

УДК 622.577

Д.В. КОНОВАЛОВ

Херсонська філія Національного університету кораблебудування ім. Макарова, Україна

ТЕРМОПРЕСОРНІ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ СУДНОВИХ ДВЗ

В роботі розроблено та проаналізовано схемні рішення термопресорних систем охолодження. Ефективність застосування термопресора проаналізовано для системи охолодження наддувного повітря з одноступінчастим стисненням. Як показали дослідження скорочення потужності, яку споживають компресори склало 7...12%, за рахунок чого в свою чергу вдалося підвищити потужність ДВЗ на 1...2%. Для цілей контактного охолодження наддувного повітря, а також екологічного зволоження наддувного повітря на вході в циліндри двигуна запропоновано спосіб тонкого розпилю води в наддувному повітрі термопресором.

Ключові слова: термопресор, наддувне повітря, турбокомпресор, контактне охолодження, двигун внутрішнього згорання.

Вступ

Резерви підвищення ефективності ДВЗ багато в чому пов'язані з удосконаленням зовнішніх систем, призначених для забезпечення оптимальних початкових параметрів робочого циклу ДВЗ, і перш за все – системи турбонаддуву. Скорочення потужності, яку споживає турбокомпресор наддувного повітря (ТК), забезпечує утворення резерву потужності турбіни ТК, яку можна було б передавати на вал двигуна або використовувати для приводу електрогенератора.

Застосування ефекту термогазодинамічної компресії (термопресії) дозволяє поєднати два процеси – контактне охолодження наддувного повітря і підвищення тиску, які забезпечують скорочення витрат потужності компресора. Термопресія – це підвищення тиску газу у процесі миттєвого випаровування води, упорскуваної в газовий (повітряний) потік, прискорений до швидкості, близької звуковій. При цьому на випаровування води відводиться теплота від наддувного повітря, в результаті чого знижується його температура. Термопресор (ТП) є компактним пристроєм, який за габаритами значно виграє порівняно з іншими охолоджувальними апаратами поверхневого й контактного типу і до того ж забезпечує певне підвищення тиску. Завдяки сумісній дії турбулізації прискореного повітряного потоку та миттєвого випаровування має місце ефективний розпил упорскуваної води.

Метою роботи є підвищення термодинамічної ефективності ДВЗ шляхом охолодження наддувного повітря з одночасним підвищенням його тиску (ефект термопресії), як наслідок, скорочення потужності, що споживає наддувний компресор, і відповідне зростання потужності ДВЗ.

1. Сучасний стан і особливості охолодження наддувного повітря ДВЗ

Охолодження наддувочного повітря застосовують для досягнення двох цілей: підвищення потужності і зниження теплового навантаження деталей ЦПГ двигуна.

Охолодження повітря дозволяє збільшити його густину а отже і масу заряду циліндра двигуна. Збільшення маси заряду повітря в циліндрі дозволяє спалювати більшу кількість палива і виконати основну задачу наддуву – збільшити потужність двигуна.

Поряд з підвищенням потужності двигуна, охолодження дозволяє покращити умови роботи деталей ЦПГ завдяки зниженню температури поршня, втулки і кришки циліндра, органів газообміну.

На рис. 1 наведено схема системи охолодження наддувного повітря з одноступінчастим стисненням повітря. В сучасних суднових дизелях охолоджувач наддувного повітря (ОНП) являє собою теплообмінний апарат з декількома тепловикористовуючими контурами: високотемпературний контур для отримання пари низького тиску, низькотемпературний контур для підігріву живильної води парових котлів, контур системи гарячого водопостачання та опалення, охолодження забортною водою. За ОНП встановлюються віддільники рідини (ВР).

В сучасних ДВЗ для зниження викидів в атмосферу NO_x застосовують зволоження наддувного повітря [1, 2]. Кількість води, що подається у ДВЗ з наддувним півтрям має бути в 3 рази більше від кількості спалюваного палива. Це дозволить знизити емісію азоту на 70...80%. Такий ефект обумовлений тим, що водяна пара внаслідок високої теплоємності відбирає на пароутворення значну кількість теплоти,

що приводить до зниження температури в камері сгоряння. 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 утворяться оксидів азоту.

Використання рідини в термопресорі, у випадку його встановлення за ТК дозволить частково або повністю виключити застосування більш складних конструктивно систем зволоження наддувного повітря (НАМ – Humid Air Motor).

