

УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ ЗГОРЯННЯ ПАЛИВА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ЇЇ В ЦИФРОВОМУ ДВІЙНИКУ

Д.С. Мінчев¹, Р.А. Варбанець², В.І. Залож³, М.С. Агєєв⁴, С.П. Псарюк⁵

¹д.т.н., доцент кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-5960-3063

²д.т.н., завідувач кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-6730-0380

³к.т.н., доцент кафедри «Інженерні дисципліни»,
Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»,
Ізмаїл, Одеська область, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-5213-6896

⁴д.т.н., професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок,
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-5691-8986

⁵суперінтендант,
VC Logistic Operations D.O.O., Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-9075-7546

Анотація

Застосування цифрових двійників є перспективним рішенням для підвищення ефективності роботи суднових енергетичних установок, зокрема їхніх важливих компонентів – суднових двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Цифровий двійник, який реалізується на зовнішньому сервері, або як складова частина локальної системи моніторингу двигуна, використовується для автоматичної обробки даних із сенсорів, які встановлені на двигуні, накопичення статистики, визначення поточного технічного стану двигуна, ефективності його застосування, ідентифікації можливих несправностей і ухвалення рішень щодо змін у програмах експлуатації. Ключовим елементом цифрового двійника є математична модель робочого циклу суднового дизеля. У роботі розглядається окреме питання застосування цифрових двійників, що застосовуються для моніторингу технічного стану та діагностики несправностей суднових двигунів внутрішнього згоряння, а саме проблема синтезу характеристик тепловиділення в циліндрі двигуна. **Мета** роботи – удосконалення моделі згоряння палива, яка застосовується для синтезу характеристик тепловиділення, завдяки врахуванню змінного середнього діаметра крапель паливного факела протягом процесу впорскування, адже відомо, що на початку та наприкінці процесу впорскування спостерігається погіршення умов розпилювання пального. **Результати.** У результаті виконання досліджень з'ясований механізм впливу значення середнього діаметра розпилю на взаємопов'язані процеси випаровування та вигорання палива; показано, що врахування змінного характеру тонкості розпилю протягом процесу впорскування

суттєво впливає як на перебіг процесів тепловиділення, так і на утворення шкідливих речовин. **Висновки.** Отже, урахування змінного значення середнього діаметра крапель палива протягом процесу впорскування дозволяє більш точно відобразити реальні процеси у двигуні, збільшити можливості налаштування й адаптування цифрового двійника. Водночас використання повною мірою отриманих додаткових можливостей моделі потребує оцінки або вимірювання характеристик впорскування палива під час роботи двигуна, вирішення цього завдання становить перспективу майбутніх досліджень.

Ключові слова: цифровий двійник, модель згоряння, судновий дизельний двигун, діагностика, впорскування пального, моніторинг.

IMPROVEMENT OF THE FUEL COMBUSTION MODEL IN A DIGITAL TWIN APPLICATION FOR DIESEL ENGINES

D.S. Minchev¹, R.A. Varbanets², V.I. Zalozh³, M.S. Ahieiev⁴, S.P. Psariuk⁵

¹Doctor of Technical Sciences, Associated Prof. of the Department “Marine Power Plants and Technical Maintenance”,

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0002-5960-3063

²Doctor of Technical Sciences, Head of the Department “Marine Power Plants and Technical Maintenance”,

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0001-6730-0380

³PhD, Associated Professor at the Department “Engineering Disciplines”,

Danube Institute of National University “Odesa Maritime Academy”,

Izmail, Odesa region, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0002-5213-6896

⁴Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department “Operation of Ship Power Plants”,

Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0001-5691-8986

⁵Superintendent,

Shipping Company VC Logistic Operations D.O.O., Odesa, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0002-9075-7546

Summary

Introduction. The application of digital twins represents a promising solution for enhancing the efficiency of marine power installations, particularly their vital components – marine internal combustion engines (ICE). A digital twin, implemented on a dedicated server or as part of an engine monitoring system, is employed for automated data processing from sensors installed on the engine. It accumulates statistics, determines the current technical condition of the engine, assesses its operational efficiency, identifies potential malfunctions, and produces decision-making regarding modifications to operational programs. The key element of the digital twin is the mathematical model of the operating cycle of a marine diesel engine. This work focuses on a specific aspect of the performance type digital twin application developed for monitoring the technical condition and diagnosing faults in marine ICMEs, specifically addressing the synthesis of heat release characteristics within the engine cylinder. **Purpose.** The purpose of this study is to increase capabilities of the fuel

combustion model applied for synthesizing heat release characteristics by considering the variable mean droplet diameter of the fuel spray during the injection process. This is crucial as the spray atomization conditions deteriorate at the beginning and end of the injection process. Results. As a result of the research, the mechanism of how the mean droplet diameter influences the interrelated processes of fuel evaporation and combustion is revealed. It is demonstrated that accounting for the variable nature of spray atomization significantly affects both the heat release processes and the formation of harmful substances. Conclusions. As the conclusion, incorporating the variable mean droplet diameter throughout the injection process allows for a more accurate representation of real operating processes, enhancing the adjustability and adaptability of the digital twin. However, complete utilizing the additional capabilities of the model requires the evaluation or measurement of fuel injection characteristics during engine operation, marking a prospect for future research.

Key words: *digital twin, combustion model, marine diesel engine, diagnostics, fuel injection, monitoring.*

Вступ. Технологія цифрових двійників є перспективним рішенням для сучасних і майбутніх суднових енергетичних установок. Вона може бути використана різними способами і для різних цілей, як-от: розширений контроль, моніторинг і діагностика технічного стану компонентів енергетичних установок, управління й аналіз даних.

Ідея цифрового двійника спочатку була розроблена Майклом Гривзом (Michael Grieves) у 2002 р. для вирішення завдань управління життєвим циклом продукції, а згодом удосконалена Джоном Вікерсом (John Vickers) з НАСА у 2010 р. [1]. Цей підхід має широку перспективу, оскільки глобальний ринок продуктів, які втілюють технологію цифрових двійників, у 2019 р. становив приблизно 3,8 млрд доларів США й очікується, що до 2025 р. він досягне 35,8 млрд доларів США [2].

Останніми роками технологія цифрових двійників переживає стрімкий розвиток. Нині цифрові двійники класифікуються за такими типами: *Digital Twin Instance, DTI*, які відображають стан реального об'єкта; *Digital Twin Prototype, DTP*, які слугують для прототипування реального об'єкта; *Performance Digital Twin, PDT*, які відображають поведінку реального об'єкта у змінних умовах [3]. Усі типи цифрових двійників мають спільні характеристики, як-от: висока точність, динамічність, здатність до вдосконалення, верифікованість, здатність до масштабування, метафізичність та ієрархічність [4; 5].

