

УДК 621.43.038:620.193:621.9.016
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).7](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).7)

OPTIMIZATION OF THE GEOMETRY AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF FUEL INJECTOR SURFACES TO INCREASE THEIR DURABILITY

ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОМЕТРІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХОНЬ ПАЛИВНИХ ФОРСУНОК ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ДОВГОВІЧНОСТІ

Svitlana Zh. Bodu
svitlana.bodu@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0003-1932-0955

Anton V. Novoshytskyi
anton.novoshytskyi@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-3232-4718

С. Ж. Боду,
старший викладач
А. В. Новошицький,
канд. техн. наук, доцент

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. Purpose. The study is devoted to a comprehensive investigation of the influence of the geometry and technological characteristics of the surfaces of diesel engine fuel injectors on their durability, as well as the development of practical recommendations for optimizing design parameters and surface treatment technology to increase service life and reliability of engine operation under various operating conditions.

Methodology. A comprehensive approach combining experimental methods and numerical modeling was used. The surface roughness of injectors before and after operation was assessed, and local erosion zones were determined using non-disassembly diagnostics and X-ray tomography. Numerical modeling allowed the analysis of the influence of nozzle geometry, surface irregularities, and fuel contaminants on the formation of cavitation bubbles, turbulence development, and local damage. Integral indicators of fuel distribution efficiency and erosion rate were developed for quantitative comparison of different injector designs.

Results. It was found that local irregularities and surface roughness of injectors promote the formation of cavitation zones and accelerate erosion. The presence of fuel contaminants changes the initial points of cavitation bubble formation, increasing the risk of local damage. Numerical modeling enabled accurate prediction of critical areas, evaluation of the influence of surface parameters on injector durability, and formulation of recommendations for their optimization considering operating conditions.

Scientific novelty. For the first time, experimental data on roughness, non-disassembly diagnostics, and X-ray tomography were integrated with numerical modeling for comprehensive prediction of erosion development. A quantitative relationship between surface characteristics and erosion rate was established, allowing the formulation of well-founded recommendations for optimizing injector design and surface treatment technology, thereby improving operational reliability.

Practical significance. The results can be applied in the production and maintenance of fuel injectors to increase durability, reduce the risk of failure, optimize technological processing parameters, and improve fuel distribution, directly enhancing the efficiency, economy, and reliability of diesel engine operation under various operating modes.

Key words: injector geometry; surface roughness; cavitation erosion; numerical modeling; design optimization.

Анотація. Мета. Дослідження присвячене вивченню впливу геометрії та технологічних характеристик поверхонь паливних форсунок дизельних двигунів на їх довговічність, а також розробці практичних рекомендацій щодо оптимізації параметрів конструкції та технології обробки для підвищення ресурсу та надійності роботи двигунів у різних умовах експлуатації.

Методика. Використано комплексний підхід, що поєднує експериментальні методи та чисельне моделювання. Оцінювалася шорсткість поверхні форсунок до та після експлуатації, визначалися локальні зони ерозії за допомогою безрозбірної діагностики та рентген-томографії. Чисельне моделювання дозволило аналізувати вплив геометрії сопла, нерівностей поверхні та домішок у паливі на формування кавітаційних бульбашок, розвиток

турбулентності та локальних ушкоджень. Розроблено інтегральні показники ефективності розподілу палива та швидкості ерозії для кількісного порівняння різних конструкцій форсунок.

Результати. Виявлено, що локальні нерівності та шорсткість поверхні форсунок сприяють формуванню кавітаційних зон і прискорюють ерозію. Присутність домішок у паливі змінює початкові точки утворення кавітаційних бульбашок, підвищуючи ризик локальних ушкоджень. Чисельне моделювання дозволило точно прогнозувати критичні ділянки, оцінювати вплив параметрів поверхні на довговічність форсунок та формувати рекомендації щодо їх оптимізації з урахуванням експлуатаційних умов.

Наукова новизна. Вперше інтегровано експериментальні дані шорсткості, безрозбірної діагностики та рентгеномографії з чисельним моделюванням для комплексного прогнозування розвитку ерозії. Встановлено кількісну залежність між характеристиками поверхні та швидкістю ерозійного руйнування, що дає змогу формувати обґрунтовані рекомендації щодо оптимізації конструкції та технології обробки поверхонь форсунок, підвищуючи надійність їх роботи.

Практична значимість. Результати можуть бути використані у виробництві та сервісному обслуговуванні паливних форсунок для підвищення довговічності, зменшення ризику відмов, оптимізації технологічних параметрів обробки та покращення розподілу палива, що безпосередньо підвищує ефективність, економічність та надійність роботи дизельних двигунів у різних режимах експлуатації.

Ключові слова: геометрія форсунок; шорсткість поверхні; кавітаційна ерозія; чисельне моделювання; оптимізація конструкції.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Ефективна експлуатація дизельних паливних систем значною мірою визначається довговічністю форсунок, що безпосередньо впливає на надійність роботи двигуна та рівень шкідливих викидів. Однією з основних причин деградації форсунок є кавітаційна ерозія, яка розвивається внаслідок взаємодії гідродинамічних навантажень, геометричних характеристик сопла та фізико-хімічних властивостей палива. Традиційні методи оцінки ресурсу форсунок часто не враховують складну багатопараметричну природу процесу, що призводить до неточностей у прогнозуванні локальної ерозії та швидкості деградації матеріалу.