Зважаючи на це термопресорне охолодження може дозволить з одного боку забезпечити інтенсивне охолодження повітря, а з другого – забезпечить значно більш ефективне розпилення води в потоці газу зі швидкістю біля звукової.

Відомий спосіб використання енергії відхідних газів дизельних ДВЗ в газовій турбіні, що приводить наддувний компресор підвищеного тиску (понад тиск наддуву), із наступним зниженням температури стисненого повітря спочатку у водяному охолоджувачі наддувного повітря (ОНП), а потім у процесі розширення в турбодетандері до необхідного тиску наддуву двигуна [3, 4]. У роботах [5, 6] показана доцільність використання надлишкової енергії відхідних газів дизельних ДВЗ у турбодетандерних холодильних машинах (ТДХМ) для попереднього охолодження зовнішнього повітря на вході ТК.

2. Особливості процесу термогазодинамічної компресії

В техніці широко використовуються процеси, в яких рух газу по каналах відбувається при різноманітних зовнішніх діях. До них можна віднести зміну площі поперечного перетину каналу, обмін енергією з навколишнім середовищем у вигляді передачі механічної енергії або теплоти, тертя о стінки каналу, зміна витрати газу унаслідок підведення рідини у потік, процес механічної і теплової взаємодії крапель рідини з потоком газу та ін.

Інтенсивне підведення тепла викликає збільшення аеродинамічного опору, а відведення – його зменшення. При інтенсивному відведенні тепла і відповідній організації робочого процесу виявляється можливим не тільки значне зменшення опору, але і збільшення повного тиску в потоці газу. В цьому випадку за рахунок переважаючої теплової дії (відведення теплоти) відбувається підтискання газового потоку. Апарат, в якому за рахунок відведення теплоти від газового потоку відбувається збільшення повного тиску газу, отримав назву *термопресора*.

Відведення теплоти може здійснюватися шляхом контактного теплообміну через стінки каналу і шляхом випарного охолодження уприскуваної в

газовий потік охолоджуючої води. Можливість протікання процесу з підвищенням повного тиску потоку при випарному охолодженні вперше теоретично була показана Л.А. Вулісом [7] в 1946 р. Питання теорії робочого процесу, конструювання і випробування термопресора отримали освітлення в літературі [8 – 10].

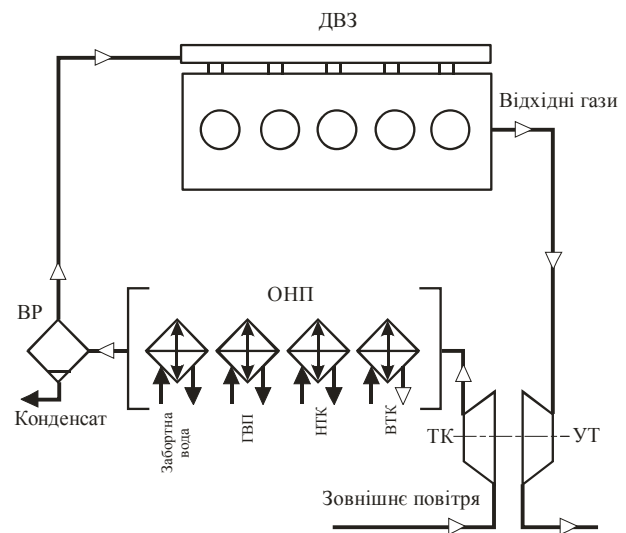


Рис. 1. Схема системи охолодження наддувного повітря суднового середньообертового дизеля:

ВР – віддільник рідини; ОНП – охолоджувач наддувного повітря; ТК – турбокомпресор; ГВП – система гарячого водопостачання; НТК – низкотемпературний контур; ВТК – високотемпературний контур

В реальному термопресорі процес розширення газу відбувається в добре спрофільованому соплі практично адіабатно. У вузьку частину сопла, де потік газу рухається із швидкістю $(0,5 \dots 0,9)M$, подається потік охолоджуючої води, що механічно дрібно розпилюється. В ділянці випаровування відбувається взаємодія цих потоків, що виражається в розгоні і дробленні крапель і деякому гальмуванню газового потоку, підігріві і випаровуванні крапель, охолодженню газу. Утворюється двофазний потік, що рухається із великою швидкістю, в якому відбуваються процеси тепло- і масообміну, зміна складу парогазожидкостной суміші і всіх параметрів потоку. Ці процеси в тому або іншому ступені продовжуються і в дифузорі, де відбувається загальне уповільнення потоку і збільшення статичного тиску.

