

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

Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**Мулярчук Вадим Олександрович**

**УДК 621.45.04**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЦПГ ДВИГУНА В**  
**ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПО ТИСКУ ГАЗІВ В КАРТЕРІ**

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

\_\_\_\_\_ Мулярчук В.О.

**Керівник роботи**

**Борак К.В.**

доктор технічних наук, професор

**Житомир – 2024**

## АНОТАЦІЯ

**Мулярчук Вадим Олександрович. Оцінка технічного стану ЦПГ двигуна в експлуатації по тиску газів в картері. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.**

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

В магістерській проведено аналіз відомих способів оцінювання технічного стану циліндро-поршневої групи двигуна на можливість їхнього використання для безперервного контролю в процесі експлуатації показав доцільність використання як діагностичного параметра витрати картерних газів.

Розроблена методика визначення об'єму картерного простору дає змогу визначати об'єм картера двигунів типу Д-243 з імовірністю 95% і похибкою  $\pm 1\%$  за витрати повітря, що подається, з витратою не менше 40 л/хв.

Показано варіант модернізації системи вентиляції картера двигуна встановленням додаткового пристрою, що дає змогу діагностувати ЦПГ ДВЗ у процесі експлуатації за дослідженим методом, запропоновано два способи керування розробленим пристроєм і розроблено відповідні алгоритми керування, що дають змогу здійснювати оцінку технічного стану ЦПГ двигуна без відриву машини від експлуатації.

*Ключові слова: двигун, метод, діагностування, циліндро-поршнева група, технічний стан.*

## ANNOTATION

**Mulyarchuk Vadym Oleksandrovyh. Evaluation of the technical condition of the engine's CPG in operation by the pressure of gases in the crankcase. – Qualification work on the rights of the manuscript.**

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2024.

The master's thesis analyzed the known methods of assessing the technical condition of the cylinder-piston group of the engine for the possibility of their use for continuous monitoring during operation and showed the feasibility of using crankcase gas flow as a diagnostic parameter.

The developed methodology for determining the volume of the crankcase space makes it possible to determine the crankcase volume of Д-243 engines with a probability of 95% and an error of  $\pm 1\%$  at a flow rate of at least 40 l/min.

The paper shows a variant of modernization of the engine crankcase ventilation system by installing an additional device that allows diagnosing the internal combustion engine during operation using the investigated method, proposes two methods of controlling the developed device, and develops appropriate control algorithms that allow assessing the technical condition of the engine crankcase without interrupting the machine from operation.

Keywords: engine, method, diagnostics, cylinder-piston group, technical condition.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	9
1.1. Методи діагностування за робочими процесами і коливаннями кутової швидкості колінчастого вала.....	9
1.2. Аналіз засобів діагностики циліндро-поршньової групи двигунів.....	15
1.3. Підвищення ефективності діагностики ДВЗ.....	20
РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	26
2.1 Програма та методики експериментальних досліджень.....	26
2.2. Результати експериментальних досліджень з вимірювання об'єму картера ДВЗ.....	33
2.3. Результати експериментальних досліджень з вимірювання витрати картерних газів.....	39
РОЗДІЛ 3. ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ДОСЛІДЖЕНОГО МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ.....	45
3.1 Реалізація отриманих результатів досліджень.....	45
3.2 Алгоритм вимірювання витрати картерних газів.....	47
3.3 Розробка пристрою для реалізації алгоритму вимірювання витрати картерних газів у процесі експлуатації техніки з ДВЗ.....	50
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	57

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Висока продуктивність праці в сільськогосподарському виробництві неможлива без ефективного використання мобільних машин. Основним джерелом механічної енергії сучасних мобільних машин залишається дизельний двигун, і забезпечення його працездатності є важливим завданням. У процесі експлуатації дизеля його технічний стан змінюється і це призводить до зниження ефективності виконуваних робіт. Своєчасне виявлення такого стану двигуна дасть змогу унеможливити ненавмисну експлуатацію техніки та знизити витрати, пов'язані з експлуатацією такої техніки. Тому розробка методів спрямованих на своєчасне виявлення порушень технічного стану двигуна, і зокрема, його ЦПГ є актуальним завданням.

Під час діагностування тракторного дизеля в більшості випадків немає можливості безпосередньо виміряти структурний параметр без виведення техніки з експлуатації, тому необхідно використовувати такі діагностичні методи, які перебували б у тісному зв'язку зі структурним параметром і характеризували б його достовірною інформацією. Водночас на операції, пов'язані з розбиранням і складанням окремих вузлів двигуна, потрібні значні витрати часу, тому розвиток методів безрозбірної діагностики є актуальним завданням.

Найбільшого поширення на тракторах країни набули дизелі серії Д-243. Основне їхнє призначення - встановлення на сільськогосподарські трактори класу 1,4-2,0 т/с. А також інші машини промислового, сільськогосподарського, лісозаготівельного призначення. Широко застосовується на екскаваторах, навантажувачах, компресорних станціях і електрогенераторах.

Під час експлуатації тракторів завданням механізаторів є підтримання дизеля в межах максимально техніко-економічних показників. параметрів на необхідному рівні, тому завдання діагностування є елементом системного підходу до розв'язання завдання зниження загальних витрат на експлуатацію дизельного двигуна. Передбачені в експлуатації профілактичні та ремонтні заходи спрямовані на підтримання стану елементів конструкції на високому рівні.

Діагностика дизелів в умовах безперервного робочого циклу характеризується необхідністю оперативного, простого і недорогого виявлення несправностей.

**Об'єкт досліджень** – процес оцінки технічного стану ЦПГ.

**Предмет досліджень** – полягає у виявленні закономірності зміни швидкості наростання тиску в закритому картері від технічного стану ЦПГ.

**Мета роботи:** удосконалення методів оцінки технічного стану циліндропоршневої групи тракторного дизеля з використанням тиску відпрацьованих газів у картері двигуна.

У зв'язку з поставленою метою визначено **завдання досліджень:**

- розрахункове дослідження виконано з використанням методів математичного моделювання робочих процесів двигуна. Основні результати розрахункових досліджень і достовірність математичної моделі процесів у контролі стану ЦПГ перевірялися під час натурних експериментів;

- провести аналіз відомих способів оцінки технічного стану циліндропоршневої групи (ЦПГ) двигуна на можливість їх використання для безперервного контролю в процесі експлуатації;

- провести розрахункові дослідження впливу режиму роботи ДВЗ і стану ЦПГ на зміну тиску газів у закритому картері ДВЗ і виявити характерні режими та параметри;

- створити експериментальну установку і провести експериментальні дослідження з оцінки характерних режимів роботи двигуна та оціночних параметрів;

- розробити діагностичні параметри та провести експериментальну перевірку оцінювання стану ЦПГ з використанням запропонованих діагностичних параметрів.

**Методи наукового дослідження.** Розрахункове дослідження виконано з використанням методів математичного моделювання робочих процесів двигуна. Основні результати розрахункових досліджень і достовірність математичної моделі процесів у контролі стану ЦПГ перевірялися під час натурних експериментів.

Перелік **публікацій** за темою роботи:

1. Міненко С.В. **Мулярчук В.О.** Аналіз засобів діагностики циліндропоршнєвої групи двигунів. Сучасні вектори розвитку аграрної науки: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (ХДАЕУ, 17-18 вересня 2024 року). Херсон: ХДАЕУ, 2024. С. 358-363.

2. Грабар І. Г., **Мулярчук В.О.** Підвищення ефективності діагностики ДВЗ. Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. С. 315-319.

3. **Мулярчук В.О.** Розробка пристрою для реалізації алгоритму вимірювання витрати картерних газів у процесі експлуатації техніки з ДВЗ. Студентські читання–2024: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 31 жовтня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. С. 27-28.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практичний інтерес для аграрного виробництва представляє розроблений метод оцінки технічного стану

циліндрпоршневої групи тракторного дизеля з використанням тиску відпрацьованих газів у картері двигуна.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 14 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 58 сторінок комп'ютерного тексту, містить 21 рисунок.



## РОЗДІЛ 1

### СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 1.1. Методи діагностування за робочими процесами і коливаннями кутової швидкості колінчастого вала

Наявні безстендові засоби діагностування недостатньо універсальні, вирізняються різноманіттям діагностичних параметрів, що використовуються, і не дають змоги вимірювати багато показників робочих процесів, необхідних для ідентифікації технічного стану кожного однойменного елемента в складі ДВЗ.

Метод діагностування за параметрами коливань, що періодично повторюються, ґрунтується на аналізі робочих процесів, що протікають в однойменних елементах ДВЗ, кінематично пов'язаних із положенням колінчастого вала. Такими параметрами є коливання:

- електричних величин у колах системи запалювання та електрообладнання;
- кутової швидкості деталей, що обертаються;
- рівня шуму та вібрації;
- тиску в системах повітро- і паливоподачі, газообміну;
- температури відпрацьованих газів, створюваній у межах кутових або часових інтервалів, що відповідають певним робочим тактам і порядку роботи циліндрів.

Відхилення амплітудно-фазових параметрів зазначених величин за кутом повороту колінчастого вала, у межах повного кінематичного циклу (для 4-тактного ДВЗ – двох обертів колінчастого вала) від нормативно допустимих, свідчать про аномалії робочих процесів у конкретних однойменних ланках.

Метод діагностування однойменних елементів системи запалювання за характерними осцилограмами зміни напруги в первинному і вторинному колах за час між послідовними іскровими розрядами в циліндрах є одним із найдосконаліших.

Пристроями типу К-484, що реалізує цей метод, обладнано мотор-тестери К-461, К-488, КИ-5524, Paltest JT-302 (Чехія), Elkon S-300 (Угорщина), SUN (США) [4,5,6]. За результатами порівняння осцилограм перехідних процесів у ланцюзі запалювання за послідовної роботи циліндрів визначають асинхронізм іскроутворення та кута замкнутого стану контактів переривника, різницю пробивних напруг на свічках запалювання та кутів випередження запалювання, низку інших параметрів.

Однак цим методом неможливо оптимізувати значення кута випередження запалювання для конкретного технічного стану ДВЗ і перевірити ефективність роботи відцентрового вакуумного регулятора залежно від навантажувального і швидкісного режимів.

**За параметрами зміни напруги (струму).** У даному способі аналізуються сигнали напруги акумуляторної батареї, електричного струму, що подається на стартер, і оборотів колінчастого вала в процесі холодного і теплого запуску двигуна. Зазначено характеристики та закономірності сигналів, пов'язаних із порушеннями компресії та згоряння двигуна, що пов'язані з кілометражем, пройденим кожним автомобілем після останнього ремонту двигуна, і часом зупинки двигуна в прогрітому стані.

Багато досліджень, пов'язаних з аналізом роботи системи запуску ДВЗ, зосереджені на діагностиці стартера та/або акумулятора на основі вимірів або моделювання струму та напруги [3, 5, 6, 8]. Щодо аналізу роботи двигуна під час процесу запуску, зарубіжні науковці Кім Х.В., Лі С.К. у роботі [4] оцінили вплив продування на зазначений середній ефективний тиск у процесі холодного запуску на двох чотирициліндрових дизелях об'ємом 1800 і 1900 см<sup>3</sup>, отримавши, що через низьку частоту обертання колінчастого валу у перших циклах, втрати на

прорив збільшуються, оскільки гази мають більше часу для виходу з камери та, як наслідок, знижується на зазначений середній ефективний тиск. Крім того, прорив газів було зменшено приблизно на 10% на низькій швидкості за рахунок зміни торцевого зазору першого компресійного кільця.

Прорив газів на низькій швидкості також теоретично досліджувався вченими Сяо Г.Ф., Цяо С.Ц., Хуан Цз., Чень З.П. [9]. Розроблена модель передбачає, що прорив знижується приблизно на 9% за рахунок збільшення швидкості з 250 об/хв<sup>-1</sup> до 1000 об/хв<sup>-1</sup>. Крім того, було досліджено вплив додаткового об'єму камери згоряння, який створюють зазори, і було виявлено зниження максимального тиску стиснення і температури через збільшення об'єму камери і зменшення ступеня стиснення. Худець Й., Шаркан Б., Чодерова Р. у дослідженні [3] виконують вимірювання тиску в циліндрах і частоти обертання колінчастого вала з виявленням верхньої мертвої точки на двох дизельних двигунах: одноциліндровому з повітряним охолодженням і шестициліндровому з водяним охолодженням, отримуючи зниження кількості обдування приблизно на 12%. за рахунок негерметичності збільшують частоту обертання колінчастого вала з 250 об/хв<sup>-1</sup> до 1100 об/хв<sup>-1</sup>. Встановлено, що через негерметичність знижується максимальна температура в камері згоряння, що призводить до пропусків запалювання.

Пщуківський Я.В. [6] співвідносить температуру довкілля з мінімальними умовами частоти обертання двигуна, тиску впорскування та заряду повітря на початку впорскування палива різних ДВЗ, виявивши, що в разі зниження температури мінімальні оберти двигуна та компресія для запуску двигуна мають бути вищими. Однак у цих роботах не робиться жодного зв'язку зі стартовою продуктивністю системи. В інших роботах виявляються зміни струму і напруги системи запуску через несправності або зміни конфігурації ДВЗ.

Грахалес Х.А., Кінтеро Х.Ф., Лопес Х.Ф. та ін. [1] визначають вплив витіку циліндра та пропусків запалювання на роботу системи запуску, отримуючи, що через витік струм знижується приблизно на 30%, а стабілізація

частоти обертання колінчастого вала затримується приблизно на 0,1 с. Через пропуск запалювання впливу на струм немає, але спостерігається затримка стабілізації частоти обертання колінчастого вала близько 0,5 с.

У цих роботах аналізується процес холодного запуску одного двигуна і вимірюються інвазивні змінні, такі як тиск у камері згоряння або прорив газу, а для встановлення датчиків потрібні адаптації або модифікації. Вимірювання інвазивних змінних може ускладнити експерименти, якщо буде використовуватися кілька двигунів.

Баїр Р., Бей О.Ф. [6] представляють графічну залежність напруги від струму, яка вказує на відмову ДВЗ. При цьому несправність двигуна не вказується.

Віброакустичний метод діагностування. Процес отримання даних проводиться щодо вібраційних сигналів шляхом зміни параметрів вибірки (часу та частоти збору даних), щоб мати якомога більший набір даних, який дає змогу повністю охарактеризувати вібраційний статус циліндрів та виконати аналіз циклів згоряння двигуна. З цією метою всі дані були відсіяні через фільтр нижніх частот з частотою зрізу 2,5 кГц, відповідно до характеристичних частот згоряння, які особливо проявляються при частоті 5 кГц [4,7] і частоті обертання двигуна 1500 об/хв.

Потім проводиться аналіз даних вібрації для оцінки якості процесу згоряння циліндрів. Отримані сигнали оцінюються як енергетичний зміст розкладеного за складовими вібраційного сигналу.

Наприклад, на рис. 1.1 показано отриманий сигнал вібрації (угорі) щодо збирання даних приблизно за 12 циклів двигуна і відповідний відфільтрований сигнал (унизу). Це дає змогу визначити найбільш підходяще налаштування процедури для оцінювання ефективності роботи камер згоряння.

