

МОЖЛИВІ ШЛЯХИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОАКУСТИЧНИХ ТЕПЛОВИХ МАШИН В СИСТЕМАХ СЕУ

Коробко В.В.

Національний університет кораблебудування ім. адмірала С.О. Макарова, м. Миколаїв

У статті розглянуті зміни в структурі скидних енергетичних потоків сучасних СЕУ, які пов'язані з використанням сучасних високоефективних двигунів та LNG палив. Показано, що зменшення температурних рівнів наявних скидних теплових ресурсів та поява криогенних робочих середовищ потребує впровадження нових технічних рішень. Термоакустичні технології можуть бути використані в СЕУ для утилізації таких скидних ресурсів. Базова теоретична модель свідчить, що існує принципова можливість роботи термоакустичних машин з використанням низько-температурних джерел скидної енергії. Запропоновано універсальну теплову схему утилізації вторинних енергоресурсів СЕУ з проміжним високотемпературним теплоносієм. Для СЕУ з LNG паливами розроблена принципова схема енергогенеруючої системи регазифікації криогенного палива з використанням термоакустичних технологій. Технічні рішення запропоновані в роботі можуть бути використані в сучасних СЕУ для підвищення їх загальної ефективності. Термоакустичні технології потенційно здатні забезпечити можливості для вдосконалення СЕУ, розробки принципово нових систем.

Ключові слова: СЕУ, скидні енергетичні ресурси, термоакустика, LNG палива, регазифікація, теплові машини.

Вступ. Останнім часом у практиці судноплавства спостерігається стійка тенденція до появи нових типів суден. Оскільки тип судна та його призначення визначають склад суднової енергетичної установки – відповідно можна очікувати змін в ньому. Розвиток морських технологій видобутку вуглеводневих палив зумовив потребу у принципово нових суднах, які забезпечують весь технологічний ланцюг цієї галузі: від розвідки та видобування до переробки та транспортування нафтопродуктів та скрапленого газу. Перехід до промислового використання відновлювальних енергетичних ресурсів – енергії вітру, морських течій, сонячної енергії – забезпечується з допомогою спеціалізованих суден, здатних перевозити великогабаритні грузи та виконувати монтажні роботи. Суттєвих змін зазнали транспортні судна – контейнеровози, танкери, пасажирські та інші. Однак незмінними залишилися вимоги до СЕУ – економічна ефективність та екологічна чистота. Тому в суднової енергетиці зберігається постійний інтерес до нових ефективних технологій енергозбереження.

Ціль роботи – визначення найбільш раціональних напрямків впровадження термоакустичних технологій в сучасній суднової енергетиці.

Постановка задачі. Найбільш поширений тип судових двигунів – двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ). Виробники судових ДВЗ, завдяки впровадженню нових технологій та наукових розробок, досягли суттєвих успіхів у підвищенні їх економічності та екологічності. Зараз, для СЕУ сучасних суден пропонуються двигуни, характеристики яких задовольняють вимогам TIER II та TIER III. За таких умов склалась ситуація, коли традиційні схеми утилізації ВЕР на суднах стають малоефективними або економічно недоцільними і стає актуальною задача пошуку нових технологій.

Розгляд проблеми. Наявна інформація щодо стану та тенденцій розвитку суднової енергетики свідчить, що в цій галузі доля сталих або безальтернативних рішень постійно зменшується, відповідно з'являється потреба у принципово нових технічних рішеннях [1–3]. Так, все частіше розглядаються варіанти енергетичних установок суден, в яких передбачається використання відновлювальних джерел енергії – вітру, сонячного випромінювання, що в свою чергу відкриває шлях до створення гібридних енергетичних установок. З'являються судна, у складі яких використовуються енергетичні установки на базі паливних елементів, які здійснюють безпосереднє перетворення енергії палива в електричну [4, 5].

