

УДК 621.577

Д.В. КОНОВАЛОВ, А.О. ДЖУРИНСЬКА

Херсонська філія Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна

МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ОХОЛОДЖЕННЯ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ СЕРЕДНЬООБЕРТОВОГО ДВИГУНА

Розглянуто методологічний підхід до охолодження наддувного повітря в середньообертovому двигуні із застосуванням термогазодинамічного ефекту. Для підвищення ефекту зниження температури повітря перед двигуном і збільшення потужності компресора, а також для забезпечення автономності роботи термопресорної системи запропоновано здійснювати попереднє охолодження повітря перед компресором, а вологу, що конденсується в теплообміннику впорскувати в термопресор. Застосування термопресорної системи з попереднім охолодженням дозволяє збільшити тиск повітря, з одночасним зниженням температури, що у свою чергу, збільшує потужність компресора на 10...20 % з відповідним збільшенням потужності двигуна.

Ключові слова: термогазодинамічний ефект, термопресор, двигун, утилізація, наддувне повітря, турбокомпресор, екологічне зволоження

Вступ

Зараз в енергомашинобудуванні існує декілька методологічних підходів до систем охолодження наддувного повітря двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Перший підхід полягає в застосуванні поверхневих повітроохолоджувачів, в яких охолодження повітря здійснюється водою через ребристу стінку. Теплообмінна поверхня представляє собою трубчасто-пластинчасту або трубчасто-ребристу конструкцію. Другий підхід полягає в застосуванні багату-ступінчастих (двох- або трьох-) когенеративних охолоджувачів наддувного повітря (ОНП). В таких ОНП в перших ступенях теплота повітря, що має високу температуру після стиснення в турбокомпресорі, застосовується для підігріву теплоносія систем опалення, гарячого водопостачання, підігріву танків палива, мастила і нафтопродуктів (на суднах морського транспортного і танкерного флоту) або генератору тепловикористовуючих холодильних машин (ТХМ) систем комфортного і технологічного кондиціонування повітря. Остаточне охолодження повітря здійснюється водою в поверхневих ОНП. Третім методологічним підходом є застосування термопресорних систем охолодження, де теплота наддувного повітря застосовується для стиснення і охолодження самого повітря (термогазодинамічний ефект). Цей ефект полягає в підвищенні тиску в результаті миттєвого випаровування диспергованої рідини, упорскуваної в прискорений потік перегрітої пари або газу (повітря) [1].

В сучасній енергетиці все більш знаходить застосування автономні когенеративні системи енер-

гозабезпечення. Основною задачею таких систем є забезпечення споживачів електричною і тепловою енергією. У складі головної енергетичної установки, як правило, застосовують дизель-генератори на базі середньообертovих первинних двигунів. Особливістю таких двигунів є досить високий тепловий потенціал відхідних газів ($t_r = 350...400$ °C) і наддувного повітря ($t_{\text{нп}} = 180...230$ °C при $\pi_k = 3,0...4,5$) [2].

1. Постановка проблеми та задач дослідження

Удосконалення систем сучасних ДВЗ, призначених для забезпечення оптимальних початкових параметрів робочого циклу, і перш за все, системи турбонаддуву є одним з резервів підвищення енергетичної ефективності ДВЗ. Зменшення потужності приводу турбокомпресора наддувного повітря забезпечить утворення резерву потужності утилізаційної турбіни, яку можна використати для збільшення масового заряду повітря (подача турбокомпресора), що йде у циліндри двигуна, а також збільшення потужності двигуна або для приводу електрогенератора [3, 4].

Одним з перспективних засобів удосконалення системи турбонаддуву є застосування термопресорних систем охолодження. Основним елементом такої системи є термопресорний апарат, в якому здійснюється підвищення тиску повітря у процесі миттєвого випаровування води, упорскуваної в повітряний потік, прискорений до швидкості, близької звукової [2]. На випаровування води відводиться теплота від наддувного повітря, як наслідок, знижуєть-

ся температура. Термопресор є досить компактним пристроєм, який за габаритами значно виграє порівняно з іншими охолоджувачами поверхневого або контактного типу і головне забезпечує певне підвищення тиску, що для повітряних систем може бути досить значним і складати 20...30 % [3, 4]. Поєднання декількох процесів в термопресорі – контактного охолодження наддувного повітря і підвищення тиску, дозволяє забезпечити скорочення витрат потужності компресора.

