

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.43:620.194.3

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14\(45\).268-280](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).268-280)

С.Ф. Посонський, доц., канд. техн. наук, **О.П. Бабак**, доц., канд. техн. наук,
А.А. Вичавка, канд. техн. наук

Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна

e-mail: p.s.f@ukr.net

Вплив відкладень на характеристики розпилення паливних форсунок та ефективність їх ультразвукового очищення на стенді AUTOOL CT160

У статті досліджено вплив експлуатаційних відкладень на характеристики розпилення паливних форсунок бензинових двигунів і оцінено ефективність їхнього відновлення методом ультразвукового очищення. Проаналізовано механізми погіршення сумішоутворення, зокрема укрупнення крапель і нерівномірність подачі пального.

Проведено стендову діагностику форсунок у різних технічних станах: нових, після експлуатації та після очищення. Встановлено, що відкладення знижують продуктивність і стабільність роботи форсунок, тоді як ультразвукове очищення ефективно відновлює їх робочі параметри до значень, близьких до початкових. Отримані результати підтверджують доцільність регулярної діагностики та очищення форсунок.

паливна форсунка, розпилення палива, відкладення, ультразвукове очищення, діагностика, продуктивність інжектора, сумішоутворення

Постановка проблеми. Система безпосереднього впорскування пального вважається однією з найсучасніших серед бензинових паливних систем. Її особливість полягає у тому, що паливо подається прямо в камеру згоряння, минаючи впускний тракт. Основну роль у цьому процесі відіграють форсунки високого тиску, які повинні забезпечити надзвичайно точне і дрібне розпилення пального впродовж дуже короткого часу.

Форсунки мають адаптувати режим розпилення відповідно до способу формування паливно-повітряної суміші: при пошаровому сумішоутворенні впорскування здійснюється поблизу свічки запалювання, а при гомогенному чи збідненому режимі – пальне має рівномірно розподілятися по всій камері згоряння.

Інжекторні двигуни внутрішнього згоряння нового покоління функціонують в умовах значних температурних і тискових навантажень у камері згоряння. Через це на форсунках з часом можуть утворюватися відкладення – як на зовнішній, так і на внутрішній частині сопел. Такі забруднення знижують витрату палива, порушують геометрію факела розпилення й погіршують ефективність подачі пального [1].

Накопичення відкладень на форсунках інжектора призводить до погіршення якості розпилення палива та зменшення об'єму потоку при однаковій тривалості імпульсу впорскування [2]. Це, у свою чергу, негативно впливає на процес формування паливно-повітряної суміші, ефективність згоряння і загальну стабільність роботи двигуна.

Результати попередніх досліджень свідчать, що у форсунках із забрудненнями можуть спостерігатися суттєві відмінності у структурі розпилення пального. Це пояснюється тим, що відкладення формуються в різний спосіб навіть за однакових експлуатаційних умов. Отже, питання своєчасної діагностики та очищення інжекторів залишається важливим для підтримання належного функціонування бензинових двигунів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зниження якості розпилення та виникнення ефекту змочування стінок камери згоряння через надмірне збільшення довжини факела розпилення можуть бути чинниками утворення сажі. У зв'язку з цим багато дослідників приділяли увагу впливу відкладень на параметри розпилення з метою запобігання таким негативним явищам. Наприклад, у дослідженні [3] було експериментально проаналізовано, як забруднення форсунок впливають на властивості розпилення.

Формування паливно-повітряної суміші при частоті обертання 1200 об/хв і тиску впорскування 150 бар було досліджено шляхом моделювання на основі емпіричних даних. У ході дослідження з'ясувалося, що наявність відкладень спричиняла зменшення кількості пального, яке впорскується, а також призводила до подовження факела розпилення. Це супроводжувалося збільшенням розміру крапель та їх швидкості, що пояснювалося зменшенням ефективної площі проходу через сопло через забруднення. Крім того, дослідження показало, що через відкладення відбувалося більше потрапляння палива на поверхні поршня та стінки циліндра, що спричиняло деформацію факела розпилення. Як наслідок – сумішоутворення ставало нерівномірним, що проявлялося у нестабільній роботі двигуна.

У дослідженні [4] було проаналізовано роботу забруднених форсунок, які мали ширину імпульсу впорскування на 8 % більшу, ніж у чистих, за умов обертів двигуна 1500 об/хв і повного навантаження. Результати показали, що в таких умовах продуктивність двигуна знижувалася на 1 %, тоді як питома витрата пального на гальмівну потужність зростала на 2 % у порівнянні з роботою двигуна з очищеними форсунками.

У схожому дослідженні [5] вивчалася форсунка, яка зазнала закоксування після 55 годин експлуатації. Експеримент проводився при навантаженні, що відповідало середньому ефективному тиску (BMEP) 3 бар і швидкості 2000 об/хв. Встановлено, що наявність відкладень у форсунці викликала подовження фази згоряння та зростання питомої витрати пального на гальмування. При цьому загальна ефективність процесу згоряння палива зменшилася.

У дослідженні [6] було розглянуто процес розпилення палива поблизу сопла типового забрудненого інжектора системи GDI. З'ясувалося, що наявні в каналах форсунки відкладення можуть суттєво погіршувати якість розпилення та бути однією з основних причин підвищення рівня викидів сажі. Виявлено, що взаємодія між забрудненнями та струменем палива спричиняє низку негативних ефектів: спотворення структури факела розпилення, накопичення залишкового пального в зоні сопел і самих відкладеннях, утворення великих крапель, розбризкування та зв'язування палива.