Аналіз характеристик сучасних СЕУ з новітніми моделями ДВЗ показує, що змінилися складові теплового балансу головного двигуна та параметри наявних вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) СЕУ. Суттєво зросли температури стислого повітря за турбонагнітачем, зменшились температури відходячих газів. На суднах та в системах СЕУ з'явилися робочі речовини з криогенною температурою (LNG палива та криогенні грузи) (табл. 1).

Відповідні зміни відбуваються і в складі СЕУ. Так, в проектах нових суден все частіше відмовляються від використання утилізаційних парогенераторів та водяної пари як теплоносія. Замість них поширюються утилізаційні системи на базі високо-температурних органічних теплоносіїв – THERMAL FLUID SYSTEMS. Такий підхід потенційно надає нові можливості для вдосконалення характеристик ЕУ суден, суттєво спрощує їх конструкцію, дозволяє запропонувати та реалізувати оригінальні схемні рішення.

Таблиця 1 – Параметри теплоносіїв вторинних теплових ресурсів сучасних суднових ДВЗ

Теплоносій	МОД	СОД	Характеристика ВЕР
	Температура [K]		
Відхідні гази ДВЗ	490–530	500–690	Високотемпературні – температура вище за доквілля
Надувне повітря	400–490	380–470	–
Рідина системи охолодження	355–360	360–370	–
Оточуюче середовище, повітря та забортна вода	298	298	ISO ambient reference conditions
LNG паливо	111	111	Низькотемпературні або криогенні – температура нижча за доквілля
LPG паливо	225	225	–
120/510 Ethylene (груз)	169	169	–

Перспективним напрямом для систем утилізації ВЕР на суднах можна вважати застосування термоакустичних теплових машин (ТАТМ). Термоакустичні апарати – двигуни (ТАД) та рефрижератори (ТАР) – забезпечують пряме перетворення теплової енергії в механічну, і навпаки. ТАТМ суттєво відрізняються від традиційних машин. Оскільки в їх складі відсутні будь-які рухомі механічні елементи, ці апарати мають високу надійність. У ТАТМ не використовуються шкідливі для довкілля речовини. Завдяки конструктивній простоті ТАТМ мають значно меншу вартість в порівнянні з традиційними тепловими машинами, тому вони можуть застосовуватись для утилізації малих обсягів ВЕР.

У практиці суднобудування існують приклади успішного використання термоакустичних рефрижераторів в складі ЕУ фрегату «Deуо» ВМС США. Існують проекти та створені діючі установки скраплення природного газу, які призначені для використання на суднах FPSO рис. 1. В аерокосмічній техніці реалізовані декілька проектів з використанням ТАТМ, це бортові джерела живлення, установки скраплення водню [6–8].

Застосування систем утилізації ВЕР на базі ТАТМ доцільно в разі їх суттєвих переваг над традиційними технологіями або коли їх використання надає судновій енергетичній установці нові якості. Велика перевага ТАТМ – можливість використання ними різних джерел теплової енергії, як високотемпературних, так і низькотемпературних або криогенних. Це питання слід розглянути більш детально.

