

3. S. Arshed, G. Akram, M. Sadaf, and K. Saeed, "Construction of new solutions of Korteweg–de Vries Caudrey-Dodd-Gibbon equation using two efficient integration methods," PLOS ONE 17, e0275118 (2022); <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275118>
4. S. A. El-Tantawy, A. H. Salas, and W. Albalawi, "New localized and periodic solutions to a Korteweg–de Vries equation with power-law nonlinearity: Applications to some plasma models," Symmetry 14, 197 (2022); <https://doi.org/10.3390/sym14020197>
5. W. W. Mohammed and F. M. Al-Askar, "New stochastic solitary solutions for the modified Korteweg–de Vries equation with stochastic term/random variable coefficients," AIMS Math. 9, 20467–20481 (2024); <https://doi.org/10.3934/math.2024995>
6. R. W. S. Westdorp and H. J. Hupkes, "Long-timescale soliton dynamics in the Korteweg–de Vries equation with multiplicative translation-invariant noise," Physica D: Nonlinear Phenom. 460, 134065 (2024); <https://doi.org/10.1016/j.physd.2024.134065>
7. D.-S. Shih and G.-T. Yeh, "Studying inertia effects in open channel flow using Saint-Venant equations," Water 10, 1652 (2018); <https://doi.org/10.3390/w10111652>
8. A. Bayon and P. López-Jiménez, "Numerical analysis of hydraulic jumps using OpenFOAM," J. Hydroinform. 17, 662–678 (2015); <https://doi.org/10.2166/hydro.2015.041>
9. X. Song, J. Yao, W. Liu, Y. Shu, and F. Xu, "Numerical generation of solitary wave and its propagation characteristics in a step-type flume," J. Mar. Sci. Eng. 11, 35 (2023); <https://doi.org/10.3390/jmse11010035>
10. A. Avershyn and O. Bilovol, "Universal flow energy dissipator," AIP Conf. Proc. 3428, 020015 (2025); <https://doi.org/10.1063/12.0038605>

УДК 621.43.019:621.43-222.2

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ШЕСТИТАКТНИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ТА СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ

Віштак Інна Вікторівна, канд. техн. наук, доцент кафедра БЖДПБ,
Вінницький національний технічний університет,
e-mail: innavish322@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5646-4996

Комендра Артем Олександрович, бакалавр,
Вінницький національний технічний університет,
e-mail: artemkomendra08@gmail.com

Підвищення ефективності двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) залишається одним із ключових напрямів розвитку сучасного автомобілебудування в умовах енергетичного переходу та посилення екологічних вимог. Значна частина енергії палива втрачається у вигляді

теплоти відпрацьованих газів, що обмежує загальний термічний коефіцієнт корисної дії традиційних чотиритактних і дизельних двигунів.

Одним із перспективних напрямів підвищення паливної економічності є використання шеститактних циклів, які поєднують базовий процес згоряння з додатковими тактами тепловідновлення – паророзширенням, водоін'єкцією чи зміною геометрії кривошипно-шатунного механізму. Такі рішення дозволяють частково утилізувати залишкове тепло, знизити пікові температури в камері згоряння та зменшити викиди шкідливих компонентів.

У цьому контексті порівняльний аналіз різних конструкцій шеститактних двигунів має важливе наукове й практичне значення для визначення оптимальних конструкційних і термодинамічних рішень.

Метою роботи є порівняльний аналіз різних конструкцій шеститактних ДВЗ – із водоін'єкцією, паророзширенням та змінною довжиною ходу поршня, для визначення найбільш ефективних схем утилізації теплоти відпрацьованих газів і підвищення загального термічного коефіцієнта корисної дії двигуна.

Об'єктом дослідження процесу енергетичного перетворення у шеститактних ДВЗ, що поєднують традиційний цикл Отто або Дизеля (Otto & Diesel) з додатковими робочими тактами тепловідновлення.

Предметом дослідження є теплові, динамічні та конструктивні параметри шеститактних конструкцій ДВЗ, зокрема вплив водоін'єкції, паророзширення та механізмів змінної довжини ходу поршня на ефективність, питомі витрати палива та рівень утилізації відпрацьованої теплоти.

Дослідження шеститактних ДВЗ активно розвивається як напрям підвищення паливної ефективності та рекуперації відпрацьованого тепла. Різні наукові школи пропонують модифікації класичного чотиритактного циклу Отто або Дизеля (Otto & Diesel) шляхом інтеграції додаткових парових або водоін'єкційних процесів.

Одними з перших дослідників, які сформулювали термодинамічну концепцію шеститактного двигуна з водоін'єкцією для рекуперації теплоти відпрацьованих газів та охолоджувальної рідини стали Дж. К. Конклін та Дж. П. Шибіст. Автори у своїй роботі [1] запропонували додавання двох додаткових тактів – компресії залишкових газів і паророзширення – після традиційного чотиритактного циклу. Їх термодинамічна модель дозволила оцінити вплив моменту закриття випускного клапана на середній ефективний тиск парового розширення (MEP_{steam}), який для стандартного бензинового двигуна становить 0,75–2,5 бар, що еквівалентно 10–25 % потенційного підвищення ефективності. Таким чином, їх дослідження заклало теоретичне підґрунтя для водяного паророзширення як методу утилізації теплоти у двигунах внутрішнього згоряння.