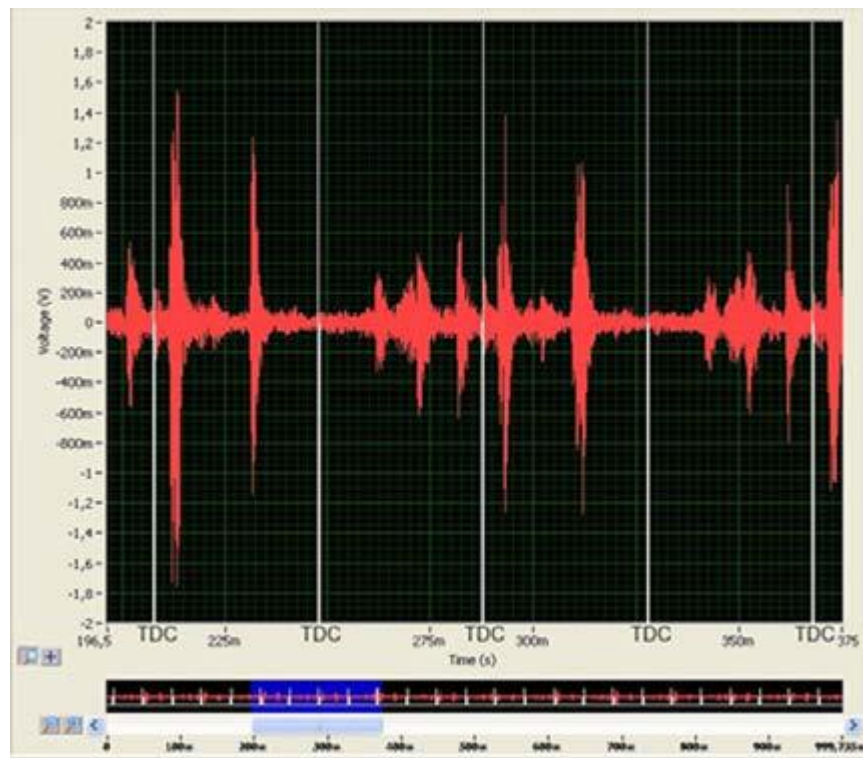


Рис. 1.1. Приклад віброцигнала [4].

Використання сигналів механічної вібрації та акустичної емісії для діагностики несправностей у компонентах двигуна значно розширилося завдяки прогресу в алгоритмах цифрового оброблення сигналів і методах їх реалізації [4]. Такі методи не є інтрузивними і забезпечують високу ефективність виявлення щодо вимірювання тиску в циліндрі та зміни кутової швидкості кривошипа. Перший, по суті, передбачає встановлення датчика тиску в кожен блок циліндрів із надмірним ускладненням і зусиллям, а другий, широко використовуваний для виявлення пропусків запалювання, має низьку ефективність виявлення на перехідних обертах двигуна [4]

У роботі [12] представлено результати експериментального аналізу на багатоциліндровому дизелі; у такому дослідженні неінтрузивні вимірювання вібрації застосовують для розроблення методології моніторингу та оптимізації режиму згоряння шляхом порівняння з даними про тиск у циліндрах. У дослідженні, докладно описаному в [12], описується розробка системи моніторингу згоряння двигуна в режимі реального часу, заснованої на вимірах

акустичної емісії двигуна, з особливою увагою до виявлення аномальних режимів згоряння, таких як детонація і пропуски запалювання.

Що стосується методологій аналізу отриманих сигналів, деякі з традиційних методів, використовуваних для діагностики несправностей, включають спектри потужності в часовій або частотній області, які пропонують ефективний метод діагностики обладнання [12].

Однак традиційні методи аналізу не завжди ефективні для застосування в певних критичних умовах, про що свідчить робота [12], в якій на аналіз частотно-тимчасової області, що застосовується до вібраційних сигналів для діагностичних цілей, істотно впливає фоновий шум. Причому миттєві варіації сигналів не могли бути визначені за допомогою амплітудного аналізу в частотній області. Це випадок застосування швидкого перетворення Фур'є або короткочасного перетворення Фур'є [13], заснованого на вікнах фіксованого розміру в частотно-часовій області.

Вейвлет-аналіз – це сучасна технологія опрацювання сигналів, у якій сигнал для вилучення ознак [11] можна вивчати з урахуванням його наближень і деталей. Різні частоти можна витягти для вивчення окремо, що спрощує аналіз сигналів. Метод вейвлет-перетворення використовували як для тимчасової, так і для частотної роздільної здатності, і він міг мати шкалу, яка автоматично налаштовується, для адаптації до сигналу.

У статті [12] розкладання сигналів акустичного тиску за допомогою вейвлет-перетворення застосовується для виявлення різноманітних несправностей двигуна, включно з пропуском запалювання в циліндрах.

Сигнали тиску розкладаються, згідно з теоремою Парсеваля [7], на наближені сигнали та детальні складові з використанням методу вейвлет-багатомасштабного аналізу. На основі таких даних розпізнавання відмов здійснюється за допомогою відповідної штучної нейронної мережі.

У роботі [12] Вудж.Д., Лю Ч.Х. застосували алгоритм безперервного вейвлет-перетворення як до вібраційних, так і до акустичних сигналів,

показавши його ефективність під час діагностики несправностей ДВЗ і його системи охолодження, але автоматичну процедуру виявлення й розпізнавання несправностей, що ґрунтується на кількісних характеристиках сигналу, не розвинуто. Ба більше, у [12] Вудж.Д., Лю Ч.Х. запропонували систему діагностики несправностей, засновану на методі з використанням сигналів звукового випромінювання. Натомість у [18] розпізнавання несправностей ДВЗ за допомогою методу нейронної мережі було досліджено на основі функцій, що забезпечуються застосуванням цієї методики до різноманітних сигналів тиску.

## **1.2. Аналіз засобів діагностики циліндро-поршньової групи двигунів**

У сільському господарстві використовують пересувні, стаціонарні та переносні комплекти контрольно-діагностичних засобів. Вони є зовнішніми щодо об'єкта діагностування і вимірюють багато фізичних величин, переважно статичного характеру. Перспективні електронні засоби (автоматизований машинотестер, мотор-тестер, гідротестер, індикатор потужності двигуна) побудовані на вимірюванні динамічних параметрів, що швидко змінюються.

У двигуні з повітряним охолодженням стінки циліндрів піддаються впливу повітряного потоку, що забезпечує основний метод охолодження двигуна. За допомогою Аналізатора герметичності циліндрів (АГЦ) (рис. 1.2) можна достовірно і точно (не розбираючи двигун) оцінити окремо технічний стан усього клапанного механізму, гільз циліндрів, компресійних і маслосніжних кілець.

Діагностика цим приладом не відрізняється від вимірювання компресії.

Усі вимірювання проводяться в процесі «провертання» двигуна стартером або пусковим пристроєм через свічкові або форсункові отвори.

Переваги АГЦ полягають у простоті процесу діагностики і водночас у високій інформативності результатів вимірювань. Плюси приладу в тому, що в якому б стані не перебував акумулятор, його стан не вплине на якість

діагностики. Необов'язково знати номінальне значення компресії для кожного двигуна, щоб порівняти його з результатами діагностики, а тільки необхідно знати марку пального, на якому працює діагностований двигун.



Рис. 1.2. Аналізатор герметичності циліндрів.

Параметри, що діагностуються, звіряються з еталонними діаграмами для цього виду палива й оцінюється стан ЦПГ. Закладено діагностичні схеми для АІ-80, АІ-92-95-98 і дизельного палива. А якщо транспортний засіб поперемінно працює на бензині та газі, то діаграму слід використовувати для цієї марки бензину. Наявність двох оригінальних клапанів в аналізаторі дає можливість виміряти за допомогою вакуумметра два значущі параметри під час «провертання» двигуна стартером: P1 і P2. Величина загального вакууму (P1) вимірюється в просторі над поршнем (рис. 1.3), під час такту впуску через вакуумний клапан.

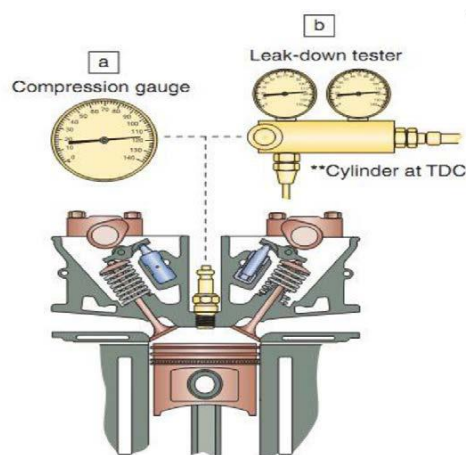


Рис. 1.3. Схема вимірювання загального вакууму.



Перед вимірюванням, під час попереднього такту стиснення, циліндр продувається через редукційний клапан низького тиску (0,01 бар).

Отримане значення загального вакууму дає змогу оцінити зношення стінки циліндра (вкладиша) і щільність у сполученні клапана та сідла.

Однак параметр P1 не дає змоги оцінити стан поршневих кілець; наявність масляного «клина» дає змогу підтримувати досить високий вакуум у просторі над поршнем. Ступінь зносу поршневих кілець оцінюють шляхом вимірювання другого параметра – залишкового вакууму (P2).

Витратомір картерних газів (модернізований) КИ-17999М

Витратомір картерних газів КИ-17999М призначений для визначення об'ємної витрати плавно мінливого потоку газів, що прориваються з камер згоряння через кільцеві ущільнення поршнів у картерний простір дизельних і карбюраторних двигунів.

КИ-17999М являє собою витратомір постійного перепаду тиску з кільцевим звужувальним пристроєм. Циліндричний корпус витратоміра забезпечений ущільненням для сполучення з маслозаливною горловиною двигуна (рис. 1.4). З метою підвищення точності вимірювань витрати газів у звужувальному пристрої використовується змінна втулка.



Рис. 1.4. Витратомір картерних газів КИ-17999М.

KI-17999M використовується для визначення технічного стану циліндропоршневої групи двигунів, визначення їхнього залишкового ресурсу, а також для ресурсу перед поточним ремонтом у стаціонарних і польових умовах обслуговування МТП на СТО, ремонтних майстернях і пунктах технічного обслуговування машин.

Вітчизняний і зарубіжний досвід показує, що одним із найважливіших засобів підвищення якості, надійності та економічної ефективності використання машин є застосування систем вбудованого діагностування, що усувають демонтаж і розбирання механізмів і агрегатів. Необхідність комплексної безрозбірної оцінки технічного стану машин і механізмів у робочих умовах висуває на передній план саме методи вбудованого діагностування як найбільш чутливі до різних відхилень від норми параметрів технічного стану.

Діагностичні засоби для визначення технічного стану електронних систем керування поділяються на три категорії:

1. Стаціонарні (стендові) діагностичні системи під'єднуються до бортового електронного блоку керування (ЕБУ) і не залежать від бортової діагностичної системи машини. Ці пристрої зазвичай діагностують окремі механізми двигуна та системи запалювання, їх часто називають мотор-тестерами (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Мотор-тестер.

Сучасні мотор-тестери можуть видавати інформацію про стан системи запалювання у вигляді цифр - осцилограми процесу. За допомогою мотор-тестера

можна визначати стан двигуна (за потужністю, що розвивається, балансом потужності за циліндрами, відносною компресією), стартера, генератора, реле-регулятора, акумулятора, переривника-розподільника, електропроводів, свічок запалювання, лямбда-зонда, форсунок системи упорскування бензинових двигунів, дизельної паливної апаратури, встановлювати кути випередження запалювання для бензинових двигунів та впорскування для дизельних двигунів за допомогою стробоскопа.

2. Бортове діагностичне програмне забезпечення, яке дає змогу індикувати несправності відповідними кодами. Системи програмного забезпечення автомобілів, починаючи з 80-х рр., забезпечуються функцією зчитування кодів несправностей за допомогою контрольної лампи CheckEngine («Перевір двигун»).

3. Бортове діагностичне програмне забезпечення, для доступу до якого потрібен спеціальний додатковий діагностичний пристрій. Зчитування інформації з такого програмного забезпечення здійснюється за допомогою спеціальних пристроїв - сканерів.

Контрольовані параметри і коди несправностей зчитуються безпосередньо з ЕБУ та інтерпретуються фахівцями сервісу.

Сканером, або скануючим приладом (рис. 1.6), називають портативні комп'ютерні тестери, зазвичай з дисплеєм на рідких кристалах, які слугують для діагностування різних електронних систем керування за допомогою зчитування цифрової інформації з діагностичного роз'єму машини.



Рис. 1.6. Діагностичний сканер Launch X431 Diagun IV.

Сканер перевіряє вхідні та вихідні параметри електричних ланцюгів та інформує оператора про їхню величину. Таким чином, сканер лише фіксує наявність або відсутність несправностей у будь-якому вузлі, але не дає змоги визначати їхні причини, яких може бути багато для одних і тих самих значень контрольованих параметрів.

### **1.3. Підвищення ефективності діагностики ДВЗ**

Оцінка стану ЦПГ за витратою картерних газів також добре досліджений спосіб, який за результатами вимірної витрати газів, що виходять із картера двигуна, дає змогу оцінити ступінь працездатності ЦПГ. Відмінність між пропонованими способами відносяться, в основному, до методів вимірювання витрати.

Методика визначення витрати картерних газів (рисунок 1.9) докладно описана в літературі [3, 5, 6] і полягає в під'єднанні до картерного простору 6 (наприклад, через маслозаливну горловину 9) газового витратоміра 8. Для забезпечення стабільності вимірювань кількості газів, що пройшли з циліндра 1, їх відкачують із картера 6 за допомогою вакуумного насоса 7 або ежектора 4, встановленого у випускному колекторі 3 після випускного клапана 2, а тиск перед витратоміром 12 підтримують постійним за допомогою регульованого дроселя 7, що контролюють за допомогою п'єзометра 10.

До недоліків викладеного методу слід віднести залежність від теплового стану двигуна, частоти обертання і навантаження, кількості моторного мастила в зоні компресійних кілець, складність локалізації причини несправності, потрібен монтаж системи вимірювання витрати картерних газів, що ускладнює його використання під час роботи двигуна в процесі експлуатації.

На відміну від викладеного способу вимірювання за допомогою витратоміра, запропоновано за швидкістю зміни тиску в картері ДВЗ [3]. Спосіб

дає змогу після проводити оцінку витрати картерних газів у процесі експлуатації машини.

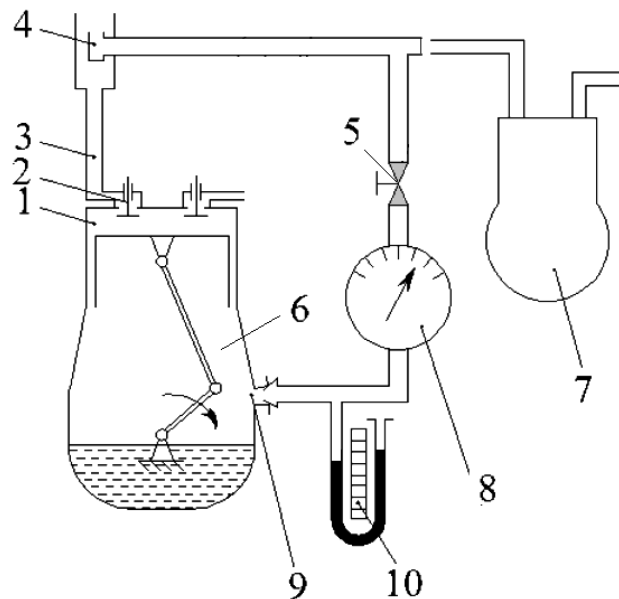


Рис. 1.7. Схема вимірювання витрати в картер газів.

Для підвищення достовірності способу необхідно враховувати конструктивні особливості ДВЗ і вплив режиму його роботи.

Оцінювання технічного стану ЦПГ за коливаннями тиску в картері ДВЗ ґрунтується на реєстрації датчиком характеру зміни тиску при працюючому двигуні за допомогою діагностичного сканера (Мотортестер MotoDoc III, USB Autoscope IV та ін.) [5, 8]. Пропонується застосовувати датчик тиску з діапазоном  $\pm 100$  кПа.

Приклад осцилограм пульсацій тиску в картері двигуна, що працює на холостому ході, показано на рисунку 10. Для справного ДВЗ піки тиску від усіх циліндрів розташовані приблизно на одному рівні (рис. 1.8 а). Для ДВЗ з одним несправним циліндром відзначаються піки з підвищеним тиском, що виділяються серед інших (рис. 1.8 б).

Даний спосіб може використовуватися в процесі експлуатації машини і не вимагає її розбирання для встановлення вимірювальної системи, якщо датчик буде встановлений заздалегідь і задіяний у вимірювальній системі машини. Спосіб дає змогу визначити несправний циліндр у разі синхронізації коливань тиску з кутом повороту колінчастого вала. До недоліків методу можна віднести

малу достовірність щодо технічного стану несправного циліндра та наявність високого рівня перешкод під час реєстрації сигналу.

