

УДК 532. 536-12. 536.2. 621

В. В. КОРОБКО

Національний університет кораблебудування ім. Макарова, УКРАЇНА

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЇ ТЕПЛООБМІННИКІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕРМОАКУСТИЧНИХ УСТАНОВОК

Розглянуто питання, які пов'язані з розробкою термоакустичних установок, призначених для використання низькотемпературних теплових ресурсів. Наведена схема термоакустичної установки, яка може бути реалізована на практиці. Проведено аналіз наявних теоретичних моделей термоакустичних апаратів. Показано, що застосування рекуперативних теплообмінників ТАТМ може призвести до формування неоднорідного температурного поля в матриці. За таких умов можливе суттєве погіршення характеристик, як термоакустичних апаратів, так і систем на їх основі. Визначені найбільш доцільні напрямки подальших робіт, які мають бути спрямовані на пошук конструктивних заходів для вирішення цих проблем.

Ключові слова: термоакустична установка, тепла машина, термоакустика, термодинаміка, математичні моделі, теплообмін.

Вступ

Питання підвищення ефективності використання теплової енергії є важливою задачею. Вдосконалення теплових двигунів, технологічних процесів та систем енергозощадження зумовило тенденцію до зменшення, як об'ємів, так і температурного рівня скидних теплових ресурсів.

В деяких випадках маємо ситуацію, коли традиційні технології енергозбереження стають малоефективними або економічно недоцільними. Тому, розробка та впровадження нових інноваційних підходів для використання низькотемпературної скидної теплової енергії стає наявною задачею.

Одним із перспективних напрямів, щодо утилізації низькотемпературних (НТ) вторинних енергоресурсів (ВЕР), є провадження термоакустичних установок (ТАУ), в яких можуть бути застосовані різні термоакустичні теплові машини (ТАТМ) [1–3].

Існують два типи ТАТМ, це – термоакустичні двигуни (ТАД) та термоакустичні теплові насоси (ТАТН), або термоакустичні рефрижератори (ТАР).

За принципом дії, властивостями ТАТМ суттєво відрізняються від механічних машин. Так в ТАТМ відсутні рухомі вузли, в них не використовуються шкідливі для довкілля речовини, завдяки цьому їм притаманні висока надійність, екологічність та відносно мала вартість.

В ТАТМ можна реалізувати термодинамічні цикли Брайтону та Стірлінгу, ТАД здатні працювати від будь-яких зовнішніх джерел теплової енергії, у тому разі низькотемпературних та криогенних..

Низька енергонасиченість ТАТМ, малий досвід їх практичного використання та складність безпосереднього отримання механічної енергії перешко-

джають широкому впровадженню термоакустичних установок на практиці

1. Аналіз попередніх досліджень

В ТАТМ за рахунок термоакустичного ефекту здійснюються взаємні перетворення енергії теплової форми в механічну у вигляді акустичних хвиль, та зворотній процес.

Зазвичай акустичну енергію характеризує акустична інтенсивність, яку визначають, як

$$\begin{aligned} \dot{E}_2 &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} [p_1 \dot{U}_1] = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [\tilde{p}_1 U_1] = \\ &= \frac{1}{2} |p_1| |U_1| \cos \phi_{pU} = \frac{1}{2} A |p_1| |u_1| \cos \phi_{pu}, \end{aligned} \quad (1)$$

де - p_1, u_1 - акустичний тиск та коливна швидкість,

A – площа перетину каналу.

Базові положення сучасної теорії термоакустики викладені в роботах N. Rott [1], в подальшому G. W. Swift [2], розвинув цю модель, запровадивши так звану «short engine model» модель ТАТМ.

Модель *Rott-Swift* (MRS) була побудована для ідеалізованої матриці - пакету паралельних пластин, при цьому до розгляду брався окремих елементарний канал, як показано на рис. 1.

Ця модель є загально визнаною і широко використовується в термоакустиці. Слід особливо звернути увагу на те, що в MRS розглядається виключно одновимірна модель, коли всі параметри робочого середовища є функціями лише позаддовжньої координати. В поперековому перетині розглядаються осереднені величини.

Отже, **MRS** добре відображає процеси в порожнинах резонаторів, матрицях, але в елементах, де апріорі присутні тримірні ефекти, її можливості дещо обмежені. На базі цієї моделі створені програмні продукти, які є у вільному доступі і застосовуються в дослідженнях та практичній діяльності.

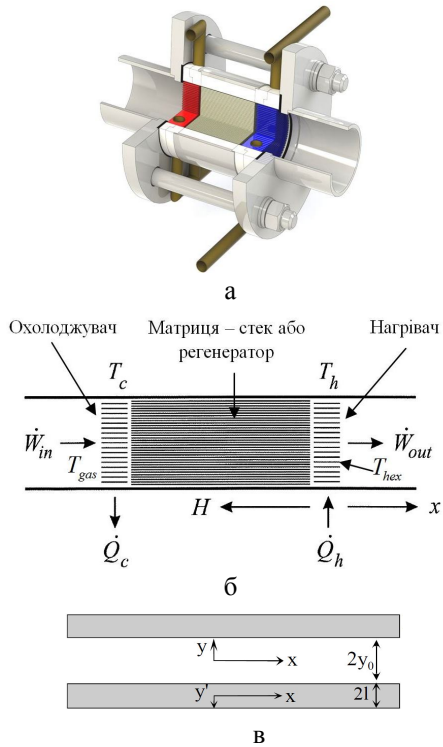


Рис. 1. Модуль термоакустичних перетворень та його складові елементи: а – конструкція; б – схема блоку теплообмінників ТАТМ; в – елемент матриці

Фундаментальні засади ТАТМ запроваджує «хвильове термоакустичне рівняння» або рівняння Ротта, яке пов'язує акустичний тиск, з поєздовжнім градієнтом температури та геометрією матриці

$$\left[1 + \frac{(\gamma - 1)}{(1 + \epsilon_s)} f_k \right] p_1 + \frac{c^2}{\omega} \rho_m \frac{d}{dx} \left[\frac{(1 - f_v)}{\rho_m} \frac{dp_1}{dx} \right] + \beta \frac{c^2}{\omega} \frac{f_k - f_v}{(\sigma - 1)(1 + \epsilon_s)} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} = 0, \quad (2)$$

де γ – показник адиабати;
 c – швидкість звуку;
 σ – стала Прандтля;
 ϵ_s – фактор, що враховує теплофізичні властивості газу та матриці;

f_k та f_v – просторово осереднені термоакустичні функції Ротта [1, 2].

Згідно **MRS** акустичну потужність, яку продукує або генерує елементарний канал матриці (стеку) (див. рис. 1) довжиною dx , можна визначити, як

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

де - $U_1 = u_1 A$ - об'ємна швидкість осцилюючого середовища;

r_v - в'язкісна складова акустичного опору;

ρ_m - щільність робочого середовища;

ω - кутова швидкість;

r_k - терморелаксаційна складова;

T_m - осереднена температура середовища;

Комплексний коефіцієнт «підсилювання або зменшення» об'ємної швидкості при наявності поєздовжнього градієнту температури, визначається як

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

Можна вважати, що матриця МТП працює як своєрідний «термоакустичний» підсилювач, коефіцієнт підсилення якого залежить від поєздовжнього градієнту температур dT_m/dx .

Загальну потужність ТАД в **MRS** визначають шляхом інтегрування по об'єму матриці. При цьому в поперековому перетині поля температур та швидкості вважаються однорідними.

В теорії термоакустики важливим є поняття повного потоку енергії. Це потік енергії, що переноситься у матриці в поєздовжньому напрямку від нагрівача до охолоджувача завдяки присутнім механізмам теплопереносу – гідродинамічному та теплопровідності. Частина цього потоку енергії перетворюється в акустичну енергію

Враховуючи зв'язок між ентальпією dh та ентропією ds

$$dh = Tds - dp/\rho, \quad (5)$$

можемо показати, що

$$\dot{N}_2 = \frac{1}{2} \text{Re}[p_1 \tilde{U}_1] + \frac{1}{2} \rho_m T_m \int \text{Re}[s_1 \tilde{u}_1] dA - (Ak - A_{stk} k_{stk}) \frac{dT_m}{dx}. \quad (6)$$

Як було показано в [4,5], невідповідність потужності теплообмінників потенційній енергоємності матриці суттєво впливає на характеристики ТАД і є фактором, що обмежує його потужність.

У разі проектування потужних ТАУ характеристики теплообмінників можуть мати вирішальне

значення. Розгляду питань, пов'язаних з характеристиками теплообмінників ТАТМ, присвячена ця робота.

Мета роботи

Метою роботи є аналіз впливу конструкції та параметрів теплообмінників та їх характеристик на ефективність ТАД і термоакустичних установок, визначення раціональних шляхів вдосконалення низькотемпературних термоакустичних машин.

Викладання основного матеріалу

На рис. 2 показана схема термоакустичної установки (ТАУ), яка призначена для використання НТР. На поточний момент найбільш вдосконали енергозберігаючі ТАУ запропоновані нідерландськими дослідниками фірми ASTER [3], які реалізували низку пілотних проектів.

Згідно з наведеною схемою, ТАУ можна поділити на три складові:

ТАД – теплова машина, яка здійснює перетворення теплової енергії в механічну у вигляді потужних акустичних хвиль.

Корисне навантаження – елемент, який здатен механічну енергію акустичних хвиль перетворювати в іншу форму енергії або механічну роботу в залежності від наявних потреб;

Зовнішні системи, з проміжним теплоносієм, які забезпечують енергообмін між робочим тілом ТАТМ, джерелом теплової енергії та довідками.

Будь-яка енергетична установка з тепловим

двигуном має в своєму складі системи, які забезпечують підвід теплової енергії до робочого тіла. Для ТАД такими системами є зовнішні контури з проміжними теплоносіями. В якості теплоносіїв в таких системах частіш за все використовують термоолії, які здатні працювати при температурах порядку 150 – 350 °С.

Теплообмінники цих систем постачають енергію до робочого тіла ТАТМ, тим самим забезпечують зв'язок між зовнішніми джерелами енергії, робочим тілом та довідками. Найбільш потужним теплообмінником в ТАД є нагрівач, потужність якого має бути не менша за загальний потік теплоти в матриці ТАД (6).

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_{HC} \geq \dot{N}_2. \quad (7)$$

Теплообмінники низькотемпературного ТАД мають досить специфічну конструкцію (рис. 2). Частіше за все, це трубчато-реберної теплообмінної поверхні, повздовжній розмір яких визначається подвійною амплітудою коливального руху робочого тіла – ζ [1].

Рідинний теплоносіє рухається по внутрішнім каналам теплообмінника, а робоче тіло ТАТМ, ззовні, здійснює коливальний рух. Величина коливального переміщення може бути розрахована, як

$$\zeta = \frac{2p_1(x)}{r\omega}. \quad (8)$$

Таким чином за умов реальних ТАД повздовж-

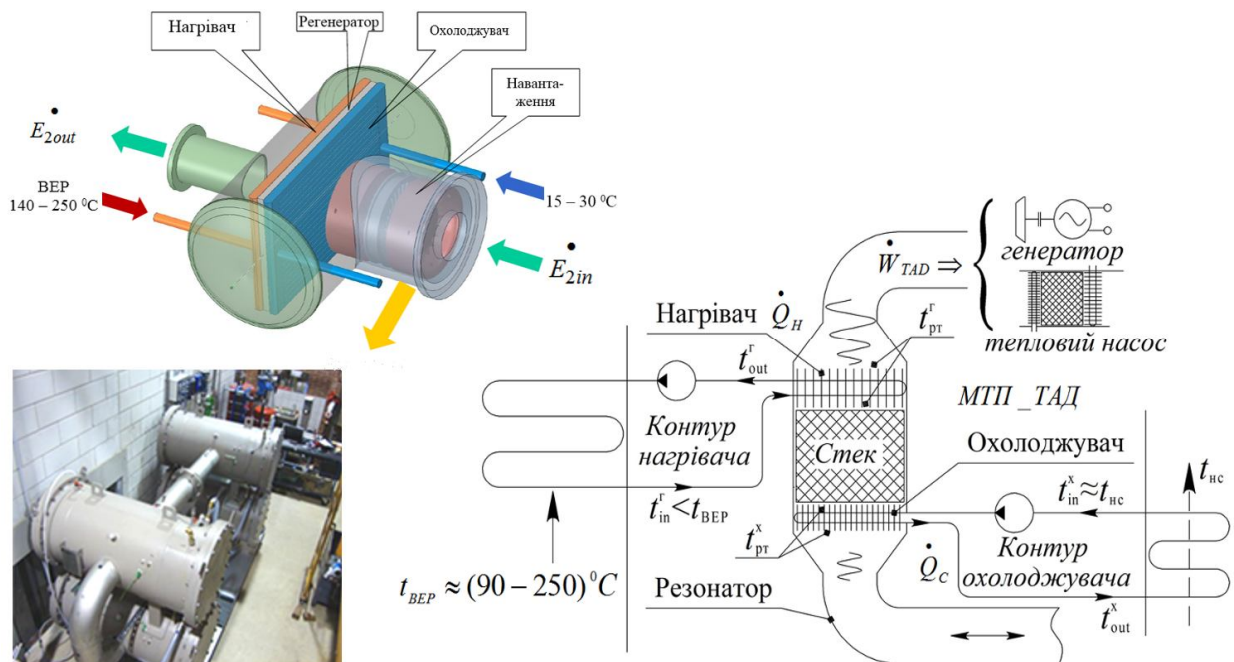


Рис. 2. Зовнішній вигляд та принципова схема термоакустичної установки для утилізації НТ ВЕР

ній розмір теплообмінників може сягати 0,04–0,08 м. Ці обставини багато в чому визначають конструкцію та характеристики цих теплообмінників.

По-перше, за для забезпечення потрібної потужності ці теплообмінники мають великий фронтальний розмір.

По-друге, коливальний рух робочого тіла формує специфічну гідродинамічну картину, яка впливає на інтенсивність теплообміну.

По-третє, перехресна схема руху теплоносіїв та малий повздовжній розмір рекуперативних теплообмінників ТАД суттєво впливає на їх розподіл температур на виході з теплообмінника.

З практики теплообміну відомо, що перехресна схема руху теплоносіїв гарантовано формує неоднорідне температурне поле по фронту теплообмінників. Розрахунок температурного поля і для звичайних умов є складною задачею. Зазвичай в теплотехніці оперують осередненими значеннями температур, що є сприйнятним для більшості задач, але відсутність спрямованого руху газового теплоносія значно ускладнює задачу.

В даному випадку, коли маємо тепловий двигун, цей параметр впливає на ефективність процесів енергетичного обміну між зовнішнім джерелом енергії та робочим тілом. Будь-яка осереднена температура T_{iH} менша за температуру джерела

$$T_H > T_{H0} > T_{iH},$$

а це для ТАД не буде реальна верхня температура циклу, з якою пов'язані ефективність та потужність ТАД.

У разі розробки ТАД ці обставини стають принципово важливими, оскільки порушується важливе припущення MRS, за яким у матриці існує лише повздовжній градієнт температури,

$$T_m = f(x, y, z) \text{ и відповідно } \frac{dT_m}{dy} \neq 0.$$

Зрозуміло, що ця неоднорідність розподілу температури залежить від багатьох факторів, таких як кількості переданої теплоти, витрати проміжного теплоносія, його теплоємності, гідравлічної схеми теплообмінника, тощо.

В першому приближенні кількісні межі цієї неоднорідності можна оцінити, як

$$\Delta T_1 \approx T_H - T_{Hout} = \frac{\dot{Q}_H}{G_{HC}}, \quad (9)$$

де G_H – витрата проміжного теплоносія;
 c – його теплоємність.

Для аналізу впливу цього фактору на характеристики ТАТМ доцільно застосувати метод «Finite Time Thermodynamic» або ФТТ термодинаміки [6], в рамках якої побудована феноменологічна модель ТАД (рис. 3).

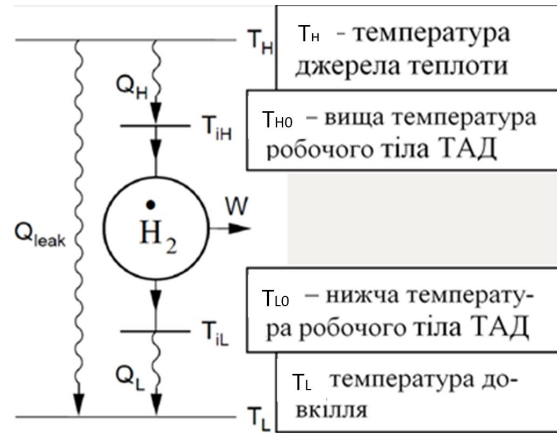


Рис. 3. Модуль термоакустичних перетворень та потоки енергії в ТАТМ

Особливість ФТТ моделі ТАД полягає в запровадженні узагальненого закону енергообміну, який дозволяє урахувати параметри джерел енергії, потужності ТМ, частоти звукової хвилі

$$Q \propto \Delta (T_H^n - T_L^n), \quad (10)$$

де $n = n_1 + in_2$ – комплексний показник,

ФТТ передбачає урахування впливу незворотних процесів різної природи з допомогою узагальнюючого коефіцієнта внутрішньої незворотності.

В даному випадку задаємо його, як суму

$$\phi_\Sigma = (\phi_{stk} + \phi_{hex}) \geq 1, \quad (11)$$

де ϕ_{stk} - коефіцієнт внутрішньої незворотності процесів у матриці ТАД [1];

ϕ_{hex} - коефіцієнт впливу неоднорідності розподілу температур.

Згідно першого закону термодинаміки в ТАТМ, має виконуватись умови

$$T_H > T_{H0} > T_{iH} > T_{iL} > T_{L0} > T_L, \quad (12)$$

$$\dot{E} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = \dot{Q}_{HC} - \dot{Q}_{LC}. \quad (13)$$

Як показано в [6], та з урахуванням (10), можна записати, що

$$T_{H0}^n = \frac{\alpha F_{HEX}^H f \phi_{\Sigma} x T_H^n + k_2 T_L^n}{k_2 x^n + k_1 x F_{HEX}^H / F_{HEX}^C \phi_{\Sigma}}, \quad (14)$$

де α та β - коефіцієнти теплопередачі нагрівача та охолоджувача;

$\chi = T_{L0}/T_{H0}$ - температурний коефіцієнт;

$f = F_{HEX}^H / F_{HEX}^C$ - відношення повних площин теплообмінників;

підприємств:

$\delta = \alpha/\beta$ - відношення коефіцієнтів теплопередачі,

$F = F_{HEX}^H + F_{HEX}^C$ - сумарна площа теплообмінників

Тоді кількість теплової енергії, що передана за допомогою теплообмінників, визначається, як

$$\dot{Q}_{HC} = \frac{\alpha F_{HEX}^H (x^n T_H^n - T_L^n)}{x^n + \phi_{\Sigma} x F_{HEX}^H / F_{HEX}^C \alpha / \beta}, \quad (15)$$

$$\dot{Q}_{LC} = \phi_{\Sigma} \chi \frac{\alpha F_{HEX}^H (\chi^n T_H^n - T_L^n)}{x^n + \phi_{\Sigma} \chi F_{HEX}^H / F_{HEX}^C \alpha / \beta}. \quad (16)$$

Відповідно до цього, потенційна потужність, яку здатен розвинути ТАД - \dot{E}' , та його ефективність - η' в комплексній формі, будуть виражені, як

$$\dot{E}' = \dot{Q}_{HC} - \dot{Q}_{LC} = \alpha f F \frac{(1 - \phi_{\Sigma} \chi) [T_H^n - (T_L / \chi)^n]}{(1 + f)(1 + \phi_{\Sigma} \delta f \chi^{1-n})}, \quad (17)$$

та

$$\eta' = \frac{\alpha f F (1 - \phi_{\Sigma} \chi) [T_H^n - (T_L / \chi)^n]}{q(1 + f)(1 + \phi_{\Sigma} \delta f \chi^{1-n}) + \alpha f F [T_H^n - (T_L / \chi)^n]}. \quad (18)$$

Попередні оціночні розрахунки показали, що неоднорідного поля температур перед фронтом матриці ТАД здатна знизити ефективність ТАД на 25 – 45 відсотків, від розрахованої за MRS. Можливо, що саме неоднорідність температурного поля в дослідному ТАД «ASTER» завадила отримати проєктні характеристики.

Аналітичний розрахунок поля температур для прогнозування впливу температурної неоднорідності у даному випадку є край складним. Крім того, додаткова проблема полягає в тому, що не виконуються базові положення лінійної моделі термоакустики.

В цьому випадку більш доцільною буде розробка низки конструктивних заходів, які б запобігали формуванню неоднорідності. Враховуючи ці обста-

вини, доцільно формалізувати низку вимог щодо конструктивних особливостей внутрішніх теплообмінників МТП ТАД, а саме:

– теплообмінники мають забезпечити підвід потрібного теплового потоку від зовнішнього джерела теплової енергії до робочого тіла ТАД;

– температурне поле по фронту матриці має бути максимально однорідним.

Висновок

Термоакустичні установки, що призначені для використання низькотемпературних теплових ресурсів, вторинних та відновлювальних, мають суттєві особливості, які повинні бути враховані при їх розробці.

Зовнішні контури таких ТАУ пов'язують ТАТМ з джерелами енергії з допомогою систем з проміжними теплоносійми та рекуперативними теплообмінниками.

Внутрішні теплообмінники ТАД являють собою трубчато-реберні апарати з перехресним рухом теплоносій, де рідинний теплоносій рухається по трубках, а газовий – робоче тіло ТАД, здійснює виключно коливний рух, що пов'язаний з присутністю акустичної хвилі.

Наявність рекуперативних теплообмінників з перехресним током теплоносій та великою фронтальною площиною зумовлює формування неоднорідного розподілу температур по фронту апарата.

Неоднорідність температурного поля за теплообмінниками не відповідає наявній лінійній теоретичній моделі термоакустики та призводить до втрати ефективності ТАД, оскільки вносить додаткові термодинамічно нерівноважні процеси.

Впровадження термоакустичних установок потребує розробки системи заходів для вдосконалення конструкції теплообмінників.

Література

1. Rott, N. *Thermoacoustics [Text] / N. Rott // Adv. Appl. Mech. – 1980. – № 20(135). – P. 250–272.*
2. Swift, G. W. *Thermoacoustic: A unifying perspective for some engines and refrigerators [Text] / G. W. Swift // American Inst. of Physics, 2002. – 300 p.*
3. De Blok, K. *Low operating temperature integral thermo acoustic devices for solar cooling and waste heat recovery [Text] / K. De Blok // Acoustic-2008, International conference. – Paris, 2008. – P. 18–24.*
4. Коробко, В. В. *Влияние интенсивности теплообмена на характеристики термоакустических двигателей [Текст] / В. В. Коробко, А. А. Московко // Сучасні інформаційні технології на транспорті : матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф. (MINTT-2014). – Херсон. 2014. – С. 257–260.*

5. Коробко, В. В. Исследование процессов теплообмена и гидродинамики в элементах термоакустических двигателей [Текст] / В. В. Коробко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – №8 (105). – С. 123–130.

6. Optimization of a Thermoacoustic Engine with a Complex Heat Transfer Exponent [Text] / F. Wu, C. Wu, F. Guo, Q. Li [at all] // *The Int. J. Entropy*. – 2003. – № 5. – P. 444–451.

References

1. Rott, N. Thermoacoustics. *Adv. Appl. Mech.*, 1980, no. 20 (135), pp. 250-272.

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

3. De Blok, K. Low operating temperature integral thermo acoustic devices for solar cooling and waste heat

recovery. *Acoustic-2008, International conference*, Paris, 2008, pp. 18-24.

4. Korobko, V. V. Vliyanie intensivnosti teploobmena na kharakteristiki termoakusticheskikh dvigatelei [Impact of heat transfer rate on the characteristics of the thermoacoustic engines]. *Suchasni informatsiyni tekhnolohiyi na transporti : materialy VI Mizhnar. nauk.-prakt. konf.* [Modern information technologies in transport. Mat. Intern. 6th Sci. Conf.] (MITT-2014), Kherson, 2014, pp. 257-260.

5. Korobko, V. V. Issledovanie protsessov teploobmena i gidrodinamiki v elementakh termoakusticheskikh dvigatelei [Investigation of heat transfer and hydrodynamics in thermoacoustic engine components]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2013, no. 8 (105), pp. 123-130.

6. Wu, F., Wu, C., Guo, F., Li, Q. and Chen, L. Optimization of a Thermoacoustic Engine with a Complex Heat Transfer Exponent. *The Int. J. Entropy*, 2003, no. 5, pp. 444-451.

Поступила в редакцию 07.05.2016, рассмотрена на редколлегии 16.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, директор С. І. Сербін, Машинобудівний навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛООБМЕННИКОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В. В. Коробко

Рассмотрены вопросы, связанные с разработкой термоакустических установок предназначенных для использования низкотемпературных тепловых ресурсов. Приведена схема термоакустической установки которая может быть реализована на практике. Выполнен анализ существующих теоретических моделей термоакустических аппаратов. Показано, что применение рекуперативных теплообменников ТАТМ может привести к формированию неоднородного температурного поля в матрице. При таких условиях возможно существенное ухудшение характеристик, как термоакустических аппаратов, так и систем на их базе. Определены наиболее целесообразные направления дальнейших работ, которые должны быть направлены на поиск конструктивных мер по разрешению этих проблем.

Ключевые слова: термоакустическая установка, тепловая машина, термоакустика, термодинамика, математические модели, теплообмен.

ANALYSIS OF INFLUENCE OF CONSTRUCTION OF HEAT EXCHANGERS ON FEATURES OF LOW TEMPERATURE THERMOACOUSTIC PLANTS

V. V. Korobko

Issues related to the development of thermoacoustic systems designed to use low-temperature heat resources were reviewed. Scheme of thermoacoustic installation that could be realized in practice was presented. The analysis of existing theoretical models of thermoacoustic devices was given. It is shown that the use of recuperative heat ТАТМ can lead to the formation of nonuniform temperature field in the matrix. Under such circumstances a significant degradation in performance of thermoacoustic devices and systems based on them is possible. The most appropriate areas for further work was selected and are aimed at finding constructive measures to address these problems.

Key words: thermoacoustic installation, heat engine, thermoacoustic, thermodynamics, mathematical model, heat transfer.

Коробко Владимир Владиславович – канд. техн. наук, доцент, Национальный университет кораблестроения, доцент кафедры ССЭУ, Николаев, Украина, e-mail: vololymyr.korobo@nuos.edu.ua, kvv001@gmail.com.

Korobko Vladimir Vladislavovich – PhD, associate professor, National University of Shipbuilding, associate professor of the department SMPP, Nikolaev, Ukraine. e-mail: vololymyr.korobo@nuos.edu.ua, kvv001@gmail.com.