На думку деяких спеціалістів, цифровий двійник можна описати як такий, що має найвищий можливий рівень двонаправленої інтеграції між фізичним об'єктом і віртуальною моделлю. Основними галузями впровадження цифрових двійників є розумні міста та міські центри, логістика вантажів, медицина, інженерія й автономні технології.

Однією з основних сфер застосування цифрових двійників є діагностика несправностей і поточний моніторинг технічного стану об'єкта.

Поєднанням цифрових двійників із методами машинного навчання можна забезпечити точну діагностику несправностей, навіть за браку експериментальних

даних, доступних для прямого вимірювання [6]. Цифровий двійник постійно оновлюється для генерації можливих умов несправностей, близьких до реальних умов, і створює навчальні дані у вихідному домені для отримання необхідної інформації. Технологія цифрового двійника також дозволяє забезпечити візуалізацію процесу моніторингу об'єкта, зокрема і 3D-візуалізацію та технології доповненої реальності [7]. Дуже перспективним є метод прогнозного обслуговування, заснований на використанні цифрового двійника, який може бути застосований у багатьох галузях і має три унікальні характеристики: робота в реальному часі, висока точність моделювання та прогнозування [8].

Для суднової енергетичної установки та її компонентів цифровий двійник може виконувати різні функції, серед яких прототипування та дизайн, моніторинг технічного стану та діагностика, контроль і аналіз ефективності, управління життєвим циклом. Також можуть вирішуватись завдання моніторингу впливу судноплавства на навколишнє середовище, що є однією з високопріоритетних цілей Міжнародної морської організації (ІМО) [9]. Різні компоненти морських енергетичних установок потребують поточного моніторингу [10; 11], водночас дизельні двигуни залишаються одними з найважливіших.

З погляду судових дизельних двигунів найскладнішими чинниками для успішного впровадження цифрового двійника для завдань моніторингу та діагностики є достовірне моделювання роботи двигуна та забезпечення необхідної швидкості обчислень. Очевидно, що для завдань керування двигуном необхідно забезпечити розрахунки процесів роботи двигуна «у реальному часі» [12; 13]. Остаточна мета повинна бути визначена так: час синтезу робочого циклу двигуна повинен дорівнювати фактичному часу робочого циклу двигуна. А це завжди компроміс між часом обчислень і точністю, на який варто зважати під час вибору математичної моделі для ядра цифрового двійника на етапі ухвалення рішень.

Виробники двигунів потенційно можуть упроваджувати цифрові двійники високої точності для вирішення питань керування двигуном у режимі реального часу, оскільки вони мають всю повну інформацію про підсистеми та компоненти двигуна. У такому разі можна застосувати модель евристичного типу [14]. І навпаки, системи моніторингу із цифровими двійниками, які надаються зовнішніми незалежними розробниками, повинні характеризуватися здатністю гнучкої настройки й адаптації, навіть за відсутності даних.

Одним із найбільш критичних аспектів для належної роботи цифрових двійників є точне передбачення процесу виділення тепла в циліндрі двигуна внаслідок згоряння палива. Симуляція згоряння палива являє собою найскладніший виклик з погляду розробки математичної моделі цифрового двійника, оскільки процеси впорскування палива, розпилення, випаровування, змішування з повітрям та згоряння є надзвичайно складними.

Хоча деякі дослідники повідомляли про застосування спрощених моделей згоряння, заснованих на функції Вібе [15], однак ці моделі мають значні обмеження щодо передбачення часу подачі палива та параметрів розпилення для процесів згоряння.

У цій роботі представлені розробки в перевірній моделі згоряння М.Ф. Разлейцева для судових дизельних двигунів із цифровими двійниками

й експериментальний стенд на базі суднового дизель-генератора, який підтверджує цю концепцію. Дослідження зосереджено на вдосконаленні прогнозування процесу випаровування та змішування палива, а також його впливі на подальший процес згоряння й утворення забруднювальних речовин.

Удосконалення моделі згоряння палива

Модель згоряння палива для дизельних двигунів була запропонована М.Ф. Разлейцевим у 1980 р. [22] для уявлення про еквівалентний паливний факел і вдосконалена в 1992 р. [23], для можливості врахування особливостей руху струменя палива з детальним механізмом взаємодії між полум'ям палива та стінками камери згоряння. Пізніше модель М.Ф. Разлейцева була дещо вдосконалена О.С. Кулешовим [24] і реалізована в комерційних програмних засобах для розрахунку робочих процесів двигуна.

Метод М.Ф. Разлейцева передбачає послідовний і взаємопов'язаний розрахунок процесів впорскування, випаровування, сумішоутворення та згоряння палива з використанням фундаментальних законів фізики та хімічної кінетики.

Характеристики впорскування палива визначають за допомогою експериментальних або статистичних даних. Базовий метод М.Ф. Разлейцева передбачає однофазне впорскування палива, але його можна використовувати і для багатфазного впорскування, як буде показано далі.

Опис руху паливних струменів та їх розпилення визначають за допомогою критеріальних рівнянь, запропонованих А.С. Лишевським:

$$\begin{cases} l_a = 1.22 \cdot l_c \cdot \bar{\rho}^{-0.5} \Xi_g^{-0.35} \cdot \Xi^{0.35} e^{-0.2\left(\frac{\tau}{\tau_c}\right)}, \\ l_b = \sqrt{d_{inj,holes} u_0 We^{0.21} M^{0.16} / (3\sqrt{2}\bar{\rho})} \tau^{0.5}, \\ l_c = 8.85 d_{inj,holes} We^{0.25} M^{0.4} \bar{\rho}^{-0.6}, \end{cases} \quad (1)$$

$$d_{32} = 10^6 E_c d_{inj,holes} \frac{M^{0.0733}}{(\bar{\rho} We)^{0.266}}, \quad (2)$$

$$M = \frac{\mu_{fuel}^2}{d_{inj,holes} \rho_{fuel} \sigma_{fuel}}; \bar{\rho} = \frac{\rho_c}{\rho_{fuel}}; We = \frac{u_{inj}^2 d_{inj,holes} \rho_{fuel}}{\sigma_{fuel}}; \Xi = \frac{\tau^2 \sigma_{fuel}}{d_{inj,holes}^3 \rho_{fuel}},$$

де l_a , l_b та l_c – розвиток довжини струменя на початковому етапі, основному етапі впорскування та в кінці початкового етапу; τ і τ_c – проміжки часу від початку впорскування та від початку впорскування до закінчення початкового етапу впорскування відповідно; μ_{fuel} , ρ_{fuel} та σ_{fuel} – динамічна в'язкість, відносна густина та поверхневе натягнення палива; E_c – коефіцієнт; $d_{inj,holes}$ – діаметр сопла форсунки.

