення лінійчастих спектрів горіння палива визначали зміну концентрації сірчистих домішок у паливі. Похибка у вимірах під час проведення лабораторних досліджень не перевищувала 3,5 %.

У виробничих умовах визначався технічний стан і основні показники роботи СД під час проведення ультразвукової кавітаційної обробки палива. При цьому похибка у вимірах не перевищувала 4,5 %.

Наукова значущість дослідження полягає в розробленні системи паливопідготовки за рахунок використання ефектів ультразвукової кавітаційної обробки палива.

Практична цінність - використання пропонованої системи паливопідготовки під час експлуатації СД дає змогу знизити сірчаний знос поршневих кілець і циліндрових втулок дизеля у 2,3...3,7 разу, у 2,3...2,7 разу знижує вміст оксидів сірки у випускних газах дизеля, покращує технічний стан ЦПГ дизеля та його газовипускної системи, на 35...40 % знижує трудомісткість робіт із моточищення дизелів. Впровадження результатів дослідження дало змогу поліпшити на 3,5...4,8 % економічні та 7,3...9,6 % енергетичні показники роботи СД.

У дослідженні висунуто і підтверджено наукове положення: удосконалення системи паливопідготовки СД можливе за рахунок проведення ультразвукової кавітаційної обробки палива, що сприяє розриву С-S зв'язків і десульфуризації палива.

### РОЗДІЛ 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СІРЧИСТИХ ДОМШОК У ПАЛИВІ НА РОБОТУ ДИЗЕЛІВ

Підвищений вміст неуглеводневих сполук у паливах для СД є наслідком погіршення якості видобутої нафти і використання крекінг залишків у вигляді компонентів товарних палив. У світовій практиці видобуток сірчистої нафти зростає. Вміст сірки в отриманому з неї паливі доходить до 4 %. Збільшення вмісту сірки супроводжує погіршення групового і хімічного складу нафти, зростає вміст ароматичних вуглеводнів, асфальто-смолистих речовин і зольних елементів.

Більша частина сірчистих сполук нафти має високу молекулярну вагу і температуру кипіння, тому під час прямої перегонки нафти від 70 до 90 % усіх сірчистих сполук конденсується в залишках (мазут, гудрон). Так, наприклад, у прямогонних продуктах нафти, що містить у вихідному стані 0,3...0,35 % сірки, міститься: у бензині – 0,045...0,048 %, гасі – 0,058...0,06 %, у мазуті – 0,58...0,65 % сірки (тобто вдвічі більше, ніж у вихідній нафті). Природно, що зі зростанням відсоткового вмісту сірки в "базовій" нафті, підвищується вміст сірки в одержуваному в результаті її перегонки паливі. Залишкове паливо, що отримується в результаті вторинної переробки нафти (наприклад, крекінг процесу), містить ще більшу кількість сірки, ніж прямогонні мазути. Це викликано технічним розпадом сірчистих сполук, що містяться в прямогонних фракціях нафти, причому значна частина сірки концентрується в залишкових продуктах крекінгу.

Більша частина сірчистих сполук міститься у високомолекулярній (ароматичній) частині нафти, і приблизно 70 % їхнього групового складу дотепер мало вивчена у зв'язку з недосконалістю методів аналізу [4]. Серед сполук сірки найбільш дослідженими є: елементарна сірка, сірководень і група з високою молекулярною вагою - меркаптани, сульфіді та дисульфіді [7].

Елементарна сірка може міститися в розчиненому стані (до 3 %) у нафті та дистилатних продуктах перегонки. Вона дуже агресивна до кольорових металів, особливо до міді та її сплавів (чорні метали за температури 100...120°C не зазнають руйнувань). Перебуваючи в паливі, вона запобігає рідкофазному окисленню вуглеводнів, тобто виконує роль антиокислювальної присадки.

Сірководень міститься в нафті в розчиненому стані і вирізняється високою корозійною активністю, особливо до міді та її сплавів, а також до чорних металів.

Меркаптани являють собою рідкі, розчинні в нафті речовини з низькою температурою кипіння (35...140 °C), завдяки чому під час перегонки нафти переходять у дистилати. Меркаптани корозійно активні. Їхня присутність у товарних сортах палива вкрай шкідлива, тому що вони викликають корозію кольорових металів [7].

Необхідно зазначити, що найбільш агресивних сірчистих сполук (елементарної сірки, сірководню і меркаптанів) у мазутах міститься значно менше, ніж у сирій нафті, або в легких погонах, у той час як загальний вміст сірки в залишкових паливах значно вищий.

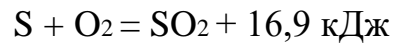
Сульфіди - рідкі речовини, що мають невисоку температуру кипіння, тому під час перегонки нафти надходять у світлі дистилати, в яких міститься 50...80 % усіх сірчистих сполук. За хімічними властивостями сульфіди є нейтральними речовинами.

Дисульфіди належать до шкідливих сірчистих сполук і становлять від 5 до 30 % сульфідів, які знаходяться у фракціях прямої перегонки нафти. У фракціях і залишках термічного крекінгу вони майже повністю відсутні, оскільки за високих температур розкладаються.

Ще до потрапляння в циліндр дизеля агресивні сірчисті сполуки, що містяться в паливі, чинять корозійний вплив на цистерни, трубопроводи і деталі паливної апаратури двигуна [7, 8].



У процесі горіння палива вся сірка, що знаходиться в різних сполуках (як нейтральних, так і агресивних), згорає. Причому її повному згорянню сприяє великий надлишок повітря для горіння в циліндрі СД ( $a = 1,6...2,4$ ):



Частина утвореного двоокису сірки  $SO_2$  переходить у триокис (сірчаний ангідрид):



Інтенсивність цієї реакції залежить від концентрації в циліндрі дизеля  $SO_2$  і кисню, від температури і тиску газів, наявності та ступеня ефективності каталізаторів [8].

Зі збільшенням коефіцієнта надлишку повітря для згорання, загального вмісту сірки в паливі, а також із підвищенням тиску в циліндрі інтенсивність утворення  $SO_3$  зростає. Підвищення температури уповільнює утворення  $SO_3$ , оскільки реакція (3.1) є екзотермічною. Наприклад, при атмосферному тиску і температурі  $410^\circ\text{C}$  всі 100 %  $SO_2$  можуть перейти в  $SO_3$ , а при температурі  $1000^\circ\text{C}$  і тому самому тиску - тільки 1 %. Зміна температури газів чинить на процес утворення  $SO_3$  сильніший вплив, ніж зміна їхнього тиску, внаслідок чого максимальна кількість  $SO_3$  у циліндрі двигуна утворюється за умов відносно низьких температур, тобто наприкінці розширення продуктів згорання в циліндрі та під час їхнього випуску.

Реакція окислення  $SO_2$  в  $SO_3$  без каталізаторів протікає повільно. Однак, у присутності таких активних сполук, як окис заліза  $Fe_2O_3$  або п'ятиокис ванадію  $V_2O_5$ , утворення сірчаного ангідриду значно прискорюється. Частина цих оксидів осідає в нагарах, решта перебуває в продуктах горіння у вигляді тонкої суспензії, тобто в стані максимальної активності.

Сірчаний ангідрид за температури вище  $400^\circ\text{C}$  дисоціює на  $SO_2$  і  $O_2$ , причому зі збільшенням температури швидкість дисоціації різко зростає. За високих температур газів у циліндрі зменшується каталітична активність  $V_2O_5$  і  $Fe_2O_3$ , внаслідок чого найбільша кількість  $SO_3$  утворюється в циліндрі дизеля наприкінці ходу розширення.

Триокис сірки за високих температур деталей ЦПГ, виготовлених із чавуну і сталі, може вступити з ними в безпосередню реакцію, спричиняючи газову корозію, що має суто хімічний характер і спостерігається за температур на поверхнях понад 1000...1100°C.