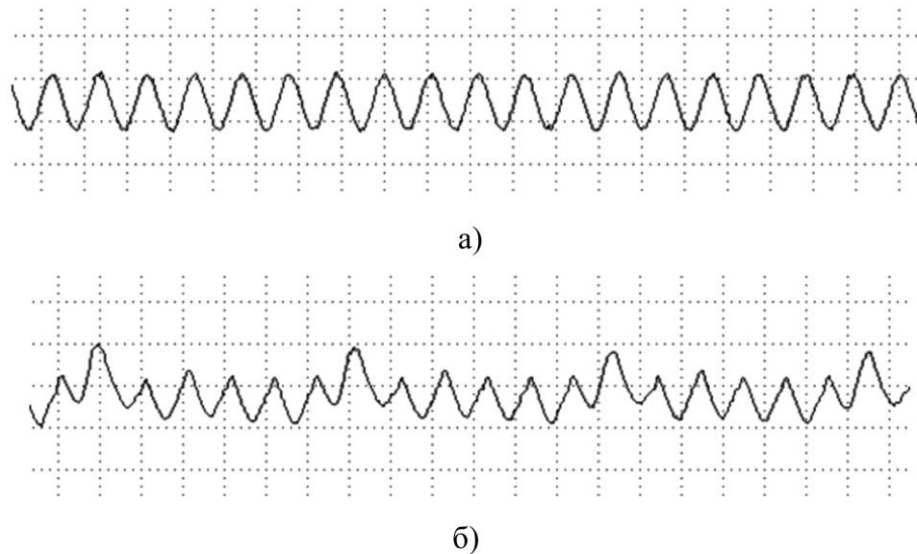
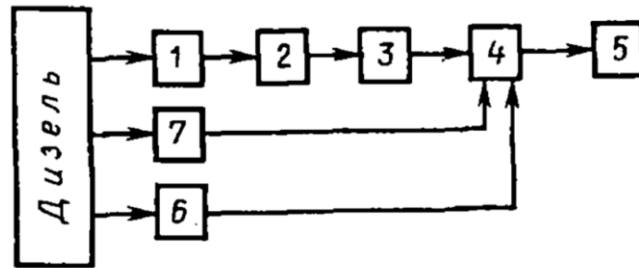


Рис. 1.8. Приклад коливань тиску в картері ДВЗ а – справний двигун; б – двигун з одним несправним циліндром.

Діагностування рухомих деталей машин може бути реалізовано використанням аналізу віброакустичних процесів, і цьому способу присвячено багато робіт [1, 3, 13, 16], деякі з них знайшли застосування для оцінки технічного стану ЦПГ дизеля [4, 5, 6, 9,]. Спосіб потребує спеціалізованого обладнання з реєстрацією процесу вібрації та подальшої розшифровки цього сигналу (рисунок 1.9,а).

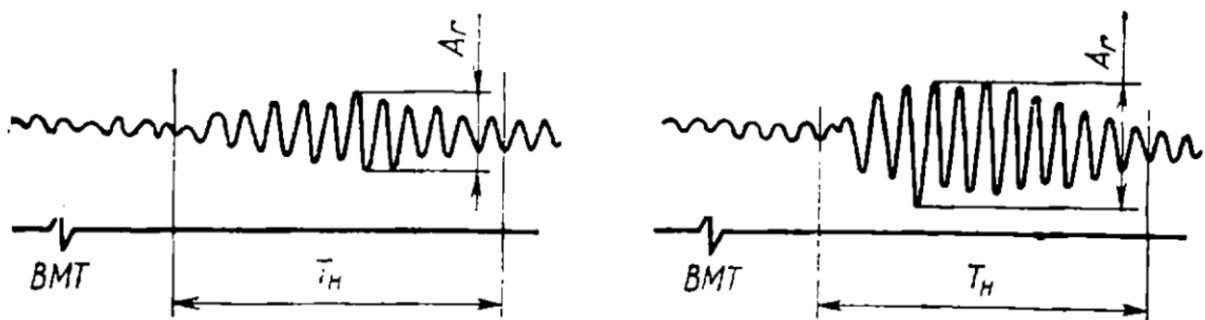
Приклад такого сигналу для ДВЗ зі справною і зношеною ЦПГ показано на рис. 1.9, б, в. Стан ЦПГ оцінюється за амплітудою  $A_r$  і тривалістю  $T_n$  реєстрованого вібропроцесу.

Акселірометр рекомендується закріплювати якомога ближче до циліндра ДВЗ (не далі 50 мм від циліндра) для отримання достатньої якості корисного сигналу. Зазначається, що максимальна інтенсивність корисного сигналу спостерігається в частотному діапазоні 2...4 кГц під час перекидання поршня у ВМТ і вібросигнал має найбільшу інформативність. Однак спосіб не дає змоги з високим ступенем достовірності отримувати інформацію про технічний стан ЦПГ через вплив перешкод, пов'язаних із процесом згоряння.



1 – акселерометр; 2 – передпідсилювач; 3 – смуговий фільтр; 4 – осцилограф; 5 – реєстратор; 6 – датчик ВМТ; 7 – датчик початку реєстрації.

а)



б)

Рис. 1.9. Діагностування віброакустичним способом. а – схема використання спеціалізованого обладнання; б – справна ЦПГ; в – зношена ЦПГ.

Перевага способу полягає у відсутності необхідності зупинки машини в процесі перевірки і може використовуватися під час її експлуатації. Однак низька достовірність потребує пошуку рішень щодо алгоритму обробки сигналу з метою підвищення якості оцінки.

У роботі [9] наводиться теоретичне обґрунтування нового методу діагностики циліндропоршневої групи двигунів внутрішнього згорання за характером зміни тиску картерних газів. Особливість полягає в проведенні вимірювань під час роботи двигуна в динамічному режимі за тимчасового роз'єднання картера з атмосферою.

Сутність ідеї полягає в пропозиції вимірювати не безпосередньо витрату картерних газів, а їхній тиск. При цьому процес вимірювання витрати картерних газів передбачається проводити в період динамічного самонавантаження двигуна

з постійно відкритою дросельною заслінкою. Тобто двигун також переводиться в режим динамічного розгону-вибігу методом вимкнення-ввімкнення подачі палива [9]. Крім цього в період розгону двигуна його картер має бути загерметезований від навколишнього середовища. Тиск у картері є діагностичним параметром, пропорційним кількості газів, що прориваються через ЦПГ, і відображатиме величину нещільності циліндропоршневої групи.

До недоліку цього методу можна віднести складність забезпечення рівності прискорень обертання вала під час розгону, що є некерованим процесом і знижує достовірність отриманих результатів.

### **Висновки по першому розділу**

Оцінювання технічного стану ЦПГ поршневого двигуна в процесі експлуатації дає змогу вчасно вжити заходів щодо усунення несправності та зменшити інтенсивність зносу двигуна і витрату ПММ.

Більшість способів визначення діагностичних параметрів потребує спеціального обладнання та часткового розбирання двигуна, що неможливо виконувати в процесі експлуатації машини, вимагає її виключення з роботи і зазвичай виконується за явної наявності несправності. Деякі з них мають малу достовірність або тривалий період оцінки.

Серед розроблених способів оцінки технічного стану ЦПГ є такі, що можуть бути використані для безперервного контролю стану ЦПГ у процесі експлуатації машини без її виключення з роботи. До таких способів можна віднести такі, що використовують як діагностичний параметр витрату картерних газів.

Для практичної реалізації способів необхідно дослідити характер зміни діагностичних параметрів і технологічний процес їхнього вимірювання, що забезпечує добру достовірність оцінювання технічного стану ЦПГ з урахуванням експлуатаційних чинників, що на них впливають.



На підставі аналізу робіт проведених досліджень за даним напрямом впливає, що даний напрям залишається актуальним і ще багато завдань потребує розв'язання для діагностування ДВЗ у процесі експлуатації машини без відриву її від виконання технологічних завдань.

## РОЗДІЛ 2

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 2.1 Програма та методики експериментальних досліджень

Дослідження з вимірювання витрати картерних газів проводилися на лабораторній базі кафедри агроінженерії та технічного сервісу Поліського національного університету на двигунах Д-240 і Д-243.

Дизель Д-243 і його модифікації є подальшим удосконаленням моторним заводом двигуна Д-240 і являє собою чотиритактний поршневий чотирициліндровий двигун внутрішнього згоряння з рядним вертикальним розташуванням циліндрів, безпосереднім впорскуванням дизельного палива і займанням від стиснення. Детальніший опис двигуна наведено в керівництві з експлуатації [4].

Усі наявні виконання дизеля Д-243 і його модифікацій можна розділити на дві принципово різні комплектації, що відрізняються способом сумішоутворення, який визначається спільним застосуванням головки циліндрів з певним видом впускних каналів, поршнів з оригінальною камерою згоряння і комплекту форсунок з певним розпилювачем. У межах однієї комплектації зазначені деталі можуть використовуватися тільки спільно. Загальний вигляд двигуна Д-243 представлений на рис. 2.1.

У процесі проведення випробувань досліджуваній двигун було встановлено або на гальмівному стенді СТУ-45, або на тракторі МТЗ-80.

Схему випробувального стенда СТУ-45 без навантажувального реостата показано на рис. 2.2, а докладний опис стенда можна знайти в літературі [3, 4, 8, 9].

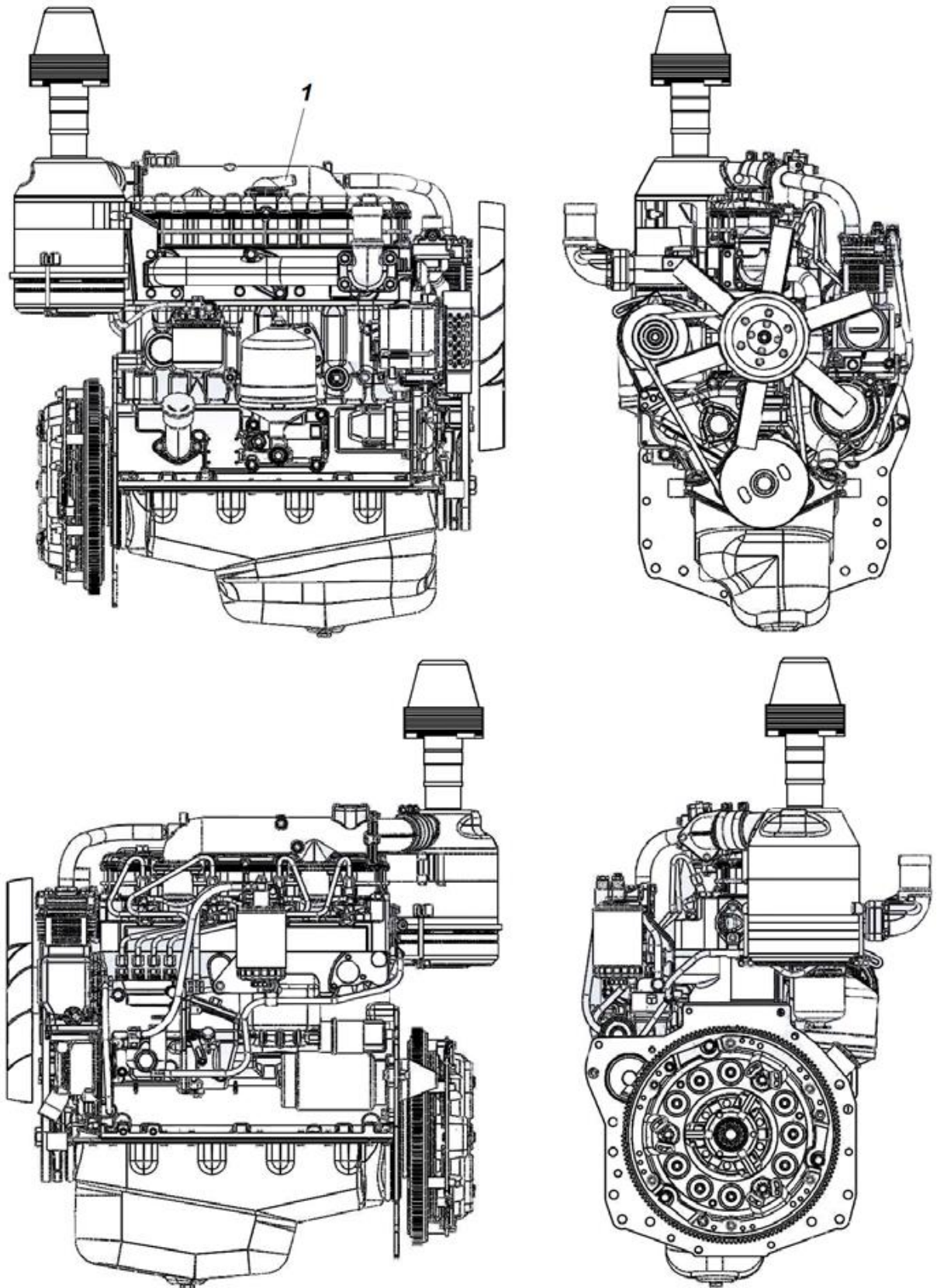


Рис. 2.1. Дизель Д-243.

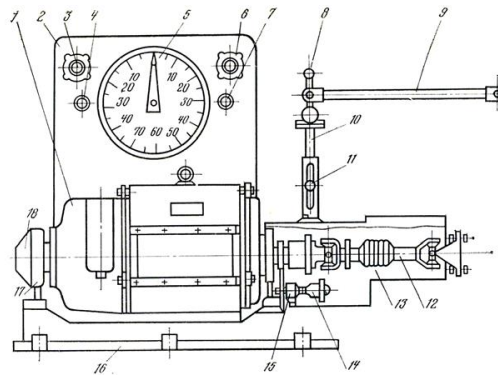


Рис. 2.2. Схема випробувального стенда СТУ-45: 1 – балансирна електромашина; 2 – пульт контрольних приладів; 3 – вимірювач електротахометра; 4 – термометр для води; 5 – циферблат вагового механізму; 6 – манометр; 7 – термометр для мастила; 8 – важіль керування подачею палива; 9 – тяга важеля; 10 – рухома колонка; 11 – затискний болт; 12 – карданний вал; 13 – захисний кожух; 14 – датчик електротахометра; 15 – привід тахометра; 16 – монтажна плита; 17 – задня стійка; 18 – кришка.

Встановлені для випробувань на стенді двигун Д-240 показано на рис. 2.3 а і двигун Д-243 на рис. 2.3 б.

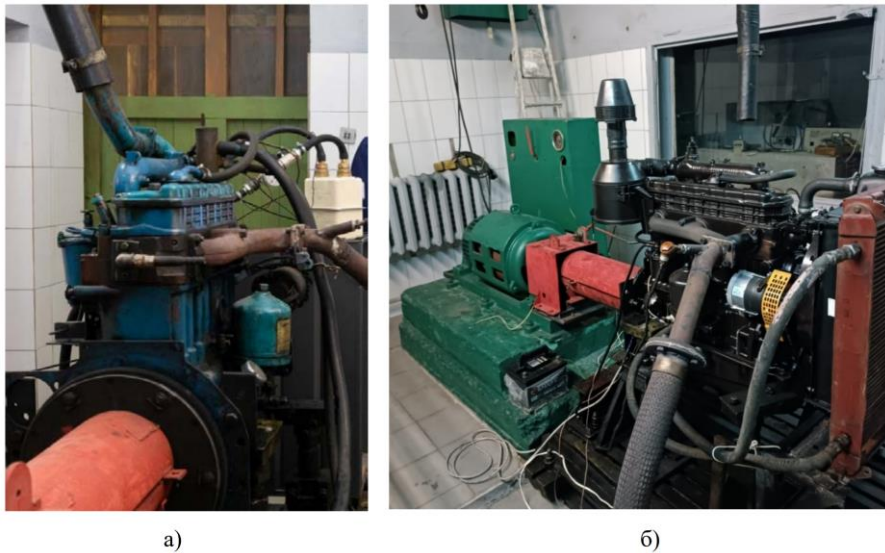


Рис. 2.3. Загальний вигляд установлених на стенді двигунів: а) – двигун Д-240; б) – двигун Д-243.