Розпилення палива характеризується діаметром крапель палива d_{32} за Заутером, який визначається як відношення загального об'єму крапель палива до їхньої сумарної площі поверхні. У спрощеному підході М.Ф. Разлейцева значення d_{32} вважалось постійним і дорівнювало середньому значенню протягом періоду впорскування [22; 23].

Для розрахунку випаровування палива використовується модифікація закону Срезневського для випаровування окремої краплі. Для визначення частки палива, що випарувалось у конкретний момент часу, проводиться інтегрування для всіх порцій палива, впорснутих до цього моменту:

$$\frac{d\sigma_{ev}}{d\varphi} = \int_{\varphi_{inj.start}}^{\varphi} \frac{3}{2} \chi_{wall} b_{ev} \left(1 - \chi_{wall} b_{ev} \frac{\varphi - \varphi_{inj.start}}{6n} \right)^{0.5} \left[\frac{d\sigma}{d\varphi} \right] d\varphi, \quad (3)$$

де σ_{ev} – частка палива, яке випарувалось; $d\sigma/d\varphi$ – відносна швидкість впорскування; b_{ev} – постійна випаровування; χ_{wall} – зменшення швидкості випаровування, яке виникає під час взаємодії палива зі стінками.

Варто зауважити, що М.Ф. Разлейцев та його послідовники, замість використання точного рішення, зазначеного вище, використовували спрощене рівняння, припускаючи, що швидкість впорскування є сталою протягом часу процесу впорскування та дорівнює середньому значенню:

$$\frac{d\sigma_{ev}}{d\varphi} = \frac{1}{\varphi_{inj}} \chi \left([1 - b_{ev}(\varphi - \varphi_{inj})]^{3/2} - [1 - b_{ev}]^{3/2} \right). \quad (4)$$

Використання спрощеного рівняння призводить до значної похибки в результатах розрахунку, як показано на рис. 1. Для нелінійних профілів швидкості впорскування накопичувальна помилка частки випарованого палива може перевищувати 20%, тому важливе застосування точного рішення.

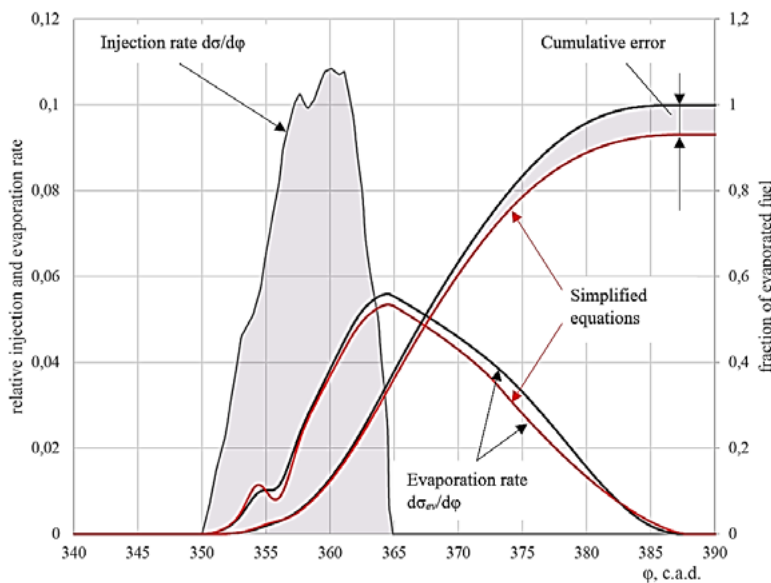


Рис. 1. Порівняння діаграм швидкості впорскування палива, розрахованих з використанням спрощених і точних рівнянь

Постійна випаровування палива залежить від середнього діаметра крапель палива d_{32} і може бути розрахована наступним чином:

$$b_{ev} = Y \frac{10^{12}}{d_{32}^2 p_c}, \quad (5)$$

де Y – поправочний коефіцієнт; p_c – кінцевий тиск процесу стиснення; m_Y – показник функції випаровування.

Відповідно до рекомендацій М.Ф. Разлейцева, поправочний коефіцієнт Y може бути обчислений за таким виразом:

$$Y = \left(\frac{n_{crank}}{1000} \right)^{m_Y}, \quad (6)$$

де m_Y – показник ступеня коригуючої функції випаровування.

Зазвичай m_Y вибирається в межах 0,65–1,00. Однак якщо частота обертання колінчастого вала двигуна нижче 1 000 об./хв, значення m_Y може бути вибране в межах від 0,35 до 0,70. Ці значення дозволяють відповідним чином налаштувати функцію випаровування для врахування різних умов роботи двигуна.

О.С. Кулешов запропонував більш складний вираз для функції Y :

$$Y = 0.372 \cdot 10^{-9} (18 + y_s + y_{rpm}) y H_y^{0.35} d_{32}^{-1.5}, \quad (7)$$

де $y_s = f(S)$ – коефіцієнт масштабування, що залежить від ходу поршня S ; $y_{rpm} = f(n_{crank})$ – поправочний коефіцієнт, що залежить від частоти обертання колінчастого вала n_{crank} ; H_y – скориговане вихорове число; y – емпіричний коефіцієнт у діапазоні від 5 до 35.

Цей більш повний вираз для функції Y урахує додаткові чинники, як-от хід поршня, частота обертання колінчастого вала та скориговане вихорове число, для надання більш точної оцінки постійної випаровування. З наведеного виразу можна зробити висновок, що постійна випаровування змінюється під час впорскування палива та залежить від середнього діаметра крапель.

Відносне зменшення швидкості випаровування внаслідок контакту крапель палива зі стінками камери згоряння, відповідно до оригінальної методики [22], може бути розраховане за допомогою такого рівняння:

$$\chi_{wall} = 1 - \left(\frac{1 - \chi_0}{0.485} \right) \cdot 0.707 \left(\frac{\varphi - \varphi_{wall}}{\varphi_{fr}} \right) \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-0.5 \left(\frac{\varphi - \varphi_{wall}}{\varphi_{fr}} \right)^2}; \quad (8)$$

$$\varphi_{fr} = A_{st} \cdot 2\varphi_{wall} \frac{\bar{p}^{0.5} W e^{0.32}}{M^{0.07}},$$

де φ_{wall} – момент часу, коли струмінь досягає стінки камери згоряння; χ_0 – мінімальне значення коефіцієнта зниження швидкості випаровування; φ_{fr} – тривалість взаємодії між факелом і стінками камери згоряння; A_{st} – коефіцієнт у формулі розрахунку кута конуса струменя розпилення палива.