В роботі [8, 10] наведено результати експериментальних і теоретичних досліджень. Вони дозволили авторам зробити висновок, що підвищення повного тиску на 20% цілком досяжно. Проведені досліді на малих моделях термопресора ($G_r = 0,25$ кг/с) і низьких значеннях початкових температур ($T_1 = 300 \dots 350$ °С) показали, що відносний ефект термопресії досягав 20...30% при $G_r = 0,24$ кг/с.

Все це дає можливість зробити висновок про доцільність застосування термопресора у системі охолодження наддувного повітря при цьому є можливість забезпечення високої інтенсивності процесу охолодження (менші габарити теплообмінника), а також високоефективне розпилення рідини в потоці. Розрахунок термогазодинамічної компресії здійснювався за методиками [7, 9].

3. Розробка та аналіз ефективності схеми системи термопресорного охолодження наддувного повітря ДВЗ

В роботі було розроблено і проаналізовано схемне рішення системи охолодження наддувного повітря із застосуванням термопресорного охолодження. На рис. 2 наведена схема з застосуванням термопресора у якості ОНП за основним турбокомпресором. Повітря всмоктується одноступінчастим турбокомпресором (ТК) і стискається до тиску менше тиску на вході в циліндри ДВЗ. Після цього повітря з високою температурою і тиском поступає на випарне охолодження в термопресор (ТП). При цьому завдяки ефекту газодинамічної компресії температура повітря значно знижується, а тиск підвищується до необхідної величини, відповідної на вході в двигун. Остаточне зниження температури здійснюється в охолоджувачі наддувного повітря (ОНП).

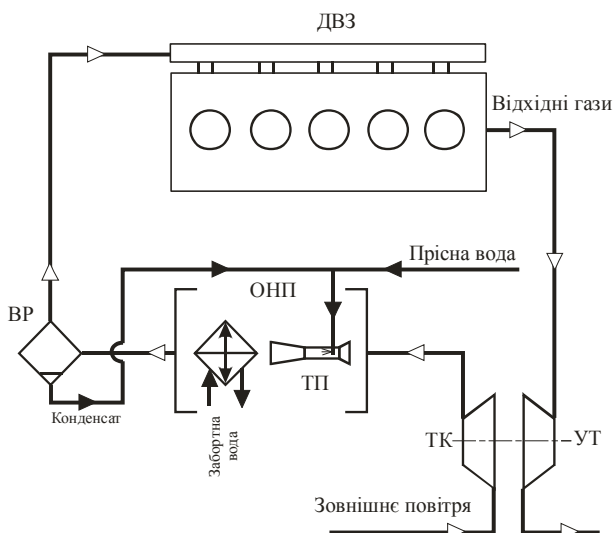


Рис. 2. Схема системи охолодження наддувного повітря із застосуванням термопресора:

ВР – віддільник рідини; ОНП – охолоджувач наддувного повітря; ТК – турбокомпресор; ТП – термопресор; ПОП – проміжний охолоджувач повітря; УТ – утилізаційна турбіна

Аналіз ефективності схем проводився відносно стандартних класичних схем охолодження наддувного повітря в одноступінчастих турбокомпресорах. Розрахунки здійснені для середньообертового двигуна 5L21/31 фірми MAN B&W з потужністю

$N_e = 1000$ кВт і $n = 1000$ об/хв.

Підвищення тиску в термопресорі $\Delta P_{\text{тп}}$ значно залежить від величини зниження температури при охолодженні $\Delta t_{\text{тп}}$, а отже велике значення має температура повітря на вході $t_{\text{тп1}}$. Температура перед термопресором відповідає температурі повітря на нагнітанні турбокомпресора. Температура повітря перед термопресором складає $t_{\text{тк}} = 150 \dots 240$ °С. Температури за ТК тим вище, чим вище температура на всмоктуванні і степінь підвищення тиску у ТК π_k .

За мінімальну температуру на виході з ТП $t_{\text{тп2}}$ приймалася температура на 2...3 °С вище температурної точки роси. Температура повітря за термопресором складала $t_{\text{тп2}} = 60 \dots 92$ °С. Температурний перепад в термопресорі (охолодження) складає $\Delta t_{\text{тп}} = t_{\text{тп1}} - t_{\text{тп2}} = 90 \dots 170$ °С. Однак, зниження температури доцільно оцінювати за відношенням температур $\Delta T_{\text{відн}} = (T_{\text{тп1}}/T_{\text{тп2}}) = 1,27 \dots 1,47$.