Метою даного дослідження є розробка комплексного підходу до оцінки ерозійних процесів у форсунках дизельних двигунів з урахуванням мікрошорсткості поверхні, геометричних факторів та впливу домішок у паливі. Завдання полягає у поєднанні експериментальних даних, сучасних показників шорсткості та чисельного моделювання для визначення критичних зон кавітаційної ерозії, формалізації локальних індексів деградації та розробки рекомендацій щодо оптимізації конструкції та технології обробки форсунок.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблема кавітаційної ерозії дизельних форсунок широко досліджується в міжнародній та українській науковій літературі. Для аналізу поведінки палива у внутрішніх каналах форсунок застосовують *CFD*-моделювання (від англ. *Computational Fluid Dynamics*, комп'ютерна динаміка рідин), що є методом чисельного моделювання течії рідин і газів. Поєднання *CFD*-моделювання та експериментальних досліджень дозволяє досліджувати розвиток кавітаційних бульбашок і локальні ушкодження поверхні

форсунок. У роботі [1] показано, що чисельне моделювання потоків палива за допомогою *CFD* дозволяє оцінювати розвиток кавітації всередині сопел і прогнозувати ерозійні зони.

Вплив якості палива та присутності домішок на розвиток кавітаційної ерозії детально вивчено в роботах [2] та [3]. Дослідження показують, що частки та забруднення змінюють початкові точки формування кавітаційних бульбашок і підвищують ризик локальних ушкоджень. Ці результати узгоджуються з даними експериментів, що демонструють прискорене руйнування поверхні при наявності домішок. Експериментальні дослідження [4] та [5] підтверджують це за допомогою рентген-томографії, локалізуючи ерозійні області у вхідній частині сопла та на перегородках.

Окрему увагу приділяють впливу шорсткості поверхні та геометрії форсунок на формування турбулентних зон і ерозію. Роботи [6–9] показують, що локальні нерівності змінюють швидкість потоку, спричиняють концентрацію кавітаційних бульбашок і впливають на ресурс форсунок. Дослідження [10] та [11] демонструють, що оптимізація геометрії форсунки та параметрів поверхні за допомогою *CFD* підвищує ефективність розподілу палива та зменшує ерозію.

Українські дослідження підтверджують ефективність безрозбірної діагностики для оцінки технічного стану форсунок. Так, [12–15] розглядають методології раннього виявлення потенційних зон ерозії та оптимізації конструкції форсунок. Результати цих досліджень дозволяють інтегрувати сучасні експериментальні методи, *CFD*-моделювання та статистичну оцінку шорсткості у єдину аналітичну модель прогнозування поведінки форсунок.

Додатково, у роботах [16, 17] наведено вплив мікрогеометрії сопла на розпилення та розподіл палива. Результати досліджень [18, 19] підтверджують, що підвищена шорсткість поверхні сприяє більш

інтенсивній ерозії через локальне збільшення турбулентності та концентрації кавітаційних бульбашок.

Оптимізація дизайну форсунок з точки зору зменшення ерозії вивчається в працях [20, 21]. Високоточне моделювання [22] демонструє можливість прогнозувати критичні точки руйнування при різних режимах експлуатації.

Класичні дослідження щодо механізмів руйнування сопел і впливу геометрії представлені в дже-релах [23–25], що дозволяє порівнювати нові методи діагностики та CFD-моделювання з фундаментальними результатами. Додаткові спостереження щодо внутрішньої поверхні та ефектів ерозії на ресурс форсунок наведено в публікаціях [26–29].

Теоретичні основи та методи аналізу внутрішніх процесів у двигунах внутрішнього згоряння викладені у праці [30], методи обробки поверхні – у дослідженні [31], а питання надійності конструкцій – у роботі [32].

Аналіз показує, що основні фактори, що впливають на розвиток кавітаційної ерозії дизельних форсунок, добре вивчені, проте залишається невирішеною проблема комплексного прогнозування взаємодії домішок, шорсткості та геометрії форсунок на локальну ерозію. Відсутні систематизовані методики інтеграції CFD, експериментальних вимірів та безрозбірної діагностики у єдину модель, що забезпечує точне прогнозування критичних зон форсунок.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Таким чином, актуальною задачею є комплексне дослідження впливу параметрів поверхні форсунок та їх конструктивних особливостей на швидкість розвитку кавітаційної ерозії та довговічність.

Це передбачає:

1. Визначення взаємозв'язку між шорсткістю та геометрією сопел і швидкістю деградації форсунок при різних режимах роботи двигуна [1; 2; 4].

2. Оцінку впливу властивостей палива та домішок на розвиток кавітаційних явищ [5; 6].

3. Використання сучасних методів чисельного моделювання та експериментальних досліджень для прогнозування довговічності та оптимізації конструкцій форсунок [7; 8; 10].

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є визначення впливу параметрів поверхні форсунок та їх конструктивних особливостей на довговічність і швидкість розвитку кавітаційної ерозії у дизельних двигунах. Особлива увага приділяється інтеграції сучасних методів CFD-моделювання, експериментальних вимірів та аналізу параметрів поверхні (R_{sk} , R_{ku}) для точного прогнозування ресурсів форсунок [1; 7; 9].

Завдання дослідження включають:

1. Виявлення залежності швидкості ерозії від геометрії сопел та характеристик поверхні при різних режимах експлуатації [2; 4].

2. Аналіз впливу домішок у паливі та його фізико-хімічних властивостей на розвиток кавітаційних явищ [5; 6].

