УДК 621.527-027.236

doi: 10.32620/aktt.2019.7.11

Д. В. КОНОВАЛОВ

*Херсонська філія Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова, Україна*

ЗАСТОСУВАННЯ ГАЗОДИНАМІЧНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ В СИСТЕМАХ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Існує цілий ряд способів і методів зниження викидів шкідливих газів на сучасних судах. Одним з найбільш ефективних способів зниження викидів оксидів NO_x і SO_x є використання рециркуляції відхідних газів (EGR-технологія). Недоліком системи рециркуляції відхідних газів є збільшення протитиску через додаткові втрати тиску в скрубєрі та теплообміннику-охолоджувачі, що впливає на погіршення паливної економічності двигуна. В представленій роботі проаналізовано ефективність застосування струминного апарату – аеротермопресора в схемі з рециркуляцією відхідних газів для суднового малооборотного двотактного двигуна. Встановлення аеротермопресора пропонується перед скрубєром, що дозволяє зменшити його теплове навантаження. Підвищення тиску в аеротермопресорі на $0,2\text{--}0,4 \cdot 10^5$ Па (6–12 %) дозволяє зменшити протитиск в системі газовихлопу, а відтак, і зменшити навантаження на вентилятор системи рециркуляції відхідних газів, причому в холодній зоні при навантаженні на двигун вище 75 % застосування вентилятора не потрібно, що додатково дозволяє зменшити питому витрату палива. Уприскування слід здійснювати кількістю води понад необхідну для випаровування (не менш як 10 %). Таке рішення необхідно для забезпечення більшого ефекту від підвищення тиску в результаті термогазодинамічної компресії (за рахунок зменшення втрат на тертя), з одного боку, і для забезпечення умов до вприскування рідини в скрубєрі. Запропоноване схемно-конструктивне рішення дозволяє при високій екологічності застосування існуючої системи рециркуляції відхідних газів забезпечити певне зменшення питомої витрати палива. Визначено, що зменшення питомої витрати палива двигуном при застосуванні аеротермопресора складає $\Delta g_e = 2,5\text{--}3,0$ г/(кВт·год) (1,5–1,7 %).

Ключові слова: аеротермопресор; термогазодинамічна компресія; рециркуляція; відхідні гази; двигун внутрішнього згоряння.

Вступ

Для сучасних енергетичних установок на базі двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) заходи із зменшення шкідливих викидів в атмосферу вимагають додаткових зовнішніх енергетичних витрат. Наприклад, особливості утворення оксидів азоту NO_x вимагають необхідності до зниження максимальної температури горіння палива в циклі. Однак, при цьому зниження цієї температури зменшує енергетичну ефективність ДВЗ.

Звідси виникає необхідність до створення еколого- і енергоефективних технологій, які забезпечать зменшення шкідливих викидів і при цьому компенсують негативний вплив на паливно-енергетичну ефективність ДВЗ.

Одним з перспективних напрямків є, на сьогоднішній день, застосування струминних термопресорних технологій [1, 2], в основі яких лежить використання процесу термогазодинамічної компресії, який у свою чергу, дозволить забезпечити охолодження і одночасне підвищення тиску газового по-

току в схемно-конструктивних рішеннях із нейтралізації шкідливих речовин у відхідних газах ДВЗ.

1. Аналіз проблеми і постановка мети

Провідні двигунобудівні фірми Світу такі як MAN Diesel, Wartsila, Caterpillar та інш. проводять постійні дослідження щодо виявлення впливу на навколишнє середовище шкідливих токсичних речовин, що входять до складу відхідних газів суднових двигунів, а також ведуть пошуки ефективних способів, які б дозволили б скоротити ці викиди [3-8].

Основними шкідливими компонентами в відхідних газах є діоксид вуглецю CO_2 , оксиди азоту NO_x , оксиди сірки SO_x .

Оксиди азоту утворюються в зонах з високою температурою, які мають місце в фазах кінетичного і дифузного згоряння. Найбільш висока температура виникає в локальних зонах при кінетичному згорянні, коли ймовірність виникнення таких зон найбільш

висока. Тому, чим більше температура процесу згоряння, тим більше оксидів азоту [9-10].