Для розрахунку періоду затримки займання палива використовують модифіковане рівняння А.І. Толстова:

$$\tau_i = B_0 (1 - k_n n_{crank}) \sqrt{\frac{p_{cyl}^{inj.start}}{T_{cyl}^{inj.start}}} e^{\frac{E_a}{RT_{cyl}^{inj.start}}} \frac{70}{25 + CN}, \quad (9)$$

де B_0 і k_n – коефіцієнти; $p_{cyl}^{inj.start}$ і $T_{cyl}^{inj.start}$ – тиск і температура на початку процесу стиснення; E_a та CN – енергія активації та цетанове число палива.

Надалі була запропонована більш удосконалена модель паливного факела, яка включає сім характерних зон [23]: ущільнене осьове ядро, ущільнений передній фронт факела, розріджену оболонку факела, конусоподібне осьове ядро пристінного потоку, ядро пристінного потоку на поверхні поршня (головки, втулки циліндра), а також розріджену оболонку пристінного потоку. Для кожної із цих характеристичних зон постійна випаровування палива розраховується за окремими рівняннями.

Застосування більш досконалої моделі розпилювання палива ускладнює процес налаштування моделі згоряння та вимагає точної інформації щодо геометрії камери згоряння та параметрів паливної форсунки, яка не завжди доступна.

Під час розрахунку тепловиділення окремо розглядаються такі процеси: згоряння паливо-повітряної суміші, що утворилася в період затримки займання палива, дифузійне згоряння, яке відбувається під час подачі палива, і догоряння палива після закінчення впорскування. Перехід між рівняннями для кожного етапу відбувається у визначені моменти часу: за $x = \sigma_i$ від рівнянь першого етапу до рівнянь другого етапу, а за $\varphi = \varphi_{inj.end} + \Delta\varphi_{k.ext}$ від рівнянь другого етапу до рівнянь третього етапу. Продовження використання рівнянь другого етапу після закінчення впорскування можливе на період $\Delta\varphi_{k.ext}$ шляхом зміни параметрів $\Delta\varphi_k$ і $\Delta\tau_k$.

Зазвичай для режимів зовнішньої характеристики приймається $\Delta\varphi_k = 0$, досягаючи в деяких випадках значень від 3 до 6 на режимах холостого ходу, тоді як $\Delta\tau_k$ рекомендується вибрати в діапазоні від 0,3 до 0,8 для прямого впорскування та від 0,5 до 0,9 для розділених камер згоряння. Базова система рівнянь має такий вигляд:

$$\frac{dx}{d\varphi} = \begin{cases} \left. \frac{1}{6n} \left(P_0 + 6n_{crank} \frac{d\sigma_{ev}}{d\varphi} \right) / \left(1 + A_1 \left(P_0 + 6n_{crank} \frac{d\sigma_{ev}}{d\varphi} \right) \right) \right|_{x=0}^{x=\sigma_i}; \\ \frac{1}{6n} \left(P_2 + 6n_{crank} \frac{d\sigma_{ev}}{d\varphi} \right) / \left(1 + A_1 6n_{crank} \frac{d\sigma_{ev}}{d\varphi} \right) \Big|_{\sigma=\sigma_i}^{\varphi=\varphi_{inj.end}+\Delta\varphi_{k.ext}}; \\ \frac{1}{6n} A_3 \frac{\xi_{a.c}\alpha}{x} (1 - \Delta_{U.F} - x)x \Big|_{\varphi=\varphi_{inj.end}+\Delta\varphi_{k.ext}}^{\varphi=\varphi_{comb.end}}, \end{cases} \quad (10)$$

де σ_i – частка палива, подана протягом періоду затримки займання; $\varphi_{inj.end}$ – момент закінчення впорскування; $\Delta\varphi_{k.ext}$ – продовження періоду застосування другого рівняння; $\Delta\varphi_{comb.end}$ – момент завершення процесу згоряння; $\xi_{a.c}$ – функція використання повітря; $\Delta_{U.F}$ – частка незгорілого палива.

Функції P_0 , P_2 , A_0 і A_2 визначаються за рівняннями:

$$\begin{cases} P_0 = \frac{A_0 q_{fuel}(\sigma_{ev} - x_0)}{V(\varphi_{comb.start})} (b_0 \sigma_{ev} + x_0); \\ P_2 = \frac{A_2 q_{fuel}(a - x)}{V_c} (\sigma_{ev} - x); \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} A_0 = a_0 (n \cdot H)^{m_{comb}}; \\ A_1 = a_1 (n \cdot H)^{m_{comb}}; \\ A_2 = a_2 (n \cdot H)^{m_{comb}}, \end{cases} \quad (12)$$

де H – вихорове число; a_0 , a_1 , a_2 , b_0 і m_{comb} – корегувальні коефіцієнти.

Як видно з наведеної системи рівнянь, перший і другий етапи процесу згоряння суттєво залежать від швидкості випаровування палива та сумішоутворення, тоді етап догоряння палива визначається функцією використання повітря в циліндрі двигуна $\zeta_{a.c}$:

$$\xi_{a.c} = 1 - 1.46(1 - \xi_{a.c0}) \frac{\Phi_z}{\Phi_{z0}} \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-0.5 \left(\frac{\Phi_z}{\Phi_{z0}} \right)^2}, \quad (13)$$

де Φ_z – відносна тривалість горіння; $\zeta_{a.c0}$ та Φ_{z0} – координати мінімуму функції $\zeta_{a.c} = \zeta_{a.c}(\Phi_{z0})$.

