

УДК 629.5.03:621.412-047.37

doi: 10.32620/aktt.2022.4sup1.12

В. В. КОРОБКО, А. П. ШЕВЦОВ

Національний університет кораблебудування ім. адм. С. О. Макарова, Миколаїв

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОАКУСТИЧНИХ ДВИГУНІВ
З ДВОФАЗНИМ РОБОЧИМ ТІЛОМ**

Характерною рисою сьогодення є загальна тенденція до зниження температурного рівня скидної теплоти двигунів енергетичних установок промисловості, транспорту, енергетики. Ці обставини ускладнюють застосування традиційних технологій енергозбереження, призначених для перетворення цієї теплоти в механічну роботу. З огляду на брак ефективних технологій, великі об'єми таких теплових викидів втрачаються. Як приклад, можна розглянути судову енергетику. На суднах, які оснащені двопаливними середньо та малооборотними двигунами, теплові викиди систем охолодження мають температуру на рівні 353–365 К. З огляду на малий ексгетичний потенціал, використання таких низькотемпературних джерел скидної енергії будь якими тепловими двигунами є складною проблемою. Отже, задача вдосконалення існуючих технологій, або розробка нових, зберігає свою актуальність. Для вирішення цієї задачі в нагоді можуть стати термоакустичні технології. Значною перевагою термоакустичних теплових машин є здатність використовувати будь які зовнішні джерела теплоти, в тому разі низькотемпературні, та продукувати механічну роботу. Відомі випадки виникнення термоакустичних коливань при малих різницях температур між джерелами теплоти за умов високої вологості робочого середовища. Це явище може бути використано для створення низькотемпературних систем енергозбереження на основі термоакустичних двигунів (ТАД) з вологим двофазним робочим середовищем. Практичне використання термоакустичних систем в складі судових енергетичних установок (СЕУ) потребує додаткових досліджень для вирішення низькі питань, зокрема підвищення питомої потужності ТАД. В роботі надано опис дослідного обладнання, конструкції експериментальних ТАД з вологим робочим тілом, методів дослідження. Результати експериментів показали, що в експериментальних ТАД з двокомпонентним (вогим) робочим середовищем температура виникнення самочинних термоакустичних коливань становила 355–359 К, при цьому повздовжній градієнт температури в матриці складав 1,19–1,30 К/м. Питома потужність ТАД з вологим середовищем зростає в 1,7–7 разів, акустичний тиск зростає в 2–4,7 разів в порівнянні з роботою на сухому повітрі. Показано, що в наявних ТАД конденсація водяної пари в керамічній матриці та на поверхнях теплообмінників може призводити до втрати потужності, орієнтовно до 25%, при збереженні їх роботоспроможності.

Ключові слова: енергозбереження; термоакустичний двигун; двофазне робоче тіло; вологість; термоакустичні технології.

Вступ

Останнім часом в практиці світової енергетики має місце поступова зміна парадигм. Питання доцільності тих, чи інших, технічних рішень розглядаються з урахуванням не тільки суто економічних факторів, але і міжнародних угод, що до обмеження шкідливого впливу на довкілля.

Так, на першу лінію виходять питання, пов'язані з екологічністю виробництва енергії, а саме – зменшенню емісії так званих парникових газів – GHG [1]. В судовій енергетиці ці обмеження сформували основні напрями розвитку, спрямовані на обмеження використання вуглецевих видобувних палив, впровадження нових видів альтернативних палив, поступовий перехід на безвуглецеві палива [2, 3]. Результатом цього стали суттєві зміни в складі судових енергетичних установок (СЕУ), конструкції двигунів.

Застосування нових високоефективних двопаливних двигунів змінило структуру теплового балансу СЕУ, призвело до зростання об'ємів низькотемпературних складових теплових викидів, появи викидів з кріогенним потенціалом [4]. В таких умовах використання технологій енергозбереження, основаних на циклі Ренкіна з водяною парою, стає недоцільним [5, 6].

Термоакустичні технології енергозбереження можуть стати в нагоді для утилізації низькопотенційних теплових СЕУ. Термоакустичні двигуни здатні працювати від будь яких зовнішніх низькотемпературних джерел енергії, в тому разі кріогенних, їм притаманні висока надійність, відносна мала вартість, екологічність [7, 8].

