

**Volodymyr
V. Korobko****Володимир
Володимирович
Коробко**

УДК 621.4: 620.9

IMPROVING THE EFFICIENCY OF POWER PLANTS BY APPLYING THE THERMOACOUSTIC TECHNOLOGY

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ШЛЯХОМ
ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОАКУСТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ****DOI 10.15589/SMI. 2018.02.28****Volodymyr V. Korobko****В. В. Коробко**, канд. техн. наук, доц.

volodymyr.korobko@nuos.edu.ua

ORC ID: 0000-0001-5761-6824

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Abstract. The paper analyzes the generalized structure of energy consumption of the society. It is shown that the structure of modern energy unit (EU) waste heat streams has significantly changed. These changes are caused by the use of the latest energy-saving production processes, high-efficiency thermal motors, etc. It is shown that a large proportion of the waste heat of modern power plants (60...80 %) is low-temperature thermal emissions. Examples of the use of known energy saving technologies designed to improve EU efficiency are considered. It is concluded that the existing majority of technologies are intended for use as a part of powerful EU, and, moreover, they are mainly focused on the consumption of high-level emissions. The work shows that there is a need to develop new technical solutions for the use of low temperature thermal resources, discharged and reduced. In addition, there is a lack of technologies that are suitable for efficient use of relatively small amounts of heat resources, $10^2 \dots 10^3$ kW, in particular for transport energy. Thermoacoustic technologies are proposed as a solution of stated problems. The basic scheme of the thermoacoustic system is developed, which is suitable for use of low-temperature thermal emissions of various types of EU. The basic principles of construction of thermoacoustic power generating systems for the use of low temperature thermal resources are considered. Factors that affect the external characteristics of thermoacoustic heaters are established. A generalized mathematical model of EU with a thermoacoustic energy saving system is proposed. It is synthesized on the basis of mathematical models of components of the basic EU. The results of the calculations carried out on the basis of the model shows that the use of thermoacoustic thermal machines in the ship's power plants, for the utilization of surplus waste heat energy with temperatures in the range of 111... 450 K, can increase the efficiency of the ship power plant by 6...8 %, ensuring fuel economy up to 6 %.

Keywords: power plants; thermal emissions; thermoacoustic technology; mathematical model.

Анотація. Проведено аналіз узагальненої структури енергоспоживання суспільством. Показано, що в структурі скидних енергетичних потоків сучасних енергетичних установок (ЕУ) відбулися суттєві зміни, які зумовлені використанням новітніх енергозощаджуючих виробничих процесів, високоефективних теплових двигунів тощо. Установлено, що більшу частку скидної теплоти сучасних ЕУ до 80 % складають низькотемпературні теплові викиди (НТВ). Розглянуті приклади застосування відомих технологій енергозбереження, призначених для підвищення ефективності ЕУ. Зроблено висновок, що більшість із них призначена для утилізації викидів високого потенціалу в складі потужних ЕУ. Показано, що існує потреба в розробці нових технічних рішень, призначених для використання низькотемпературних теплових ресурсів, скидних та відновлювальних. Крім того, бракує технологій, придатних для ефективного застосування відносно малих об'ємів теплових ресурсів, рівня $10^2 \dots 10^3$ кВт, зокрема для транспортної енергетики. Для вирішення поставлених питань запропоновано впровадження термоакустичних технологій. Розроблена принципова схема термоакустичної системи, яка придатна для використання НТВ різних типів ЕУ. Розглянуті базові принципи побудови термоакустичних енергогенеруючих систем застосування низькотемпературних теплових ресурсів, скидних та відновлювальних. Установлені фактори, які впливають на зовнішні характеристики термоакустичних

теплових машин. Запропонована узагальнююча математична модель ЕУ з термоакустичною системою енергозбереження, яка синтезована на основі математичних моделей складових частин базової ЕУ. Результати розрахунків, виконаних на базі моделі, свідчать, що застосування термоакустичних теплових машин у складі суднових енергетичних установок (СЕУ), для утилізації надлишків скидної теплової енергії з температурами в діапазоні 111...450 К, дає можливість підняти ефективність СЕУ на 6...8 %, забезпечивши при цьому економію пального до 6 %.

Ключові слова: енергетичні установки; теплові викиди; термоакустичні технології; математична модель.

Аннотация. Проведен анализ обобщенной структуры энергопотребления обществом. Показано, что в структуре тепловых выбросов энергетических установок (ЭУ) произошли существенные изменения, обусловленные использованием новейших энергосберегающих производственных процессов, высокоэффективных тепловых двигателей. Показано, что 80 % составляют низкотемпературные тепловые выбросы (НТВ). Рассмотрены примеры применения известных технологий энергосбережения, предназначенных для повышения эффективности ЭУ. Сделан вывод, что большинство имеющихся технологий предназначено для использования в составе мощных ЭУ, кроме того, они ориентированы на потребление выбросов высокого потенциала. Показано, что существует потребность в разработке новых технических решений, предназначенных для применения низкотемпературных тепловых ресурсов, сбросных и возобновляемых. Кроме того, не хватает технологий, пригодных для эффективного использования относительно малых объемов тепловых ресурсов, уровня 102 ...103 кВт, в частности для транспортной энергетики. Для решения поставленных вопросов предложено применение термоакустических технологий. Разработана принципиальная схема термоакустической системы, которая пригодна для использования НТВ различных типов ЭУ. Рассмотрены базовые принципы построения термоакустических энергогенерирующих систем энергосбережения, предназначенных для утилизации низкотемпературных тепловых ресурсов — тепловых выбросов ЕУ и теплоты возобновляемых источников энергии. Предложена обобщенная математическая модель ЭУ с термоакустической системой энергосбережения, которая синтезирована на основе математических моделей составных частей ЭУ. Результаты расчетов, выполненных на базе разработанной модели, показывают, что применение термоакустических тепловых машин в составе судовых энергетических установок (СЭУ), для утилизации излишков сбросной тепловой энергии с температурами в диапазоне 111...450 К, дает возможность повысить эффективность СЭУ на 6...8 %, обеспечив при этом экономию горючего до 6 %.

Ключевые слова: энергетические установки; тепловые выбросы; термоакустические технологии; математическая модель.