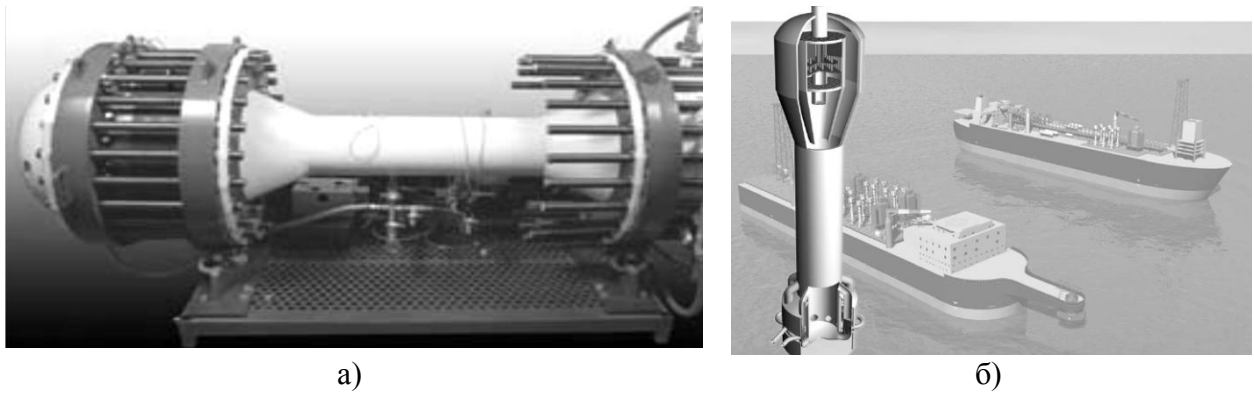


Рис. 1 – а) TAP TRITON система охолодження електроніки фрегата Deyo; б) термоакустична установка скраплення газу для FPSO, (США)

Робота ТАТМ основана на термоакустичному ефекті – самочинному виникненні акустичних пульсацій в газовому середовищі в об'ємі резонатора за наявності необхідного попероздовжнього градієнту температур ∇T_m в пористій матриці (стеку) [7, 8]. Цей градієнт у стеку формується за допомогою двох теплообмінників – нагрівача та охолоджувача, скрізь котрі прокачуються відповідні теплоносії (рис. 2).

Попероздовжній градієнт температури стеку – ∇T_m можна визначити як:

$$\nabla T_m = \frac{dT_m(x)}{dx} \approx (T_H - T_L) / L_S. \quad (1)$$

Крім попероздовжнього градієнту ∇T_m , важливою характеристикою для термоакустичного процесу є ΔT_{crit} – критичний температурний градієнт, який дорівнює:

$$\nabla T_{crit} = \frac{p_1 \omega}{\rho_m c_p u_{s1}}, \quad (2)$$

де T_m, p_m, ρ_m, c_p – теплофізичні параметри робочого середовища, відповідно – середня температура, тиск, щільність, теплоємність; $\omega = 2\pi f$ – кутова частота акустичної хвилі; p_1 та u_{s1} – амплітуди коливань акустичного тиску та коливної швидкості в акустичній хвилі.

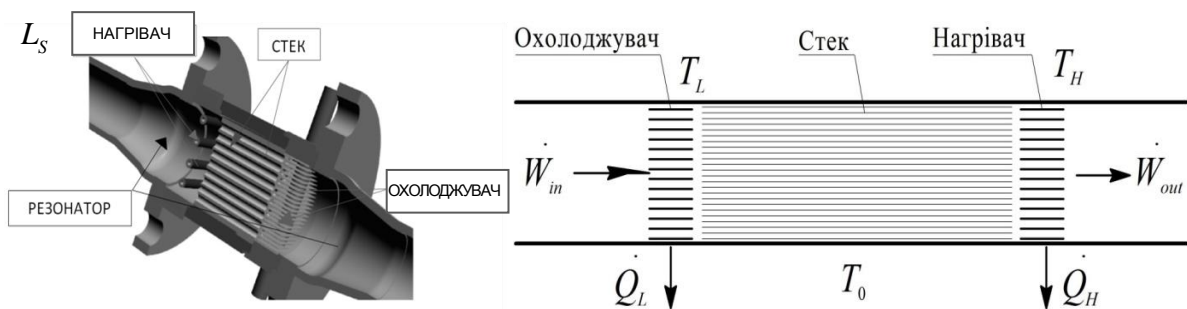


Рис. 2 – Принципова схема модулю термоакустичного перетворювача

ТАТМ працює в якості теплового двигуна, коли виконуються певні умови, а саме температура T_H перевищує температуру початку самочинних пульсацій T_{onset} :

$$T_H \geq T_{onset} > T_L \quad (3)$$

та

$$\nabla T_m / \nabla T_{crit} > 1. \quad (4)$$

У разі, коли $\frac{\nabla T_m}{\nabla T_{crit}} < 1$ ТАТМ працює як рефрижератор, поглинаючи акустичну енергію, а в разі $\frac{\nabla T_m}{\nabla T_{crit}} > 1$ – ТАД продукує механічну енергію у вигляді акустичної хвилі.

