

УДК 621.431.74
DOI 10.47049/2226-1893-2023-4-110-123

АНАЛІЗ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ СУДНОВОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ

Е.М. Половинка

д.т.н., професор кафедри «Суднові енергетичні установки»

Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна

Анотація. Проведено аналіз методів моделювання робочих процесів дизелів. У сфері сучасних методів розрахунку робочих процесів дизелів склалися два напрями: термодинамічних та чисельних методів. Останні ґрунтуються на вирішенні завдань механіки рідини та газу засобами комп'ютерного моделювання. Розрахунок процесу згоряння в термодинамічних моделях зводиться до визначення швидкості тепловиділення, яка залежить від швидкості згоряння палива $dx/d\varphi$.

Встановлено невирішене завдання розрахунку згоряння палива з урахуванням реальних характеристик сумішоутворення та кінетики реакцій окиснення.

Запропоновано робочу методику розрахунку характеристик тепловиділення за індикаторними діаграмами.

При розробці методики розрахунку $\frac{dx}{d\varphi}$ прийнято такі припущення:

- не враховані втрати на дисоціацію продуктів згоряння, що становлять умови згоряння в дизелі 0,2-0,7 %;

- не проведено коригування нижчої теплоти згоряння на величину початкової температури продуктів реакції та зміну складу газової суміші, що становить 0,8 %.

Слід зазначити, що ці припущення частково компенсують один одного.

Проведено обробку індикаторної діаграми суднового малообертового дизеля.

Наступним етапом аналізу робочого процесу є дослідження процесу згоряння. Передбачено створення інформаційного середовища для фізико-хімічних процесів у циліндрі дизеля.

При великому різноманітті уявлень про механізм формування факела, а також роль різних факторів у процесах сумішоутворення та згоряння базовим у всіх феноменологічних підходах є опис поведінки краплі розпиленого палива.

З урахуванням цієї обставини аналіз, а згодом синтез робочого процесу виконано з урахуванням закономірностей прогріву і випаровування окремої краплі.

Наведено методику аналізу процесів сумішоутворення та алгоритм підготовки даних для оцінки умов процесу згоряння. Використано комбінований підхід: поєднання феноменологічного та стохастичного методів.

Кінцевим результатом аналізу процесу згоряння є визначення величини коефіцієнта швидкості хімічного реагування бімолекулярної схеми згоряння палива.

Проведено аналіз характеристик сумішоутворення та згоряння по індикаторній діаграмі та осцилограмі паливopодачі дизеля. Отримано регресійні рівняння для коефіцієнта швидкості згоряння бімолекулярної реакції.

Як визначальні прийняті чотири фактори: температура газів у циліндрі, сумарна частка згорілого палива, концентрація палива, підготовленого до згоряння та концентрація кисню. Коефіцієнт детермінації (множинний коефіцієнт кореляції) регресійної залежності становив $R^2 = 0,9169$.

Ключові слова: дизелі, згоряння, феноменологічні та статистичні моделі.

UDC 621.431.74

DOI 10.47049/2226-1893-2023-4-110-123

ANALYSIS OF THE MODELING WORKING PROCESSES METHODS OF DIESEL ENGINES

E.M. Polovinka

DTSс, professor Department «Ship power plants»

National University «Odesa Maritime Academy», Odesa, Ukraine

Abstract. *An analysis of the modeling working processes methods of diesel engines was carried out.*

In the field of modern methods for calculating the working processes of diesel engines, two directions have developed: thermodynamic and numerical methods. The latter are based on solving problems of fluid and gas mechanics by means of computer simulation. The calculation of the combustion process in thermodynamic models is reduced to the determination of the heat release rate, which depends on the fuel combustion rate $dx/d\varphi$.

The unsolved task of calculating fuel combustion, taking into account the real characteristics of mixture formation and the kinetics of oxidation reactions, was established.

A working methodology for calculating heat release characteristics based on indicator diagrams is proposed.

When developing the calculation methodology, the following assumptions were made:

- losses due to the dissociation of combustion products are not taken into account, which constitute for the combustion conditions in diesel 0,2-0,7 %;*
- no adjustment of the lower heat of combustion for the value of the initial temperature of the reaction products and the change in the composition of the gas mixture, which is 0,8 %, was carried out.*

It should be noted that these assumptions partially offset each other.

Processing of the indicator diagram of the ship's low-speed diesel engine was carried out.

The next stage of the analysis of the work process is the study of the combustion process. It is planned to create an information environment for physical and chemical processes in a diesel cylinder.

