

УДК 629.5

ARTICLE HISTORY

Received 02.03.2023

Accepted 12.03.2023

Сагін Арсеній Сергійович  
НУ «Одеська морська академія», Одеса, Україна  
arseniysagin@gmail.com

## **Корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки**

Sagin Arseniy  
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine  
arseniysagin@gmail.com

### **Correction of high-pressure fuel equipment setting when converting marine diesels to low-sulfur fuel**

*Резюме – Надані результати щодо корегування налаштування паливних насосів високого тиску суднового дизеля 6S60MC-8.2-ТII під час його експлуатації в спеціальних екологічних районах Sulfur Emission Control Areas на паливі з низьким вмістом сірки. Експериментально підтверджено, що шляхом зменшення кута випередження подачі палива досягається зниження динамічних навантажень на деталі кривошипно-шатунного механізму та зменшення пікових температур в циліндрі дизеля. Це виявляється в зменшенні ступеню підвищення тиску під час згоряння та зниженні емісії оксидів азоту.*

*Abstract – The results are presented on adjusting the setting of the high pressure fuel pumps of the 6S60MC-8.2-TII marine diesel engine during its operation in special environmental areas of Sulfur Emission Control Areas on low-sulfur fuel. It has been experimentally confirmed that by reducing the advance angle of fuel supply, a reduction in dynamic loads on the parts of the crank-connecting mechanism and a reduction in peak temperatures in the diesel cylinder is achieved. This is manifested in a decrease in the degree of pressure increase during combustion and a decrease in the emission of nitrogen oxides.*

DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-67-78

Експлуатація суднових двигунів внутрішнього згоряння має виконуватися не лише з підтриманням необхідної потужності та виконанням вимог інструкцій з експлуатації, але також із забезпеченням екологічних показників їх роботи. До основних екологічних показників роботи суднових дизелів належать концентрація оксидів сірки  $SO_x$  та оксидів азоту  $NO_x$  в випускних газах [1, 2]. Значення обох показників регламентується вимогами Додатка VI MARPOL, при цьому обмеження щодо емісії  $NO_x$  (яке відповідає рівням Tier I, II або III) залежить від року побудови дизеля та його номінальної частоти обертання, обмеження викидів  $SO_x$  визначається вмістом сірки в паливі [3, 4]. З 01.02.2020 на судах морського та внутрішнього водного транспорту заборонено використання морських сортів палива, вміст сірки в яких перевищує 0,5 % за масою [5, 6]. Також визначені спеціальні екологічні райони з обмеження викидів оксидів сірки (Sulfur Emission Control Areas – SECAs), в яких дозволяється використовувати паливо з вмістом сірки не більш ніж 0,1 %. Під час роботи в цих районах або за умовою їх перетинання суднові дизелі (які використовували паливо зі вмістом сірки більш ніж 0,1 %) переводяться на експлуатацію на паливі зі вмістом сірки, що не перевищує 0,1 %. Цей перевід виконується поступово з урахуванням обсягу сірчистого палива в витратній цистерні, вмісту сірки в паливі та експлуатаційної потужності дизеля. Час експлуатації дизеля на паливі з низьким вмістом сірки залежить від швидкісних характеристик судна, гідрометеорологічних умов переходу, часу перебування в зоні SECAs та коливається від кількох годин (при знаходженні судна в екологічних районах Північної Європи) до кількох днів (під час руху в каравані суден внутрішніми водними шляхами Китаю).

Одна з проблем, що виникає під час переводу дизелів на паливо з низьким вмістом сірки, полягає в наступному. Зниження вмісту сірки в паливі сприяє зниженню його густини, в'язкості, температури самозаймання та збільшує теплотворну здатність палива (через пропорційне збільшення вмісту в паливі водню та вуглецю) [7, 8]. За однакових умов процесу впорскування палив, що мають меншу температуру самозаймання та більшу теплотворну здатність, характеризуються більш високою температурою наприкінці згоряння  $T_z$ . Це обумовлюється зменшенням кута затримки самозаймання, збільшенням кута випередження початку згоряння та більшою ефективністю процесу згоряння в районі верхньої мертвої точки (ВМТ) [9, 10]. Основні теплофізичні характеристики суднових палив наведені в табл. 1.