Міжнародні вимоги щодо викидів оксидів азоту NO_x , оксидів сірки SO_x і твердих частинок визначаються конвенцією MARPOL (додаток VI – "Положення про запобігання забрудненню повітря з суден") [11]. Відповідно до правил, викиди NO_x з будь-якого дизельного двигуна, що встановлено на судні, побудованому після 01.01.2016, повинні відповідати рівню Tier III при роботі в зоні контролю викидів NO_x .

Існує цілий ряд способів і методів зниження викидів шкідливих газів на сучасних судах. Як показує порівняльний аналіз, найбільш ефективним способом зниження викидів оксидів NO_x і SO_x є використання рециркуляції відхідних газів (EGR-технологія): зменшення викидів NO_x складає 70 %, зменшення SO_x – 19 % [12].

Для судових малообертових дизелів використовують дві основні схеми EGR-технології [11, 13]:

1) система рециркуляції байпасування з одним наддувним турбокомпресором (застосовується для двигунів із діаметром циліндру до 700 мм);

2) система рециркуляції з двома або більше турбокомпресорами (застосовується для двигунів із діаметром циліндру більше 700 мм).

Одним з недоліків системи рециркуляції відхідних газів є збільшення протитиску через додаткові втрати тиску в скрубєрі та теплообміннику-охолоджувачі, а це, у свою чергу, сприяє погіршенню паливної економічності ДВЗ.

Слід зауважити, що створення надійного і ефективного теплообмінника для охолодження рециркуляційних газів являє собою складну задачу через відкладення та забруднення від цих газів [14, 15].

До перспективних теплообмінників-охолоджувачів які можна було б застосувати в системі рециркуляції відхідних газів слід віднести контактні теплообмінники струминного (газодинамічного) типу – термопресори (або аеротермопресори) [2, 16, 17]. Перевагами таких теплообмінників є компактність і простота конструкції, до того ж, вони окрім охолодження забезпечують також і певне підвищення тиску [18-19], що може дозволити зменшити вплив протитиску в системі рециркуляції та знизити витрати роботи на додаткове стиснення рециркуляційних газів в вентиляторі (або в електрокомпресорі).

Аеротермопресор – це двофазний струминний апарат для контактного дисперсного охолодження, в якому за рахунок відведення теплоти від газового потоку відбувається підвищення тиску газу та його охолодження. При відповідній організації процесів випарного контактного динамічного охолодження виникає ефект термогазодинамічної компресії (термопресії) – явище, при якому відбувається підви-

щення тиску газу в процесі миттєвого випаровування води, що упрскується в газовий (повітряний) потік, прискорений до швидкості, близької звуковій. При цьому на випаровування води відводиться теплота від газу (повітря), в результаті чого знижується його температура.

Мета дослідження – аналіз ефективності способу охолодження відхідних рециркуляційних газів аеротермопресором для судового малообертового дизельного двигуна.

2. Результати дослідження

При аналізі ефективності застосування запропонованого рішення порівняння здійснено на основі базової схеми з рециркуляцією відхідних газів. Дані схеми застосовуються для зниження шкідливих викидів газів (CO_2 , NO_x , SO_x) для малообертових двигунів фірми MAN (відповідно до умов Tier III). При цьому застосовується байпасування частини відхідних газів з наступним охолодженням і одночасним конденсаванням (очищенням) екологонебезпечних газів в скрубєрі та доохолодженням в теплообміннику-охолоджувачі газу до температури, що дорівнює температурі повітря в ресивері. До складу системи входять скрубєр, охолоджувач, вологовідділювач, вентилятор і система підтримки розчину NaOH з насосом і баком.

Система рециркуляції працює наступним чином: відхідні гази кількістю до 30–40 % через клапан з ресиверу відпрацьованих газів подаються в скрубєр, де вони частково охолоджуються і очищуються при розпиленні води форсунками. Потім гази охолоджуються в теплообміннику-охолоджувачі газу, конденсат відводиться в конденсатовідводнику, а очищений і охолоджений газ подається в вентилятор або електрокомпресором в повітряний ресивер, де він змішується із повітрям [11].

Схемні рішення розглянуто для судового малообертового дизельного двотактного двигуна MAN B&W марки 6G70ME-C9.5. Для аналізу використовувався програмний комплекс CEAS [20]. Розрахунок зроблено для наступних експлуатаційних характеристик: навантаження на двигун – 90 %; потужність – $N_e = 19656$ кВт; частота обертання – $n_e = 80,1$ хв⁻¹; питома витрата умовного палива – $g_e = 169,8$ г/(кВт·год) при ISO.