Оскільки в дизелях поверхня деталей ЦПГ до таких високих температур не нагрівається, газова корозія, спричинена присутністю в циліндрі триокису сірки, практично не має місця.

Підвищений знос деталей двигуна під час роботи на сірчистих паливах зумовлений, головним чином, електрохімічною (волоگو) корозією. Сірчаний ангідрид, що знаходиться в циліндрі в газоподібному стані, з'єднуючись з парами води, завжди присутньої в циліндрі, утворює пари сірчаної кислоти



Підвищення температури сприяє дисоціації парів сірчаної кислоти, тому найсприятливіші умови для їхнього утворення бувають наприкінці розширення продуктів згоряння і під час випуску. Кількість сірчаної кислоти, що конденсується на дзеркалі циліндрової втулки, зростає зі зниженням температури її стінок і підвищенням точки роси парів  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Таким чином, у дизелі може мати місце газова корозія і корозія, що відбувається в рідкій фазі, які залежать від температури деталей ЦПГ і від точки роси продуктів згоряння сірчистого палива (рис. 3.1).

За температури внутрішньої поверхні дизеля, що перевищує точку роси газоповітряної суміші, продукти згоряння не конденсуються, і корозія може відбуватися тільки за участю газової фази.

Очевидно, що інтенсивність газової корозії зростатиме з температурою, підкоряючись загальному закону підвищення швидкості хімічних реакцій зі збільшенням температури та уповільнення при зниженні температури. У разі зниження температури нижче точки роси відбуватиметься конденсація води й утворення сірчистої або сірчаної кислоти. Цей процес матиме місце на тих поверхнях дизеля, температура яких нижча за температуру насичення (точки

роси) продуктів згоряння. Наприклад, на внутрішній поверхні втулки циліндра, що охолоджується зовні водою.

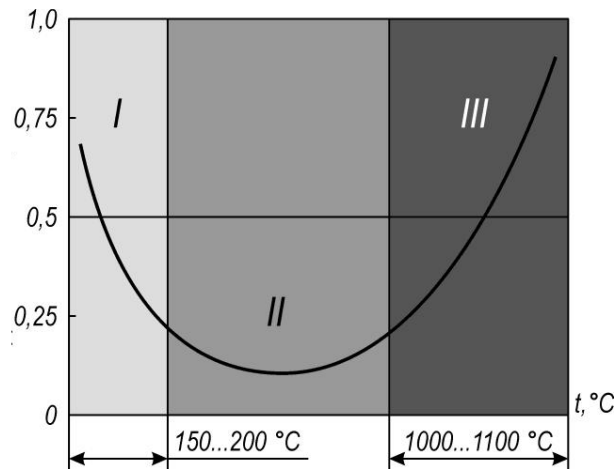


Рис. 3.1. Залежність корозійного зносу деталей дизеля від температури під час роботи на сірчастому паливі: I – зона кислотної корозії; II – зона мінімальних зносів; III – зона газової корозії

Корозійну дію розчинів сірчаної кислоти, що утворюються на стінках циліндра, визначають їхня концентрація і температура. Сірчана кислота міцністю понад 93 % не діє на чорні метали, тоді як розбавлена легко викликає їхню корозію. Найбільш активна щодо чавуну кислота з концентрацією від 3 до 20 %.

Таким чином, у міру зниження температури стінки циліндра нижче за температуру насичення інтенсивність корозії знову починає різко зростати і крива корозії набуває вигляду, показаного на рис. 3.1, тобто має мінімум на ділянці температур, що дещо перевищують температуру насичення.

У дизелях до газової корозії найбільше схильні тарілки випускних клапанів, але особливе значення цей вид корозії має для газових турбін газотурбокомпресорів.

На рис. 3.2 показано порівняння газової корозії в середовищі  $\text{SO}_2$  низки металів. Для дизелів велике значення має кислотна корозія, що відбувається в рідкій фазі, тому що основні елементи ЦПГ, наприклад, стінки поршня, втулки циліндра і поршневі кільця, мають такі температури, за яких можлива конденсація продуктів згоряння сірчистих палив.

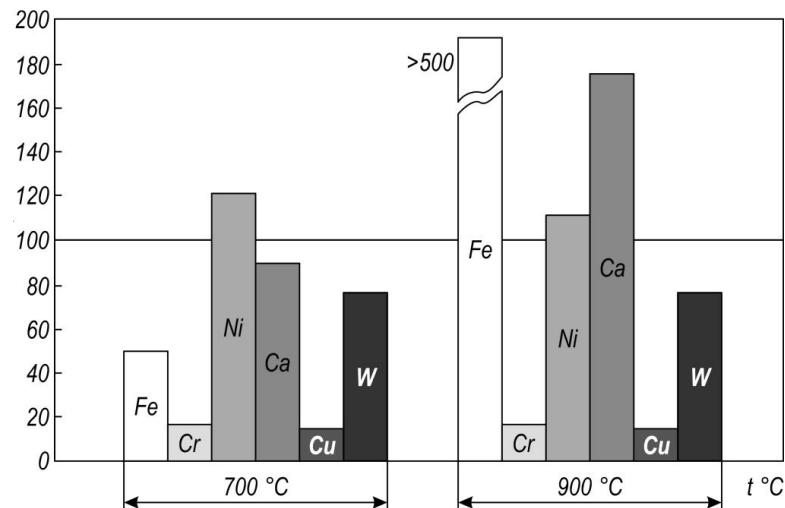


Рис. 3.2. Порівняння газової корозії для низки металів у середовищі SO<sub>2</sub> (за Гадфільдом)

Посилене корозійне спрацьовування, що спостерігається під час роботи дизелів на високосірчистому залишковому паливі, спричиняється не тільки підвищеним вмістом сірки в паливі, а й погіршенням його згорання, що особливо проявляється за наявності в паливі великої кількості вуглеводнів і асфальто-смолистих речовин. Продукти неповного згорання палива, що утворюються в циліндрі дизеля, - аморфні вуглецеві частинки, поглинають пари сірчаної кислоти і води і, осідаючи на поверхні металу, викликають його корозію.

Частинки чавуну, що руйнуються, разом із сульфатом заліза (продуктом корозії) під впливом високої температури перетворюються на оксид заліза, що має сильні абразивні властивості.

Наявність у паливі сірки збільшує також абразивний знос поверхонь, що труться, оскільки сульфати сприяють затвердінню відкладень вуглеводнів. Крім того, накопичення сірчистих сполук у нагарах робить їх більш твердими.

Оксиди сірки прискорюють полімеризацію вуглеводнів пального та оливи. Продукти полімеризації не розчиняються в мастилi і, будучи липкими, міцно утримуються на поверхні металу у вигляді лакової плівки, в якій цементуються тверді частинки з продуктів згорання. Абразивні частинки, своєю чергою, створюють на дзеркалі циліндрової втулки дрібні подряпини та риски, що

посилює корозійну активність розчинів сірчаної кислоти, яка проникає вглиб металевої поверхні.

Виходячи з того, що в горючій масі палива містяться різноманітні сірчисті сполуки (елементарна сірка, сірководень, меркаптани, сульфідиди, дисульфідиди, тіофени, теофани, сульфоокислоти тощо), які взаємодіють із деталями ЦПГ, кришкою циліндра, випускними та продувними клапанами за різного фізико-хімічного стану палива, можна позначити такі основні шляхи захисту цих вузлів дизеля [4]:

- виготовлення деталей дизеля з матеріалів, стійких до впливу сірчистої корозії;
- зміни в конструкції дизелів, призначених для роботи на сірчистих паливах;
- застосування нейтралізуючих антисірчистих присадок до палива;
- виключення режимів роботи дизеля, які спричиняють найінтенсивнішу електрохімічну корозію та підвищене зношення (тобто режимів із низькою температурою води, що охолоджує стінки циліндра і циліндрову кришку);
- створення систем паливопідготовки, що знижують кількість сірчистих сполук, які надходять у циліндр дизеля;
- вибір режиму роботи системи паливопідготовки, що забезпечує найбільш якісну обробку палива [4].