Через знижену ефективність роботи забрудненої форсунки навіть за підвищеного тиску впорскування зберігалася тенденція до утворення великих крапель та крапельного зв'язку. На основі отриманих результатів дослідники дійшли висновку, що збільшення тиску подачі палива не здатне компенсувати втрати у якості розпилення при забрудненні форсунки. Крім того, частина крапель залишалася у підвищеному стані поблизу наконечника інжектора, а деякі переміщувалися до його поверхні, спричиняючи змочування кінчика форсунки.

У роботі [7] дослідники проаналізували особливості розпилення палива, газових викидів і концентрацію твердих частинок у двигуні з безпосереднім упорскуванням

(GDI) із використанням форсунки, яка зазнала закоксування після 30 годин роботи. Встановлено, що при різних параметрах ширини імпульсу й тиску впорскування масова витрата палива у випадку забрудненої форсунки була меншою на 2...8 % порівняно з чистою. Крім того, довжина проникнення струменя пального зросла на 6...20 %, а середній розмір крапель та рівень викидів вуглеводнів збільшилися приблизно на 36 % і 30 % відповідно.

В іншому дослідженні [8] було проведено чисельне моделювання із застосуванням тривимірної обчислювальної гідродинаміки (CFD) для аналізу впливу відкладень на характер потоку в зоні сопла і розвиток факела розпилення. Згідно з отриманими результатами, наявність відкладень у вигляді розтруба подовжує внутрішню геометрію отвору, що знижує інтенсивність утворення турбулентної кінетичної енергії на виході. Це, своєю чергою, послаблює ефективність розпилення. Дослідники також відзначили, що у закоксованих форсунок збільшується довжина факела та зменшується кут розпилення.

Поверхня наконечника форсунки відіграє важливу роль у процесі утворення відкладень. У дослідженні [9] вивчався вплив температури цієї поверхні на особливості осідання бензинових залишків при контакті з гарячим металом. Було встановлено, що температурний режим поверхні суттєво впливає на процес випаровування бензинових крапель, а також на характер формування відкладень. З'ясувалося, що форма та структура осаду змінюють інтенсивність випаровування пального. Дослідники зафіксували наявність двох пікових значень у зміні кількості відкладень зі зростанням температури. Крім того, аналіз показав, що склад і структура відкладень у цих піках значно відрізнялися, що свідчить про відмінність хімічних реакцій і компонентів, які беруть участь у їх утворенні при різних температурних умовах.

Постановка завдання. Таким чином метою роботи є комплексна оцінка впливу забруднень на характеристики розпилення форсунок Bosch 0280158117 EV14, визначення наслідків експлуатації на 1000 км та ефективності відновлення параметрів після ультразвукового очищення Titan Cleaner на стенді AUTOOL CT160, з метою забезпечення стабільної роботи паливної системи та оптимальної витрати пального.

Виклад основного матеріалу. Огляд і очищення форсунок у бензинових двигунах є ключовими процедурами технічного обслуговування, що забезпечують стабільну роботу паливної системи, оптимальну витрату пального та відповідність екологічним нормам. У таблиці 1 представлено основні види несправностей і відмов, що найчастіше виникають у форсунках.

Розглянемо основні методи діагностики паливних форсунок [10].

1. Вимірювання опору обмотки форсунки. Проводиться мультиметром. Нормальний опір: від 12 до 16 Ом (для більшості інжекторів). Відхилення свідчить про обрив або замикання обмотки.

2. Прослуховування "клацання" форсунок. За допомогою стетоскопа або викрутки перевіряється, чи працює електромагнітний клапан – чути характерне клацання при подачі імпульсу.

3. Сканування через діагностичний роз'єм (OBD-II). Зчитуються коди помилок і параметри (тривалість імпульсу впорскування, корекції паливоподачі). Дозволяє виявити несправності, наприклад P0204.

4. Тестування на стенді. Перевірка продуктивності, якості розпилення, рівномірності подачі пального. Найбільш точний метод, використовується у спеціалізованих СТО.

5. Аналіз роботи двигуна. Ознаки несправних форсунок: нестабільна робота на холостому ходу, падіння потужності, підвищена витрата палива, димність.

Таблиця 1 – Типові несправності та відмови форсунок

Механічні	Електричні	Гідравлічні
Руйнування, або втрата жорсткості пружини	Пошкодження обмотки соленоїда	Зменшення пропускної здатності
Деформація або руйнування клеми чи замка клеми	Пробій на масу або міжвиткове замикання	Втрата герметичності
Наявність тріщини у корпусі або розпилювачі	Окислення контактної групи	Погіршення якості розпилювання

Джерело: розроблено на підставі [10]

Методи очищення форсунок:

1. Хімічне очищення без зняття (промивка через паливну систему). Спеціальна рідина заливається в бак або подається через стенд. Проводиться на працюючому двигуні. Перевага: швидко і зручно. Недолік: не завжди ефективно для сильно забруднених форсунок.

2. Очищення на стенді з імпульсною подачею очищувача. Форсунки демонтуються та підключаються до тестової установки. Через них під тиском пропускається спеціальна рідина з одночасною подачею імпульсів. Дозволяє видалити нагар і смоли навіть з форсунок зі складними забрудненнями.