Іншим засобом скорочення витрат потужності компресора є охолодження повітря на всмоктуванні у турбокомпресор [5, 6]. Це дозволяє не тільки зменшити роботу компресора на стиснення, але й зменшити температуру наддувного повітря на нагнітанні, а від так, і зменшити теплове навантаження на ОНП.

В сучасних ДВЗ для зниження викидів в атмосферу оксидів азоту NO_x застосовують спеціальні системи зволоження наддувного повітря [2, 7]. Кількість води, що подається у ДВЗ з наддувним повітрям має бути в 3 рази більше від кількості спалюваного палива. Температура наддувного повітря на вході у циліндри двигуна складає 50...70 °С, а вологовміст – до 80 г/кг [7]. Такі параметри повітря дозволяють знизити емісію оксидів азоту на 70...80 %. Ефект обумовлений тим, що водяна пара внаслідок високої теплоємності відбирає на пароутворення значну кількість теплоти, що призводить до зниження температури в камері згоряння. Зважаючи на те, що швидкість утворення NO_x безпосередньо залежить від температури, то чим більше водяної пари в суміші газів у циліндрі, тим нижча температура в зоні горіння та менше утворюється оксидів азоту.

В роботі [9] наведено поєднання двох функцій системи охолодження наддувного повітря: контактне охолодження наддувного повітря (до входу в компресор і при стисканні в компресорі), а також екологічне (з метою зменшення емісії оксидів азоту NO_x) зволоження наддувного повітря на вході в циліндри ДВЗ. Запропоновано спосіб тонкого розпилу води в наддувному повітрі термопресором, тобто безпосередньо у теплообміннику-термопресорі, завдяки турбулізації потоку при високих швидкостях потоку (число Маха $M = 0,80...0,95$) і зменшення розмірів крапель у результаті випаровування.

Застосування механічних форсунок для організації розпилу не досить ефективно, до того ж це призводить до додаткових аеродинамічних опорів і звісно втрат тиску, що зменшує ефект від впорскування води. Зважаючи на це термопресорне охолодження може дозволити з одного боку забезпечити інтенсивне охолодження повітря, а з другого – забезпечити значно більш ефективно розпилення води в потоці газу зі швидкістю біля звукової.

Використання рідини в термопресорі, у випадку його встановлення за турбокомпресором дозволить частково або повністю виключити застосування конструктивно більш складних систем зволоження наддувного повітря типу CASS ("Wartsila").

В роботах [8, 9] було розглянуто термопресорні системи для охолодження наддувного повітря головного суднового двигуна, але воду для упорскування в термопресорі запропоновано брати із зовнішньої системи прісної води або застосовувати конденсат з додаткового ОНП за термопресором. Встановлення додаткового ОНП необхідно, оскільки температура повітря за термопресором досить висока і складає 70...80 °С. Все це ускладнює систему охолодження і, до того ж, значна частина вологи конденсується в ОНП, що у свою чергу знижує ефект від екологічного зволоження.

Зважаючи на вище викладене, сформульовано основну мету даного дослідження – оцінка доцільності методологічного підходу до охолодження наддувного повітря середньообертового двигуна застосуванням термопресорної системи, що поєднала би в собі декілька функцій: додаткове підвищення тиску, охолодження і екологічне зволоження повітря.

2. Викладення результатів дослідження

На рис. 1 наведено систему охолодження і зволоження наддувного повітря для стаціонарних модульних і суднових дизель-генераторів на базі середньо обертових ДВЗ із застосуванням термопресора. Така система включає в себе схему, де повітря перед всмоктуванням турбокомпресором (ТК) охолоджується в повітроохолоджувачі (ПО) холодильної машини. В ТК повітря стискається до тиску менше, ніж тиск на вході в циліндри ДВЗ. Стиснене повітря з високою температурою поступає на випарне охолодження в термопресор. Завдяки ефекту термогазодинамічної компресії температура повітря значно знижується, а тиск підвищується до величини, необхідної для подачі в циліндри двигуна. У якості зовнішньої холодильної машини може бути застосовано, наприклад, тепловикористовуючу абсорбційну холодильну машину (АБХМ) [11]. Теплота в генераторі АБХМ підводиться за рахунок теплоти відхідних газів ДВЗ.