With a great variety of ideas about the mechanism of the torch formation, as well as the role of various factors in the processes of mixture formation and combustion, the basic in all phenomenological approaches is the description of the behavior of an atomized fuel drop.

Taking into account this circumstance, the analysis, and later the synthesis of the work process, was performed taking into account the regularities of heating and evaporation of a single drop.

The method of analysis of mixture formation processes and the algorithm of data preparation for evaluating the conditions of the combustion process are presented. A combined approach was used: a combination of phenomenological and stochastic methods.

The final result of the combustion process analysis is the determination of the chemical reaction rate coefficient for bimolecular fuel combustion scheme.

Four factors are taken as determining these: the temperature of gases in the cylinder, the total proportion of burned fuel, the concentration of fuel prepared for combustion and the concentration of oxygen. The coefficient of determination (multiple correlation coefficient) of the regression dependence was $R^2 = 0,9169$.

Keywords: *diesels, combustion, phenomenological and statistical models.*

Вступ. Завдання розвитку коректного моделювання робочих процесів дизелів різного призначення та характеристик залишається актуальним, незважаючи на інтенсивні дослідження у цій галузі. Для термодинамічних моделей, які отримали переважне застосування, критичним є розрахунок процесу згоряння, що описується протіканням швидкості нормованого тепловиділення $dx/d\varphi$. У цій частині ситуація, по суті, не змінюється з запропонованого І.І. Вибі в 1962 метод апроксимації швидкості тепловиділення. Однак при цьому не розглядається феноменологія внутрішньоциліндрових процесів.

У цій роботі запропоновано спосіб суміщеного феноменологічного та статистичного аналізу робочих процесів дизелів. На прикладі сучасного суднового малообертного дизеля проведено аналіз із побудовою регресійних залежностей. Використана для аналізу методика може бути базою на вирішення завдання синтезу робочого процесу.

1. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит. Об'єктом дослідження є робочі процеси дизелів. Розглядаються моделі сумішоутворення та згоряння на рівні феноменології фізичних явищ та статистична обробка отриманих закономірностей.

Технологічний аудит представлений оглядом підходів до моделювання робочих процесів дизелів та методологією проведених досліджень.

2. Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є розробка методу аналізу робочого процесу на основі феноменологічного та стохастичного уявлення внутрішньоциліндрових процесів.

Завданням дослідження є побудова комбінованої (феноменологічної та статистичної) моделі робочого процесу для суднового малообертового дизеля.

3. Дослідження існуючих розв'язань проблеми. У сфері сучасних методів розрахунку робочих процесів дизелів склалися два напрями: термодинамічних і численних методів [1]. Останні ґрунтуються на вирішенні завдань механіки рідини та газу засобами комп'ютерного моделювання – CFD (Computational Fluid Dynamic).

Базові моделі термодинамічного ряду, до яких належать методи розрахунку, запропоновані В.І. Гриневецьким, І.І. Вибе [2], Ватсоном (Watson) [3] та іншими авторами [4-7], відрізняються компактністю.

Розрахунок процесу згоряння в термодинамічних моделях зводиться до визначення швидкості тепловиділення, яка залежить від швидкості згоряння палива dx/df . Саме його знаходження становить найбільші труднощі, будучи водночас найбільш істотною величиною. Складність рішення полягає у різноманітні чинників, що впливають на швидкість згоряння палива, а актуальність визначається необхідністю використання цього параметра для визначення пов'язаних показників двигуна. До них, зокрема, належать найважливіші параметри – екологічні дані двигуна.

У програмах CFD розрахункова область розбивається на велику кількість осередків (до 1,5 млн.), для кожної з яких вирішуються системи рівнянь збереження маси, імпульсу, енергії та стану. У цьому тривимірному середовищі моделюється рух газу і палива, що впорскується. Недоліками використання програм є велика трудомісткість розрахунків із застосуванням суперкомп'ютерів, значний обсяг підготовчої роботи та високі експлуатаційні витрати комерційних пакетів.

Прикладом використання моделей першого типу може бути [8-10] розробка комплексного методу розрахунку робочих процесів суднового малообертового двигуна з метою вирішення питань оптимізації експлуатаційних режимів.