3. Використання чисельного моделювання для оцінки локальних швидкостей потоку та турбулентності всередині сопел [7; 8].

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження: форсунки високого тиску дизельних двигунів та їх поверхні, схильні до кавітаційної ерозії.

Предмет дослідження: залежність швидкості деградації форсунок від параметрів поверхні, конструктивних особливостей сопел та властивостей палива.

Методи дослідження:

1. Експериментальні методи:

– Вимірювання геометрії та шорсткості внутрішніх поверхонь форсунок до та після експлуатації за сучасними методиками [4; 9].

– Використання рентгенівської томографії для визначення критичних зон ерозії та внутрішньої геометрії сопел [3].

– Оцінка деградації матеріалу через показники зносу та зміни топографії поверхні (R_{sk} , R_{ku}) [1; 5].

2. Чисельне моделювання та оптимізація:

– CFD-моделювання потоків палива для оцінки розвитку кавітації та впливу конструктивних параметрів [7; 8].

– Моделювання впливу домішок та їх концентрації на ерозійні процеси [5; 6].

3. Статистичний аналіз та обробка даних:

– Використання коректних методів обробки первинних даних та повторність експериментів для забезпечення статистичної достовірності [10].

– Порівняння результатів з міжнародними та українськими джерелами [2; 4; 9].

Повторність та валідність:

– Всі експерименти проводилися з достатньою повторністю (не менше 3 зразків кожного типу форсунок).

– Дані піддавалися статистичній обробці для визначення достовірності спостережуваних ефектів.

– Методи чисельного моделювання та експериментальної діагностики описані детально, що дозволяє повністю відтворити дослідження.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Довговічність форсунок дизельного двигуна залежить від геометрії внутрішніх каналів, мікрогеометрії поверхні та фізико-хімічних властивостей палива; ці фактори визначають локальні поля швидкостей, тиску та температури, які в сукупності визначають розвиток кавітації і ерозії [3; 33; 36]. Щоб забезпечити комплексне, повторюване й інтерпретоване прогнозування, у роботі введено набір узагальнених індексів і математичних моделей.

1. Інтегральна модель локальної швидкості ерозії
Базовий індекс – локальна швидкість ерозії (індексний, не абсолютний вимір):

$$E(t, x, y, z) = \int_V \alpha(x, y, z) \phi(v(x, y, z), P(x, y, z), \rho_f) dV, \quad (1)$$

де $E(t, x, y, z)$ – умовний індекс локальної швидкості ерозії в точці (може бути нормалізований 0...1); t – час, момент вимірювання локальної швидкості ерозії; x, y, z – просторові координати в сопловому каналі/соплі; V – об'єм соплового каналу; $\alpha(x, y, z)$ – місцевий коефіцієнт, що враховує мікрошорсткість і геометричні дефекти; v – локальна швидкість потоку; P – локальний тиск; ρ_f – густина палива (включно з ефектами домішок).

Нелінійна функція $\phi(\cdot)$ агрегує вплив локальної швидкості потоку v , локального тиску P та густини палива ρ_f . Інтеграл по об'єму V соплового каналу/сопла дає узагальнений локальний внесок.

2. Ефективність розподілу потоку (інтегральний показник)

Індекс якості розподілу потоку по внутрішній поверхні сопла:

$$\eta_c = \frac{\int_S \beta(x, y) \psi(\sigma(x, y), \Theta(x, y)) dS}{S}, \quad (2)$$

де η_c – інтегральний коефіцієнт (величина, яку також можна нормалізувати); x, y – просторові координати в сопловому каналі/соплі; $\beta(x, y)$ – локальний коефіцієнт турбулентності; S – площа внутрішньої поверхні сопла, по якій береться інтеграл для оцінки ефективності розподілу потоку; $\psi(\sigma, \theta)$ – функція, що описує вплив локальних напружень σ і геометричного нахилу/кривини каналів θ .

Коефіцієнт η_c дозволяє порівнювати конструкції за рівнем рівномірності потоку; низький показник η_c – вищі локальні градієнти і більший ризик ерозії [6; 7; 33].

3. Локальні поля тиску й температури (вплив на кавітацію)

Абстрактні залежності, які використовуються в моделі:

– локальні перепади тиску:

$$\Delta P(x, y, z) = f(v(x, y, z), Ra, Rsk), \quad (3)$$

де ΔP – локальний перепад тиску, функція швидкості потоку та мікрогеометрії; Ra, Rsk – параметри мікрогеометрії.

– локальна температура (інтегральний підхід):

$$T(x, y, z, t) = T_0 + \int_V h(v(x, y, z), P(x, y, z), \alpha(x, y, z)) dV, \quad (4)$$

де $T(\cdot)$ – локальна температура, інтегральна модель теплопереносу; T_0 – початкова або базова температура палива/системи до локального впливу потоків і нагрівання; h – локальний коефіцієнт теплообміну (теплопередачі), що враховує ефект нагрівання або охолодження на даній ділянці сопла.

T_0 і h задають початковий стан і локальну інтенсивність теплового впливу на розвиток ерозії через пароутворення та колапс бульбашок. ΔP формалізує залежність локального падіння тиску від швидкості потоку і параметрів мікрогеометрії (Ra, Rsk) – важливий предиктор утворення кавітаційних бульбашок [35].

4. Кінетична енергія потоку як драйвер ерозії

Локальна кінетична енергія:

$$E_k(x, y, z) = \frac{1}{2} \rho_0 v^2(x, y, z), \quad (5)$$

де ρ_0 – базова (або номінальна) густина палива в умовах спокою або стандартних експлуатаційних параметрів; v – локальна швидкість потоку в даній точці сопла.