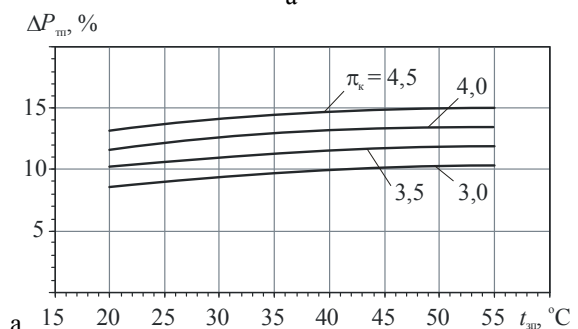
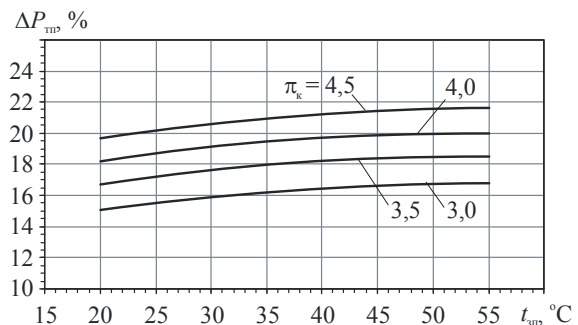


Рис. 3. Відносне підвищення повного тиску в ідеальному термопресорі $\Delta P_{\text{тп}} = P_{\text{тп2}}/P_{\text{тп1}}$ (а) і в реальному термопресорі (б) при різних π_k в залежності від температури повітря на всмоктуванні $t_{\text{тп}}$

Ефект термопресії буде вище при збільшенні $\Delta T_{\text{відн}}$. Для ідеального термопресора (втрати тиску на подолання гідравлічних опорів не враховуються) підвищення тиску складало $\Delta P_{\text{тп}} = 15 \dots 22$ % (рис. 3, а) – та $\Delta P_{\text{тп}} = 9 \dots 17$ % (рис. 3, б) – для реального термопресора. Більші значення тисків відповідають більш високим температурам зовнішнього повітря (45...55 °С). Підвищення тиску за термопресором знижує π_k турбокомпресорної установки. Так, на-

приклад, при загальному $\pi_k = 4,6$ степiнь пiдвищення тиску для турбокомпресора знижується до $\pi_k = 4,0 \dots 4,1$, а при загальному $\pi_k = 3,0$ до $2,7 \dots 2,8$.

З iншого боку пiдвищення температури повітря на всмоктуванні збiльшує роботу на стискування і як наслідок потужність ТК. При одноступiнчастому стисненні зменшення потужності ΔN_{TK} збiльшується від 12 до 28 кВт (рис. 4, а) в залежності від π_k або з 7 до 12 % (рис. 4, б) відносно потужності турбокомпресора і з 1,2 до 3,0 % (рис. 5) відносно потужності двигуна.

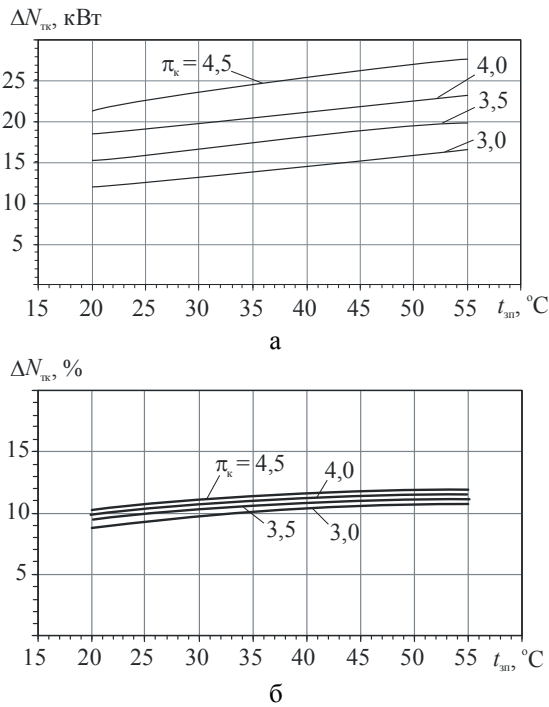


Рис. 4. Зменшення потужності турбокомпресорів ΔN_{TK} в кВт (а) і в % (б) при різних π_k в залежності від температури повітря на всмоктуванні $t_{вп}$

Витрата води, що необхідна для повного випаровування у термопресорі G_w складає $0,06 \dots 0,12$ кг/с або $0,2 \dots 0,4$ % відносно витрати наддувного повітря (рис. 6).