3. Ультразвукове очищення, вважається найефективнішим методом. Форсунки занурюють у ванну з розчином, який піддається впливу ультразвукових хвиль. Процес кавітації руйнує відкладення на внутрішніх і зовнішніх поверхнях.

Періодична перевірка та очищення форсунок є важливою складовою підтримання ефективної роботи двигуна, сприяє зниженню витрати пального й зменшенню кількості шкідливих викидів в атмосферу. Найрезультативнішими методами очищення вважаються стендовий спосіб і ультразвукова обробка.

Щодо принципу дії ультразвукового очищення, він базується на використанні пружних механічних коливань, частота яких зазвичай становить від 18 до 120 кГц. Для генерації таких хвиль застосовуються ультразвукові перетворювачі – основні елементи систем, що створюють ультразвук. При проходженні через рідке середовище ці коливання спричиняють чергування фаз стиснення й розрідження, що приводить до інтенсивного перемішування рідини та ефективного видалення забруднень із поверхні елементів.

Коли щільність ультразвукового потоку в рідкому середовищі перевищує значення 1...2 Вт/см², виникає ефект кавітації. У цьому процесі утворюються дрібні газові бульбашки, які швидко руйнуються, створюючи мікро вибухи. Ці явища значно підсилюють очищувальну дію ультразвуку. Варто зазначити, що частинки рідини мають більшу здатність до переміщення, ніж у твердих тілах, однак вони взаємодіють між собою сильніше, ніж у газоподібному середовищі, через більш виражені міжмолекулярні сили.

Наприклад, вода здатна випаровуватись при різних температурах, однак її кипіння відбувається лише при 100 °С за умови, що тиск пари дорівнює одній атмосфері. У разі впливу на рідину ультразвуку високої інтенсивності навіть при кімнатній температурі може розпочатися процес утворення газових бульбашок – це є початковим етапом кавітаційного явища.

У процесі проходження ультразвукових хвиль крізь рідке середовище, на стадії розрідження (фаза 1), утворюються мікроскопічні газові порожнини. Ці бульбашки збільшуються в об'ємі до завершення фази зниженого тиску, що є початком кавітаційного процесу. Наступна стадія – фаза стиснення (фаза 2), під час якої тиск різко зростає, чинячи вплив на бульбашки. Це призводить до стрімкого підвищення

температури газу в їхньому об'ємі (фаза 3), аж до моменту, коли бульбашки руйнуються.

Руйнування бульбашок завершується явищем імплзії – внутрішнім вибухом, який супроводжується вивільненням значної кількості енергії (фаза 4). Ця енергія активно діє на поверхню об'єкта, що підлягає очищенню. У результаті проявляється комбінований ефект: з одного боку – механічна дія у вигляді високочастотних мікрівібрацій (до 50 тисяч коливань за секунду), а з іншого – посилена хімічна взаємодія мийного середовища з поверхнею деталі. Саме цей комплексний вплив лежить в основі принципу роботи ультразвукової очистки.

Одним із сучасних стендів, що використовується для перевірки та ультразвукового очищення паливних форсунок, є AUTOOL CT160 (рис.1–4). Це професійне багатофункціональне обладнання, яке поєднує ультразвукову технологію очищення з розумною мікрокомп'ютерною системою контролю тиску в паливній магістралі [11]. Пристрій підтримує дев'ять тестових режимів, а також режим очищення, дозволяючи моделювати різні умови роботи двигуна, проводити глибоке очищення та перевіряти працездатність інжекторів.

Модель CT160 сумісна з різними типами інжекторів – зокрема GDI, EFI, FSI – завдяки підтримці трьох варіантів робочої напруги: 12 В, 70 В та 120 В. Це дозволяє застосовувати пристрій для обслуговування інжекторів провідних автомобільних марок, включаючи Mercedes-Benz, BMW, Audi, Porsche і Ford. Крім цього, стенд оснащено функцією автоматичного розпізнавання напруги інжектора. У разі неправильного вибору напруги система миттєво сповістить користувача, запобігаючи можливому пошкодженню обладнання.

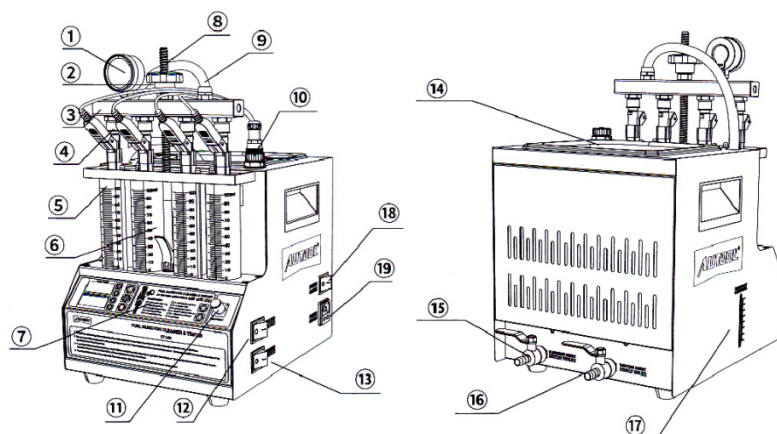


Рисунок 1 – Елементи приладу AUTOOL CT160:

1 – манометр; 2 – контргайка; 3 – масляна рампа; 4 – верхній патрубок впуску мастила; 5 – скляний мірний циліндр; 6 – ручка для зливу мастила; 7 – панель керування; 8 – замок; 9 – мастило відвідний патрубок; 10 – сигнальний провід; 11 – ручка регулювання тиску; 12 – вимикач опалення; 13 – ультразвуковий перемикач; 14 – бак ультразвукового очищення; 15 – вентиль зливу мийного засобу; 16 – кран зливу випробувального засобу; 17 – вимірювач рівня рідини; 18 – вимикач живлення; 19 – розетка.
Джерело: розроблено на підставі [11]

Ще однією корисною особливістю CT160 є наявність функції інтелектуального підігріву: рідина для очищення автоматично нагрівається до температури 50 °С, що підвищує ефективність мийного процесу та сприяє кращому видаленню забруднень.