Розрахунок характеристик двигуна проводився в всьому можливому діапазоні часткових навантажень (30–100 %), а також для наступних умов:

1) ISO – температура повітря на вході турбокомпресора $t_{n1} = 25$ °C, температура охолоджуючої води в охолоджувачі наддувного повітря $t_{w1} = 25$ °C, відносна вологість повітря – $\phi_{n1} = 30$ %;

2) тропічна зона $-t_{п1} = 45^\circ\text{C}$, $t_{w1} = 36^\circ\text{C}$, $\phi_{п1} = 60\%$;

3) холодна зона $-t_{п1} = 10^\circ\text{C}$, $t_{w1} = 10^\circ\text{C}$, $\phi_{п1} = 60\%$.

Параметри відхідних газів, які йдуть на рециркуляцію та процеси їх газодинамічного охолодження в аеротермопресорі розраховували за розробленою методикою та програмою з використанням рівнянь термодинаміки та газодинаміки потоку [18–21].

Для забезпечення ефективного охолодження відхідних газів в системі рециркуляції раціонально встановлення аеротермопресора перед скруббером (рис. 1). В даному випадку аеротермопресор забезпечить підвищення тиску газу, що, у свою чергу, зменшить протитиск газового тракту двигуна і, відповідно, зменшить навантаження на вентилятор або електрокомпресор. До того ж, виходячи з умов безпеки низькотемпературної сірчистоокислої корозії, даний апарат забезпечить охолодження відхідних газів до температури вище точки роси. Таке рішення також зменшить теплове навантаження на скруббер і поверхневий охолоджувач газу.

Рис. 1. Схема рециркуляції відхідних газів із аеротермопресором: Н1, Н1, Н3, Н4 – насоси; ТК – турбокомпресор; К1 – байпасний клапан EGR; К2 – клапан регулювання системи EGR; К3 – байпасний клапан на лінії відхідних газів; ГР – газовий ресивер; ПР – ресивер наддувного повітря; ВВ – воловідділювач; АТП – аеротермопресор; ОГ – охолоджувач газу; ОНП – охолоджувач наддувного повітря; В – вентилятор; С – скруббер

Уприскування слід здійснювати кількістю води понад необхідну для випаровування (не менш як 10 %). Таке рішення необхідно для забезпечення більшого ефекту від підвищення тиску в результаті термогазодинамічної компресії (за рахунок зменшення втрат на тертя), з одного боку, і для забезпечення умов до вприскування рідини в скруббері. Це дозволить зменшити навантаження по витраті води на вприскування в скруббері, а також частково або повністю компенсує втрати тиску.

Застосування аеротермопресора перед скруббером системи рециркуляції відхідних газів дозволяє підвищити тиск відхідних газів, що байпасуються через турбокомпресор двигуна, на $0,2\text{--}0,4 \cdot 10^5$ Па (6–12 %) (рис. 2). При цьому зниження температури в результаті ефекту термогазодинамічної компресії становить $\Delta T_{атп} = 150\text{--}300$ К. Необхідна для випаровування кількість води в аеротермопресорі становить $G_w = 0,35\text{--}0,50$ кг/с ($g_{w,атп} = 5\text{--}8\%$ від витрати відхідних газів – рис. 3), при цьому коефіцієнт рециркуляції склав $K_p = 0,12\text{--}0,20$ при витраті води на скруббер – $g_{w,egr} = 0,02\text{--}0,04$ (2–4 %).

Рис. 2. Залежності підвищення тиску в АТП без врахування тертя $\Delta P_{атп,сух}$, підвищення тиску в АТП із врахування тертя $\Delta P_{атп}$, втрат на тертя $\Delta P_{атп,пот}$, зниження температури газу при охолодженні в АТП $\Delta T_{атп}$ від навантаження на двигун NMCR:

— — — — — умови ISO ($t_{пов1} = 25^\circ\text{C}$; $t_{w1} = 25^\circ\text{C}$);
 — — — — — тропічні умови ($t_{пов1} = 45^\circ\text{C}$; $t_{w1} = 36^\circ\text{C}$);
 - - - - - холодна зона ($t_{пов1} = 10^\circ\text{C}$; $t_{w1} = 10^\circ\text{C}$)

Підвищення тиску в аеротермопресорі дозволяє зменшити протитиск в системі газовихлопу, а відтак, і зменшити навантаження на вентилятор системи рециркуляції відхідних газів. Так потужність вентилятора знизилася з $N_{вент} = 120\text{--}160$ кВт до $N_{вент,атп} = 20\text{--}110$ кВт (рис. 4). В холодній зоні при навантаженні на двигун вище 75 % застосування вентилятора взагалі не потрібно, оскільки тиск газів після аеротермопресора достатній для забезпечення

нагнітання їх до повітряного ресиверу без додаткової компенсації.