Зносостійкість циліндрових втулок, поршневих кілець, циліндрових кришок та інших деталей, що піддаються корозії, підвищують шляхом виготовлення їх із легованих чавунів. Значне зниження зносу досягається шляхом хромування циліндрових втулок (рис. 3.3). Однак, цей варіант рентабельний лише для малорозмірних промислових ДВЗ і не набув широкого поширення для двигунів унаслідок високої технологічної вартості [4].

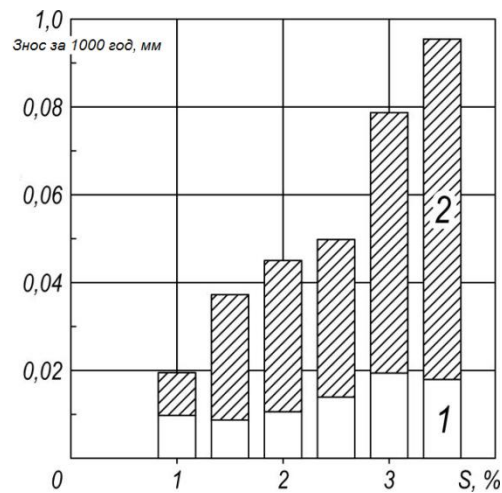


Рис. 3.3. Порівняння зносу циліндрових втулок: 1 – хромовані; 2 – нехромовані [4].

Для збільшення термінів служби деталей ЦПГ у МОД, що працюють на високов'язкому сірчистому паливі, низка дизелебудівних фірм циліндрову втулку виконують із двох частин: верхню – сталеву, а нижню (з випускними і продувними вікнами) – чавунну. Чавунна частина втулки, додатково збагачена фосфором, характеризується підвищеною здатністю чинити опір корозії та зносу.

Для зменшення сірчистої корозії охолодження циліндрових втулок довгоходових МОД виконується за допомогою двоконтурної системи охолодження. Цей метод широко впроваджується у виробництво МОД, проте неефективний для СД, які конструктивно мають менші відношення довжини циліндрової втулки до діаметру поршня, а також менші товщини циліндрових втулок, що зрівнює градієнти температур у їхніх різних перетинах.

Для зменшення зносу канавок верхніх поршневих кілець їх хромують або використовують протизносні кільця, які розташовують під кільцями ущільнювачів. Застосовується також пористе хромування верхнього поршневого кільця [4].

Для запобігання закоксуванню і поломці поршневих кілець у дизелях із високим ступенем наддуву і великим діаметром циліндра збільшують зазори в замках до 6,8...7,0 мм і торцеві зазори між кільцем і канавкою до 0,35...0,40 мм. Для цієї ж мети застосовують кориговані поршневі кільця з радіальною

товщиною, що плавно зменшується в бік замка на довжині 160...200 мм від замка [4].

Для боротьби зі зносом і нагароутворенням у деталях ЦПГ дизелів, що працюють на сірчистих паливах, було розроблено спеціальні присадки, що запобігають корозійному впливу агресивних сірчистих сполук, а також інтенсифікують процес згоряння палива і частково нейтралізують оксиди сірки. Як присадки до сірчистих сполук застосовувалися солі лужних металів, нафтеніт цинку, колоїдна мідь та інші різні металоорганічні сполуки. Незважаючи на антизносні та протинагарні властивості, присадки до палив не набули широкого поширення на практиці [4].

Причиною цього є їхня погана стабільність. Під час тривалого зберігання палива присадки випадають з нього, а введення їх у видаткову цистерну безпосередньо на підприємстві ускладнює систему паливопідготовки і ускладнює обслуговування дизеля [4].

Значне зниження зносу і нагароутворення в дизелях, що працюють на сірчистих паливах, було отримано введенням у циліндри газоподібного аміаку. Однак, у оєадбних умовах цей спосіб нейтралізації кислотного середовища, що утворюється в циліндрі дизеля, виявився неприйнятним внаслідок його токсичності [4].

В умовах експлуатації дизеля необхідно підтримувати температуру охолоджувальної води і мастила на верхніх межах, рекомендованих інструкціями (щоб уникнути конденсації продуктів згоряння сірки та утворення міцних мінеральних сірковмісних кислот: сірчистої  $H_2SO_3$ , сірчаної  $H_2SO_4$ , пероксомоносірчаної  $H_2SO_5$ , пероксосірчаної  $H_2S_2O_8$  і низки інших). На режимі часткових навантажень рекомендується підвищувати температуру повітря на вході в циліндр шляхом вимкнення охолоджувача наддувочного повітря [4].

Під час згоряння палива в циліндрі дизеля всі сірчисті сполуки, що містяться в ньому, утворюють двоокис  $SO_2$  і триокис  $SO_3$  сірки [4].

Окислення сірки в  $\text{SO}_3$  пов'язане з характерним для цього процесу в дизелів надлишком кисню і каталітичним впливом переважно різних оксидів заліза  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  і окису ванадію  $\text{V}_2\text{O}_5$  [4].

Одночасно в циліндрі утворюється велика кількість водяної пари і, таким чином, у продуктах згоряння з'являється система з двох компонентів, що конденсуються,  $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{SO}_4$ , яка зумовлює можливість інтенсивної електрохімічної корозії [4].

Умовою випадання конденсату на стінках циліндра є перевищення точки роси зазначеної двофазної суміші над температурою стінок. Необхідно зазначити, що точка роси суміші навіть за дуже малого вмісту  $\text{H}_2\text{SO}_4$  значно перевищує точку роси водяної пари. У міру зниження температури поверхонь деталей до точки роси водяної пари з продуктів згоряння починає випадати розчин сірчаної кислоти і вода, тим самим значно знижується концентрація конденсату на стінках. Остання обставина призводить до різкого зростання агресивності конденсату, оскільки відомо, що сірчана кислота найсильніше реагує з металами за концентрації 3...20 % [4].

Таким чином, за температур стінок циліндра, що перевищують точку роси продуктів згоряння, електрохімічна корозія протікає слабо. У разі ж, коли температура стінок виявляється нижче точки роси водяної пари, інтенсивність корозії різко зростає [4].

Виходячи з аналізу складу важких палив для СД і способів їх очищення в процесі паливопідготовки, можна зробити висновок, що основними побічними продуктами, що мають істотний вплив на довговічність і економічність роботи на довговічність і економічність роботи дизеля, є що містяться в паливі: механічні домішки, смолисто-асфальтенові речовини, сірка і сірчисті сполуки, вода.

Як зазначалося раніше, підвищений вміст сірчистих складових у паливі істотно позначається на надійності та економічності дизеля, а їх видалення дає змогу значно підвищити ефективність використання важких сортів палива в СД.



Розв'язання завдань із десульфуризації палива, як правило, відноситься до стаціонарної енергетики і виконується на берегових нафтопереробних комбінатах

Як способи десульфуризації палива в умовах можуть бути використані:

- тонка фільтрація;
- гідроочистка;
- змішування палива зі сполучними реагентами з подальшим відстоюванням, фільтрацією або сепарацією осаду;
- окислювальне відновлення;
- ультразвукова кавітаційна обробка.

