

Є.В. Білоусов, В.П. Савчук, Г.Я. Тулущенко

ВИКОРИСТАННЯ ЧИСЛОВИХ ПРОФІЛІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ФАЗ ЗАКРИТТЯ ВИПУСКНОГО КЛАПАНА ДВОТАКТНОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ

Існуюча на торгівельному флоті практика діагностування головних та допоміжних двигунів за параметрами робочого процесу, у світі сучасних тенденцій у галузі їх експлуатації, потребує суттєвого перегляду підходів. Зростання цін на нафтові палива, та посилення екологічних норм, призвели до суттєвого зменшення комерційних швидкостей суден, що, в свою чергу, призвело до зростання часу експлуатації головних двигунів на режимах часткових навантажень. На практиці суднові механіки стикаються з тим, що протягом усього рейсу немає можливості проіндиціювати двигун в умовах, які дозволяють отримати індикаторні діаграми придатні для проведення порівняльного аналізу з еталонними профілями отриманими виробником двигуна, під час його стендових випробувань. Ця проблема може бути вирішена шляхом побудови числових профілів робочого процесу по результатам стендових випробувань двигуна. Наявність такого профілю дозволяє отримати еталонну індикаторну діаграму для будь якого робочого режиму. Однак для об'єктивного порівняльного аналізу отриманих під час експлуатації та еталонних індикаторних діаграм, навіть наявність останніх може виявитися недостатньою. Особливості організації процесів газообміну у двотактних малооборотових двигунах, накладають певні обмеження на застосування традиційних методів обробки індикаторних діаграм, вимагаючи врахування додаткових параметрів, в тому числі і динамічних фаз газорозподілу. Особливості конструкції газорозподільних органів цих двигунів, призводять до того, що їх технічний стан може суттєво впливати на момент початку процесу стискування, а отже, і на параметри всього робочого процесу. Основним газорозподільним органом даного типу двигунів є випускний клапан, який має гідравлічний привід, що приводиться в дію або від розподільчого валу або через мультиплікатор тиску з електромагнітним керуванням від електронної системи управління двигуном. Незалежно від способу керування, конструкція гідравлічної передачі має певні особливості які приводять до відмінностей статичних фаз газорозподілу від реальних, динамічних. Саме дослідженню динамічних фаз закриття випускного клапану з використанням числових профілів робочого процесу присвячено дане дослідження авторів.

Ключові слова: газорозподіл, малооборотовий двигун, гідравлічна передача, динамічні фази газорозподілу, випускний клапан.

Вступ

Динамічні фази газорозподілу сучасних суднових двотактних малооборотових дизелів, зокрема кути відкриття и, особливо, закриття випускного клапана, відіграють ключову роль у подальшому протіканні їх робочого процесу. Конструкція гідравлічного приводу клапанів має особливості, які приводять до зміни фактичного кута закриття випускного клапану відносно його значення визначеного статично. При цьому відмінність між кутами визначеними статично і фактичними кутами закриття і відкриття залежить як від режиму роботи двигуна, так і технічного стану елементів механізму приводу. Таким чином, при зміні робочих режимів відбуваються і зміни фаз газорозподілу, що необхідно враховувати при обробці індикаторних діаграм отриманих під час планових перевірок двигуна. При цьому треба враховувати не тільки фактичний кут закриття клапану, що сучасні системи діагностування дозволяють зробити [1-5], але і порівняти цей кут з відповідним значенням для справного двигуна на відповідному навантажувально-швидкісному режимі.

Сам факт відхилення фактичного значення кута отриманого під час діагностування від еталонного може свідчити про несправності у системі приводу клапану, що робить не ефективним подальший аналіз індикаторних діаграм до усунення проблем у

механізмі приводу.

Актуальність дослідження

Враховуючи, що сьогодні більшість суднових головних двигунів експлуатується на режимах часткових навантажень [6], суднові механіки вимушені проводити планові ініціювання на режимах відмінних від Maximum Continuous Rating (MCR). Для таких режимів інформація щодо динамічних кутів закриття, як правило, відсутня [7]. Тому дослідження можливостей визначення динамічних кутів фаз газорозподілу у всьому діапазоні робочих режимів є актуальною задачею, вирішення якої дозволить підвищити точність діагностування суднових двотактних дизелів під час їх експлуатації [8].

Шляхи розв'язання проблеми

Наявність у приводі випускного клапану гідравлічної передачі (рис. 1 а) з демпферним пристроєм (рис. 1 б) призводить до виникнення складних гідродинамічних процесів під час як прямого, так і зворотного руху клапану и, особливо, під час його посадки на сідло. На це накладаються динамічні фактори, пов'язані з рухом досить значних мас, поєднаних з випускним клапаном. Так, наприклад випускний клапан дизеля K90MC-C важить близько 300 кг, і це без врахування супутніх мас пов'язаних з ним [9-12]. Це створює досить складні взаємодії, які при-

зводять до зміщення фактичного кута закриття клапана щодо статичного зі зміною режиму роботи двигуна. Розглянемо механізм зміни динамічного кута відкриття клапану.

На завершальній стадії руху клапану під час закриття, торець демпферного пристрою, який інтегровано у гідравлічний поршень приводу клапану (рис. 1) входить у канал подачі гідравлічного масла перекриваючи вільний вихід масла з циліндру приводу (рис. 2 с) [10, 13].