Рис. 3. Залежності зміни витрати вихлопних відхідних газів G_{egr} , витрати рециркуляційного газу G_{egr} , витрати води на вприскування в АТП $G_{w.atp}$, витрати води на вприскування в скрубєрі $G_{w.egr}$ від навантаження на двигун NMCR:

— умови ISO ($t_{пов1} = 25^\circ\text{C}$; $t_{w1} = 25^\circ\text{C}$);
 - - - тропічні умови ($t_{пов1} = 45^\circ\text{C}$; $t_{w1} = 36^\circ\text{C}$);
 ····· холодна зона ($t_{пов1} = 10^\circ\text{C}$; $t_{w1} = 10^\circ\text{C}$)

Рис. 4. Залежності зміни питомої витрати умовного палива для двигуна без рециркуляції g_e , питомої витрати палива для двигуна з рециркуляцією $g_{e.egr}$, питомої витрати палива для двигуна з рециркуляцією і АТП $g_{e.atp}$, питомої витрати палива для двигуна з рециркуляцією, АТП та з врахуванням зменшення навантаження на вентилятор $g_{e.total}$, потужності вентилятора системи рециркуляції N_{vent} , потужності вентилятора системи рециркуляції із АТП $N_{vent.atp}$ від навантаження на двигун NMCR:

— умови ISO ($t_{пов1} = 25^\circ\text{C}$; $t_{w1} = 25^\circ\text{C}$);
 - - - тропічні умови ($t_{пов1} = 45^\circ\text{C}$; $t_{w1} = 36^\circ\text{C}$);
 ····· холодна зона ($t_{пов1} = 10^\circ\text{C}$; $t_{w1} = 10^\circ\text{C}$)

Зменшення навантаження на вентилятор системи рециркуляції, а також зменшення протитиску в системі дозволяє знизити питому витрату палива двигуном на $\Delta g_e = 2,5\text{--}3,0$ г/(кВт·год) (1,5–1,7 %)

(див. рис. 4). При навантаженні на двигун близькому до експлуатаційного (90–95 % від потужності двигуна) витрати палива при застосуванні системи рециркуляції з аеротермопресором і без рециркуляції взагалі рівні, що робить таке схемне рішення раціональним з точки зору економічності. В цьому випадку вдається поєднати високу екологічну і економічну ефективність від застосування такого рішення.

Висновки

1. Підвищення тиску в аеротермопресорі на $0,2\text{--}0,4 \cdot 10^5$ Па (6–12 %) дозволяє зменшити протитиск в системі газовихлопу, а відтак, і зменшити навантаження на вентилятор системи рециркуляції відхідних газів, причому в холодній зоні при навантаженні на двигун вище 75 % застосування вентилятора не потрібно, що додатково дозволяє зменшити питому витрату палива.

2. Запропоноване схемно-конструктивне рішення системи рециркуляції відхідних газів із застосуванням газодинамічного охолодження в аеротермопресорі дозволяє при високій екологічності застосування існуючої системи рециркуляції відхідних газів забезпечити зменшення питомої витрати палива. Визначено, що зменшення питомої витрати палива двигуном при застосуванні аеротермопресора складає $\Delta g_e = 2,5\text{--}3,0$ г/(кВт·год) (1,5–1,7 %).