Центрифуги, як будь-які роторні апарати, відрізняються високим ступенем обробки палива, але через високу енергоємність і підвищений знос рухомих частин приводів та електроприводів. рухомих частин приводів і електродвигунів, можуть бути рекомендовані як додатковий спосіб підготовки із великою потужністю допоміжної енергетичної установки, що характеризуються частими заходами в морські порти (наприклад, вантажопасажирські). Крім того, отримання необхідного вмісту сірки в високов'язких паливах цим методом часто економічно не вигідно.

Це пов'язано з високою вартістю активних і селективних каталізаторів, водневмісного газу, обладнання. Причому вартість технології зростає зі збільшенням ступеня сіркоочищення.

Простішим методом в апаратурному виконанні є адсорбційне видалення сіркоорганічних сполук. У транспортних енергетичних установках десульфуризація, як правило, проводиться адсорбційним або каталітично-адсорбційним методами.

В останньому, сполуки сірки перетворюються на  $H_2S$  каталітичним відновленням водню або ж на елементарну сірку та/або  $SO_x$  селективним (вибірковим) каталітичним окисленням, з подальшою їх адсорбцією .

Десульфуризація палива також можлива за допомогою водню, однак необхідність зберігання стисненого водню і витрати енергії на його стиснення обмежують застосування цього способу і можлива лише для суден, що використовують водневе паливо (наприклад, для деяких типів газозовів).

Ефективність окислювального знесірчення вуглеводневого палива істотно підвищується, коли за процесом окислення слідує адсорбція продуктів окислення на твердому адсорбенті, наприклад, на молібденовмісних компонентах, активованому вугіллі, алюмосилікатах. Однак, використання подібних способів може бути рекомендовано лише для паливних систем невеликого обсягу.

Останніми роками для знесірчення різних видів моторних палив було запропоновано метод екстракції сірчистих сполук іонними рідинами. Особливо ефективними є іонні рідини, які містять іони  $\text{Cu(I)}$  і  $\text{Ag(I)}$ , а також безводні порошкоподібні  $\text{CuCl}$ , які містять як аніони частинки  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{Cu}_2\text{Cl}_3$  і  $\text{Cu}_3\text{Cl}_4$ . Однак, ці системи забезпечують високу знесірчувальну здатність лише для малов'язких палив.

Серед інших методів окислювального знесірчення палива слід відзначити його озонування. Цей метод дає змогу не тільки зруйнувати конденсовані сірчисті сполуки, а й отримувати на їх основі високоефективні емульгатори. Попереднє озонування може інтенсифікувати процес гідроочищення палива. При цьому застосування даного способу вимагає додаткового генератора озону.

Методом десульфуризації палива, застосовним на всіх типах обладнання і ЕУ є ультразвукова кавітаційна обробка палива, особливості якої розглянуто нижче.

Моторне паливо – високомолекулярна, гетерогенна рідина, молекули якої за атмосферного тиску і нормальної температури складно орієнтовані. При застосуванні до нафти зовнішнього тиску в кілька сот атмосфер молекули поляризуються, протидіючи зовнішнім силам і зберігаючи рівновагу системи. Якщо зовнішній тиск різко зняти, то внутрішні сили почнуть розривати

макромолекули на більш дрібні складові, причому, щільність продукту зменшується. Цей принцип покладено в основу обробки нафти та її похідних з метою зміни її структури.

Ідея дробити довгі органічні ланцюжки палива на більш короткі для отримання вільних радикалів, що утворюють нові сполуки, не нова. При цьому, дослідження в цьому напрямі виконувалися, в основному, для стаціонарної енергетики та нафтопереробних комплексів, а їхнім завданням був розрив С-С-зв'язків у молекулах парафіну, внаслідок чого відбувалася зміна фізико-хімічного складу палива (зменшення молекулярної ваги, температури кристалізації та ін.). Одним із варіантів здійснення завдання розриву міжмолекулярних зв'язків у паливі є використання кавітації - утворення розривів суцільності палива внаслідок місцевого спаду тиску.

Поширення хвиль великої інтенсивності (ультразвуку) супроводжується нелінійними ефектами. Хвилі великої амплітуди, проходячи через паливо, створюють області істотного стиснення і розрядження. При істотному розрядженні виникають "негативні тиски", що призводять до розриву палива. Порожнечі при цьому, як правило, заповнюються газами, які проникають у них унаслідок дифузії з навколишнього палива, а також із парами палива. Оскільки в хвилі за розрядженням настає стиснення, тиск на бульбашку з боку палива різко зростає, що призводить до "схлопування" бульбашок. При цьому виникають хвилі великої інтенсивності.

Для утворення в паливі акустичної порожнини, необхідно розсунути його сусідні молекули на відстань, не меншу за подвоєну довжину проміжку між ними. Паливо може витримувати максимальну розтягувальну напругу, що розраховується за формулою

$$P \approx \frac{2\sigma}{R}, \quad (3.1)$$

де  $\sigma$  – поверхневий натяг рідини, Н/м;

$R$  – радіус бульбашки кавітації, м.

Умова рівноваги парогазової бульбашки в рідині записується у вигляді

$$P_r = P_\infty + P_n + \frac{2\sigma}{R}, \quad (3.2)$$

де  $P_\infty$ ,  $P$ ,  $P_n$  – тиск у парогазовій бульбашці, статичний тиск у рідині, тиск насичених парів палива, відповідно, Па.

При нанесенні на паливо ультразвукових гармонійних коливань рівняння рівноваги записується як

$$P_0 - P_a = \left( P_\infty - P_n + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^3 - \frac{2\sigma}{R_0} + P_n, \quad (3.3)$$

де  $P_0$  - початковий тиск у бульбашці при накладенні ультразвукової кавітаційної хвилі, Па;

$P_a$  - акустичний тиск, створюваний під час ультразвукової кавітації, Па;

$R_0$  - початковий радіус бульбашки кавітації, м;

Бульбашка стійка, поки  $P_a$  не досягає критичного значення  $P_{кр}$ .

За  $P_a > P_{кр}$  бульбашка починає швидко зростати, що призводить до розриву суцільності палива.

Значення критичного радіуса визначається за формулою

$$R_{кр} = \sqrt{3} R_0 \sqrt{\frac{R_0}{2\sigma} \left( P_\infty - P_n + \frac{2\sigma}{R} \right)}. \quad (3.4)$$

З врахуванням того, що тиск насичених парів значно менший за гідростатичний тиск, рівняння для кавітаційної міцності рідини залежно від початкового радіуса бульбашки записується у вигляді

$$R_0^3 + R_0^2 \frac{2\sigma}{P_\infty} - \frac{32\sigma^3}{27P(P_\infty - P_{кр})^2} \cong 0. \quad (3.5)$$

Диференціальне рівняння нелінійного характеру, яке представляє базову модель сферично симетричного пульсування газової каверни з радіусом  $r=R(t)$  в області дії плоскої акустичної хвилі, формулюється наступним чином::

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} (P_\infty - P(R)) = 0, \quad (3.6)$$

де  $\rho$  - густина палива, кг/м<sup>3</sup>.

Аналітичний розв'язок цього рівняння, отриманий Релеєм за найпростіших умов найпростіших умов:  $P = P_a$ ;  $P(R) = 0$ . У цьому випадку рівняння (3.3) переходить у рівняння схлопування порожньої порожнини під дією гідростатичного тиску:

$$\left( \frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{2}{3} \frac{P_\infty}{\rho} \left( \frac{R_{\max}^3}{R^3} - 1 \right). \quad (3.7)$$

де  $R_{\max}$  - максимальний радіус парогазової бульбашки, м.