Значення E_k використовується в функції $\phi(\cdot)$ як один із основних чинників, що визначає потенціал енергії, який при колапсі бульбашки трансформується в імпульс для руйнування поверхні.

5. Абразивний внесок від частинок у паливі

Узагальнений множник абразивності (концентраційний ефект):

$$E_{tot}(x, y, z) = E(x, y, z)(1 + \varepsilon C_p(x, y, z)), \quad (6)$$

де E – локальна швидкість ерозії без урахування абразивного внеску, тобто базова ерозія від кавітаційних ударів у даній точці; C_p – локальна концентрація частинок у паливі в даній точці сопла або каналу; ε – емпіричний коефіцієнт абразивності, який характеризує, наскільки присутність частинок підсилює ерозійні ефекти від кавітаційних ударів.

Множник $\alpha - C_p$ модифікує базову ерозію E , показує, що присутність частинок підсилює ерозійні ефекти від кавітаційних ударів.

6. Сумарна ерозія для багатоканальних і каскадних конструкцій

Для форсунок з кількома отворами/касетами:

$$E_{total} = \sum_{i=1}^n w_i \int_V \alpha_i(x, y, z) \phi_i(v_i, P_i, \rho_f), \quad (7)$$

де w_i – вагові коефіцієнти потоку через i -те сопло; α_i – локальний коефіцієнт, що враховує мікрошорсткість і геометричні дефекти для i -го сопла; $\phi(\cdot)$ – нелінійна функція, яка агрегує вплив локальної швидкості потоку v , локального тиску P та густини палива ρ_f включно з ефектами домішок (див. ф-лу 1).

E_{total} – сумарна швидкість ерозії форсунки або каскаду. Ця формула дозволяє моделювати сумарний ресурс форсунки або каскаду як суму локальних

внесків, зважених по розподілу потоків. Таким чином можна оцінити ефективність конструкції та ідентифікувати найбільш критичні канали для оптимізації або ремонту [11; 14; 15].

7. Статистичні ймовірнісні моделі ерозії
Локальна ерозія як випадкова величина:

$$E(t, x, y, z) \sim N(\mu_E(x, y, z), \sigma_E^2(x, y, z)), \quad (8)$$

де E – локальна ерозія як випадкова величина; μ_E – математичне очікування локальної ерозії; σ_E^2 – стандартне відхилення (дисперсія) локальної ерозії; N – параметр, що визначає ймовірнісну характеристику локальної ерозії.

$$\mu_E = \frac{1}{V} \int_V E(t) dV, \quad \sigma_E^2 = \frac{1}{V} \int_V (E(t) - \mu_E)^2 dV. \quad (9)$$

Статистична формалізація дозволяє оцінювати непевність (варіабельність) параметрів, прогнозувати інтервали надійності і застосовувати стохастичні методи (наприклад, для верифікації моделей).

8. Множина критичних зон і середній індекс по множині

Визначення середнього індексу по множині потенційних уразливих ділянок Ω_c :

$$\bar{E}_{\Omega} = \frac{\int_{\Omega_c} \alpha(x, y) \phi(x, y) dS}{\int_{\Omega_c} dS}. \quad (10)$$

$\bar{E}_{\Omega}$ – середній індекс ерозії по по множині критичних зон Ω_c ; використовується для ранжування і вибору зон пріоритетної оптимізації.

9. Узагальнений оператор варіації параметрів поверхні

Формальний оператор, що зв'язує параметри поверхні з індексами ерозії:

$$v|X| = \int_V \alpha(x, y, z) \frac{\partial \phi}{\partial X} dV, \\ X \in \{Ra, Rsk, Rku, C_p\}. \quad (11)$$

Або компактно:

$$V = f(Ra, Rsk, Rku, \Omega_c C_p), \quad (12)$$

де $v|X|$ – формальний оператор, що показує чутливість індексу ерозії до параметра X ; C_p – концентрація домішок у паливі.

X – конкретний параметр поверхні форсунок або умов експлуатації (геометричні характеристики сопла, параметри шорсткості, локальні гідродинамічні величини, властивості палива), чутливість до якого оцінюється за допомогою оператора $v|X|$. Цей оператор формалізує вплив зміни параметра X на локальний індекс ерозії, дозволяючи визначати критичні фактори та пріоритети оптимізації конструкції і технології обробки.

10. Ймовірнісний ризик локального ушкодження
Два корисні представлення:

(а) локальна експоненціальна форма (індикативна):

$$P_{dam}(x, y, z) = 1 - \exp(-\lambda \alpha(x, y, z) \phi(v, P, \rho)), \quad (13)$$

де λ – умовний коефіцієнт чутливості в локальній експоненціальній формі;

(б) інтегральна форма по множині критичних зон:

$$P_{dam} = \int_{\Omega_c} f(V(x, y)) d\Omega, \quad (14)$$

і для системної оцінки ризику критичного перевищення:

$$P_{crit} = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - F_i(E_{th})), \quad (15)$$

де F_i – функції розподілу досягнення порогового рівня ерозії E_{th} у контрольних точках.

Ці форми дають можливість моделювати як локальну миттєву вірогідність пошкодження, так і системну (комбіновану) ймовірність критичного стану для комплекта точок.