З наведеного вище аналізу, можна зробити висновки про доцільність застосування термопресора в одноступiнчастій схемі стиснення повітря. Конденсат з віддiльника рiдини (ВР) доречно застосовувати для впорскування у термопресор (рис. 2).

Висновки

1. Запропоновано принцип охолодження наддувного повітря ДВЗ із одночасним пiдвищенням тиску – ефект термопресії.
2. Застосування термопресорів у системах охолодження наддувного повітря дає можливість скоротити потужність, яку споживають компресори N_{TK} для одноступiнчастої системи наддуву на $7 \dots 12$, за

рахунок чого в свою чергу пiдвищити потужність двигуна на $1 \dots 2$ % в залежності від температури зовнішнього повітря $t_{вп}$ і степiнь пiдвищення тиску π_k .

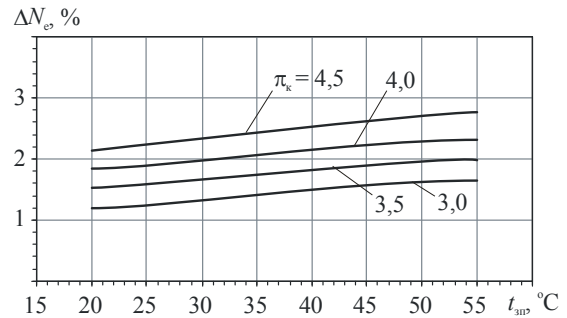


Рис. 5. Відносний приріст потужності ДВЗ ΔN при різних π_k в залежності від температури повітря на всмоктуванні $t_{вп}$

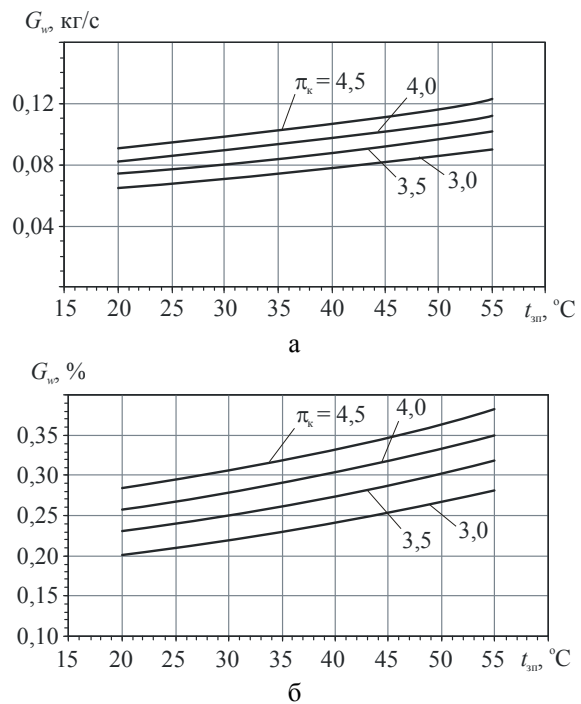


Рис. 6. Абсолютна G_w (а) і відносна g_w (б) витрата води в термопресорі при різних π_k в залежності від температури повітря на всмоктуванні $t_{вп}$

3. З пiдвищенням температури зовнішнього повітря $t_{вп}$ на вході ТК ефект від застосування термопресорного охолодження наддувного повітря зростає: збiльшується величина скорочення потужності ТК ΔN_{TK} із відповідним зростанням потужності двигуна.

4. Визначено відносні (віднесені до витрати повітря) масові витрати води, яку необхідно упорскувати при повному її випаровуванні в термопресорі, які склали $0,2 \dots 0,4$ %.

5. Для цілей контактного охолодження наддувного повітря, а також екологічного (з метою зменшення емісії оксидів азоту NO_x) зволоження наддувного повітря на вході в циліндри ДВЗ запропоно-

вано спосіб тонкого розпилу води в наддувному повітрі термопресором. Це виключає необхідність застосування складних систем розпилу механічними форсунками.