Ключові характеристики та переваги пристрою:

1) Ультразвукова технологія очищення.

Пристрій AUTOOL CT160 застосовує високоефективну ультразвукову систему очищення, яка створює кавітаційний ефект у рідкому середовищі за допомогою високочастотних коливань. Завдяки цьому можливо делікатно, але глибоко очищати

важкодоступні ділянки інжектора від забруднень, не пошкоджуючи при цьому його поверхню.

2) Автоматичне підтримання постійної температури.

Стенд обладнано функцією інтелектуального підігріву, яка дозволяє автоматично доводити миючий розчин до оптимальної робочої температури 50 °С. Такий підхід підвищує хімічну активність рідини, сприяючи більш ефективному видаленню вкрай стійких відкладень із внутрішніх каналів паливної форсунки.

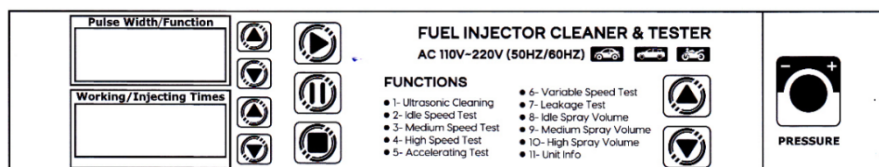


Рисунок 2 – Панель керування приладу AUTOOL CT160.

Джерело: розроблено на підставі [11]

Пристрій AUTOOL CT160 підтримує 9 режимів тестування та один режим очищення, що дозволяє проводити повноцінну діагностику і обслуговування паливних форсунок.

1. Тестування на холостому ході (0...20 мс) – моделювання роботи двигуна при мінімальних обертах дозволяє оцінити, як форсунка функціонує в режимі холостого ходу.

2. Тест на середніх обертах (0...7,5 мс) – перевірка роботи інжектора в умовах стабільного середнього навантаження.

3. Тестування на високих обертах (0...4 мс) – імітація роботи двигуна на високій швидкості з метою оцінки продуктивності форсунки.

4. Тест прискорення – моделюється перехід від спокійного стану до активного прискорення, щоб перевірити, наскільки швидко й точно працює форсунка в динамічних умовах.

5. Перевірка на герметичність – відтворення умов тиску в паливній системі під час роботи двигуна для виявлення можливих витоків.

6. Оцінка об'єму впорскування при холостому ході – імітація мінімальних обертів двигуна для визначення об'єму пального, яке розпилує інжектор.

7. Оцінка об'єму впорскування на середніх обертах – перевірка ефективності впорскування під час помірної навантаження двигуна.

8. Оцінка об'єму впорскування на високій швидкості — визначення об'єму палива, що подається форсункою при максимальному навантаженні.

9. Імпульсне тестування – перевірка інжектора шляхом моделювання змінного навантаження та частоти холостого ходу для аналізу його реакції на різкі зміни в роботі двигуна.

10. Очищення ультразвуком – очищення здійснюється за допомогою ультразвукових хвиль, які передаються до форсунок через кабель адаптера імпульсів. Завдяки цьому відбувається ефективне усунення нагару та забруднень з внутрішніх поверхонь інжектора.

AUTOOL CT160 оснащено яскравим цифровим дисплеєм з підсвічуванням високої роздільної здатності, а також зручними графічними кнопками, що забезпечують легке та інтуїтивне керування пристроєм. У межах встановлених параметрів користувач має змогу вільно налаштовувати тиск під час тестування, тривалість циклів та ширину імпульсів згідно з потребами.

Додаткові функціональні елементи пристрою наступні.

Клапан зливу очищувальної рідини дозволяє швидко відводити використану рідину з подальшою її утилізацією та очищенням резервуару. Датчик контролю рівня рідини забезпечує постійний моніторинг кількості тестової рідини в системі, сигналізуючи про необхідність її поповнення. Підсвітка скляної вимірювальної трубки дає змогу точно спостерігати за ходом тестування навіть при недостатньому освітленні. Зручна бічна ручка покращує мобільність пристрою, забезпечуючи легке транспортування та комфорт при переміщенні.

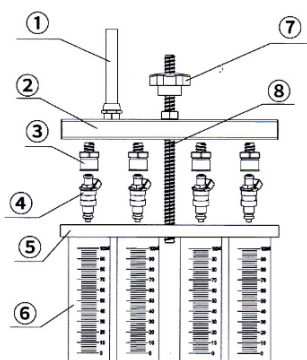


Рисунок 3 – Схема складових елементів стенду:
1 – трубопровід відводу палива; 2 – паливна рейка;
3 – верхній вхідний патрубок; 4 – форсунки; 5 – опора верхньої плити; 6 – скляний мірний циліндр;
7 – контргайка; 8 – гвинтова напрямна.

Джерело: розроблено на підставі [11]



Рисунок 4 – Загальний вигляд стенду з форсунками перед початком діагностики.