Величини ∇T_{crit} та T_{onset} залежать від багатьох чинників, таких як конструктивні особливості ТАД та термодинамічного циклу, що реалізований в навісному ТАД (цикл Брайтону чи Стірлінгу), матеріалу стеку (регенератору), робочого тиску в резонаторі, фізичних якостей робочого газу, тощо.

В [8] показано, що в термоакустичних перетвореннях, які відбуваються в об'ємі стеку, задіяний так званий повний потік енергії – \dot{H}_{2TAD}^{HEX} , який, з певними припущеннями, може бути представлений у вигляді

$$\dot{H}_{2TAD}^{HEX} = \frac{1}{4} \Pi \delta_k \frac{\beta T_m p_1 u_{s1}}{(1 + Pr)(1 + \varepsilon_s) \Lambda} \times \left[\Gamma \frac{1 + Pr^{1/2} + Pr(1 + \varepsilon_s)}{1 + Pr^{1/2}} - \left(1 + Pr^{1/2} - \frac{\delta_v}{y_0} \right) \right] - \Pi (y_0 k + L k_s) \frac{dT_m}{dx} \quad (5)$$

Відповідно, акустичну потужність \dot{W}_{TAD} , яку генерує ТАД, можна розрахувати за допомогою наступного виразу:

$$\dot{W}_{TAD} = \left(\frac{\frac{1}{4} \Pi \delta_k L_s (\gamma - 1) \varpi (p_{s1})^2}{\rho_m a^2 (1 + \varepsilon_s)} \right) \times \left(\frac{\Gamma}{(1 + Pr^{1/2}) \Lambda} - 1 \right) - \frac{1}{4} \frac{\Pi \delta_v L_s \omega \rho_m u_{s1}^2}{\Lambda} \quad (6)$$

Втрати акустичної енергії на поверхні резонатору ТАТМ, радіусом R та довжиною L_{res} , можна оцінити, як:

$$E_{diss}^{\bullet} = \frac{1}{4} \frac{(p_{s1})^2}{\rho_m c^2} \omega \pi R L_{res} \left[\delta_k \frac{(\gamma - 1)}{(1 + \varepsilon_s)} \left(1 + \frac{2R}{L_{res}} \right) + \delta_v \right], \quad (7)$$

де Π, L, L_{res} – периметр, довжина стеку та довжина резонатору; $\delta_s = \sqrt{2\lambda_s / \rho_s c_s \omega}$ – товщина термічного граничного шару в матеріалі стеку; $\delta_k = \sqrt{2\lambda_k / \rho_m c_p \omega}$ – товщина термічного граничного шару в газі, що контактує зі стінкою; $\delta_v = \sqrt{2\nu / \omega}$ – величина в'язкісного пограничного шару; $\Lambda = 1 - \delta_v / y_0 + \delta_v^2 / 2y_0^2$ – масштабний фактор; $\Gamma = \Delta T_m / \Delta T_{crit}$ – нормалізований градієнт температури.

Наведені вирази свідчать, що потужність ТАД залежить від комплексу теплофізичних параметрів робочого тіла та стеку, геометричних розмірів та температурного градієнту.

Для виникнення акустичних коливань та роботи ТАД суттєвим є повздовжній градієнт температури в матриці – ΔT_m , і неважливо, яким чином він формується. Принциповою є лише різниця між температурою нагрівача T_H та температурою охолоджувача T_L , температура довкілля не суттєва.

Зрозуміло, що температура джерела теплової енергії T_H визначається параметрами наявних теплових ресурсів. Нижня температура T_L в ТАТМ може формуватись як довкіллям, так і іншими теплоносіями, в тому числі і криогенними речовинами.

