

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно–технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
“ ” 2025 р.
Зав. кафедри професор
(науковий ступінь, вчене звання)
В.В.Дідур
(підпис) (ініціали, прізвище)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до дипломної роботи
магістр
(освітній рівень)

**тема роботи: «Дослідження технології діагностування технічного стану
автотракторних двигунів за теплофізичними параметрами»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 21м–ім
освітньої програми магістр
спеціальності Н7
«Агроінженерія»
Головченко Костянтин Олегович
(прізвище та ініціали)

Керівник: доцент, Петриченко Є.А.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

м. Умань – 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно–технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Освітня програма _____ магістр _____
Спеціальність _____ 208 «Агроінженерія» _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

В.В. Дідур
“ ” _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

студенту _____ **Головченку Костянтину Олеговичу** _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження технології діагностування технічного стану автотракторних двигунів за теплофізичними параметрами»

керівник роботи _____ доцент Петриченко Є.А. _____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від
“14” листопада 2025 р. № 01–06/261 _____

2. Строк подання студентом роботи _____ 25.11.2025 р. _____

3. Вихідні дані до роботи: способи зниження коливань машинно–тракторних агрегатів; літературні джерела; шляхи підвищення тягово–зчіпних показників колісних тракторів.

4. Перелік питань, які потрібно розробити:

- теоретично обґрунтувати спосіб діагностування ЦПГ за температурним полем у камері згоряння ДВЗ;
- спроектувати пристрій для контролю ЦПГ за температурою у камері згоряння;
- виконати експериментальні дослідження запропонованого діагностичного пристрою та визначити доцільну періодичність його застосування;
- оцінити економічний ефект від упровадження розробок.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 20 слайдів) як
додаток до доповіді за темою дипломної роботи: мета і завдання дослідження;
конструктивне рішення встановлення здвосісних коліс на тракторі ХТЗ–242К;
показники економічної ефективності;

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		
Техніко–економічне обґрунтування	Петриченко Є.А., доцент		

7. Дата видачі завдання 23 квітня 2025 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При– мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	30.04.2025 р.	
2.	Розділ 1.	14.05.2025 р.	
3.	Розділ 2.	28.05.2025 р.	
4.	Розділ 3.	11.06.2025 р.	
5.	Розділ 4.	25.06.2025 р.	
6.	Розділ 5.	24.09.2025 р.	
7.	Виконання ілюстративної частини роботи	23.10.2025 р.	
8.	Представлення роботи керівнику на перевірку	25.11.2025 р.	

Студент _____
(підпис)Головченко К.О.
(прізвище та ініціали)Керівник роботи _____
(підпис)Петриченко Є.А.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

У магістерській роботі обґрунтовано підхід до вдосконалення діагностики технічного стану циліндро-поршневої групи (ЦПГ) на основі інформативності температурного параметра. Показано, що традиційні методики контролю ЦПГ не забезпечують оперативного й достовірного визначення її стану, оскільки температурні умови в циліндрі істотно змінюються залежно від режимів роботи двигуна, параметрів довкілля та фактичного зносу вузлів.

Для розв'язання цієї проблеми запропоновано метод температурної діагностики за даними вимірювання поля температур усередині циліндра. Просторовий розподіл температур дає змогу точніше ідентифікувати характерні ознаки відмов і дефектів елементів ЦПГ.

Розроблено апаратно-програмний комплекс реалізації методу, що включає реєстратор, температурний датчик, спеціалізоване програмне забезпечення та механічний модуль інтеграції з об'єктом контролю. Проведені стендові випробування підтвердили високу точність визначення температур у вибраних зонах циліндра та відтворюваність результатів.

Запропонований підхід забезпечує підвищення швидкості та точності діагностування, зменшення ймовірності помилкових висновків і скорочення витрат на ремонт і обслуговування двигунів.

Ключові слова: циліндро-поршнева група, діагностування, температурний параметр, термічне зображення, апаратно-програмний комплекс, стендові випробування.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	8
1.1. Аналіз параметрів діагностування циліндро-поршневої групи.....	8
1.2. Аналіз засобів та методів діагностування	14
1.3. Висновки та завдання дослідження	24
2. ТЕОРИТИЧНА ЧАСТИНА.....	25
2.1. Аналітичне дослідження залежності температури камери згоряння від зношування сполучень циліндро-поршневої групи.....	25
3. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	30
3.1. Схема загальної методики дослідження.....	30
3.2. Оцінка впливу герметичності камери згоряння на температурний режим ДВЗ	33
3.3. Розроблення пристрою діагностики циліндропоршневої групи ДВЗ	40
3.4. Обґрунтування залежності діагностичного параметра температури в камері згоряння від структурного зносу гільзи циліндрів у поясі зупинки верхнього компресійного кільця.....	44
3.5. Удосконалення алгоритму і технологічного процесу діагностування ДВЗ ЯМЗ-238.11-240.....	45
4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	50
4.1. Аналіз керування системою охорони праці у АТП -11263.....	50
4.2. Аналіз травматизму на виробничому об'єкті	51
4.3. Захист у надзвичайних та аварійних ситуаціях	54
5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	57
5.1. Розрахунок періодичності діагностування автотракторних ДВЗ та її вплив на ресурс.....	57
5.2. Розрахунок економічних показників	59
ВИСНОВОК	63
СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	64

ВСТУП

В аграрному секторі спостерігається виразне «старіння» парку автотранспортних засобів і сільськогосподарської техніки, що безпосередньо пов'язано із загальним економічним станом країни. Витрати фермерських господарств і виробників на підтримання працездатності машин та встановлених на них двигунів у ряді випадків перевищують ціну придбання нових агрегатів і сягають 12...15 % собівартості продукції. Із цієї суми до 23 % припадає на технічне обслуговування (ТО) та ремонти. Водночас ремонтні підприємства фіксують надходження агрегатів і двигунів на капітальний ремонт (КР) з невикористаним ресурсом на 28...35 %, що зумовлено несвоєчасним виявленням несправностей унаслідок недостатньо розвиненої діагностики технічного стану та недоліків планово-попереджувальної системи ТО і ремонту [1, 2].

Проблематика забезпечення працездатності сільськогосподарських машин і їх агрегатів, а також автотракторної техніки на основі методів діагностування висвітлена в низці публікацій [3, 4, 5, 6]. Тягово-економічні показники двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) визначаються узгодженою роботою ключових механізмів і систем: кривошипно-шатунного механізму (КШМ), циліндро-поршневої групи (ЦПГ), систем змащення, живлення та газорозподілу. Високий коефіцієнт варіації відмов і розбіжність фактичних діагностичних параметрів цих вузлів із нормативними значеннями [7] потребують індивідуалізованого підходу до контролю технічного стану автотракторних ДВЗ з науково обґрунтованою періодичністю.

Чинна методологія профілактичних, контрольних, регулювальних, ремонтних і відновлювальних робіт у межах планово-попереджуваної системи спирається на відповідність структурних та діагностичних параметрів ДВЗ фіксованим регламентам. Така «жорстка» прив'язка часто призводить до недоотримання потенційних вигод від індивідуального планування відновлення ресурсу агрегатів, зокрема двигунів сільськогосподарських машин і автотракторної техніки.

Статистично повторюваний характер відмов відкриває можливість

планувати технічні впливи та поточні ремонти (ТР) на основі результатів комплексної діагностичної оцінки ДВЗ з раціонально обраною періодичністю. Відтак підвищення ефективності технічної експлуатації ДВЗ через системне діагностування їх механізмів і систем у визначені інтервали дає змогу зменшити витрати на ТР і скоротити сумарні витрати протягом життєвого циклу двигуна.

Мета роботи — забезпечити працездатність дизельного двигуна за результатами діагностування.

Завдання дослідження:

1. теоретично обґрунтувати спосіб діагностування ЦПГ за температурним полем у камері згоряння ДВЗ;
2. спроектувати пристрій для контролю ЦПГ за температурою у камері згоряння;
3. виконати експериментальні дослідження запропонованого діагностичного пристрою та визначити доцільну періодичність його застосування;
4. оцінити економічний ефект від упровадження розробок.

Об'єкт дослідження — циліндро-поршнева група двигунів внутрішнього згоряння.

Предмет дослідження — еволюція температури в камері згоряння ДВЗ у процесі експлуатації.

1. ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Аналіз параметрів діагностування циліндро-поршневої групи

У ремонтних майстернях агропідприємств технічний стан двигуна та потребу в ремонті зазвичай визначають за діагностичними показниками витрати пального й моторної оливи, тиску в системі змащення та фактичної вихідної потужності. Проте точності цих індикаторів недостатньо, щоб коректно оцінити ступінь і характер зношування циліндро-поршневої групи (ЦПГ), спрогнозувати її залишковий ресурс і дати неупереджену оцінку обсягу ремонтних робіт [3, 5].

Вимір компресії — тобто оцінка пневмоцільності окремого циліндра за величиною максимального тиску наприкінці такту стиснення (див. рис. 1.1) — є одним із найпростіших і найуживаніших базових способів первинної діагностики стану ЦПГ.



Рисунок 1.1 – Процедура вимірювання компресії в двигуні

Компресійний метод вирізняється простотою, доступністю та універсальністю. Отримані з його допомогою дані є необхідними для первинної оцінки стану: покази компресометра дають змогу ідентифікувати характерні несправності ЦПГ і газорозподільного механізму (ГРМ) (див. табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Типові несправності циліндро-поршневої групи та їхні діагностичні ознаки [8, 9]

Несправність	Ознака несправності	Компресія МПа	
		Відкрита заслонка	Закрита заслонка
Повністю справний двигун	Відсутні	1,0 -1,2	0,6-0,8
 Тріщина в перемичці поршня	Синій дим вихлопу, підвищений тиск в картері	0,6-0,8	0,3-0,4
 Прогар поршня	Синій дим вихлопу, підвищений тиск в картері, циліндр не працює на малих обертах	0,4-0,5	0-0,1
 Залягання кілець	Синій дим вихлопу, підвищений тиск в картері, циліндр не працює на малих обертах	0,2-0,4	0-0,2

 Задир поршня і циліндра	Синій дим вихлопу, підвищений тиск в картері, циліндр не працює на малих обертах, можлива не стійка робота на холостому ходу	0,2-0,8	0,1-0,5
 Деформація клапана	Циліндр не працює на малих обертах	0,3-0,7	0-0,2
 Прогар клапана	Циліндр не працює на малих обертах	0,1-0,4	0
 Дефект профілю кулачка розподільчатого валу	Циліндр не працює на малих обертах	0,7-0,8	0,1-0,3

 Підвищення нагару в камері згорання та підвищений знос маслосемних ковпачків	Підвищена витрата масла + синій дим вихлопу	1,2-1,5	0,9-1,2
Підвищений знос ЦПГ	Підвищена витрата палива та масла на угар	0,2-0,4	0,6-0,8

Попри поширеність, інформативність компресійної перевірки недостатня для прогнозування залишкового ресурсу та формулювання остаточного висновку щодо стану циліндро-поршневої групи (ЦПГ) і газорозподільного механізму (ГРМ). Проблема полягає не лише в обмеженому обсязі даних, а й у методичних похибках застосування.

До ключових недоліків компресометрії належить висока похибка вимірювань (до 11%). Показники можуть бути штучно «підтягнуті», коли зношені маслоснімні кільця залишають на стінках циліндра плівку оливи: паливо розмиває оливний клин, що змінює фактичний ступінь стиснення та спотворює висновок. На величину компресії відчутно впливають початкова частота обертання колінчастого вала, термічний стан двигуна (зокрема температура камери згорання), ступінь розрядження акумулятора (різниця може сягати до 0,5 МПа), опір впускного тракту й температура моторної оливи. Неповнота діагностичної інформації спричиняє втрати часу та зниження рентабельності ремонту. Ослаблене прилягання кілець чи клапанів, а також поверхневі маніпуляції на кшталт короточасної «проливки» кілець присадками/парафіном нерідко завершуються зайвим розбиранням без встановлення кореневої причини відмови.

Отже, метод сам по собі малопоказовий, але придатний для виявлення «підозрілого» циліндра, після чого доцільно переходити до більш інформативних

засобів контролю. Компресія надзвичайно чутлива до витоків: навіть незначні нещільності зумовлюють істотне падіння тиску. Типові причини — неповне прилягання клапанів до сидла, знос профілю кулачка розподільного вала, пробій прокладки ГБЦ тощо. Під час проектування діагностичного обладнання ці витoki через елементи ЦПГ і ГРМ слід враховувати як системні фактори.

Вимірювання при відкритій дросельній заслінці має інший характер і результат: більший притік повітря підвищує тиск у камері згоряння, але одночасно збільшуються витoki через «кільце — гільза». Як наслідок, фіксована компресія може зменшуватися відносно «закритої дросельної» перевірки. Такий режим доцільний для діагностики дефектів, пов'язаних із руйнуванням/прогаром поршня, закоксовуванням або руйнуванням поршневих кілець у канавках, прогаром чи деформацією клапанів, подряпинами «дзеркала» циліндра тощо.

У всіх варіантах випробувань важливо відстежувати динаміку наростання тиску та температури в камері згоряння — це підвищує вірогідність коректної інтерпретації. Наприклад, якщо на початку прокручування тиск низький (близько 0,3...0,4 МПа), але швидко зростає з кожним тактом — типовою причиною є зношення поршневих кілець. Для верифікації діагнозу в циліндр додають невеликий об'єм оливи (до 5 см³): підвищення тиску підтвердить «кільцеву» природу витоків. Якщо ж стартове значення близько 0,9 МПа і не збільшується — імовірні нещільності в зоні клапанних сидел або прокладки ГБЦ; у такому випадку потрібні додаткові методи контролю.

Оцінювання за витратою картерних газів для наукових задач також має обмежену придатність через вплив побічних витоків через гумові ущільнення. Зменшити похибку можна, відводячи гази з картера та підтримуючи під час вимірювання атмосферний тиск у системі, але така процедура є тривалою та затратною; додатковий вплив мають і вібрації двигуна. Методика не дозволяє однозначно виділити «проблемний» циліндр і вказати причину падіння працездатності ЦПГ. Через значні коливання показника навіть для двигунів одного типу за подібного рівня зносу, такі прилади справедливо відносять радше до індикаторів, аніж до точних діагностичних засобів.

Наявні дослідження дали змогу ідентифікувати чинники, що впливають на прорив картерних газів як індикатор технічного стану ЦПГ. Зокрема, у міру прогрівання двигуна зростає і об'ємна витрата картерних газів. Експериментальні дані [10, 11, 12] щодо залежності витрати картерних газів від температури охолоджувальної рідини, отримані на двигунах ЯМЗ-238 за сталої частоти обертання колінчастого вала та без навантаження, наведено на рис. 1.2.