Аналіз роботи термопресорної системи наведено на прикладі системи охолодження наддувного повітря дизель-генератора (ДГ) фірми MAN B&W 5L21/31 потужністю $N_e = 1000$ кВт. Розрахунок процесів охолодження і стиснення вологого повітря зроблено за класичними методиками [11], а розрахунок процесів у термопресорі за методиками [1, 12, 13].

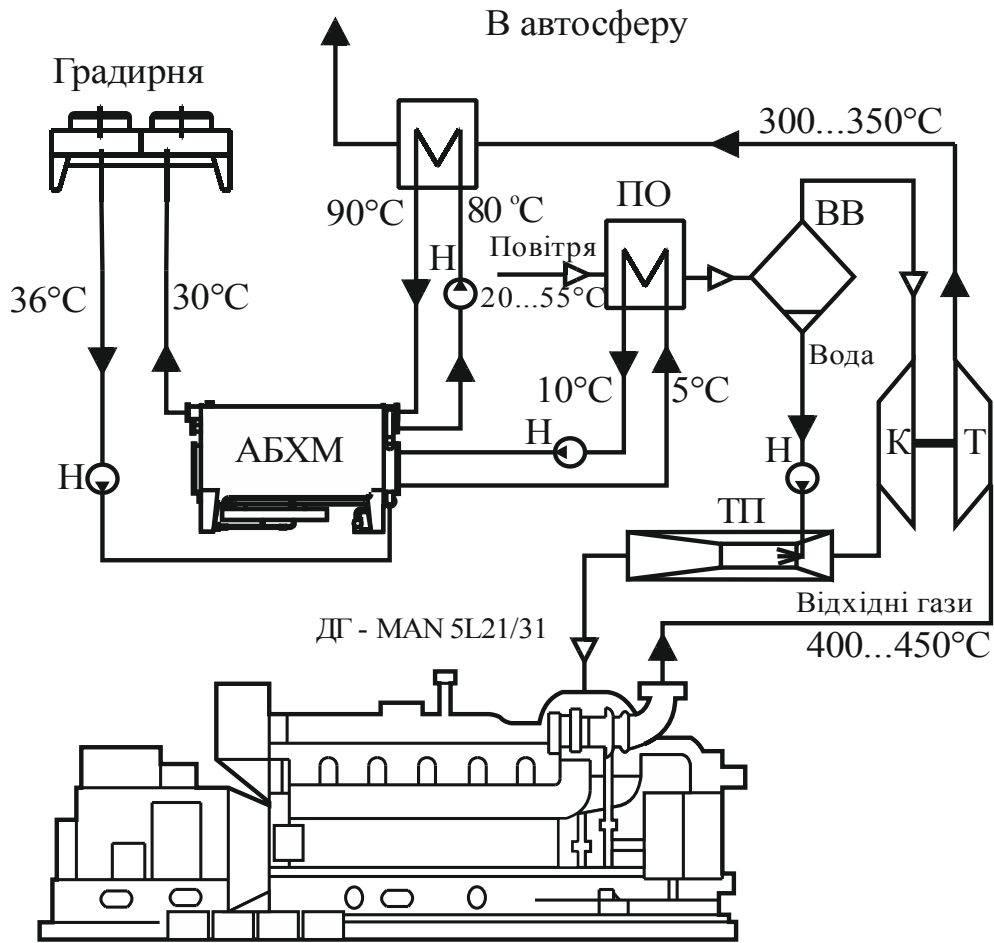


Рис. 1. Схема термопресорної системи охолодження наддувного повітря ДВЗ: ПО – повітроохолоджувач; ВВ – вологовідділювач; К – компресор; Т – турбіна; Н – насос; ТП – термопресор; ДГ – дизель-генератор