Випробування двигуна Д-240 у складі трактора МТЗ-80 проводили в лабораторії під'єднанням вимірювальної системи до патрубку відведення картерних газів, як показано на рис. 2.4.



Рис. 2.4. Монтаж вимірювальної системи на двигун Д-240 у складі трактора МТЗ-80.

Як описувалося раніше в 3-му розділі, об'єм картерного простору ДВЗ впливає на швидкість наростання тиску в картері в разі перекриття відводу газів, на амплітуду коливань тиску в картері під час руху поршнів. Тому в процесі дослідження характеру зміни тиску в картері двигуна необхідно знати його об'єм.

Величина об'єму картерного простору в літературі з ДВЗ практично не розглядається і в технічній документації на ДВЗ не позначається. Конфігурація об'єму картерного простору має досить складну форму і вимірювання об'єму картерного простору є непростим завданням.

Процес вимірювання виконувався таким чином:

1 Від джерела стисненого повітря 1 (ресивер компресора моделі STRATOS50) через газовий редуктор 2 (БГО-250) з манометром 3 подається повітря, витрата якого  $Q_{\text{кгс}}$  реєструється газовим витратоміром 8 (газовий лічильник Газдевайс NPM-G4) і регулюється краном 4.

2. Після встановлення режиму потоку і реєстрації витрати витратоміром 8 вмикається система реєстрації 9 часу і тиску в картері за допомогою датчика тиску 7 (модель ManoverMR-4216-3829).

3. Перекривається кран виходу повітря 6.

4. При досягненні заданого тиску, що реєструється за манометром 5, перекривається кран 4 і триває реєстрація зміни тиску в картері (наявність витоків газу з простору) вимірювальною системою 9 протягом  $\approx 1$  хв.

5. Відкривається кран 6 і надлишковий тиск стравлюється з вимірюваного об'єму.

6. За результатами отриманих вимірювань визначаються:

- початковий тиск у картері  $P_1$ ;

- час  $\Delta t$  підвищення тиску до  $P_2$ ;

- кількість повітря, що надійшло за цей час у картер,  $\Delta V = Q_{\text{кг}} \cdot \Delta t$ ;

- падіння тиску в картері  $\Delta P_y$  після перекриття крана 4 за такий самий час  $\Delta t$ ;

- розраховується об'єм картера за формулою.

Для подачі стисненого повітря використовувався компресор моделі STRATOS50.

Вимірювання витрати картерних газів проводили на працюючому двигуні або на випробувальному стенді, або на тракторі. Випробування на стенді давали змогу змінювати не тільки частоту обертання вала двигуна, а й змінювати навантаження гальмівною установкою стенда [3, 4]. Систему вимірювання витрати картерних газів підключали до патрубку 1 (рис. 2.5), з якого видаляли шланг відведення картерних газів у впускний колектор двигуна.

Схему підключення газового витратоміра показано на рис. 2.5.

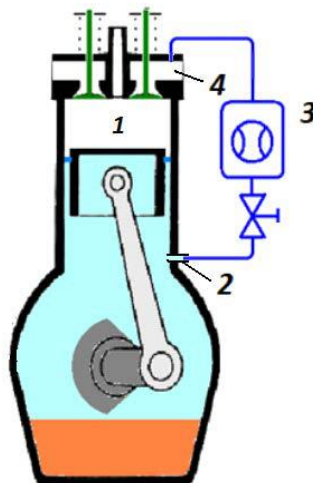


Рис. 2.5. Схема вимірювання витрати картерних газів двигуна: 1 – двигун; 2 – патрубок відведення картерних газів; 3 – газовий лічильник NPM-G4; 4 – впускний колектор.

Процес вимірювання виконувався таким чином (рис. 2.5) [8].

1. З патрубка 2 відведення картерних газів двигуна видалявся шланг відведення газів.
2. До патрубка 2 підключався шланг із газовим лічильником 3, вихід із якого під'єднується до впускного колектора 4 замість видаленого шланга.
3. Після запуску і прогріву двигуна 1, встановлюється необхідний режим роботи двигуна.
4. Проводиться вимірювання об'єму  $\Delta V$  (л) газу, що проходить, газовим витратоміром 8 (газовий лічильник Газдевайс NPM-G4) за певний інтервал часу  $\Delta t$  (с).
5. Дані вимірювань реєструються і двигун переводиться на наступний режим роботи.
6. Роботи за пунктами 4 і 5 повторюються до завершення всіх вимірювань.
7. Двигун зупиняється і приводиться у вихідний стан.
8. За результатами вимірювань визначається витрата картерних газів  $Q_{кг}$  для кожного режиму.

Вимірювання витрати картерних газів на певному режимі роботи двигуна і реєстрацію зміни тиску в картерному просторі на цьому ж режимі роботи двигуна проводили за методикою, яка відрізняється від викладеної в попередньому розділі. Система вимірювання містила не тільки визначення витрати картерних газів, а ще й реєстрацію тиску газу в картері двигуна. Схема підключення вимірювальної системи показана на рис. 2.6.

Процес проведення досліджень виконується таким чином (рис. 3.6) [8]:

- 1) Вимірювальну систему витрати газу і тиску в картерному просторі під'єднують до патрубка відведення газів із картера (рис. 3.1, поз.1).
2. Кран 2 переводиться в положення «відкритий».
3. Вмикається система реєстрації 7 і переводиться в режим готовності.
4. Після запуску і прогрівання двигуна встановлюється необхідний режим роботи двигуна.

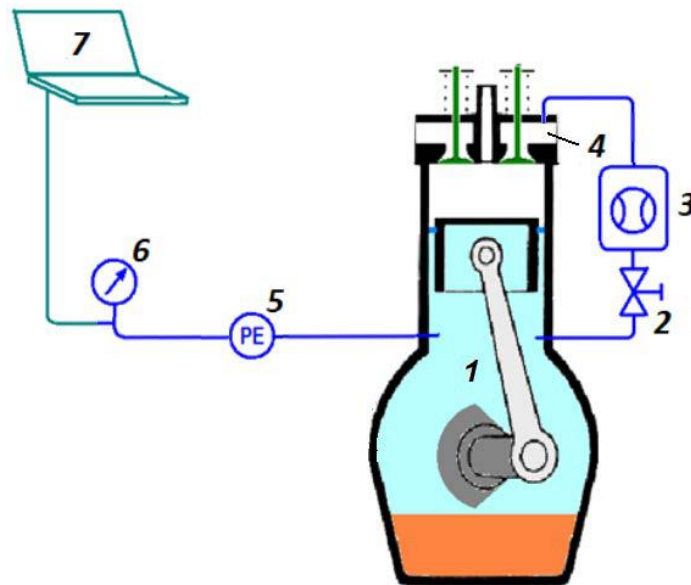


Рис. 2.6. Схема реєстрації витрати картерних газів двигуна і тиску в картерному просторі: 1 – картер двигуна; 2 – кран; 3 - газовий лічильник; 4 - впускний колектор; 5 – датчик тиску; 6 - манометр; 7 - система реєстрації.

5. Проводиться вимірювання об'єму  $\Delta V$  (л) газу, що проходить, газовим витратоміром 3 (газовий лічильник Газдевайс NPM-G4) за певний інтервал часу  $\Delta t$  (с).

6. Вмикається режим запису системою 7 реєстрації тиску в картері датчиком тиску 5 (ManoverMR-4216-3829) і перекривається кран відведення газів з картера 2.

7. Тиск у картері контролюється манометром 6 (ММП-60) і при досягненні надлишкового тиску 17...20 кПа (130...150 мм рт. ст.) відкривається кран 2.

8. Зупиняється запис тиску і часу системою вимірювання 7 і зареєстровані дані зберігаються у файл.

9. Двигун переводиться на наступний режим роботи.

10. Дії за пунктами 5...9 повторюються до завершення всіх вимірювань.

11. Двигун зупиняється і приводиться у вихідний стан.

12. Результати вимірювань витрати картерних газів  $Q_{кг}$  для кожного режиму визначаються за формулою, а дані, записані у файл, обробляються в електронних таблицях Excel.



## 2.2. Результати експериментальних досліджень з вимірювання об'єму картера ДВЗ

На початку випробувань проведено перевірку калібрування датчика тиску.

Для цього у вимірювальну порожнину подавалося повітря заданого надлишкового тиску  $p$ , величину якого фіксували манометром ММП-60 і датчиком тиску. Значення сигналу датчика тиску у вигляді напруги  $V$  (В) на кожному режимі записувалися вимірювальною системою і результати вимірювань наведено на рис. 2.7. Величина тиску з одиниць виміру мм рт.ст. в кПа переводилася на підставі співвідношення:

$$760 \text{ мм рт. ст.} = 101,325 \text{ кПа}$$

У результаті опрацювання даних отримано калібрувальний графік, показаний на рис. 3.7, і отримано рівняння регресії між вихідною напругою датчика  $V$  (В) і величиною вимірюваного тиску  $p$ (кПа), що має коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,999$ :

$$p = 22,01 \times V - 89,07, [\text{кПа}] \quad (2.1)$$

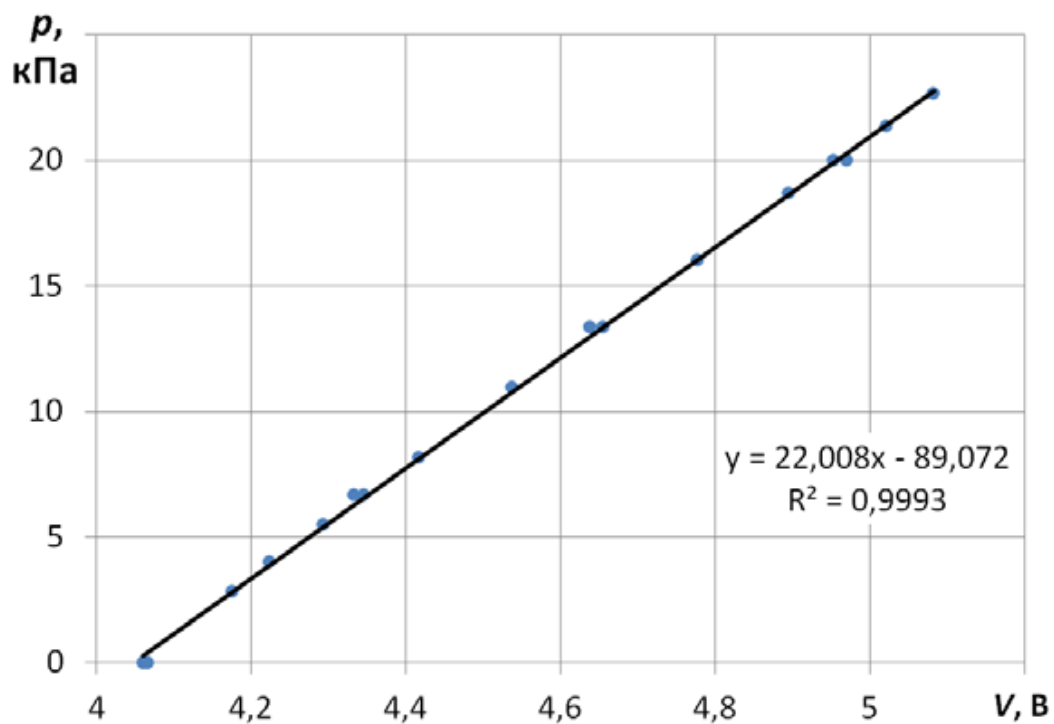


Рис. 2.7. Калібрувальний графік датчика тиску.

Вимірювання об'єму картерного простору двигуна здійснювали на зупиненому двигуні за подачі повітря з ресивера компресора під надлишковим тиском 350 кПа. Рівень масла в картері відповідав мітці максимального значення щупа [2,3]. Витоки повітря через маслозаливний отвір, отвір для щупа, ПНВТ і компресор, встановлений на двигуні, були усунені. Можливість витоку повітря, що подається в картер двигуна, залишилася через поршневі кільця і незакриті клапани в будь-яких циліндрах двигуна, залежно від положення колінчастого вала під час проведення вимірювань [4].

Розміщення дослідницького обладнання під час вимірювання об'єму картерного простору двигуна Д-240 у складі трактора МТЗ-80 показано на рис. 2.8.



Рис. 2.8. Експериментальні дослідження під час вимірювання об'єму картерного простору двигуна у складі трактора МТЗ-80: 1 – двигун Д-240; 2 – екран осцилографа (мотортестр); 3 – регулювальний кран подачі повітря; 4 –

газовий редуктор; 5 – манометр ММП-60; 6 – таймер-секундомір; 7 – витратомір (газовий лічильник); 8 – вимірювальна система.

Результати реєстрації тиску повітря у картерному просторі двигуна Д-240 у складі трактора МТЗ-80 показано на рис. 2.9 за різних витрат повітря.

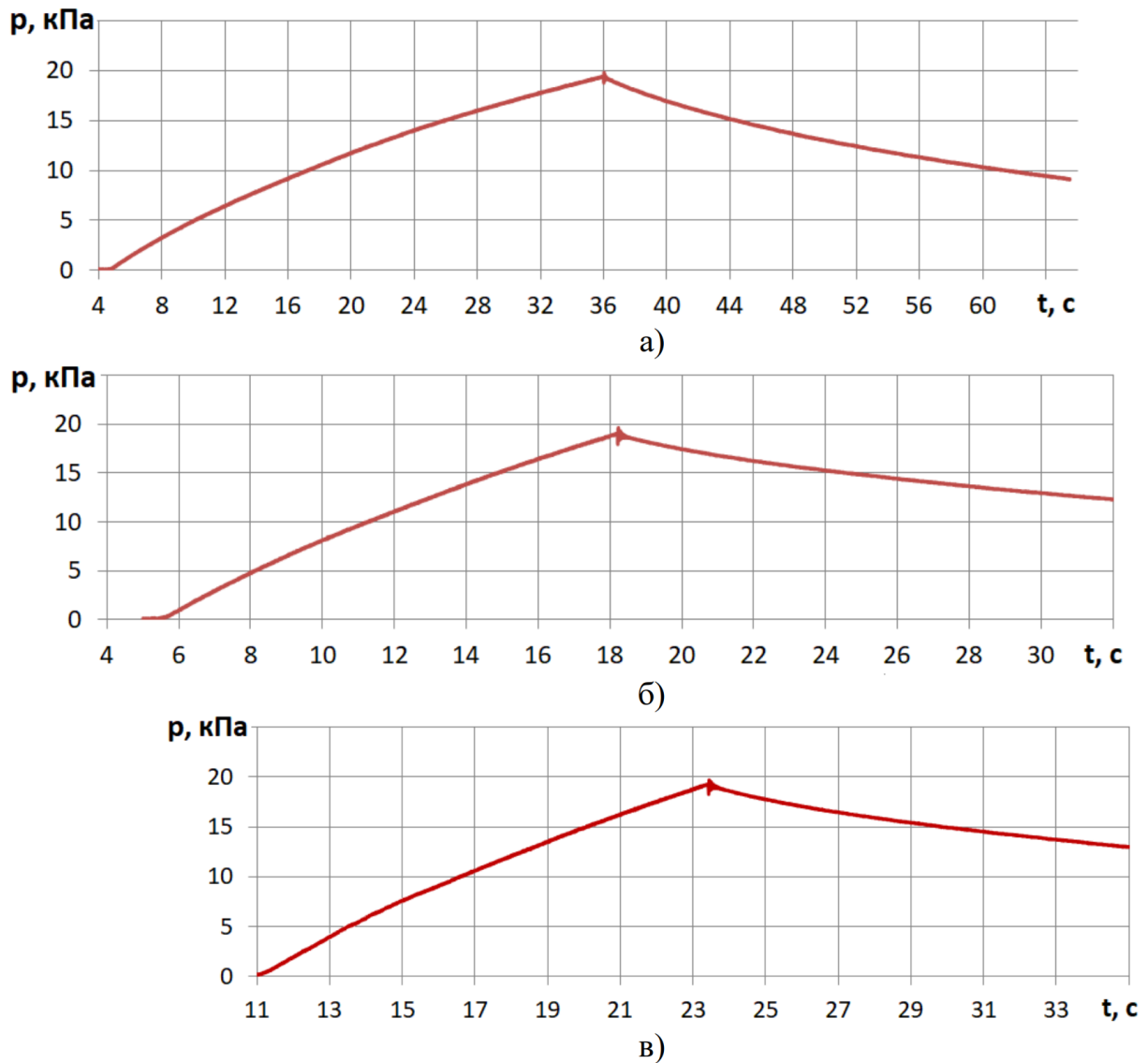
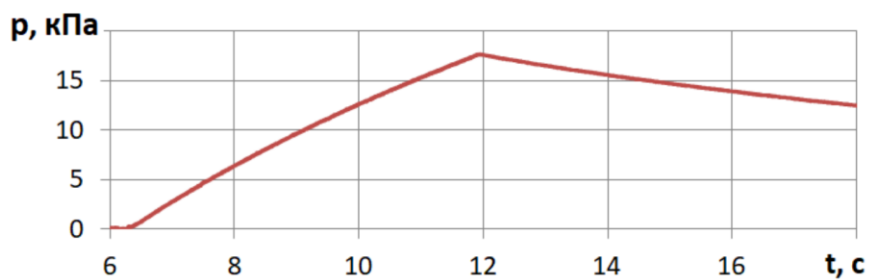
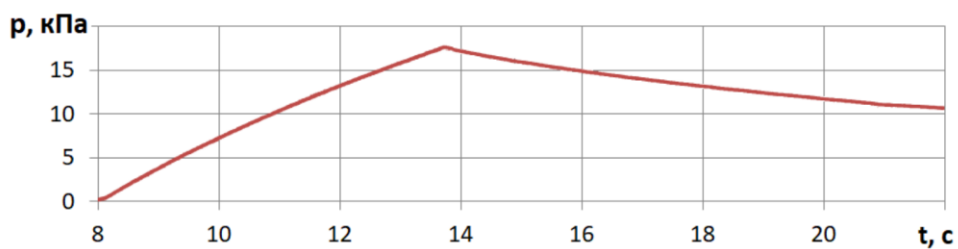


Рис. 2.9. Результати реєстрації тиску повітря в картерному просторі двигуна за витрати повітря: а) – 16 л/хв; б) – 42 л/хв; в) – 44 л/хв.