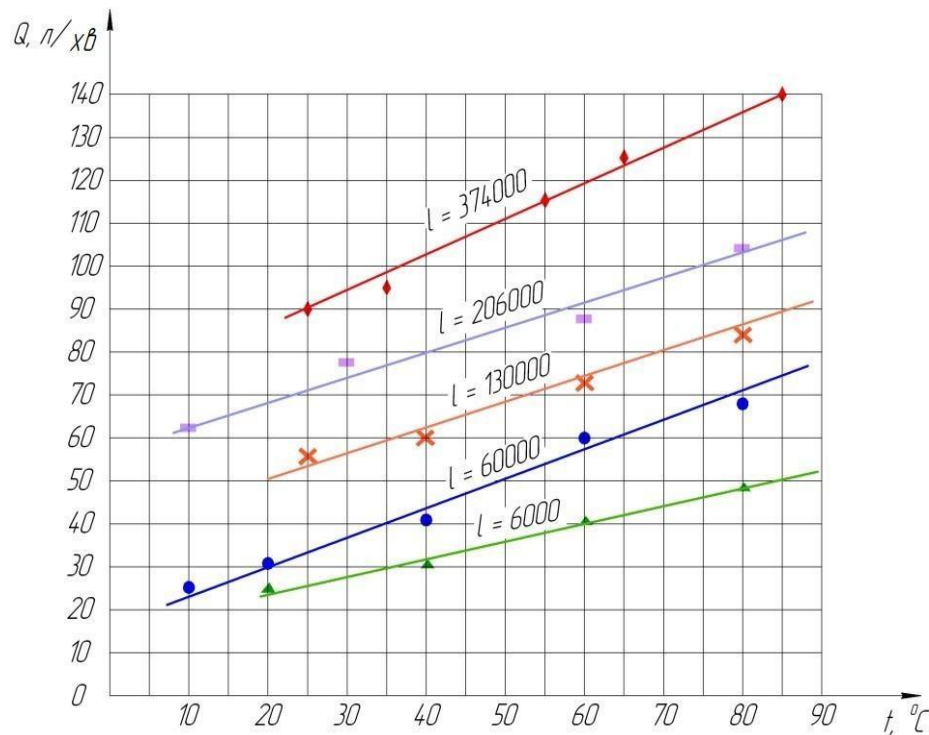


Рисунок 1.2 – Зміна витрати картерних газів із підвищенням ступеня прогрівання ДВЗ [12].

У межах цього дослідження проаналізовано, як окиснення (старіння) моторної оливи впливає на інтенсивність прориву картерних газів. Для цього виконано порівняльні вимірювання витрати картерних газів до та після планової заміни оливи під час ТО. Узагальнені результати випробувань на двигунах ЯМЗ-238 подано на рис. 1.3.

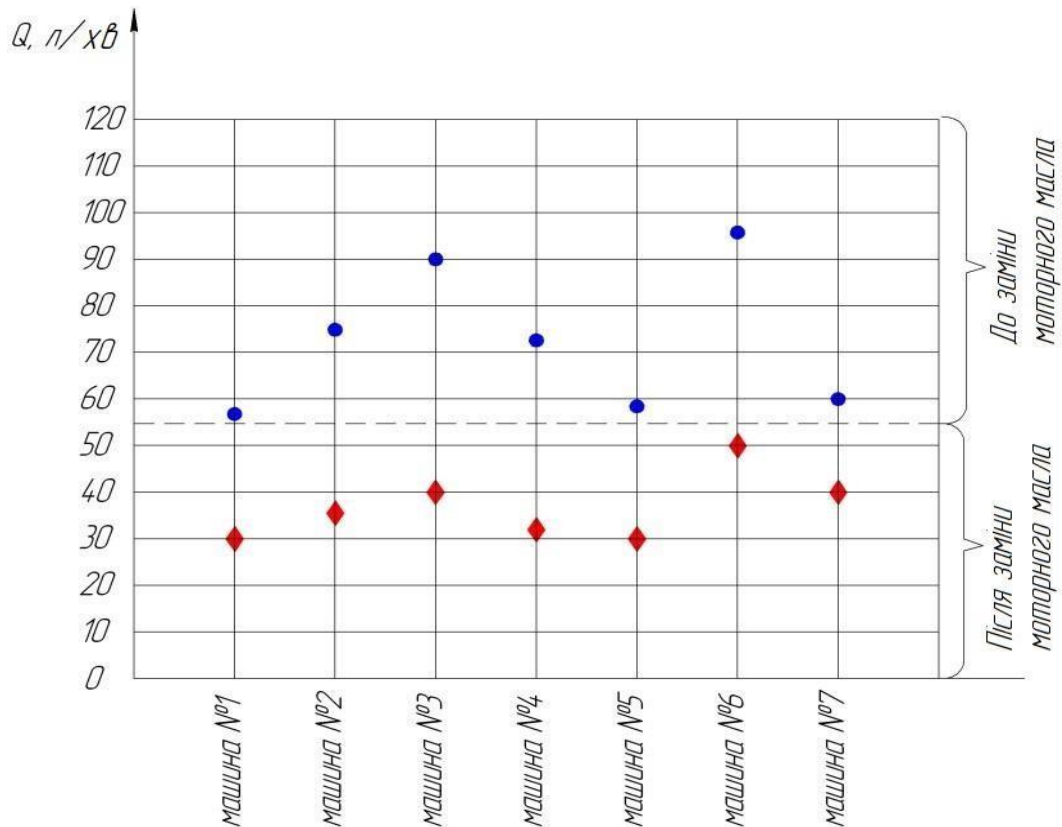


Рисунок 1.3 – Зміна витрати картерних газів у процесі старіння моторної оливи [12].

У численних дослідженнях зафіксовано зростання витоків через циліндро-поршневу групу після заміни моторної оливи; подекуди їх інтенсивність підвищується в рази, що вказує на неналежну якість мастильного матеріалу. Отже, під час діагностування стану ЦПГ за показником витрати картерних газів необхідно враховувати не лише властивості та якість оливи, а й тепловий режим камери згоряння ДВЗ, оскільки обидва чинники істотно впливають на ефективність і стабільність роботи двигуна в цілому.

1.2. Аналіз засобів та методів діагностування

Діагностика пневмотестером (рис. 1.4) дає змогу локалізувати витoki в камері згоряння, спричинені нещільністю вузла «поршень — кільця — гільза», та однозначно ідентифікувати несправний циліндр або його елемент.

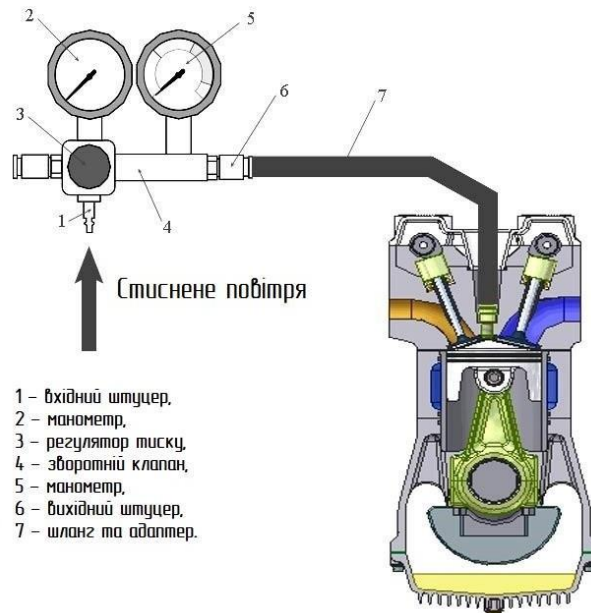


Рисунок 1.4 – Перевірка пневмотестером [12]

Поршень досліджуваного циліндра встановлюють у верхню мертву точку під час такту стиснення, коли впускний і випускний клапани перекриті. Далі в циліндр подають стислий повітряний потік від компресора, фіксують витрату та відміряють час падіння тиску — за цими даними оцінюють пневмоцільність камери згоряння. Метод придатний для стаціонарних умов ремонтних підприємств за умови наявності джерела стисненого повітря (компресора).

Слід урахувати, що навіть у новому двигуні абсолютної герметичності немає: конструктивні зазори вузла «циліндр—поршень—кільця» спричиняють допустимі втрати тиску паливно-повітряної суміші на рівні 15...20%. В експлуатації цей показник може зростати орієнтовно вдвічі. У будь-якому разі під час оцінювання потрібно спиратися на регламентовані довідкові значення (див. табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Критерії герметичності камери згоряння та допустимі межі

Величина витоку, %	Зона шкали	Висновок про герметичність камери згоряння
10...20%	Зелена	Хороший стан - витік через зазори ЦПГ мінімальний
20...40%	Жовта	Задовільний стан - витік граничний
40...60%	Червона	Критичний витік - у циліндрі несправності, за яких експлуатація заборонена

Понад 60%		Безумовне зняття з експлуатації та відправлення в капітальний ремонт
-----------	--	--

Недоліки методу:

1. якщо двигун оснащений АКПП чи подібними трансмісіями, потрібен підйомник; складнощі також виникають під час точного встановлення поршня у ВМТ;
2. під час перевірки «останнього» в порядку роботи циліндра результати можуть спотворюватися через стекання оливи зі стінок у картер;
3. метод достовірно виявляє переважно підтікання через клапани; стан поршневих кілець і знос гільз оцінює ненадійно;
4. процедура трудомістка, оскільки кожен циліндр потребує окремої тривалої перевірки.

Сутність вакуумного способу оцінювання ЦПГ полягає у вимірюванні розрідження (вакууму), що створюється під час відсмоктування повітря з камери згоряння, з подальшим порівнянням отриманого значення з табличними даними для конкретного двигуна. Алгоритм діагностування та робота комплексу приладів зводяться до прокручування колінчастого вала пусковим пристроєм будь-якої конструкції: на такті стиснення поршень витісняє повітря з циліндра крізь редукційний клапан (рис. 1.5) в атмосферу.



Рисунок 1.5 – Вакуумметр

Наприкінці такту стиснення тиск у камері згоряння є підвищеним, але не перевищує допустимих меж. Під час такту розширення під дією розрідження в

циліндрі відкривається вакуумний редукційний клапан. Далі, у момент відкриття випускного клапана ГРМ, клапан закривається, а вимірювальний блок вакуумметра «запам'ятовує» досягнуте максимальне значення розрідження в циліндрі (рис. 1.6).

Величина повного вакууму, зумовлена дією оливного клина за справного стану гільзи та герметичного прилягання впускних і випускних клапанів до сідел, не опускається нижче певного порогового значення $P_{1\min}$ для будь-якого типу двигуна й не залежить від стану поршневих кілець. Тому, орієнтуючись на виміряне значення повного вакууму P_1 , можна робити висновки щодо стану гільзи (еліпсність, натири, задири) та герметичності клапанних пар ГРМ. Друге значення тиску розрідження фіксують за відсутності сполучення надпоршневого простору з атмосферою під час такту стиснення.

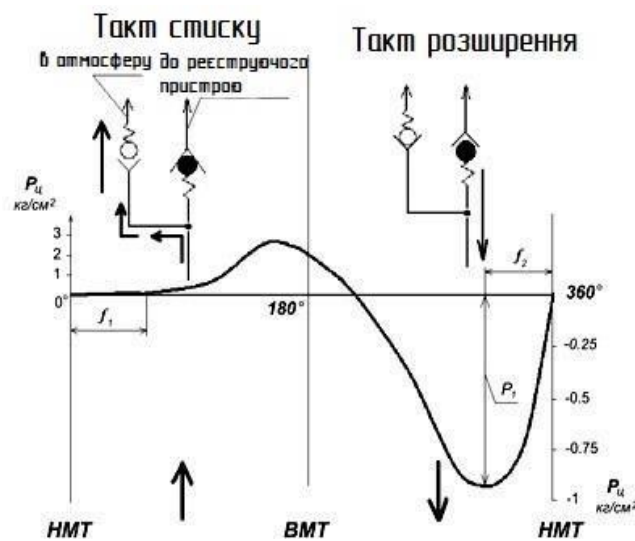


Рисунок 1.6 – Схема вимірювання повного вакууму P_1 [12].

Поняття залишкового вакууму пов'язане з втратами тиску робочого тіла в камері згоряння через протікання крізь вузол «кільця—гільза» у фазі надлишкового тиску в циліндрі. Іншими словами, величина залишкового розрідження є функцією інтенсивності витоків у період, коли тиск у циліндрі перевищує атмосферний.

Принцип фіксації залишкового вакууму подано на рис. 1.7. За справного стану гільзи та герметичного прилягання клапанів виміряне значення

залишкового вакууму слугує інформативним індикатором для оцінки поршневих кілець (компресійних і маслоснімних): ступеня зношення, закоксованості, можливих поломок перемичок поршня чи самих кілець. На показник P_1 істотно впливають також пневмощільність впускних/випускних клапанів і дефекти типу прогару або тріщин у днищі поршня та голівці блока циліндрів.

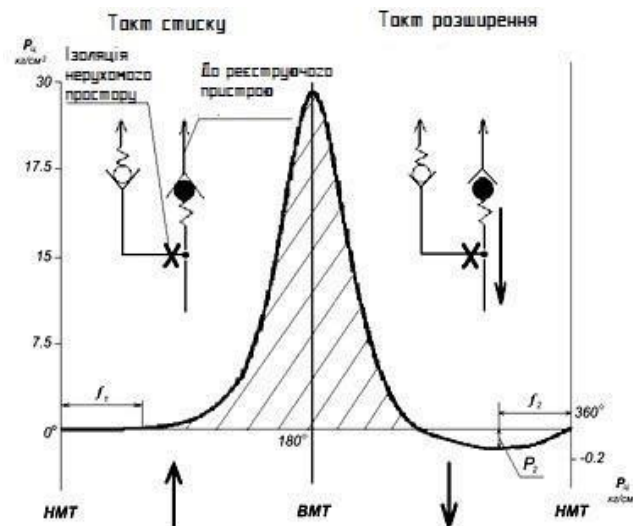


Рисунок 1.7 – Схема фіксації залишкового вакууму P_2 .

Проведені експериментальні випробування, підтверджені широкою статистичною вибіркою, дали змогу встановити та обґрунтувати базові нормативи для ключових показників P_1 і P_2 як для дизельних, так і для бензинових ДВЗ. Узагальнені номінальні та гранично допустимі значення тиску в циліндрі подано в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Номінальні та граничні значення тиску в циліндрі (показники P_1 і P_2)

Тип ДВС	Номінальні значення, кгс/см ²		Граничні значення, кгс/см ²		
	Гільза – P_1	Кільця – P_2	Гільза – P_1	Кільця – P_2	Клапан – P_1
Дизель	0,89...0,94	0,14...0,17	0,78	0,25	0,65
Бензиновий (на Аі-95)	0,80...0,84	0,17...0,20	0,75	0,32	0,60
Бензиновий (на Аі-92)	0,80...0,82	0,18...0,20	0,72	0,36	0,60

Запропонований метод має достатню інформативність і дає змогу з високою точністю ідентифікувати тип несправності. Його сильні сторони — проста інструментальна реалізація у поєднанні з високою чутливістю та виразністю результатів. Робота пристрою не залежить від стану акумуляторної батареї; знати номінальне значення компресії для конкретного двигуна, щоб порівнювати показники, не потрібно. Водночас необхідно враховувати марку та вид палива, на якому працює силова установка сільськогосподарської машини: оцінювання параметрів здійснюють за діагностичними діаграмами, побудованими для відповідного палива. Якщо двигун працює почергово на бензині й газі, використовують діаграму для застосованої марки бензину. Завдяки своєчасному й коректному виявленню дефектів деталей ЦПГ аналізатор герметичності циліндрів дає можливість уникати дорогих, але необґрунтованих ремонтів, раціональніше використовувати ресурс і якісно виконувати регламентні операції за фактичним технічним станом. Водночас слід відзначити й обмеження: метод не забезпечує достатньо надійного прогнозу залишкового ресурсу деталей.