Температура відхідних газів за ТК для ДГ 5L21/31 складає $t_r = 300...350\text{ }^\circ\text{C}$ [2]. У якості АБХМ запропоновано застосувати бромисто-літєву АБХМ. Така машина має ряд переваг перед іншими тепловикористовуючими машинами: компактність і досить великий, як для тепловикористовуючих машин, тепловий коефіцієнт $\zeta = 0,8...1,0$. Температура теплоносія на вході в генератор АБХМ повинна складати близько $90\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 1), а температура теплоносія на виході з випарника АБХМ $t_0 = 7\text{ }^\circ\text{C}$. Така температура в ПО дозволяє отримати температуру охолодженого наддувного повітря $t_{\text{пов}} = 12\text{ }^\circ\text{C}$. Конденсат, що утворився при охолодженні в ПО, запропоновано застосувати для упорскування в термопресор. Розрахунок параметрів роботи термопресорної системи зроблено для діапазону температур повітря на вході $t_{\text{вх}} = 20...55\text{ }^\circ\text{C}$, і відносної вологості повітря $\phi = 60\%$.

З рис. 2 (а) видно, що коефіцієнт вологовипадіння при високих температурах повітря на вході

($t_{\text{вх}} = 45...55\text{ }^\circ\text{C}$) досягає $\xi = 3...4$. Зменшення вологості повітря на вході складає $\Delta d = 5...50\text{ г/кг}$ (рис. 2, б), при цьому загальне випадіння вологи в ПО складе $\Delta W = 5...100 \cdot 10^{-3}\text{ кг/с}$. У випадку термопресорної схеми без ПО на вході в турбокомпресор необхідна кількість води для впорскування в термопресор при $\pi_k = 4,0$ складає $W = 80...110 \cdot 10^{-3}\text{ кг/с}$, а при $\pi_k = 3,0$ – $W = 65...90 \cdot 10^{-3}\text{ кг/с}$. Охолодження повітря в ПО здійснюється до однакових параметрів, звідси приблизно постійна витрата води на упорскування в термопресор: для $\pi_k = 3,0$ – $W = 57 \cdot 10^{-3}\text{ кг/с}$; для $\pi_k = 4,0$ – $W = 73 \cdot 10^{-3}\text{ кг/с}$. При температурі $t_{\text{вх}} = 45...50\text{ }^\circ\text{C}$ система може функціонувати повністю автономно, тобто кількості води сконденсованої в ПО достатньо для забезпечення роботи термопресора. Такий діапазон температур відповідає температурним режимам в машинному відділенні. При менших температурах (холодні пори року) необхідна додаткова кількість води (до $52 \cdot 10^{-3}\text{ кг/с}$ при $t_{\text{вх}} = 20\text{ }^\circ\text{C}$).