References

- [1] Forman, C., Pardemann, M. I., Muritala, I. K. & Meyer, B. (2016). Estimating the global waste heat potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1568-1579. ISSN1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192>.
- [2] Thekdi, A., N., & Sachin, U. Thu (2015). Industrial Waste Heat Recovery — Potential Applications. *OSTI. GOV Technical Report*. Available Technologies and Crosscutting R&D Opportunities. United States. DOI: 10.2172/1185778.
- [3] Cullen, J. M., & Allwood, J. M. (2010). Theoretical efficiency limits for energy conversion devices. *Energy*, 35, 2059-2069. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy>.
- [4] Semkov, K., Mooney, E., Connolly, M., & Adley, C. (2014). Efficiency improvement through Waste heat reduction. *Appl Therm Energy*, 70, 716-722. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.030>.
- [5] Singh, D., & Pedersen, E. (2016). A review of waste heat recovery technologies for maritime applications. *Energy Conversion and Management*, 111, 315-328. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman>.
- [6] Yun, E., Park, H., Youl, S., & Chun, K. (2015). 000 Dual parallel organic Rankine cycle (ORC) system for high efficiency waste heat recovery in marine application. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29, 2509-2515. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0548-5>.
- [7] Kalina, A. I. (1983). Combined cycle and waste heat-recovery power-systems based on a novel thermodynamic energy cycle utilizing low-temperature heat for power-generation. *Mech Eng.*, 105(11), 104. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0548-5>.
- [8] Yari, M., Mehr, A., Zare, V., Mahmoudi, S. & Rosen, M. (2015). Exergoeconomic comparison of TC (trilateral Rankine cycle), ORC (organic Rankine cycle) and Kalina cycle using a low grade heat source. *Energy*, 1-11. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy>. 2015.02.080.
- [9] *Waste heat recovery system (whrs) for reduction of fuel consumption, emissions and EEDI* (2011). Tech. rep., MAN Diesel and Turbo. Retrieved from <https://www.mandieselturbo.com>.

- [10] *Interim guidelines on the method of calculation of the energy efficiency design. Interim guidelines on the method of calculation of the energy efficiency design index for new ships* (2009). IMO. Retrieved from <https://goo.gl/4Amxuv>.
- [11] Haddad, C., Périlhon, C., & Danlos, A. (2014). Some Efficient Solutions to Recover Low and Medium Waste Heat: Competitiveness of the Thermoacoustic technology: 14 International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES 14. *Energy Procedia*, 50, 1056-1069. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.125>.
- [12] Rott, N. (1980). Thermoacoustics. *Adv. Appl. Mech.*, 20 (135), 250-272. [https://doi.org/10.1016/S0065-2156\(08\)70233-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2156(08)70233-3).
- [13] Swift, G. W. (2002). *Thermoacoustic: A unifying perspective for some engines and refrigerators*. New York: American Institute of Physics Press.
- [14] Ward, B., Clark, J., & Swift, G.W. (2017). *Design environment for low-amplitude thermoacoustic energy conversion*. Version 6.4b2.7. Users Guide. Retrieved from <https://www.lanl.gov>.
- [15] Bejan, A. (1996). Entropy generation minimization. The new thermodynamics of finite-size device and finite-time processes. *J. Appl. Phys.*, 79 (3), 1191-1218. DOI: 10.1063/1.362674.
- [16] Kan, X., Wu, F., Chen, L., Sun, F., & Guo, F. (2010). Exergy efficiency optimization of a thermoacoustic engine with a complex heat transfer exponent. *International Journal of Sustainable Energy*, 29(4), 220-232. doi:10.1080/14786461003782716.
- [17] Korobko, V. V. (2013). Yssledovanye protsessov teploobmena y hydrodynamiky v elementakh termoakustycheskykh dvyhateley. *Avyatsyonno-kosmycheskaya tekhnika i tekhnolohyya*, 8 (105), 123-130. ISSN.1727-7337.
- [18] Korobko, V. V. (2014). Osoblyvosti protsesu zapusku termoakustychnykh dvyhuniv za umov vykorystannia nyzkotemperaturnykh dzherel teplovoi enerhii. *Avyatsyonno-kosmycheskaya tekhnika i tekhnolohyya*, 8 (115), 50-54, ISSN 1727-7337.
- [19] Korobko, V. V., Moskovko, O. O., & Tymoshenko, D. O. (2015). Chyslove modeliuvannia sudnovoi termoakustychnoi systemy rehazyfikatsii LNG palyv. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*. Kherson, KhDMA, 3(11), 69-76. ISSN 2313-4763.
- [20] Korobko, V. V. (2016). Doslidzhennya osoblyvostej vykorystannya impul'snyx dvonapravlenykh turbin v termoakustychnyx mashynax [Investigation use of features of puls bidirectional turbine in thermoacoustic heat machines]. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*. Kherson, KhDMA, 1 (14), 201-208. ISSN 2313-4763.
- [21] De Blok, K. (2012). *Bi-directional turbines for converting acoustic wave power into electricity*. Retrieved from <http://www.aster-thermoacoustics.com>.
- [22] *INSTALLATION INSTRUCTIONS & CONCEPT GUIDANCE, W12X92DF, Net GD*. Retrieved from <https://www.wingd.com/en/engines/engine-types/x-df-dual-fuel/x92df>.

Постановка задачі. Сучасне суспільство споживає великі об'єми енергії, основний об'єм якої продукується з допомогою теплових енергетичних установок (ТЕУ). Робота будь-яких ЕУ супроводжується утворенням теплових викидів, які розглядаються як вторинні енергетичні ресурси (ВЕР). Використання цих ВЕР дозволяє підвищити ефективність ЕУ, зменшити споживання видобувних видів палив, знизити шкідливий вплив на довкілля.

Удосконалення технічного рівня ЕУ та впровадження новітніх технологій в енергетиці, транспорті, промисловості призвели до суттєвого підвищення ефективності ТЕУ та зміни температурного рівня ВЕР.

Діаграма на рис. 1 ілюструє в послідовності процеси виробництва, трансформації та енергоспоживання: від первинних джерел енергії (палив) до споживачів в енергетиці, транспорті, промисловості, ЖКХ, сфери послуг [1]. Можна бачити, що в результаті роботи ТЕУ біля 30 % енергії первинних енер-

гоносіїв використовується на потреби споживачів. Решту енергії, а це приблизно 50 %, складають ВЕР різних температурних рівнів, 20 % — беззворотні втрати.

Сумарний об'єм ВЕР із температурою, що перевищує 300 °С, складає лише 20 %, до діапазону температур 200...300 °С належить 16 % від загального об'єму, решта, а це 54 %, — викиди з температурою, нижчою за 100 °С. Питання, пов'язані з утилізацією ВЕР з температурами, вищими за 300 °С, не є предметом наявних досліджень.

Використання ВЕР з температурами нижче 300 °С, а це 89 % від загального обсягу, є складною проблемою, оскільки потребує врахування потреб конкретного споживача. Така задача може бути розв'язана шляхом застосування системного підходу, оскільки потребує аналізу взаємодії складових елементів ЕУ, обґрунтування можливості та доцільності використання технологій енергозбереження в кожному окремому випадку.