Серед сучасних підходів до оцінювання загального технічного стану сполучень двигуна — віброакустична діагностика, у якій індикатором виступає рівень акустичних і вібраційних сигналів. Її застосовують, зокрема, для контролю колінчастих валів, шатунних вузлів і механізмів газорозподілу. Інформативність методу ґрунтується на декодуванні процесів вібрації: імпульси, що виникають у місцях контакту сполучених деталей, істотно відрізняються за амплітудно-частотними характеристиками від коливань газодинамічного та фрикційного походження. Кожна пара тертя має «власні» частоти та амплітуди зіткнень; із ростом зазорів збільшується енергія та тривалість ударних взаємодій, а отже — і рівень вібрації. Приналежність сигналу конкретному вузлу визначають для обраної контрольної точки вимірювання, при цьому параметри вібросигналу істотно залежать від частоти обертання та режиму навантаження.

У практиці виокремлюють кілька реалізацій віброакустичного аналізу. В одному з підходів за допомогою осцилографа реєструють амплітуду миттєвого віброімпульсу в заданий момент часу або за фіксованого кута повороту

колінчастого вала; для придушення перешкод запис ведуть у частотному діапазоні, де ознаки дефекту проявляються найвиразніше, та поблизу обраної контрольної ділянки діаграми. Також добирають оптимальні для об'єкта умови навантаження, швидкість і положення датчика. Несправності ідентифікують за формою осцилограми та зіставляють із «еталонними» кривими справного вузла.

Існує й універсальний варіант: реєстрація та аналіз осцилограми у всьому спектрі амплітуд із подальшим частотним фільтруванням для виокремлення ділянки, що становить інтерес. Запис спектра виконують на характерному режимі за обґрунтованих навантажувально-швидкісних умов. За середніми або максимальними значеннями параметрів, порівнюючи їх із нормативами, роблять висновок про стан сполучення. Нормативи встановлюють експериментально — шляхом індукованих відмов або накопичення статистики з експлуатаційних випробувань. У вимірювальних трактах застосовують акселерометри для реєстрації вібрації, ультразвукові детектори витоків (для відокремлення високочастотних газодинамічних складових від низькочастотних механічних шумів), індуктивні перетворювачі, тензо- чи п'єзодатчики тиску.

Слабке місце методу — висока вартість і кількість необхідних засобів вимірювання, що обмежує доступність точної віброакустичної діагностики ЦПГ для більшості СТО. Таким чином, розглянуті підходи до контролю ЦПГ ДВЗ мають суттєві обмеження, які не дають змоги з великою імовірністю однозначно судити про стан критичного сполучення; актуальним є створення точніших і мобільніших діагностичних засобів.

Приклад структурно-наслідкової моделі ЦПГ як об'єкта діагностування наведено на рис. 1.8. Схема відображає взаємозв'язок елементів, структурних параметрів, діагностичних ознак і вимірюваних параметрів та їх взаємовплив. Зміни у структурних параметрах (зноси у сполученнях, величина зазорів тощо) спричиняють відповідні зсуви діагностичних параметрів.

Діагностичні параметри, що корелюють зі структурними, поділяють на:

- номінальні — відповідають справному стану нового сполучення;
- допустимі — характеризують працездатну роботу в межах

експлуатаційних відхилень;

- граничні — сигналізують про перехід у несправний стан.

Під час добору структурних і діагностичних параметрів необхідно враховувати їхню значущість, достовірність та інформативність [9].

До ключових показників ефективності сільськогосподарських машин належать продуктивність, потужність, енергоємність і паливна економічність. За даними досліджень, до 30 % машинно-тракторного парку сільгосппідприємств працює з перевитратою палива; понад половину факторів, що погіршують економічність, можна усунути силами самого підприємства шляхом регулювань та ліквідації виявлених несправностей.

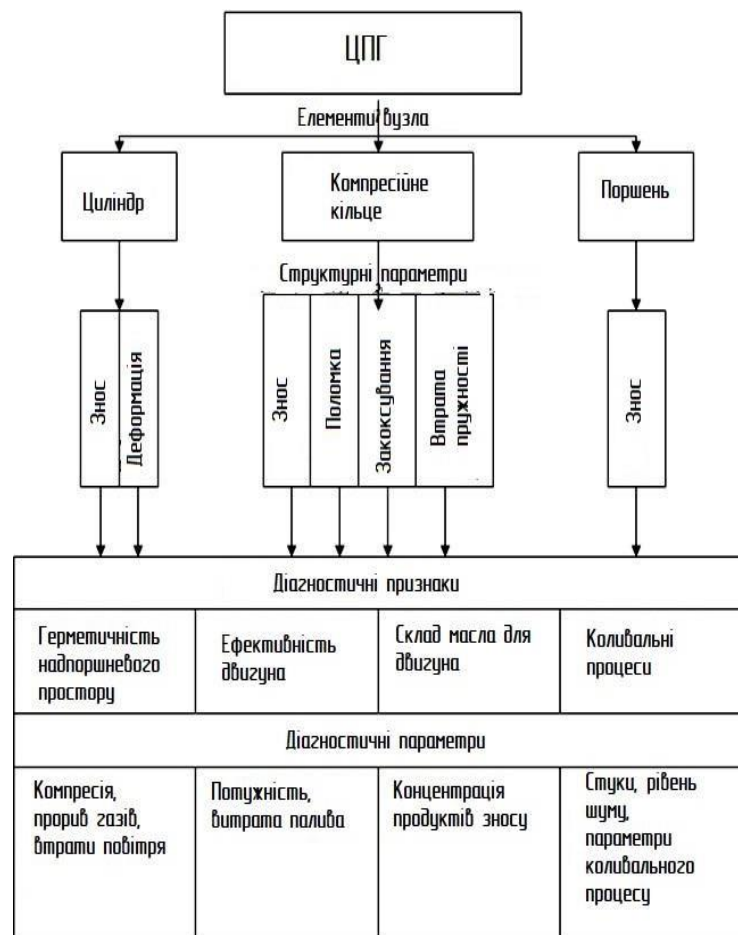


Рисунок 1.8 – Структурно-наслідковий зв'язок циліндро-поршневої групи як об'єкта діагностування [12].

Один із базових способів оперативної перевірки герметичності надпоршневого простору — пряма оцінка компресії компресометром. Компресія — це максимальний тиск повітря наприкінці такту стиснення в камері згоряння.

Зниження вимірюваного значення приблизно на 40 % свідчить про поломку чи заїдання кільця, надмірний знос кілець і гільзи або про ослаблене прилягання клапана до сидла. Для верифікації причини в камеру згоряння вводять 20–25 см³ моторної оливи й повторюють вимір: зростання тиску підтверджує значний знос поршневих кілець/вкладишів. Метод має як переваги, так і обмеження. До переваг належать невисока вартість обладнання та короткий час випробування. Основні недоліки:

- залежність показників від частоти обертання колінчастого вала: стартерні 250...350 хв⁻¹ істотно відрізняються навіть від холостого ходу, не кажучи про навантажені режими;
- недостатня інформативність щодо встановлення не лише «проблемного» циліндра, а й першопричини низького тиску;
- неможливість виконати тест на демонтованому чи частково розібраному двигуні або за несправного стартера.

Більш повну картину стану ЦПГ дає вимірювання температури в камері згоряння за відсутності займання. Упродовж ресурсу до капітального ремонту температура в КЗ типовим чином зменшується більш як на 11 %. Прорив газів у картер і підвищена витрата оливи при збільшених зазорах пари «поршень—кільця—гільза» призводять до відмінностей робочих температур, додаткових напружень у деталях ЦПГ, зміни геометрії, зростання теплових зазорів і втрати пружності кілець. Низка дослідників [13, 14] відзначає кореляцію між температурним режимом у камері згоряння та зносом сполучень ЦПГ, однак приладна реалізація ускладнена недостатнім аналітичним опрацюванням і браком експериментальних методик. Тому у цій роботі поставлено завдання: теоретично обґрунтувати спосіб діагностування ЦПГ за температурним параметром у камері згоряння ДВЗ та розробити відповідний пристрій.

Порівняння переваг і недоліків поширених методів діагностики ЦПГ наведено у табл. 1.4. На нашу думку, існує нагальна потреба у створенні методів, що враховують температурне поле в камері згоряння, а також у формуванні обґрунтованих вимог до обладнання, методики, структури та діагностичних

параметрів. Цим напрямом займаються чимало науковців [15, 16].

Таблиця 1.4 – Методи діагностування циліндро-поршневої групи ДВЗ: сильні сторони та обмеження [16].

№ з/п	Спосіб діагностування	Переваги	Недоліки
1.	Вимірювання тиску компресометром	- швидкість; - оцінка загального технічного стану; - переносний.	- велика похибка (10%); - при недостатньо зарядженій АКБ компресія на 1...1,5 атм. нижча за реальну
2.	Вимірювання витрати картерних газів пневмотестером	- оцінка загальної працездатності ЦПГ; - виявляє факт несправності циліндра.	- витік газів через сальникові ущільнення; - вплив вібрації на показання пневмотестера; - необхідність у джерелі стисненого повітря.
3.	Органолептичний	- попередня оцінка технічного стану за стуками, температурою охолоджувальної рідини.	- мала інформативність; - низька точність діагнозу; - суб'єктивізм.
4.	Віброакустичний	- попередня оцінка технічного стану за шумом у ЦПГ ДВЗ.	- мала інформативність; - низька точність діагнозу; - суб'єктивізм.
5.	Трибодіагностика (аналіз продуктів зносу в моторному мастилі спектрометрами)	- точна кількісна оцінка продуктів зносу - хімічних елементів у моторному маслі, що характеризують знос конкретних деталей ДВЗ.	- висока вартість; - недостатня інформативність; - висока трудомісткість; - стаціонарний.

6.	Діагностика за температурою в камері згоряння (пропонований)	- інформативність; - точність способу; - дешевизна і невисока трудомісткість; - переносний.	- висока кваліфікація персоналу.
----	--	--	----------------------------------

1.3. Висновки та завдання дослідження

Проведений аналіз дозволяє сформулювати такі висновки:

1. Існуючі методи та засоби діагностики циліндро-поршневої групи відрізняються набором використовуваних параметрів, недостатньою універсальністю й точністю, а також відносно високою трудомісткістю, що обмежує їх ефективне застосування у різних виробничих умовах.

2. Наявні прилади діагностування не повною мірою відповідають запитам експлуатуючих організацій: вони або коштовні, або малопридатні з огляду на інформативність. Потрібно визначити раціональну періодичність контролю і сформувати комплекс засобів та параметрів, який оптимально поєднає якість діагностики, трудомісткість і змістовність результатів.

3. Поряд із традиційними підходами перспективним є використання температури в камері згоряння як діагностичного параметра, що корелює зі зносом пари «поршень—кільце—гільза» і, відповідно, з ресурсом ДВЗ.

З огляду на це окреслено основні завдання дослідження:

1. теоретично обґрунтувати метод діагностування ЦПГ за температурним режимом у камері згоряння ДВЗ;

2. розробити апаратний засіб для такої температурної діагностики;

3. виконати експериментальні випробування пристрою та визначити доцільну періодичність його застосування;

4. оцінити економічний ефект від упровадження запропонованих рішень.

2. ТЕОРИТИЧНА ЧАСТИНА

2.1. Аналітичне дослідження залежності температури камери згоряння від зношування сполучень циліндро-поршневої групи

Згідно з результатами досліджень [7, 13, 15, 16], інтенсивність зношування сполучень α зростає лінійно зі збільшенням контактного тиску: $\alpha \propto \Delta p$; тобто приріст тиску на поверхні тертя безпосередньо веде до пропорційного підвищення швидкості зношування, розраховується за формулою 2.1:

де: α — інтенсивність зношування матеріалу деталі до моменту підвищення контактного тиску на поверхні тертя;

c — коефіцієнт пропорційності.

Інтенсивність зношування сполучень у механізмах і системах ДВЗ визначає характер (форму) кривої «знос — пробіг». За результатами досліджень основних пар тертя ДВЗ [15] встановлено, що зміна інтенсивності зношування сполучень ЦПГ і КШМ із пробігом l має експоненційний характер. Узагальнено це можна подати як формулу 2.2:

де: a_0 — інтенсивність зношування сполучення, приведена до початкового періоду експлуатації;

b — коефіцієнт, що відображає зміну інтенсивності зношування на одиницю приросту зносу.

У процесі роботи інтенсивність зношування динамічно навантажених пар (наприклад, «шатун — поршковий палець») має тенденцію зростати, тоді як у сполученнях, що частково саморозвантажуються (на кшталт «циліндр — поршневе кільце»), вона може зменшуватися. Це пояснюється різницею в механіці контакту та режимах навантаження під час експлуатації.

За взаємодії поверхонь тертя за заданих швидкості ковзання та контактного тиску в робочому температурному діапазоні [17–19] спостерігається підвищення температури контактної зони, що впливає на інтенсивність зношування. У першому наближенні залежність інтенсивності зношування від температури адекватно описується лінійною моделлю за формулою 2.3[17]:

де: Δt — приріст температури на поверхні тертя;

a_0 — базова (опорна) інтенсивність зношування;

b — коефіцієнт інтенсифікації зносу.

Лінійна залежність (2.3) вважається коректною, оскільки підтверджена численними експериментами [17] і може бути подана у вигляді формули 2.4:

де: Δt_M — відхилення температури моторної оливи;

b_1, b_2 — коефіцієнти, що враховують чутливість інтенсивності зношування до зміни температури.

Квадратичну залежність впливу температури оливи можна подати як формулу 2.5:

де: a_0 — інтенсивність зношування сполучень за умов $\Delta p = 0, \Delta V = 0$;

a_1 — гранична інтенсивність зношування за режимів $p \rightarrow \infty, V \rightarrow \infty$;

$\Delta p, \Delta V$ — прирости контактного тиску на поверхні тертя та швидкості ковзання відповідно.

Відомі залежності впливу тиску на температуру в камері згоряння мають обмеження: вони ігнорують витік робочого тіла через поршневі кільця, що неприпустимо для двигунів із напрацюванням. Щоб урахувати ці втрати маси, скористаємося рівнянням Менделєєва–Клапейрона (ідеального газу):

де P — тиск газів у камері згоряння, Па;

V — об'єм камери згоряння, м³;

M — кількість речовини (маса в молях) робочого тіла в циліндрі, моль;

R — універсальна газова стала, Дж/(моль·К) $R = 8,31$ Дж/моль·К

T — температура в камері згоряння, К.

Виходячи з рівняння стану ідеального газу можливо сформулювати формулу 2.7.

Розкриємо співвідношення 2.7 та виконаємо диференціювання за температурою, формулою 2.8. Похідну для виразу 2.8 запишемо у формулі 2.9.