Аналізуючи матеріальні потоки робочих середовищ сучасних СЕУ з ДВЗ можна визначити джерела вторинної теплової енергії, які потенційно придатні для використання ТАТМ.

Враховуючи досвід експлуатації існуючих суднових систем утилізації ВЕР, можна вважати доцільним прийняти в якості базової схему суднової термоакустичної системи з проміжними теплоносіями, яка показана на рис. 3 [9].

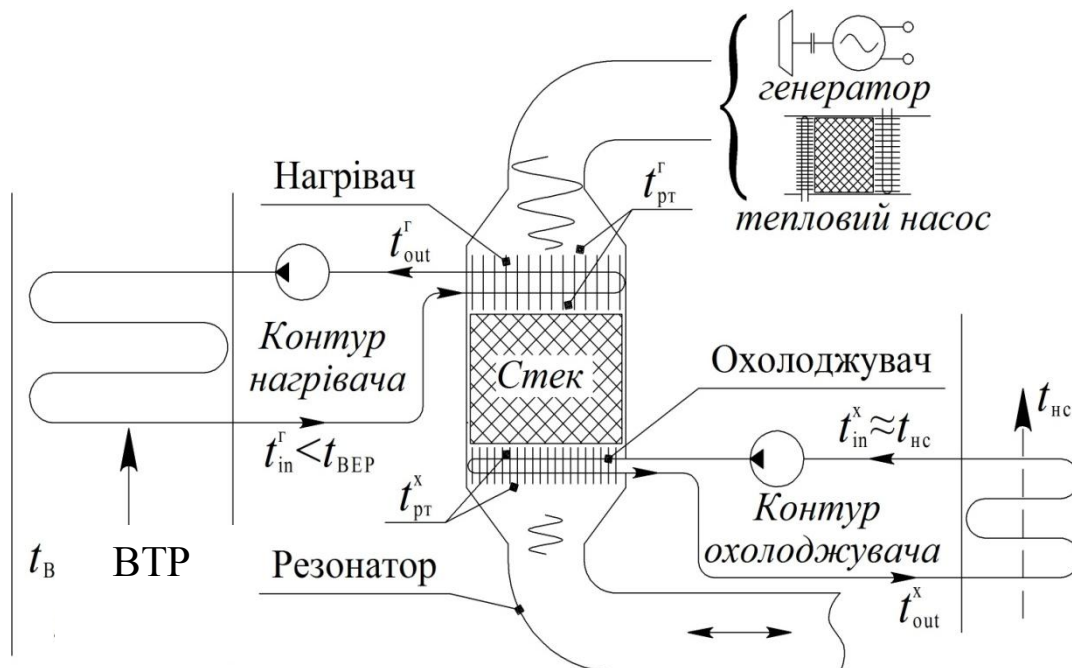


Рис. 3 – Принципова схема системи утилізації ВЕР з допомогою ТАТМ

Використання в системах СЕУ високотемпературних рідкісних теплоносіїв (ВРТ) значно спрощує застосування термоакустичних апаратів і робить цю схему універсальною. Проміжні циркуляційні контури з ВРТ надають змогу ТАТМ працювати у складі систем ЕУ, використовуючи наявні ВЕР, різні за температурними рівнями та складом.

У практиці термоакустики прийнято, що коли в якості стоку теплової енергії розглядається оточуюче середовище, то маємо «heat-source driven thermoacoustic engine – НТЕ», та коли температура стоку значно нижча за температуру довкілля – відповідно маємо «cold-source-driven thermoacoustic engine – СТЕ».

ТАТМ здатні ефективно працювати у складі криогенних систем, оскільки для їх роботи потрібна лише наявність повздовжнього градієнту температури у стеку, при цьому абсолютні значення температур неважливі. Можливість роботи НТЕ ТАТМ була підтверджена експериментально в роботі [10].

Оскільки механічна енергія в ТАТМ існує у хвильовій формі, то найбільш просто її використовувати в ТАР та термоакустичних теплових насосах [11], але існують діючі зразки ТАТМ, які продукують електричну енергію, використовуючи п'єзоперетворювачі або лінійні електрогенератори.