6. Запропоновано воду, що відводиться у процесі охолодження вологого повітря в охолоджувачі наддувного повітря (ОНП), використовувати для упорскування в термопресор.

7. При більш високій інтенсивності теплообміну при контактному охолодженні в ТП порівняно з поверхневим у традиційних ОНП відповідно менші габарити ТП порівняно з ОНП.

Дослідження виконане за фінансової підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень у рамках гранту Президента України.

Література

1. Двигатели внутреннего сгорания. Кн. 1. Теория рабочих процессов / В.Н. Луканин, К.А. Морозов, А.С. Хачян и др. – М.: Высшая школа, 2007. – 479 с.
2. Горбов В.М. Енциклопедія суднової енергетики / В.М. Горбов. – Миколаїв: НУК, 2010. – 624 с.
3. Екологічно чисті газові двигуни внутрішнього згорання з утилізацією низькопотенційної енергії продуктів згорання / А.М. Радченко, М.І. Радченко, Д.В. Коновалов, Л.М. Воробйов // Наукові праці ЧДУ ім. П. Могили. Серія «Техногенна безпека». – Миколаїв: ЧДУ, 2010.

4. Радченко А.Н. Энергосберегающий экологически безопасный судовый кондиционер на базе дизельгенератора / А.Н. Радченко, А.И. Бузник // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 10 (57). – С. 118-122.

5. Радченко М.І. Підвищення ефективності газового двигуна внутрішнього згорання турбодетандерним охолодженням газоповітряної суміші / М.І. Радченко, Д.В. Коновалов, Л.М. Воробйов // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2010. – № 10 (77). – С. 62-65.

6. Радченко Р.Н. Охлаждение воздуха на входе судовых ДВС утилизационной воздушной холодильной машиной / Р.Н. Радченко, А.И. Бузник // *Вестник двигателестроения*. – 2008. – № 3. – С. 77-81.

7. Вулис Л.А. Термодинамика газовых потоков / Л.А. Вулис. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 304 с.

8. Ерофеев В.Л. Экспериментальное исследование термпрессора / В.Л. Ерофеев // *Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация флота: тр. ленинградского ин-та водного транспорта*. – Л., 1974. – Вып. 147. – С. 25-30.

9. Живица В.И. Промежуточные охладители с термпрессором для двухступенчатых аммиачных холодильных установок / В.И. Живица // *Холодильная техника*. – 2002. – № 5. – С. 18-20.

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

Надійшла до редакції 27.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.І. Живица, Одеська державна академія холоду, Одеса, Україна.

ТЕРМОПРЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ НАДДУВНОГО ВОЗДУХА СУДОВЫХ ДВС

Д.В. Коновалов

В работе разработаны и проанализированы схемные решения термопресорных систем охлаждения. Эффективность применения термпрессора проанализирована для системы охлаждения наддувного воздуха с одноступенчатым сжатием. Как показали исследования сокращения мощности, которую потребляют компрессоры составило 7...12 %, за счет чего в свою очередь удалось повысить мощность ДВС на 1...2%. Для целей контактного охлаждения наддувного воздуха, а также экологического увлажнения наддувного воздуха на входе в цилиндры двигателя предложен способ тонкого распыла воды в наддувочном воздухе термопресором.

Ключевые слова: термопресор, наддувочный воздух, турбокомпрессор, контактное охлаждение, двигатель внутреннего сгорания.

THE TERMOPRESSOR SYSTEMS OF COOLING AIR OF ENGINE SHIPS

D.V. Konovalov

The scheme decisions of the termopressor systems of cooling are developed and analysed in work. Efficiency of application of termopressor is analysed for the system of cooling air with the single-stage compression. As researches of abbreviation of power which are consumed by compressors made 7...12 %, due to what in same queue it was succeeded to promote the internal-combustion engine on 1...2 %. The method of thin disperse water in cooling air of termopressor of purposes of the contact cooling of cooling air and ecological moistening of cooling air on the entrance in the cylinders of engine.

Key words: termopressor, cooling air, turbokompressor, contact cooling, engine.

Коновалов Дмитро Вікторович – канд. техн. наук, доцент кафедри теплотехніки Херсонської філії національного університету кораблебудування ім. Макарова, Херсон, e-mail: dimitriy_ko@mail.ru.