Впровадження термоакустичних технологій енергозбереження в промисловості можливо за умов зменшення масогабаритних показників ТАД, підвищення їх питомої потужності.

1. Постановка задачі

В роботі [9] приведені результати досліджень процесів виникнення самочинних термоакустичних коливань в вологому середовищі. Авторами показано, що ефекти фазового переходу в вологому повітрі сприяють виникненню термоакустичних явищ при температурах на 45...65 К, вищих за температуру довкілля.

В [10] вивчалась робота ТАД при використанні двокомпонентного робочого тіла – суміші інертного газу та рідин, що випаровувались. Крім ефекту зниження температури виникнення термоакустичних явищ в цих роботах спостерігалось короткочасне підвищення акустичного тиску та акустичної потужності ТАД. Нестабільність роботи ТАД автори пов'язують з конденсацією рідини в матриці.

Використання цього ефекту дає змогу створити ТАД, які здатні працювати від джерел теплоти з температурою рівня 355...361 К. Такі ТАД з двофазним робочим середовищем можуть бути застосовані в суднових термоакустичних системах енергозбереження, для утилізації скидної теплоти систем охолодження суднових двигунів.

Метою проведення експериментальних досліджень є вивчення характеристик ТАД з двофазним робочим тілом в умовах, наближених до роботи

в складі суднових систем енергозбереження з урахуванням вимог ІМО до обладнання СЕУ.

2. Розробка експериментального обладнання та методики досліджень

В експериментах моделювалась робота ТАД в складі систем охолодження суднових ДВС з температурами теплоносіїв на рівні 355...359 К. В якості випарного компонента використовувалась дисцилірована вода, як екологічно нейтральна речовина.

Дослідження проводились з допомогою ТАД, в яких здійснювався термодинамічний цикл Брайтона, це так звані ТАД зі стоячою хвилею, використовувались два ТАД з різним діаметром матриці.

Для проведення дослідів була створена експериментальна установка. Схема установки та зовнішній вигляд «двофазного» ТАД показані на рис. 1 та рис. 2. Основні характеристики експериментальних ТАД надані в табл. 1.

Теплота до матриці ТАД підводилась в різний спосіб – з допомогою електричного нагрівача (рис. 1, а), або рекуперативного нагрівача (рис. 1, б), з рідинним теплоносієм. Термобуферна порожнина резонатора ТАД була занурена в робочу ємність термостата (рис.1), що забезпечувало стабільну температуру робочого середовища.