Помноживши співвідношення (2.9) на dt , дістанемо диференціальне рівняння зміни температури в камері згоряння з урахуванням витрат робочого тіла M крізь замкові ділянки поршневих кілець, зумовлених зношуванням гільзи у поясі зупинки верхнього компресійного кільця за формулою 2.10.

Від’ємний доданок, що відповідає витокам у формулі 2.10, означає зниження температури в разі втрати робочого тіла з камери згоряння ДВЗ.

Запропоновано математичну модель та блок-схему обчислень у середовищі MatLab, які дають змогу визначати температуру суміші в камері згоряння як за наявності займання, так і без нього, для двигунів із різним ступенем зносу циліндро-поршневої групи. Для теплового розрахунку дизеля ЯМЗ-238.11-240 у режимі згоряння використовувалися такі вхідні дані: теплота згоряння палива, коефіцієнт надлишку повітря, тиск і температура залишкових газів, показник адіабати, кут повороту колінчастого вала. Для режиму без займання задавали: діаметр і хід поршня, кут повороту колінчастого вала, номінальний/допустимий/граничний знос гільз у поясі зупинки верхнього компресійного кільця (діаметр гільзи), частоту обертання колінчастого вала та ступінь стиснення.

Теплові розрахунки в MatLab виконували за формулою 2.11:

де: $T_{к.с.}$ — температура газів у камері згоряння, К;

ε — ступінь стиснення;

n_1 — показник політропи стиснення (для дизельних двигунів зазвичай $n_1 \approx 1,36$).

Ступінь стиснення визначають за формулою 2.12:

де: V_a — сумарний об’єм циліндра разом із камерою згоряння, л ($V_a = 1,357$ л);

V_x — миттєвий (поточний) об’єм камери згоряння та циліндра при заданому куті повороту колінчастого вала, визначається за формулою 2.13:

де: S_x — зміщення поршня, що відповідає куту повороту колінчастого вала φ :

$$S_x = 1 - \cos \varphi + \frac{\lambda}{4}(1 - \cos^2 \varphi),$$
 де λ — відношення радіуса кривошипа до довжини шатуна;

$V_{кс}$ — об’єм камери згоряння.

За підсумком виводимо розрахункову формула 2.14.

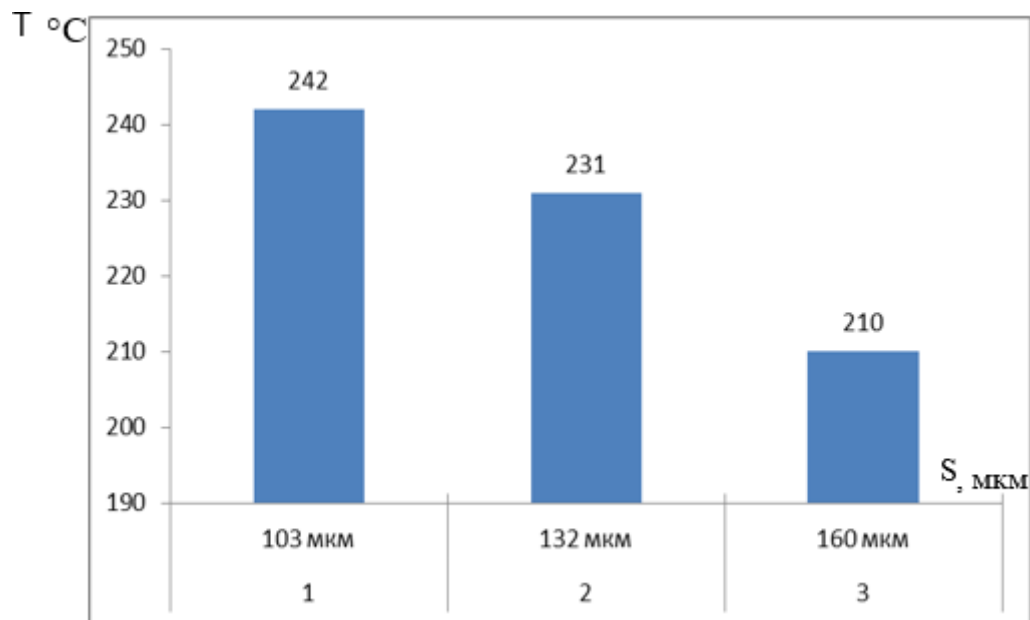
Підсумки теплового розрахунку без урахування займання подано на

гістограмі (рис. 2.1): 1 двигун із номінальним значенням діагностичного параметра;

2 двигун із допустимим рівнем параметра;

3 двигун із граничним значенням параметра.

Отже, аналітичні опрацювання свідчать, що контроль температури повітряно-оливної суміші в камері згоряння без процесу згоряння коректно відображає ключові чинники, які формують технічний стан циліндро-поршневої групи. Теоретичні висновки верифіковано експериментом; розбіжність між розрахунковими та вимірними даними не перевищує 5% (збіжність — близько 95%).



1. — ДВЗ із номінальним значенням діагностичного параметра;

2. — ДВЗ із допустимим значенням діагностичного параметра;

3. 3 — ДВЗ із граничним значенням діагностичного параметра.

Рисунок 2.1 — Зміна температури в камері згоряння ДВЗ ЯМЗ-238.11-240 залежно від зношування гільзи циліндра в зоні зупинки верхнього компресійного кільця (у площині гойдання шатуна).

Висновок

Аналітично доведено взаємозв'язок між температурою та тиском у камері згоряння наприкінці такту стиснення й величиною зносу гільзи циліндра в зоні

зупинки верхнього компресійного кільця.

Показано, що граничне значення температури в камері згоряння, обчислене за спрощеним рівнянням Менделєєва–Клапейрона та тепловим розрахунком, корелює з граничним зносом гільзи у зазначеній зоні.

Розроблено нову математичну модель еволюції температури й тиску без процесу займання в камері згоряння; модель адаптовано для чисельної реалізації в MatLab на EOM.

Під час оцінювання впливу коефіцієнта тепловіддачі проаналізовано відомі підходи та запропоновано оригінальну модель для режиму без займання на ДВЗ ЯМЗ-238.11-240 з урахуванням зносу гільзи в зоні зупинки верхнього компресійного кільця, що демонструє тісний взаємозв'язок відповідних параметрів.

3. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

3.1. Схема загальної методики дослідження

Розроблено програму досліджень, а також загальні та спеціальні методики проведення експериментів. План робіт охоплював лабораторні й стендові випробування. Тиск у камері згоряння визначали манометром, встановленим у верхній частині пристрою та з'єднаним із КЗ герметичним каналом. Температуру вимірювали вбудованою вібростійкою термопарою ТХА-К.305-2-2-1-С10-310/900 (діапазон $-40...+900$ °С) з подальшим перетворенням сигналу вимірювачем технологічним одноканальним Б-ІТ-УН-І, зав. №10170.

На такті стиснення, при відповідному повороті кривошипа колінчастого вала, фіксувалися максимальні середні значення тиску та температури. Випробувальний стенд було оснащено: компресометром, пневмотестером, аналізатором герметичності циліндрів і термопарою.

Дослідження впливу температури в камері згоряння на спрацьовування ЦПГ (вимірювання термопарою) виконували у два етапи:

зняття показів компресометра (витоки ЦПГ) та термопари (температура КЗ) на повністю прогрітому ДВЗ;

часткове розбирання двигуна для вимірювання зносу гільз у зоні зупинки верхнього компресійного кільця нутроміром і встановлення кореляції параметрів.

Окремо, вплив герметичності ЦПГ на температурний режим роботи двигуна оцінювали також у два етапи. Експеримент передбачав випробування прогрітого до робочої температури двигуна ЯМЗ-238.11-240 у режимі без займання; на другому етапі виконували часткове розбирання з контролем геометрії деталей ЦПГ. Перелік завдань і логіку виконання наведено у схемі загальної методики (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 — Узагальнена схема методики проведення дослідження.

Метою експерименту було зібрати й опрацювати статистичні дані для ДВЗ ЯМЗ-238.11-240 з метою обґрунтування періодичності діагностування, проаналізувати експлуатаційні витрати під час усіх видів технічних впливів, сформулювати за діагностичними параметрами маршрутні схеми відновлення працездатності двигуна та розробити технологію проведення діагностики.

Програма робіт охоплювала лабораторні й стендові випробування. Під час експерименту вимірювали тиск і температуру в момент такту стиснення за

відповідного кута повороту кривошипа, коли досліджувані величини досягають максимальних значень.

Стенд оснащено приладами й обладнанням, що дозволяють визначати температуру та тиск, синхронізовані з кутом повороту кривошипа; заявлена точність вимірювань — $\pm 5\%$. Систему збору та оброблення даних виконано відповідно до вимог ГОСТ 17509-2003, а методику стендових випробувань — згідно з планом випробувань за ГОСТ 14846-2003.

Напрацювання до заміни деталей і механізмів двигуна встановлювали за показами одометра, дорожніми листами, паспортними даними техзасобу, квартальними зведеннями, актами та довідками про напрацювання. Діагностичні параметри сполучень у експлуатації вимірювали сертифікованими за ДСТУ приладами, а також спеціально розробленими й запатентованими засобами.

Розмір вибірки двигунів визначали за формулою 3.1 [14]:

det_a — коефіцієнт Стюдента, що відповідає обраній довірчій імовірності (визначається за табличними даними);

V — коефіцієнт варіації;

E — відносна похибка (точність) обчислення.

Імовірність безвідмовної роботи ДВЗ задається виразом 3.2 [14, 20, 21]:

де N_0 — кількість двигунів, що перебувають під спостереженням;

n — число двигунів, які відмовили в інтервалі напрацювання/пробігу від 0 до L км. Критерієм відмови вважають зняття двигуна на ремонт. Число відмов у заданому інтервалі визначали як добуток обсягу вибірки на аналітичне (теоретичне) значення частоти для цього інтервалу з подальшим підсумуванням із попереднім значенням.

Експериментальні результати мають стохастичний характер: кожному значенню аргументу відповідає не фіксоване значення функції, а певний закон розподілу. Розкид спостережень зумовлюють суб'єктивні та невраховані чинники: різниця у кваліфікації діагностів, відмінності в технічному стані агрегатів сільгоспмашин, а також варіації швидкісних і навантажувальних режимів.

Ступінь узгодженості експериментальних точок із аналітичною лінійною

моделлю оцінювали за коефіцієнтом кореляції, а для нелінійної — за кореляційним відношенням. Коефіцієнт кореляції визначається за формулою 3.2 [14]:

де: K_{XY} — змішаний (коваріаційний) момент;

σ_X, σ_Y — відповідно середньоквадратичні відхилення величин X і Y .

Кореляційне відношення $\eta_{Y|X}$ визначали за співвідношенням 3.4:

де: σ_{XY} — частка дисперсії результативної ознаки, зумовлена впливом фактора X ;

σ_Y — повна дисперсія результативної ознаки під дією всіх чинників.

На підставі цих положень визначали наведені параметри моделей, оцінювали їхні похибки та виконували обчислення на персональному комп'ютері.

3.2. Оцінка впливу герметичності камери згоряння на температурний режим ДВЗ

Дослідження впливу герметичності ЦПГ на тепловий режим роботи двигуна виконували у два етапи. Експеримент передбачав випробування ЯМЗ-238.11-240, прогрітого до робочої температури, у режимі без займання робочої суміші. Отримані результати (табл. 3.1) підтверджують доцільність проводити діагностування на попередньо прогрітому ДВЗ до 90...95 °С.

Таблиця 3.1 — Температура в камері згоряння залежно від тривалості прогрівання ДВЗ

Час, хв.	№ циліндра			
	1	4	5	8
	Значення температури, С			
0	30	30	30	30
5	107	105	104	102
10	154	158	156	159
15	166	169	164	170
20	174	172	171	175
25	187	194	185	191
30	216	211	214	218
35	216	211	214	218

На рис. 3.2 подано загальний вигляд стенда, призначеного для випробувань ДВЗ.



Рисунок 3.2 — Загальний вигляд випробувального стенда для дослідження ДВЗ.

На другому етапі виконували часткове розбирання двигуна для контролю зношеності деталей сполучень ЦПГ. За даними табл. 3.2 видно, що вузли, які визначають ресурс ДВЗ, доцільно поділяти на групи за вартістю та довговічністю. Для кривошипно-шатунного механізму ключовою деталлю є колінчастий вал, а для циліндро-поршневої групи — гільзи циліндрів і поршні. За вартісною складовою колінчастий вал, гільзи та поршнева група суттєво дорожчі за витратні елементи — вкладиші й поршневі кільця.

Водночас інтенсивність зношування шатунних і корінних вкладишів та поршневих кілець на порядок перевищує зношування шийок колінчастого вала й гільз циліндрів (зокрема в зоні зупинки верхнього компресійного кільця), що підтверджено під час діагностики двигуна ЯМЗ-238.11-240 (рис. 3.3). Отже, ресурс дорогих базових деталей використовується не повністю, тоді як відносно дешеві витратні елементи відпрацьовують свій ресурс повністю.

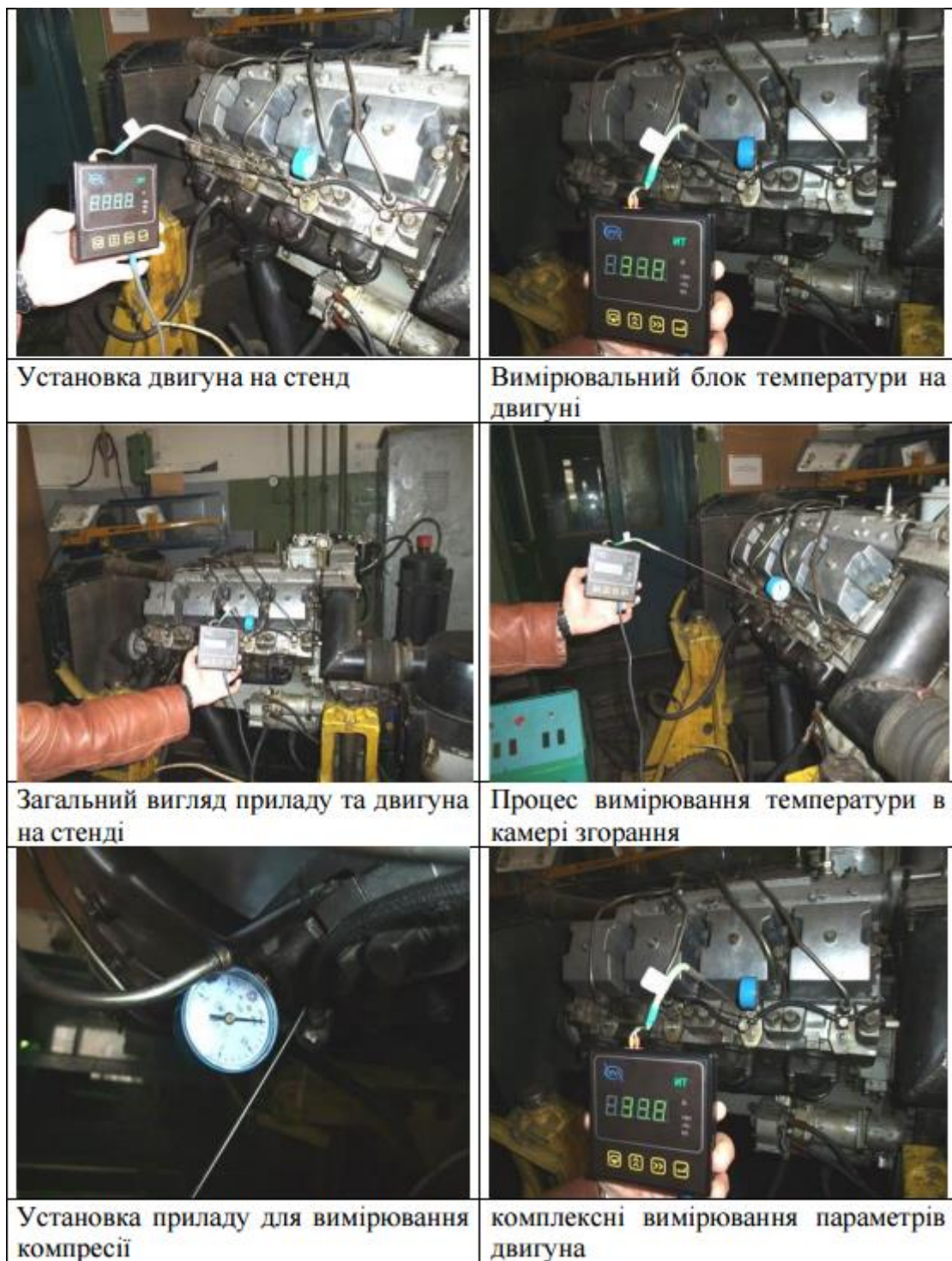


Рисунок 3.3 — Стенд із установленим пристроєм, оснащеним компресометром і датчиком температури камери згорання.