Таблиця 1

## Основні теплофізичні характеристики суднових палив

Характеристика	RMG500	RMG380	DMA15
Вміст сірки, %	0,50	0,48	0,082
Вміст вуглецю, %	82,1	82,2	83,1
Вміст водню, %	10,3	10,5	10,5
Густина за 15 °С, кг/м <sup>3</sup>	993	982	931
В'язкість за 50 °С, мм <sup>2</sup> /с	500	380	11,7
Температура спалаху, °С	81	78	73
Температура самозаймання, °С	203	197	112
Теплотворна здатність, кДж/кг	41660	41920	42230

За умовою більш раннього самозаймання палива підвищується кількість палива, що згоряє до ВМТ. Це призводить до збільшення швидкості зростання тиску за кутом повороту колінчатого валу («жорсткості» роботи дизеля) та збільшенню ступеню підвищення тиску під час згоряння  $\lambda = p_z / p_c$ , де  $p_z$ ,  $p_c$  – максимальний тиск згоряння та тиск наприкінці стиснення, МПа [11, 12]. Останнє найбільш негативне для двохтактних дизелів, що характеризуються підвищеною масою деталей кривошипно-шатунного механізму, тому викликає збільшення ударних навантажень на крейцкопфний та мотильовий підшипники [13, 14].

Температура наприкінці згоряння  $T_z$  визначається через термодинамічне рівняння згоряння за виразом:

$$T_z = \frac{(m_T - 1)\xi_z Q_H + (c_{pc} + R_c(\lambda - 1))T_c}{m_T c_{pz}}, \quad (1)$$

де  $m_T$  – коефіцієнт збільшення маси заряду;  $\xi_z$  – коефіцієнт використання теплоти наприкінці згоряння;  $Q_H$  – нижча теплотворна здатність палива, кДж/кг;  $c_{pc}$ ,  $c_{pz}$  – середні питомі ізобарні теплоємності суміші повітря та залишкових газів, а також продуктів згоряння, кДж/(кг·К);  $R_c$  – газова постійна суміші повітря та залишкових газів;  $\lambda$  – ступінь підвищення тиску під час згоряння;  $T_c$  – температура наприкінці процесу стиснення, К.

Визначення  $T_z$  шляхом вимірювання неможливо через динамічність зміни температури в циліндрі дизеля, тому для оцінки її значень використовують розрахункові моделі [15, 16]. Результати моделювання за виразом (1) для співрозмірних за діаметром циліндра  $d$ , але різних за ходом поршню  $S$  дизелів MAN-Diesel&Turbo, надано в табл. 2.

Таблиця 2

## Результати моделювання

Марка та характеристики дизеля	Нижча теплотворна здатність палива, $Q_{н}$ , кДж/кг	Температура наприкінці згоряння, $T_z$ , К
K80MC $d=0,8$ м, $S=2,3$ м	41660	1866
	41920	1876
	42230	1887
L80MC $d=0,8$ м, $S=2,592$ м	41660	1822
	41920	1833
	42230	1845
S80MC $d=0,8$ м, $S=3,056$ м	41660	1811
	41920	1825
	42230	1840
G80ME $d=0,8$ м, $S=3,72$ м	41660	1742
	41920	1759
	42230	1776

Незначне на перший погляд підвищення температури  $T_z$  під час зміни одного сорту палива на інший характеризується (через інертність теплових процесів) накопичувальним ефектом, що сприяє зростанню теплової напруженості дизеля. До «прихованих» негативних наслідків підвищення температури  $T_z$  також відноситься збільшення концентрації оксидів азоту  $NO_x$  в випускних газах дизеля, що неминусе виникає відповідно до високотемпературного механізму утворення  $NO_x$  Я.В. Зельдовича та теорії утворення швидких  $NO_x$  К. Феніморю [17, 18].

Для визначення механізму, за допомогою якого можливо управління процесом згоряння палива під час переведення роботи дизеля 6S60MC-8.2-ТІІ MAN-Diesel & Turbo на паливо з низьким вмістом сірки проводився такий експеримент.