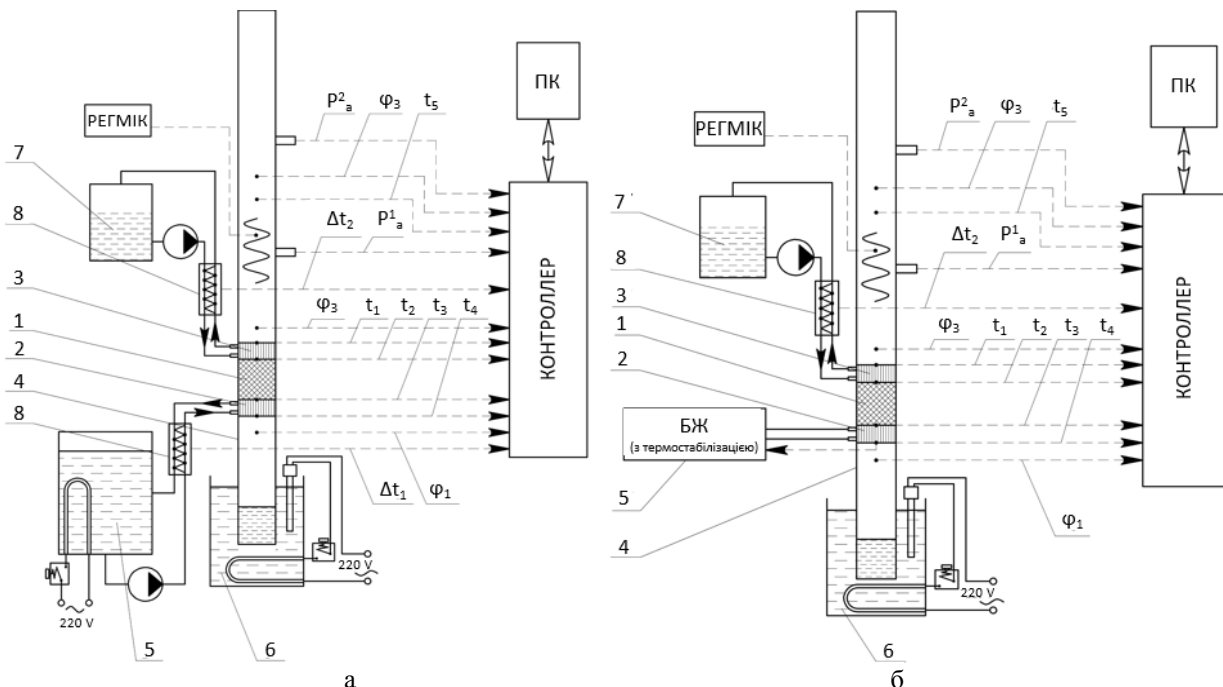


Рис. 1. Експериментальна установка для дослідження термоакустичного двигуна з двофазним робочим тілом з рекуперативним (а) та електричним термостабілізованим (б) нагрівачами:

- 1 – матриця; 2 – нагрівач ТАД; 3 – охолоджувач; 4 – ТАД; 5 – блок живлення;
6 – термостат; 7 – бак; 8 – батарея термопар

Температура гріючої рідини в термостаті VEB MZW UP 15 C підтримувалась електроконтактним термометром типу ТПК – 100, з точністю $\pm 0,5$ К.

Кількість теплоти, підведеної до рекуперативного нагрівача, розраховувалась по різниці температур гріючої рідини на вході та виході з нагрівача. Ця різниця вимірювалась попередньо тарованою термомпарною батареєю. Використання термобатарей суттєво підвищувало точність вимірювань малих температурних перепадів.

Витрати гріючої рідини визначались об'ємним способом, з використанням зразкової мірної ємності – 1000 мл та електронного секундоміру. Всі трубопроводи були ізольовані для запобігання теплових втрат.

В ТАД, рис. 1, б, використовувались електричні нагрівачі з електронною термостабілізацією температури поверхні теплообмінника. Температура нагрівача та охолоджувача ТАД визначалась з допомогою термопар ТХК (тип L), точність вимірювання вологості – (3...5 %), а температури – (0,5...1,5 К). Кількість електричної енергії, підведеної до нагрівача, визначалась еталонним ватметром.

Вимірювання температури і вологості в буферній порожнині резонатора здійснювалось з допомогою прибору контролю вологості та температури типу «Рег-Мик» И2 з датчиком ДВТц-001.

Вологість середовища в порожнині резонатора ТАД, на відстані 100 мм від охолоджувача – контролювалась з допомогою датчиків типу Honeywell ННН-3602-А, абсолютна похибка вимірювань забезпечувалась на рівні $\pm 0,5$.

Акустичний тиск в резонаторі вимірювався з допомогою диференціальних термостабілізованих датчиків тиску типу МРХV 7007. Акустична потужність ТАД визначалась двоточковим модифікованим методом [11].

Всі датчики, які використовувались в дослідженнях, були зв'язані з комп'ютерною контрольно вимірювальною системою (КВС), яка забезпечувала вимірювання, реєстрацію та первинну обробку експериментальних даних [12].

Таблиця 1.

Параметри дослідних ТАД

Діаметр матриці, та теплообмінників ТАД	м	$40 \cdot 10^{-3}$ $50 \cdot 10^{-3}$
Довжина матриці	м	$40 \cdot 10^{-3}$ $50 \cdot 10^{-3}$
Пористість матриці	-	0,78
Еквівалентний діаметр матриці	м	$1,07 \cdot 10^{-3}$
Об'єм стеку (матриці) дослідних ТАД	м ³	$9,8 \cdot 10^{-5}$ $7,6 \cdot 10^{-5}$
Довжина охолоджувача	м	$18 \cdot 10^{-3}$
Еквівалентний діаметр охолоджувача	м	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Діаметр резонатора дослідних ТАД	м	$38 \cdot 10^{-3}$ $48 \cdot 10^{-3}$
Нагрівач резистивний, потужність	Вт	5 - 600

3. Методика проведення експериментальних досліджень

Режим «сухого» робочого тіла (Dry). Це тестовий режим, на цьому режимі визначались характеристики експериментального ТАД, робочим тілом якого було кімнатне повітря з відносною вологістю 40...45 %, при температурі 290...295 К. Ці данні потрібні для більш коректного порівняння та оцінки впливу підвищеної вологості робочого середовища на характеристики саме цього експериментального ТАД.