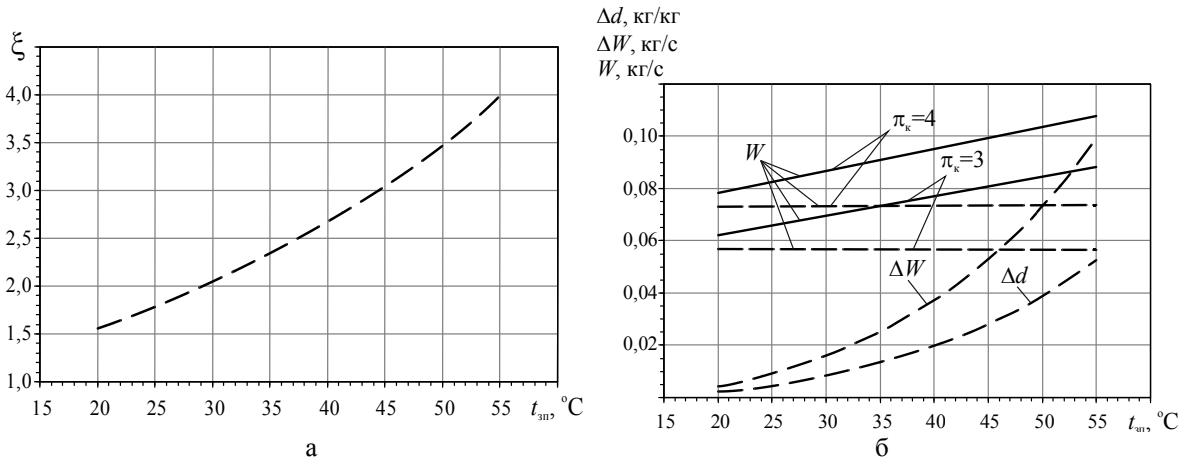


Рис. 2. Залежності коефіцієнта вологовипадіння ξ (а), зменшення вологовмісту Δd , кількість сконденсованої в ПО вологи ΔW , витрата води на впорскування в термопресорі W (б) від температури зовнішнього повітря $t_{вп}$:
 ———— термопресорна система без охолодження повітря на вході;
 - - - - - термопресорна система з охолодженням повітря на вході

Застосування попереднього охолодження повітря 4) на 10...25 кВт (5...12 %) при $\pi_k = 3,0$ і 15...35 кВт зменшує температуру повітря за компресором, а відповідно перед термопресором. Звідси менше підвищення тиску (рис. 3, а). Для схеми термопресорної системи без попереднього охолодження: при $\pi_k = 3,0$ – $\Delta P = 5...7$ %; при $\pi_k = 4,0$ – $\Delta P = 8...10$ %; для схеми термопресорної системи з попереднім охолодженням: при $\pi_k = 3,0$ – $\Delta P = 3,0...3,5$ %; при $\pi_k = 4,0$ – $\Delta P = 5,5...6,0$ %. Однак, температура повітря за термопресором значно нижче, ніж для схеми без попереднього охолодження (рис. 3, б), і складає $t_{пов2} = 56...58$ °C при $\pi_k = 3,0$ і $t_{пов2} = 66...67$ °C при $\pi_k = 4,0$.

Більші значення $\Delta N_{тк}$ по відношенню до схеми без попереднього охолодження зумовлені тим, що зменшення потужності за рахунок охолодження повітря і конденсації вологи має визначальний вплив ніж підвищення тиску в термопресорі.

Попереднє охолодження повітря на вході компресора дозволяє зменшити роботу на стиснення, а отже, збільшити потужність компресора $\Delta N_{тк}$ (рис.

Окрім стиснення і охолодження повітря до функції термопресорної системи входить екологічне зволоження. Так, вологовміст повітря d_2 на виході з термопресора складає 45...50 г/кг, при цьому температура повітря в порівнянні з системами типу CASS менша на 5...10 °C, що сприяє більшій паливній економічності двигуна.

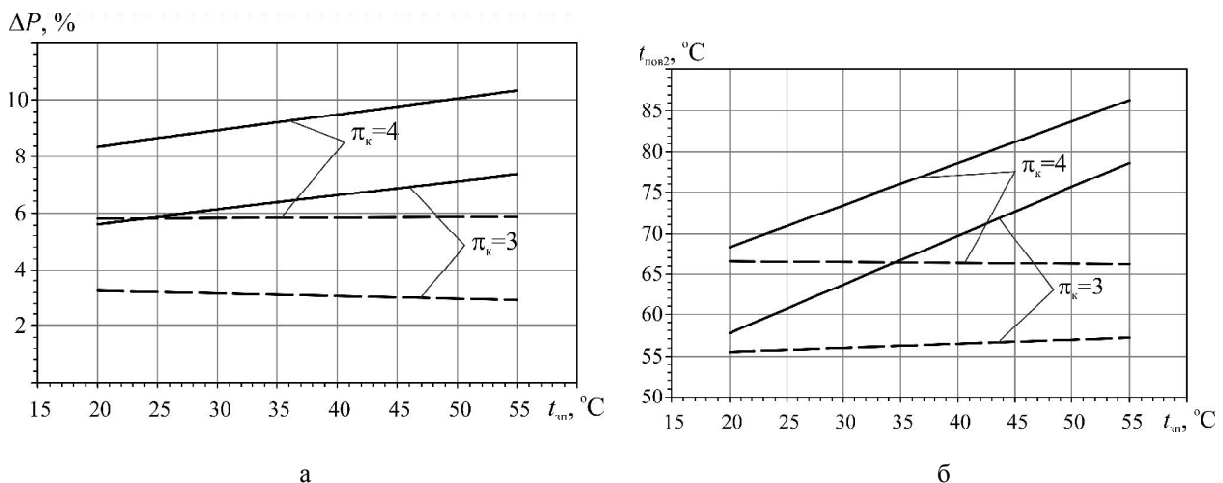


Рис. 3. Залежності підвищення тиску в термопресорі ΔP (а) і температури повітря на виході з термопресора $t_{пов2}$ (б) від температури зовнішнього повітря $t_{вп}$:
 ———— термопресорна система без охолодження повітря на вході;
 - - - - - термопресорна система з охолодженням повітря на вході