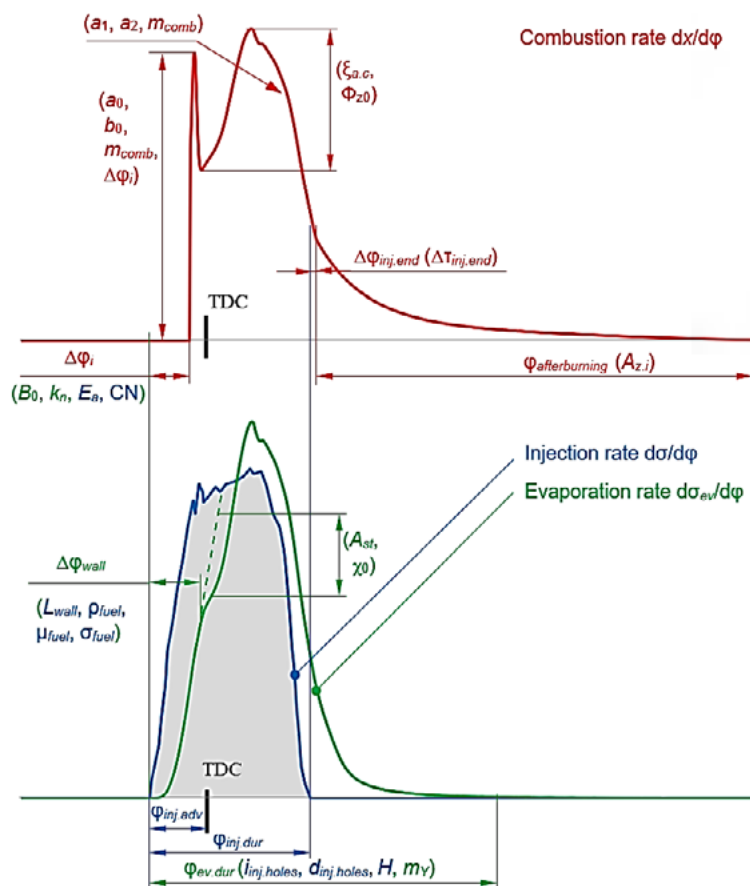


Рис. 2. Взаємозв'язок між процесами впорскування, випаровування та згоряння палива та вплив параметрів налаштування моделі М.Ф. Разлейцева на ці процеси для випадку одноразового впорскування

У таблиці 1 наведені типові значення коефіцієнтів у рівняннях моделі згоряння палива для різних типів двигунів, а на рис. 2 показаний вплив різних параметрів налаштування на характеристики тепловиділення.

Таблиця 1

Рекомендовані значення для моделі згоряння палива

Тип двигуна	$a_0 \cdot 10^{-3}$	$a_1 \cdot 10^2$	a_2	b_0	m_{comb}	H	m_γ
$n = 50-250$ об./хв, двотактний	5-12	5-10	10-15	0,1-0,2	0,6-0,8	1,5-3	0,30-0,65
$n = 400-750$ об./хв, чотиритактний	8-15	4-9	8-13	0,05-0,15	0,5-0,7	1-1,1	0,45-0,7
$n = 750-1\ 500$ об./хв, двотактний	10-40	3-7	4-8	0,05-0,1	0,5-0,7	1-1,2	0,5-0,75
$n > 1\ 500$ об./хв, двотактний	15-30	3-6	3-7	0,04-0,08	0,6-0,8	1,2-2	0,5-0,9

Урахування змінного розміру крапель палива під час впорскування

Як було вказано вище, М.Ф. Разлейцев використовував середнє значення діаметра розпилювання палива d_{32} для розрахунку процесів випаровування і вважав цей параметр постійним у процесі впорскування. Очевидно, це означає, що постійна випаровування палива b_{ev} , як і поправочний коефіцієнт Y , є також незмінними у процесі випаровування. Для перевірки придатності спрощених рівнянь розглянемо рисунки 3–5, на яких показані розрахункові діаграми випаровування палива для двох випадків: у разі змінного діаметра розпилу у процесі впорскування та за використання постійного значення d_{32} , середнього за період впорскування ($d_{32} = \text{const}$). Як видно, урахування зміни діаметра крапель палива має суттєвий вплив на діаграми випаровування палива, що призводить до подальшого впливу на процеси згоряння палива, отже, і на криву тиску в циліндрі двигуна.

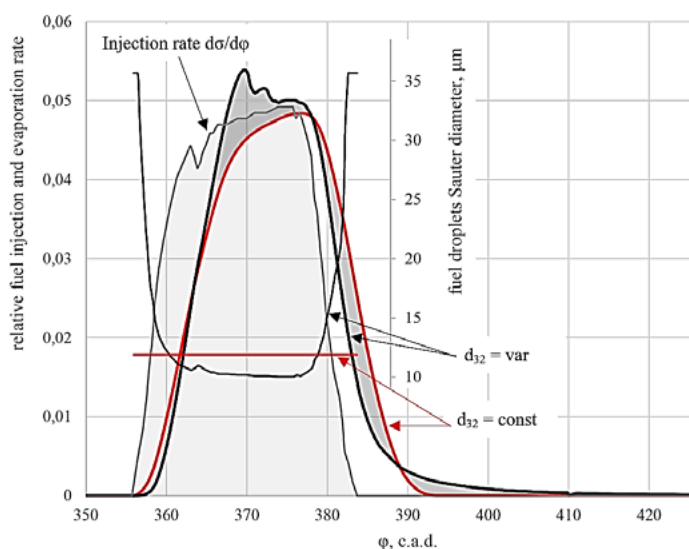


Рис. 3. Розрахункові діаграми швидкості випаровування палива.
Середньооборотний дизельний двигун, номінальний режим

Процеси згоряння палива супроводжуються виділенням токсичних сполук у відхідних газах суднових дизельних двигунів. Ці викиди в основному складаються із CO , сажі (та інших твердих часток), SO_x і NO_x . Точне прогнозування накопичення токсичних викидів є важливим у разі застосування цифрових двійників двигуна.

Для прогнозування складових частин газу в різних зонах використовується двозонна модель згоряння. Ця модель відокремлює зону свіжого заряду від зони відпрацьованих газів. Склад вихідних газів визначається за методом професора Звонова, який передбачає наявність 18-компонентної суміші, що складається з O , O_2 , O_3 , H , H_2 , OH , H_2O , C , CO , CO_2 , CH_4 , N , N_2 , NO , NO_2 , NH_3 , HNO_3 та HCN .

Розрахунок концентрації NO_x у відпрацьованих газах базується на механізмі Я.Б. Зельдовича для «термічного» оксиду азоту (NO). Цей механізм включає в себе серію із трьох рівнянь.