Таблиця 3.2 — Граничні параметри та ресурсні показники ДВЗ ЯМЗ-238.11-240.

Показники технічного стану	Граничне значення	Середнє значення ресурсу, тис. км
Знос шатунних шийок, мкм	50	240
Знос корінних шийок, мкм	60	200
Зазор у шатунних підшипниках, мкм	220	150
Зазор у корінних підшипниках, мкм	250	120
Тиск у системі змащення, МПа: за 2600 хв ⁻¹ за 600 хв ⁻¹	0,3 0,1	180 180
Знос гільз циліндрів, мкм	220	240
Овальність гільз циліндрів, мкм	90	230
Радіальний знос верхнього компресійного кільця, мкм	130	130
Питома витрата масла на чад, %	2,5	170
Температура камери згоряння ДВЗ, °С.	205	240

У процесі експлуатації знос пар тертя двигуна зумовлює зміну як структурних, так і діагностичних параметрів його роботи. Ключовими сполученнями, що визначають ресурс ДВЗ, є вузли кривошипно-шатунного механізму та циліндро-поршневої групи. За статистикою причин зняття двигунів (зокрема ЯМЗ-238.11-240) на капітальний ремонт, на ЦПГ припадає до половини відмов. У табл. 3.3 і 3.4 наведено параметри експоненціальної моделі (2.2) та розподіли показників технічного стану деталей двигунів ЯМЗ-238.11-240, демонтованих для КР; ці дані слід враховувати під час визначення періодичності діагностування.

Своєчасна діагностика та регулювальні роботи дають змогу знизити питому витрату оливи на угар і підвищити тиск у системі змащення. Важливим чинником надійності є точність налаштувань паливної апаратури: відхилення від нормативів

істотно прискорюють зношування деталей ЦПП і КШМ та погіршують надійність двигуна.

Таблиця 3.3 — Параметри експоненціальної залежності (2.2) показників технічного стану двигунів ЯМЗ-238.11-240.

Показники технічного стану	$\alpha\theta$	b	r	P
Витрата масла на угар у % до витрати палива	0,763	0,00830	0,959	0,998
Знос корінних шийок колінчастого вала	21,6	0,00453	0,967	0,992
Знос шатунних шийок колінчастого вала	18,5	0,00430	0,959	0,988
Знос нижніх корінних вкладишів	47,3	0,00491	0,972	0,998
Знос верхніх корінних вкладишів	32,9	0,005	0,982	0,996
Знос нижніх шатунних вкладишів	26,5	0,00455	0,987	0,998
Знос верхніх шатунних вкладишів	31,8	0,00444	0,973	0,996
Зазор у корінних підшипниках	165,0	0,00303	0,967	0,957
Зазор у шатунних підшипниках	145,0	0,00233	0,968	0,956
Зазор у сполученні "канавка поршня - кільце":	119	0,00558	0,965	0,991
- верхнє компресійне	87	0,00472	0,978	0,987
- друге компресійне - маслознімне	60	0,00397	0,937	0,996

Таблиця 3.4 — Параметри розподілу показників технічного стану деталей двигунів ЯМЗ-238.11-240, демонтованих для капітального ремонту, мкм.

Показники технічного стану	Капітально			
	не ремонт- ваних		відремонтованих	
	m	σ	m	σ
Знос гільз циліндрів у поясі зупинки верхнього компресійного кільця у ВМТ у площині гойдання шатуна	160	59	150	42
Овальність гільз циліндрів у тому самому	38	21,5	28	15

поясі				
Радіальний знос верхніх компресійних кілець	320	442	230	367
Радіальний знос нижніх компресійних кілець	175	205	131	182
Радіальний знос маслосніжних кілець	182	212	123	161
Зазор у стику верхніх компресійних кілець у калібрі діаметра 120+0,021 мм	175,0	42,7	161,0	39,8
Зазор у стику нижніх компресійних кілець	142,5	36,5	126,0	29,7
Знос шатунних шийок колінвала в площині кривошипа	37,6	19,5	46,5	26
Те саме в перпендикулярній площині	24	16	39,3	21
Знос корінних шийок колінчастого вала	20,5	9,4	13,9	23
Знос верхніх шатунних вкладишів	37,4	23,4	31,4	28
Знос нижніх шатунних вкладишів	25,2	17,4	23,4	14,7
Знос верхніх корінних вкладишів	40,1	24,5	31,1	41,8
Знос нижніх корінних вкладишів	31,3	29	22,5	36

m - середнє значення; σ - середньоквадратичне відхилення.

За порушень регулювань паливної апаратури інтенсивність потоку відмов двигунів ЯМЗ-238.11-240 зростає орієнтовно удвічі, а середня кількість відмов — у 1,5 раза. Водночас середній напрацювання до відмови скорочується приблизно у 1,7 раза, а сумарний час простою (пошук несправності, відновлення, повторний запуск) збільшується близько в 1,4 раза порівняно з коректно відрегульованими ДВЗ. Ситуацію погіршує сукупне відхилення налаштувань систем і механізмів автотракторних двигунів.

Аналіз моторів ЯМЗ-238.11-240, що надійшли на капітальний ремонт за останні три роки, показав: до 50 % випадків пов'язані зі зношуванням і відмовами ЦПГ. Отже, саме стан циліндро-поршневої групи значною мірою визначає ресурс двигуна. За даними дослідників, структура причин відмов для двигунів сімейства ЯМЗ така: конструктивні — 21,3 %, технологічні — 31,3 %, експлуатаційні —

47,4 %.

Наявні засоби діагностики не повністю закривають потреби практики. Хоча для дизелів випускається багато приладів, аналіз каталогів виробників технологічного оснащення свідчить: номенклатура вітчизняного обладнання для оцінювання стану двигунів залишається обмеженою. Багато перспективних розробок НДІ не дійшли до масової експлуатації: їх впровадження часто завершується одиничними зразками або малими серіями. У підсумку нині важко підібрати єдиний комплект, який би дав змогу всебічно оцінити технічний стан дизеля.

Використовуваний для ресурсної діагностики КШМ метод лінійних переміщень (вимір осьового ходу поршня поблизу ВМТ під дією тиску/розрідження) не відповідає сучасним вимогам через високу похибку — 20...25 % — і значну трудомісткість (0,9...2,6 люд.-год на двигун). Тому в практиці досі поширене направлення двигунів у ремонт за плановими інтервалами, що часто призводить до передчасних КР. Досвід впровадження безрозбірних методів оцінки стану машин підтверджує реальне зниження експлуатаційних витрат: підвищення безвідмовності на 10...15 %, збільшення фактично використаного ресурсу на ≈ 20 %, скорочення частки передчасних ремонтів на 30...40 % [14, 17]. У цьому контексті створення точніших і доступніших засобів діагностики підшипників шатуна залишається актуальним. Одним із завдань цієї роботи є розроблення пристрою діагностування ДВЗ за температурою у камері згоряння. У поєднанні з вимірюванням тиску це забезпечує належну інформативність діагностичних висновків.

На практиці ступінь зношування та потребу в ремонті зазвичай оцінюють за непрямими ознаками — витратою пального й оливи, падінням тиску мастилосистеми, втратою потужності. Проте точність таких суджень обмежена: вони не дозволяють надійно встановити реальний стан і рівень зносу ЦПГ, об'єктивно оцінити якість ремонту або спрогнозувати залишковий ресурс. Натомість вимірювання температури в камері згоряння (без подачі паливно-повітряної суміші) дає можливість напряду судити про стан пари тертя.

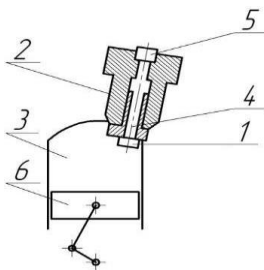
Пара «поршень — циліндр — поршневе кільце» належить до саморозвантажувальних: у міру зносу контактний тиск у зоні тертя зменшується. За однакових зовнішніх умов інтенсивність спрацювання циліндрів і кілець визначають насамперед тиск газів і пружність кілець. Втрата потужності зумовлюється погіршенням ущільнювальної здатності кілець, зниженням герметичності камери згоряння, ослабленням пружності кілець і деформаціями гільзи. Чим більша відхиленість форми гільзи від циліндричності в поперечному перерізі та чим нижча пружність кільця, тим гірша його прилеглість.

Просвіт між кільцем і гільзою пропорційний зносу гільзи на величину d ; при цьому стиковий зазор кільця збільшується на πd , а пружність зменшується на $b \pi d$ (де b — коефіцієнт пропорційності). Відтак прилеглість кільця (а з нею — герметичність КЗ) та його пружність лінійно пов'язані зі зносом гільзи.

За експериментальними даними [14], тиск у тактах стиснення та згоряння знижується пропорційно площі просвітів, що веде до зменшення температури в такті стиснення. Описані закономірності й наведені параметри розподілів показників технічного стану справджуються, коли відносна площа просвіту поршневих кілець не перевищує $\approx 10\%$.

3.3. Розроблення пристрою діагностики циліндропоршневої групи ДВЗ

Загальний вигляд пристрою для діагностування ЦПГ подано на рис. 3.4 та 3.5. Конструкція містить термopару 1, змонтовану в корпусі 2. Як корпус доцільно використати штатний корпус форсунки ДВЗ, що забезпечує швидкознімне й водночас герметичне приєднання до двигуна. Чутливий кінець термopари закріплюють у тій частині корпусу, яка розташована безпосередньо в камері згоряння 3. Термopара 1 через з'єднувальний провід підключається до блока реєстрації 5, розміщеного в зручному для спостереження місці.



1 — термопара; 2 — корпус; 3 — камера згоряння; 4 — канал; 5 — блок реєстрації; 6 — поршень.

Рисунок 3.4 — Пристрій для діагностування двигуна внутрішнього згоряння.

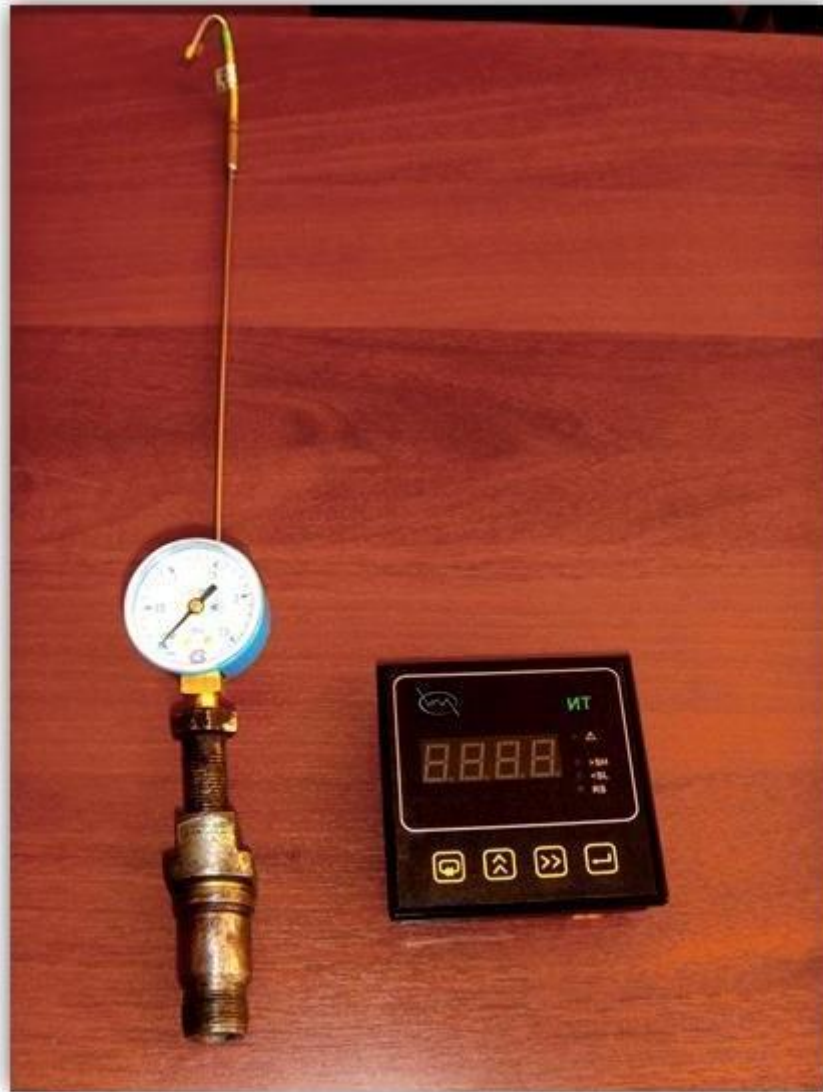


Рисунок 3.5 — Фотографія діагностичного пристрою ДВЗ у комплекті з блоком реєстрації.

Блок реєстрації містить цифровий перетворювач, що переводить сигнали термопар у температурні значення з роздільною здатністю $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Діагностичний модуль встановлюють на місці штатного вузла впорскування, а термопару вводять у камеру згоряння так, щоб вона не торкалася жодних деталей двигуна. Під час перевірки прогрітий до робочої температури двигун ЯМЗ запускають на холостому ходу ($\approx 850\text{ хв}^{-1}$). За результатами вимірювань температура повітряно-оливної суміші в такому режимі становить $205\text{--}240\text{ }^{\circ}\text{C}$ і змінюється залежно від ступеня зносу поршневих кілець і пари «гільза—кільце». Компоновку обладнання на ДВЗ у лабораторних умовах наведено на рис. 3.6.