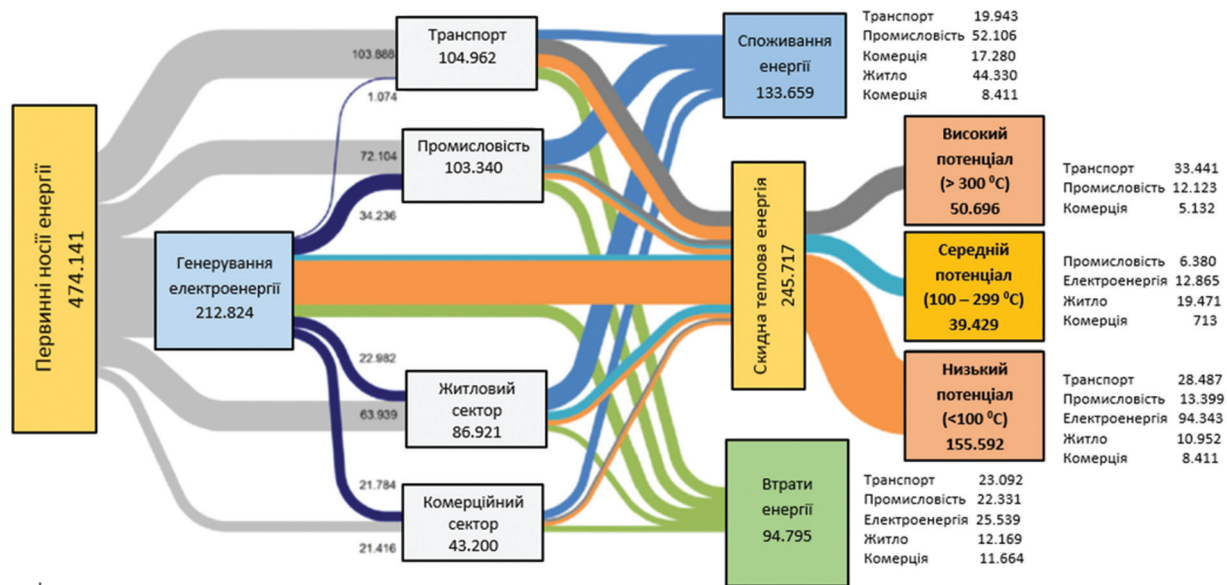


Рис. 1. Узагальнена структура енергетичних потоків сучасного суспільства, 10¹⁵ Дж [1]

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При виборі технології застосування ВЕР вирішальним фактором є специфічні потреби **споживача** в конкретних видах енергії: механічній, електричній, тепловій тощо. Відповідно до цих обставин енергозберігаючі технології можна поділити на дві групи [2–4].

Перша група, **теплофікаційні**, це такі, що не передбачають отримання додаткової механічної роботи, а саме комунальні та побутові потреби, процеси сушки та ін. Ці рішення відносно прості, але їх використання цілком визначається наявністю потреб у споживача.

Друга група, **енергогенеруючі технології**, до яких належать когенераційні та тригенераційні схеми. У цих системах застосовуються теплові машини (ТМ), які здатні перетворювати потенціал низькотемпературних ВЕР у механічну роботу. Такі ТМ можуть бути реалізовані на основі різних термодинамічних циклів — цикл Ренкіна (на воді або органічних теплоносіях (ORC) [5, 6], цикл А. Kalina [7], Trilateral Cycle (TC) [8] тощо.

Зрозуміло, що всі вказані технології передбачають використання додаткового обладнання, що призводить до зростання масогабаритних показників ЕУ, ускладнення їх конструкції, зростання вартості, погіршення надійності. У деяких випадках ці фактори унеможливають їх застосування.

Наведена інформація свідчить, що на даний момент не існує універсальної технології утилізації нижчої температури (НТ) ВЕР. Вибір технології обмежується характеристиками наявної ЕУ та потребами конкретного споживача, крім того, в деяких випадках, таких, як транспортна енергетика, існують масогабаритні, екологічні або вартісні обмеження [9, 10]. Відсутні рішення для «малих» об'ємів теплових викидів 10²...10³ кВт.

Одним з перспективних шляхів утилізації НТ теплових енергоресурсів є використання термоаку-

стичних теплових машин (ТАТМ). Існують ТАТМ прямої дії: це термоакустичні двигуни (ТАД) та машини зворотної дії — термоакустичні рефрижератори (ТАР) або теплові насоси. Ці апарати суттєво відрізняються від механічних систем простою конструкцією, відсутністю рухомих частин та шкідливих робочих речовин. Для ТАТМ характерні висока надійність, відносна мала вартість, екологічна безпека [11, 12].

Здатність ТАТМ використовувати теплоту від будь-яких зовнішніх джерел дає можливість створювати такі системи для різних типів ТЕУ. Для роботи ТАД вирішальною є різниця температур між зовнішніми джерелами та стоком теплової енергії, тому ТАТМ здатні використовувати будь-які джерела енергії, в цьому випадку кріогенний потенціал скраплених газів. Такі установки доцільно запровадити як системи регазифікації LNG та LPG палив на судах та берегових терміналах.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Термоакустичні технології можуть стати в нагоді для вирішення питань утилізації НТ теплових викидів. Але їх впровадженню заважає відсутність наукових знань відносно раціонального використання ТАТМ у складі ЕУ.

МЕТОЮ СТАТТІ є формалізація базових принципів побудови енергогенеруючих термоакустичних систем застосування низькотемпературних теплових ресурсів, скидних та відновлювальних; синтез математичної моделі ЕУ з термоакустичною системою енергозбереження; розробка науково обґрунтованих принципів побудови термоакустичних систем як складової частини ЕУ.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ — аналіз та синтез теплотехнічних процесів та їх моделювання в ЕУ з термоакустичною системою енергозбереження.

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ — теплотехнічні процеси енергоперетворення в ЕУ з ТАТМ та їх елементах, їх внутрішні взаємозв'язки і взаємодія з навколишнім середовищем.

ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ — закономірності теплофізичних процесів в ЕУ та ТАТМ систем використання НТ теплових ресурсів.

Основний матеріал. Задачі створення узагальненої математичної моделі ЕУ з термоакустичною системою енергозбереження доцільно вирішувати в максимально повній постановці, не звужуючи її окремими типами ЕУ. Принципова схема ЕУ з термоакустичною системою енергозбереження показана на рис. 2.