Після підготовки паливної системи до експлуатації в зоні SECA (а саме, повного витрачання палива RMG500 зі вмістом сірки 0,5 % та заповнення витратних цистерн паливом DMA15 зі вмістом сірки 0,082 %) було виконано переналаштування паливних насосів високого тиску (ПНВТ) шляхом зміни кутів випередження подачі палива. Для циліндрів № 1 та 6 значення попередніх кутів випередження (на яких виконувалась експлуатація дизеля на паливі RMG500) залишилось незмінним ( $-6^\circ$  повороту колінчатого валу – ПКВ). Для циліндрів № 2, 3, 4, 5 встановлювались нові кути

випередження -5,5, -4,5, -4,0, -5,0 °ПКВ відповідно). Під час дослідження для кожного з циліндрів контролювались максимальний тиск згоряння  $p_z$ , тиск наприкінці стиснення  $p_c$ , середній індикаторний тиск  $p_i$  та температура випускних газів  $t_{вг}$ . За результатами вимірювання  $p_i$  визначалося середнє значення індикаторного тиску всіх циліндрах дизеля  $p_i^{cp} = (p_i^1 + p_i^2 + \dots + p_i^6) / 6$ , де  $p_i^1, p_i^2, \dots, p_i^6$  – індикаторний тиск по відповідним циліндрам дизеля, МПа, та відносне відхилення індикаторного тиску за окремими циліндрами від його середнього значення всіх циліндрів  $\Delta p_i^n = |p_i^n - p_i^{cp}| \cdot 100\% / p_i^n$ , де  $p_i^n$  – індикаторний тиск в одному з циліндрів, МПа. Фіксація показників роботи дизеля здійснювалась для навантаження  $0,85N_{ном}$ , де  $N_{ном} = 14280$  кВт – максимальна тривала експлуатаційна потужність. Також в газовипускній магістралі вимірювалась концентрація оксидів азоту в випускних газах. Результати дослідження узагальнені в табл. 3.

Таблиця 3

## Результати дослідження

Номер циліндра	Кут випередження подачі палива, °ПКВ	Максимальний тиск згоряння, $p_z$ , МПа	Тиск наприкінці стиснення, $p_c$ , МПа	Ступінь підвищення тиску під час згоряння, $\lambda$	Середній індикаторний тиск, $p_i$ , МПа	Відносне відхилення індикаторного тиску, $\Delta p_i$ , МПа	Температура випускних газів, $t_{вг}$ , °С
1	-6,0	14,68	12,56	1,169	1,96	-1,28	374
2	-5,5	14,72	12,68	1,161	1,97	-0,76	377
3	-4,5	14,78	12,81	1,154	2,01	1,24	382
4	-4,0	14,66	12,78	1,147	2,01	1,24	386
5	-5,0	14,71	12,65	1,163	1,99	0,25	383
6	-6,0	14,77	12,58	1,174	1,97	-0,76	375

За результатами табл. 3 побудовані номограми (рис. 1), що відображають зміну показників роботи дизеля за різних умов налаштування ПНВТ. Як найбільш інформативні показники, що характеризують перебіг процесу згоряння та використання теплоти,

були обрані ступінь підвищення тиску під час згоряння  $\lambda$  та температура випускних газів  $t_{вг}$ . Значення  $p_i$ ,  $\Delta p_i$  та  $t_{вг}$  були віднесені до показників, що характеризують рівномірність розподілення навантаження циліндрів дизеля.

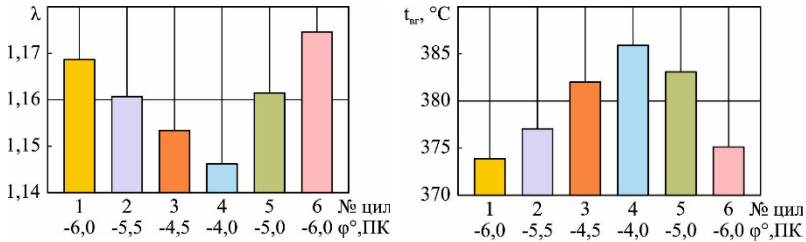


Рис. 1. Зміна ступеню підвищення тиску під час згоряння  $\lambda$  та температура випускних газів  $t_{вг}$  для різних кутів випередження подачі палива суднового дизелю 6S60MC-8.2-ТІІ