Рисунок 3.6 — Процес виконання діагностики двигуна.

Щоб визначити доцільну частоту обертання колінчастого вала для роботи приладу під час діагностування, в лабораторії виконали експеримент із встановлення робочого діапазону частот. Дослідження показали: для стабілізації температури в камері згоряння без займання ДВЗ слід попередньо прогріти до 90–95 °С і працювати на мінімально можливих обертах колінчастого вала. Додатково вивчено зміну температури в камері згоряння (діагностичний параметр) унаслідок негерметичності пари «поршень—кільце—гільза» та зносу упорного паска над компресійним кільцем (конструктивний параметр). Результати наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 — Зв'язок діагностичного параметра (температура в камері згоряння T ; витіки в сполученні «поршень—кільце—гільза», %) зі структурним параметром — зносом S гільзи циліндра у зоні зупинки верхнього компресійного кільця, мкм.

T , °С	238-242	234-237	228-231	221-224	205-210
L , тис.км.	105	117	141	148	163
S , мкм	98-103	113-115	129-132	143-146	159-162

3.4. Обґрунтування залежності діагностичного параметра температури в камері згоряння від структурного зносу гільзи циліндрів у поясі зупинки верхнього компресійного кільця

Встановлено, що граничний стан ЦПГ настає за температури в камері згоряння близько 205...210 °С, що відповідає зносу гільзи в зоні зупинки верхнього компресійного кільця на рівні ≈ 155 мкм. Аналіз розподілу значень діагностичного параметра дав змогу ідентифікувати параметри експоненційного закону зміни температури в камері згоряння залежно від зносу гільзи. Температура в КЗ без процесу займання експоненційно знижується зі зростанням напрацювання двигуна рис. 3.7. Ймовірнісну оцінку працездатності виконували за температурним критерієм, узявши за базу граничний знос гільзи у вказаній зоні.

Для дослідження зв'язку між діагностичними показниками (температура в КЗ) і структурними (знос гільзи в районі верхнього стопорного поясу компресійного кільця) проведено експлуатаційні та лабораторні випробування. За підсумками вимірювань отримано лінійні залежності діагностичних параметрів від структурних, що продемонстрували високий коефіцієнт кореляції між аналітичними розрахунками та експериментом рис. 3.8.

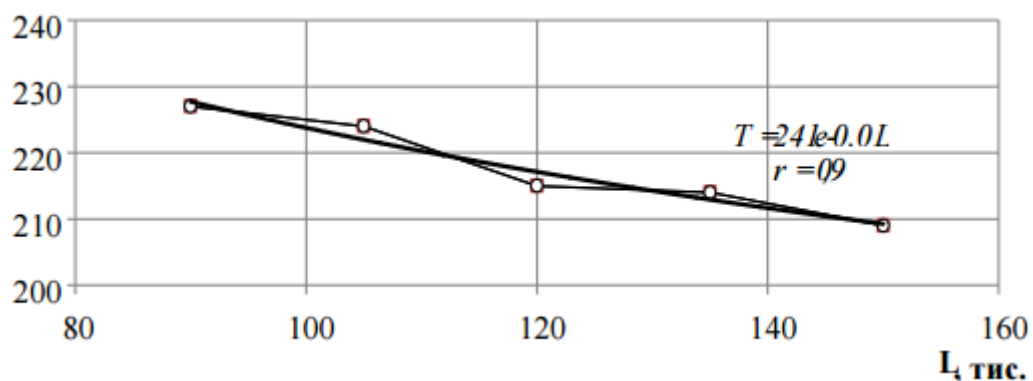


Рисунок 3.7 — Зміна температури в камері згоряння (без займання) залежно від напрацювання ДВЗ.

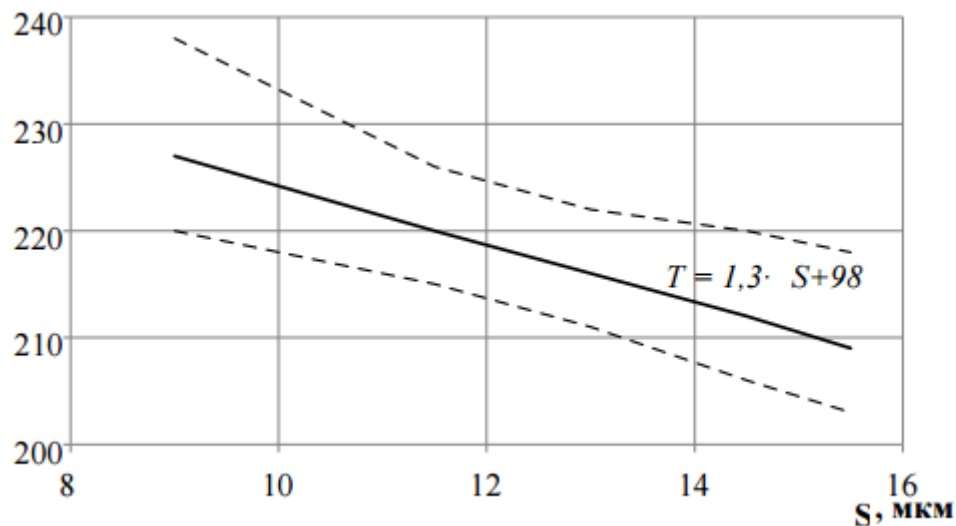


Рисунок 3.8 — Зв'язок діагностичного параметра T із структурним показником S .

Стенд для випробування діагностичного оснащення ЦПГ ДВЗ укомплектований приладами та вузлами, що синхронно з кутом повороту колінчастого вала фіксують температуру й тиск у камері згоряння. Комплекс забезпечує вимірювання всіх зазначених параметрів із точністю $\pm 5\%$. Для оцінювання стану ЦПГ за температурним критерієм у камері згоряння застосовано авторський пристрій, який одночасно дає змогу визначати температуру та компресію. Дослідження впливу герметичності сполучень на тепловий режим двигуна виконували у два етапи; експерименти проводили на двигуні ЯМЗ-238.11-240, попередньо прогрітому до робочої температури, у режимі без займання.

3.5. Удосконалення алгоритму і технологічного процесу діагностування ДВЗ ЯМЗ-238.11-240

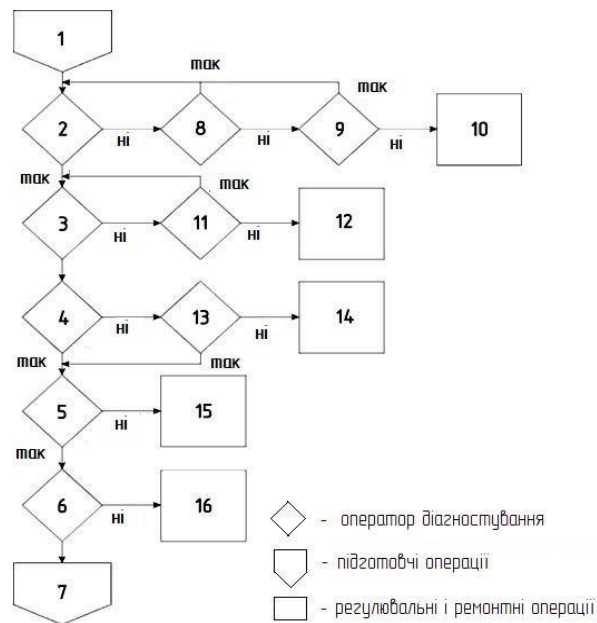
Головна мета технологічної діагностики двигунів ЯМЗ — контроль і відновлення їх працездатності. Це забезпечується своєчасним виявленням відхилень у системах двигуна та виконанням регулювань чи поточних ремонтів.

Алгоритм діагностування укладено на основі технологічного процесу (див. рис. 3.9). Нумерація позицій відповідає номерам операцій у карті процесу. Вертикальна гілка алгоритму реалізує послідовний пошук: кожен крок має два варіанти — «так» (параметри в нормі) або «ні» (перевищені/недостатні). За

позитивного результату переходять до наступної операції; за негативного — локалізують несправність і усувають її регулюванням або скеровують машину в зону ТО.

Після підготовчих дій і прогріву двигуна виконують вимірювання. Зокрема, визначають витрату оливи на угар до передремонтної діагностики в експлуатації, відстежуючи обсяги доливання оливи й пального (допустиме співвідношення не більше 1:50). Якщо поріг перевищено, виконують операцію 8 — перевірку герметичності ЦПГ (разом з операцією 9 вона впливає на витрату оливи).

Окремі операції (наприклад, 2 та 8) можуть виконуватися розробленим пристроєм: він дає змогу оцінити стан кілець, їх пружність і можливі поломки, виявити знос/задири гільз, негерметичність клапанів і прокладки ГБЦ [13]. Додатково перевіряють і, за потреби, регулюють зазори в клапанному механізмі.



1 — зовнішній огляд і прослуховування ДВЗ; 2 — температура в камері згоряння; 3 — димність відпрацьованих газів; 4 — тиск у системі змащення; 5 — прогин шатунних вкладишів; 6 — сумарне переміщення поршня у ВМТ; 7 — експлуатаційна перевірка; 8 — герметичність ЦПГ; 9 — регульовальні зазори в клапанному механізмі; 10 — поточний ремонт ЦПГ і ГРМ; 11 — кут випередження та тиск упорскування; 12 — переддіагностика (ПД) паливної апаратури; 13 — продуктивність масляного насоса; 14 — переддіагностика системи змащення; 15 — переддіагностика шатунних підшипників; 16 —

переддіагностика підшипників колінчастого вала зі зняттям двигуна.

Рисунок 3.9 — Алгоритм діагностування двигунів ЯМЗ.

Якщо коригування співвідношення витрати оливи до пального не дає ефекту, слід планово виконати обслуговування ЦПП і газорозподільного механізму.

Коли ж витрата оливи на угар утримується в допустимих межах (після профілактики або без неї), переходять до операції 3 — перевірки димності вихлопу. Нормою вважають не більш як 50 одиниць. Якщо показник перевищено, діагностують паливну систему (операція 11) за двома параметрами: тиском початку упорскування та кутом випередження упорскування. Якщо після регулювання димність не знижується — виконують операцію 12. За умови відповідності параметрів — переходять до операції 4: вимірювання тиску в мастильній системі на мінімальних і номінальних обертах. Мінімально допустимі значення — 0,1 МПа і 0,26 МПа відповідно. За нижчих значень перевіряють продуктивність масляного насоса; якщо регулювання редукційного клапана не допомагає — виконують регулювальні/ремонтні роботи за операцією 14. За нормального тиску визначають прогин вкладишів згідно з методикою. Підсумкові розрахунки періодичності діагностування наведено в табл. 3.6 [12, 15].

Регулярний контроль температури у камері згоряння надає інформативні відомості про технічний стан і підказує доцільність технічних втручань для підтримання працездатності. Запропонований процес починається з попередньої оцінки стану двигуна за стандартними показниками за розробленим алгоритмом. Після завершення діагностики результати фіксують у «діагностичному квадрокоптері» та формують висновок щодо стану двигуна з урахуванням сукупності параметрів.

Алгоритм випробувано в експлуатаційних умовах на 48 автомобілях із пробігом до 300 тис. км. Виявлено: у 16 % двигунів — відхилення кута випередження упорскування, у 15 % — значні відхилення стану шатунних підшипників, у 25 % — перевищений тиск у системі змащення, і у 25 % — перевищення температури в камері згоряння. Додаткові значення інших

діагностичних показників подано в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 — Допустимі значення параметрів ДВЗ у сформованих кластерах перед ПР (у чисельнику) та перед КР (у знаменнику).

№ з/п	Показник технічного стану	ДВЗ ЯМЗ- Євро
Кластер № 1		
1.	Знос шатунних шийок у площині кривошипа, мкм	35/50
2.	Овальність шатунних шийок, мкм	15/25
3.	Знос шатунних вкладишів, мкм	45/50
4.	Зазор у шатунних підшипниках, мкм	200/220
5.	Прогин шатунних вкладишів, мкм	20/40
6.	Товщина шару масла в шатунних підшипниках, мкм	15/15
Кластер № 2		
7.	Знос корінних вкладишів, мкм	70/80
8.	Сумарне переміщення поршня у ВМТ, мкм	40/60
9.	Зазор у корінних підшипниках, мкм	250/270
10.	Тиск у системі змащення: - номінальний режим, МПа - мінімальний режим, МПа	0,32/0,30 0,14/0,12
Кластер № 3		
11.	Знос гільз циліндрів у верхньому поясі в площині гойдання шатуна, мкм	132/160
12.	Овальність гільз циліндрів у верхньому поясі, мкм	60/90
13.	Радіальний знос верхніх компресійних кілець, мкм	130/130

14.	Радіальний знос маслоснімних кілець, мкм	60/60
15.	Зазор у сполученні "канавка поршня - верхнє компрес. кільце", мкм	260/260
16.	Знос гільз циліндрів у верхньому поясі в площині гойдання шатуна, мкм	120/120
17.	Температура в камері згоряння без займання, °С	231/210

На рис. 3.10 подано розподіл пробігів до капітального ремонту за умови проведення проміжних діагностик. Із графіка видно, що двигуни, які проходили ПД, демонструють приріст ресурсу на 12–13 %, а їхня імовірність безвідмовної роботи наближається до показників після КР. Отже, за середнього пробігу близько 280 тис. км до КР, виконання поточних ремонтів на підставі результатів ПД дає змогу уникнути капітального ремонту протягом усього життєвого циклу ДВЗ.

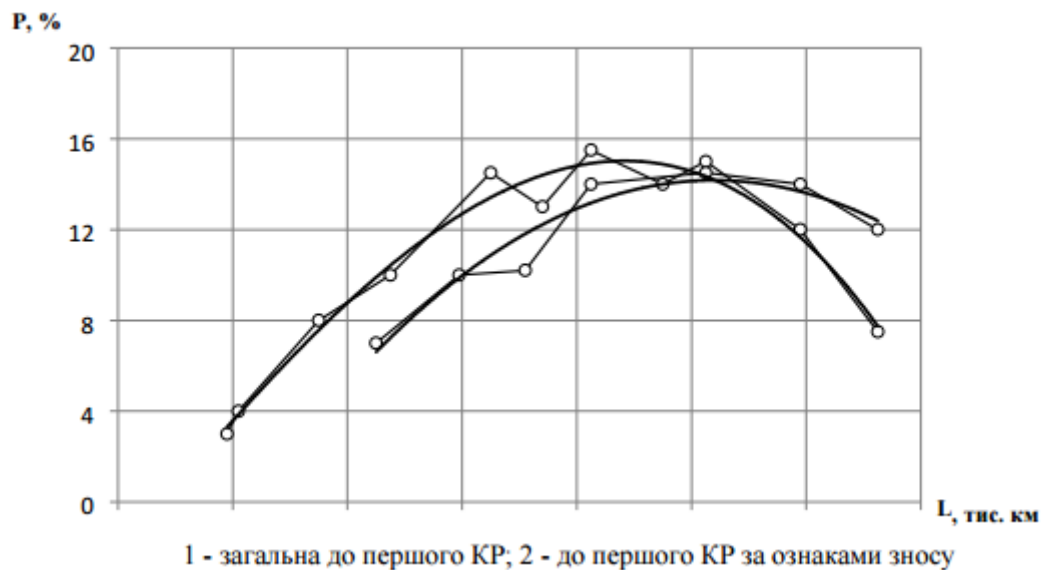


Рисунок 3.10 — Розподіл пробігу l до капітального ремонту двигунів за результатами проміжних діагностик.