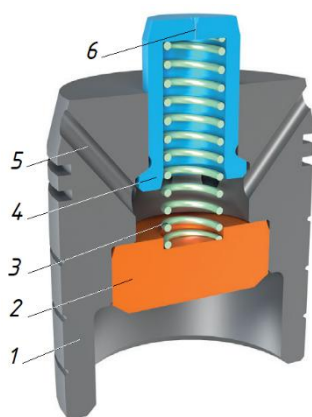


Рис. 1. Гідравлічний поршень механізму приводу випускного клапану дизелів серії MC та MC-C фірми MAN: 1 – гідравлічний поршень приводу клапану; 2 – регулювальна проставка; 3 – пружина; 4 – демпферний поршень; 5 – канал сполучення підпоршневої та надпоршневої порожнини; 6 – дросельний отвір [10]

Таким чином частина масла оказується замкненим у надпоршневому просторі, який з'єднується з гідравлічною магістраллю через відвідний канал і дросельний отвір в торці демпферного поршню. Це сповільнює виток масла з надпоршневої порожнини, що приводить до сповільнення руху клапану при посадці на сідло.

Швидкість руху гідравлічного поршню приводу на цьому етапі залежить від сили F_{sp} прикладеної вздовж осі шпинделя клапану. В свою чергу величина цієї сили має три складові:

$$F_{sp} = F_{gs} + F_j + F_p,$$

де F_{gs} – сила яку створює газова пружина; F_j – сила інерції рухомих мас пов'язаних з випускним клапаном; F_p – сила тиску газів на поверхню тарілки клапану зі сторони робочого циліндру.

Якщо перша складова сумарної сили F_{gs} не залежить від режиму роботи двигуна то дві останні складові пов'язані з частотою обертання (F_j) та величиною тиску у робочому циліндрі на момент початку стиску (F_p), тобто навантаженням двигуна. При зменшенні навантаження і, відповідно, частоти обертання дизеля сили інерції та тиску газів зменшуються, сумарна сила F_{sp} скорочується, що призводить до зменшення тиску в надпоршневій порожнині гідравлічної камери і більш повільному проходженню масла через дросельний отвір. В результаті час необхідний на повне закриття клапану збільшується, а кут його остаточного закриття зсувається далі від НМТ.

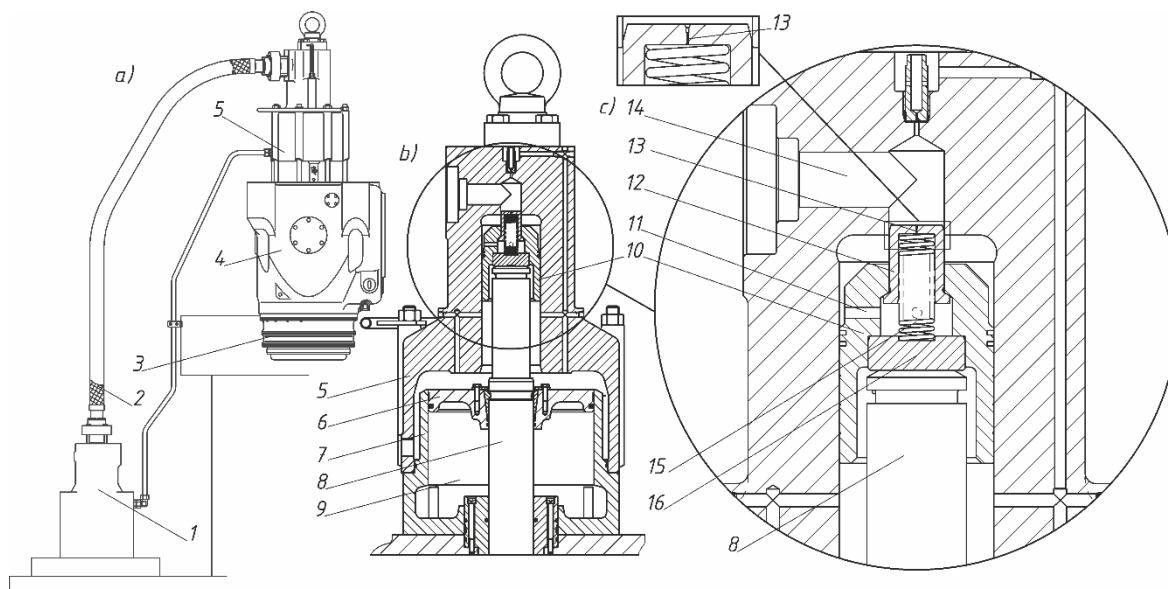


Рис. 2. Гідравлічний привод випускного клапана дизеля K90MC-C (а) та демпферний пристрій для безударної посадки клапану на сідло (б, с): 1 – насос-актюатор; 2 – гідравлічна лінія; 3 – сідло клапану; 4 – корпус клапанного вузла; 5 – корпус механізму приводу; 6 – повітряний поршень; 7 – повітряний циліндр; 8 – шпиндель клапану; 9 – порожнина газової пружини; 10 – гідравлічний поршень приводу клапану; 11 – канал сполучення підпоршневої та надпоршневої порожнини; 12 – демпферний поршень; 13 – дросельний отвір; 14 – канал підведення масла; 15 – пружина; 16 – регулювальна проставка [11, 12]

Таким чином динамічні фази закриття клапану суттєво відрізняються від статичних кутів визначених за умов необмеженого часу на закриття та відкриття. Це впливає на значення дійсної ступені стиску, яка поступово скорочується зі зменшенням навантаження двигуна, і на всі інші показники робочого процесу.