Математична модель має відповідати структурі ЕУ та функціональним зв'язкам у комплексі: «ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ–ТАТМ–НАВАНТАЖЕННЯ ТАТМ». Математична модель повинна забезпечити можливість прийняття обґрунтованих конструктивних та схемних рішень при розробці термоакустичних систем енергозбереження, здатних працювати в складі різних ТЕУ. Енергообмін між джерелами енергії, ТАТМ та довідками забезпечують зовнішні системи з проміжними теплоносіями.

Вважаємо, що ЕУ складається з трьох взаємно пов'язаних підсистем:

- підсистема високого потенціалу — це джерела скидної та відновлювальної теплової енергії: теплові двигуни, виробничі процеси, ЕУ, тощо;
- підсистема ТАТМ та її навантаження;
- підсистема низького потенціалу (стік теплової енергії) — довідка або робочі речовини, з температурою, нижчою за температуру оточуючого середовища.

Математична модель синтезована на базі моделей складових компонентів ЕУ відповідно до прийнятих припущень:

- ТАТМ працює за рахунок різниці в температурі між джерелами енергії високого та низького потенціалу;

– зовнішні джерела низького потенціалу можуть мати температуру довідки або нижчу;

- джерела енергії — ТД, ЕУ, технологічні процеси, не пов'язані термодинамічними циклами з ТАТМ;
- енергообмін між ТАТМ та джерелами енергії здійснюється за рахунок окремих проміжних систем;
- навантаженням ТАТМ можуть бути енергогенеруючі елементи або ТАТМ зворотної дії.

1. Теплоенергетична установка та зовнішнє середовище

Згідно з прийнятими умовами математична модель умовної ЕУ може бути подана у вигляді системи рівнянь балансу енергетичних та матеріальних потоків ВЕР на різних експлуатаційних режимах. Ця модель включає в себе теплофізичні параметри теплоносіїв підсистеми високого та низького потенціалу.

Для задачі проектування ТАТМ достатньо знати функціональні залежності температури та витрати по кожному зі скидних теплоносіїв залежно від потужності ЕУ, зовнішніх параметрів та інших факторів. Зазвичай ця інформація може бути задана у вигляді апроксимаційних функцій, що значно спрощує їх подальше використання. Загалом ця система рівнянь виглядає як

$$\begin{aligned}T_j^i &= F(Ne_{EY}(reg), T_{amb}, \dots); \\G_j^i &= F(Ne_{EY}(reg), T_{amb}, \dots); \\Ne_{EY}(reg) &= F(T_{amb}, g_e, \dots),\end{aligned}\quad (1)$$

де i — елемент ТЕУ, що розглядається; j — теплоносій ВЕР; $Ne_{EY}(reg)$ — ефективна потужність на різних режимах; g_e — питома витрата пального; T_{amb} — температура довідки.

Зрозуміло, що потужність ЕУ $Ne_{EY}(reg)$ — це цільова функція і залежить від великої кількості параметрів. Доступний об'єм ВЕР ТЕУ по кожному з теплоносіїв відносно до умов довідки може бути обчислений як

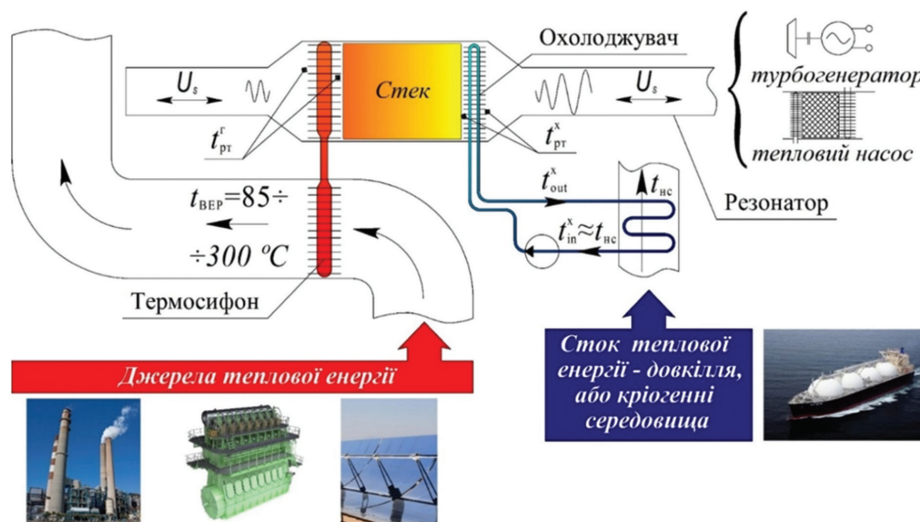


Рис. 2. Принципова схема системи використання низькотемпературних теплових ресурсів із застосуванням ТАТМ

$$Q_j^i = G_j^i \times c_j (T_j^i - T_{amb}). \quad (2)$$

Здебільшого цієї інформації достатньо для розробки ТАТМ та пов'язаних з нею систем.

2. Термоакустична теплова машина

У ТАТМ за рахунок термоакустичного ефекту здійснюються перетворення теплової енергії в механічну у вигляді потужних акустичних хвиль з її подальшою трансформацією для потреб споживача:

$$Q_j^i \Leftrightarrow \dot{E}_2 = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[\tilde{p}_1 U_1] = \\ = \frac{1}{2} |p_1| |U_1| \cos \varphi_{pU} = \frac{1}{2} A |p_1| |u_1| \cos \varphi_{pU},$$

де p_1 , u_1 — акустичний тиск та коливна швидкість; A — площа перетину резонатора; U — об'ємна швидкість; φ_{pU} — фазовий кут.

Базові положення сучасної теорії термоакустики були викладені в роботах N. Rott [12]. У подальшому G. W. Swift [13] розвинув цю модель, запровадивши так звану «short engine model» ТАТМ (рис. 3).

Модель Rott–Swift (MRS) побудована на базі класичної лінійної акустики, це загальновизнана модель широко використовується в практиці термоакустики. У цій одномірній моделі параметри робочого середовища та акустичної хвилі є функціями поздовжньої координати, а в поперечному перетині розглядаються лише осереднені величини.

Згідно із MRS акустичну потужність, яку продукує або абсорбує елемент матриці довжиною dx , визначають як

$$\frac{d \dot{E}_{matr}}{dx} = -\frac{r_v}{2} [U_1]^2 - \frac{1}{2r_k} |p_1|^2 + \frac{1}{2} \operatorname{Re}[g \tilde{p}_1 U_1], \quad (3)$$

де r_v — в'язкісна складова акустичного опору; r_k — терморелаксацийна складова акустичного опору; ρ_m — густина робочого середовища; g — коефіцієнт підсилення матриці.