Наявність криогенних теплоносіїв надає змогу запропонувати енергогенеруючу LNG систему паливопідготовки з використанням ТАТМ. Така система є привабливою для таких суден, як LNG танкери та судна з LNG паливами [9] (рис. 4).

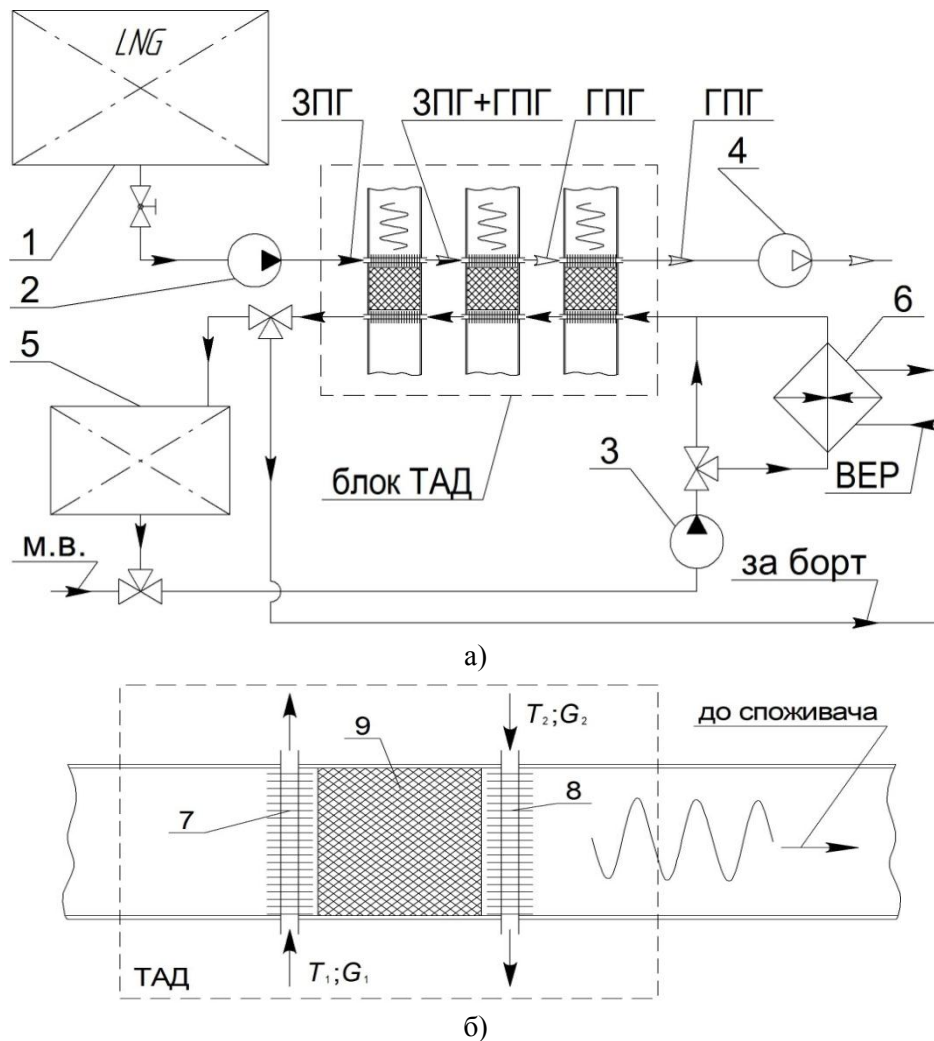


Рис. 4 – Принципова схема системи регазифікації LNG палива:

а) – загальний вигляд, б) – схема ТАД; 1 – ємність з LNG; 2, 3 – насоси; 4 – компресор; 5 – цистерна з прісною водою; 6 – теплообмінник ВЕР двигуна; 7, 8 – теплообмінники, нагрівач та охолоджувач; 9 – стек або регенератор

Сьогодні на судах з LNG паливами застосовується спеціальна система регазифікації, яка забезпечує отримання та подачу газового палива до двигуна. У більшості існуючих систем регазифікації низькотемпературний потенціал криогенного палива практично втрачається.