Для розрахунку швидкості горіння палива застосована модель Вошні-Ані-сіца (Woschni-Anisits) [5]. У цій моделі використовується структура односкладового вираження Вібе з константами, які залежать від умов роботи двигуна на одному виді палива. Отримано вираз

$$\frac{dm_{f,cy}}{dt} = 6N m_{f,cy} a \frac{(m+1)}{\Delta\theta} \left(\frac{\theta - \theta_{soc}}{\Delta\theta} \right)^m e^{\left(-a \left(\frac{\theta - \theta_{soc}}{\Delta\theta} \right)^{m-1} \right)},$$

де $m_{f,cy}$ – маса палива, що впорскується на циліндр за цикл;

$\Delta\theta$ – тривалість горіння;

θ_{soc} – початок горіння;

a, m – параметри моделі.

Розрахункові характеристики робочого процесу малообертового дизеля у формі даних тепловиділення представлені на рис. 1.

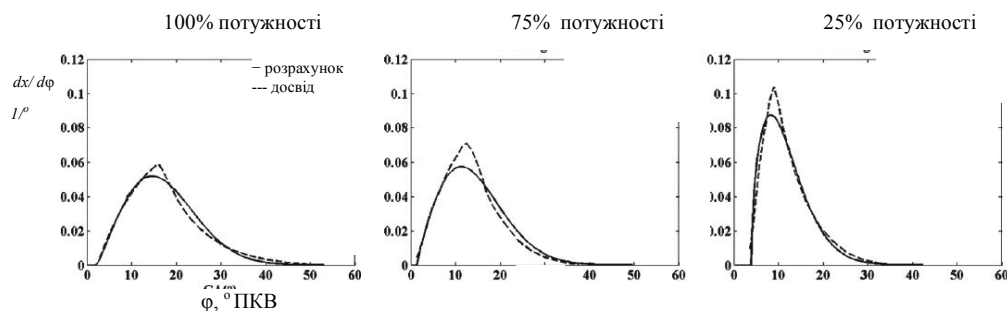


Рис. 1. Характеристики тепловиділення двигуна MAN B&W K98MC

4. Виклад основного матеріалу. Кінцевим результатом аналізу робочого процесу у цьому дослідженні є визначення параметрів процесу згоряння.

Експериментальним матеріалом служать індикаторна діаграма та осцилограма паливоподачі.

На першому етапі розраховуються параметри тепловиділення.

Для згладжування дослідних даних (значень тиску) використано залежності, отримані К. Ланцош. В основу методу покладено визначення значення функції на середині відрізка, що включає п'ять дослідчених значень. Середня точка на відрізку має значення

$$\left(\frac{dp}{d\varphi} \right)_3 = \frac{-2p_1 - p_2 + p_4 + 2p_5}{10\Delta\varphi}$$

При виведенні розрахункових формул для визначення характеристик тепловиділення використано як вихідне співвідношення перший закон термодинаміки:

$$dQ = dU + dL \quad ,$$

окремі складові якого мають вигляд

$$\frac{dQ}{d\varphi} = Q_H^P q_{Ц} \frac{dx}{d\varphi} \quad - \text{швидкість виділення тепла при згоранні палива,}$$

де Q_H^P – нижча теплота згоряння палива;

$q_{Ц}$ – циклова подача палива;

$\frac{dx}{d\varphi}$ – швидкість відносного тепловиділення.

Зміна внутрішньої енергії робочого тіла

$$\frac{dU}{d\phi} = c_v^{cm} G_{cm} \frac{dT}{d\phi},$$

де c_v^{cm} – теплоємність робочого тіла;

G_{cm} – кількість газів у циліндрі;

$\frac{dT}{d\phi}$ – швидкість зміни температури.

Робота газів

$$\frac{dL}{d\phi} = p \frac{dV}{d\phi},$$

де p – тиск у циліндрі;

$\frac{dV}{d\phi}$ – швидкість зміни обсягу.

З урахуванням тепловіддачі в стінки розрахунковий вираз швидкості виділення отримано у формі

$$\frac{dx}{d\phi} = \frac{\frac{k}{k-1} p \frac{dV}{d\phi} + \frac{1}{k-1} V \frac{dp}{d\phi} + \frac{dQ_W}{d\phi}}{[Q_H^P + (c_V^{cm} - 2,9302)T + 761,85] q_{II}}.$$

При розробці методики розрахунку прийнято такі припущення:

- не враховано втрати на дисоціацію продуктів згоряння, що становлять умови згоряння в дизелі 0,2-0,7 %;

- не проведено коригування нижчої теплоти згоряння на величину початкової температури продуктів реакції та зміну складу газової суміші, що становить 0,8 %.

Слід зазначити, що ці припущення частково компенсують один одного.

Чисельне інтегрування рівняння проведено методом Рунге-Кутта четвертого порядку.