Отже, за середнього пробігу близько 280 тис. км до КР, виконання поточних ремонтів на підставі результатів діагностування дозволяє протягом усього строку служби ДВЗ обходитися без капітального ремонту.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Аналіз керування системою охорони праці у АТП -11263

ДСТУ ISO 45001:2019 (ISO 45001:2018, IDT). У рамках системи менеджменту охорони праці та безпеки (ОПБ) ця система є складовою загальної системи менеджменту організації й призначена для керування ризиками, що виникають у сфері професійної безпеки та здоров'я під час діяльності підприємства [26].

Відповідно до вимог АТП 11263 система управління охороною праці охоплює такий комплект документації:

- Положення про СУОП організації: порядок ідентифікації небезпек, оцінювання та контролю ризиків; політика з ОП; структура служби ОП; робота спільного комітету з ОП тощо.
- Правила внутрішнього трудового розпорядку.
- Програми навчання/інструктажів: вступний інструктаж з ОП; первинний інструктаж на робочому місці; первинний інструктаж з електробезпеки (за групою допуску).
- Накази і розпорядчі документи: про розподіл обов'язків; призначення відповідальних за розроблення, упровадження та функціонування СУОП; призначення відповідальних за електрогосподарство; порядок забезпечення працівників ЗІЗ тощо.
- Процедури (стандартизовані порядки виконання робіт і контролів).
- Керівні (методичні) документи.
- Переліки НПА: чинні законодавчі та нормативно-правові акти з ОП (національні та локальні), у т. ч. документи щодо безоплатної видачі спецодягу, спецвзуття та інших ЗІЗ з урахуванням специфіки діяльності.
- Інструкції з ОП за професіями та посадами; інструкції з надання першої домедичної допомоги.
- Журнали з ОП (реєстрації інструктажів, обліку ЗІЗ, навчання тощо).

- Інформаційно-довідкові матеріали й пам'ятки.

Відповідальну особу за впровадження та функціонування СУОП на АТП 11263, а також розподіл обов'язків між підрозділами підприємства визначають окремим наказом.

Усі керівники в межах посадових повноважень вирішують виробничі завдання у зв'язці з питаннями ОП і несуть повну відповідальність за інженерне, кадрове та матеріально-технічне забезпечення безпечних і здорових умов праці, за проведення сертифікації постійних робочих місць на відповідність вимогам ОП. Працівники, своєю чергою, відповідають за дотримання встановлених технологічних процесів, інструкцій, норм і правил з охорони праці. Схематичну структуру служби ОП наведено на рис. 4.1.



Рисунок 4.1 — Організаційна структура служби охорони праці АТП.

4.2. Аналіз травматизму на виробничому об'єкті

Для аналізу травматизму на АТП застосовано статистичний підхід [27], за яким розглядають заздалегідь визначений обмежений набір показників інциденту.

Основними джерелами статистики на підприємстві слугують документи реєстрації нещасних випадків (акти форми Н-1, листки непрацездатності).

За звітний 2022 рік на АТП 11263 зафіксовано 15 постраждалих. Порівняно з 2021 роком кількість потерпілих зросла на одну особу (див. рис. 4.2).

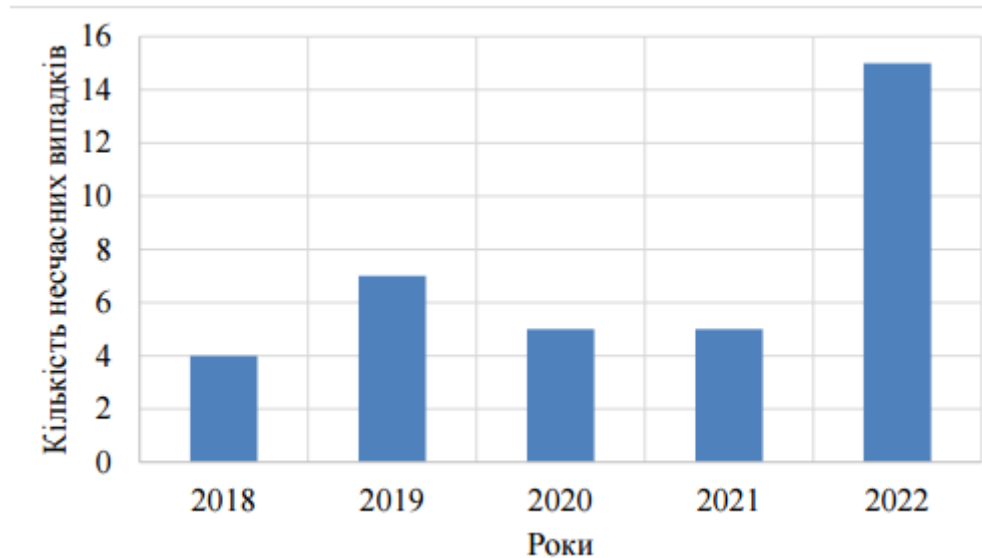


Рисунок 4.2 — Динаміка нещасних випадків і захворюваності.

Із графіка видно окремі сплески травматизму. Зокрема, у 2019 році через спалах COVID-19 на АТП фіксувалися тривалі періоди лікування працівників і, на жаль, два летальні випадки. У 2022 році наприкінці вересня по території АТП було завдано ракетного удару російськими військами: знищено близько 50 автобусів, ще близько 100 виведено з експлуатації, зруйновано ремонтні цехи та гуртожиток, що також призвело до людських жертв.



Рисунок 4.3 — Наслідки ракетного удару по території АТП.

Розподіл нещасних випадків за професіями подано на рис. 4.4.



Рисунок 4.4 – Несчастні випадки за професіями

З поданих даних видно, що за п'ятирічний період найбільшу частку травматизму становить професія водія — 47% усіх випадків.



Рисунок 4.5 — Залежність частоти нещасних випадків на АТП від діючих травмувальних факторів.

4.3. Захист у надзвичайних та аварійних ситуаціях

4.3.1. Вибір найбільш ймовірного аварійного сценарію

Пожежа — одна з найнебезпечніших ситуацій, що може виникнути з різних причин.

Основні чинники загорянь на об'єктах автотранспортної сфери:

- недбале поводження з вогнем, порушення вимог пожежної безпеки під час зварювальних та інших вогневих робіт;
- відхилення від правил експлуатації електрообладнання;
- несправності систем опалення чи печей;
- неправильний режим роботи опалювальних систем транспортних засобів;
- порушення пожежних вимог під час акумуляторних та фарбувальних операцій;
- недотримання правил зберігання легкозаймистих і горючих рідин.

4.3.2. Пожежна безпека в установках та виробничих приміщеннях транспортних засобів

Території автотерміналів підтримують у належній чистоті, виробничі відходи регулярно вивозять. Знежирювальні матеріали та інші відходи збирають у спеціально відведених місцях і видаляють наприкінці зміни.

Забороняється:

- захищувати або блокувати доступ до первинних засобів пожежогасіння та внутрішніх пожежних кранів;
- прибирати приміщення із застосуванням легкозаймистих чи горючих рідин;
- залишати після роботи увімкненими електронагрівальні прилади, електрообладнання, технологічні й допоміжні установки;
- використовувати відкритий вогонь не за призначенням;
- зберігати тару з ЛЗР та ГР (легкозаймистими й горючими рідинами) поза визначеними місцями.

Вимоги під час ТО та експлуатації автомобілів:

- очищення агрегатів і деталей здійснювати лише негорючими засобами;
- елементи двигунів, що працюють на етилованому бензині, знешкоджувати шляхом промивання парафіном у спеціально обладнаних зонах.

Первинні засоби пожежогасіння:

- тип і кількість визначають з урахуванням фізико-хімічних та пожежонебезпечних властивостей матеріалів, їх сумісності з вогнегасними речовинами, а також площі приміщень, відкритих майданчиків та кількості обладнання;
- розміщення у коридорах і проходах має не перешкоджати безпечній евакуації людей;
- усі установки маркуються знаками пожежної безпеки відповідно до ДСТУ EN ISO 7010:2019 «Графічні символи. Кольори та знаки безпеки» (див. рис. 12) [28].

4.3.3. Евакуація людей та автомобілів під час пожежі

Безпека людей і техніки під час пожежі напряму залежить від швидкої та правильно організованої евакуації. Для цього має бути підготовлений план евакуації з чітко позначеними шляхами виходу з урахуванням розташування дверей і виходів.

Кількість виходів із будівлі на кожному поверсі та з окремих приміщень — щонайменше два.

Для майданчиків/гаражів, де зберігається 25 і більше транспортних засобів, обов'язково розробляють схему їх розміщення. У ній визначаються черговість і порядок евакуації машин під час пожежі, обов'язки водіїв у нічний час, у вихідні та свята, а також правила зберігання ключів запалювання.

Місця стоянки (відкриті й закриті) слід оснащувати буксирними тросами або фаркопами з розрахунку один комплект на кожні 10 транспортних засобів.

Щоб забезпечити своєчасне виведення машин із пневматичною гальмівною системою, на майданчиках зберігання дозволяється розміщувати лише транспортні засоби зі справними гальмами.

Кількість техніки в експлуатації не повинна перевищувати проєктну місткість об'єкта.

5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1. Розрахунок періодичності діагностування автотракторних ДВЗ та її вплив на ресурс

Сучасний автосервіс ставить у пріоритет скорочення строків поточних ремонтів ДВЗ і підвищення їх якості при мінімальних витратах. Досягти цього можна завдяки плануванню періодичності діагностування, щоб своєчасно виконувати ПР, спираючись на розроблені та верифіковані нормативи діагностичних параметрів деталей ДВЗ. Розрахунки виконано за відомою методикою [27]. Періодичність контролю для дизеля ЯМЗ-238.11-240 визначали техніко-економічним методом, який мінімізує сумарні питомі витрати на діагностику, ТО та ПР.

З цією метою оцінено вартість діагностування дизеля ЯМЗ-238.11-240 для підприємства розраховуються за формулою 5.1:

де: $B_{з.п.}$ — витрати на оплату праці персоналу;

$B_{п.}$ — податкові відрахування;

B_a — амортизаційні нарахування.

Мінімальні питомі витрати досягаються за оптимально обраної періодичності обслуговування l . За цих умов питомі витрати на діагностування обчислюють за формулою 5.2:

де l — періодичність проведення ТО;

D — разові витрати на діагностування ДВЗ.

Оптимальний інтервал між ТО та ПР можна також визначити розрахунково. Водночас слід зважати, що збільшення пробігу до моменту діагностики й обслуговування підвищує імовірність відмови та, як наслідок, питомі витрати на поточні ремонти.

За цих передумов мінімум сумарних питомих витрат доцільно знаходити за формулою 5.3:

де: C'_d — питомі витрати на діагностування;

$C'_{т.о.}$ — питомі витрати на технічне обслуговування;

$C'_{\text{п.р.}}$ — питомі витрати на поточний ремонт.

Для розрахунку оптимальної періодичності діагностування прийнято усереднені показники для м. Дніпро: оплата праці діагноста $B_{\text{з.п.}} = 200 \text{ грн/год}$, податкові відрахування $B_{\text{п}} = 50 \text{ грн/год}$, амортизаційні нарахування $B_{\text{а}} = 0,2\%$ від вартості обладнання.

Відомості щодо питомих витрат на ремонти отримано у ТОВ «АТП 11263». Зведені дані наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 — Залежність питомих витрат на діагностування Д, ТО та ПР від періодичності проведення діагностики.

Періодичність ТО, км	24000	48000	72000	20000	96000	120000
Питомі витрати Д, грн/км	0,34	0,07	0,03	0,02	0,02	0,01
Питомі витрати ПР, грн/км	0,30	0,63	0,88	1,10	1,58	1,95
Питомі витрати на ТО, грн/км	1,00	0,50	0,33	0,25	0,20	0,17
Загальні витрати на Д, ТО і ПР, грн/км	1,64	1,19	1,24	1,37	1,80	2,13

На основі даних табл. 5.1 побудовано експериментальну криву сумарних питомих витрат на Д, ТО та ПР залежно від періодичності діагностування, за якою отримано регресійну модель. Аналітичний вираз цієї залежності має такий вигляд за формулою 5.4:

де: a — регресійний коефіцієнт;

$$a_1 = -0,0208; a_2 = 0,3149; a_3 = -1,2077; a_4 = 2,5444;$$

l — періодичність діагностування.

Графічне подання регресійної кривої сумарних питомих витрат на Д, ТО та ПР разом із експериментальними точками, отриманими для різних інтервалів діагностування, наведено на рис. 5.1.

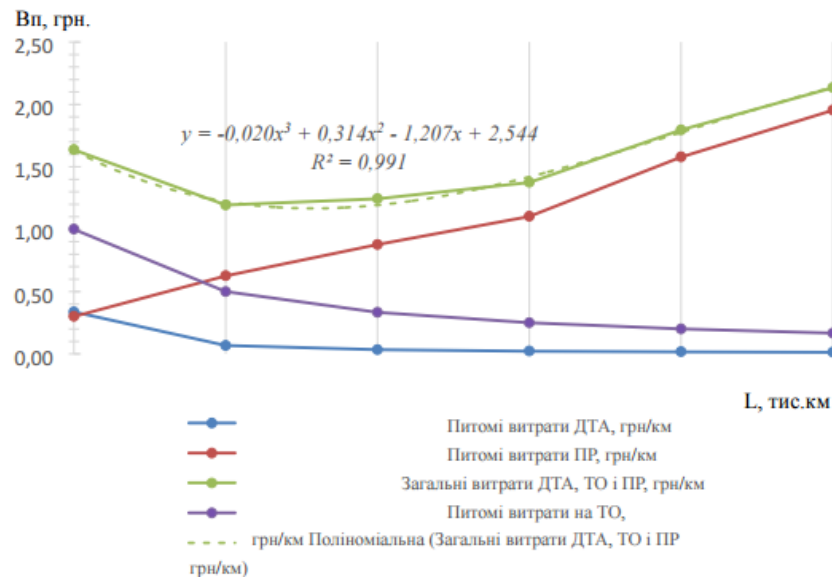


Рисунок 5.1 — Зміна питомих витрат $V_{\text{п}}$ на діагностування Д, ТО та ПР, а також сукупних питомих витрат залежно від пробігу L .

За підсумками експериментів і розрахунків встановлено, що мінімум сукупних питомих витрат досягається за інтервалу діагностування близько 24 000 км.

Аналіз показує, що рівень загальних витрат залишається практично незмінним у діапазоні періодичності 23 000–25 000 км. Відтак, аби знизити витрати, доцільно включати роботи з діагностування дизеля ЯМЗ-238 до переліку операцій кожного другого ТО-2.