У роботі [2] авторами проведено розгорнутий аналіз публікацій за 1990–2023 рр., порівнюючи термодинамічні та експериментальні підходи до водоін'єкційних шеститактних циклів і зосереджено увагу на кількісній оцінці та практичній реалізації таких систем. Визначено, що їх основними перевагами є зниження температури згоряння та викидів NO_x , а головними проблемами – енергетичний баланс випаровування води, матеріальна корозія та складність

інтеграції інжекційних контурів. На думку авторів, шеститактні системи з водоін'єкцією є реалістичною альтернативою звичайним ДВЗ за умови використання термостійких матеріалів і керованих фаз упорскування [2].

Найновіші підходи зосереджуються на механічній оптимізації циклу. У роботі [3] здійснено експериментальну конверсію одноциліндрового бензинового двигуна з чотиритактного на шеститактний. Результати показали зниження температури вихлопу на 18 %, збільшення ефективності на 6,2 % та зменшення питомої витрати палива, а також виявлено потребу у точному керуванні часом відкриття та закриття клапанів для запобігання втратам тиску. Отже, дослідником підтверджено, що реалізація шеститактної конструкції можлива в умовах лабораторного експерименту, а перспективи масштабування залежать від вдосконалення систем керування клапанами та термозахисту елементів.

Загалом, аналіз свідчить, що шеститактні конструкції на базі водоін'єкції та паророзширення залишаються перспективним шляхом підвищення ефективності ДВЗ (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика ключових показників шеститактних двигунів внутрішнього згорання

Критерій	Водоін'єкція (WI+steam)	Паро-розширення (external steam loop)	Змінна довжина ходу (over-expansion)
Потенційний приріст ККД	Суттєвий при правильному енергобалансі	Помірний–високий (залежить від теплообмінника)	Помірний
Зниження NOx	Високе (охолодження)	Помірне (залежить від температури)	Низьке (без води)
Механічна складність	Середня (інжектори, дозатори)	Висока (теплообмінник, парова магістраль)	Висока (складний привод)
Ризик корозії/змащення	Високий (вода)	Високий (пара, конденсат)	Низький
Маса/габарити	Помірні–високі	Високі	Помірні
Легкість інтеграції в серійне виробництво	Середня	Низька	Низька–середня

Експлуатаційні характеристики визначаються балансом між тепловою рекуперацією, конструктивною складністю та довговічністю вузлів, що потребує подальшого експериментального й CFD-моделювання.

Конструкційна концепція, запропонована у роботах [4,5] фактично реалізує два послідовні цикли згорання у межах одного повного робочого процесу. Це дає змогу повторно використовувати частину енергії залишкових

газів і зменшити втрати теплоти під час фази випуску. За результатами досліджень авторів роботах [4,5], порівняно з класичним чотиритактним циклом Отто або Дизеля, запропонована шеститактна конструкція, що забезпечує зростання середнього ефективного тиску (ІМЕР) на 5–8% і зменшення питомої витрати палива приблизно на 8–10%.

Підвищення ефективності обумовлене можливістю рекуперації теплоти з камери згоряння під час другого стиснення і повторного займання газів, що зменшує коливання температури стінок циліндра та продовжує термін служби поршневої групи. Таке рішення може бути застосоване як для бензинових, так і для дизельних двигунів малої потужності, що працюють у стаціонарних або гібридних системах.

Висновки

Шеститактні конструкції мають реальний потенціал для підвищення ефективності ДВЗ у сучасних умовах енергетичного переходу. Водоін'єкційна схема відзначається технологічною простотою та можливістю модернізації серійних двигунів; паророзширювальна – найвищим коефіцієнтом утилізації теплоти; система зі змінною довжиною ходу – найкращою адаптивністю до навантажень. Подальші дослідження будуть спрямовані на інтеграцію цих принципів у гібридні силові установки з мінімальними екологічними викидами.

Література

1. Conklin, J. C., & Szybist, J. P. (2010). *A six-stroke internal combustion engine cycle with water injection for in-cylinder exhaust heat recovery*. *Energy*, 35(12), 5413–5421. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.015>
2. Mejía-Gallón, V., Gomez, S., Estrada Grisales, D. *et al.* 6-Stroke water injection engine literature review with an introduction of heat transfer and thermodynamic analysis. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **21**, 6911–6924 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05404-8>
3. Arabacı, E. (2025). *Conversion of four-stroke engines to six-stroke: Experimental and numerical study*. *Mechanical Sciences*, 16(3), 359–368. <https://doi.org/10.5194/ms-16-359-2025>
4. Jiang, J., Xie, K., Liu, Y., Sun, H., & Yang, H. (2023). *Improvement of thermal efficiency in six-stroke internal combustion engines by residual gas utilization*. *Energy Conversion and Management*, 297, 117560. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117560>
5. Google Patents. (2024). *6-Stroke Internal Combustion Engine*. US Patent Application US20240301817A1. <https://patents.google.com/patent/US20240301817A1/en>