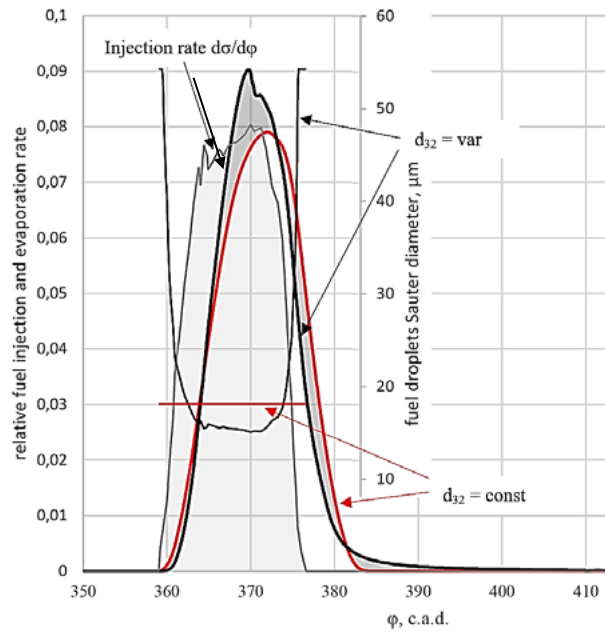


Рис. 4. Розрахункові діаграми швидкості випаровування палива. Середньооборотний дизельний двигун, 40% номінального навантаження

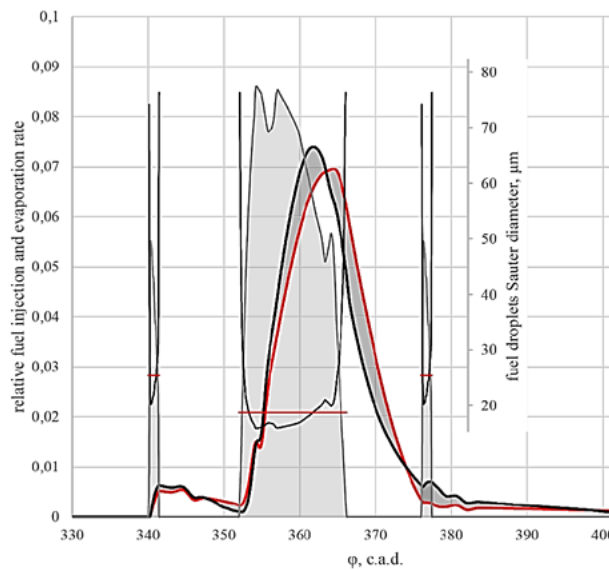


Рис. 5. Розрахункові діаграми швидкості випаровування палива. Високооборотний дизельний двигун, триразове впорскування, часткове навантаження

Розрахунок утворення сажі та твердих часток у дизельних двигунах виконується за методикою М.Ф. Разлейцева.

Вплив змінного діаметра паливних крапель на утворення токсичних викидів наведено на рис. 6.

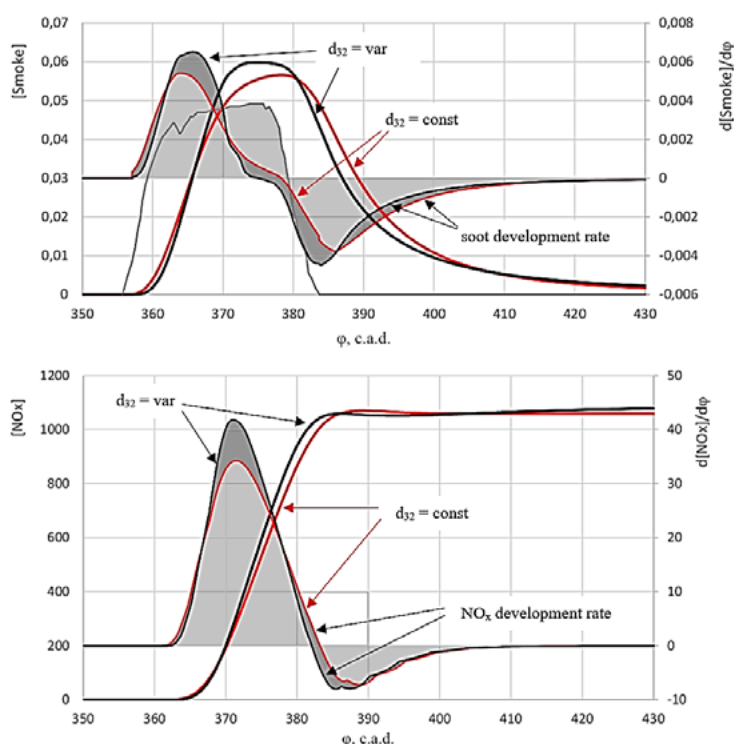


Рис. 6. Концентрація сажі та швидкість виділення оксиду азоту в циліндрі.
Середньооборотний двигун, MCR

Висновки. Технологія цифрового двійника – перспективний напрям підвищення ефективності роботи суднових двигунів внутрішнього згорання. З використанням цифрових двійників можуть бути розроблені адаптивні системи контролю технічного стану та діагностики несправностей двигунів, які відповідають принципам і вимогам четвертої промислової революції для сучасних транспортних систем. Цифровий двійник, як основний елемент цих систем, використовує дані з датчиків двигуна для синтезу віртуального робочого процесу, що дозволяє отримати додаткову інформацію про параметри роботи двигуна, допомагає оцінити ефективність його експлуатації та виявити можливі несправності.

Система моніторингу включає в себе сервер з базою даних робочих параметрів двигуна, що передаються з набору сенсорів, установлених на двигуні. Експериментальні дані можуть включати інтегральні, або «статичні», параметри та високошвидкісні, «динамічні» параметри. Цифровий двійник працює в автономному режимі, а також має забезпечувати сигналізацію про можливі несправності або відхилення контрольованих параметрів.

Під час розроблення цифрового двійника для двигуна внутрішнього згорання важливо достовірно та точно розрахувати процеси тепловиділення внаслідок згорання палива, оскільки вони суттєво впливають як на ефективність двигуна, так і на рівень токсичних викидів у відпрацьованих газах. Урахування зміни середнього діаметра крапель палива під час процесу впорскування значно покращує точність моделювання двигуна.