Наприклад, якщо при діагностуванні дизеля по параметрам робочого процесу не враховувати динамічні фази закриття клапану можна несправності в системі гідравлічного приводу клапану прийняти за більш суттєві проблеми.

Так, наприклад засмічення дросельного отвору демпферного поршня призведе до подовження періоду закриття клапану, що спричинить зменшення тиску наприкінці процесу стиску (параметр p_c). Без контролю і врахування дійсного моменту закриття клапану це може бути інтерпретоване як погіршення герметичності газового стику поршня або прогорання випускного клапану чи його сидла.

Можливість визначати під час діагностування дійсний кут закриття і порівняти його з еталонним значенням кута притаманним повністю справному двигуну дозволить уникнути цієї помилки.

Визначення динамічних кутів закриття випускного клапану

Зручним інструментом для аналізу робочих процесів суднових двигунів, є використання числових профілів (рис. 3), методики побудови яких по результатам стендових випробувань двигуна [9] і їх використання наведені у роботах [14-17].

Наявність такого профілю, який пов'язує тиск у робочому циліндрі з кутом обертання колінчатого валу і навантажувально-швидкісним режимом роботи двигуна, дозволяє шляхом відповідних розрахункових операцій отримувати числовий профіль змиви будь якого параметру робочого процесу як функцію навантаження (частоти обертання, при роботі по гвинтовій характеристиці) двигуна [14].

Враховуючи, що закриття випускного клапану під час ходу поршня двотактного двигуна від НМТ до ВМТ є початком процесу стиску, то відповідно, початок зростання тиску умовно можна вважати за момент закриття клапану.

Найбільш інформативно на початок зростання тиску у робочому циліндрі вказує динамічна характеристика робочого процесу, яка пов'язує швидкість зростання тиску по куту повороту колінчатого валу, тобто $dp/d\varphi$.

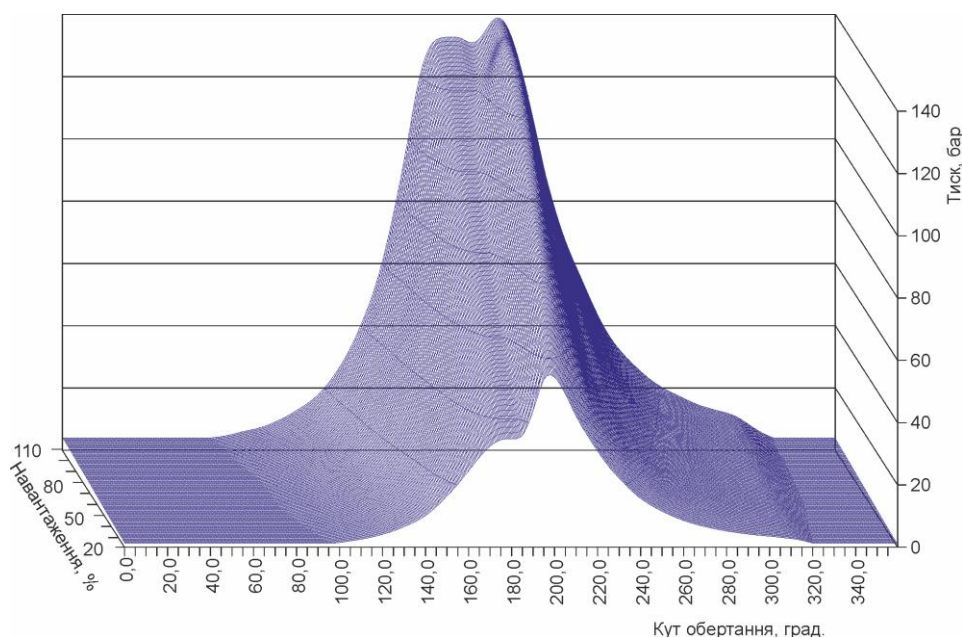


Рис. 3. Графічне відображення цифрового профілю робочого процесу дизеля K90MC-C в діапазоні навантажень 20...110% від MCR

На рис. 4 наведено отриманий авторами цифровий профіль який пов'язує динамічні характеристики з навантажувально-швидкісними режимами роботи головного малообертового дизеля K90MC-C в діапазоні експлуатаційних навантажень від 20 до 110 % від MCR.

Основні характеристики дизеля, дослідженого

в якості прикладу щодо застосування числових профілів для визначення динамічних фаз газорозподілу, надано у табл. 1.