Джерело: розроблено автором

Діагностика форсунок. Ця функція призначена для виявлення розпилення, крапання, блокування, стану кута впорскування палива паливних форсунок, а також розміру та балансу впорскування палива кожної паливної форсунки на різних швидкостях. Для діагностики використаємо форсунки Bosch 0280158117 EV14 – це сучасна електромагнітна паливна форсунка бензинових двигунів із сімейства EV14, яка широко використовується як у серійних, так і в тюнінгованих системах упорскування. Вона сумісна з більшістю професійних стендів перевірки форсунок, зокрема типу AUTOOL CT160. Для діагностики використаємо два комплекти форсунок (по 4 штуки). Один новий комплект, а другий – форсунки з двигуна автомобіля, що пройшов 1000 км пробігу.

Порядок виконання діагностики наступний:

1. Переконайтеся, що ручка для зливу мастила відкрита, скористайтеся лійкою та додайте досліджувану рідину в обладнання через скляне віконце та зверніть увагу на контроль швидкості потоку під час додавання, щоб уникнути переливання. Щоразу додавайте 1 пляшку (приблизно 1000 мл) тестового засобу.

2. Встановіть паливну форсунку згідно рисунку 4.

3. Виконайте тест холостого ходу наступним чином:

1) Переконайтеся, що форсунка, яку потрібно перевірити, встановлена належним чином і сигнальний дрот підключено.

2) Виберіть «02 Idle Speed Test» (тест холостого ходу).

3) Натисніть клавіші робочого часу вгору та вниз, щоб встановити час. (Зазвичай встановлено на 2 хвилини).

4) Натисніть кнопку «start» (пуск), щоб почати роботу.

5) Поверніть ручку регулювання тиску, щоб відрегулювати тиск на 0,25...0,3 МПа. (В електронній системі впорскування загальний тиск палива працює на рівні 0,25...0,3 МПа)

6) Натисніть клавіші вгору та вниз, щоб вибрати відповідну величину імпульсу. (Системне значення за замовчуванням становить 3 мс).

7) Робочий час поступово скорочується. Коли таймер покаже «0», система автоматично зупиняється. Результати вимірювань занести в табл. 2.

4. Виконайте тест середньої швидкості наступним чином:

1) Виберіть «03 Medium Speed Test» (Тест середньої швидкості).

2) Натисніть кнопку запуску.

3) Решта операцій узгоджуються з підпунктами 3 – 7 пункту 3.

5. Виконайте тест високої швидкості.

1) Виберіть «04 High Speed Test» (Тест високої швидкості).

2) Натисніть кнопку запуску.

3) Решта операцій узгоджуються з підпунктами 3 – 7 пункту 3.

6. Виконайте тест на прискорення наступним чином:

1) Виберіть «05 Accelerating Test».

2) Натисніть кнопку запуску.

3) Решта операцій узгоджуються з підпунктами 3 – 7 пункту 3. Результати вимірювань занести в табл. 2.

7. Виконайте тест на перевірку швидкості наступним чином:

1) Виберіть «06 Variable Speed Test» (Тест змінної швидкості).

2) Натисніть кнопку запуску. Тиск палива, робочий час і ширина імпульсу встановлюються системою автоматично. Система часу за замовчуванням використовує цикл 10 секунд, і користувачеві не потрібно встановлювати його окремо. Система автоматично і безперервно циклічно виконає три рази, щоб імітувати робочі умови та об'єм уприскування палива паливної форсунки, коли двигун працює на холостому ході (750 об/хв), на середній швидкості (4500 об/хв) і на високій швидкості (7500 об/хв). Результати вимірювань занести в табл. 3.

8. Виконайте тест на герметичність форсунки наступним чином:

1) Виберіть «07 Leak Test» (Тест на герметичність).

2) Щоб встановити час, натисніть кнопки вгору та вниз. (Зазвичай встановлено на 1 хвилину)

3) Решта операцій узгоджуються з підпунктами 3 – 7 пункту 3. Величина імпульсу за замовчуванням становить 3 мс, не потрібно встановлювати її знову.

4) Виконати візуальну перевірку підтікання палива з форсунки, та встановити об'єм. Результати вимірювань занести в табл. 2.

9. Виконайте перевірку об'єму розпилення на холостому ході наступним чином:

1) Виберіть «08 Idle Spray Volume» (Об'єм розпилення на холостому ході).

2) Натисніть кнопки вгору та вниз, щоб встановити кількість разів. (Зазвичай встановлено 2000 разів)

3) Натисніть на рукоятку зливу палива, щоб спостерігати за об'ємом вприскування палива.

4) Натисніть кнопку запуску, щоб розпочати тест.

5) Після тесту підніміть зливну ручку та помістіть тестовий засіб назад у бак.

10. Виконайте тест розпилення на середній швидкості наступним чином:

1) Виберіть «09 Medium Spray Volume» (Об'єм розпилення на середній швидкості).

2) Решта операцій узгоджуються з підпунктами 2 – 5 пункту 9.

11. Виконайте високошвидкісний об'ємний тест розпилення наступним чином:
 1) Виберіть «10 High Spray Volume» (Об'єм розпилення на високій швидкості).
 2) Решта операцій узгоджуються з підпунктами 2 – 5 пункту 9.