Час захопування порожньої порожнини визначається з формули Релея (3.7)

$$t_c = 0,915 R_{\max} \sqrt{\frac{\rho}{P_\infty}}.$$

Рівняння, яке використовується для опису змін радіусу кавітаційної бульбашки під впливом ультразвукової хвилі, відоме як рівняння Нолтінга-Неппайреса:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \left[ P_\infty - P_n - P_a \sin \omega t + \frac{2\sigma}{R} - \left( P_\infty + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] = 0. \quad (3.8)$$

Рівняння (3.5) досить добре описує поведінку кавітаційної бульбашки в полі ультразвукової хвилі, але припущення про нестисливість рідини не дають змоги правильно оцінити кінцеву стадію захопування кавітаційної бульбашки.

Динаміку кавітаційної бульбашки з урахуванням стисливості описує рівняння Херрінга-Флінна

$$\begin{aligned} & R \left( 1 - \frac{2}{c_0} \cdot \frac{dR}{dt} \right) \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( 1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{c_0} \cdot \frac{dR}{dt} \right) \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \\ & + \frac{1}{\rho} \left[ P_\infty - P_n - P_a \sin \omega t + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu}{R} \cdot \frac{dR}{dt} - \left( P_\infty + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] + \\ & + \frac{R}{\rho} \cdot \frac{1}{c_0} \cdot \frac{dR}{dt} \left( 1 - \frac{1}{c_0} \cdot \frac{dR}{dt} \right) \frac{dP(R)}{dR} = 0. \end{aligned} \quad (3.9)$$

де  $c_0$  - швидкість поширення ультразвукової хвилі в паливі, м/с;

$\mu$  - динамічна в'язкість палива, Па с;

$\gamma = c_p / c_v$  – співвідношення питомих теплоємностей для газу.

Рівняння (3.7) і (3.8) не розв'язуються в загальному вигляді. Їхні чисельні розв'язки отримують для конкретних приватних випадків із певними значеннями частоти й амплітуди звукового поля та величиною початкового розміру бульбашки. Дослідження цих рівнянь зроблено докладно в і показує, що за амплітуд звукового тиску  $P_a < P_{кр}$  газові бульбашки не захоплюються і пульсують лінійно. Бульбашки з  $R < R_{кр}$  пульсують із частотою акустичної хвилі, а за розміру бульбашки  $R > R_{кр}$  період пульсації близький до періоду власних коливань. За  $P_a > P_{кр}$  рух порожнини стає нестійким і вона захоплюється в першому позитивному напівперіоді. При подальшому збільшенні  $P_a$  інерційні сили перешкоджають захопленню бульбашки, і вона здійснює одне або кілька коливань, а потім потім схлопується.

Таким чином, одним із завдань ультразвукової кавітаційної обробки ультразвуком палива є знаходження і підтримання оптимальної частоти акустичного сигналу, що сприяє утворенню і збільшенню кількості кавітаційних бульбашок.

За малих відстаней між бульбашками в щільному кавітаційному кластері кавітаційні бульбашки взаємодіють одна з одною в процесі пульсацій. У цьому разі в рівняння (3.5) необхідно ввести доданок, що виражає тиск, який генерують сусідні бульбашки.

Запишемо рівняння (3.7), враховуючи тиск, що генерується всіма кавітаційними бульбашками  $P_{кав}$ :

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \left[ P_\infty - P_n - P_a + P_{кав} + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu}{R} \cdot \frac{dR}{dt} - \left( P_\infty + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] = 0. \quad (3.10)$$

Як величина, що характеризує ступінь розвиненості кавітації, Л. Д. Розенберг запропонував використовувати індекс кавітації

$$K = \Delta v / v, \quad (3.11)$$

де  $v$  – виділений об'єм, м<sup>3</sup>;

$\Delta v$  – об'єм усіх кавітаційних бульбашок, м<sup>3</sup>.

Виділений об'єм  $v$  повинен задовольняти таким двом вимогам:

1) лінійні розміри цього об'єму мають бути малі порівняно з довжиною хвилі, щоб первинний звуковий тиск, який збуджує кавітацію, можна було вважати всередині цього об'єму постійним за величиною і синфазним;

2) лінійні розміри цього об'єму мають бути набагато більшими за розмірів кавітаційної бульбашки.

Індекс кавітації є мірою просторової густини енергії, а величина  $\Delta v$  пропорційна потенційній енергії, запасеної всіма бульбашками, що містяться в об'ємі  $v$ . Робота, здійснювана  $n$  бульбашками з однаковими максимальними розмірами, записується у вигляді

$$A_k \approx \frac{4}{3} \pi R_{\text{max}}^3 P_{\infty} n = P_{\infty} \Delta v. \quad (3.12)$$

У сталому режимі, за незмінних зовнішніх умов (статичний тиск, температура, газовміст тощо) індекс кавітації є функцією координат поля. Величина  $K$  лежить у межах  $0 < K < 1$ . Нижня межа відповідає відсутності кавітації, верхня межа досяжна тільки в локальному обсязі. Усереднювати індекс кавітації можна не тільки за областю, а й за будь-яким перетином.

Для формування кавітаційної зони використовується частина енергії із первісного акустичного поля. Співвідношення між використаною енергією та загальною енергією первинного поля визначається коефіцієнтом кавітаційної ефективності у використанні акустичної енергії:

$$\eta_{\text{ав}} = \frac{E_k}{E}. \quad (3.13)$$

Цей час дещо менший за період первинного звуку  $T_0$ . Приймаючи цей час рівним  $T_0$ , середня за період, потужність, яка витрачається на утворення всієї кавітаційної області, дорівнює:

$$N_k = \frac{E_k}{T_0} = \eta_{ав} \frac{E}{T_0} = N\eta_{ав}, \quad (3.14)$$

де  $N$  – потужність первинного звуку, Вт.

Методи дослідження кавітації необхідно поділити на прямі та непрямі. До прямих методів можна віднести:

- 1) візуальні - фото-, кіно- і відеозйомка кавітаційних утворень;
- 2) акустичні – вимірювання тиску в ударній хвилі, що випромінюється однією або сукупністю кавітаційних бульбашок під час пульсацій і схлопування.

Непрямі методи включають у себе такі методи як:

- 1) фотоелектричний – реєстрація сонолюмінесценції під час кавітації;
- 2) хімічні – дослідження зміни маси, концентрації або об'єму хімічних реагентів за рахунок звуку. об'єму хімічних реагентів за рахунок звукохімічних реакцій у кавітаційному полі;
- 3) гідродинамічні – зміна гідродинамічних параметрів потоку рідини, пов'язаних з інтенсивністю кавітації;
- 4) механічні – вимірювання величини кавітаційної ерозії, яку зазвичай виражають через зменшення ваги зразків у вигляді алюмінієвих циліндриків або через площу виривів в алюмінієвій фользі;
- 5) технологічні – зміни якісних показників оброблюваного середовища, пов'язаних з інтенсивністю кавітації (як оброблюваного середовища використовують емульсії, суспензії тощо, в яких протікають гідромеханічні та тепломасообмінні процеси).

Розглядаючи більш детально вплив ультразвуку на рідкі середовища, можна виокремити чотири головні напрями застосування ультразвукової кавітаційної обробки, спрямовані на підвищення ефективності використання палива:

- 1) інтенсифікація процесу згоряння важкого палива;



- 2) зниження втрат горючої маси палива під час його підготовки;
- 3) приготування високостабільних паливних сумішей;
- 4) видалення з палива сірки із застосуванням продування повітря в зоні кавітації.

Перший напрямок досить широко висвітлений у літературі і свідчить про значну інтенсифікацію процесу згоряння шляхом кавітаційної обробки палива безпосередньо перед уприскуванням у циліндри.