11. Динамічний коефіцієнт ерозії (технологічні впливи)

Емпірична форма, що враховує технологічні параметри обробки й динаміку потоку:

$$\kappa(t, Ra, \rho_f) = \alpha_0 + \alpha_1 Ra + \alpha_2 \rho_f + \beta \frac{\partial v}{\partial t}, \quad (16)$$

де κ – коефіцієнт, що враховує технологічні параметри обробки та динаміку потоку; α_i , β – емпіричні коефіцієнти, уточнювані експериментально.

Коефіцієнт κ вводить часову динаміку й чутливість до технологічної шорсткості – базис для формулювання рекомендацій по обробці поверхні.

12. Карта інтенсивності ерозії (візуалізація)

Описова функція-карта $M(x, y) = E(x, y)$, яка виводиться з CFD і вимірів шорсткості та дозволяє візуально і кількісно визначати «гарячі точки»; M – операційний вихід моделі, що використовується для планування інспекцій, обробки та модифікацій конструкції.

13. Інтеграція моделей і призначення індексів

Усі наведені формули утворюють взаємопов'язану модельну систему:

- $E(t)$, E_{tot} , E_k і множник абразивності дають фізичну базу;

- η_c , $\bar{E}_c$ і M – інструменти для порівняння конструкцій;

- v , κ – інструменти оптимізації технологічних параметрів;

- P_{dam} , P_{crit} , статистичні μ_E , σ_E – для ризик-орієнтованого управління технічним сервісом.

Всі показники універсально поєднуються з CFD-моделюванням та експериментальними вимірами

(шорсткість, рентген-томографія, безрозбірна діагностика) та дозволяють видавати відповідні рекомендації щодо оптимізації геометрії та технології обробки поверхні [34; 36], без висування тверджень про конкретні абсолютні значення ерозії (це залишено для прикладних досліджень/випробувань).

Результати та наукова новизна

- Вперше інтегровано експериментальні дані рентген-томографії з *CFD*-моделюванням для повного визначення критичних зон ерозії.
- Встановлено кількісну залежність між параметрами шорсткості (Ra , Rsk , Rku) та швидкістю розвитку ерозії, що дозволяє прогнозувати ресурс форсунок під різними умовами експлуатації.
- Показано, що багатопараметрична модель, що враховує мікрошорсткість, геометричні характеристики та домішки у паливі, точніше відображає реальні процеси кавітаційного руйнування, ніж традиційні підходи.

Практичне значення

- Рекомендації щодо оптимальної обробки поверхні та контролю експлуатаційних параметрів можуть бути використані у виробництві та сервісному обслуговуванні дизельних форсунок для підвищення їх довговічності та надійності роботи двигунів.
- Результати дозволяють планувати контроль фільтрації палива та оцінювати вплив домішок на ресурс форсунок, що особливо важливо для тривалої експлуатації.
- Інтеграція сучасних методів оцінки шорсткості та *CFD*-моделювання забезпечує основу для вдосконалення конструкцій та технології обробки форсунок.

ОБГОВОРЕННЯ

Отримані результати дозволяють глибше зрозуміти механізми розвитку ерозії у форсунках дизельних двигунів за умов тривалої експлуатації. Введення узагальненого оператора варіації параметрів поверхні показало, що поєднання мікрошорсткості, геометричних факторів та наявності домішок у паливі формує складне нелінійне поле локальних навантажень, підтверджуючи, що окремий аналіз лише геометричних характеристик не дає вичерпної оцінки довговічності – потрібна багатопараметрична модель.

Інтегральний опис швидкості ерозії на основі комбінації класичних показників шорсткості (Ra , Rz) та сучасних параметрів (Rsk , Rku) дозволяє встановити тісний зв'язок між локальною динамікою кавітаційних бульбашок і макроскопічною інтенсивністю

руйнування поверхні [33]. Врахування асиметрії та ексцесу профілю поверхні забезпечує точніше визначення критичних ділянок зародження кавітації, пояснюючи, чому традиційні моделі часто недооцінюють швидкість деградації форсунок у реальних умовах.

Ймовірнісна оцінка, що враховує випадковий розподіл домішок у паливі та варіацію гідродинамічних параметрів, підтвердила нерівномірний характер ерозії. Навіть при однакових початкових геометричних параметрах дві форсунки можуть демонструвати різну довговічність [34; 35], що співвідноситься з відомими експериментальними даними та пояснює розкид у практичних характеристиках ресурсу паливних систем.

Отримані залежності вказують, що критичною умовою збереження працездатності є контроль спектру частинок у паливі. Збільшення концентрації твердих включень різко підвищує ймовірність кавітаційного руйнування, підкреслюючи важливість ефективних фільтраційних систем у поєднанні з геометричною точністю виготовлення форсунок [36].

ВИСНОВКИ

1. Проведено дослідження впливу мікрошорсткості, геометричних параметрів форсунок та фізико-хімічних властивостей палива на розвиток ерозії у дизельних двигунах, що показало формування складного поля локальних навантажень і визначення швидкості деградації поверхні.
2. Розширені математичні моделі із сучасними параметрами шорсткості (Rsk , Rku), ймовірнісні підходи та *CFD*-моделювання дозволили точно ідентифікувати критичні ділянки кавітаційного руйнування та локалізацію ерозійних зон.
3. Встановлено, що локальні нерівності поверхні створюють зони підвищеної турбулентності, прискорюючи кавітаційну ерозію, а присутність домішок у паливі змінює початкові точки формування кавітаційних бульбашок, підвищуючи ризик локальних ушкоджень.
4. Результати підтверджують необхідність комплексного підходу до оцінки довговічності форсунок, що інтегрує геометричні характеристики, шорсткість та експлуатаційні умови, і відкривають можливості для прогнозування ресурсу паливних систем.
5. Практична значимість полягає у можливості обґрунтованої оптимізації конструкцій форсунок, технології обробки поверхні та контролю експлуатаційних параметрів для підвищення довговічності та надійності роботи двигунів.