Наступним етапом аналізу робочого процесу є дослідження процесу згоряння. Передбачено створення інформаційного середовища для фізико-хімічних процесів у циліндрі дизеля. Разом про те, розглянуто методологічні основи моделювання робочого процесу, т.щ. статистичні характеристики, що замикають розрахункову схему, мають бути отримані при використанні тих самих феноменологічних підмоделей, що і при синтезі робочого циклу.

При великому різноманітті уявлень про механізм формування факела, а також роль різних факторів у процесах сумішоутворення та згоряння базовим у всіх феноменологічних підходах є опис поведінки краплі розпиленого палива.

З урахуванням цієї обставини аналіз, а згодом синтез робочого процесу виконано з урахуванням закономірностей прогріву і випаровування окремої краплі. Теорія цього явища вперше розроблена Г.А. Варшавським, Сполдінгом, Гольдсмітом та Пеннером. Надалі вона була розвинена І.І. Палєєвим, М.А. Гурвічем та Ф.А. Агафоновою.

Зміна маси краплі в результаті випаровування може бути виражено наступним чином:

$$d\left(\rho_{\text{ж}} \frac{\pi d_{\text{к}}^3}{6}\right) = -\pi d_{\text{к}}^2 g_{\text{п}} d\tau \quad ,$$

де $\rho_{\text{ж}}$ – щільність рідини;

τ – час;

$g_{\text{п}}$ – потік пари (питомий) з поверхні краплі.

Істотним для розрахунку випаровування краплі є визначення режиму горіння.

За досвідченими даними зривні швидкості для крапель бензину діаметрів 0,2-1 мм при горінні повітря з температурою 870 °С становлять 4-9 м/с. Чим менший діаметр крапель, тим нижче значення швидкостей зриву полум'я.

Оскільки для дизельного процесу швидкості руху крапель як мінімум на порядок вище зазначених значень, а діаметр настільки ж менше, згорання парів відбувається поза межами наведеної плівки в об'ємі камери згорання.

Кінцевим результатом аналізу процесу згорання є визначення величини коефіцієнта швидкості хімічного реагування.

Для бімолекулярної схеми реакції швидкість згорання палива представляється наступною залежністю:

$$\frac{dG_{\text{T}}}{d\tau} = k_{\rho} c_{\text{T}} c_{\text{O}_2} \quad ,$$

де k_{ρ} – коефіцієнт швидкості;

$$k_{\rho} = \frac{dG_{\text{T}}}{d\tau} / (c_{\text{T}} c_{\text{O}_2}) \quad .$$

$c_{\text{T}}, c_{\text{O}_2}$ – концентрація палива (підготовленого до згорання) та кисню, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Для такої схеми стиль розмірності буде $\frac{\text{м}^3}{\text{с} \cdot \text{кг}_{\text{O}_2}}$.

Аналіз робочого процесу виконаний за індикаторною діаграмою двигуна 7S50ME-C в режимі 75 % потужності, поєднаної з осцилограмою паливоподачі, представленої на рис. 2.

Параметри режиму є наступними. Загальний кут впорскування $\varphi_{\text{вп}} = 11,7^\circ$ ПКВ, кут початку впорскування палива $\varphi_{\text{п}} = 0,32^\circ$ ПКВ за ВМТ, кут початку згорання $\varphi_{\text{н.сг}} = 2,86^\circ$ ПКВ за ВМТ.

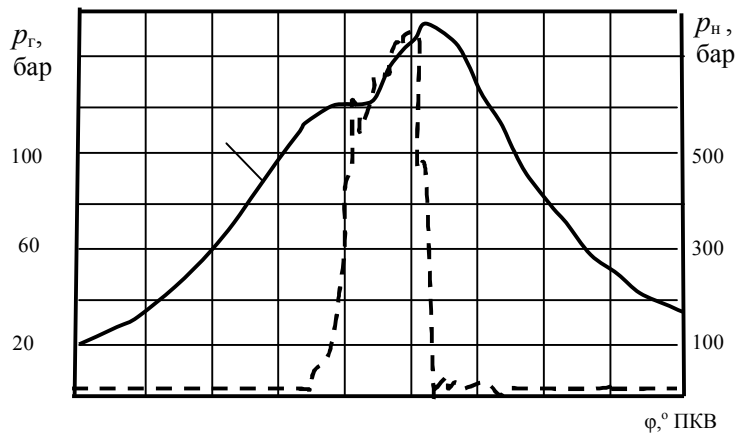


Рис. 2. Індикаторна діаграма двигуна 7S50ME-C з осцилограмою паливободачі

Основні параметри двигуна: діаметр циліндра $D = 500$ мм, хід поршня $S = 2000$ мм, номінальний середній ефективний тиск $p_e = 20$ бар, питома ефективна витрата палива на режимі 75 % потужності $g_e = 166$ г/кВт-год.