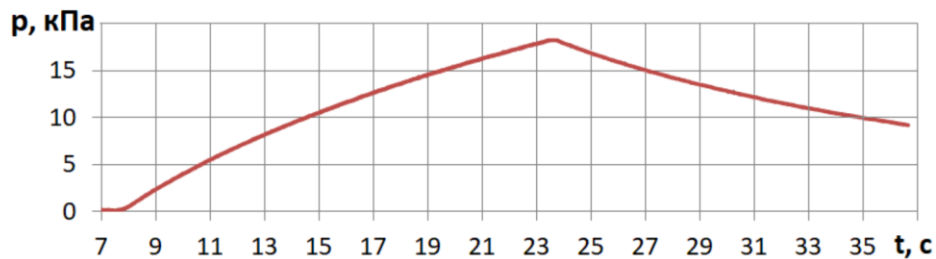
Результати реєстрації тиску повітря, що подається, в картерному просторі двигуна Д-240, встановленого на гальмівному стенді, показано на рис. 2.10 за різних витрат повітря.



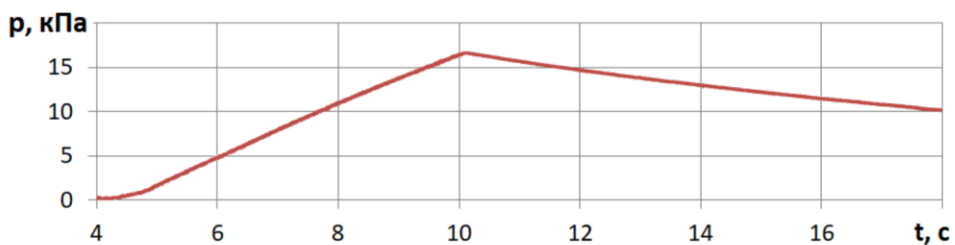
а)



б)



в)



г)

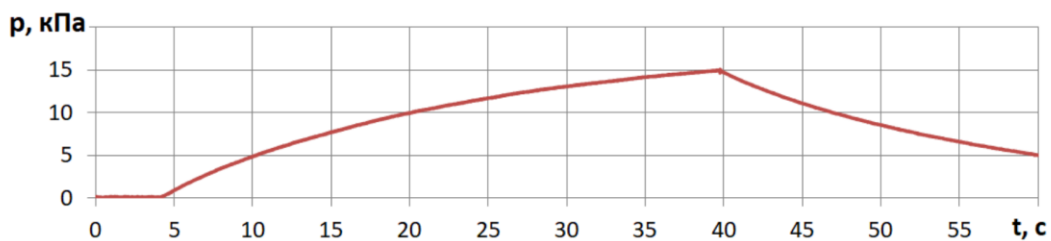


Рис. 2.10. Результаты реєстрації тиску повітря в картерному просторі двигуна № 393170 за витрати повітря, що подається: а) – 88 л/хв; б) – 89 л/хв; в) – 39 л/хв; г) – 81 л/хв; д) – 19 л/хв.

Результати реєстрації тиску повітря, що подається, в картерному просторі двигуна Д-243, встановленого на гальмівному стенді, показано на рис. 2.11

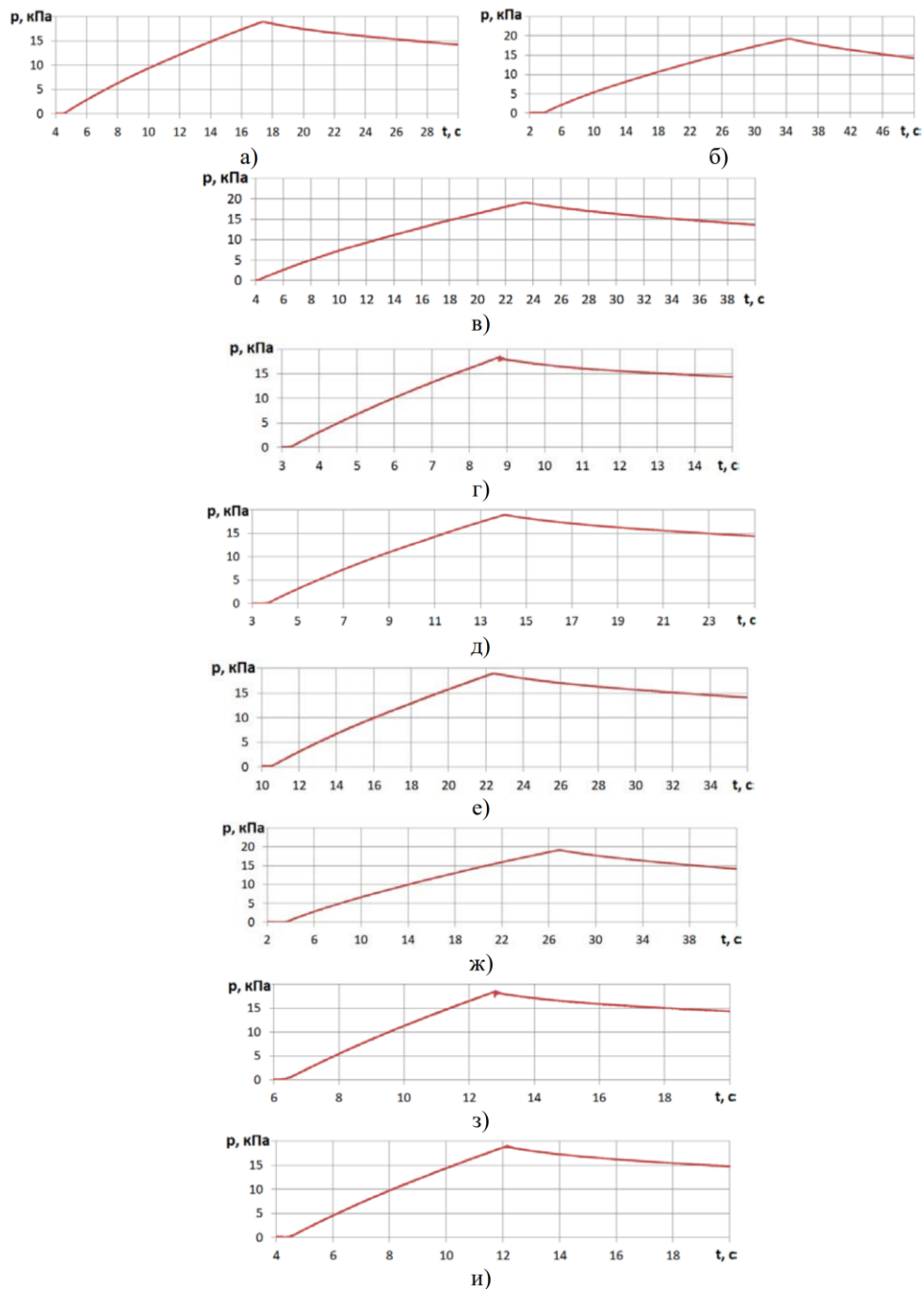


Рис. 2.11. Результати реєстрації тиску в повітря в картерному просторі двигуна № 213436 за витрати повітря, що подається: а) – 43 л/хв; б) – 23 л/хв; в) – 29 л/хв; г) – 90 л/хв; д) – 51 л/хв; е) – 45 л/хв; ж) – 23 л/хв; з) – 79 л/хв; и) – 68 л/хв.

Отримані результати вимірювань об'єму картерного простору двигунів Д-240 і Д-243 показують, що виміряний об'єм змінюється від 41,1 л до 51,8 л, причому виміряний об'єм залежить від витрати повітря, що подається. Цю залежність наведено на рис. 2.12. З представленого графіка видно, що за витрати повітря менше 40 л/хв збільшується розкид отриманих значень і середнє значення знижується. Такий характер зміни результатів вимірювань можна пояснити впливом витоків повітря з картера, врахування яких зроблено примітивним для простоти обчислень і в результаті за малих витрат повітря це допущення призводить до великої похибки [2, 3].

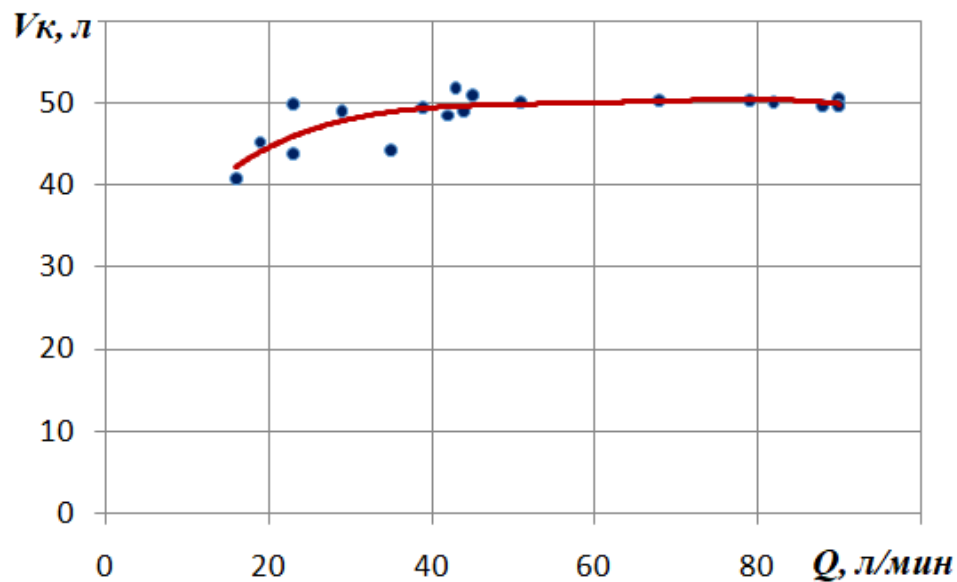


Рис. 2.12. Залежність результатів вимірювань об'єму картерного простору від витрати повітря.

Для зменшення похибки обчислень пропонується в аналізі використовувати тільки вимірювання при витратах повітря, що подається, понад 35 л/хв. У результаті виходять середні значення виміряного об'єму:

- для двигуна Д-240  $V_k = 48,7$  л
- для двигуна Д-240  $V_k = 49,8$  л
- для двигуна Д-243  $V_k = 50,4$  л.

Розкид отриманих значень виміряного об'єму картера перебуває в діапазоні 48,3...51,8 л. Середнє значення об'єму за результатами всіх вимірювань із витратою повітря, що подається, понад 35 л/хв становить  $V_{kcp} = 49,95$  л.

Середньоквадратичне відхилення результатів становить  $S_v = 0,88$  л [5]. Для рівня значущості  $\alpha = 0,05$  довірчий інтервал становить 0,50 л.

### 2.3. Результати експериментальних досліджень з вимірювання витрати картерних газів

Отримані дані вимірювань витрати картерних газів двигуна Д-240 під час випробування на стенді на режимах холостого ходу наведено на рис. 2.13 у вигляді залежності зміни витрати картерних газів від частоти обертання вала на режимі холостого ходу.

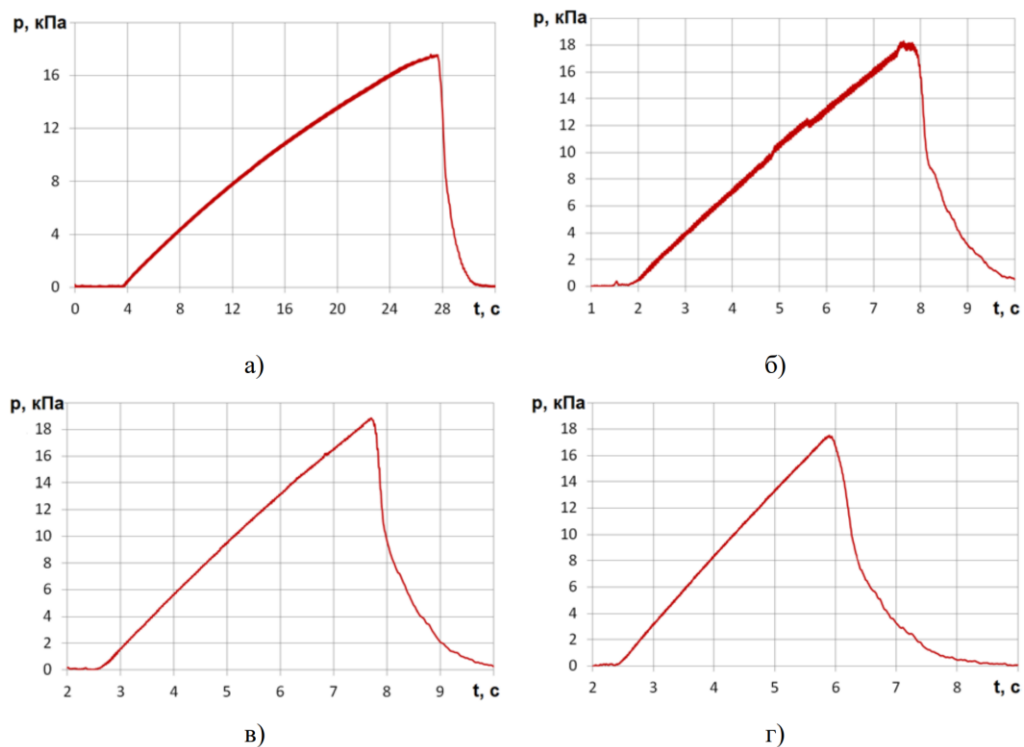


Рис. 2.13. Результати реєстрації тиску в картері двигуна Д-240 на режимі холостого ходу: а)  $n = 800 \text{ хв}^{-1}$ ; б)  $n = 1400 \text{ хв}^{-1}$ ; в)  $n = 1800 \text{ хв}^{-1}$ ; г)  $n = 2200 \text{ хв}^{-1}$ .