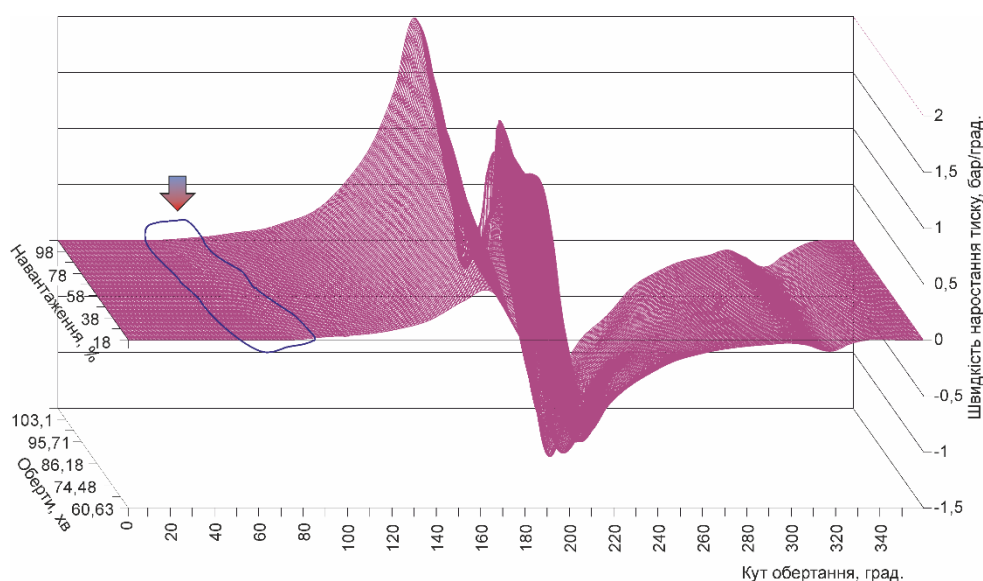
Наведені характеристики безпосередньо впливають на газорозподіл двигуна, визначаючи час-перетин продувочних вікон та сил діючих у механізмі приводу клапана.

Таблиця 1. Параметри двигуна K90MC-C

Параметр	Значення
Діаметр циліндра, м	0,90
Хід поршня, м	2,30
Частота обертання хв^{-1}	104
Циліндрова потужність, MCR, кВт	4570
Питома витрата палива, MCR, г/(кВт·год.)	171
Висота продувочних вікон, см	21
Постійна КПД (λ)	0,364
Середній індикаторний тиск, MCR, МПа	1,8
Об'єм камери згоряння, м^3	0,0535
Тиск у момент відкриття клапану, MCR, МПа	1,181

На рисунку виділено ділянку початку зростання $dp/d\phi$ для всього поля робочих режимів (навантаження 20...110% від MCR), що відповідає частотам

обертання колінчатого валу у діапазоні 62,1...106,5 хв^{-1} . Видно, що вздовж поверхні профілю зі зменшенням навантаження кут початку стиску збільшується відносно НМТ. Це пояснюється збільшенням часу на остаточне закриття клапану у завершальній фазі, за рахунок демпфірування потоку масла гідравлічним демпфером за механізмом розглянутим вище. В залежності від домінування відповідних складових сили, що передаються вздовж штоку клапану, залежить швидкість зміни динамічного кута закриття клапану. Зі зменшенням навантаження і частоти обертання двигуна сили тиску газів та інерції зменшуються. Це призводить до зменшення тиску у надпоршневій порожнині гідравлічного поршня і більш повільному закриттю клапана.

Рис. 4. Числовий профіль зміни $dp/d\phi$ як функція навантаження для малообертового дизеля K90MC-C

Аналіз числового профілю $dp/d\phi$ дозволяє отримати залежність зміни кута закриття випускного клапану від режиму роботи головного двигуна (рис. 4). Відповідним чином ця зміна впливає на дійсну ступінь стиску (рис. 4), особливо, враховуючи той факт, що збільшення кута затримки закриття клапану відбувається на ділянці 46...77,5° о.к.в (рис. 5). К цьому моменту поршень вже має досить високу швидкість руху, тому втрата робочого ходу випереджає збільшення кута затримки закриття, і зі зменшенням на кожний градус ця тенденція посилюється. При куті закриття клапану 46° після НМТ, що відповідає MCR (104 хв^{-1} , рис. 5), поршень вже має швидкість руху 7,27 м/с що становить більше половини від максимальної (max 13,21 м/с). При цьому на газообмін втрачається 12,3% робочого ходу (рис. 5). При зменшенні навантаження до 20% MCR і, відповідно частоти обертання до 62 хв^{-1} , закриття клапану відбувається вже при 77,5°. На цей момент поршень досягає швидкості 6,73 м/с, що становить 85%

від максимальної (7,92 м/с) і долає 30,6% робочого ходу (рис. 5).

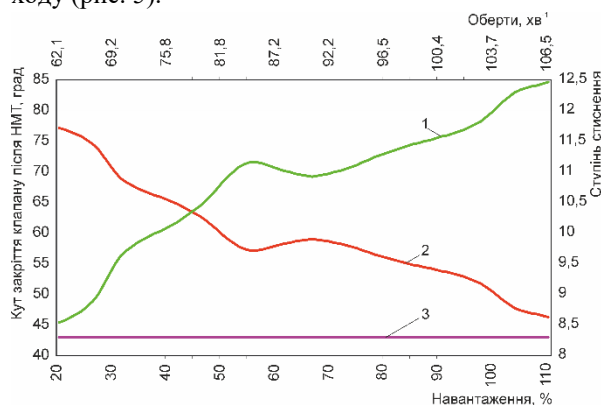


Рис. 5. Залежність кута закриття випускного клапану від режиму роботи дизеля та його вплив на дійсну ступінь стискування:

1 – зміна ступені стискування; 2 – зміна кута закриття випускного клапану; 3 – кут закриття продувочних вікон

Завдяки збільшенню затримки закриття клапану, дійсна ступінь стиску при зменшенні навантаження

по гвинтовій характеристиці з 110 до 20% від MCR зменшується з 12,5 до 8,5 (рис. 3).