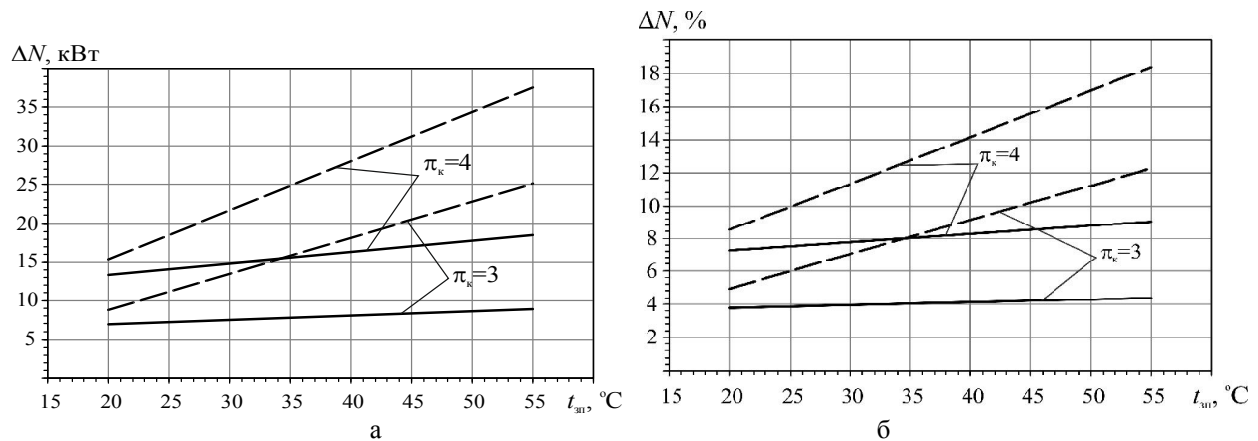


Рис. 4. Залежності підвищення потужності компресора $\Delta N_{\text{к}}$ (а) і потужності двигуна $\Delta N_{\text{д}}$ (б) від температури зовнішнього повітря $t_{\text{вн}}$:
 ———— термопресорна система без охолодження повітря на вході;
 - - - термопресорна система з охолодженням повітря на вході

Висновки

1. Розглянуто методологічний підхід до охолодження наддувного повітря в середньо-обертовому двигуні із застосуванням термогазодинамічного ефекту сумісно з попереднім охолодженням повітря перед компресором.

2. Застосування термопресорної системи дозволяє збільшити тиск повітря на $\Delta P = 3,0 \dots 6,0\%$ з одночасним зниженням температури повітря до $t_{\text{пов2}} = 55 \dots 70\text{ }^\circ\text{C}$, що у свою чергу, збільшує потужність компресора на $10 \dots 20\%$.

Література

1. Вулис, Л.А. Термодинамика газовых потоков [Текст] / Л.А. Вулис. – М.:Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 304 с.
2. Горбов, В.М. Энциклопедия судовой энергетики [Текст] / В. М. Горбов. – Николаїв: НУК, 2010. – 624 с.
3. Радченко, А.Н. Энергосберегающий экологически безопасный судовый кондиционер на базе дизельгенератора [Текст] / А.Н. Радченко, А.И. Бузник // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – №10(57). – С. 118–122.
4. Радченко, М.І. Підвищення ефективності газового двигуна внутрішнього згорання турбодетандерним охолодженням газоповітряної суміші [Текст] / М.І. Радченко, Д.В. Коновалов, Л.М. Воробйов // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2010. – № 10(77). – С. 62-65.
5. Радченко, М.І. Попереднє охолодження газоповітряної паливної суміші газових двигунів у детандертотермопресорних холодильних машинах [Текст] / М.І. Радченко, Д.В. Коновалов, Л.М. Вороб-

йов // *Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць ДонНУЕТ*. – Донецьк: ДонНУ-ЕТ, 2010. – Вип. 24. – С. 234–240.