ЛІТЕРАТУРА

1. M. Grieves and J. Vickers. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches*. 2017, pp. 85–113. URL: https://www.researchgate.net/profile/Michael-Grieves/publication/306223791_Digital_Twin_Mitigating_Unpredictable_Undesirable_Emergent_Behavior_in_Complex_Systems/links/5aa54e1ea6fdccd544bc386f/Digital-Twin-Mitigating-Unpredictable-Undesirable-Emerge.
2. S. Evans, C. Savian, A. Burns and C. Cooper. Digital Twins for the Built Environment: An Introduction to the Opportunities. *Built Environmental News*. 2019. URL: <https://www.theiet.org/media/8762/digital-twins-for-the-built-environment.pdf>.
3. D. Botín-Sanabria, A.-S. Mihaita, R. Peimbert-García, M. Ramírez-Moreno, R. Ramírez-Mendoza and J. Lozoya-Santos. Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review. *Remote Sensing*. 2022, vol. 14 (6), № 1335, <https://doi.org/10.3390/rs14061335>.
4. M. Singh, E. Fuenmayor, E. Hinchy, Y. Qiao, N. Murray and D. Devine. Digital Twin: Origin to Future. *Appl. Syst. Innov.* 2021, vol. 4, № 36. <https://doi.org/10.3390/asi4020036>.
5. L. Li, S. Aslam, A. Wileman and S. Perinpanayagam. Digital Twin in Aerospace Industry: A Gentle Introduction. *IEEE Access*. 2022, vol. 10, pp. 9543–9562. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3136458>.
6. M. Xia, H. Shao, D. Williams, S. Lu, L. Shu and C.W. de Silva. Intelligent fault diagnosis of machinery using digital twin-assisted deep transfer learning. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021, vol. 215. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107938>.
7. S. Choi, J. Woo, J. Kim and J. Lee. Digital Twin-Based Integrated Monitoring System: Korean Application Cases. *Sensors*. 2022, vol. 22, № 5450, <https://doi.org/10.3390/s22145450>.
8. D. Zhong, Z. Xia, Y. Zhu and J. Duan. Overview of predictive maintenance based on digital twin technology. *Heliyon*. 2023, vol. 9, № 4, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14534>.
9. A.T. Hoang, A.M. Foley, S. Nižetić, Z. Huang, H.C. Ong, A.I. Ölçer, V.V. Pham and X.P. Nguyen. Energy-related approach for reduction of CO2 emissions: A critical strategy on the port-to-ship pathway. *Journal of Cleaner Production*. 2022, vol. 355, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131772>.
10. O. Melnyk, O. Sagaydak, O. Shumylo and O. Lohinov. Modern Aspects of Ship Ballast Water Management and Measures to Enhance the Ecological Safety of Shipping. *Studies in Systems, Decision and Control Systems, Decision and Control in Energy V*. Springer ed. 2023, vol. 481, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_39.
11. O. Onishchenko, A. Bukaros, O. Melnyk, V. Yarovenko, A. Voloshyn and O. Lohinov. Ship Refrigeration System Operating Cycle Efficiency

- Assessment and Identification of Ways to Reduce Energy Consumption of Maritime Transport. *Studies in Systems, Decision and Control Systems, Decision and Control in Energy V*. 2023, vol 481. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_36.
12. S. Hautala, M. Mikulski, E. Söderäng, X. Storm and S. Niemi. Toward a digital twin of a mid-speed marine engine: From detailed 1D engine model to real-time implementation on a target platform. *International Journal of Engine Research*. 2022, <https://doi.org/10.1177/14680874221106168>.
 13. S. Stoumpos, G. Theotokatos, C. Mavrelos and E. Boulougouris. Towards Marine Dual Fuel Engines Digital Twins – Integrated Modelling of Thermodynamic Processes and Control System Functions. *J. Mar. Sci. Eng.* 2020, vol. 8, № 3 (200), <https://doi.org/10.3390/jmse8030200>.
 14. I. Asimakopoulos, L. Avendaño-Valencia, M. Lützen and N. Rytter. Data-driven condition monitoring of two-stroke marine diesel engine piston rings with machine learning. *Ships and Offshore Structures*. 2023, <https://doi.org/10.1080/17445302.2023.2237302>.
 15. O. Bondarenko and T. Fukuda. Development of a diesel engine's digital twin for predicting propulsion system dynamics. *Energy*. 2020, vol. 196, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117126>.
 16. R. Varbanets, O. Fomin, V. Pištěk, V. Klymenko, D. Minchev, A. Khrulev, V. Zalozh and P. Kučera. Acoustic method for estimation of marine low-speed engine turbocharger parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021, vol. 3, № 9, <https://doi.org/10.3390/jmse9030321>.
 17. R. Varbanets, O. Shumylo, A. Marchenko, D. Minchev, V. Kyrnats, V. Zalozh, N. Aleksandrovska, R. Brusnyk and K. Volovyk. Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. *Polish Maritime Research*. 2022, vol. 29, № 4, pp. 88–96, <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
 18. S. Neumann, R. Varbanets, D. Minchev, V. Malchevsky and V. Zalozh. Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems. *Ships and Offshore Structures*. 2022, <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2128558>.
 19. O. Yeryganov and R. Varbanets. Features of the fastest pressure growth point during compression stroke. *Diagnostyka*. 2018, vol. 19, № 2, pp. 71–76, <https://doi.org/10.29354/diag/89729>.
 20. D. Minchev, R. Varbanets, N. Alexandrovskaya and L. Pisintsaly. Marine diesel engines operating cycle simulation for diagnostics issues. *Acta Polytechnica*. 2021, vol. 61, № 3, pp. 428–440, <https://doi.org/10.14311/ap.2021.61.0435>.
 21. D. Minchev, O. Gogorenko, R. Varbanets, Y. Moshentsev, V. Pištěk, P. Kučera, O. Shumylo and V. Kyrnats. Prediction of centrifugal compressor instabilities for internal combustion engines operating cycle simulation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2023, vol. 237, № № 2–3, pp. 572–584, <https://doi.org/10.1177/09544070221075419>.

22. Н.Ф. Разлейцев, Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях, Харьков : Вища школа, 1980, с. 169.
23. Двигуни внутрішнього згоряння : Серія підручників у 6 томах. Т. 5. Екологізація ДВЗ. [текст] / за ред. А.П. Марченка, А.Ф. Шеховцова. Харків : Видавн. центр НТУ «ХПІ», 2004. 466 с.
24. L. Grekhov, K. Mahkamov and A. Kuleshov. Optimization of Mixture Formation and Combustion in Two-Stroke OP Engine Using Innovative Diesel Spray Combustion Model and Fuel System Simulation Software. *SAE*. 2015, 2015-01-1859, <https://doi.org/10.4271/2015-01-1859>.
25. A. Kuleshov, K. Mahkamov, A. Kozlov and Y. Fadeev. Simulation of dual-fuel diesel combustion with multi-zone fuel spray combustion model. *Proceedings of the ASME 2014 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*. 2014, pp. 1–13, <https://doi.org/10.1115/ICEF2014-5700>.