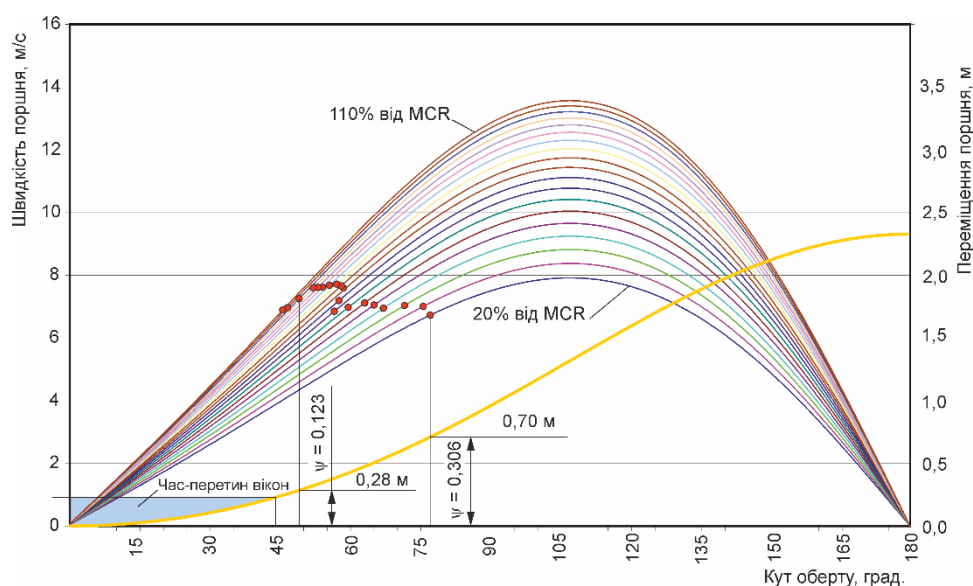


Рис. 5. Швидкості поршня у діапазоні навантажень від 20 до 110% від MCR (крок 5%) та кути закриття випускного клапану, що відповідають даному навантажувально-швидкісному режиму. Втрати робочого ходу на газообмін внаслідок зміни динамічних кутів закриття випускного клапану

З рис. 4 та 5, видно, що кут закриття випускного клапану, досить прогнозовано (майже лінійна залежність) змінюється у діапазоні основних експлуатаційних режимів 65...100% від MCR. Однак за межами цього діапазону, під впливом розглянутих раніше факторів його зміна носить більш складний характер. Незалежно від характеру змін, кут поступово збільшується зі зменшенням навантаження. Це суттєво впливає на кут початку процесу стиснення і весь подальший перебіг робочого процесу. Тому при знятті індикаторних діаграм, на режимах за межами номінального діапазону, для адекватного аналізу робочого процесу, вкрай важливо враховувати як фактичні кути закриття клапану, так і відхилення цього параметру від базового, характерного для повністю справного двигуна.

Окрім вирішення задач діагностування двигунів за параметрами робочого процесу, врахування фактичних кутів закриття випускного клапану вкрай важливо при розробці алгоритмів керування подачею газового палива у малооборотних газодизельних двигунах. Особливо важливо розуміння закономірностей зміни динамічних фаз газорозподілу при аналізі робочих процесів газодизельних двигунів низького тиску [18-20]. В цих двигунах кутовий проміжок від моменту закриття випускного клапану і до досягнення газоподавальних модулів, встановлених на втулці циліндра, визначає час на формування газоповітряної суміші відповідного складу. Запізнення закриття клапану може привести до потрапляння газового палива в випускний ресивер (так

званий «проскок» метану), що може мати серйозні наслідки.

Висновки

Використання числових профілів і побудованих на їх основі профілів інших параметрів, що характеризують робочий процес двигуна, дозволяє проводити більш об'єктивне оцінювання результатів ініціювання, особливо якщо останнє проводиться на режимах середніх і малих навантажень.

Кут закриття у дослідженого у роботі двигуна в залежності від режиму роботи змінюється в межах 46...77,5° о.к.в. При цьому, за межами діапазону основних експлуатаційних режимів (65...100% від MCR) ці зміни носять складний характер, що ускладнює їх врахування при аналізі індикаторних діаграм отриманих на режимах поза межами цього діапазону.

Відмінність фактичних динамічних кутів закриття випускного клапану від номінальних, може вказувати на несправності у механізмі приводу випускного клапану. При відсутності порівняльних параметрів такі несправності можуть бути неправильно інтерпретовані, що ускладнить пошук причин відхилення інших параметрів робочого процесу при діагностуванні двигуна.

Врахування динамічних фаз газорозподілу вкрай важливе при розробці алгоритмів керування паливоподачею у газодизельних малооборотних двигунах низького тиску, так як їх відхилення може

суттєво впливати на економічні та екологічні показники цих двигунів.