Перші два члени рівняння (3) є дисипативними і пов'язані з в'язкісними та терморелаксацийними процесами в приміжових шарах. Третя складова визначає характер та інтенсивність термоакустичних перетворень у матриці. Коефіцієнт підсилювання акустичної енергії розраховується так:

$$g = \frac{f_k - f_v}{(1 - \sigma)(1 - f_v)} \frac{1}{T_m} \frac{dT_m}{dx}, \quad (4)$$

де ω — кутова швидкість; T_m — осереднена температура середовища; f_k і f_v — просторово осереднені термоакустичні функції Ротта [7, 8], які залежать від типу поверхні матриці; σ — стала Прандтля.

Можна вважати, що матриця ТАТМ працює як своєрідний «термоакустичний» підсилювач, величина якого залежить від поздовжнього градієнта температур у матриці dT_m/dx .

Акустичну потужність, що генерується в матриці МТП за MRS, визначають шляхом інтегрування (3) за довжиною матриці.

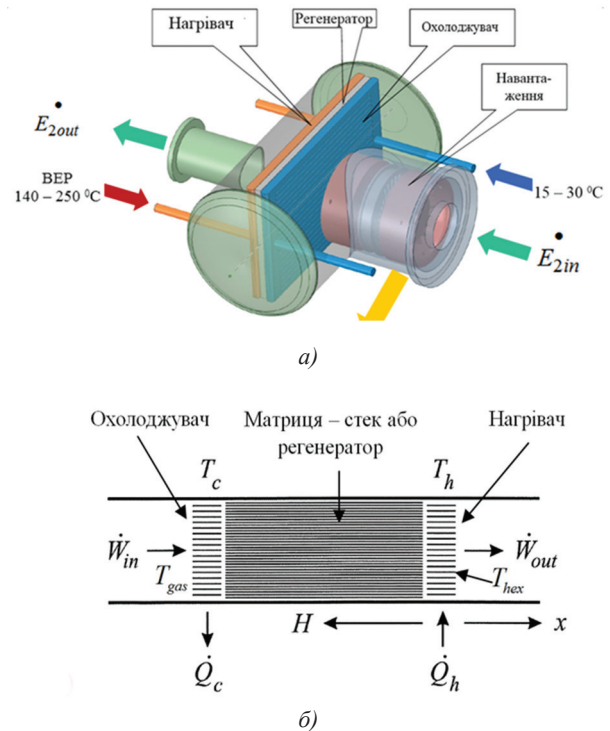


Рис. 3. Модуль термоакустичних перетворень та його складові елементи:

а — конструкція; б — схема блока теплообмінників ТАТМ

У теорії термоакустики MRS важливим є поняття повної потужності — H_2 , яка відображає енергетичні перетворення в структурних елементах ТАТМ — теплообмінниках, матриці, резонаторі, навантаженні:

$$\dot{H}_2(x) = \dot{E}_2(x) + \frac{1}{2} \rho_m T_m \int \operatorname{Re}[s_1 \tilde{u}_1] dA - \\ - (A_{gas} k_{gas} + A_{solid} k_{solid}) \frac{dT_m}{dx}. \quad (5)$$

За допомогою співвідношень (1)–(5) можна визначити кількість теплоти, яку мають підвести до матриці теплообмінники, потужність ТАТМ, дослідити розподіл теплофізичних параметрів у ТАТМ.

На основі MRS створений програмний комплекс Delta EC [14], який виконує одночасні інтеграції вздовж осі x імпульсу, неперервність і рівняння сумарної потужності у формах:

$$dp_1 = F_{mom}(T_m, U_1; \omega, gas \text{ proerties, geometry}) dx;$$

$$dT_m = F_{power} \times \\ \times (T_m, p_1, U_1; \dot{H}_2, \omega, gas \text{ proerties, geometry}) dx;$$

$$dU_1 = F_{cont} \times \\ \times (T_m, p_1, U_1; \omega, gas \text{ proerties, geometry}) dx.$$

Однак лінійна модель Ротта–Свіфта має суттєвий недолік, оскільки всі теплофізичні параметри вважаються однорідними в поперечному перетині резонатора і такими, що залежать тільки від поздовжньої координати.

MRS не враховує особливості теплоенергообміну між робочим тілом ТАТМ та рекуперативними теплообмінниками, а вирази (3)–(5) базуються на різниці температур уздовж матриці ТАТМ, яка вважається заданою. Питання, яким чином ця температурна різниця може бути досягнута, не розглядаються. Нехтування цими факторами призводить до значних похибок при проектуванні термоакустичних апаратів. Можливі випадки, коли потенційна теплова потужність стеку може перевищувати відповідну потужність теплообмінників. Очевидно, що за таких умов найбільш раціональним буде підхід, за яким ТАТМ буде розглядається як складова частина ЕУ.

FTT-модель ТАТМ. Останнім часом широкого розповсюдження для аналізу ефективності ЕУ набула так звана FTT (Finite Time Thermodynamics). Особливість FTT-моделей ТД полягає в застосуванні узагальненого закону енергообміну, який дозволяє враховувати параметри джерел енергії, потужності ТД, тривалість термодинамічного циклу, для ТАТМ це частота звукової хвилі [15, 16]:

$$Q_{HEX} = kF_{HEX} (T_H^n - T_L^n),$$

де $n = n_1 + in_2$ — комплексний показник; k — коефіцієнт теплопередачі; F_{HEX} — загальна площа поверхні теплообмінника.

На рис. 4 наведена схема ТАД, яка ілюструє основні принципи побудови моделей процесів методами FTT-термодинаміки.

Згідно з першим законом термодинаміки в ТАТМ мають виконуватися умови

$$T_H > T_{iH} > T_{iL} > T_L. \quad (6)$$

Акустична потужність, яку розвиває ТАТМ, може бути розрахована як

$$\dot{E} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = \dot{Q}_{iH} - \dot{Q}_{iL}. \quad (7)$$

У базовій FTT-моделі передбачається врахування впливу незворотних процесів у матриці ТАТМ за допомогою коефіцієнта внутрішньої незворотності Φ_{TATM} [16].

