

ТЕРМОДИНАМІКА ТА ФІЗИКА ПРОЦЕСІВ ЗГОРЯННЯ В ДВИГУНІ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У статті розглянуто фізичні основи процесів згоряння палива в двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ) через призму термодинаміки та кінетики хімічних реакцій. Проведено аналіз циклів Отто та Дизеля, із акцентом на ентропійні зміни, теплообмін та втрати енергії. Розглянуто вплив тиску, температури, складу палива та турбулентності на швидкість згоряння, ККД та стабільність роботи двигуна. Наведено фізичні рекомендації щодо оптимізації процесів для підвищення ефективності та зменшення втрат.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння, термодинаміка, згоряння, цикл Отто, цикл Дизеля, кінетика реакцій, теплообмін, ентропія

Abstract

The article investigates the physical principles of fuel combustion in internal combustion engines (ICE) from the standpoint of thermodynamics and reaction kinetics. Otto and Diesel cycles are analyzed with emphasis on entropy changes, heat transfer, and energy losses. The effects of pressure, temperature, fuel composition, and turbulence on combustion rate, efficiency, and stability are discussed. Physical recommendations for process optimization are provided to increase efficiency and reduce losses.

Keywords: internal combustion engine, thermodynamics, combustion, Otto cycle, Diesel cycle, reaction kinetics, heat transfer, entropy

Вступ

Двигуни внутрішнього згоряння базуються на перетворенні хімічної енергії палива у теплову, а згодом – у механічну роботу розширення продуктів згоряння. Ключову роль відіграють термодинамічні закономірності, рівняння стану газів, кінетика окиснення та теплові втрати до стінок циліндра. Аналіз цих процесів дозволяє визначити межі підвищення ефективності, оцінити явища детонації, нерівномірного згоряння та обмеження, пов'язані зі швидкістю хімічних реакцій [1].

Теоретичні основи термодинаміки двз

Основою аналізу є перший закон термодинаміки у формі:

$$Q = \Delta U + W, \quad (1)$$

де Q – підведене тепло, ΔU – зміна внутрішньої енергії, W – корисна робота розширення. Стан газу описується рівнянням:

$$pV = mRT. \quad (2)$$

У циклі Отто теплопідвід відбувається ізохорно, а теоретичний ККД визначається:

$$\eta_0 = 1 - r^{1-\gamma}, \quad (3)$$

де r – ступінь стиску, γ – показник адіабати [1,2].

Для дизельного циклу, в якому тепло підводиться ізобарно, ККД має вигляд:

$$\eta_D = \frac{1 - r\gamma - 1 \cdot (\rho\gamma - 1)}{\gamma(\rho - 1)}, \quad (4)$$

де ρ – відношення кінцевого до початкового об'єму під час теплопідводу. Розуміння цих теоретичних засад створює основу для подальшого аналізу реального процесу згоряння. Розуміння цих теоретичних засад створює основу для подальшого аналізу реального процесу згоряння.

Фази згоряння та їх фізичні особливості

Після формального опису циклів можна перейти до фізичного перебігу хімічних реакцій у циліндрі. Згоряння паливно-повітряної суміші складається з трьох ключових фаз, кожна з яких визначає подальшу еволюцію тиску та температури.

Спершу проходить індукційний період, коли формується активований шар реагентів, а швидкість радикальних реакцій задається рівнянням Арреніуса:

$$k = A e^{\frac{-E_a}{RT}}. \quad (5)$$

Далі настає фаза швидкого згоряння – основний етап вивільнення тепла, коли фронт полум'я поширюється зі швидкістю 20–45 м/с, а тиск зростає до 6–9 МПа при температурах 2500–3000 К [1,2].

Завершальне догорання включає залишкові реакції та значні теплові втрати.

Саме структура цих фаз визначає не лише ефективність, а й ризики, такі як детонація – аномально швидке самозаймання незгорілої суміші, що створює ударні хвилі й небезпечні механічні навантаження [2]. Щоб зрозуміти, чому ці явища залежать від палива, необхідно перейти до його теплотворних характеристик.

Теплотворні властивості палив

Тип палива визначає максимальну можливу енергію, доступну для виконання роботи, тому теплота згоряння є базовим параметром: бензин – 44–46 МДж/кг, дизель – 42–43 МДж/кг, етанол – 27–30 МДж/кг. Водночас значення октанового та цетанового числа впливають на характер згоряння, зокрема на детонаційну стійкість або схильність до самозаймання. Важливим регулятором процесу є коефіцієнт надлишку повітря λ , який впливає на температуру й повноту згоряння. Бідні суміші ($\lambda > 1$) знижують температуру, але збільшують ККД; багаті ($\lambda < 1$) – навпаки, дають високі температури, але погіршують повноту окиснення. Аналіз залежностей ККД і температури від λ дозволяє обґрунтовано перейти до порівняння реальних циклів бензинових і дизельних двигунів.

Порівняння циклів Отто та Дізеля

На основі попередніх міркувань стає зрозуміло, що цикли Отто й Дізеля мають різні теоретичні переваги. Цикл Отто забезпечує вищий теоретичний ККД за однакового ступеня стиску завдяки ізохорному теплопідводу. Проте у практичних умовах дизельні двигуни досягають вищого реального ККД, оскільки можуть працювати при значно вищому ступені стиску без ризику детонації. Реальна ж ефективність обох типів двигунів зменшується через теплові втрати, газодинамічні втрати на газообмін, тертя та кінетичні обмеження швидкості поширення полум'я. Це підводить до узагальнення властивостей палива, які визначають поведінку двигуна. Характеристика палив наведена у таблиці 1.

Таблиця 1 – характеристика палив

Паливо	Теплота згоряння, МДж/кг	Октанове/цетанове число
Бензин	44–46	ОЧ 95–100
Дизель	42–43	ЦЧ 45–55
Етанол	27–30	ОЧ > 108

Висновки

У роботі розглянуто термодинамічні закономірності, що визначають перебіг процесів у двигунах внутрішнього згоряння, зокрема залежність тиску, температури та ефективності від параметрів робочого тіла. Наведено основні співвідношення циклів Отто та Дізеля, що дозволяють оцінити вплив ступеня стиску та режиму теплопідводу на теоретичний ККД. Описано фізичні особливості трьох фаз згоряння паливно-повітряної суміші та їхній зв'язок із формуванням тиску і температури в циліндрі. Показано значення теплотворних властивостей палива і коефіцієнта надлишку повітря для

температури процесу та повноти згоряння. Проведено порівняння характеристик бензинових і дизельних двигунів на основі аналізу різниці їхніх термодинамічних циклів і особливостей перебігу згоряння. Таким чином, наведений матеріал узагальнює ключові фізичні закономірності, які визначають ефективність роботи двигунів внутрішнього згоряння.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Internal combustion engine fundamentals. – [Б. м.] : McGraw-Hill Education, 2018. – 1056 с.
2. Stone R. Introduction to internal combustion engines [Електронний ресурс] / Richard Stone. – London : Macmillan Education UK, 2012. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/978-1-137-02829-7> (дата звернення: 04.12.2025).

Липкань Віктор Михайлович – студент групи 1KI-25МС, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: lipkan02@gmail.com.

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** – канд. техн. наук, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Viktor Mykhailovych Lypkan – student of group 1KI-25MS, Faculty of Information Technology and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: lipkan02@gmail.com.

Scientific supervisor: **Volodymyr Valeriyovych Martyniuk** – Candidate of Philology tech. Sciences, Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.