Як впливає з наведених даних, збільшення частоти обертання вала від  $800 \text{ хв}^{-1}$  до  $2200 \text{ хв}^{-1}$  призводить до збільшення швидкості наростання тиску  $\Delta p / \Delta t$  від  $0,727$  до  $4,943 \text{ кПа/с}$  або в 6,8 раза.

Отримані дані вимірювань тиску газу в картері за різних частот обертання вала двигуна Д-240 під час випробування у складі трактора МТЗ-80 на режимах

холостого ходу представлено на рис. 2.14 у вигляді залежності зміни тиску картерних газів за часом.

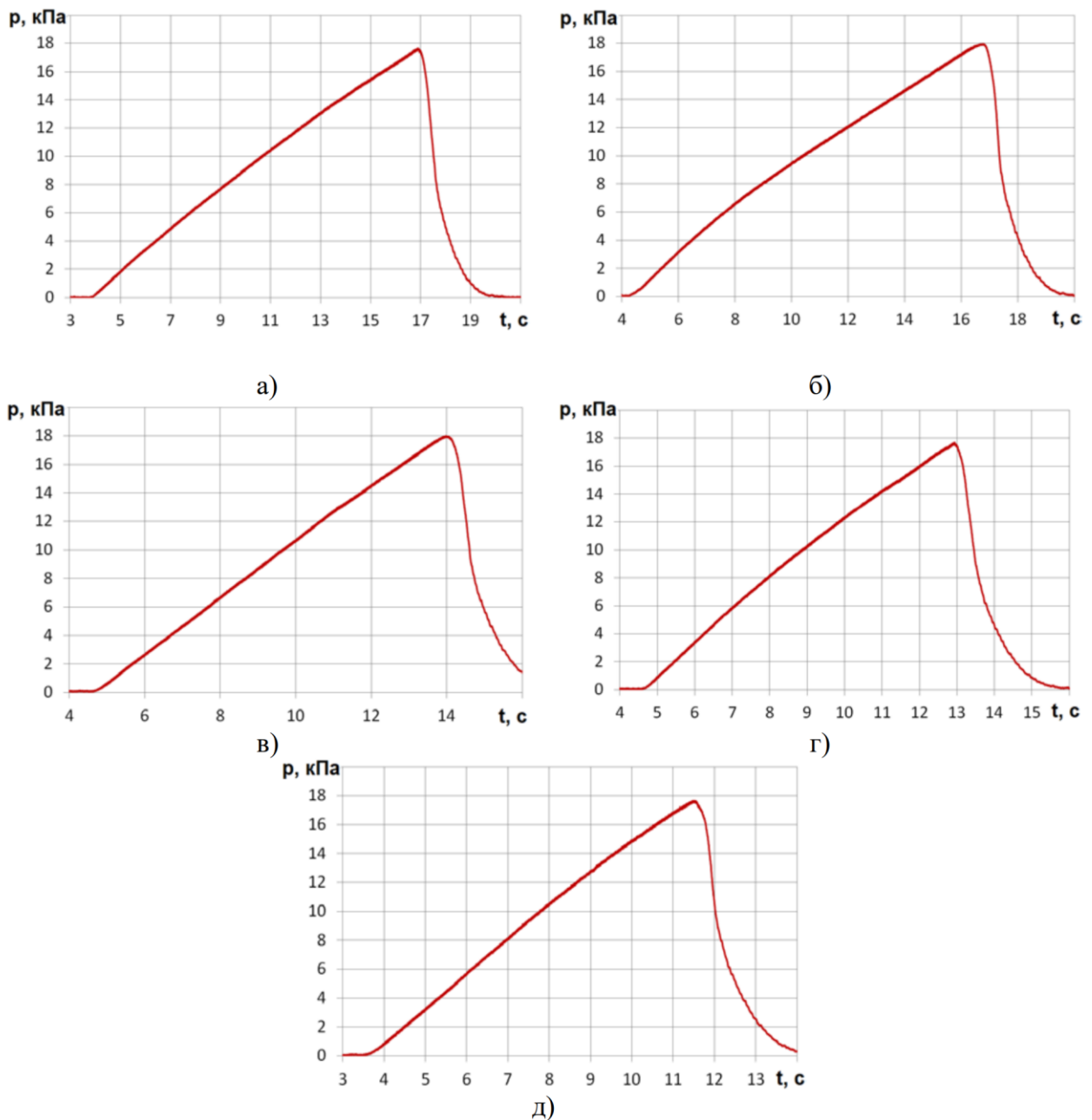


Рис. 2.14. Результати реєстрації тиску в картері двигуна Д-240 на режимі холостого ходу: а)  $n = 800 \text{ xv}^{-1}$ ; б)  $n = 1400 \text{ xv}^{-1}$ ; в)  $n = 1800 \text{ xv}^{-1}$ ; г)  $n = 2200 \text{ xv}^{-1}$ ; д)  $n = 2350 \text{ xv}^{-1}$ .

Як впливає з наведених даних, збільшення частоти обертання вала від 800  $\text{xv}^{-1}$  до 2350  $\text{xv}^{-1}$  призводить до збільшення швидкості наростання тиску  $\Delta p/\Delta t$  від 1,352 до 2,222 кПа/с або в 1,6 раза.



Отримані дані вимірювань тиску газу в картері за різних частот обертання вала двигуна Д-243 під час випробування на стенді на режимах холостого ходу подано на рис. 2.15 за зміни частоти обертання від 800 до 1400  $\text{хв}^{-1}$  і на рис. 2.16 за зміни частоти обертання від 1600 до 2200  $\text{хв}^{-1}$  у вигляді залежності зміни тиску картерних газів у часі.

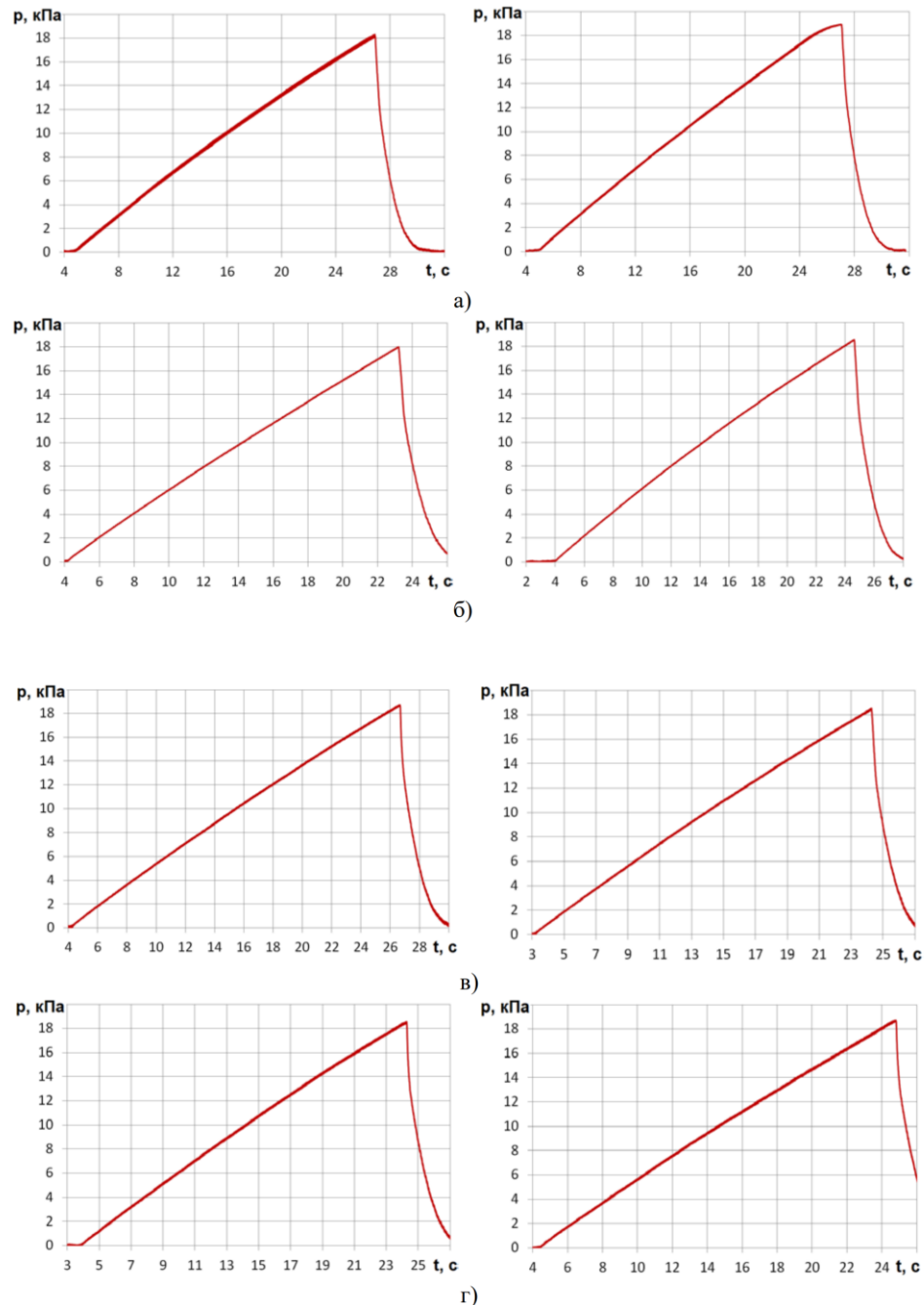
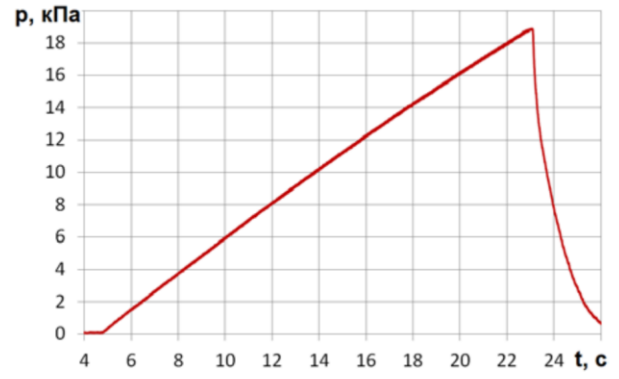
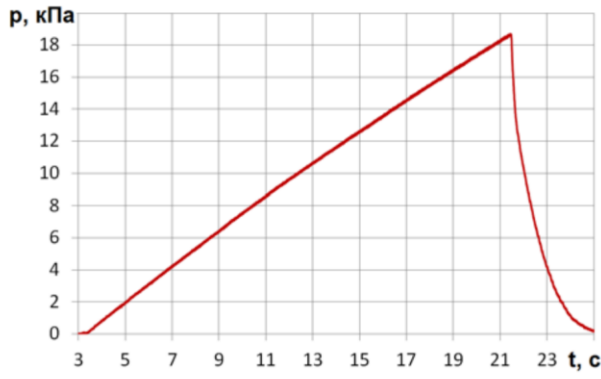
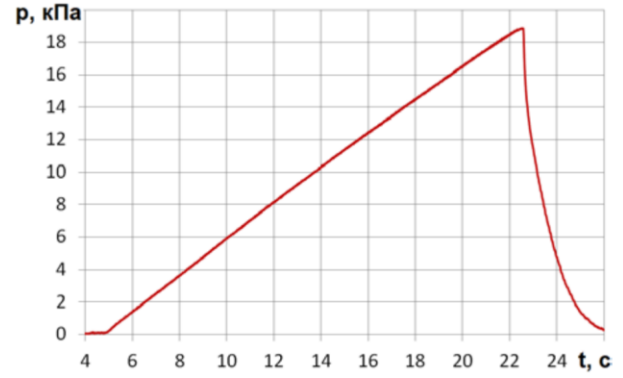
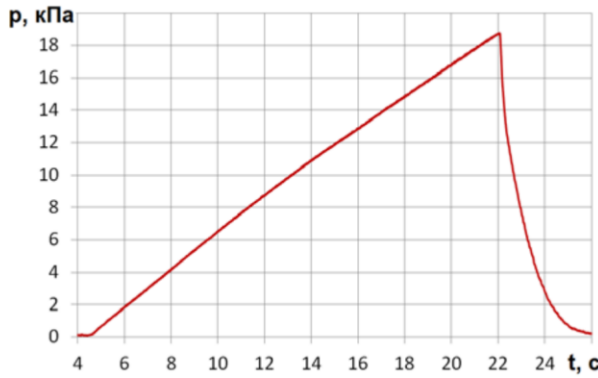


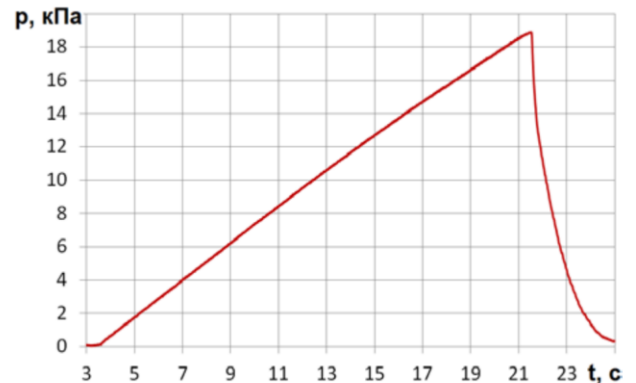
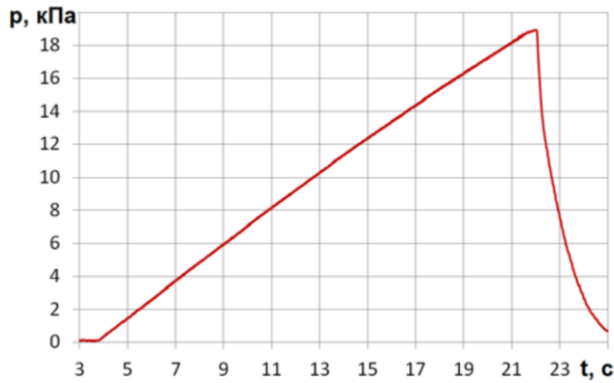
Рис. 2.15. Результати реєстрації тиску в картері двигуна Д-243 на режимі холостого ходу: а)  $n = 800 \text{ хв}^{-1}$ ; б)  $n = 1000 \text{ хв}^{-1}$ ; в)  $n = 1200 \text{ хв}^{-1}$ ; г)  $n = 1400 \text{ хв}^{-1}$ .



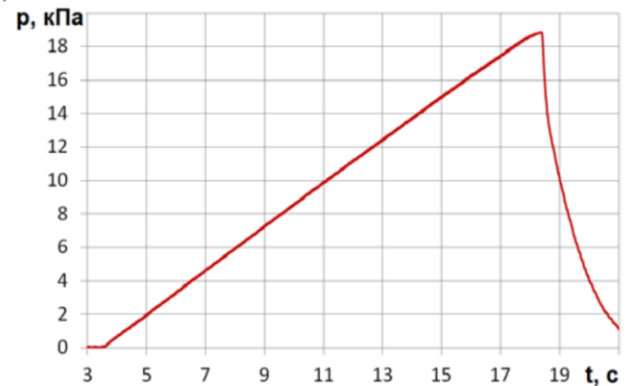
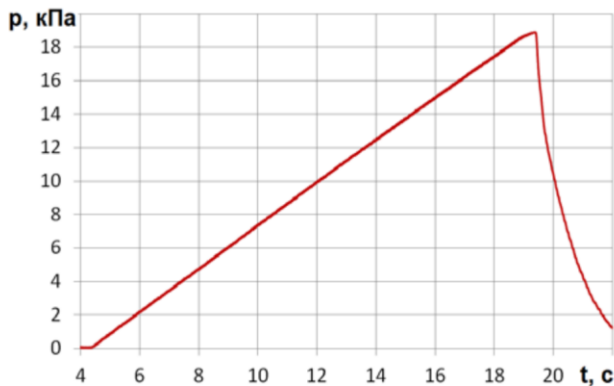
д)



е)



ж)



з)

Рис. 2.16. Результаты реестрации тиску в картері двигуна Д-243 на режимі холостого ходу: д)  $n = 1600 \text{ хв}^{-1}$ ; е)  $n = 1800 \text{ хв}^{-1}$ ; ж)  $n = 2000 \text{ хв}^{-1}$ ; з)  $n = 2200 \text{ хв}^{-1}$ .