За другим напрямом основний ефект досягається за рахунок виключення з процесу паливопідготовки сепарації, шляхом її заміни ультразвуковою кавітаційною гомогенізацією. Для гомогенізації важких палив і мазутів, як правило, використовують роторні та плунжерні гомогенізатори, а також гомогенізатори, що працюють на принципі сопла Лавалю. Останній вид ультразвукового гомогенізатора простий за конструкцією, дешевший у виробництві та в експлуатації. Крім того, ультразвукова кавітація, що виникає під час виходу палива з сопла, диспергує смолисто-асфальтенові речовини і практично не впливає на дисперсний склад механічних домішок, які видаляються фільтрами.

Головною вимогою третього напрямку ультразвукової обробки високов'язких палив є створення стійкої емульсії типу "вода в паливі" з розмірами глобул води меншими, ніж зазори в плунжерних парах паливної апаратури дизеля. Причому емульсія має бути не тільки стійкою протягом кількох діб, а й однорідною. Л. Бергман, розглядаючи диспергуючу дію ультразвуку, вказує, що емульгування найефективніше протікає на межі розділу між рідиною і джерелом коливань, а також між рідиною і твердими стінками. Крім цього, великий вплив на емульгування ультразвуковими хвилями мають розчинені в рідині гази і газові бульбашки. Виконані в дисертаційній роботі дослідження добре узгоджуються з концепцією Л. Бергмана і результатами подібних робіт щодо посилення емульгування в разі подачі в зону кавітації невеликої кількості повітря.

Четвертий напрям являє собою сукупність двох технологічних процесів, головним з яких є використання ультразвукової обробки палива з одночасним продуванням повітрям для видалення з нього сірки. Як супутній технологічний процесу в даному випадку виступає операція з підготовки високостабільних і високоякісних паливних сумішей (особливо за умови великому вмісті в паливі води).

Таким чином, усі чотири розглянуті методи поряд із видаленням сірки з палива забезпечують підготовку палива для впорскування в циліндр дизеля.

Для видалення сірки з пального найоптимальнішим є фізико-хімічний метод, який являє собою ультразвукову обробку пального з метою розриву зв'язку C-S у гетероциклічних сполуках з подальшим проведенням хімічної реакції для виведення сірки з пального у складі газової фази.

Виникнення хімічних реакцій у полі ультразвукових хвиль тісно пов'язане з явищем кавітації. Утворення кавітації залежить від в'язкості, тому що при її збільшенні зростає міцність рідини. Що більша в'язкість рідини, то більша інтенсивність ультразвукових хвиль, яка зумовлює появу кавітаційних бульбашок. Величина змінного акустичного тиску, необхідного для збудження кавітацій на одній і тій самій частоті, залежатиме від в'язкості палива. Хімічні процеси в паливі виникають за такої інтенсивності ультразвукових хвиль, за якої неминучим стає утворення кавітаційних порожнин. Має певний поріг інтенсивності ультразвукових хвиль, нижче якого хімічні процеси не настають. Хімічні процеси, що протікають у полі ультразвукових хвиль, дуже різноманітні. У тому числі до них належить процес розпаду органічних речовин, які необхідні для подальшого вилучення сірки з палива.

Для моторного палива, що характеризується підвищеною в'язкістю, підбір оптимальних умов ультразвукової обробки має першорядне значення. Як критерій вибору оптимальної частоти ультразвукової кавітаційної обробки палива може бути прийнята умова зниження вмісту сірки в паливі, а також вміст сірковмісних компонентів у газах, що виділяються паливом після його обробки.

Під час проведення досліджень як постулати приймалися такі твердження:

1) ультразвукова кавітаційна обробка палива сприяє зниженню вмісту сірчистих домішок у паливі;

2) під час ультразвукової кавітаційної обробки палива у зв'язку з термічним розкладанням сірковмісних сполук відбувається виділення сульфїду водню  $H_2S$  з відкритої поверхні палива.

Підтвердження цих висловлювань було виконано експериментально і полягало в такому. Досліджувану порцію палива поміщали в скляну ємність і піддавали ультразвуковій обробці за різної частоти генерованого звукового випромінювання. У ємності з паливом був температурний датчик, що давав змогу контролювати рівень температури, що, згодом, давало змогу визначати енергію, поглинуту паливом під час ультразвукової обробки, а також уникати перегріву палива до температур, близьких до температури самозаймання його парів. Безпосередньо над ємністю з паливом розміщувався портативний газоаналізатор Dräger X-am 2000 (виробництва Німеччини), за допомогою якого визначали концентрацію сульфїду водню  $H_2S$  і оксидів сірки  $SO_x$  у газах, що виділяються з палива.

Експериментальна установка (рис. 3.7) розташовувалася в автономній хімічній шафі.

Як ультразвуковий генератор використовували модульний генератор багатофазного ультразвукового поля УЗГ-5-М із фазовою корекцією і магнітострикційним випромінювачем. Генератор складається з декількох силових осередків УЗГ-5 і загальної системи управління.

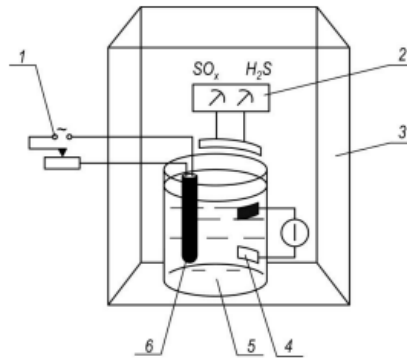


Рис. 3.7. Схема дослідної установки для встановлення структурної зміни палива при виконанні ультразвукової обробки: 1 –генератор; 2 –Dräger X-am 2000 3 – а хімічна шафа; 4 – датчик (температурний); 5 – ємність скляна із дизельним паливом; 6 – магнітострикційний випромінювач ультразвукової установки

При синфазної роботи генератор дає змогу набрати модульно будь-яку потужність у діапазоні 20...5000 Вт, а також забезпечити вихідну частоту ультразвукового сигналу в діапазоні 7...30 кГц з точністю завдання частоти до 1 Гц.

Потужність ультразвукового генератора  $N_{\text{вуз}}$  дає змогу оцінити величину амплітуди ультразвукової звукової хвилі  $a$ . Згідно з виразом для вектора Умова-Пойтінга.

$$N_{\text{уз}} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 v a^2, \quad (3.15)$$

де  $\rho$  – густина палива,  $\text{кг/м}^3$  ;

$\omega = 2\pi\nu_{\text{вуз}}$  – частота ультразвукового сигналу;  $\nu$

$\nu$  – швидкість поширення ультразвукової хвилі, м/с (у разі поширення ультразвукової хвилі в паливі  $\nu = 1000$  м/с);

$a$  – амплітуда ультразвукової хвилі, м.

Із рівняння (3.7) амплітуда ультразвукової хвилі визначається як

$$a = \frac{1}{2\pi\nu_{\text{уз}}} \sqrt{\frac{2N_{\text{уз}}}{\rho\nu}}. \quad (3.16)$$

Діапазон значень амплітуди ультразвукової хвилі  $a$  залежно від потужності ультразвукового генератора  $N_{вуз}$  і частоти ультразвукового сигналу  $\nu_{вуз}$  для високов'язкого палива НФО380 з густиною  $\rho = 920 \text{ кг/м}^3$  наведено в табл. 3.3.

Результати, наведені в табл. 3.1, підтверджують, що потужність ультразвукового генератора, а також ультразвукові хвилі обраної частоти впливають на частинки мікронних розмірів, до яких належить молекулярна структура палива.

За наведеною методикою виконувалося визначення вмісту сірчистих домішок у паливах, що пройшли ультразвукову кавітаційну обробку, різним початковим вмістом сірки S: 2,7 %, 3,0 % і 3,2 %.

Зміна вмісту сірчистих домішок у різних паливах S залежно від частоти ультразвукового сигналу залежності від частоти ультразвукового сигналу  $\nu_{вуз}$  представлена масивом кривих на рис. 3.8, а. Залежність вмісту сульфіду водню  $\text{H}_2\text{S}$  у парах різних палив над його поверхнею у функції від частоти звуку, що генерується, показано на генерованого звуку показано на рис. 3.8,б.