Таблиця 2 – Результати вимірювання прямого об'єму впорскування форсунок

Режим тестування	Продуктивність форсунок на режимах роботи, мл.											
	Нові форсунки				Форсунки з пробігом 1000 км				Форсунки після УЗО			
№ Форсунок	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
«02 Тест холостого ходу»	72	73	72	74	68	66	65	67	71	72	71	73
«03 Тест середньої швидкості»	78	79	77	80	73	71	70	72	77	78	76	79
«04 Тест високої швидкості»	86	87	85	88	80	78	77	79	85	86	84	87
«05 Тест на прискорення»	81	82	80	83	75	73	72	74	80	81	79	82
«07 Тест на герметичність»	0	0	0	0	5	0	0	5	0	0	0	0
«08 Об'єм розпилення на холостому ходу»	18,4	18,7	18,1	18,9	16,2	15,9	15,5	16,0	18,1	18,3	17,8	18,5
«09 Об'єм розпилення на середній швидкості»	23,3	23,7	22,9	23,9	21,1	20,6	20,2	20,8	22,9	23,1	22,4	23,3
«10 Об'єм розпилення на високій швидкості»	28,1	28,6	27,5	28,8	25,2	24,6	24,3	24,9	27,6	27,9	27,1	28,2

Джерело: розроблено автором

Ультразвукове очищення форсунок. Порядок виконання очищення наступний.

1. Підключити кабелі живлення установки і ультразвукової ванни.
2. Додати відповідну кількість миючого засобу в ультразвуковий резервуар і розподілити миючий засіб по дну підставки для чищення так, щоб рівень рідини був на 20 мм вище за голчастий клапан форсунки. Як миючий засіб в даній роботі використовується Titan Cleaner – спеціалізована рідина для ультразвукового очищення паливних форсунок, клапанів, форсунок високого тиску, карбюраторів та інших деталей паливної системи двигунів. Вона ефективно видаляє відкладення нагару, смоли, масло, забруднення та залишки палива навіть у важкодоступних каналах.

Таблиця 3 – Результати перевірки продуктивності розпилювання форсунок при змінній швидкості (06 Тест змінної швидкості)

Стан форсунок	№ форсунки	750 об/хв	4500 об/хв	7500 об/хв	Сумарно за цикл
Нові	1	18,2	23,1	28,0	69,3
	2	18,5	23,4	28,2	70,1
	3	18,0	22,9	27,6	68,5
	4	18,7	23,6	28,4	70,7
З пробігом 1000 км.	1	16,7	21,3	25,6	63,6
	2	16,2	20,9	24,8	61,9
	3	15,9	20,4	24,5	60,8
	4	16,5	21,0	25,1	62,6
Після УЗО	1	17,9	22,6	27,4	67,9
	2	18,2	22,9	27,7	68,8
	3	17,6	22,3	27,0	66,9
	4	18,4	23,0	27,9	69,3

Джерело: розроблено автором

3. Встановити заздалегідь відмиті форсунки на полку з отворами в ультразвуковій ванні.

4. З'єднати кожну форсунку з приладом за допомогою кабелю.

5. Включити живлення ультразвукової ванни.

6. Натисніть клавіші вибору пункту вгору та вниз на панелі керування приладу, рис. 3, щоб вибрати пункт «01 Ultrasonic cleaning» (ультразвукове очищення), а потім натисніть клавіші робочого часу вгору та вниз, щоб встановити час. (Система за замовчуванням становить 10 хвилин, якщо вам потрібно змінити час, ви можете використовувати клавіші вгору та вниз для зміни)

7. Натисніть кнопку запуску та увімкніть перемикач ультразвукового очищення збоку пристрою, щоб почати очищення. Під час роботи ви можете натиснути кнопку паузи, щоб призупинити роботу, або натиснути кнопку зупинки, щоб вийти.

8. Під час процесу очищення можна увімкнути перемикач нагріву збоку обладнання, щоб покращити ефект очищення. Час роботи поступово скорочується. Коли таймер покаже 0, система автоматично зупиняється.

9. Вийміть паливну форсунку з ультразвукового бака, протріть на ній рідину для чищення м'якою тканиною та готуйтеся до очищення наступної форсунки.

10. Виконайте діагностику очищених форсунок. Результати вимірювань занесіть в табл. 2 і 3.

Виконуючи аналіз отриманих даних, згідно таблиць 2 і 3, отримуємо наступні результати діагностики форсунок «Bosch 0280158117 EV14».

За результатами тесту холостого ходу (Idle Speed Test) нові форсунки показали стабільну і рівномірну подачу палива. Після 1000 км експлуатації зафіксовано зниження об'єму впорскування приблизно на 14 %, що свідчить про часткове звуження прохідних каналів. Після ультразвукового очищення продуктивність майже повністю відновила (98 % від нових). Найбільша чутливість до забруднення спостерігається саме у режимі малої тривалості імпульсу. Встановлено, що холостий режим найбільш інформативний для виявлення початкового забруднення форсунки.

Тест середньої швидкості (Medium Speed Test) показав, що у нових форсунок подача стабільна, різниця між форсунками мінімальна. Після експлуатації зменшення об'єму становить близько 12 %, що вказує на зниження ефективної площі розпилення.

Після очищення відновлення становить близько 97 %, що підтверджує ефективність ультразвукової обробки. Балансування форсунок після очищення знаходиться в межах норми. Встановлено, що забруднення помітно впливає на продуктивність у середніх режимах, але компенсується очищенням.