У наявній моделі запропоновано ввести коефіцієнт, який ураховує вплив неоднорідності поля температур по фронту рекуперативних теплообмінників — Φ_{HEX} . Тоді сумарний коефіцієнт незворотності визначиться у вигляді суми

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_{TATM} + \Phi_{HEX}. \quad (8)$$

Як показано в [16], кількість теплової енергії, що передана теплообмінниками ТАТМ до робочого тіла та матриці:

$$\dot{Q}_{iH} = \frac{k_h f F_{\Sigma} (x^n T_H^n - T_L^n)}{(1+f) \times (\chi^n + \Phi_{\Sigma} \chi f k_h / k_c)};$$

$$\dot{Q}_{iL} = \Phi_{\Sigma} \chi \frac{k_h f F_{\Sigma} (\chi^n T_H^n - T_L^n)}{(1+f) \times (\chi^n + \Phi_{\Sigma} \chi f k_h / k_c)},$$

де k_h і k_c — коефіцієнти теплопередачі нагрівача й охолоджувача; $\chi = T_{L0}/T_{H0}$ — температурний коефіцієнт; $f = F_{HEX}^h / F_{HEX}^c$ — відношення повних площ теплообмінників; $\delta = k_h / k_c$ — відношення коефіцієнтів теплопередачі теплообмінників; $F_{\Sigma} = F_{HEX}^h + F_{HEX}^c$ — сумарна площа теплообмінників. Потужність, яку здатен розвинути ТАД $\dot{E}_{TAD}$ за методологією FTT-термодинаміки з урахуванням (6)–(8) може бути розрахована як

$$\dot{E}_{TAD} = \dot{Q}_{iH} - \dot{Q}_{iL} = \frac{k_h f F_{\Sigma} (1 - \Phi_{\Sigma} \chi) (T_H^n - (T_L / \chi)^n)}{(1+f) (1 + \delta \Phi_{\Sigma} f \chi^{1-n})}. \quad (9)$$

У роботах [17, 18] було показано, що інтенсивність теплообміну в значній мірі визначає можливу потужність ТАТМ, оскільки теплообмін — це єдиний механізм підведення зовнішньої енергії до робочого тіла. Завдяки (9) можливо встановити безпосередній зв'язок інтенсивності теплообміну в акустичному середовищі з робочими характеристиками ТАТМ.

Обговорення отриманих результатів. Унаслідок застосування інтегруючого підходу до моделювання ЕУ з ТАТМ синтезована узагальнююча математична модель, в якій з допомогою методів FTT-термодинаміки пов'язані балансова модель ЕУ та лінійна модель термоакустики MRS:

$$\left\{ \begin{aligned} T_j^i &= F(Ne_{EY}(reg), T_{amb}, \dots) \\ G_j^i &= F(Ne_{EY}(reg), T_{amb}, \dots) \\ Ne_{EY}(reg) &= F(T_{amb}, g_e, \dots) \\ dp_1 &= F_{mom}(T_m, U_1; \omega, gas \text{ proerties, geometry}) dx \\ dT_m &= F_{power} \times \\ &\times (T_m, p_1, U_1; \dot{H}_2, \omega, gas \text{ proerties, geometry}) dx \\ dU_1 &= F_{cont} \times \\ &\times (T_m, p_1, U_1; \omega, gas \text{ proerties, geometry}) dx \\ \dot{H}_2(x) &= \dot{E}_2(x) + \frac{1}{2} \rho_m T_m \int \text{Re}[s_1 \tilde{u}_1] dA - \\ &- (A_{gas} k_{gas} + A_{solid} k_{solid}) \frac{dT_m}{dx} \\ \dot{E}_{TAD} &= \dot{Q}_{HC} - \dot{Q}_{LC} = \\ &= \frac{k_h f F_{\Sigma} (1 - \Phi_{\Sigma} \chi) (T_H^n - (T_L / \chi)^n)}{(1+f) (1 + \delta \Phi_{\Sigma} f \chi^{1-n})} \end{aligned} \right.$$

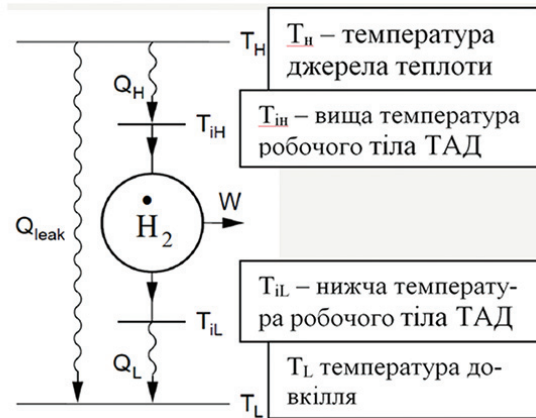
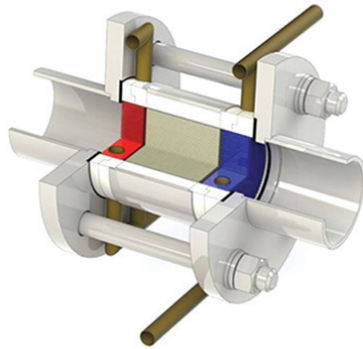


Рис. 4. Потоки енергії в ТАТМ

У загальному випадку результатом використання енергогенеруючої термоакустичної системи є отримання додаткової потужності Ne^{TETM} , тоді сумарна ефективна потужність ЕУ

$$Ne_{\Sigma}^{EV} = Ne^{EV} + Ne^{TATM} \times (Ne_{EV}^{reg}, Q_f^{BEP}, T_{amb}, T_H, T_C, \dots).$$

Важливою перевагою моделі є можливість її етапного застосування для визначення доцільності використання ТАТМ у конкретній ЕУ.

На першому етапі достатньо розглянути балансову модель ЕУ та отримати дані відносно параметрів скидних ресурсів. Далі, за допомогою спрощених виразів MRS можна оцінити потенційну ефективність від використання ТАТМ.

Як приклад розглянута можливість застосування ТАТМ для утилізації теплових викидів суднового МОД W12X92DF потужністю 63800 кВт, який здатний працювати на криогенному паливі — LNG [19]. Для транспортних суден витрати на пальне є основною статтею витрат, тому впровадження енергогенеруючих технологій енергозощадження є дуже привабливим. На рис. 5 наведені дані відносно об'ємів та параметрів скидної енергії двигуна W12X92DF [19].

Можна побачити, що температури теплових викидів не перевищують 230 °С, що суттєво обмежує можливості використання систем утилізації, основаних на циклі Ренкіна.

Термоакустичні теплові машини здатні працювати за таких умов, крім того, вони дозволяють утилізувати потенціал криогенного палива. Ураховуючи ці обставини, була розроблена термоакустична система утилізації НТ викидів малооборотного двигуна (МОД), схема якої показана на рис. 6.

У цій системі передбачається використання двох термоакустичних двигунів, які працюють за циклом Стірлінга. Як навантаження ТАД обрано електрогенератор з приводом від імпульсної двонаправленої турбіни (ІДТ) [19, 20].