Список літератури:

1. Minchev D. Digital Twin Test-Bench Performance for Marine Diesel Engine Applications. / D. Minchev, R. Varbanets, O. Shumylo, V. Zalozh, N. Aleksandrovska, P. Bratchenko, T.H. Truong // Polish Maritime Research. – 2023. – Vol. 30 No.4, pp. 81-91. <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0061>
2. Varbanets R. Methods of Real-Time Parametric Diagnostics for Marine Diesel Engines. / R. Varbanets, D. Minchev, Y. Kucherenko, V. Zalozh, O. Kyrylash, T. Tarasenko // Polish Maritime Research. – 2024. – Vol. 31; No. 3 (123), pp. 71-84. <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037>
3. WINMOT – Software Manual. Software for Electronic Indicator HLV 2005 MK. Präzisions-Messtechnik Baewert GmbH., Meerane, Germany. – 2007. – 28 p.
4. Neumann S. Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems / S. Neumann, R. Varbanets, D. Minchev, V. Malchevsky, V. Zalozh // Ships Offshore Struct. – 2022. – pp. 1-12, DOI: 10.1080/17445302.2022.2128558
5. Neumann S. High temperature pressure sensor based on thin film strain gauges on stainless steel for continuous cylinder pressure control. CIMAC Congress, Hamburg. Digest – 2001. – pp. 1-12.
6. Sartini N. More haste less speed. Container ship focus. Lloyd's Register, September 2008. Issue 5. – p. 3.
7. Правила технічної експлуатації морських і річкових суден. Дизелі. Нормативний документ морського транспорту України. Дата введення: 01.02.1997. – 63 с.
8. Білоусов Є.В. Визначення динамічних фаз закриття випускного клапана двотактного малообертового дизеля з використанням числових профілів робочого процесу / Є.В. Білоусов, В.П. Савчук, С.О. Кравченко, Г.В. Малишев. // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної морської конференції «Marine Power Plants and Operation» (MPP&O-2025) 4 березня 2025 р., Одеса: ОНМУ, 2025. – С. 240-245.
9. Shop test report of marine low speed diesel engine type: Doosan MAN B&W 8K90MC-C, Project name DANA 1671, test date 21.03.2008 – 68 p.
10. MAN Energy Solution. Future in the making. MAN Energy Solutions. Copenhagen, Denmark. 2023 – 38 p.
11. Engine Type: 8K90MC-C. Instruction Manual. Description. HSD ENGINE Co., Ltd. Changwon-City, Kyungnam, Korea. 2008 – 613 p.
12. Instructions for Main Engine Type K90MC-C. Hyundai Heavy Industries Co., Ltd. Engine & Machinery Division. Ulsan, Korea. – 161 p.
13. Bilousov I.V. Internal combustion engines of modern marine vessels. Textbook for higher maritime educational institutions / I.V. Bilousov, M.P. Bulgakov. – Odesa: Astroprint publishing house, 2024. – 512 p. ISBN 978-617-7797-54-7
14. Belousov E. Digital Profiles of Work Processes of a Marine Engine for Calculated Indicator Diagrams in Operating Modes Other than Maximum Continuous Rating / E. Belousov, A. Marchenko, M. Rybalchenko, G. Tuluchenko, I. Gritsuk, V. Savchuk, M. Volodarets // SAE Technical Paper 2023-01-5008. – 2023. – 13 p. DOI: 10.4271/2023-01-5008.
15. Білоусов Є.В. Розробка методів оцінки технічного стану двигунів за результатами індикування робочого процесу на режимах відмінних від номінальних / Є.В. Білоусов, А.П. Марченко, М.Є. Рибальченко, В.П. Савчук, Г.Я. Тулущенко // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2022. – №1. – С 51-59. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.1.07
16. Рибальченко М.Є. Використання числових профілів робочого процесу для аналізу ефективності роботи суднового малообертового двигуна на режимах часткових навантажень. / М.Є. Рибальченко, Є.В. Білоусов // Розвиток транспорту. – 2022.

- № 3(14). – С. 97-100.
17. Рибальченко М.Є. Використання числових профілів робочого процесу для аналізу ефективності роботи суднового малообертового двигуна в умовах сучасної тенденції щодо зниження експлуатаційної швидкості суден. / М.Є. Рибальченко, Є.В. Білоусов // Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – 2022. – № 2(36) – С. 71-83. DOI: 10.33298/2226-8553.2022.2.36.06
18. Белоусов, Е.В. Организация внутреннего смешанного образования в судовых малооборотных газодизельных двигателях / Е.В. Белоусов, В.П. Савчук, И.В. Грицук, Т.П. Белоусова // Двигатели внутреннего сгорания – 2017. – №1. – С 13-16. DOI: 10.20998/0419-8719.2017.1.03
19. Белоусов Е.В. Исследование процессов топливоподачи в газодизельных малооборотных двухтактных двигателях низкого давления / Е.В. Белоусов, Р.А. Варбанец, В.П. Савчук, И.В. Грицук, В.С. Вербовский // Двигуни внутрішнього згоряння – 2019. – №1. С 27-33. – DOI:10.20998/0419-8719.2019.1.05
20. Марченко А.П. Влияние геометрии проточной части газоподводящего модуля на процесс подачи газового топлива в малооборотном газодизельном двигателе. / А.П. Марченко, Е.В. Белоусов, В.П. Савчук, В.С. Вербовский, Н.Е. Рыбальченко // Двигуни внутрішнього згоряння – 2021. – №1. – С 59-65. DOI:10.20998/0419-8719.2021.1.08.