Неузгодженість показників робочого процесу в циліндрах під час переналаштування ПНВТ на різні для кожного з циліндрів кути випередження подачі палива не перевищувала:  $p_z - \pm 0,5\%$ ;  $p_i - \pm 1,3\%$ ;  $p_c - \pm 1,0\%$ ,  $t_{вг} - \pm 7^\circ\text{C}$  [19, 20]. Дозволена розбіжність в значеннях  $\Delta p_i$  гарантувала ефективність перебігу робочого циклу у всіх циліндрах дизеля [21, 22].

Вимірювання концентрації оксидів азоту в випускних газах виконувалося для трьох умов експлуатації дизеля: робота на паливі RMG500, робота на паливі DMA15 з однаковими кутами випередження подачі палива (до переналаштування дизеля), робота на паливі DMA15 з різними кутами випередження подачі палива (після переналаштування дизеля) [23, 24]. При цьому для всіх випадків дизель експлуатувався на навантаженні  $0,85N_{ном}$  не менш ніж 2 год. Номограма, що відображає зміну  $\text{NO}_x$  за цих умов, надана на рис. 2.

Значення концентрації  $\text{NO}_x$  в випускних газах на всіх режимах роботи не перевищувало максимально можливої величини, яка для дизелів, що відносяться до рівню Tier II відповідно до вимог Додатку VI МАРПОЛ складає  $14,4 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$  [25, 26].

Збільшення концентрації  $\text{NO}_x$  в випускних газах під час роботи дизеля 6S60MC-8.2-ТІІ з використанням палива DMA15 (з низьким вмістом сірки) свідчить про підвищення пікових температур під час згоряння палива за цих умов. Переналаштування ПНВТ на різні кути випередження та пов'язане з цим зменшення емісії  $\text{NO}_x$  обумовлюється

затримкою займання палива та зниженням максимальної температури згоряння палива [27, 28].

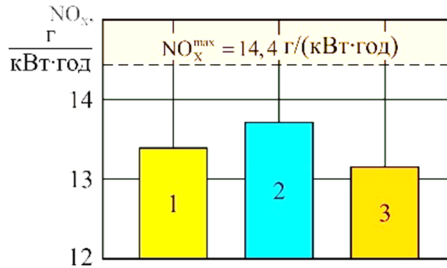


Рис. 2. Концентрація  $\text{NO}_x$  в випускних газах суднового дизеля 6S60MC-8.2-ТІІ за різних умов експлуатації: 1 – робота на паливі RMG500; 2 – робота на паливі DMA15 з однаковими кутами випередження подачі палива для всіх циліндрів; 3 – робота на паливі DMA15 з різними кутами випередження подачі палива по циліндрах дизеля (відповідно до табл. 3)

Результати досліджень, дозволяють зробити наступні **висновки**.

1. Під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки підвищується інтенсивність його згоряння, що виявляється в зростанні максимальної температури згоряння та підвищенні динамічних навантажень на деталі циліндрової групи та кривошипно-шатунного механізму. Це збільшує концентрацію оксидів азоту в випускних газах дизеля та ступінь підвищення тиску під час згоряння. Перше погіршує екологічність роботи дизеля, друге – сприяє підвищенню ударних навантажень на вкладиші підшипників дизеля.

2. Експериментально встановлено, що шляхом корегування кутів випередження палива можливо забезпечення перебігу процесу згоряння з меншою тепловою ефективністю. Для суднового дизеля 6S60MC-8.2-ТІІ переналаштування ПНВТ призводить до зменшення ступеню підвищення тиску під час згоряння зі значень 1,169 ... 1,174 до значень 1,147 ... 1,161 (в залежності від кутів подачі палива), також за цих умов досягається зменшення емісії оксидів азоту з 13,7  $\text{гNO}_x/(\text{кВт}\cdot\text{год})$  до 13,2  $\text{гNO}_x/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ .

3. Під час переналаштування ПНВТ необхідно стежити за енергетичними показниками дизеля (насамперед за індикаторним тиском  $p_i$  та його неузгодженістю за окремими циліндрами  $\Delta p_i$ ) та його тепловою напруженістю (насамперед за температурою випускних газів для кожного з циліндрів  $t_{\text{вг}}$ ). Під час проведення досліджень на дизелі

6S60MC-8.2-ТІІ відхилення цих показників від середнього значення, визначеного во всіх циліндрах, не перевищувало  $\pm 1,3\%$  для  $\Delta p_i$  та  $\pm 7^\circ$  для  $\Delta t_{вг}$ .

4. Реалізація контролю показників роботи дизеля під час корегування налаштування його паливної апаратури, а також збереження масивів отриманих даних можливо за допомогою спеціальних програм [29, 30].

#### ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // *Nase More: International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2022. – Vol. 69. – Iss. 1. – P. 53 – 61.

2. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331.

3. Sagin S.V., Kuropyatnik A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // *American Scientific Journal*. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67 – 71.

4. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. – 2021. – № 7-8. – P. 36 – 43.

5. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок // *Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць*. – 2020. – № 2(62). – С. 106 – 119.

6. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // *Nase More: International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2022. – Vol. 69. – Iss. 1. – P. 53 – 61.

7. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2021. – Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 5 – 17.

8. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8. – P. 14 – 17.



9. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 132 – 142.

10. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін А.С. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 93 – 107.

11. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використанні моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 108 – 119.

12. Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 121 – 131.

13. Сагин С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // Universum. Технические науки. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67 – 71.

14. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблемы техники: науч. -виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 78 – 88.

15. Горб С.И. Оптимизация главного двигателя на режиме экономического хода судна // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 17 – 34.

16. Горб С.И. Повышение точности численного моделирования рабочих процессов дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 26. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 3 – 26.

17. Сагин С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 79 – 89.

18. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 5 – 9.

19. Заблоцкий Ю.В., Куропятник А.А. Повышение топливной экономичности и экологических параметров работы судовых дизелей при использовании присадок к топливу // Austria-science. – 2017. – № 2. – С. 83 – 88.

20. Gorb S.I., Budurov M.I. Increasing the accuracy of a marine diesel engine operation limit by thermal factor // *International Review of Mechanical Engineering*. – 2021. – Vol. 15(3). – P. 115 – 121.

21. Кривий М.О., Сагін С.В. Визначення впливу властивостей моторних мастил на розподіл тиску в парах ковзання суднових дизелів // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2021. – Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 18 – 24.

22. Сагін С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // *Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць.* – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89 – 100.

23. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kuřcera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(10). – P. 1373.

24. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”, Beijing.* – 2019. – Part 1. – P. 139 – 145.

25. Sagin S., Madey V., Stoliaryk T. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels // *Technology Audit and Production Reserves.* – 2021. – № 5 (2 (61)). – P. 26 – 32.

26. Сагін С.В., Кривий М.О. Визначення розподілу тиску в шарі неньютонівських мастил у суднових енергетичних установках // *Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць.* – 2020. – № 2(62). – С. 160 – 170.

27. Куропятник А.А., Сагін С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник.* – 2018. – Вып. 24. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 72 – 80.

28. Сагін С.В., Кривий М.О. Розрахунок контактної тиску та зони контакту в парах ковзання судових дизелів // *Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб.* – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 84 – 92.

29. Горб С.И., Горб А.С. Программное обеспечение для управления активами на судах // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник.* – 2018. – Вып. 24. – Одесса: ОНМА. – С. 34 – 48.

30. Горб С.И., Каменева А.В., Запороженко Н.В. Модернизация структуры упрощённой системы технического менеджмента судов // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб.* – 2016. – Вып. 22. – Одесса: ОНМА. – С. 33 – 38.