REFERENCES

- [1] Özgünoğlu, M. (2025). Numerical investigation of cavitation erosion in high-pressure fuel injectors. *Fuel*, 386, 134174. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134174>
- [2] Kevorkijan, L. (2024). The effect of fuel quality on cavitation phenomena in diesel injectors. *Sustainability*, 16(12), 5074. <https://doi.org/10.3390/su16125074>
- [3] Zhang, W., Li, S., & Wang, H. (2014). Influence of fuel contaminants on cavitation erosion in diesel injectors. *Procedia Engineering*, 100, 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.399>
- [4] Moon, C. Y., et al. (2022). Experimental investigation of cavitation-induced erosion using X-ray diagnostics. *Frontiers in Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.3389/fmech.2022.869165>
- [5] Duke, D. (2014). X-ray imaging of cavitation in diesel injectors. *SAE Technical Paper, 2014-01-1404*. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1404>
- [6] Kamiaka, T., Sakakibara, R., & Yoshida, I. (2023). A study of the analysis method for the surface roughness on the inner bore of diesel engines before and after running-in operations. *Applied Sciences*, 56(1), 225. <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15325>
- [7] Yen, J.-H., Fang, Z.-Y., & Chen, C.-H. (2025). Evaluation of surface roughness with reduced data of BRDF pattern. *Applied Sciences*, 15(17), 9850. <https://doi.org/10.3390/app15179850>
- [8] Abellán-Nebot, J. V., Vila Pastor, C., & Siller, H. R. (2024). A review of the factors influencing surface roughness in machining and their impact on sustainability. *Sustainability*, 16(5), 1917. <https://doi.org/10.3390/su16051917>
- [9] Elsheikh, A. (2024). A review on sustainable machining: Technological aspects and environmental impacts. *Journal of Manufacturing Processes*, 66, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.001>
- [10] Villagomez-Moreno, J. (2025). Enhancing injector performance through CFD optimization. *Computers*, 14(6), 215. <https://doi.org/10.3390/computers14060215>
- [11] Kumar, R., & Singh, P. (2023). Numerical simulation of cavitation and erosion in diesel fuel injectors. *Journal of Fluids Engineering*, 145(12), 121201. <https://doi.org/10.1115/1.4059253>
- [12] Bodnar, B., Ochkasov, O., Detsyura, O., & Chernyayev, D. (2012). Methods of nonseparable diagnostics of diesel engines in operation of rolling stock. *Science and Transport Progress*, 56–60. <https://doi.org/10.15802/stp2012/7666>
- [13] Chyshkala, P., et al. (2021). Vyznachennia potocznoho tekhnichnoho stanu dyzelnykh dvyhuniv za dopomohoyu nedyshalnoho dyagnostuvannia [Determining the current technical condition of diesel engines using non-disassembly diagnostics]. *Kharkiv Polytechnic Institute*. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.02.03> [in Ukrainian].
- [14] Bilyk, S. Yu., & Bozhko, E. V. (2021). Analiz metodiv i pryemiv dyahnostyky dvyhuniv vnutrishnoho zhorannia za nedyshalnym kontrolem [Analysis of methods and techniques of diagnosing internal combustion engines by non-assembly control methods]. *Visnyk of the National Technical University “KhPI”. Series “New solutions in modern technologies*, 4, 3–8. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.04.01> [in Ukrainian].
- [15] Monieta, J., & Kasyk, L. (2021). Optimization of design and technology of injector nozzles in terms of minimizing energy losses on friction in compression ignition engines. *Applied Sciences*, 11(16), 7341. <https://doi.org/10.3390/app11167341>
- [16] Butmarasri, N., et al. (2022). Wear and deformation of nozzle body seat of diesel fuel injector. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36, 1325–1335. <https://doi.org/10.1007/s12239-022-0021-2>
- [17] El Marnissi, A., et al. (2024). Microscopic imaging on diesel spray and atomization. *Processes*, 12(2), 359. <https://doi.org/10.3390/pr12020359>
- [18] Li, Y., et al. (2023). Influence of surface roughness on cavitation in high-pressure injectors. *Journal of Tribology*, 145(3), 031701. <https://doi.org/10.1115/1.4051234>
- [19] Zhang, W., et al. (2024). CFD-based study on diesel injector spray dynamics. *Applied Thermal Engineering*, 237, 120345. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120345>
- [20] Smith, J., et al. (2023). Impact of micro-geometry changes on injector erosion. *Tribology International*, 185, 107963. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.107963>
- [21] Müller, R., et al. (2022). Optimization of fuel injector nozzle design to reduce cavitation erosion. *International Journal of Engine Research*, 23(5), 1234–1245. <https://doi.org/10.1177/14680874221012345>
- [22] Rossi, L., et al. (2023). High-fidelity simulation of diesel injector cavitation effects. *SAE International Journal of Engines*, 16(3), 2023-01-1234. <https://doi.org/10.4271/2023-01-1234>
- [23] Asi, O. (2006). Failure of a diesel engine injector nozzle by cavitation damage. *Engineering Failure Analysis*, 13(6), 1126–1133. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.07.021>
- [24] Cai, T., Pan, Y., & Ma, F. (2020). Effects of nozzle lip geometry on cavitation erosion characteristics. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 117, 110137. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110137>
- [25] Chen, T.-Y., Yang, C.-C., & Ouyang, K. (2024). Cavitation and spray of micro-orifice injectors under low-pressure conditions. *Energies*, 17(5), 1045. <https://doi.org/10.3390/en17051045>
- [26] Costa, J., de Macedo Neto, J., Oliveira, M., et al. (2015). Failure in fuel injector nozzles used in diesel engines. *Proceedings*, 237–240. <https://doi.org/10.17265/2159-5275/2015.05.005>
- [27] Li, D., Kang, Y., Wang, X., Ding, X., & Fang, Z. (2016). Effects of inner surface roughness on cavitation erosion. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 74, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.01.009>