В матриці ТАД, з допомогою нагрівача та охолоджувача, формувався повздовжній градієнт температури. Відповідно до потужності, підведеної до електричного нагрівача, змінювалась його температура. Момент виникнення термоакустичних коливань фіксувався з допомогою датчиків акустичного тиску.

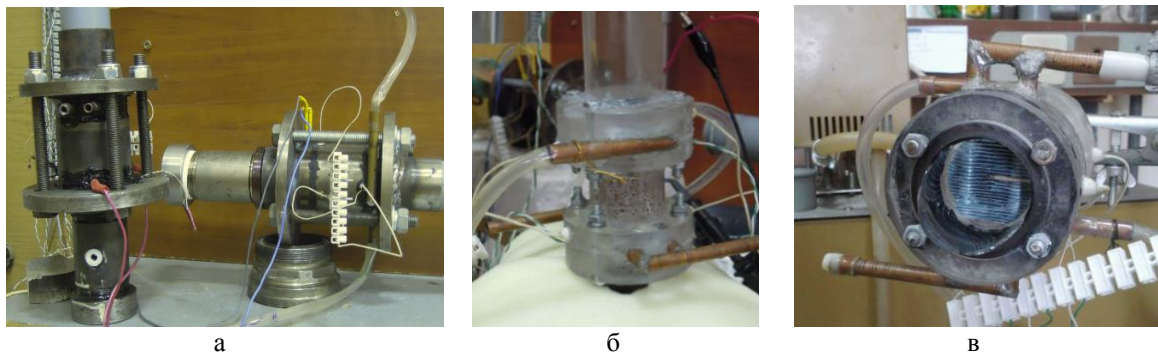


Рис. 2. Термоакустичні двигуни (а), ТАД на дослідному стенді (б), охолоджувач ТАД (с)

Температура охолоджуючої рідини на вході в охолоджувачі утримувалась в межах 293...295 К. Результати цих вимірювань надані в табл. 2, де можна бачити, що мінімальний повздовжній градієнт температури в матриці ∇T_{onset} для виникнення термоакустичних коливань становить 2,8 К/м (рис. 3) і залежить від потужності нагрівача.

Режим двокомпонентного робочого тіла (Wet). Для отримання двокомпонентного вологого робочого тіла в термобуферну частину резонатора ТАД додавалось 20 мл дистильованої води. Така кількість води гарантувала створення в робочому середовищі ТАД стану, близького до насичення, при температурах 358...365 К. ТАД встановлювався в термостат таким чином, що термобуферна порожнина була повністю занурена у воду, тим самим її температура дорівнювала температурі гріючої рідини.

З метою моделювання умов роботи ТАД в складі системи охолодження ДВЗ, температура нагрівачів була обмежена на рівні 358...365 К. Для підтримки температури електричного нагрівача використовувалась спеціально розроблена електронна система термостабілізації, яка керувала роботою блока живлення. Охолоджувач прокачувався водою, що дозволяло на кожному з режимів підтримувати постійним градієнт температури в матриці.

При проведенні експериментів температура гріючої води поступово підвищувалась. Починаючи з 323 К крок підвищення температури був 5 К до температури 353 К. В інтервалі температур 353...363 К температура в термостаті зростала з кроком 2К. Покрокове підвищення температури відбувалось тільки після стабілізації температури в термобуферній порожнині ТАД. Такий режим запуску ТАД забезпечував поступове випаровування частини води для створення майже 100 % вологості в робочому середовищі при заданій температурі.

4. Результати досліджень

На рис. 3, рис. 4 та в таблиці 2 наведені основні результати експериментальних досліджень. Експерименти показали, що робота ТАД в режимі з вологим робочим середовищем принципово відрізняється від роботи зі звичайним робочим тілом, і має такі відмінності:

- запуск ТАД в режимі вологого повітря відбувається при різниці температур вздовж матриці в межах $\Delta T_{\text{onset}} = 59\text{--}62$ К, що значно менше, ніж в режимі Dry, коли ця різниця сягала 139–170 К;

- акустичний тиск та акустична потужність ТАД з двофазним середовищем суттєво перевищу-

ють ці характеристики в порівнянні з режимом Dry, рис. 3 та рис. 4;

- на режимі **Wet** потужність нагрівачів впливала лише на тривалість запуску ТАД, оскільки їх температура була обмежена умовами моделювання систем охолодження – 358...365 К. Цей факт вказує на те, що основні процеси енергообміну в ТАД з двофазним робочим тілом відбуваються в порожнині термобуферної труби, де мають місце явища фазового переходу.

Важливим результатом досліджень є встановлення факту здатності ТАД тривалий час працювати за рахунок теплоти, яка підводиться не з допомогою нагрівачів – електричних або рекуператора, а безпосередньо завдяки теплообміну між зовнішньою поверхнею термобуферної порожнини та рідиною в термостаті. Підтвердженням цього данні наведені на рис. 3 та в табл. 2 – режим 1.

Як показали дослідження, нагрівачі лише прискорюють процес формування потрібного для запуску градієнта температури $-\nabla T_{\text{onset}}$. Сталий режим роботи ТАД підтримувався не нагрівачами, а безпосередньо робочим середовищем в термобуферній порожнині, завдяки безпосередньому енергообміну з гарячим теплоносієм.

Конденсація вологи на поверхнях теплообмінників, термобуферної порожнини, матриці не впливає на тривалу роботоспроможність експериментального ТАД, але зменшує його потужність. В середині ТАД позначався режим динамічної рівноваги між процесами випаровування та конденсації рідини.

Для візуального спостереження ефектів конденсації та випаровування води при роботі пристроя з високою вологістю робочого тіла було виготовлено прозорий зразок ТАД (рис. 4). Завдяки цьому можна бачити в динаміці процеси конденсації води в матриці ТАД та на поверхні охолоджувача.

Нажаль, не вдалося отримати кількісні характеристики при тривалій роботі ТАД за умов інтенсивної конденсації парів, оскільки висока вологість в резонаторі унеможлилювала коректну роботу датчиків акустичного тиску, які були використані в установці.

Як показали вимірювання, відносна вологість в резонаторі ТАД на відстані 0,150 м від охолоджувача сягала 60...70 %, при температурі середовища на рівні 303...308 К. В цей же час в термобуферній трубці цей показник був близьким до 100 %, але при температурах 358...365 К.

Таблиця 2

Параметри ТАД на режимах з «сухим» та вологим робочим тілом

Реж.	Режим сухе робоче тіло - повітря					Режим вологе робоче тіло				
	Вологість 40...50%, T ₀ = 300 К					Вологість 90...95 %, T ₀ = 365 К				
№	Q нагр. Вт	ΔT _{onset} , К	∇T _{onset} 10 ⁻³ , К	Ps, Па	NeТАД, Вт	Q нагр., Вт	ΔT _{onset} , К	∇T _{onset} 10 ⁻³ , К	Ps, Па	NeТАД, Вт
1	60	–	–	–	–	0	59	1,2-1,3	4950	14,3
2	80	170	3,4	1230	1,5	80	61	1,2-1,3	4870	14,1
3	100	150	3,1	1540	4,1	100	62	1,2-1,3	4950	14,0
4	125	141	2,9	1870	6,2	125	61	1,2-1,3	4960	14,1
5	150	139	2,8	2240	7,4	150	59	1,19	4890	14,2

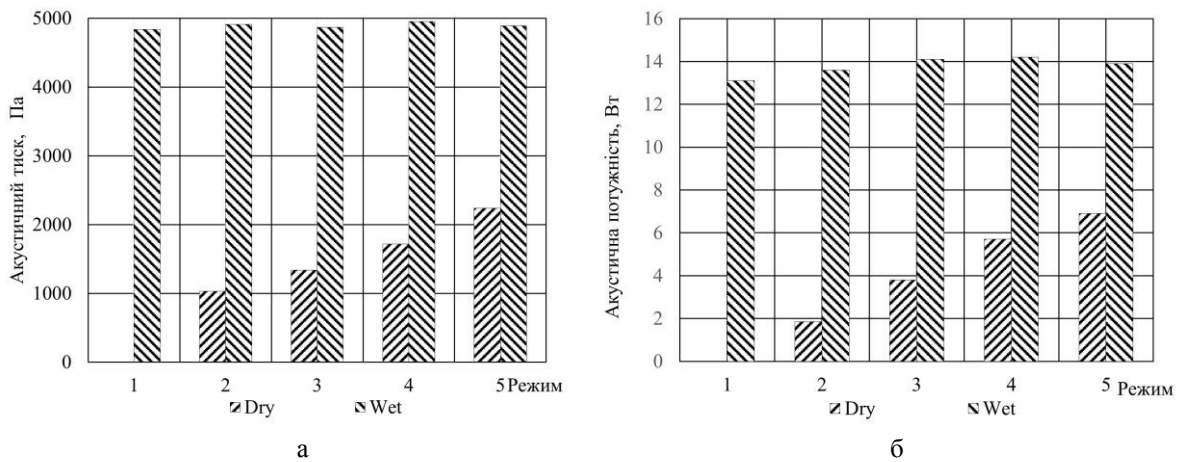


Рис. 3. Зіставлення характеристик ТАД з різними робочими середовищами:
а – акустичний тиск; б – акустична потужність ТАД

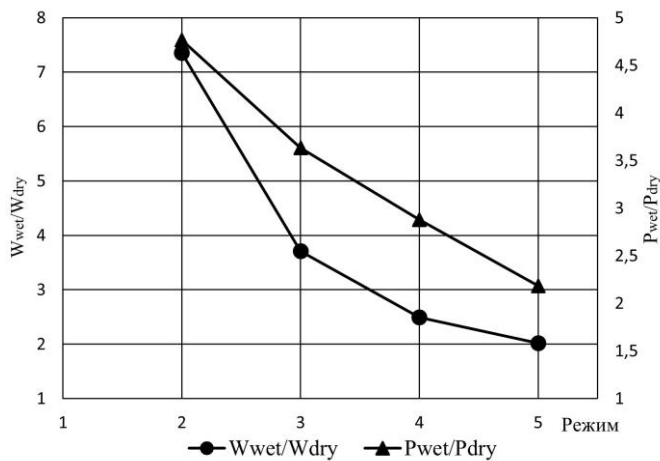


Рис. 4. Відносні акустичний тиск – P_{wet}/P_{dry} та акустична потужність W_{wet}/W_{dry} ТАД на різних режимах при роботі з вологим та сухим робочим тілом



Рис. 5 Конденсація вологи в ТАД

Висновки

1. В результаті експериментальних досліджень робочих процесів в термоакустичному двигуні з вологим робочим середовищем було встановлено, що використання ефектів фазового переходу дозво-

ляє забезпечити виникнення термоакустичних пульсацій при температурі гарячої сторони матриці 355...359 К, при цьому повздовжній градієнт температури в матриці становить 1,19...1,30 К/мм, а акустична потужність ТАД зростає в 1,7...7 рази.

2. Застосування термоакустичних двигунів для утилізації теплових ресурсів з температурами на рівні 355...365 К можливо за рахунок використання енергії фазового переходу в багатокомпонентному робочому середовищі, яке складається з інертного газу або суміші інертних газів та рідини, що випаровується.

3. Результати роботи є основою для подальшого розвитку наукових досліджень в напрямку впровадження низькотемпературних енергогенеруючих термоакустичних систем енергозбереження в судновій енергетиці, транспорті, промисловості.

Література

1. *The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas (GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050 [Text]* / Tae-Hwan Joung, Seong-Gil Kang, Jong-Kap Lee, Junkeon Ahn // *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*. – 2020. – Vol. 4, No. 1. – P. 1-7. DOI: 10.1080/25725084.2019.1707938.

2. *How to decarbonize international shipping: Options for fuels, technologies and policies [Text]* / P. Balcombe, J. Brierley, C. Lewis [et al.] // *Energy Convers. Manag.* – 2019. – No. 182. – P. 72–88. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.12.080.

3. *Estimating the global waste heat potential [Text]* / C. Forman, M. I. Pardemann, I. K. Muritala, B. Meyer // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – No. 57. – P. 1568–1579. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.192.

4. Singh, D. *A review of waste heat recovery technologies for maritime applications [Text]* / D. Singh, E. Pedersen // *Energy Conversion and Management*. – 2016. – Vol. 111. – P. 315–328. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.12.073

5. *Waste heat recovery system [Electronic resource]*. – Available at: <https://mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/technical-papers/waste-heat-recovery-system.pdf>. – 10.03.2022.

6. Haddad, C. *Some Efficient Solutions to Recover Low and Medium Waste Heat [Text]* / C. Haddad, C. Périllon, A. Danlos // *14 Intern. Conf. on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability Competitiveness of the Thermoacoustic technology*. – Cairo, 2014. – Vol. 50. – P. 1056-1069. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.06.125.

7. Swift, G. W. *Thermoacoustic: A unifying perspective for some engines and refrigerators [Text]* / G. W. Swift. – *American Inst. of Physics*, 2002. – 300 p.

8. Коробко, В. В. Підвищення ефективності енергетичних установок шляхом застосування термоакустичних технологій. [Текст] / В. В. Коробко // *Судостроение и морская инфраструктура*. – Николаев : Изд. НУК, 2018. – № 2(10). – С. 252–261.

9. Noda, D. *A thermoacoustic oscillator powered by vaporized water and ethanol [Text]* / D. Noda,

Y. Ueda // *American Journal of Physics*. – 2013. – Vol. 81, Iss. 2. – P. 124–126. DOI: 10.1119/1.4766940.

10. Yang, R. *Theoretical Performance Characteristics of a Travelling-Wave Phase-Change Thermoacoustic Engine for Low-Grade Heat Recovery [Text]* / R. Yang, A. Meir, GZ. Ramon // *Applied Energy*. – 2020. – Vol. 261. – Article No. 114377. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114377.

11. *Acoustic intensity measurement in a narrow duct by a two-sensor method [Text]* / T. Biwa, Y. Tashiro, H. Nomura [et al.] // *Rev. Sci. Instrum.* – 2007. – Vol. 78. – Article No. 086110. DOI: 10.1063/1.2768929.

12. *Green-IT Approach to Design and Optimization of Thermoacoustic Waste Heat Utilization Plant Based on Soft Computing [Text]* / Y. Kondratenko, V. Korobko [et al.] // *Green IT Engineering: Components, Networks and Systems Implementation. Studies in Systems, Decision and Control*, Springer, Cham. – 2017. – Vol. 105. – P. 287–311. DOI: 10.1007/978-3-319-55595-9_14.

References

1. Joung, Tae-Hwan., Kang, Seong-Gil., Lee, Jong-Kap., Ahn, Junkeon. The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas(GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 2020, vol. 4, no. 1, pp. 1-7. DOI: 10.1080/25725084.2019.1707938.

2. Balcombe, P., Brierley, J., Lewis, C., Skatvedt, L., Speirs, J., Hawkes, A. A., Staell, I. How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. *Energy Convers. Manag.*, 2019, no. 182, pp. 72–88. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.12.080.

3. Forman, C., Pardemann, M. I., Muritala, I. K., Meyer, B. Estimating the global waste heat potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, no. 57, pp. 1568–1579. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.192.

4. Singh, D., Pedersen, E. A review of waste heat recovery technologies for maritime applications. *Energy Conversion and Management*, 2016, vol. 111, pp. 315–328. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.12.073.

5. *Waste heat recovery system*. Available at: <https://mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/technical-papers/waste-heat-recovery-system.pdf>. (accessed 10.03.2022).

6. Haddad, C., Périllon, C., Danlos, A. Some Efficient Solutions to Recover Low and Medium Waste Heat. *14 Intern. Conf. on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability Competitiveness of the Thermoacoustic technology*. Cairo, 2014, vol. 50, pp. 1056-1069. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.06.125.

7. Swift, G. W. *Thermoacoustic: A unifying perspective for some engines and refrigerators*. American Inst. Of Physics Publ., 2002. 300 p.

8. Korobko, V. V. Pidvyshchennia efektyvnosti enerhetychnykh ustanovok shliakhom zastosuvannia termoakustychnykh tekhnolohii [Improvement of Efficiency of Power Plants by Applying Thermoacoustic Technologies]. *Cudostroenye y morskaiya ynfrastrukturna*, Nikolaev, Yzd. NUK, 2018, no. 2 (10), pp. 252–261.

9. Noda, D., Ueda, Y. A thermoacoustic oscillator powered by vaporized water and ethanol. *American Journal of Physics*, 2013, vol. 81, iss. 2, pp. 124–126. DOI: 10.1119/1.4766940.

10. Yang, R, Meir, A, Ramon, GZ. Theoretical Performance Characteristics of a Travelling-Wave Phase-Change Thermoacoustic Engine for Low-Grade Heat Recovery. *Applied Energy*, 2020, vol. 261,

article no. 114377. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114377.

11. Biwa, T., Tashiro, Y., Nomura, H., Ueda, Y., Yazaki, T. Acoustic intensity measurement in a narrow duct by a two-sensor method. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, vol. 78, article no. 086110. DOI: 10.1063/1.2768929.

12. Kondratenko, Y., Korobko, V., Korobko, O., Kondratenko, G., Kozlov, O. Green-IT Approach to Design and Optimization of Thermoacoustic Waste Heat Utilization Plant Based on Soft Computing. *Green IT Engineering: Components, Networks and Systems Implementation. Studies in Systems, Decision and Control*, Springer, Cham, 2017, vol. 105, pp. 287–311. DOI: 10.1007/978-3-319-55595-9_14.

Надійшла до редакції 15.05.2022, розглянута на редколегії 8.08.2022

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THERMOACOUSTIC ENGINES WITH TWO-PHASE WORKING BODY

Volodymyr Korobko, Anatoliy Shevtsov

A distinguishing feature of these days is the general tendency to decrease the temperature level of the waste heat of engines for power plants in industry, transport, and energy. These circumstances complicate the usage of traditional energy-saving technologies designed to transform this heat into mechanical work. Given the lack of effective technologies, large volumes of such heat emissions are lost. As an example, we can consider ship power engineering. On ships that are equipped with dual-fuel medium and low-speed engines, the thermal emissions of the cooling systems have a temperature of 355...365 K. Given the small exegerical potential, the use of such low-temperature waste energy sources by any heat engines is a difficult problem. Therefore, the task of improving existing energy-saving technologies or developing new ones remains relevant. Thermoacoustic technologies can be useful in solving this problem. A significant advantage of thermoacoustic heat machines is the ability to use any external heat source, in this case low-temperature sources, and produce mechanical work. There are known cases of thermoacoustic oscillations at small temperature differences between heat sources under conditions of high humidity of the working environment. This phenomenon can be used to create low-temperature energy-saving systems based on thermoacoustic engines (TAE) with a wet two-phase working environment. The practical use of thermoacoustic systems as part of ship power plants requires additional research to solve low-level issues, in particular, increasing the specific power of the TAE. This work provides a description of the experimental equipment, design of experimental TAE with a wet working body and research methods. The results of the experiments showed that in experimental TAEs with a two-component (moist) working environment, the temperature of spontaneous thermoacoustic oscillations was 355...359 K, while the longitudinal temperature gradient in the matrix was 1.19...1.30 K/m. The specific power of TAE with a moist environment increased by 1.7...7 times, and the acoustic pressure increased by 2...4.7 times compared to the operation in dry air. It is shown that in the existing TAEs, the condensation of water vapor in the ceramic matrix and on the surfaces of the heat exchangers can lead to a loss of power, roughly up to 25 %, while maintaining the operational capacity.

Keywords: energy saving; thermoacoustic engine; two-phase working body; humidity; thermoacoustic technologies.

Коробко Владимир Владиславович – д-р техн. наук, доц., доц. каф. Эксплуатации СЭУ и Теплоэнергетики, Национальный университет кораблестроения, Николаев, Украина.

Шевцов Анатолий Павлович – д-р техн. наук, проф., Учебно-научный центр морской инфраструктуры, Национальный университет кораблестроения, Николаев, Украина.

Volodymyr Korobko – Doctor of tech. Sciences, associate professor, associate professor of the department of Operation of Ship Power Plants and Heat Power Engineering, National University of Shipbuilding, Nikolaev, Ukraine;

e-mail: vololymyr.korobko@nuos.edu.ua, kvv001@gmail.com,

ORCID: 0000-0001-5761-6824, Scopus Author ID: 54420455300

Anatoliy Shevtsov – Doctor of tech. Sciences, Professor, Educational and Scientific Center of Marine Infrastructure, National University of Shipbuilding, Nikolaev, Ukraine,

e-mail: aootnet@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8692-6458.