Для створення енергогенеруючої системи регазифікації пропонується в якості нагрівачів скрапленого газу використати блок низькотемпературних ТАД. Важливо підкреслити, що така схема може бути використана для робочих середовищ з різними температурами, оскільки в ТАТМ в якості робочого тіла використовується гелій, що виключає можливі проблеми, пов'язані з низькими, криогенними температурами на поверхні внутрішніх теплообмінників (8) ТАД.

Потрібний для роботи ТАД градієнт температур забезпечується завдяки різниці в температурі між рідиною системи охолодження ГД (355 – 360 К) – теплообмінник (7) та температурою LNG палива – теплообмінник (8). Завдяки внутрішній незворотності робочого процесу в ТАД температура скрапленого газу, який прокачується скрізь ТАД, буде підвищуватись. У СТЕ ТАД на перших ступенях можуть бути використані теплообмінники з LNG в якості теплоносія, в послідовних ступенях доцільно застосувати випарні теплообмінники, в яких може бути використана скрита теплота випаровування теплоносія.

Висновки. Так, система спроможна утилізувати енергії різних джерел низькопотенційних ВЕР СЕУ – скидну теплоту системи охолодження ГД, теплоту від ОНП ГД та криогенний потенціал LNG палива.

Крім цього, можливість ефективно генерувати потужні акустичні пульсації потенційно надає змогу розробити та впровадити принципово нові рішення для вдосконалення СЕУ та загальносуднових систем.

Відомо, що потужні акустичні хвилі суттєво впливають на перетик багатьох теплофізичних процесів, а саме – інтенсивність тепло і масообміну, значно позначаються на перебігу міжфазних перетворень, сприяють осушенню вологого повітря тощо. Ці явища потребують проведення додаткових детальних досліджень. Результати первинних власних експериментів показали перспективність даного напрямку робіт.

Враховуючи наявний температурний рівень ВЕР сучасних СЕУ, а також потенційні можливості термоакустичних технологій, можна вважати доцільним їх застосування у складі суднових енергетичних установок. Найбільш доцільними можна вважати наступні технічні рішення на базі ТАТМ:

- суднові системи кондиціонування та рефрижерації, системи осушення повітря у спеціальних приміщеннях;
- спеціальні системи охолодження електронних блоків кораблів та суден;
- грузові системи на суднах газозазах;
- паливні системи на суднах з LNG та LPG паливами;
- технологічні системи суден FPSO, системи регенерації технологічних ВЕР шляхом підвищення їх температурного рівня.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Heinrich Schmid, Less Emissions Through Waste Heat Recovery [Електронний ресурс] // Wartsila Corporation, 2004. – Режим доступу : <http://www.wartsila.com>.
2. George Backwell / Korean Car Carrier Puts ‘Garage Roof’ to Productive Use [Електронний ресурс] // maritimepropulsion.com 2012. – Режим доступу : <http://goo.gl/8ruY45>.
3. SUTO Naonori, MINAMI Hiroki Development of Power Supply System with Hybrid Turbocharger for Marine Application // JFE GIHO No. 32 (Aug. 2013), p. 91–94. – Режим доступу: <http://goo.gl/tb7TSU>
4. Jan Fredrik Hansen, John Olav Lindtjørn, Klaus Vänskä Onboard DC Grid for enhanced DP operation in ships // Dynamic Positioning Conference. – Houston, Oct. 11-12, 2011.
5. Rolls-Royce Hybrid shaft generator propulsion system upgrade [Електронний ресурс] // Режим доступу: http://www.rolls-royce.com/Images/hsg_brochure_tcm92-26884.pdf
6. G. W. Swift. Thermoacoustics for liquefaction of natural gas // G. W. Swift and J. J. Wollan, GasTIPS, Volume 8, Number 4, pages 21-26
7. Swift G.W. Thermoacoustic: A unifying perspective for some engines and refrigerators / G.W. Swift // American Institute of Physics. – 2002. – 300 p.
8. Swift G. W. Thermoacoustic Engines / G.W. Swift // Journal of the Acoustical Society of America. – Vol. 84, No. 4, 1988. – P. 1145–1180.
9. Коробко В. В. Перспективи застосування термоакустичних технологій в системах регазифікації [Електронний ресурс] / Коробко В. В., Московко О. О. // Матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції ; НУК, «Суднова енергетика: стан та проблеми». – 2013. – Режим доступу : <http://goo.gl/vHjXvi>.
10. QIU LiMin1 Characteristics of onset and damping in a standing-wave thermoacoustic engine driven by liquid nitrogen / QIU LiMin1, LOU Ping1, WANG Kai1, WANG Bo, SUN DaMing1, RAO JunFeng, ZHANG XueJun // Chinese Science Bulletin – 2013., 58 (11): p. 1325-1330.