Література

1. Коновалов, Д. В. Методологічний підхід до охолодження наддувеного повітря середньобертового двигуна [Текст] / Д. В. Коновалов, А. О. Джуринська. // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2012. – № 6 (93). – С. 73–78.
2. Коновалов, Д. В. Термопресорні системи охолодження суднових ДВЗ [Текст] / Д. В. Коновалов // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2011. – № 10 (87). – С. 44–48.
3. Якунчиков, В. В. Снижение вредных выбросов судового дизеля в переходных режимах [Текст] Автореф. дис. ... канд. тех. наук / В. В. Якунчиков; Московская государственная академия водного транспорта. – М., 1997. – 17 с.
4. Hellen, G. Paper carriers to cut NOx emissions by Direct Water Injection [Text] / G. Hellen // *Marine News*. – 1991. – No. 1. – P. 8-11.
5. The Motor Ship. Exhaust gas recirculation. – 1996. – P. 2–11.
6. MER. Practical implication of NOx exhaust emission regulation. – 1994. – P. 33-35.
7. Lausoh, W. Low engine Fuel Consumption and Low NOx Emission: Incompatible Opposites [Text] / W. Lausoh, V. Dietl, W. Fleischer // *Wartsila Diesel Group. Marine News*. – 1994. – No. 12. – P. 35-40.
8. IMO. IMO Working Group / EE/WG 2/4. – 1994. – P. 20-40.
9. Марченко, А. П. Двигуни внутрішнього згоряння: Серія підручників у 6 томах [Текст] / А. П. Марченко, І. В. Парсаданов, Л. Л. Товажнян-

ський, А. Ф. Шеховцов. – Харків : Видавничий центр НТУ "ХПИ", 2004. – 468 с.

10. Agrawal, A. K. Effect of EGR on the exhaust gas temperature and exhaust opacity in compression ignition engines [Text] / A. K. Agrawal, S. K. Singh, S. Sinha, M. K. Shukla // *Academy Proceedings in Engineering Sciences*. – 2004. – Vol. 29, No. 3. – P. 275-284.

11. MAN B&W, *Two-stroke Marine Engines. Emission Project Guide* [Text]. – 9th Edition ed. – Copenhagen : MAN Diesel & Turbo, 2018. – 111 p.

12. Bent, N. 8500 TEU Container Ship Green Ship of the Future Concept study [Text] / N. Bent. – Odense Steel Shipyard Ltd, 2009.

13. Wartsila, Wärsilä *Environmental Product Guide* [Online]. – Wartsila, 2011. Available at: <https://cdn.wartsila.com/docs> – 12.02.2019.

14. The effect of engine operating conditions on exhaust gas recirculation cooler fouling [Text] / M. J. Lance, Z. G. Mills, J. C. Seylar, J. M. E. Storey, C. S. Sluder // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 126. – P. 509-520.

15. Hoseini, S. S. Thermal and fluid simulation of a new diesel engine cooling exhaust gas recirculation system to reduce exhaust gas emissions [Text] / S. S. Hoseini, G. Najafi, B. Ghobadian // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 51, No. 2. – P. 197-208.

16. Живица, В. И. Промежуточные охладители с термopрессором для двух ступенчатых аммиачных холодильных установок [Текст] / В. И. Живица // *Холодильная техника*. – 2002. – № 5. – С. 18–20.

17. Modelling of droplets evaporation in ejector heat exchanger [Text] / V. Kogut, V. Bushmanov, I. Butovskiy, M. Khmelniuk // *Proceedings of the 9th International Conference on Compressors and Coolants*. – Bratislava : Slovakia, 2017.

18. Вулис, Л. А. Термодинамика газовых потоков [Текст] / Л. А. Вулис. – Москва, Ленинград : Госэнергоиздат, 1950. – 304 с.

19. Степанов, И. Р. Некоторые задачи движения газа и жидкости в каналах и трубопроводах энергоустановок [Текст] / И. Р. Степанов, В. И. Чудинов. – Ленинград : Наука. Ленингр. отд-ние, 1977. – 199 с. – (АН СССР, Кольск. филиал им. С.М. Кирова).

20. MAN Diesel Turbo, CEAS Engine Calculations, Wartsila – 2019. [Online]. Available at: <https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas>. 14.04.2019.

21. Дейч, М. Е. Газодинамика двухфазных сред [Текст] / М. Е. Дейч, Г. А. Филиппов. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 472 с.

22. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И. Е. Идельчик. – Москва : Машиностроение, 1992. – 672 с.

References

1. Kononov, D. V., Dzhurynska, A. O. Metodolohichniy pidkhid do okholodzhennia nad-duvnoho povitria serednobertovoho dvyhuna [The methodological approach near cooling of scavenging air of medium speed engine]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2012, no. 6(96), pp. 73-78.

2. Kononov, D. V. Termopresorni systemy okholodzhennia sudnovykh DVZ [The termopressor systems of cooling air of engine ships]. *Aviacijno-*

kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology, 2011, no. 10(87), pp. 44-48.