Результати обробки осцилограм представлені в таблиці з наступними позначеннями, використаними надалі для статистичного моделювання обробки:

TGM(-3) – температура газів у циліндрі масштабована $\cdot 10^{-3}$;

X1 – сумарна частка згорілого палива;

СТ – концентрація палива, підготовленого до згорання;

CO2 – концентрація кисню;

RKE – коефіцієнт швидкості реакції згорання;

LogRKE – логарифм RKE.

Графічне уявлення залежності швидкості згорання від кута повороту представлено на рис. 3.

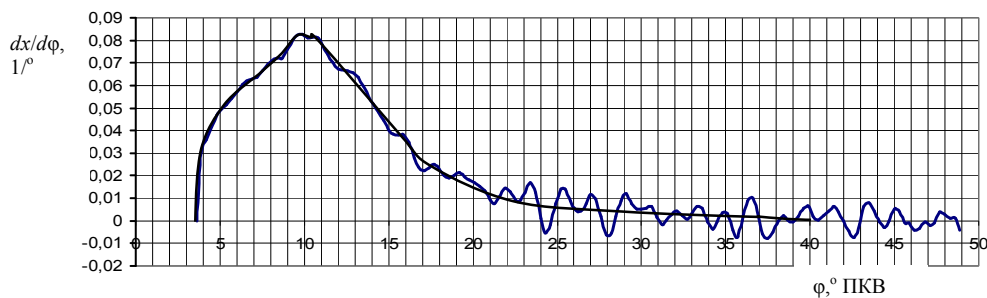


Рис. 3. Швидкість відносного тепловиділення двигуна MAN 7S50ME на режимі 75 % потужності

Для отриманих параметрів процесу згоряння побудовано статистичні залежності у формі регресійних рівнянь першого порядку. Як залежна змінна прийнятий коефіцієнт швидкості згоряння RKE. Параметрами послужили

TGM, X1, CT та CO2. Визначення коефіцієнтів багатофакторного регресійного рівняння та статистик створених моделей проведено у середовищі пакету Статистика 6.

Параметри процесу згоряння

TGM(-3), К	X1, ед	CT, $\frac{к2}{м^3}$	CO2, $\frac{к2}{м^3}$	RKE, $\frac{м^3}{с \cdot к2_{O_2}}$	LogRKE
1,105278	0,0093	0,265	9	9,63	0,983626287
1,146975	0,05023	0,309	8,77	2,8	1,10720997
1,199496	0,10334	0,34	8,47	13,7	1,13672057
1,259766	0,1652	0,361	8,14	15	1,17609126
1,321881	0,23243	0,377	7,78	16,2	1,20951501
1,388424	0,30704	0,385	7,4	17,3	1,2380461
1,460994	0,39017	0,384	6,98	20,5	1,31175386
1,531596	0,47618	0,379	6,56	21	1,32221929
1,593588	0,55905	0,387	6,15	17,8	1,25042
1,640943	0,62973	0,316	5,78	21,9	1,34044411
1,680549	0,69444	0,254	5,44	23,5	1,37106786
1,704657	0,74644	0,205	5,15	22,7	1,35602586
1,716711	0,7872	0,167	4,89	26,1	1,41664051
1,720401	0,82092	0,136	4,65	18,4	1,26481782
1,716588	0,84563	0,113	4,44	25,7	1,40993312
1,707855	0,86731	0,0943	4,25	25	1,39794001
1,700352	0,88838	0,0767	4,06	27,6	1,44090908
1,688298	0,90538	0,0629	3,89	23,2	1,36548798
1,669233	0,91509	0,0545	3,73	32,4	1,51054501
1,642296	0,94231	0,0346	3,43	31,2	1,49415459
1,599861	0,95374	0,0258	3,18	38,2	1,58206336
1,578828	0,95813	0,0226	3,06	55,2	1,74193908

З кількох варіантів обробки даних представлені два, що мають найкращі прогностичні характеристики. Дві вихідні величини перетворені: масштабована $TGM \cdot 10^{-3}$, в одному варіанті логарифмований LogRKE. Під час підготовки даних видалено два випадуючих значення RKE (таблиці не наведено).