11. Spoelstra S. Thermoacoustic heat pumps for energy savings [Text] / S. Spoelstra, M.E.H. Tijani // Grensoverschrijdende akoestiek, Nederlands Akoestisch Genootschap, The Netherlands, 2005. – 23 p.

Коробко В.В. ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ МАШИН В СИСТЕМАХ СЭУ

В статье рассмотрены изменения в структуре вторичных энергетических ресурсов СЭУ, которые вызваны использованием современных высокоэффективных двигателей и LNG топлив. Показано, что уменьшение температурных уровней, имеющих сбросных тепловых ресурсов, и появление криогенных рабочих сред требует внедрения новых технических решений. Термоакустические технологии могут быть использованы в СЭУ для утилизации таких вторичных энергоресурсов. Базовая теоретическая модель термоакустики показывает, что существует принципиальная возможность работы термоакустических машин с использованием низкотемпературных источников сбросной энергии. Предложена универсальная тепловая схема утилизации вторичных энергоресурсов СЭУ с промежуточным высокотемпературным теплоносителем. Для СЭУ с LNG топливами разработана принципиальная схема термоакустической энергогенерирующей системы регазификации криогенного топлива. Технические решения предложенные в работе, могут быть использованы в современных СЭУ для повышения их общей эффективности. Термоакустические технологии потенциально способны обеспечить возможности для совершенствования СЭУ и разработки принципиально новых систем и решений.

Ключевые слова: СЭУ, вторичные энергетические ресурсы, термоакустика, LNG топлива, регазификация, тепловые двигатели.

Korobko V.V. POSSIBLE USES OF THERMOACOUSTIC HEAT MACHINES IN THE SHIP POWER PLANTS

The article deals with changes in the structure of waste energy flows of modern SPP that are associated with the use of modern highly efficient engines and LNG fuels. It is shown that reducing the temperature levels of available waste heat resources, and the appearance of cryogenic working fluids require the introduction of new technical solutions. Thermoacoustic technologies can be used in SPP for disposing low temperature waste heat resources. Thermoacoustic basic theoretical model shows that there is a fundamental opportunity for thermoacoustic machines to work using low-temperature sources of energy relief. A universal scheme of thermal recycling of waste energy SPP with an intermediate high-temperature coolant was also offered. A schematic diagram of the power generating system for cryogenic fuel regasification by thermoacoustic technology adjusting to SPP with LNG fuels was developed. The technical solutions proposed in the paper can be used in present-day SPP to improve their overall performance. Thermoacoustic technology can potentially provide opportunities for improving SPP and developing new innovative systems.

Keywords: ship power plants, waste heat energy, thermoacoustic, heat machine, LNG fuel, regasification.

© Коробко В.В.

Статтю прийнято
до редакції 30.10.14