REFERENCES

1. M. Grieves and J. Vickers. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches*. 2017, pp. 85–113. URL: https://www.researchgate.net/profile/Michael-Grieves/publication/306223791_Digital_Twin_Mitigating_Unpredictable_Undesirable_Emergent_Behavior_in_Complex_Systems/links/5aa54e1ea6fdccd544bc386f/Digital-Twin-Mitigating-Unpredictable-Undesirable-Emerge.
2. S. Evans, C. Savian, A. Burns and C. Cooper. Digital Twins for the Built Environment: An Introduction to the Opportunities. *Built Environmental News*. 2019. URL: <https://www.theiet.org/media/8762/digital-twins-for-the-built-environment.pdf>.
3. D. Botín-Sanabria, A.-S. Mihaita, R. Peimbert-García, M. Ramírez-Moreno, R. Ramírez-Mendoza and J. Lozoya-Santos. Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review. *Remote Sensing*. 2022, vol. 14 (6), № 1335, DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14061335>.
4. M. Singh, E. Fuenmayor, E. Hinchy, Y. Qiao, N. Murray and D. Devine. Digital Twin: Origin to Future. *Appl. Syst. Innov.* 2021, vol. 4, № 36. DOI: <https://doi.org/10.3390/asi4020036>.
5. L. Li, S. Aslam, A. Wileman and S. Perinpanayagam. Digital Twin in Aerospace Industry: A Gentle Introduction. *IEEE Access*. 2022, vol. 10, pp. 9543–9562. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3136458>.
6. M. Xia, H. Shao, D. Williams, S. Lu, L. Shu and C.W. de Silva. Intelligent fault diagnosis of machinery using digital twin-assisted deep transfer learning. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021, vol. 215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107938>.
7. S. Choi, J. Woo, J. Kim and J. Lee. Digital Twin-Based Integrated Monitoring System: Korean Application Cases. *Sensors*. 2022, vol. 22, № 5450, doi: <https://doi.org/10.3390/s22145450>.

8. D. Zhong, Z. Xia, Y. Zhu and J. Duan. Overview of predictive maintenance based on digital twin technology. *Heliyon*. 2023, vol. 9, № 4, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14534>.
9. A.T. Hoang, A.M. Foley, S. Nižetić, Z. Huang, H.C. Ong, A.I. Ölçer, V.V. Pham and X.P. Nguyen. Energy-related approach for reduction of CO₂ emissions: A critical strategy on the port-to-ship pathway. *Journal of Cleaner Production*. 2022, vol. 355, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131772>.
10. O. Melnyk, O. Sagaydak, O. Shumylo and O. Lohinov. Modern Aspects of Ship Ballast Water Management and Measures to Enhance the Ecological Safety of Shipping. *Studies in Systems, Decision and Control Systems, Decision and Control in Energy V*. Springer ed. 2023, vol. 481, Cham, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_39.
11. O. Onishchenko, A. Bukaros, O. Melnyk, V. Yarovenko, A. Voloshyn and O. Lohinov. Ship Refrigeration System Operating Cycle Efficiency Assessment and Identification of Ways to Reduce Energy Consumption of Maritime Transport. *Studies in Systems, Decision and Control Systems, Decision and Control in Energy V*. 2023, vol 481. Springer, Cham. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_36.
12. S. Hautala, M. Mikulski, E. Söderäng, X. Storm and S. Niemi. Toward a digital twin of a mid-speed marine engine: From detailed 1D engine model to real-time implementation on a target platform. *International Journal of Engine Research*. 2022, doi: <https://doi.org/10.1177/14680874221106168>.
13. S. Stoumpos, G. Theotokatos, C. Mavrelos and E. Boulougouris. Towards Marine Dual Fuel Engines Digital Twins – Integrated Modelling of Thermodynamic Processes and Control System Functions. *J. Mar. Sci. Eng.* 2020, vol. 8, № 3 (200), doi: <https://doi.org/10.3390/jmse8030200>.
14. I. Asimakopoulos, L. Avendaño-Valencia, M. Lützen and N. Rytter. Data-driven condition monitoring of two-stroke marine diesel engine piston rings with machine learning. *Ships and Offshore Structures*. 2023, doi: [10.1080/17445302.2023.2237302](https://doi.org/10.1080/17445302.2023.2237302).
15. O. Bondarenko and T. Fukuda. Development of a diesel engine's digital twin for predicting propulsion system dynamics. *Energy*. 2020, vol. 196, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117126>.
16. R. Varbanets, O. Fomin, V. Pištěk, V. Klymenko, D. Minchev, A. Khrulev, V. Zalozh and P. Kučera. Acoustic method for estimation of marine low-speed engine turbocharger parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021, vol. 3, № 9, doi: <https://doi.org/10.3390/jmse9030321>.
17. R. Varbanets, O. Shumylo, A. Marchenko, D. Minchev, V. Kyrnats, V. Zalozh, N. Aleksandrovska, R. Brusnyk and K. Volovyk. Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. *Polish Maritime Research*. 2022, vol. 29, № 4, pp. 88–96, doi: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
18. S. Neumann, R. Varbanets, D. Minchev, V. Malchevsky and V. Zalozh. Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems. *Ships*

- and Offshore Structures*. 2022, doi: <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2128558>.
19. O. Yeryganov and R. Varbanets. Features of the fastest pressure growth point during compression stroke. *Diagnostyka*. 2018, vol. 19, № 2, pp. 71–76, doi: <https://doi.org/10.29354/diag/89729>.
 20. D. Minchev, R. Varbanets, N. Alexandrovskaya and L. Pisintsaly. Marine diesel engines operating cycle simulation for diagnostics issues. *Acta Polytechnica*. 2021, vol. 61, № 3, pp. 428–440, doi: <https://doi.org/10.14311/ap.2021.61.0435>.
 21. D. Minchev, O. Gogorenko, R. Varbanets, Y. Moshentsev, V. Píšťek, P. Kučera, O. Shumylo and V. Kyrnats. Prediction of centrifugal compressor instabilities for internal combustion engines operating cycle simulation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2023, vol. 237, № 2–3, pp. 572–584, doi: <https://doi.org/10.1177/09544070221075419>.
 22. M. F. Razlejtsev, Simulation and optimization of combustion processes in diesel engines [Modelirovaniye i optimizatsiya procesa sgoryaniya v dizelyah], Kharkiv: Vyscha Shkola, 1980, p. 169.
 23. Internal Combustion Engines: handbooks in 6 volumes. V. 5. Ekologization of Internal Combustion Engines [Dvyguny vnutrishnyogo zgoryannya : Serija pidruchnykiv v 6 tomah. T.5. Tkolohyzatsija DVZ] / edited by A.P. Marchenko, A.S. Shehovtsev. Kharkiv : Publisher NTU “KhPI”, 2004. 466 p.
 24. L. Grekhov, K. Mahkamov and A. Kuleshov. Optimization of Mixture Formation and Combustion in Two-Stroke OP Engine Using Innovative Diesel Spray Combustion Model and Fuel System Simulation Software. *SAE*. 2015, 2015-01-1859, doi: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1859>.
 25. A. Kuleshov, K. Mahkamov, A. Kozlov and Y. Fadeev. Simulation of dual-fuel diesel combustion with multi-zone fuel spray combustion model. *Proceedings of the ASME 2014 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*. 2014, pp. 1–13, doi: <https://doi.org/10.1115/ICEF2014-5700>.