Bibliography (transliterated):

1. Minchev, D., Varbanets, R., Shumylo, O., Zalozh, V., Aleksandrovska, N., Bratchenko, P., Truong T.H. (2023), "Digital Twin Test-Bench Performance for Marine Diesel Engine Applications", Polish Maritime Research, Vol. 30 No.4, pp. 81-91. <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0061>
2. Varbanets, R., Minchev, D., Kucherenko, Y., Zalozh, V., Kyrylash, O., Tarasenko, T. (2024), "Methods of Real-Time Parametric Diagnostics for Marine Diesel Engines", Polish Maritime Research, Vol. 31; No. 3 (123), pp. 71-84. <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037>
3. WINMOT – Software Manual. Software for Electronic Indicator HLV 2005 MK. Präzisions-Messtechnik Baewert GmbH., Meerane, Germany. – 2007. – 28 p.
4. Neumann, S., Varbanets, R., Minchev, D., Malchevsky, V., Zalozh, V. (2022) "Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems" Ships Offshore Struct. – pp. 1-12, DOI: 10.1080/17445302.2022.2128558
5. Neumann S. (2001), "High temperature pressure sensor based on thin film strain gauges on stainless steel for continuous cylinder pressure control" CIMAC Congress, Hamburg. Digest – pp. 1-12.
6. Sartini, N. (2008), "More haste less speed. Container ship focus" Lloyd's Register, September. Issue 5. – p. 3.
7. "Pravyla tekhnichnoyi ekspluatatsiyi mors'kykh i richkovykh suden. Dyzelі. Normatyvnyy dokument mors'koho transportu Ukrainy" ["Rules for the technical operation of sea and river vessels. Diesels. Normative document of maritime transport of Ukraine"]. Data vvedennya: 01.02.1997. – 63 p.
8. Bilousov, I.V. Savchuk, V.P., Kravchenko, S.O., Malyshev, H.V. (2025) "Determination of dynamic phases of exhaust valve closing of a two-stroke low-speed diesel engine using numerical profiles of the working process" ["Vyznachennya dynamichnykh faz zakryttya vypusknogo klapanu dvotaktnoho maloobertovoho dyzelya z vykorystanniam chyslovykh profiliv robochoho protsesu"] Materials of the VI International Scientific and Practical Marine Conference "Marine Power Plants and Operation" (MPP&O-2025) March 4, 2025, Odesa: ONMU, 2025. – pp. 240-245.
9. Shop test report of marine low speed diesel engine type: Doosan MAN B&W 8K90MC-C, Project name DANA 1671, test date 21.03.2008 – 68 p.
10. MAN Energy Solution. Future in the making. MAN Energy Solutions. Copenhagen, Denmark. 2023 – 38 p.
11. Engine Type: 8K90MC-C. Instruction Manual. Description. HSD ENGINE Co., Ltd. Changwon-City, Kyungnam, Korea. 2008 – 613 p.
12. Instructions for Main Engine Type K90MC-C. Hyundai Heavy Industries Co., Ltd. Engine & Machinery Division. Ulsan, Korea. – 161 p.
13. Bilousov, I.V., Bulgakov, M.P. (2024), "Internal combustion engines of modern marine vessels. Textbook for higher maritime educational institutions" – Odesa: Astroprint publishing house. – 512 p.

ISBN 978-617-7797-54-7 14. Belousov, E. Marchenko, A., Rybalchenko, M., Tuluchenko, G., Gritsuk, I., Savchuk, V., Volodarets, M. (2023), "Digital Profiles of Work Processes of a Marine Engine for Calculated Indicator Diagrams in Operating Modes Other than Maximum Continuous Rating" SAE Technical Paper 2023-01-5008. – 13 p. DOI: 10.4271/2023-01-5008. 15. Bilousov, I.V., Marchenko, A.P., Rybalchenko, M. Ye., Savchuk, V.P., Tuluchenko, H.Ya. (2022), "Development of methods for assessing the technical condition of engines based on the results of indicating the working process at modes other than nominal ones" ["Rozrobka metodiv otsinky tekhnichnogo stanu dvyhuniv za rezul'tatamy indytsiyuvannya robochoho protsesu na rezhymakh vidminnykh vid nominal'nykh"], Internal combustion engines, No. 1, pp. 51-59. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.1.07 16. Rybalchenko, M.Ye., Bilousov, I.V. (2022), "Using numerical workflow profiles to analyze the efficiency of a marine low-speed engine at partial load conditions ["Vykorystannya chyslovykh profiliv robochoho protsesu dlya analizu efektyvnosti roboty sudnovoho maloobertovoho dvyhuna na rezhymakh chastkovykh navantazhen"], Transport development, No. 3(14), pp. 97-100. 17. Rybalchenko, M.Ye., Bilousov, I.V. (2022), "Victimization of numerical profiles of the work process to analyze the efficiency of the work of a small-speed ship engine in view of the current trend towards a decrease in the operational efficiency of ships" ["Vykorystannya chyslovykh profiliv robochoho protsesu dlya analizu efektyvnosti roboty sudnovoho maloobertovoho dvyhuna v umovakh suchasnoyi tendentsiyi shchodo znyzhennya ekspluatatsiynoyi shvydkosti suden"], Water transport. Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technology, No. 2(36), pp. 71-83. DOI: 10.33298/2226-8553.2022.2.36.06 18. Belousov, E.V. Savchuk, V.P., Gritsuk, I.V., Belousova, T.P. (2017), "Organization of internal mixture formation in marine low-speed gas-diesel engines" ["Organizatsiya vnutrennego smeseobrazovaniya v sudovykh malooborotnykh gazodizel'nykh dvigatelyakh"], Internal combustion engines, No. 1, pp. 13-16. DOI: 10.20998/0419-8719.2017.1.03 19. Belousov, E.V., Varbanets, R.A., Savchuk, V.P., Gritsuk, I.V., Verbovskii, V.S. (2019), "Research of fuel supply processes in low-speed two-stroke low-pressure gas-diesel engines" ["Issledovanie protsessov toplivopodachi v gazodizel'nykh malooborotnykh dvukhtaknykh dvigatelyakh nizkogo davleniya"], Internal combustion engines, No. 1, pp. 27-33. – DOI:10.20998/0419-8719.2019.1.05 20. Marchenko, A.P., Belousov, E.V., Savchuk, V.P., Verbovskii, V.S., Rybalchenko, N.E. (2021), "Influence of the geometry of the flow part of the gas supply module on the process of gas fuel supply in a low-speed gas-diesel engine" ["Vliyanie geometrii protchnoi chasti gazopodayushchego modulya na protsess podachi gazovogo topliva v malooborotnom gazodizel'nom dvigatele"], Internal combustion engines, No. 1, pp. 59-65. DOI:10.20998/0419-8719.2021.1.08.