Як впливає з наведених даних, збільшення частоти обертання вала від  $800 \text{ хв}^{-1}$  до  $2200 \text{ хв}^{-1}$  призводить до збільшення швидкості наростання тиску  $\Delta p/\Delta t$  від  $0,862$  до  $1,274 \text{ кПа/с}$  або в  $1,5$  раза. Результати аналізу представлених результатів досліджень наведено на рис. 2.17 у вигляді залежності витрати картерних газів  $Q_{кг}$  від швидкості наростання тиску в картері  $\Delta p/\Delta t$  після перекриття відведення картерних газів для даних вимірювань і розрахунків за розробленою методикою.

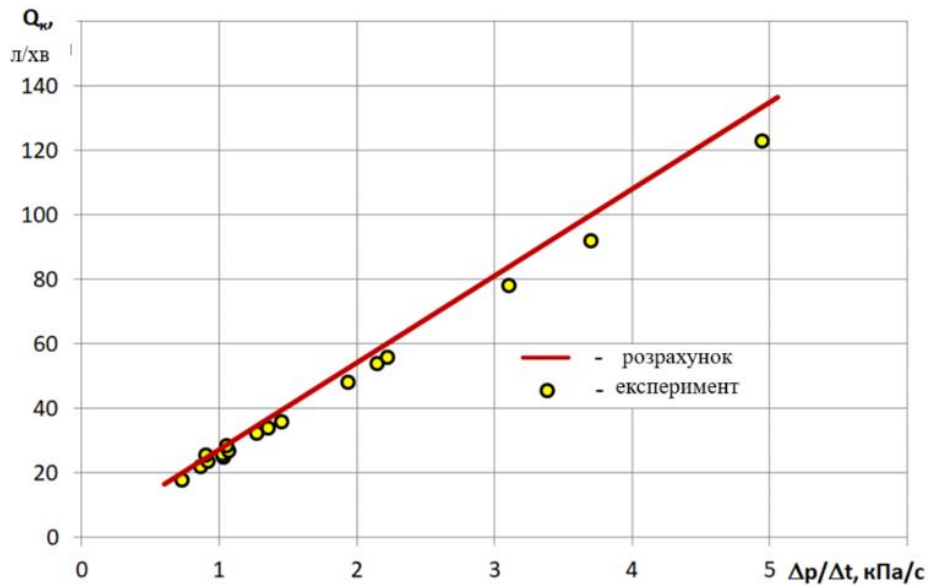


Рис. 2.17. Залежність витрати картерних газів  $Q_{кг}$  від швидкості наростання тиску в картері  $\Delta p/\Delta t$ .

Наведені дані свідчать, що розроблена методика розрахунку витрати картерних газів і зміни тиску в картері під час перекриття відведення газу достовірно описує зміну тиску в картері та дає змогу прогнозувати витрату картерних газів із похибкою не більше ніж  $10\%$ .

Залежність витрати картерних газів  $Q_{кг}$  від швидкості наростання тиску в картері  $\Delta p/\Delta t$ .

### Висновки по розділу

Викладені результати експериментальних досліджень дають змогу зробити такі висновки.

Вимірювання замкненого об'єму довільної форми за розробленою методикою вимірювань забезпечує похибку не більше 2%, що дає змогу використовувати її для вимірювання об'єму картерного простору ДВЗ.

Вимірний об'єм картерного простору випробовуваних двигунів Д-240 і Д-243 за повного рівня оливи в картері становив 50,0 л за довірчого інтервалу 0,5 л для рівня значущості  $\alpha = 0,05$ .

Отримані результати з вимірювання об'єму картерного простору показують, що розроблена методика дає змогу визначати об'єм картера з імовірністю 95% і похибкою  $\pm 1\%$ .

Під час вимірювання об'єму картерного простору двигунів Д-240 і Д-243 витрата повітря, що подається, має бути не нижчою за 40 л/хв, що дає змогу проводити вимірювання об'єму картерного простору з похибкою  $\pm 1\%$  за довірчої ймовірності 95%.

Дослідження впливу режиму роботи двигуна на витрату картерних газів показали, що вплив частоти обертання набагато істотніший, ніж навантаження двигуна. У разі зміни частоти обертання в межах допустимого діапазону (800...2200 хв<sup>-1</sup>) витрата картерних газів не змінюється:

- для двигуна з нормальним зносом у 1,6 рази;
- для двигуна з допустимим зносом у 2 рази;
- для двигуна з граничним зносом у 6,9 рази. При зміні навантаження в

межах допустимого діапазону витрата картерних газів змінюється:

- для двигуна з нормальним зносом на 14%;
- для двигуна з граничним зносом на 2%.

Тому як діагностичний режим пропонується використовувати режим холостого ходу за номінальної частоти або максимальних обертів холостого ходу, які можна отримати на машині з працюючим двигуном без спеціальних пристосувань.

## РОЗДІЛ 3

### ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ДОСЛІДЖЕНОГО МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ

#### 3.1 Реалізація отриманих результатів досліджень

Результати досліджень показують, що швидкість підвищення тиску газів у картері з моменту герметизації картерного простору може бути діагностичним параметром, який дає змогу оцінювати технічний стан циліндропоршневої групи двигуна за аналогією до витрати картерних газів.

Існуючі методи вимірювання витрати картерних газів вимагають виключення машини з роботи і встановлення додаткового обладнання для проведення діагностування, а в деяких випадках і часткового демонтажу елементів двигуна. Така процедура ускладнює процес оцінювання технічного стану ЦПГ двигуна, знижує коефіцієнт використання машин за часом, збільшує трудомісткість обслуговування і в кінцевому підсумку знижує ефективність її використання в експлуатації.

Розв'язання задачі оцінювання технічного стану ЦПГ двигуна в процесі експлуатації машини без її відриву від виконуваних робіт не тільки знижує експлуатаційні витрати, а й за наявності реєстрації результатів діагностування в процесі експлуатації дає змогу здійснювати прогнозування технічного стану в процесі опрацювання результатів реєстрації. Запропонований у роботі підхід до оцінки технічного стану ЦПГ двигуна за швидкістю наростання тиску газів у картері дає змогу розв'язати це завдання.

Як показали результати експериментальних досліджень, вимірювання тиску в картерному просторі після перекриття відводу газів із картера дає змогу з похибкою не більше ніж 10 % вимірювати витрату картерних газів від значення, що в 1,5 раза менше від порогового значення для двигуна з нормальним станом ЦПГ, до значення, що в 1,3 раза більше від порогового значення для двигуна з

граничним станом ЦПГ. Таким чином, досліджений метод діагностування ЦПГ двигуна із запасом перекриває необхідний діапазон вимірювань.

Застосовувані засоби вимірювання витрати картерних газів, як правило, підключаються до картерного простору через заливну горловину замість кришки, або через отвір для масляного щупа контролю рівня масла в картері [3, 1, 3]. Однак такий спосіб під'єднання до картерного простору для постійно встановленого пристрою неприйнятний, тому що ускладнюватиме обслуговування двигуна. Пристрій вимірювання зміни тиску газів у картерному просторі може бути встановлений у системі вентиляції картера на весь термін експлуатації машини.

Усі двигуни внутрішнього згорання для мобільних машин, які випускають нині, мають закриту вентиляцію картера, що пов'язано насамперед із забезпеченням екологічних вимог [2, 4, 8, 9]. Схему системи вентиляції картера сучасного двигуна в загальному вигляді показано на малюнку 5.1,а. Система працює таким чином. Під час роботи двигуна 1 через ущільнення поршня газу прориваються в картерний простір 2. По каналу 3 газу надходять у масловіддільник 5, з якого масло повертається в картер по каналу 4, а газу по каналу 7 надходять у впускний колектор 8. У впускному каналі газу змішуються зі свіжим зарядом і надходять у циліндри двигуна. Підвищення тиску в картері обмежується пристроєм регулювання тиску 6.

Пристрій керування потоком і контролю тиску газів у картері 9 може бути встановлений у системі вентиляції картера на ділянці між виходом із мастиловіддільника та входом до впускного колектора в розрив каналу 7, як показано на рис. 3.1, б. Функції пристрою 9 полягають у своєчасному перекритті каналу 7 відведення газів із картера, вимірюванні зміни тиску газів у закритому картерному просторі, своєчасному відкритті каналу 7 для продовження відведення газів із картера та реєстрації часу виконуваних процесів.

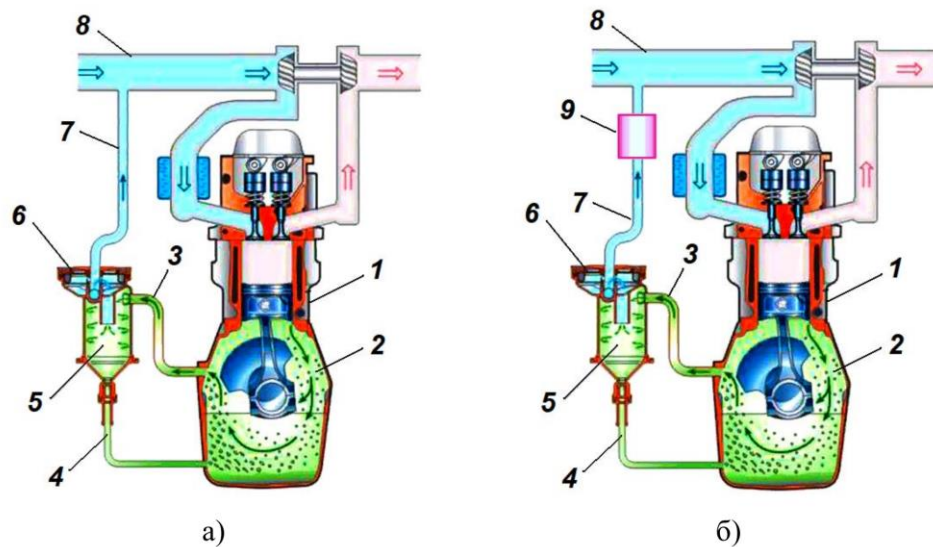


Рис. 3.1. Схема системи вентиляції картера двигуна: а) традиційна схема; б) модернізована схема; 1 – ДВЗ; 2 – картерний простір; 3 – канал відведення газів із картера; 4 – канал відведення оливи з мастиловіддільника в картер; 5 – мастиловіддільник; 6 – пристрій регулювання тиску в картері ДВЗ; 7 – канал підведення картерних газів на впуск; 8 – впускний колектор; 9 – пристрій керування потоком і контролю тиску газів у картері.

Принцип роботи пристрою керування потоком і контролю тиску газів у картері дає змогу використовувати його на будь-якому двигуні, що має вільний доступ до каналу 7, у вигляді модернізації системи вентиляції картера двигунів, які вже експлуатують, або бути вбудованим у конструкцію двигунів, які розробляють знову.

### 3.2 Алгоритм вимірювання витрати картерних газів

Як було показано в 2-му розділі, технічний стан ЦПГ двигуна може бути оцінено за швидкістю зміни тиску газів у картері після перекриття відведення газів. Цей ефект можна використовувати в пристрої керування потоком видалення газів із картера різними способами.

Можна контролювати час досягнення контрольного тиску в картерному просторі після перекриття відведення газу з картера, як показано на рис. 3.2.

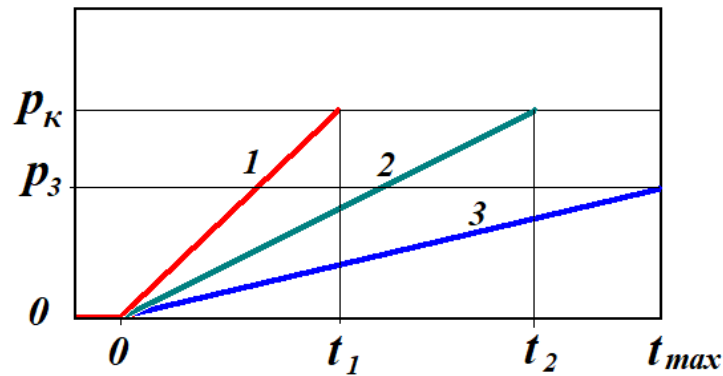


Рис. 3.2. Оцінка стану ЦПГ за часом досягнення контрольного тиску  $p_k$ .

Для технічного стану «1» час досягнення тиску  $p_k$  становить  $t_1$ , а для технічного стану «2» час досягнення тиску  $p_k$  становить  $t_2$ . Відповідно, швидкість наростання тиску в першому випадку  $(dp/dt)_1 = p_k/t_1$ , і в другому випадку -  $(dp/dt)_2 = p_k/t_2$ .

За малої витрати картерних газів (лінія «3») час  $t_3$  досягнення контрольного тиску  $p_k$  може сильно затягнутися, що потребуватиме великого часу на вимір, і оперативність процесу контролю буде втрачено. У цьому разі необхідно обмежити максимальний час вимірювання, після якого припинити процес. Як такий час може бути обрано час для нормального стану ЦПГ, наприклад, для двигуна Д-243 (Д-240) за швидкості наростання тиску  $(dp/dt)_n = 1,1$  кПа/с і тиску  $p_k = 20$  кПа цей час становитиме  $t_{max} = 18$  с. Для випадку, коли за час контролю не було досягнуто контрольного тиску  $p_k$ , тобто  $t_i > t_{max}$  необхідно дати відповідне повідомлення.

Необхідність повідомлення про такий вимір пов'язана з можливою розгерметизацією картерного простору (не закрито кришку оливозаливної горловини, оливний шуп не опущено до кінця, десь порушено ущільнення тощо). Розгерметизація картерного простору і сполучення його з навколишнім середовищем не тільки призводить до збільшення шкідливих викидів, а й без фільтрації повітря, що надходить до картера, сприяє потраплянню абразиву до моторного мастила і збільшенню зносу деталей.

На підставі викладеного можна скласти такий алгоритм вимірювання витрати картерних газів за швидкістю наростання тиску в закритому картері.



1. У процесі роботи двигуна на холостому ході встановити номінальну частоту обертання (можна - максимальних обертів холостого ходу).
2. Запустити процес реєстрації тиску:
  - а) перекрити клапан відведення газів із картера;
  - б) почати відлік часу;
  - в) почати реєстрацію тиску; (усі операції починаються одночасно з пріоритетом а-б-в).
3. У момент досягнення контрольного тиску  $p_k$ :
  - а) зареєструвати час процесаті;
  - б) зареєструвати вимірний тиск  $p_k$ ;
  - в) відкрити клапан відведення газів із картера; (усі операції виконуються одночасно з пріоритетом а-б-в).
4. У момент досягнення максимального часу вимірювань  $t_{max}$ :
  - а) зареєструвати вимірний тиск  $p_3$ ;
  - б) зареєструвати час процесу  $t_{max}$ ;
  - в) відкрити клапан відведення газів із картера;
  - г) швидкість наростання тиску визначити (операції виконуються одночасно з пріоритетом а-б-в-г).
5. Зберегти результати вимірювань, дату і час проведення вимірювань.
6. Знизити частоту обертання двигуна до мінімальних обертів холостого ходу.
7. За необхідності заглушити двигун.

Замість часу можна контролювати тиск у картерному просторі за контрольний час  $t_k$  після перекриття відведення газу з картера, як показано на рис. 3.3.

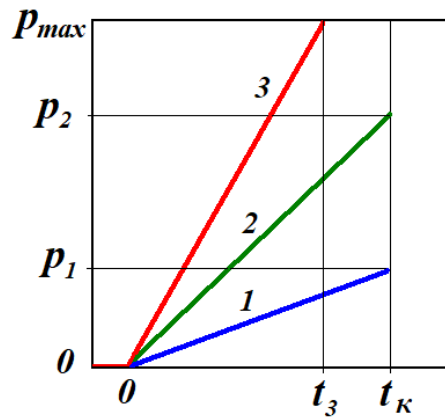


Рис. 3.3. Оцінка стану ЦПГ за збільшенням тиску за контрольний час  $t_k$ .