Тест високої швидкості (High Speed Test) показав, що у нових форсунок забезпечується максимальна і рівномірна подача палива. Після 1000 км експлуатації зафіксовано зниження подачі приблизно на 12...13 %. Високошвидкісний режим менш чутливий до дрібних відкладень, але добре показує загальне зниження пропускної здатності. Після очищення продуктивність відновлюється до 98 %. Встановлено, що у високошвидкісному режимі головним індикатором несправності є загальна втрата пропускної здатності.

Тест прискорення (Accelerating Test) показав, що нові форсунки швидко реагують на зміну імпульсу без затримок подачі. Після експлуатації спостерігається незначне запізнення відкриття і зменшення миттєвої подачі. Після очищення динаміка впорскування відновлюється практично повністю. Встановлено, що забруднення впливає на швидкодію електромагнітного клапана та інерційність відкриття.

Тест змінної швидкості (Variable Speed Test: 750 / 4500 / 7500 об/хв) показав, що нові форсунки демонструють стабільну зміну продуктивності пропорційно режиму роботи. Після експлуатації зниження подачі фіксується на всіх швидкостях, найбільше – на низьких обертах. Після очищення характеристики подачі по всьому діапазону швидкостей відновлюються. Встановлено, що забруднення викликає нерівномірність подачі у широкому діапазоні навантажень двигуна.

Тест герметичності (Leak Test) показав, що нові форсунки повністю герметичні. Після експлуатації можливі мікропідтікання через частинки відкладень. Після очищення герметичність відновлюється. Встановлено, що забруднення може порушувати герметичність навіть без механічного зносу.

Тест на об'єм розпилення (Idle / Medium / High Spray Volume) показав, що нові форсунки демонструють стабільну подачу у всіх режимах. Після експлуатації зафіксовано системне зниження об'єму впорскування: холостий хід 14 %, середня швидкість 12 %, висока швидкість 12...13 %. Після ультразвукового очищення відновлення продуктивності становить 97...98 %. Встановлено, що основний ефект забруднення – зменшення ефективної площі проходу через сопло.

Висновки. За результатами діагностики встановлено, що навіть відносно невеликий пробіг (1000 км) призводить до зниження продуктивності форсунок внаслідок забруднення. Забруднення перш за все впливає на малу подачу палива, динаміку відкриття форсунки та рівномірність розпилення. Найбільш чутливими до забруднення є режими холостого ходу та змінного навантаження.

Ультразвукове очищення забезпечує практично повне відновлення гідравлічних характеристик форсунок. Комбінований ефект механічної дії кавітаційних мікробухів та хімічної взаємодії мийного середовища забезпечує повне видалення відкладень із внутрішніх та зовнішніх поверхонь форсунок. Відновлюються динаміка відкриття, герметичність та рівномірність розпилення. Різниця між очищеними і новими форсунками не перевищує 2...3 %, що відповідає нормі стендових випробувань.

Стендова діагностика з прямим вимірюванням об'єму є об'єктивним методом оцінки технічного стану форсунок. Регулярне очищення форсунок дозволяє: стабілізувати сумішоутворення, знизити витрату палива, покращити екологічні показники двигуна та запобігти нерівномірній роботі циліндрів.

Отримані результати можуть бути використані для вивчення ефекту різних марок пального та присадок на утворення відкладень і швидкість зносу форсунок.

Список літератури

1. Z. Zhang, et al. (2020). Effects of GDI injector deposits on spray and combustion characteristics under different injection conditions. *Fuel*, 278(5): 118094, URL:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118094>
2. H. Song et al. (2016). The effects of deposits on spray behaviors of a gasoline direct injector. *Fuel*, 180(15), pp. 506-513, URL:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.067>
3. B. Wang, et al. (2017). Investigation of deposit effect on multi-hole injector spray characteristics and air/fuel mixing process. *Fuel*, 191, pp. 10-24, URL:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.055>
4. Joedicke, A., Krueger-Venus, J., Bohr, P., Cracknell, R. et al. (2012) Understanding the Effect of DISI Injector Deposits on Vehicle Performance. *SAE Technical Paper*, 2012-01-0391, <https://doi.org/10.4271/2012-01-0391>.
5. Ding, H., Zhang, W., Ma, X., Shuai, S. et al. (2017). The Impact of GDI Injector Deposits on Engine Combustion and Emission. *SAE Technical Paper*, 2017-01-2248, URL:<https://doi.org/10.4271/2017-01-2248>.
6. J. Zhou, et al. (2018). Characteristics of near-nozzle spray development from a fouled GDI injector *Fuel*, 219, pp. 17-29, URL:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.070>
7. C. Jiang et al. (2017). Effect of fuel injector deposit on spray characteristics, gaseous emissions and particulate matter in a gasoline direct injection engine. *Applied Energy*, 203, pp. 390-402, URL:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.020>
8. C. Wang et al. (2014). Impact of fuel and injection system on particle emissions from a GDI engine. *Applied Energy*, 132, pp. 178-191, URL:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.012>
9. H. Song, et al. (2018). The effects of surface temperature on the deposit behaviors of gasoline on a hot surface. *Fuel*, 215, pp. 111-122, URL:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.017>
10. Практичні основи діагностування автомобільних двигунів : навч. посіб. / Мигаль В. Д., Корогодський В. А., Воронков О. І., Нікітченко І. М. Харків : ХНАДУ, 2021. 412 с
11. AUTOOL CT160. URL: <https://www.autooltech.com/> (дата звернення: 26.01.2026).