При обробці даних з вихідним значенням RKE отримано наступне регресійне рівняння (відтворюється у формі, поданій пакетом Статистика 6).

$$RKE = 261.07 + 13.13 \cdot TGM(-3) - 151.7 \cdot X1 + 25.93 \cdot CT - 30.22 \cdot CO2$$

Другий варіант моделі отримано при логарифмуванні залежної змінної. Регресійне рівняння представлено у формі

$$\text{LogRKE}=7.555+2.804*\text{"TGM(-3)}"-7.404*\text{"X1"}-.1788 *\text{CT}-1.058*\text{"CO2"}$$

Підсумковою характеристикою прогностичних якостей моделей є коефіцієнт детермінації (або множинний коефіцієнт кореляції) R^2 , що характеризує частку дисперсії Y , поясненої регресією Y по X .

У першому варіанті обробки без коригування RKE отримані $R = 0,9244$ і $R^2 = 0,8545$.

В результаті логарифмування функції при статистичному аналізі даних складено регресійне рівняння, верифікація якого показала прогностичні якості, що склали значення $R=0,9575$ та $R^2=0,9169$.

Аналогічно співвідносяться критерії адекватності: $F_e = 24,96$ і $46,91$. При цьому компоненти склали $MS_D = 434,50$ та $0,13539$; $MS_R = 17,405$ та $0,002886$.

Експериментальні критерії адекватності визначені як $F_{\mathcal{D}} = \frac{MS_D}{MS_R}$,

де $MS_D = \frac{SS_D}{v_D}$ и $MS_R \equiv S^2 = \frac{SS_R}{v_R}$ – середній квадрат відхилень.

При цьому SS_D – сума квадратів відхилень проорокованих значень функції від середнього, обумовлена регресією,

$$SS_D = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2,$$

а сума квадратів відхилень значень функції, що спостерігаються щодо передбачених (залишок)

$$SS_R = SS_T - SS_D.$$

Тут дана повна сума квадратів відхилень, що спостерігаються y_i щодо середнього \bar{y}

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2.$$

Відповідне число ступенів свободи v_T, v_D .

Як зазначено вище, $F_{\mathcal{D}} = 24,96$ та $46,91$ для першого та другого регресійного рівняння відповідно.

З розподілу Фішера-Снедекора при $\alpha=0,05$; $v_T = 1$; $v_D = 20$ слід прийняти табличний $F_{\alpha, v_T, v_D} = 4,35$.

Оцінка адекватності обох рівнянь позитивна: $F_{\mathcal{D}} \geq F_{\alpha, \nu_T, \nu_D}$ – рівняння адекватні.

Найкращими прогностичними властивостями, як за $F_{\mathcal{D}}$ і для оцінок R^2 , має друге рівняння, де використаний LogRKE.

Процедура апроксимації відображена на графіках рис. 4-6.

Початкове співвідношення експериментальних даних та їх апроксимації представлено на рис. 4.

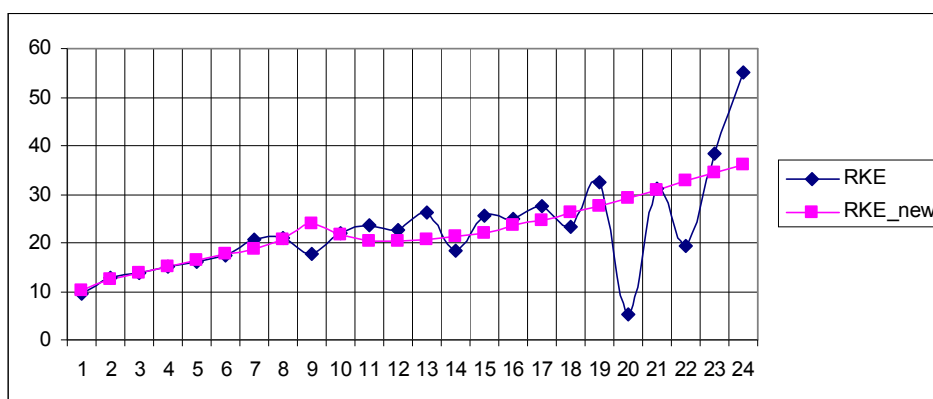


Рис. 4. Вихідне співвідношення експериментальних і розрахункових даних

На графіку видно експериментальні точки, які суттєво виділяються із загальної залежності та були виключені з подальшого розгляду. Підсумкові дані моделювання показані на рис. 5; 6.

Номер спостереження, співвідношення експериментальних та розрахункових значень логарифму RKE представлено на рис. 5.