Таблиця 3.1 – Діапазон значень амплітуди ультразвукової хвилі  $a$ , мкм, залежно від потужності ультразвукового генератора  $N_{вуз}$  і частоти ультразвукового сигналу  $\nu_{вуз}$  для палива НФО380

		Частота ультразвукового сигналу, $\nu_{вуз}$ , кГц					
		20	22	24	26	28	30
Потужність генератора ультразвуку, $N_{вуз}$ , Вт	1000	0,384	0,358	0,339	0,303	0,282	0,273
	2000	0,557	0,517	0,464	0,439	0,398	0,372
	3000	0,682	0,618	0,569	0,525	0,497	0,455
	4000	0,797	0,716	0,656	0,626	0,563	0,525
	5000	0,888	0,798	0,734	0,687	0,629	0,597

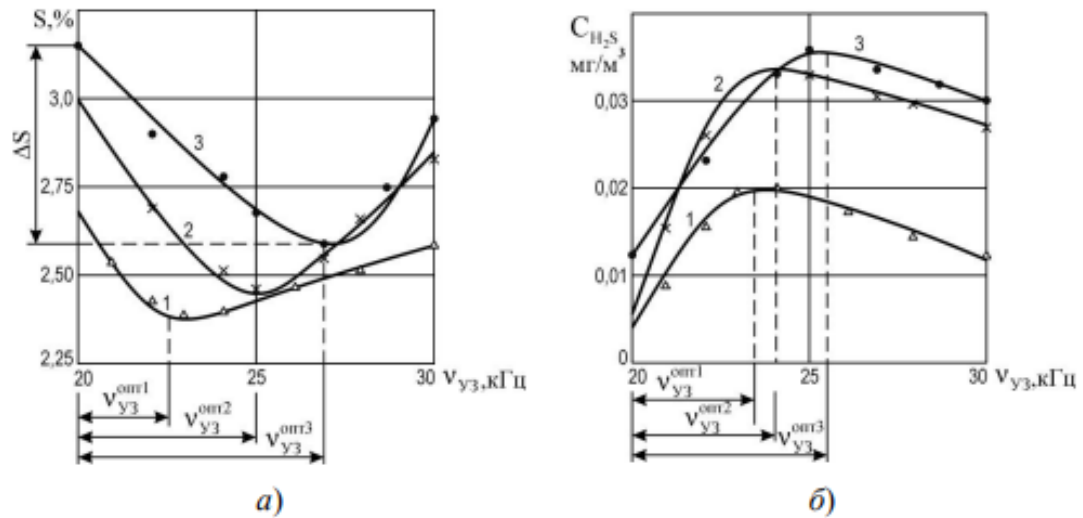


Рис. 3.8. Зміна вмісту сірчистих домішок у паливі  $S$  (а) і концентрації сульфїду водню  $C_{H_2S}$  у парах палива (б) для палив із різним вмістом сірки (1 –  $S=2,8$  %, 2 –  $S=3,1$  %, 3 –  $S=3,3$  %) залежно від частоти ультразвукового сигналу  $\nu_{уз}$

Використання цих залежностей на спільній координатній сітці уможливорює встановлення оптимального діапазону частот, які забезпечують найбільше зниження вмісту сірчистих домішок у паливі та сприяють максимальному викиду сірководню у парах палива., рис. 3.9.

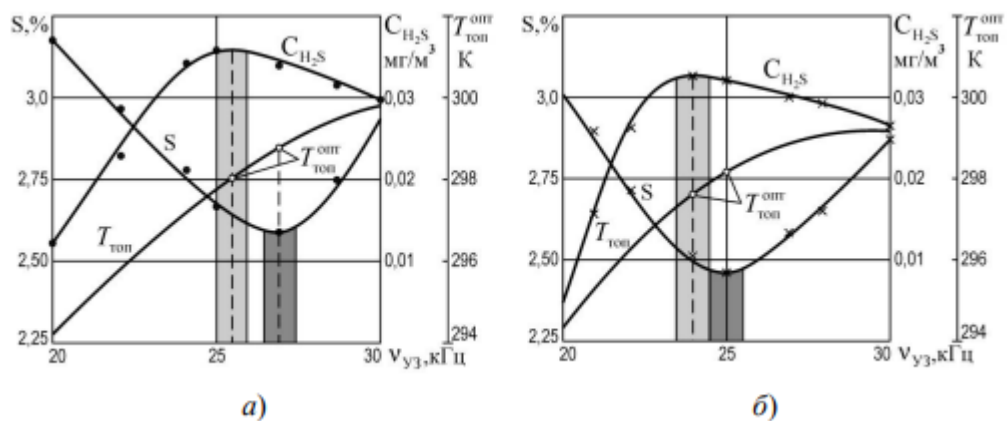


Рис. 3.9. Зміна вмісту сірчистих домішок у паливі  $S$ , концентрації сульфїду водню  $C_{H_2S}$  у парах палива і температури палива  $T_{топ}$  залежно від частоти ультразвукового сигналу  $\nu_{уз}$ : а) паливо НFO380 ( $S=3,2$  %); б) паливо НFO180 ( $S=3,0$  %)

Важливим критерієм підбору оптимальної частоти ультразвукового сигналу є температура дизельного палива, що піддається опроміненню.

Залежність  $T_{\text{топ}} = f(v_{\text{вуз}})$  має слабо виражений експоненціальний характер (рис. 3.9). Для мінімізації енергетичних витрат вибір частоти частоти ультразвукового сигналу повинен забезпечувати температуру палива  $T_{\text{топ}}^{\text{опт}}$  максимально наближену до найближчого оптимуму кривих  $S = f(v_{\text{вуз}})$  і  $C_{\text{H}_2\text{S}} = f(v_{\text{вуз}})$ .

На рис. 3.10 представлено залежності  $S = f(v_{\text{вуз}})$  і  $C_{\text{H}_2\text{S}} = f(v_{\text{вуз}})$  для різного часу ультразвукової обробки палива. Обидві залежності мають експоненціальний вигляд і дають змогу визначити оптимальний час ультразвукової обробки, який, з одного боку, забезпечує максимальне видалення сірчистих домішок із палива, а з іншого - сприяє мінімізації енерговитрат на проведення такої обробки.

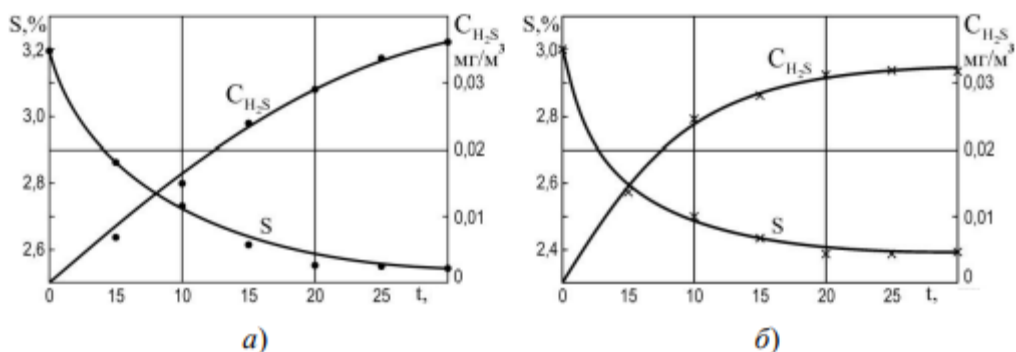


Рис. 3.10. Визначення оптимального часу ультразвукової обробки різних палив: а) паливо НFO380 ( $S=3,2\%$ ); б) паливо НFO180 ( $S=3,0\%$ )

Видалення сірчистих домішок у складі газової фази призводить до зміни структурного складу палива, що впливає на нижчу теплотворну здатність палива -  $Q_{\text{H}}^{\text{p}}$ . Для оцінки цієї зміни калориметричним методом проводилося визначення величини  $Q_{\text{H}}^{\text{p}}$  для палива, що пройшло ультразвукову кавітаційну обробку. При цьому, незважаючи на видалення з палива горючих складових (водню Н і сірки S у складі сульфїду водню  $\text{H}_2\text{S}$ ) максимальна зміна  $Q_{\text{H}}^{\text{p}}$  не перевищувала  $1,2\%$  (з урахуванням похибки експерименту). Це підтверджує висловлювання про те, що під час ультразвукової обробки відбувається дисоціація і розрив не тільки C-S, а

й С-Н і С-С зв'язків у паливі. У результаті протікання цих процесів у паливі збільшується кількість активованих частинок: радикалів, іонів, іонно-радикальних утворень, які інтенсифікують процес згоряння палива і сприяють підвищенню його теплотворної здатності.