References

1. Z. Zhang, et al. (2020). Effects of GDI injector deposits on spray and combustion characteristics under different injection conditions. *Fuel*, 278(5): 118094, URL:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118094>
2. H. Song et al. (2016). The effects of deposits on spray behaviors of a gasoline direct injector. *Fuel*, 180(15), pp. 506-513, URL:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.067>
3. B. Wang, et al. (2017). Investigation of deposit effect on multi-hole injector spray characteristics and air/fuel mixing process. *Fuel*, 191, pp. 10-24, URL:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.055>
4. Joedicke, A., Krueger-Venus, J., Bohr, P., Cracknell, R. et al. (2012) Understanding the Effect of DISI Injector Deposits on Vehicle Performance. *SAE Technical Paper*, 2012-01-0391, <https://doi.org/10.4271/2012-01-0391>.
5. Ding, H., Zhang, W., Ma, X., Shuai, S. et al. (2017). The Impact of GDI Injector Deposits on Engine Combustion and Emission. *SAE Technical Paper*, 2017-01-2248, URL:<https://doi.org/10.4271/2017-01-2248>.
6. J. Zhou, et al. (2018). Characteristics of near-nozzle spray development from a fouled GDI injector *Fuel*, 219, pp. 17-29, URL:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.070>
7. C. Jiang et al. (2017). Effect of fuel injector deposit on spray characteristics, gaseous emissions and particulate matter in a gasoline direct injection engine. *Applied Energy*, 203, pp. 390-402, URL:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.020>
8. C. Wang et al. (2014). Impact of fuel and injection system on particle emissions from a GDI engine. *Applied Energy*, 132, pp. 178-191, URL:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.012>
9. H. Song, et al. (2018). The effects of surface temperature on the deposit behaviors of gasoline on a hot surface. *Fuel*, 215, pp. 111-122, URL:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.017>
10. Praktychni osnovy diahnostuvannia avtomobilnykh dvyhuniv : navch. posib. / Myhal V. D., Korohodskyi V. A., Voronkov O. I., Nikitchenko I. M. Kharkiv : KhNADU, 2021. 412 s
11. AUTOOL CT160. URL: <https://www.autooltech.com/> (data zvernennia: 26.01.2026).

Sergiy Posonskiy, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleg Babak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anatolij Vychavka**, PhD tech. sci.

Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

The Influence of Deposits on the Fuel Injectors' Atomization Characteristics and the Efficiency of Their Ultrasonic Cleaning on the AUTOOL CT160 Stand

The article investigates the effect of operational deposits on the spray characteristics of gasoline engine fuel injectors and evaluates the effectiveness of their restoration by means of ultrasonic cleaning. The physical mechanisms of the mixture formation process deterioration are analyzed, in particular, an increase in the length of the spray torch, droplet enlargement, uneven fuel supply and combustion chamber surfaces' wetting. The results of modern studies, confirming the negative impact of contaminants on fuel consumption, combustion stability and the level of harmful emissions, are summarized.

The experimental part of the workpaper is devoted to bench diagnostics of injectors in various technical conditions: new, after operation and after ultrasonic cleaning. A set of tests, which included checking the tightness, uniformity of fuel supply, spray characteristics and injection volume in different operating modes, was carried out. It was found out that operational deposits lead to a decrease in injector performance, disruption of the spray torch structure and operation stability deterioration.

Ultrasonic cleaning proved to be an effective way of removing contaminants and restoring the main operating parameters of injectors to values close to their original ones. The results confirm the feasibility of injectors' regular diagnostics and cleaning injectors to maintain efficient engine operation and reduce harmful emissions.

fuel injector, fuel atomization, deposits, ultrasonic cleaning, diagnostics, injector performance, mixture formation

Одержано (Received) 26.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 27.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026

УДК 629.79; 621.793.7

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14\(45\).280-292](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).280-292)

О. М. Маковкін, доц., канд. техн. наук, , **І. К. Вальчук**

Хмельницький національний університет, м.Хмельницький, Україна

e-mail: makovkinol@khmnu.edu.ua

Метрологічне та технологічне забезпечення якості при електроіскровому легуванні поверхонь деталей автомобільних двигунів

Виконано обґрунтування технологічної схеми формування зміцненого поверхневого шару деталей машин методом електроіскрового легування з урахуванням особливостей фізичних механізмів масопереносу матеріалу електрода, термічних процесів у зоні імпульсного розряду та стохастичного характеру формування мікрорельєфу поверхні. Встановлено закономірності впливу енергетичних параметрів процесу на формування мікрогеометрії поверхні, мікротвердості, товщини зміцненого шару та інтенсивності зношування. Визначено аналітичні зв'язки між режимами електроіскрового легування, структурно-фазовим станом поверхневого шару та експлуатаційними характеристиками деталей.

електроіскрове легування, поверхневий шар, мікротвердість, шорсткість, зносостійкість, енергетичні режими, технологія, обладнання

Постановка задачі. Якість робочих поверхонь деталей машин і різальних інструментів визначає їхні експлуатаційні характеристики, зокрема зносостійкість, довговічність і надійність роботи в умовах інтенсивних навантажень і підвищених температур. Вирішальну роль відіграє стан поверхневого шару — мікрогеометрія, структура, фазовий склад, рівень залишкових напружень і мікротвердість [1].

Сучасні методи поверхневого зміцнення дозволяють цілеспрямовано формувати властивості поверхневого шару. Одним із перспективних методів локального зміцнення