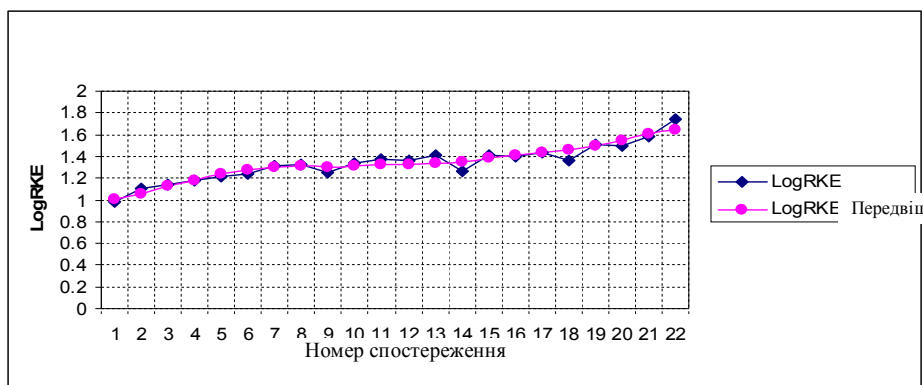


Рис. 5. Підсумкові графіки коефіцієнта швидкості реакції згоряння

Додаткову інформацію щодо якості регресійного рівняння містить графік розсіювання даних рис. 6.

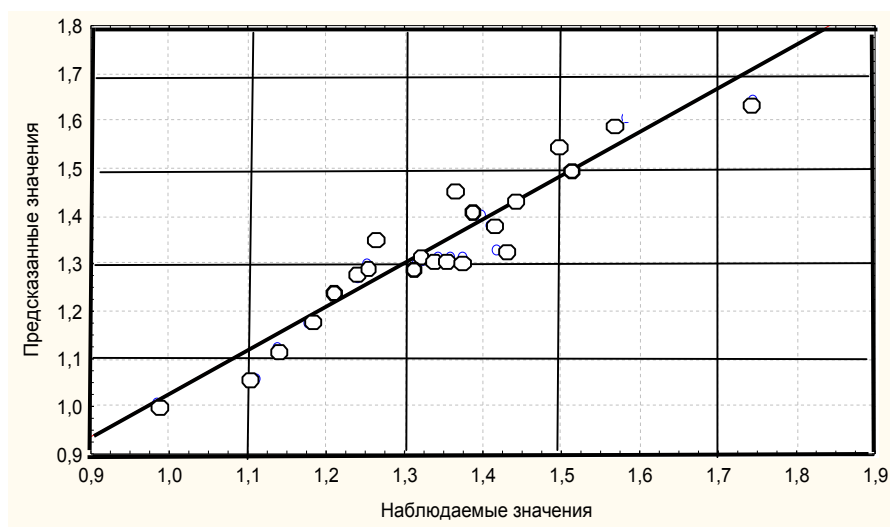


Рис. 6. Графік розсіювання значень $\log RKE$

Висновки. Проведено аналіз методів моделювання робочих процесів дизелів. Встановлено невирішене завдання розрахунку згоряння палива з урахуванням реальних характеристик сумішоутворення та кінетики реакцій окиснення.

Запропоновано робочу методику розрахунку характеристик тепловиділення за індикаторними діаграмами. Проведено обробку індикаторної діаграми суднового малооборотного дизеля.

Наведено методику аналізу процесів сумішоутворення та алгоритм підготовки даних для оцінки умов процесу згоряння. Використано комбінований підхід: поєднання феноменологічного та стохастичного методів.

Проведено аналіз характеристик сумішоутворення та згоряння по індикаторній діаграмі та осцилограмі паливободачі дизеля. Отримано регресійні рівняння для коефіцієнта швидкості згоряння бімолекулярної реакції. Коефіцієнт детермінації (множинний коефіцієнт кореляції) становив $R^2 = 0,9169$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кулешов А.С. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС / А.С. Кулешов. – Дис. ДТН. – 05.04.02. – М.: МВТУ им. Н.Э. БАУМАНА, 2011. С. 235.
2. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей / И.И. Вибе. – М.: Машигиз, 1962. – 272 с.