6. Радченко, Р.Н. Использование сбросного тепла малооборотных дизелей для охлаждения воздуха на входе турбокомпрессоров [Текст] / Р.Н. Радченко, Н.Я. Хлопенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 8(75). – С. 24-28.

7. Wartsila 46 Technology review. [Text] // *Wartsila Corporation*. – 2008. – 20 p.

8. Коновалов, Д.В. Термопресорні системи охолодження судових ДВЗ [Текст] / Д.В. Коновалов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 10 (87). – С. 44–48.

9. Коновалов, Д.В. Застосування термогазодинамічного ефекту для проміжного охолодження в системах наддувного повітря ДВЗ [Текст] / Д.В. Коновалов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 8 (85). – С. 136–140.

10. Радченко, А.Н. Альтернативная технология получения пресной воды на судах теплоиспользующей холодильной машиной [Текст] / А.Н. Радченко, Р.Н. Радченко, Д.В. Коновалов // *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали молодих науковців науч.-техн. конф.* - Николаїв: НУК, 2011. – С. 353–355.

11. Захаров, Ю.В. Судовые установки кондиционирования воздуха и холодильные машины [Текст] / Ю.В. Захаров. – СПб.: Судостроение, 1994. – 504 с.

12. Степанов, И.Р. Некоторые задачи движения газа и жидкости в каналах и трубопроводах энергоустановок [Текст] / И.Р. Степанов, В.И. Чудинов. – Л.: Наука, 1977. – 200 с.

13. Живица, В.И. Промежуточные охладители с термопресором для двухступенчатых аммиачных холодильных установок [Текст] / В.И. Живица // *Холодильная техника*. – 2002. – № 5. – С. 18-20.

Надійшла до редакції 23.10.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.І. Живиця, Одеська національна морська академія, Одеса, Україна

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОХЛАЖДЕНИЮ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА СРЕДНЕОБОРОТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Д.В. Коновалов, А.А. Джури́нская

Рассмотрен методологический подход к охлаждению наддувочного воздуха в среднеоборотном двигателе с помощью применения термогазодинамического эффекта. Для повышения эффекта снижения температуры воздуха перед двигателем и увеличением мощности компрессора, а также для обеспечения автономности работы термодвигательной системы предложено осуществлять предварительное охлаждение перед компрессором, а влагу, которая конденсируется в теплообменнике впрыскивать в термодвигатель. Применение термодвигательной системы с предварительным охлаждением позволяет увеличить давление воздуха, с одновременным понижением температуры, что в свою очередь, увеличивает мощность компрессора на 10...20 % с соответствующим увеличением мощности двигателя.

Ключевые слова: термогазодинамический эффект, термодвигатель, двигатель, утилизация теплоты, наддувочный воздух, турбокомпрессор, экологическое увлажнение.

THE METHODOLOGICAL APPROACH NEAR COOLING OF SCAVENGING AIR OF MEDIUM SPEED ENGINE

D.V. Konovalov, A.O. Dzhurinskaya

The methodological approach is considered near cooling scavenging air by application of thermogasdynamic effect in medium speed engine. For the increase of effect of decline of temperature of air before an engine and increasing power compressor, and also for providing of noninteraction of work of the thermopressor system it is suggested to carry out the preliminary cooling before a compressor, and moisture which is condensed in heat-exchanger to inject in thermopressor. Application of the thermopressor system with the preliminary cooling allows to increase pressure of air, with a simultaneous lowering of the temperature, that in same queue, increases power compressor on 10...20 % with the proper increase of engine power.

Key words: thermogasdynamic effect, thermopressor, engine, utilization of warmth, scavenging air, turbo-charger, ecological moistening.

Коновалов Дмитро Вікторович – канд. техн. наук, доцент Херсонської філії Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна.

Джури́нская Анна Олександрівна – студентка енерготехнічного факультету Херсонської філії Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна, e-mail: zmeya_23_89@mail.ru.