Згідно із [13, 14] у першому приближенні можливу потужність ТАТМ можна визначити, знаючи екзергію наявних енергетичних ресурсів та задавши ККД ТАТМ. У даному випадку потужність термоакустичного турбогенератора може бути розрахована як

$$Ne_{TATM} = \eta_{TATM}^{Stirl} (Q_h^{in} - Q_c^{out}) (1 - T_c/T_h) \eta_{IDT} \eta_{gen},$$

де η_{IDT} — ККД імпульсної двонаправленої турбіни; η_{gen} — ККД електрогенератора. Згідно з [11 та 21]

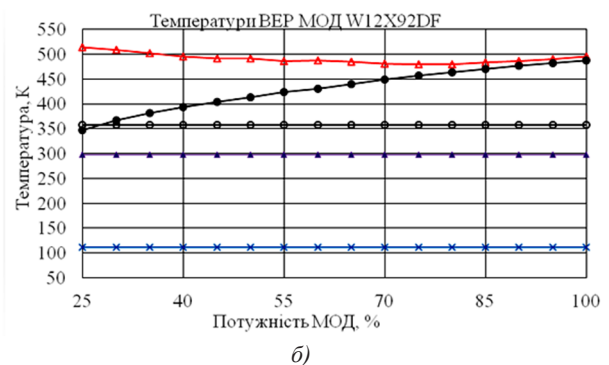
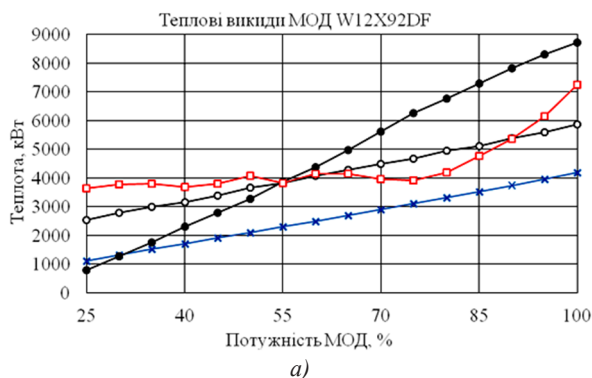


Рис. 5. Параметри джерел теплової енергії:

а — об'єми; б — температури; — довілля, — відхідні гази, — паливна LNG-система, — ОНП; — ОНП МОД та паливна LNG-система, — ОНП МОД, паливна LNG-система і надлишок пари

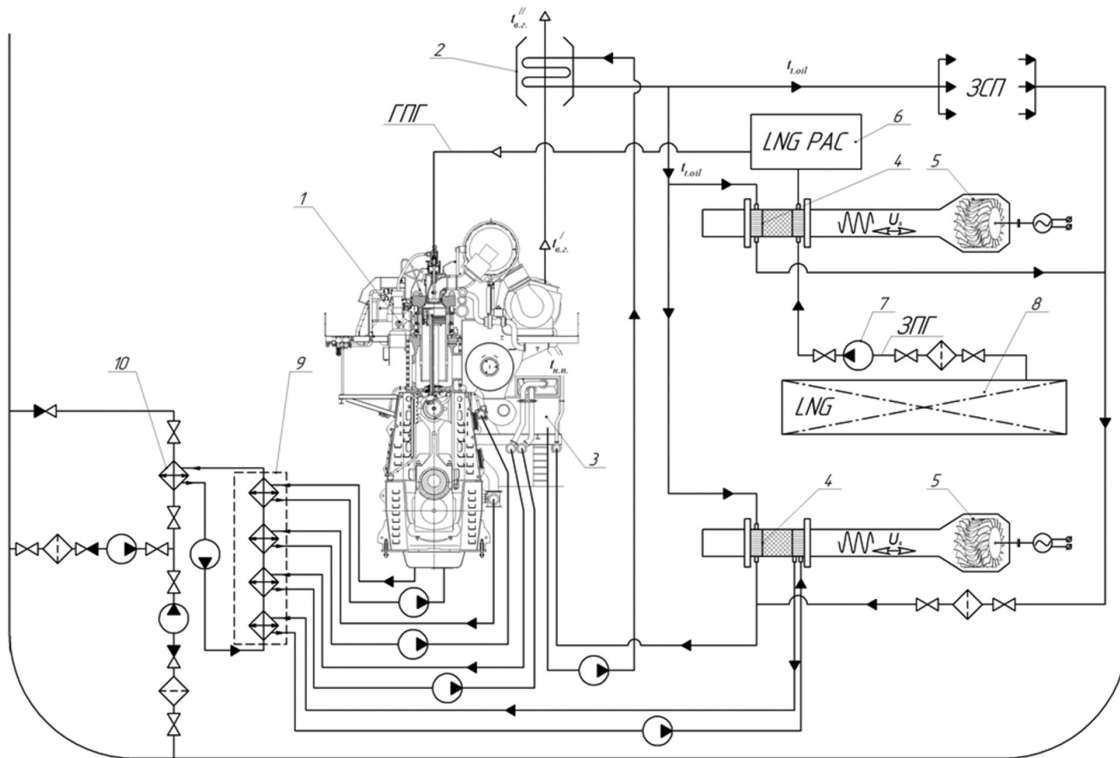


Рис. 6. Принципова схема утилізації ВЕР суднової енергетичної установки з ТАТМ:

1 — МОД; 2 — утилізаційний котел; 3 — охолоджувач наддувального повітря (ОНП); 4 — ТАД; 5 — навантаження (ІДТ); 6 — LNG pack; 7 — насос; 8 — запас LNG-палива; 9 і 10 — охолоджувачі ГД

можна прийняти, що $\eta_{\text{ІДТ}} = (0,65-0,8)$, а $\eta_{\text{ген}} = (0,94-0,96)$. Об'єми теплових викидів та їх температури визначаємо за даними фірми-виробника [22].

Як показано на рис. 7, за рахунок утилізації криогенного потенціалу палива максимальна потужність ТАТГ може сягати 1600 кВт, скидна теплота ОНП додатково дає до 2800 кВт.

У разі використання всього наявного потенціалу скидної теплоти МОД (енергії регазифікації LNG-палива, скидної теплоти ОНП та теплоти відхідних газів) сумарна потужність ТАТГ може сягати 4200...5200 кВт, що складає до 8,3 % при максимальній потужності двигуна.

ВИСНОВКИ. 1. Аналіз структури енергетичних потоків сучасних ЕУ та існуючих тенденцій показав наявність значних об'ємів низькотемпературних викидів з температурами нижче 300 °С та нестачу ефективних технологій їх утилізації.

2. Для використання НТ ВЕР, нижчими за 250 °С, запропоновано залучення термоакустичних технологій, розроблена математична модель ЕУ з термоакустичною системою утилізації НТ ВЕР.

3. За допомогою розробленої моделі показано, що термоакустична енергогенеруюча система регазифікації LNG-палива здатна продукувати до 1600 кВт електричної енергії.

4. Сумарна потужність термоакустичної системи утилізації скидної теплоти на експлуатаційних режимах двигуна може сягати від 5 до 8,3 % потужності МОД W12X92DF.