Анотація – Надані результати щодо корегування налаштування паливних насосів високого тиску суднового дизеля 6S60MC-8.2-III MAN-Diesel & Turbo під час його експлуатації в спеціальних екологічних районах Sulfur Emission Control Areas на паливі з низьким вмістом сірки. Експерименти здійснювалися з використанням суднових моторних палив RMG500 (вміст сірки в якому складає 0,5 % за масою) та DMA15 (зі вмістом сірки 0,082 % за масою). Експлуатація дизелю на паливі DMA15 виконувалась під час знаходження судна в Sulfur Emission Control Areas, на паливі RMG500 – під час знаходження поза Sulfur Emission Control Areas. Шляхом математичного моделювання встановлено, що під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки підвищується інтенсивність його згоряння, що виявляється в зростанні максимальної температури згоряння та підвищенні динамічних навантажень на деталі циліндрової групи та кривошипно-шатунного механізму. Підтвердження цього виявилось в збільшенні концентрації оксидів азоту  $NO_x$  в випускних газах під час роботи дизеля 6S60MC-8.2-III з використанням палива DMA15. Експериментально встановлено, що шляхом корегування кутів випередження палива можливо забезпечення перебігу процесу згоряння з меншою тепловою ефективністю. Для суднового дизелю 6S60MC-8.2-III переналаштування паливних насосів високого тиску призводить до зменшення ступеню підвищення тиску під час згоряння зі значень 1,169 ... 1,174 до значень 1,147 ... 1,161 (в залежності від кутів подачі палива). Також за цих умов досягається зменшення емісії оксидів азоту з 13,7  $гNO_x/(кВт \cdot год)$  до 13,2  $гNO_x/(кВт \cdot год)$ , що обумовлюється затримкою займання палива та зниженням максимальної температури згоряння палива. Під час переналаштування паливних насосів високого тиску необхідно стежити за енергетичними показниками дизеля (насамперед за індикаторним тиском  $p_i$  та його неузгодженістю за окремими циліндрами  $\Delta p_i$ ) та його тепловою напруженістю (насамперед за температурою випускних газів для кожного з циліндрів  $t_{вг}$ ). Під час проведення досліджень на дизелі 6S60MC-8.2-III відхилення цих показників від середнього значення, визначеного во всіх циліндрах, не перевищувало  $\pm 1,3$  % для  $\Delta p_i$  та  $\pm 7$  ° для  $\Delta t_{вг}$ .

Annotation – The results are presented on the adjustment of the high pressure fuel pump settings of the 6S60MC-8.2-III MAN-Diesel & Turbo marine diesel engine during its operation in special environmental areas of Sulfur Emission Control Areas on low-sulfur fuel. The experiments were

*performed using marine motor fuels RMG500 (with a sulfur content of 0.5 % by mass) and DMA15 (with a sulfur content of 0.082 % by mass). The diesel engine was operated on DMA15 fuel while the ship was in Sulfur Emission Control Areas, on RMG500 fuel – while outside Sulfur Emission Control Areas. By means of mathematical modeling, it was established that during the conversion of marine diesel engines to fuel with a low sulfur content, the intensity of its combustion increases, which is manifested in an increase in the maximum combustion temperature and an increase in dynamic loads on the parts of the cylinder group and the crank-connecting mechanism. This was confirmed by an increase in the concentration of nitrogen oxides  $NO_x$  in the exhaust gases during the operation of the 6S60MC-8.2-TII diesel engine using DMA15 fuel. It was experimentally established that by adjusting the angles of advance of the fuel, it is possible to ensure the course of the combustion process with lower thermal efficiency. For the marine diesel engine 6S60MC-8.2-TII, the reconfiguration of the high-pressure fuel pumps leads to a decrease in the degree of pressure increase during combustion from values 1.169 ... 1.174 to values 1.147 ... 1.161 (depending on the fuel supply angles). Also, under these conditions, a reduction in the emission of nitrogen oxides from 13.7  $gNO_x/(kW \cdot h)$  to 13.2  $gNO_x/(kW \cdot h)$  is achieved, which is due to the delay in fuel ignition and the reduction of the maximum fuel combustion temperature. During the reconfiguration of high-pressure fuel pumps, it is necessary to monitor the energy indicators of the diesel engine (primarily the indicator pressure  $p_i$  and its inconsistency for individual cylinders  $\Delta p_i$ ) and its thermal intensity (primarily the temperature of the exhaust gases for each of the cylinders  $t_g$ ). During research on the 6S60MC-8.2-TII diesel, the deviation of these indicators from the average value determined for all cylinders did not exceed  $\pm 1.3$  % for  $\Delta p_i$  and  $\pm 7$  ° for  $\Delta t_g$ .*