3. *Watson N., Pilley A.D., Marzouk M. A Combustion Correlation for Diesel Engine Simulation // SAE Tech. Pap. Ser. – 1980. – N 800029. – P. 1-19.*
4. *Austen A.E.W., Lyn W.T. Relation between Fuel Injection and Heat Re-lease in a Direct Injection Engine and the Nature of the Combustion Process// Proc. Inst. Mech. Ehg. – 1960-1961. – N 1. – P. 47-62.*
5. *Woschni G. Experimental Investigation and Mathematical Presentation of Rate of Heat Release in Diesel Engines Dependent Upon Engine Operating Conditions/ G.Woschni, F.Anisits// SAE Paper, nr. 740086, 1974. – P. 1-21.*
6. *Shipinski J., Myers P.S., Uyehara O.A. Spray-Droplet Model for Diesel Combustion // Proc. Inst. Mech. Engrs. – 1969-1970. – V. 184, Part 3J. – P. 28-35.*
7. *Whitehouse N.D., Way R.J.B. A Simple Method for Calculation of Heat Release in Diesel Engines Based on Fuel Injection Rate // SAE Tech. Pap. Ser. – 1971. – N 710134. – P. 1-19.*
8. *Merker G.P. Simulating Combustion / G.P.Merker, C.Schwarz, G.Stiesch, F. Otto. – Berlin: Springer-Verlag, 2006. – P.395.*
9. *Cong G.Analysis of Two Stroke Marine Diesel Engine Operation Including Turbocharger Cut-Out by Using a Zero-Dimensional Model / G. Cong, G. Theotokatos, H. Chen// Energies. – 2015.-№8.-p. 5738-5764; DOI:10.3390/en 8065738/ – www.mdpi.com/journal/energies.*
10. *Guan C. Computational investigation of a large containership propulsion engine operation at slow steaming conditions / C. Guan, G. Theotokatos, P. Zhou, H. Chen // Appl. Energy. – 2014. – № 130. – P. 370-383.*

REFERENCES

1. *Kuleshov A.S.(2011) Razvitiye metodov rascheta i optimizatsiya rabochikh protsessov DVS [Development of calculation methods and optimization of internal combustion engine working processes]. Dis. DTN. 05.04.02 . Moskva: MVTU im. N.E. BAUMANA, 235. (in Rus.).*
2. *Vibe I.I. (1962) Novoye o rabochem tsikle dvigateley[New information about the operating cycle of engines]. M.: Mashgiz, 272. (in Rus.).*
3. *Watson N., Pilley A.D., Marzouk M. A . (1980). Combustion Correlation for Diesel Engine Simulation . SAE Tech. Pap. Ser. 800029, 1-19.*
4. *Austen A.E.W., Lyn W.T. (1960). Relation between Fuel Injection and Heat Release in a Direct Injection Engine and the Nature of the Combustion Process. Proc. Inst. Mech. Ehg. 1, 47-62.*
5. *Woschni G., Anisits F. (1974). Experimental Investigation and Mathematical Presentation of Rate of Heat Release in Diesel Engines Dependent Upon Engine Operating Conditions. SAE Paper. 740086, 1-21.*
6. *Shipinski J., Myers P.S., Uyehara O. (1969) A Spray-Droplet Model for Diesel Combustion . Proc. Inst. Mech. Engrs. V. 184. Part 3J, 28-35.*

7. Whitehouse N.D., Way R.J.B. (1971) *A Simple Method for Calculation of Heat Release in Diesel Engines Based on Fuel Injection Rate*. SAE Tech. Pap. Ser. 710134, 1-19.
8. Merker G.P., Schwarz C., Stiesch G., Otto F. (2006) *Simulating Combustion*. Berlin: Springer-Verlag, 395.
9. Cong G., Theotokatos G., Chen H. (2015). *Analysis of Two Stroke Marine Diesel Engine Operation Including Turbocharger Cut-Out by Using a Zero-Dimensional Model*. *Energies*. 8, 5738-5764. doi:10.3390/en8065738/www.mdpi.com/journal/energies.
10. Guan C. *Computational investigation of a large containership propulsion engine operation at slow steaming conditions* / C. Guan, G. Theotokatos, P. Zhou, H. Chen // *Appl. Energy*. – 2014. – № 130. – P. 370-383.

Стаття надійшла до редакції 10.10.2023

Посилання на статтю: Половинка Е.М. Аналіз робочого процесу суднового малообертового дизеля // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2023. № 4 (71). С. 110-123. DOI 10.47049/2226-1893-2023-4-110-123.

Article received 10.10.2023

Reference a journalartic: Polovinka E.M. Analysis of the modeling working processes methods of diesel engines // Herald of the Odessa national maritime university: Coll. scient. works, 2023. № 4 (71). P. 110-123. DOI 10.47049/2226-1893-2023-4-110-123.