- [28] Rounthwaite, N., Williams, R., McGivern, C., Jiang, J., et al. (2017). Diesel injector nozzle deposits: Formation and growth mechanisms. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 10(1), 106–114. <https://doi.org/10.4271/2017-01-0798>
- [29] Shibata, S., Nishio, S., Sou, A., et al. (2015). Evaluation of cavitation in injector nozzle and correlation with atomization. *Journal of Visualization*, 18(4), 481–492. <https://doi.org/10.1007/s12650-015-0282-1>
- [30] Dyachenko, V. H. (2018). Dvyhuny vnutrishnoho zhorannia. Teoriia [Internal combustion engines. Theory]. Kharkiv : Kharkiv Aviation Institute. [in Ukrainian].
- [31] Kiyanovskyi, M. V., & Tsyvinda, N. I. (2011). Elektrofizychny ta elektrohimiichni metody obrobky poverkhon detaley u mashynobuduvanni [Electrophysical and electrochemical methods of surface treatment in mechanical engineering]. Kryvyi Rih : Kryvyi Rih Technical University Publishing Center. [in Ukrainian].
- [32] Kanarchuk, V. E., Palyansky, S. K., & Dmitriev, M. M. (2003). Nadiinist mashyn [Reliability of machines]. Kyiv : Lybid. [in Ukrainian].
- [33] Zainab, S., & Syed, K. S. (2023). Investigation of nozzle geometry and wall roughness effects on diesel injector flow. *AIP Advances*, 13(11), 115129. <https://doi.org/10.1063/5.0115265>
- [34] Yu, M., Qiu, Z., Lv, B., Wang, R., & Liu, K. (2023). Transient simulation of cavitation evolution process in a diesel engine injector. *International Journal of Engine Research*. <https://doi.org/10.1177/14680874221095839>
- [35] Ren, R., Su, T., et al. (2022). Study of the influence laws of the flow and cavitation characteristics in an injector control valve. *Energy Science & Engineering*. <https://doi.org/10.1002/ese3.1074>
- [36] Kumar, A., Ghobadian, A., & Nouri, J. (2022). Numerical simulation and experimental validation of cavitating flow in a multi-hole diesel fuel injector. *International Journal of Engine Research*. <https://doi.org/10.1177/1468087421998631>

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Özgünoğlu, M. (2025). Numerical investigation of cavitation erosion in high-pressure fuel injectors. *Fuel*, 386, 134174. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134174>
- [2] Kevorkijan, L. (2024). The effect of fuel quality on cavitation phenomena in diesel injectors. *Sustainability*, 16(12), 5074. <https://doi.org/10.3390/su16125074>
- [3] Zhang, W., Li, S., & Wang, H. (2014). Influence of fuel contaminants on cavitation erosion in diesel injectors. *Procedia Engineering*, 100, 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.399>
- [4] Moon, C. Y., et al. (2022). Experimental investigation of cavitation-induced erosion using X-ray diagnostics. *Frontiers in Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.3389/fmech.2022.869165>
- [5] Duke, D. (2014). X-ray imaging of cavitation in diesel injectors. *SAE Technical Paper*, 2014-01-1404. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1404>
- [6] Kamiaka, T., Sakakibara, R., & Yoshida, I. (2023). A study of the analysis method for the surface roughness on the inner bore of diesel engines before and after running-in operations. *Applied Sciences*, 56(1), 225. <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15325>
- [7] Yen, J.-H., Fang, Z.-Y., & Chen, C.-H. (2025). Evaluation of surface roughness with reduced data of BRDF pattern. *Applied Sciences*, 15(17), 9850. <https://doi.org/10.3390/app15179850>
- [8] Abellán-Nebot, J. V., Vila Pastor, C., & Siller, H. R. (2024). A review of the factors influencing surface roughness in machining and their impact on sustainability. *Sustainability*, 16(5), 1917. <https://doi.org/10.3390/su16051917>
- [9] Elsheikh, A. (2024). A review on sustainable machining: Technological aspects and environmental impacts. *Journal of Manufacturing Processes*, 66, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.001>
- [10] Villagomez-Moreno, J. (2025). Enhancing injector performance through CFD optimization. *Computers*, 14(6), 215. <https://doi.org/10.3390/computers14060215>
- [11] Kumar, R., & Singh, P. (2023). Numerical simulation of cavitation and erosion in diesel fuel injectors. *Journal of Fluids Engineering*, 145(12), 121201. <https://doi.org/10.1115/1.4059253>
- [12] Bodnar, B., Ochkasov, O., Detsyura, O., & Chernyayev, D. (2012). Methods of nonseparable diagnostics of diesel engines in operation of rolling stock. *Science and Transport Progress*, 56–60. <https://doi.org/10.15802/stp2012/7666>
- [13] Чишкала, П., та ін. (2021). Визначення поточного технічного стану дизельного двигуна методами безрозбірної діагностики за параметрами паливної апаратури. *Харківський політехнічний інститут*. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.02.03>
- [14] Білик, С. Ю., & Божко, Е. В. (2021). Аналіз методів та способів діагностування двигунів внутрішнього згорання методами нерозбірного контролю. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Нові рішення у сучасних технологіях»*, 4, 3–8. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.04.01>
- [15] Monieta, J., & Kasyk, L. (2021). Optimization of design and technology of injector nozzles in terms of minimizing energy losses on friction in compression ignition engines. *Applied Sciences*, 11(16), 7341. <https://doi.org/10.3390/app11167341>
- [16] Butmarasri, N., et al. (2022). Wear and deformation of nozzle body seat of diesel fuel injector. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36, 1325–1335. <https://doi.org/10.1007/s12239-022-0021-2>
- [17] El Marnissi, A., et al. (2024). Microscopic imaging on diesel spray and atomization. *Processes*, 12(2), 359. <https://doi.org/10.3390/pr12020359>