3. Yakunchikov, V. V. Snizhenie vrednykh vyibroso sudovogo dizelya v perehodnykh rezhimakh. Avtoref. diss. na soisk. uch. stepeny kand. techn. nauk, Moskovskovskaya gosudarstvennaya akademiya vodnogo transporta, Moscow, 1997.

4. Hellen G. 1991. Paper carriers to cut NOx emissions by Direct Water Injection. Wartsila NSD Corporation. *Marine News*, 1991, no.1, pp. 8-11.

5. The Motor Ship. Exhaust gas recirculation. 1996, pp. 2-11.

6. MER, Practical implication of NOx exhaust emission regulation. Nov. 1994, pp. 33-35.

7. Lausoh, W., Dietl, V., Fleischer, W. Low engine Fuel Consumption and Low NOx Emission: Incompatible Opposites. Wartsila Diesel Group. *Marine News*, 1994, no. 12, pp. 35-40.

8. IMO, "IMO Working Group / EE/WG 2/4", 1994, pp. 20-40.

9. Marchenko, A. P., Parsadanov, I. V., Tovazhnianskyi, L. L., Shekhovtsov, A. F. *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia: Ekolohizatsiia DVZ* [Internal combustion engines: 6-volume textbook series]. Kharkiv, Vydavnychiy tsentr NTU "KhPI" Publ., 2004. 468 p.

10. Agrawal, A. K., Singh, S. K., Sinha, S., Shukla, M. K. Effect of EGR on the exhaust gas temperature and exhaust capacity in compression ignition engines. *Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 2004, vol. 29, iss. 3, pp. 275-284.

11. MAN B&W. *Two-stroke Marine Engines. Emission Project Guide*, 9th Edition ed., Copenhagen: MAN Diesel & Turbo, 2018. 111 p.

12. Bent, N. 8500 TEU Container Ship Green Ship of the Future Concept study. Odense Steel Shipyard Ltd, 2009.

13. Wärsilä *Environmental Product Guide*, 2011. Available at: <https://cdn.wartsila.com/docs> (accessed 12.02.2019)

14. Lance M. J., Mills Z. G., Seylar J. C., Storey J., Sluder C. S. 2018. The effect of engine operating conditions on exhaust gas recirculation cooler fouling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, no. 126, pp. 509-520. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.069.

15. Hoseini, S. S., Najafi, G., Ghobadian, B. Thermal and fluid simulation of a new diesel engine cooling exhaust gas recirculation system to reduce exhaust gas emissions. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2018, vol. 51, iss. 2, pp. 197-208.

16. Zhivitsa, V. I. Promezhutochnye ohladiteli s termopressorom dlya dvuh stupenchatykh ammiachnykh holodilnykh ustanovok [Intercoolers with a thermal compressor for two-stage ammonia refrigeration units]. *Holodilnaya tehnika*, 2002, no. 5, pp. 18-20.

17. Kogut, V., Bushmanov, V., Butovskiy, I. Khmelniuk, M. Modelling of droplets evaporation in ejector heat exchanger. *Proceedings of the 9th International Conference on Compressors and Coolants*. Samorin, Bratislava; Slovakia, 6-8 September 2017.

18. Vulis, L. A. *Termodinamika gazovykh potokov* [Thermodynamics of gas flows]. Moscow, Leningrad, Gosjenergoizdat Publ., 1950. 304 p.

19. Stepanov, I. R., Chudinov, V. I. Nekotoryye zadachi dvizheniya gaza i zhidkosti v kanalah i truboprovodakh energoustanovok [Some tasks of the movement

of gas and liquid in the channels and pipelines of power plants]. Leningrad, Nauka, Leningradskoe otd. Publ., 1977. 199 p.

20. *CEAS Engine Calculations. MAN Diesel Turbo*, 2019. Available at: <https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas>. (accessed 14.04.2019).

21. Deych, M. E., Filippov, G. A. *Gazodinamika dvuhfaznykh sred* [Gas dynamics of two-phase media]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 472 p.

22. Idelchik, I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Hydraulic Resistance Reference]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 672 p.