bochoho protsesu dlya analizu efektyvnosti roboty sudnovoho maloobertovoho dvyhuna v umovakh suchasnoyi tendentsiyi shchodo znyzhennya ekspluatatsiynoyi shvydkosti suden"], Water transport. Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technology, No. 2(36), pp. 71-83. DOI: 10.33298/2226-8553.2022.2.36.06 18. Belousov, E.V. Savchuk, V.P., Gritsuk, I.V., Belousova, T.P. (2017), "Organization of internal mixture formation in marine low-speed gas-diesel engines" ["Organizatsiya vnutrennego smeseobrazovaniya v sudovykh malooborotnykh gazodizel'nykh dvigatelyakh"], Internal combustion engines, No. 1, pp. 13-16. DOI: 10.20998/0419-8719.2017.1.03 19. Belousov, E.V., Varbanets, R.A., Savchuk, V.P., Gritsuk, I.V., Verbovskii, V.S. (2019), "Research of fuel supply processes in low-speed two-stroke low-pressure gas-diesel engines" ["Issledovanie protsessov toplivopodachi v gazodizel'nykh malooborotnykh dvukhtaknykh dvigatelyakh nizkogo davleniya"], Internal combustion engines, No. 1, pp. 27-33. – DOI:10.20998/0419-8719.2019.1.05 20. Marchenko, A.P., Belousov, E.V., Savchuk, V.P., Verbovskii, V.S., Rybalchenko, N.E. (2021), "Influence of the geometry of the flow part of the gas supply module on the process of gas fuel supply in a low-speed gas-diesel engine" ["Vliyanie geometrii protchnoi chasti gazopodayushchego modulya na protsess podachi gazovogo topliva v malooborotnom gazodizel'nom dvigatele"], Internal combustion engines, No. 1, pp. 59-65. DOI:10.20998/0419-8719.2021.1.08.

Надійшла до редакції 08.06.2025 р.

Білоусов Євген Вікторович – доктор техн. наук, проф., професор кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації Одеського національного морського університету, Одеса, Україна, e-mail: ewbelousov67@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8185-8209>.

Савчук Володимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Херсонської державної морської академії, Одеса, Україна, postsavchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5266-850X>.

Тулученко Галина Яківна – доктор техн. наук, проф., професор кафедри вищої математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-6196-540X>.

USE OF NUMERICAL PROFILES OF THE WORKING PROCESS TO DETERMINE DYNAMIC PHASES OF EXHAUST VALVE CLOSURE OF A TWO-STROKE LOW-SPEED DIESEL ENGINE

I.V. Bilousov, V.P. Savchuk, H.Y. Tuluchenko

The existing practice of diagnosing main and auxiliary engines by parameters of the working process in the merchant fleet, in the world of modern trends in the field of their operation, requires a significant revision of approaches. The increase in prices for oil fuels and the tightening of environmental standards have led to a significant decrease in commercial speeds of ships, which, in turn, has led to an increase in the operating time of main engines in partial load modes. In practice, ship mechanics are faced with the fact that during the entire voyage there is no possibility to simulate the engine in conditions that allow obtaining indicator diagrams suitable for comparative analysis with reference profiles obtained by the engine manufacturer during its bench tests. This problem can be solved by constructing numerical profiles of the working process based on the results of bench tests of the engine. The presence of such a profile allows you to obtain a reference indicator diagram for any operating mode, however, for an objective comparative analysis of the obtained during operation and reference indicator diagrams, even the presence of the latter may be insufficient. The peculiarities of the organization of gas exchange processes in two-stroke low-speed engines impose certain restrictions on the use of traditional methods of processing indicator diagrams, requiring the consideration of additional parameters, including dynamic valve timing. The design features of the gas distribution elements of these engines lead to the fact that their technical condition can significantly affect the moment of the start of the compression process, and therefore the parameters of the entire working process. The main gas distribution element of this type of engine is the exhaust valve, which has a hydraulic drive, which is driven either by the camshaft or through a pressure multiplier with electromagnetic control from the electronic engine control system. Regardless of the control method, the design of the hydraulic transmission has certain features that lead to differences in static valve timing from real, dynamic ones. This study by the authors is devoted to the study of dynamic phases of exhaust valve closing using numerical profiles of the working process.

Keywords: gas distribution; low-speed engine; hydraulic transmission; dynamic phases of gas distribution; exhaust valve.