### Висновки з розділу

Як основні висновки за розділом зазначимо таке:

Ключовим індикатором, який всебічно відображає робочі властивості палива та впливає на енергетичні показники та технічні характеристики дизельних двигунів, є рівень сірчаних домішок у паливі.

Оптимальним способом десульфуризації палива в умовах сільського господарства його ультразвукова обробка, проведення якої необхідно виконувати в малорухомому об'ємі палива, для чого найбільше підходить видаткова паливна цистерна.

Для мінімізації енергетичних витрат на ультразвукову обробку палива частота ультразвукового сигналу повинна забезпечувати температуру палива опт  $T_{mon}$  максимально наближеному до найближчого оптимум кривих  $S = f(v_{вуз})$  і  $C_{H_2S} = f(v_{вуз})$ .

Удосконалений метод ультразвукової обробки палива дає змогу визначити оптимальний час цього процесу як синергетичний розв'язок залежностей  $S = f(t) \wedge C_{H_2S} = f(t)$ .



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дослідження спрямоване на розв'язання науковоприкладної задачі – підвищення екологічної ефективності та збереження працездатності середньооборотних дизелів шляхом удосконалення їхніх систем паливопідготовки.

Встановлено, що оптимальним способом видалення сірки дизельного палива є його ультразвукова обробка, проведення якої необхідно виконувати в малорухомих умовах, для чого найбільш підходить видаткова паливна цистерна.

За результатами експериментів з'ясовано, що ультразвукова обробка палива для його десульфуризації супроводжується викидом сірководню  $H_2S$  в газову фазу над поверхнею палива. Рівень  $H_2S$  у газовій фазі палива з початковим вмістом сірчаних домішок до 3,5% не перевищує  $0,04 \text{ мг/м}^3$ , що дозволяє використовувати ультразвуковий блок у системах підготовки палива. Додавання до системи підготовки палива блоку для ультразвукової обробки, застосування додаткової системи ультразвукової підготовки у паливних системах низького тиску, введення системи ультразвукової обробки та гідродинамічної активації для важкого палива, а також використання двоступеневого модуля ультразвукової підготовки сприяють зменшенню зносу поршневих кілець та циліндрових втулок дизеля в 2,4...3,8 рази, зниженню вмісту оксидів сірки у вихлопних газах дизеля в 2,2...2,7 раза, та покращенню економічних показників на 3,6...4,9 % і енергетичних показників на 7,4...9,8 %.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Осетров О.О. Поліпшення техніко-економічних показників дизеля ЧН 12/14, що працює на біопаливах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки». Харків, 2015. 20 с.
2. Грабар І. Г., **Нахаєв М. П.** Ультразвукова обробка важкого палива. Збірник тез доповідей XXIV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2023 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ.. 2023.С. 285-287.
3. **Нахаєв М.П.** Аналіз зміни експлуатаційних властивостей палив під час їх підготовки. Студентські читання–2023: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 25 жовтня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 80-82.
4. Грабар І., **Нахаєв М.** Загальна характеристика способів захисту деталей дизеля під час роботи на сірчистих паливах. Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки». Кропивницький: ЦНТУ. 2023. С. 419-420.
5. Шльончак А.І. Покращення економічних та екологічних показників транспортних засобів з дизелем шляхом використання сумішевих палив: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.22.20 / І. А. Шльончак: Нац. трансп. ун-т. Київ. 2013. 20 с.
6. Поляков А. П. Покращення показників дизеля зміною пропорцій дизельного та біодизельного палив в паливній суміші. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил.* 2013. Вип. 3. С. 167-169.

7. Петренко В. Г. Підвищення ефективності та екологічних показників автомобільних ДВЗ шляхом застосування трипаливної бензогазової технології : Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: Спеціальність 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки». Київ. 2012. 189 с.
8. ДСТУ 6081:2009 Паливо моторне. Ефіри метилові жирних кислот олій і жирів для дизельних двигунів. Технічні вимоги. 2009.
9. Smailys V. Assessment of chemmological properties and problems of practical implementation of vegetable oils derived fuels. *Jura Ir Aplinka*. -2004. – № 2(11). S. 65 – 75.
10. Demirbas, Ayhan. Biodiesel A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines. s.l. : Springer-Verlag London Limited, 2008.
11. Поляков А. П. Вплив керування подачею повітря та сумішевого палива на робочі процеси двигуна. *Сборник научных трудов*. Выпуск 1. Том 1. Одесса, 2013. С. 120–123.
12. Поляков А.П. Спосіб забезпечення необхідних техніко-економічних та експлуатаційних характеристик дизельного двигуна при переводі його на роботу на біодизельному паливі. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2012. №3. Режим доступу: [praci.vntu.edu.ua/article/download/2330/2588](http://praci.vntu.edu.ua/article/download/2330/2588)
13. Поляков А.П. Математична оцінка дрібності розпилювання біодизельного палива при його використанні як палива для дизеля. *Наукові нотатки*. 2012. Вип. 37. С. 272-274.
14. Семенов В. Біодизельне паливо для України. *Вісник Національної Академії Наук України*. 2007. № 4. С. 18-22.
15. Галушак О.О. Особливості акумуляторної системи живлення Common Rail при динамічному регулюванні відсоткового складу суміші дизельного та біодизельного палив. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. Сер.: Технічні науки. 2014. № 2. С. 74-77

16. Поляков А.П. Дослідження впливу підігріву палива на його характеристики в'язкості і густини. *Вісник СевНТУ: зб. наук. пр.* Вип. 142/2013. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. Севастополь, 2013. С 116 – 119.
17. Моделювання та оптимізація систем: підручник / В.М. Дубовой, Р.Н. Кветний, О.І. Міхальов, А.В. Усов. Вінниця: ПП «ТД» Едельвейс, 2017. 804 с.
18. ДСТУ 4276:2004 Норми і методи вимірювання димності відпрацьованих газів автомобілів з дизелями або газодизелями. [Чинний з 2004-01-04] . Київ: Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2004. 13 с.
19. ДСТУ 4840:2007 Паливо дизельне підвищеної якості. Технічні умови. [Чинний від 2008-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. – 12 с.
20. Устименко В.С. Поліпшення екологічних показників автомобілів та розширення паливної бази автомобільного транспорту шляхом застосування біоеталону [Текст] : Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.22.20 / В.С. Устименко; Національний транспортний ун-т. Київ. 2006. 20 с.
21. Дунь С.В. Зменшення димності відпрацьованих газів великовантажних дизельних автомобілів застосуванням у випускній системі каталітичних нейтралізаторів: автореф. дис... канд. техн. наук: спец. 05.22.02 / С.В. Дунь: Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2002. 19 с.