Надійшла до редакції 6.06.2019, розглянута на редколегії 7.08.2019

THE USE OF GAS-DYNAMIC COOLING RECIRCULATION OF EXHAUST GASES OF MARINE DIESEL ENGINES

Dmytro Kononov

There are many ways and methods to reduce exhaust gases emissions on modern ships. One of the most effective ways to reduce NO_x and SO_x emissions is to use of exhaust gas recirculation (EGR technology). The EGR system disadvantage is an increase in back pressure through additional pressure losses in the scrubber and heat exchanger, which entails an engine fuel efficiency deterioration. Creating a reliable and efficient heat exchanger for cooling recirculation gases is a complex task due to deposits and pollution emitted by these gases. In the pre-sent work, the jet apparatus effectiveness named aerothermopressor is analyzed in the scheme with exhaust gases recirculation of the ship low-speed two-stroke engine. Aerothermopressor is a two-phase jet for contact disperse cooling, in which by increasing the heat from the gas stream the gas pressure and cooling are increased. The calculation of the characteristics of the engine was carried out, both in nominal, and in operating modes and in all possible range of partial loads. The installation of the aerothermopressor before the scrubber is proposed, which allows reducing engine thermal load. Increasing the pressure in the aerothermopressor by $0.2-0.4 \cdot 10^5$ Pa (6-12 %) allows reducing the back pressure in the gas exhaust system and thus reducing the load on the exhaust gas recirculation fan and when the engine load is higher than 75% in the cold zone, the fan is not needed, which additionally allows to reduce the specific fuel consumption. The parameters of the exhaust gases that are going to be recirculated and the processes of their gas-dynamic cooling in the aerothermopressor are based on the developed technique and program using the thermodynamic and gas dynamics equations. The proposed scheme-design solution allows at a high environmental friendliness of the existing exhaust gas recirculation system to provide a certain reduction in specific fuel consumption. It was determined that the engine specific fuel consumption has been decreasing when the aerothermopressor is used to $\Delta g_e = 2.5-3.0$ g/(kW·h) (1.5-1.7%).

Keywords: Aerothermopressor; Thermogasdynamic Compression; Recirculation; Exhaust Gases; Internal-Combustion Engine.

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В СИСТЕМАХ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Д. В. Коновалов

Существует целый ряд способов и методов снижения выбросов вредных газов на современных судах. Одним из наиболее эффективных способов снижения выбросов оксидов NO_x и SO_x является использование рециркуляции отходящих газов (EGR-технология). Недостатком системы рециркуляции отходящих газов является увеличение противодавления через дополнительные потери давления в скруббере и теплообменнике-охладителе, что влияет на ухудшение топливной экономичности двигателя. В представленной работе проанализирована эффективность применения струйного аппарата-аэротермопрессора в схеме с рециркуляцией отходящих газов для судового малооборотного двухтактного двигателя. Установка аэротермопрессора перед скруббером, что позволяет уменьшить его тепловую нагрузку. Повышение давления в аэротермопрессоре на $0,2-0,4 \cdot 10^5$ Па (6-12 %) позволяет уменьшить противодавление в системе газовыхлопа, а значит, и уменьшить нагрузку на вентилятор системы рециркуляции отходящих газов, причем в холодной зоне при нагрузке на двигатель выше 75 % применение вентилятора не нужно, что дополнительно позволяет уменьшить удельный расход топлива. Впрыска следует осуществлять количеством воды свыше необходимой для испарения (не менее 10 %). Такое решение необходимо для обеспечения большего эффекта от повышения давления в результате термогазодинамической компрессии (за счет уменьшения потерь на трение), с одной стороны, и для обеспечения условий до впрыска жидкости в скруббере. Предлагаемое схемно-конструктивное решение позволяет при высокой экологической эффективности применения существующей системы рециркуляции отходящих газов обеспечить некоторое уменьшение удельного расхода топлива. Определено, что уменьшение удельного расхода топлива двигателем при применении аэротермопрессора составляет $\Delta g_e = 2,5-3,0$ г/(кВт·ч) (1,5-1,7 %).

Ключевые слова: аэротермопрессор; термогазодинамическая компрессия; рециркуляция; отходящие газы; двигатель внутреннего сгорания.

Коновалов Дмитро Вікторович – канд. техн. наук, завідувач кафедри теплотехніки, Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна.

Kononov Dmytro – Ph.D., Head of the Heat Engineering Department, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson Branch, Kherson, Ukraine,
e-mail: dimitriyko79@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-7127-0487, Scopus Author ID: 57209246625,
<https://scholar.google.ru/citations?user=l5Ot7GQAAAAJ&hl=uk>.