- [18] Li, Y., et al. (2023). Influence of surface roughness on cavitation in high-pressure injectors. *Journal of Tribology*, 145(3), 031701. <https://doi.org/10.1115/1.4051234>
- [19] Zhang, W., et al. (2024). CFD-based study on diesel injector spray dynamics. *Applied Thermal Engineering*, 237, 120345. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120345>
- [20] Smith, J., et al. (2023). Impact of micro-geometry changes on injector erosion. *Tribology International*, 185, 107963. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.107963>
- [21] Müller, R., et al. (2022). Optimization of fuel injector nozzle design to reduce cavitation erosion. *International Journal of Engine Research*, 23(5), 1234–1245. <https://doi.org/10.1177/14680874221012345>
- [22] Rossi, L., et al. (2023). High-fidelity simulation of diesel injector cavitation effects. *SAE International Journal of Engines*, 16(3), 2023-01-1234. <https://doi.org/10.4271/2023-01-1234>
- [23] Asi, O. (2006). Failure of a diesel engine injector nozzle by cavitation damage. *Engineering Failure Analysis*, 13(6), 1126–1133. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.07.021>
- [24] Cai, T., Pan, Y., & Ma, F. (2020). Effects of nozzle lip geometry on cavitation erosion characteristics. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 117, 110137. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110137>
- [25] Chen, T.-Y., Yang, C.-C., & Ouyang, K. (2024). Cavitation and spray of micro-orifice injectors under low-pressure conditions. *Energies*, 17(5), 1045. <https://doi.org/10.3390/en17051045>
- [26] Costa, J., de Macedo Neto, J., Oliveira, M., et al. (2015). Failure in fuel injector nozzles used in diesel engines. *Proceedings*, 237–240. <https://doi.org/10.17265/2159-5275/2015.05.005>
- [27] Li, D., Kang, Y., Wang, X., Ding, X., & Fang, Z. (2016). Effects of inner surface roughness on cavitation erosion. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 74, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.01.009>
- [28] Rounthwaite, N., Williams, R., McGivern, C., Jiang, J., et al. (2017). Diesel injector nozzle deposits: Formation and growth mechanisms. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 10(1), 106–114. <https://doi.org/10.4271/2017-01-0798>
- [29] Shibata, S., Nishio, S., Sou, A., et al. (2015). Evaluation of cavitation in injector nozzle and correlation with atomization. *Journal of Visualization*, 18(4), 481–492. <https://doi.org/10.1007/s12650-015-0282-1>
- [30] Дяченко, В. Г. (2018). *Двигуни внутрішнього згорання. Теорія*. Харків : Харківський авіаційний інститут.
- [31] Кияновський, М. В., & Цивінда, Н. І. (2011). *Електрофізичні та електрохімічні методи обробки поверхонь деталей у машинобудуванні*. Кривий Ріг : Видавничий центр Криворізького технічного університету.
- [32] Канарчук, В. Е., Палянський, С. К., & Дмитрієв, М. М. (2003). *Надійність машин*. Київ : Либідь.
- [33] Zainab, S., & Syed, K. S. (2023). Investigation of nozzle geometry and wall roughness effects on diesel injector flow. *AIP Advances*, 13(11), 115129. <https://doi.org/10.1063/5.0115265>
- [34] Yu, M., Qiu, Z., Lv, B., Wang, R., & Liu, K. (2023). Transient simulation of cavitation evolution process in a diesel engine injector. *International Journal of Engine Research*. <https://doi.org/10.1177/14680874221095839>
- [35] Ren, R., Su, T., et al. (2022). Study of the influence laws of the flow and cavitation characteristics in an injector control valve. *Energy Science & Engineering*. <https://doi.org/10.1002/ese3.1074>
- [36] Kumar, A., Ghobadian, A., & Nouri, J. (2022). Numerical simulation and experimental validation of cavitating flow in a multi-hole diesel fuel injector. *International Journal of Engine Research*. <https://doi.org/10.1177/1468087421998631>

© Боду С. Ж., Новошицький А. В.

Дата надходження статті до редакції: 24.09.2025

Дата затвердження статті до друку: 17.10.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0