Для технічного стану «1» за контрольний час  $t_k$  тиск у картері досягає значення  $p_1$ , а для технічного стану «2» за контрольний час  $t_k$  тиск у картері досягає значення  $p_2$ . Відповідно, швидкість наростання тиску в першому випадку  $(dp/dt)_1 = p_1/t_k$ , і в другому випадку -  $(dp/dt)_2 = p_2/t_k$ . За великої витрати картерних газів (лінія «3») тиск  $p_3$  за контрольний час  $t_k$  може перевищити максимально допустимий тиск, що призведе до виходу з ладу будь-яких елементів двигуна або призведе до інших небажаних наслідків. У цьому разі необхідно обмежити максимальний тиск у процесі вимірювання  $p_{max}$ , після якого припинити процес.

### 3.3 Розробка пристрою для реалізації алгоритму вимірювання витрати картерних газів у процесі експлуатації техніки з ДВЗ

Завдання, на вирішення яких спрямоване технічне рішення, полягають у зменшенні трудомісткості процесу вимірювання, а також проведенні оцінки технічного стану циліндропоршневої групи двигуна внутрішнього згорання в процесі експлуатації без зупинки техніки.

Основним завданням запропонованого пристрою для оцінювання діагностичного параметра, що використовується на холостому ході двигуна за максимальної частоти обертання колінвалу, є вимірювання часу наростання тиску в картері під час надходження в нього відпрацьованих газів від моменту ізолювання порожнини картера від атмосфери до моменту досягнення заданого рівня тиску в ньому.

Розв'язання технічної задачі досягається тим, що оцінка технічного стану циліндропоршневої групи проводиться за рахунок вимірювання часу наростання тиску в картері до 25 кПа в пристрої під час закриття відведення газів із картера за допомогою електромагнітного клапана під час експлуатації тягово-транспортного засобу без спеціальної зупинки. А також накопичена база даних результатів вимірювань у процесі експлуатації дає змогу прогнозувати залишковий ресурс циліндропоршневої групи двигуна. При цьому в пропонованому пристрої для забезпечення безпечної роботи двигуна внутрішнього згоряння пропонований пристрій оснащено запобіжним клапаном, що відкривається в разі досягнення тиску картерних газів  $35 \pm 5$  кПа.

На рис. 3.4 представлено блок-схему пристрою вимірювання витрати картерних газів.

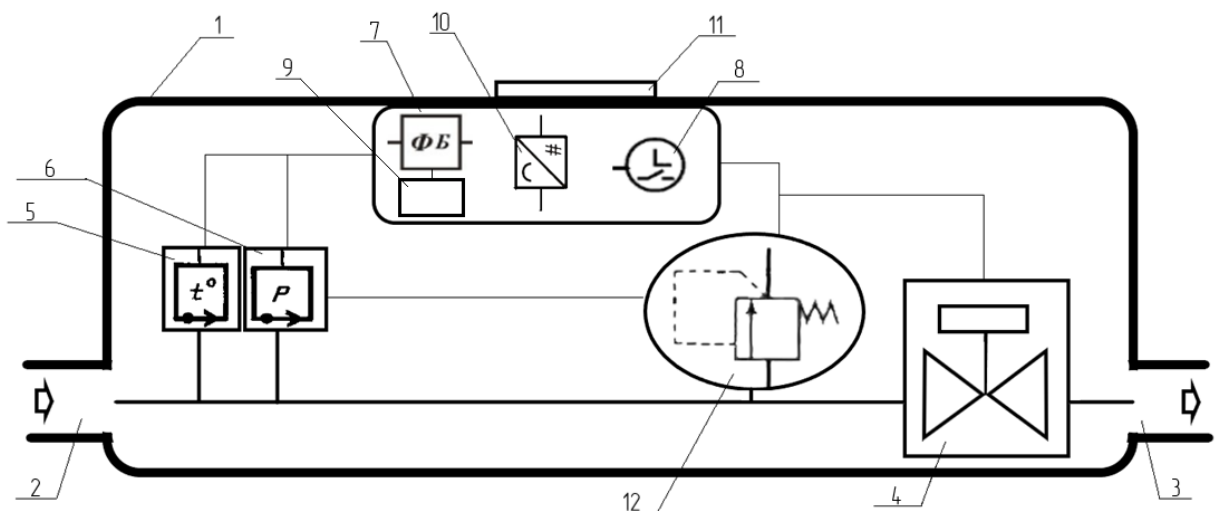


Рис. 3.4. Блок-схема пристрою вимірювання витрати картерних газів.

Заявлений пристрій містить: корпус 1, виконаний із жорсткого пластику, вхідний 2 і вихідний 3 канали, електромагнітний клапан 4, датчик температури 5 і датчик тиску 6, блок керування 7, таймер 8, блок пам'яті 9, аналого-цифровий перетворювач 10, роз'єм живлення пристрою 11, запобіжний клапан 12.

Принцип роботи - пристрій, корпус 1, якого виконаного з жорсткого пластику, встановлюється на двигун у систему вентиляції картера з вхідним 2 і вихідним 3 отворами. Картерні гази, проходячи через пристрій, проходять через

електромагнітний клапан 4, який за командою перекриває рух картерних газів. Датчик температури 5 і датчик тиску 6 реєструють відповідні параметри та передають їх у блок керування 7 пристрою. Коли після закриття клапана тиск картерних газів досягає 25 кПа, блок керування 7 сигналізує команду «відкриття» на електромагнітний клапан 4, а таймер 8 реєструє час досягнення тиску в картері 25 кПа. Блок пам'яті 9 зберігає результати вимірювання від датчика температури 5, датчика тиску 6 і лічильника 8 та передає їх на блок управління 7, який, своєю чергою, перетворюється з аналогового в цифровий за рахунок перетворювача 10. Пристрій працює від бортової електромережі транспортного засобу. Для можливості зчитування інформації зовнішнім приладом пристрій має роз'єм 11. Пристрій оснащений запобіжним клапаном 12 для забезпечення безпеки роботи двигуна, який відкривається при досягненні тиску картерних газів  $35 \pm 5$  кПа.

Витрату картерних газів вимірюють за допомогою датчика тиску 6 і датчика температури 5 за час, що фіксується таймером 8 за часом перекриття електромагнітним клапаном потоку картерних газів, до досягнення тиску 25 кПа. Процес діагностування двигуна відбувається на максимальних обертах холостого ходу.

Під час роботи пристрою стан ЦПГ оцінюється за часом наростання тиску в картері. Нормальний стан ЦПГ – якщо час наростання тиску не менший за  $t_{норм}$ , допустимий стан - якщо менший за  $t_{норм}$ , але більший за  $t_{пр}$ , і граничний – якщо час менший за  $t_{пр}$ . Аналіз отриманих за допомогою заявленого пристрою даних та порівняння їх із регламентованими заводом-виробником ДВЗ (закладено у блоці пам'яті пристрою для різних моделей двигунів) показниками дають змогу зробити висновок про технічний стан ЦПГ двигуна в режимі безперервної експлуатації машини без спеціального зупинення роботи машини та демонтажу її вузлів, а також про те, як це може бути зроблено у процесі експлуатації.

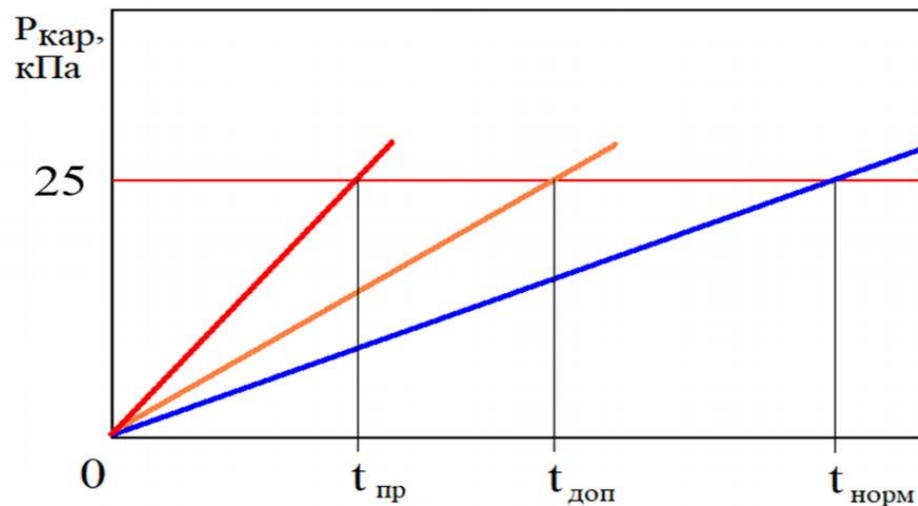


Рис. 3.5. Графічне відображення за станом за час наростання тиску в картері.

Пропонований пристрій передбачається встановлювати на двигун внутрішнього згоряння на постійну основу. Оскільки пристрій працює від бортової мережі тягово-транспортного засобу, що забезпечує процес діагностування циліндропоршневої групи в умовах експлуатації тягово-транспортного засобу без зупинки техніки

### Висновки по розділу

1. Запропоновано модернізацію системи вентиляції картера двигуна встановленням додаткового пристрою, який дає змогу діагностувати ЦПГ ДВЗ у процесі експлуатації за дослідженим методом.

2. Завдання, що вирішуються запропонованим пристроєм, полягають у своєчасному перекритті та відкритті каналу відведення газів із картера, вимірювання тиску газів у закритому картерному просторі та реєстрації часу виконуваних процесів.

3. Запропоновано два способи керування розробленим пристроєм і для кожного розроблено алгоритми керування.

4. Розроблено конструкцію пристрою керування потоком картерного газу і контролю тиску газів у картері, що дає змогу використовувати його на будь-якому

двигуні, який має вільний доступ до каналу відведення картерних газів. Пристрій дає змогу модернізувати систему вентиляції картера двигунів, що вже експлуатуються, або може бути вбудований у конструкцію двигунів, що розробляються.

5. Запропоновано алгоритм процесу вимірювання витрати картерних газів під час експлуатації, який може бути автоматизовано та виконуватися щоденно наприкінці припинення робіт, а зареєстровані дані зберігатимуться в пам'яті системи керування машини для контролю зміни стану ЦПГ у процесі експлуатації та своєчасно провести операції обслуговування.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Аналіз відомих способів оцінювання технічного стану циліндропоршневої групи двигуна на можливість їхнього використання для безперервного контролю в процесі експлуатації показав доцільність використання як діагностичного параметра витрати картерних газів.

Результати розрахунку двигуна Д-243 на різних режимах роботи і з різним зносом ЦПГ показали:

- збільшення навантаження і частоти обертання призводить до збільшення витрати картерних газів, і під час збільшення навантаження від 0 до 100% витрата збільшується на 25%, а під час збільшення частоти обертання від 800 до 2400 хв-1 витрата збільшується в 1,8 разу в разі нормального зношення, у 2,4 разу в разі припустимого зношення та в 2,6 разу в разі граничного зношення;

- для діагностування стану ЦПГ краще використовувати режим холостого ходу за номінальної або максимальної частоти обертання, який може бути простіше реалізовано на двигуні в процесі експлуатації та має більшу чутливість до технічного стану ЦПГ;

- характер зміни тиску газів у закритому картері за цикл має яскраво виражений коливальний характер із поступовим підвищенням середнього значення тиску, причому амплітуда коливань тиску від насосного ходу поршнів у 5...21 разів більша, ніж від витоку газу через нещільності з циліндра;

- час досягнення тиску в картері двигуна під час його роботи на режимі холостого ходу за частоти обертання 2200 хв-1, з моменту перекриття відведення газів, досягає тиску 120 кПа за нормального зношення через  $18 \pm 0,55$  с, за припустимого зношення -  $7 \pm 0,25$  с і за граничного зношення -  $4 \pm 0,38$  с. Кожен наступний якісний показник (час наростання тиску до 120 кПа) відрізняється від найближчого майже в 1,5 раза і більше за можливої похибки менше ніж  $\pm 10\%$ , що дає змогу робити оцінку технічного стану з хорошою достовірністю.

Проведені на створеній установці експериментальні дослідження двигунів типу Д-243 з різним ступенем зносу ЦПГ на різних режимах їхньої роботи показали:

- правомірність використання розробленої методики і програми розрахунку для оцінки витрати картерних газів для двигунів з різним зносом ЦПГ;

- як діагностичний режим краще використовувати режим холостого ходу за номінальної частоти обертання або максимальних обертів холостого ходу, які можуть бути отримані на машині з працюючим двигуном без спеціальних пристроїв;

- розроблена методика оцінки витрати картерних газів за зміною тиску в картері під час перекриття відведення газу достовірно описує зміну тиску в картері та дає змогу прогнозувати витрату картерних газів із похибкою не більше 10%;

- швидкість наростання тиску може бути використана як діагностичний параметр оцінки технічного стану ЦПГ для двигунів типу Д-243, при цьому граничні значення швидкості наростання тиску становлять для нормального стану ЦПГ 1,1 кПа/с; для допустимого стану ЦПГ 2,5 кПа/с і для граничного стану ЦПГ 3,5 кПа/с.

Розроблена методика визначення об'єму картерного простору дає змогу визначати об'єм картера двигунів типу Д-243 з імовірністю 95% і похибкою  $\pm 1\%$  за витрати повітря, що подається, з витратою не менше 40 л/хв.

Показано варіант модернізації системи вентиляції картера двигуна встановленням додаткового пристрою, що дає змогу діагностувати ЦПГ ДВЗ у процесі експлуатації за дослідженим методом, запропоновано два способи керування розробленим пристроєм і розроблено відповідні алгоритми керування, що дають змогу здійснювати оцінку технічного стану ЦПГ двигуна без відриву машини від експлуатації.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міненко С.В. Мулярчук В.О. Аналіз засобів діагностики циліндро-поршньової групи двигунів. Сучасні вектори розвитку аграрної науки: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (ХДАЕУ, 17-18 вересня 2024 року). Херсон: ХДАЕУ, 2024. С. 358-363.
2. Грабар І. Г., Мулярчук В.О. Підвищення ефективності діагностики ДВЗ. Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. С. 315-319.
3. Мулярчук В.О. Розробка пристрою для реалізації алгоритму вимірювання витрати картерних газів у процесі експлуатації техніки з ДВЗ. Студентські читання–2024: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 31 жовтня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. С. 27-28.
4. Rogovskii, I. L., Titova, L. L., Trokhaniak, V. I., Borak, K. V., Lavrinenko, O. T., Bannyi, O. O. (2021). Research on a grain cultiseeder for subsoil-broadcast sowing. *Agricultural Engineering*, Vol. 63(1), pp. 385–396. <https://doi.org/10.35633/INMATEH-63-39>.
5. Rogovskii I. L., Borak K. V., Maksimovich E. Yu., Smelik V. A., Voinash S. A., Maksimovich K. Yu., Sokolova V. A. Wear resistance of blade and disc working bodies of tillage tilling machines hardened by electrodes T-series. *Journal of Physics*. 2020. Vol. 1679. 042084.
6. Розен Л. В. Технічний стан і діагностика двигунів транспортних засобів. Одеса: Фенікс, 2020. 304 с.
7. Ganesan V. *Internal Combustion Engines*. 5th ed. New Delhi: McGraw Hill Education, 2017. 592 p.

8. Bosch Automotive Handbook. 9th ed. Plochingen: Robert Bosch GmbH, 2020. 1456 p.
9. Heywood J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018. 928 p.
10. Коршак А. А. Діагностика та обслуговування автомобільних двигунів. Харків: НТУ "ХПІ", 2019. 278 с.
11. Федоров В. С. Методи визначення технічного стану двигунів за параметрами картерних газів. Вісник машинобудування. 2021. № 3(89). С. 56-63.
12. Stone R., Ball, A. Automotive Engineering Fundamentals. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2020. 480 p.
13. Kumar S. Automotive Engines: Diagnosis, Repair, and Rebuilding. London: Routledge, 2021. 542 p.
14. Чижик, О. М. Моніторинг технічного стану ЦПГ двигуна. Технічна діагностика і ремонт. 2022. № 1. С. 78-84.