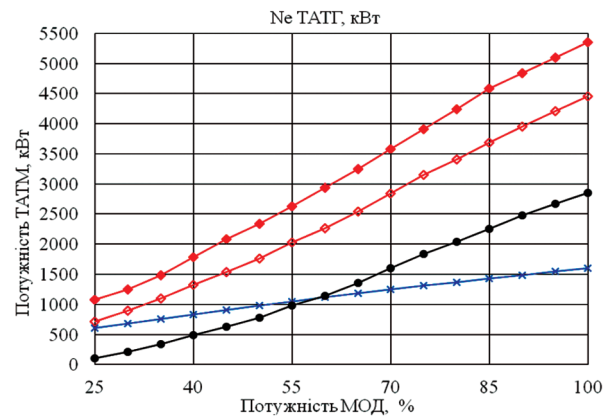


Рис. 7. Потужність ТАТГ залежно від використовуваного джерела енергії:

—×— паливна LNG-система; —●— ОНП МОД; —◇— ОНП ТАТГ

5. Упровадження термоакустичних енергогенеруючих технологій для використання глобальних теплових викидів [1] з температурами 100...299 °С дозволить утилізувати до $4,2 \cdot 10^{15}$ Дж теплової енергії, що складає від 5 до 10 % від сумарного об'єму.

У разі утилізації викидів з температурою менше 100 °С можна перетворити 1,5...5,0 % від загального об'єму, що в абсолютному відношенні складає до $7,8 \cdot 10^{15}$ Дж.

Список літератури

- [1] Forman, C., Pardemann, M. I., Muritala, I. K. & Meyer, B. (2016). Estimating the global waste heat potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1568-1579. ISSN1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192>.
- [2] Thekdi, A., N., & Sachin, U. Thu (2015). Industrial Waste Heat Recovery — Potential Applications. *OSTI.GOV Technical Report*. Available Technologies and Crosscutting R&D Opportunities. United States. DOI: 10.2172/1185778.
- [3] Cullen, J. M., & Allwood, J. M. (2010). Theoretical efficiency limits for energy conversion devices. *Energy*, 35, 2059-2069. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy>.
- [4] Semkov, K., Mooney, E., Connolly, M., & Adley, C. (2014). Efficiency improvement through Waste heat reduction. *Appl Therm Energy*, 70, 716-722. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.030>.
- [5] Singh, D., & Pedersen, E. (2016). A review of waste heat recovery technologies for maritime applications. *Energy Conversion and Management*, 111, 315-328. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman>.
- [6] Yun, E., Park, H., Youl, S., & Chun, K. (2015). Dual parallel organic Rankine cycle (ORC) system for high efficiency waste heat recovery in marine application. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29, 2509-2515. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0548-5>.
- [7] Kalina, A. I. (1983). Combined cycle and waste heat-recovery power-systems based on a novel thermodynamic energy cycle utilizing low-temperature heat for power-generation. *Mech Eng.*, 105(11), 104. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0548-5>.
- [8] Yari, M., Mehr, A., Zare, V., Mahmoudi, S. & Rosen, M. (2015). Exergoeconomic comparison of TC (trilateral Rankine cycle), ORC (organic Rankine cycle) and Kalina cycle using a low grade heat source. *Energy*, 1-11. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy>. 2015.02.080.
- [9] *Waste heat recovery system (whrs) for reduction of fuel consumption, emissions and EEDI* (2011). Tech. rep., MAN Diesel and Turbo. Retrieved from <https://www.mandieselturbo.com>.
- [10] *Interim guidelines on the method of calculation of the energy efficiency design. Interim guidelines on the method of calculation of the energy efficiency design index for new ships* (2009). IMO. Retrieved from <https://goo.gl/4Amxuv>.
- [11] Haddad, C., Périllon, C., & Danlos, A. (2014). Some Efficient Solutions to Recover Low and Medium Waste Heat: Competitiveness of the Thermoacoustic technology: 14 International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES 14. *Energy Procedia*, 50, 1056-1069. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.125>.
- [12] Rott, N. (1980). Thermoacoustics. *Adv. Appl. Mech.*, 20 (135), 250-272. [https://doi.org/10.1016/S0065-2156\(08\)70233-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2156(08)70233-3).
- [13] Swift, G. W. (2002). *Thermoacoustic: A unifying perspective for some engines and refrigerators*. New York: American Institute of Physics Press.
- [14] Ward, B., Clark, J., & Swift, G.W. (2017). *Design environment for low-amplitude thermoacoustic energy conversion. Version 6.4b2.7*. Users Guide. Retrieved from <https://www.lanl.gov>.
- [15] Bejan, A. (1996). Entropy generation minimization. The new thermodynamics of finite-size device and finite-time processes. *J. Appl. Phys.*, 79 (3), 1191-1218. DOI: 10.1063/1.362674.
- [16] Kan, X., Wu, F., Chen, L., Sun, F., & Guo, F. (2010). Exergy efficiency optimization of a thermoacoustic engine with a complex heat transfer exponent. *International Journal of Sustainable Energy*, 29(4), 220-232. doi:10.1080/14786461003782716.
- [17] Коробко, В. В. (2013). Исследование процессов теплообмена и гидродинамики в элементах термоакустических двигателей. *Авиационно-космическая техника и технология*, 8 (105), 123-130. ISSN 1727-7337.
- [18] Коробко В., & Московко, О. (2014). Особливості процесу запуску термоакустичних двигунів за умов використання низькотемпературних джерел теплової енергії. *Авиационно-космическая техника и технологии*, 8 (115), 50-54. ISSN 1727-7337.
- [19] Коробко, В., Московко, А., & Тимошенко, Д. (2015). Числове моделювання суднової термоакустичної системи регазифікації LNG палив. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*, 3(11), 69-76. ISSN 2313-4763.
- [20] Коробко, В. В., Московко, О. О., Мостипаненко, Г. Б., & Сербін, С. І. (2017). Дослідження роботи імпульсної двонаправленої турбіни в резонаторі термоакустичного двигуна. *Авиационно-космическая техника и технологии*, 8(143), 19-25. ISSN 2313-4763.
- [21] De Blok, K. (2012). *Bi-directional turbines for converting acoustic wave power into electricity*. Retrieved from <http://www.aster-hermoacoustics.com>.
- [22] *INSTALLATION INSTRUCTIONS & CONCEPT GUIDANCE, W12X92DF, Net GD*. Retrieved from <https://www.wingd.com/en/engines/engine-types/x-df-dual-fuel/x92df>.

© В. В. Коробко

Статтю рекомендує до друку
д-р техн. наук, проф. С. І. Сербін