5.2. Розрахунок економічних показників

Проведені дослідження свідчать: відмови настають задовго до повного вичерпання ресурсу базових деталей. Порівняно невелике напрацювання ДВЗ зумовлене, зокрема, відсутністю регулярної профілактичної діагностики стану сполучень ЦПГ за температурним показником у камері згоряння, а також недосконалою системою поточних ремонтів в умовах АТП 11263 (коли заміну деталей виконують уже на граничному стані). У підсумку, попри заводський ресурс до КР для ЯМЗ (III категорія умов) у 240 тис. км, за цей інтервал двигун нерідко проходить не один капремонт, що спричиняє додаткові витрати на запчастини та втрату залишкового ресурсу дорогих базових елементів.

Для двигунів, що відмовляють через зношування ЦПГ, доцільно продовжити строк служби шляхом включення до алгоритму діагностування контролю температури повітряно-оливної суміші в камері згоряння, який репрезентує ступінь зносу гільзи у зоні зупинки верхнього компресійного кільця.

У роботі наведено залежність витрат ДВЗ ЯМЗ-238.11-240 у процесі експлуатації та їх середнє фактичне значення — 27,3 двигуна на 100 автомобілів за рік. За даними [14, 17], 40 % двигунів потребують поточних ремонтів (через несвоєчасне виконання ПР за результатами ПД):

$$N_p^{NP} = 27,3 \cdot 0,4 = 10,9 \text{ двиг./100 авт.рік}$$

Економічна віддача від своєчасного виявлення та усунення дефектів проявляється у зменшенні витрат на дорогі ПР і КР двигунів при одночасному зростанні витрат на діагностику та своєчасну заміну вузлів. Відповідно до загальноприйнятої методики річний економічний ефект розраховують як різницю між базовими витратами та витратами після впровадження діагностичних заходів за формулою 5.5:

де A — річна продуктивність автомобіля, т·км;

B_T, B_P — наведені витрати за традиційного забезпечення працездатності та за умови впровадження діагностування відповідно.

Сумарні витрати визначають за формулою 5.6:

де S — собівартість перевезень, грн/10 т·км;

EB — нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

K — питомі капітальні вкладення у виробництво, грн/10 т·км.

З огляду на формули 5.5 та 5.6 отримаємо формулу 5.7.

Перший доданок відображає зменшення річних витрат завдяки скороченню витрат на ПР за рахунок збільшення витрат на ПД, тобто формула 5.8:

де: N_p^{np} — річна потреба в капітальних ремонтах (прийнято $N_p^{np} = 0,109$);

d — частка відмов, яких вдається уникнути завдяки діагностуванню (ймовірність виявлення $d = 0,95$);

S_g — витрати на діагностування;

S_3 — витрати на поточні ремонти ПР;

S_p — середня вартість проміжної діагностики ПД одного двигуна, раховується за формулою 5.9:

тут n — кількість позицій деталей, що підлягають заміні або відновленню;

C_i — витрати на заміну/відновлення i -тої деталі;

p_i — імовірність виконання заміни чи відновлення для цієї i -тої деталі.

Вартість одного діагностування з урахуванням трудомісткості $T = 54$ люд.-хв, тарифної ставки слюсаря та витрат на електроенергію становить у середньому $X = 148$ грн. За періодичності контролю кожні 25 тис. км і середньорічному пробігу 50 тис. км річні витрати на діагностування одного ДВЗ дорівнюють 420 грн.

Разові витрати на діагностику визначали з урахуванням вартості змінних деталей $S_{\text{дет}}$ і трудових витрат, що залежать від середньої трудомісткості T_3 та тарифної ставки ааа. Оскільки ПР виконують не під час кожного сеансу, зі співвідношення середнього ресурсу та річного пробігу l_p отримано, що в середньому на один ДВЗ припадає 0,5 діагностування на рік. Відтак річні витрати становитимуть розраховуються за формулою 5.10:

$$S_3 = 5910 \text{ грн}$$

Друга складова відображає приріст капітальних витрат на діагностичне оснащення. Орієнтовна вартість пристрою — 4350 грн.

За заданої періодичності та середньорічного пробігу для парку зі 100 ДВЗ ЯМЗ-238 потрібно близько 200 діагностичних сеансів на рік. Враховуючи ціну обладнання та нормативний коефіцієнт ефективності $EB = 0,15$, річні витрати на діагностування в розрахунку на один двигун збільшаться, розрахунок проводимо за формулою 5.11:

$$\Delta S = 0,93 \text{ грн.}$$

За формулою 5.5 економічний ефект становить 19 329 грн. Додатковий зиск очікується також завдяки скороченню відмов автомобілів через раптові аварійні причини.

Визначимо строк окупності капітальних витрат. Розрахунок ведемо з

урахуванням того, що на облаштування поста діагностування, придбання оснастки та виготовлення діагностичного пристрою потрібно інвестувати 55 300 грн, за формулою 5.12.

Отже, систематичне підтримання справного стану ДВЗ через проведення ПР за результатами ПД з раціонально визначеною періодичністю дозволяє подовжити ресурс агрегату та знизити витрати на експлуатацію, забезпечуючи відчутний економічний результат.

Таблиця 5.2 – Результати техніко-економічної оцінки роботи

Показник	Одиниця ви- мірювання	Значення пока- зника
Вид робіт		Діагностування
Програма діагностування (Двигуни)	одиниці	100
Капіталовкладення (прилад, оснастка, обла- штування поста діагностування)	грн	55300
Трудомісткість одного діагностування	Люд. хв.	54
Витрати на одне діагностування	грн	148
Періодичність діагностування	Км. пробігу	25000
Витрати за рік на передремонтне діагносту- вання	грн	480
Витрати на поточний ремонт	грн	5910
Вартість діагностичного пристрою	грн	4350
Загальні витрати при проведенні ПД та ПР	грн	10740
за рік		
Загальні витрати при проведенні ПР без ПД за рік	грн	30069
Економічний ефект від впровадження ПД на один двигун	грн	19329
Термін окупності	років	2,9

ВИСНОВОК

Результати дослідження:

1. Теоретична База: Обґрунтовано принципово новий підхід до діагностики циліндропоршневої групи (ЦПГ), що базується на вимірюванні температури робочого тіла в герметичній камері згоряння за умови відсутності запалювання. Розроблено математичний апарат (модель теплового розрахунку 14) для комп'ютеризованого аналізу цього процесу.

2. Технічне Рішення та Критерії Зносу: Створено діагностичний пристрій, який інтегрує термопару в конструктив форсунки для точної реєстрації температури. Вдосконалений алгоритм діагностування демонструє зростання точності на 5,5% відносно класичного компресометричного контролю. Визначено критичну межу працездатності ЦПГ: 210°C, що корелює зі зносом гільзи 160 мкм у зоні зупинки верхнього компресійного кільця.

3. Експлуатаційна Оптимізація: Запропонована періодичність контролю ЦПГ – 24 тис. Км (ТО-2) – підтверджена експлуатаційними випробуваннями як найбільш ефективна. Її застосування забезпечує збільшення міжремонтного ресурсу ДВЗ на 12...13 та виключає необхідність капітального ремонту протягом усього терміну експлуатації.

4. Економічна Ефективність: Розрахунковий економічний ефект від своєчасного усунення дефектів, виявлених за допомогою обґрунтованої періодичності діагностування, становить 19329 на один двигун щорічно.

Рекомендації для Виробництва: Регламент ТО-2 слід доповнити контролем температури стиснення (через одне ТО-2), використовуючи новий пристрій, а також враховувати табличні нормативи інших діагностичних параметрів ЦПГ.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Мельянцов П. Т. Організація використання техніки за умов дефіциту матеріально - технічних ресурсів / П. Т. Мельянцов, Є. В. Калганков. // Zbiór raportów naukowych. „Inżynieria i technologia. Teoria. Praktyk Sp. z o.o. «Diamond trading tou. – 2010. – С. 84–87.
2. Черній О. Деякі проблеми технічної надійності сільськогосподарських тракторів JOHN DEERE. *The 7 th International scientific and practical Conference “Innovations and prospects of world science” (March 2-4, 2022) Perfect Publishing, Vancouver, Canada. 2022. С. 13–19.*
3. Дирда В. І. Ремонт машин та обладнання. Підручник для вищих навчальних закладів [Текст] / В. І. Дирда, П. Т. Мельянцов, О. І. Кириленко та ін. – Днівськ, Журофонд, 2015. – 292 с.
4. Калганков, Є.В. Обґрунтування інформативних діагностичних параметрів технічного стану об’ємного гідроприводу трансмісії ГСТ-90 / Є.В. Калганков // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. – 2009. – No 2. – С. 71-74
5. Калганков, Є.В. Технічне діагностування об’ємних гідроприводів трансмісії як об’єктивна необхідність / Є.В. Калганков // Сучасна наука: теорія і практика. – Запоріжжя, 2012. – Т. 2. – С. 88-90.
6. Дорошенко О. В. Обґрунтування методів та параметрів діагностування паливних систем мобільних сільськогосподарських машин / О. В. Дорошенко, Є. В. Калганков. // Zbiór artykułów naukowych z Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej «Nowy sposób rozwoju Inżynieria i Technologia» Sp. Z o.o. «Diamond trading tour» Warszawa. – 2017. – С. 44–50
7. Волошин Р.В. Обґрунтування ефективних методів діагностування агрегатів мобільних сільськогосподарських машин / Р.В.

Волошин, Є.В. Калганков // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції "Інтеграція світових наукових процесів як основа суспільного прогресу": ГО «Інститут інноваційної освіти»; Науково-учбовий центр прикладної інформатики НАН України. – Київ. 2018. – С. 200-205.

8. Бондаренко, В.А. Повышение долговечности транспортных машин / В.А. Бондаренко, К.В. Щурин, Н.Н. Якунин, В.И. Рассоха, В.Ю. Филиппов. – М.: Машиностроение, 1999. – 144 с.

9. Які бувають пошкодження в циліндропоршневої групи [Електронний ресурс] / Режим доступу до ресурсу: <https://optimaprom.com/ua/a379573-kakie-byvayut-povrezhdeniya.html>.

10. A. Golovan, S. Rudenko, I. Gritsuk, A. Shakhov, et al., "Improving the Process of Vehicle Units Diagnosis by Applying Harmonic Analysis to the Processing of Discrete Signals," SAE Technical Paper 2018-01-1774, 2018, doi:10.4271/2018-01-1774.

11. Діагностика автомобіля [Електронний ресурс]. – 21. – Режим доступу до ресурсу: <http://komitet.kiev.ua/diagnostyka-avtomobilya-3/>.

12. Николаев, Е.В. Факторы, влияющие на параметр расхода картерных газов как основной показатель технического состояния ЦПГ / А.В. Николаев, Н.С. Нистратова. // Тракторы и сельхозмашины. - 2011. - №10. - С 45-46.

13. Двигуни внутрішнього згорання. Теорія [Текст]: Підручник / В.Г. Дяченко; За ред. А.П.Марченка. - Харків: НТУ "ХП", 2008. – 488 с

14. Армашов Ю.В. Надійність сільськогосподарської техніки: навчальний посібник / Ю.В. Армашов, П.К. Охмат. – Дніпропетровськ.: РВВ ДДАУ, 2008. – 208 с.

15. Картошкін, О.П. Методологічні аспекти наукових досліджень зі створення способу дистанційного теплового контролю потужних показників мобільного сільськогосподарського агрегату. - 2015. - №39. С. 309-314.

16. Інтелектуальні системи діагностики теплового стану електродвигу- на : монографія / Д. Ю. Зубенко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 203 с.
17. Кіндрачук М.В. Трибологія: підручник / М.В.Кіндрачук, В.Ф. Лабу- нець, М.І. Пашечко, Є.В. Корбут. – К.: НАУ, 2009
18. Калганков Е.В. Расчет долговечности резиновых футеровок шаровых рудоразмольных мельниц с учетом старения резины / Калганков Е.В. // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб . наук . Праць , Ін- т геотехнічної механіки ім. М .С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2013. – No 113. С. 181– 202.
19. Калганков Є. В. Особливості фрактального аналізу поверхні руйну- вання гумових футерівок, що працюють в умовах абразивно- втомного зносу / Є. В. Калганков. // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. - Дніпропе- тровск: ІГТМ НАНУ. – 2017. – No133. – С. 66–74
20. Нижняк Д.В. Визначення показників надійності колінчатих валів автотракторних двигунів / Нижняк Д.В., Калганков Є.В., Дирда В.І. // Inżynieria i technologia. 2014. osiągnięć, projekty hipotezę. (29.12.2014 - 30.12.2014) – Warszawa: – 2014. – С. 8-13.
21. Надійність сільськогосподарської техніки: підручник / М. І. Черно- вол, В. Ю. Черкун. – 2-ге вид., переробл. і допов. – Кіровоград : КОД, 2010. – 320 с.
22. Кобец А.С. Энергетическая оценка износа антифрикционных мате- риалов / Кобец А.С., Дырда В.И., Калганков Е.В., Цаниди И.Н. // Геотехниче- ская механика. 2012. Вып. 106. С. 78–90.
23. Наноматеріали в механіці де формівного твердого тіла на прикладі гумових футеровок барабанних кульових млинів / В. Дирда та ін. *Геотехніч- на механіка*. 2021. № 157. С. 120–129.
24. Черній О. Дослідження безвідказності тракторів John Deere серії 8R в експлуатаційних умовах України. *Теоретичні та практичні питання*

агра- рної науки : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. 2022. С. 117–120.

25. Пат. № 144310 Україна, G01N 3/56 (2006.01) Машина тертя / Калганков Євген Васильович (UA); Грачова Вікторія Миколаївна (UA); Косенко Анна Вадимівна (UA) - u202001408; заявл. 20.03.2020; опубл. 25.09.2020, бюл. № 18; 4 с.

26. ДСТУ ISO 45001:2019 (ISO 45001:2018, IDT). Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосу- вання. На заміну ДСТУ OHSAS 18001:2010 ; чинний від 2021-01-01. Вид. офіц. Київ, 2021. 5 с.

27. Основи охорони праці: / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний. - К.: Основа, 2006 — 448 с

28. ДСТУ EN ISO 7010:2019. Графічні символи. Кольори та знаки без- пеки. На заміну ДСТУ ISO 7010:2009; ДСТУ ISO 6309:2007 ; чинний від 2020-07-01. Вид. офіц. Київ, 2020. 136 с.

29. Вініченко І.І. Методичні рекомендації з економічного обґрунтуван- ня дипломних робіт для студентів факультету механізації сільського госпо- дарства / І.І. Вініченко, А.О. Сітковська. Дніпропетровськ: ДДАЕУ, 2016. – 27 с.

30. Калганков Є.В. Методичні рекомендації до виконання і оформлення дипломних проектів ОС "Бакалавр" за спеціальністю 208 "Агроінженерія" і дипломних робіт ОС "Магістр" за спеціальністю 208 "Агроінженерія" / Кал- ганков Є.В. – Д.: ДДАЕУ, 2021. – 36 с.39.

31. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання