

УДК 532. 536-12. 536.2. 621

В. В. КОРОБКО

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна

## АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕРМОАКУСТИЧНИХ ТЕПЛОВИХ МАШИН ШЛЯХОМ РАЦІОНАЛЬНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ

В статті розглянуто можливі шляхи вдосконалення термоакустичних теплових машин за рахунок підвищення інтенсивності теплообміну між основними структурними елементами. Проведено аналіз теоретичних та експериментальних досліджень процесів теплообміну в елементах модулю термоакустичних перетворень – пористій матриці та рекуперативних теплообмінниках. Аналізуються особливості теплофізичних процесів в теплообмінниках термоакустичних апаратів в умовах пульсуючого середовища. Отримано залежності, які зв'язують зовнішні характеристики термоакустичних систем з параметрами теплообмінників. Визначено найбільш доцільні напрямки подальших робіт.

**Ключові слова:** тепла машина, термоакустика, оптимізаційна термодинаміка, теплообмін.

### Вступ

Питання використання низькотемпературних джерел теплової енергії – скидних та відновлювальних ресурсів – є актуальною задачею. В деяких випадках традиційні технології є малоефективними або економічно недоцільними. Тому розробка та впровадження нових інноваційних підходів раціонального використання скидної енергії стає актуальною задачею.

Одним із перспективних напрямків утилізації вторинних енергоресурсів є використання систем на базі термоакустичних теплових машин (ТАТМ). Ці апарати дозволяють створювати ефективні технічні рішення, призначені для використання низькотемпературних вторинних та відновлювальних теплових енергоресурсів [1, 2].

ТАТМ бувають двох типів – двигуни (ТАД) та теплові насоси (ТАТН) [3-5]. Конструкція ТАТМ має певні переваги що до механічних пристроїв: відсутність рухомих частин та шкідливих для довкілля робочих речовин, висока надійність, мала

вартість. Низька енергонасиченість ТАТМ та складність отримання механічної енергії перешкоджають їй широкому впровадженню.

### 1. Аналіз попередніх досліджень

Робота ТАТМ основана на термоакустичному ефекті – самочинному виникненні акустичних пульсацій при наявності необхідного поперемного градієнту температур  $\nabla T_m$  в пористій матриці (стеку або регенераторі) [3-5].

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

Цей градієнт формується в пористій матриці за допомогою двох теплообмінників – нагрівача та охолоджувача, скрізь які прокачуються відповідні теплоносії (рис.1).

Для подальшого аналізу доцільно запровадити поняття модулю термоакустичних перетворень (МТП) і розглядати цю сукупність теплообмінних поверхонь як єдиний елемент. Існуючі математичні

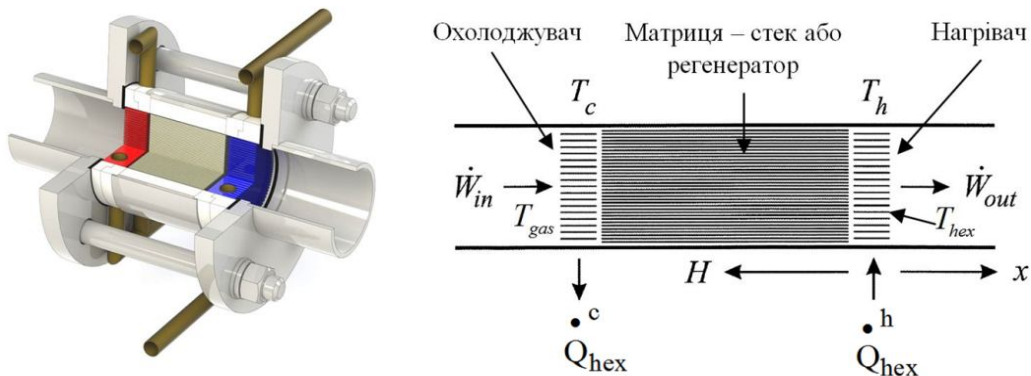


Рис. 1. Принципова схема модулю термоакустичного перетворювача (МТП)

моделі ТАТМ були створені на основі класичної системи рівнянь механіки та термодинаміки [4-6]. Термоакустичні перетворення в ТАТМ відбуваються в пористій матриці (рис.1), тому зрозуміло, що математична модель була створена саме для процесів, що відбуваються у стеку (матриці).

N. Rott в роботі [5] розробив основи теорії термоакустики. Пізніше Свіфт [4], базуючись на роботах Ротта, розвинув математичну теорію ТАТМ. Результатом цієї роботи стала загально визнана лінійна математична модель термоакустики, яка являє собою систему диференціальних рівнянь першого порядку відносно акустичного тиску  $p_1$  та об'ємної швидкості  $U_1$

$$\frac{dU_1}{dx} = -\frac{i\omega A}{\rho_m a^2} \left( 1 + \frac{(\gamma-1)f_k}{1+\epsilon_s} \right) p_1 + \frac{\beta(f_k - f_v)}{(1-\sigma)(1+\epsilon_s)} \frac{dT_m}{dx} U_1, \quad (2)$$

$$\frac{dp_1}{dx} = -\frac{i\omega \rho_m}{A(1-f_v)} U_1. \quad (3)$$

Ці рівняння часто наводять у вигляді «хвильового термоакустичного рівняння» або рівняння Ротта.

$$\left[ 1 + \frac{(\gamma-1)}{(1+\epsilon_s)} f_k \right] p_1 + \frac{a^2}{\omega^2} \rho_m \frac{d}{dx} \left[ \frac{(1-f_v)}{\rho_m} \frac{dp_1}{dx} \right] + \beta \frac{a^2}{\omega^2} \frac{f_k - f_v}{(\sigma-1)(1+\epsilon_s)} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} = 0, \quad (4)$$

- де  $\gamma$  – показник адиабати;
- $a$  – швидкість звуку;
- $\rho_m$  – щільність середовища;
- $\sigma$  – стала Прандтля;
- $\omega$  – кутова швидкість акустичної хвилі;
- $\epsilon_s$  – фактор, що враховує теплофізичні властивості газу та матриці;
- $T_m$  – розподіл температур повздовж матриці;
- $p_1$  – акустичний тиск в резонаторі;
- $f_k$  та  $f_v$  – термов'язкісні функції Ротту.

В термоакустиці введено поняття сумарного термоакустичного потоку енергії в стеку ТАТМ

$$\begin{aligned} \dot{H}_2 = & \frac{1}{4} \Pi \delta_k \frac{T_m \beta p_1 \langle u_1 \rangle}{(1+Pr)(1+\epsilon_s)\Lambda} \times \\ & \times \left[ \Gamma \frac{1+\sqrt{\sigma}+\sigma(1+\epsilon_s)}{1+\sqrt{\sigma}} - \left( 1+\sqrt{\sigma} - \frac{\delta_v}{y_0} \right) \right] - \\ & - \Pi (y_0 k + Lk_s) \frac{dT_m}{dx}. \end{aligned} \quad (5)$$

Робота, яка продукується або споживається в матриці в термоакустичних процесах, може бути

визначена, як

$$\dot{W}_2 = \Pi y_0 \operatorname{Re} \left( \frac{ip_1}{2\omega \rho_m} \frac{dp}{dx} \right) (1-f_v). \quad (6)$$

Або

$$\begin{aligned} \dot{W}_2 = & \frac{1}{4} \Pi \delta_k L_s \frac{(\gamma-1)\varpi(p_1^s)^2}{\rho_m C^2 (1+\epsilon_s)} \times \\ & \times \left( \frac{\Gamma}{(1+\sqrt{\sigma})\Lambda} - 1 \right) - \frac{1}{4} \Pi \delta_v L_s \frac{\omega \rho_m \langle u_1^2 \rangle}{\Lambda}, \end{aligned} \quad (7)$$

де  $\Pi, L$  - периметр та довжина (матриці);

$f_h$  та  $\lambda$  - характерні розміри елементу ТАТМ.

$T_m, p_m, \rho_m, c_p$  - теплофізичні параметри, відповідно - середня температура, тиск, щільність, теплоємність;

$\delta_s = \sqrt{2\lambda_s/\rho_s c_s \omega}$  - 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;

$\nabla T_{crit} = p_1 \omega / \rho_m c_p u_s$  - критичний температурний градієнт;

$\Gamma = \nabla T_m / T_{crit}$  - нормалізований градієнт.

Ця лінійна модель Ротту-Свіфта зараз є загально визнаною. Але вона має певні обмеження, оскільки і не в повній мірі враховує процеси підводу теплової енергії к стеку, рівень температур наявних джерел теплової енергії, особливості взаємодії робочого тіла з теплообмінниками ТАТМ.

Експериментальні дослідження виявили, що теплообмін в МТП в пульсуючому середовищі в присутності потужних акустичних пульсацій має значні відмінності від процесу в однонаправлених течіях [7].

Крім того, в [8] показано, що тепла потужність стеку може перевищувати відповідну потужність теплообмінників, що значно погіршує характеристики ТАТМ.

Спроба систематизувати опубліковані дані що до теплообміну в ТАТМ зроблена в [9]. Результати цієї роботи показують на значні розбіжності в експериментальних результатах різних дослідників та відсутність єдиного узагальнюючого підходу.

## 2. Постановка задачі

МТП є важливою частиною ТАТМ, яка суттєво впливає на її загальну ефективність та продуктив-

ність. Оскільки МТП складається з різних типів поверхонь – пористої матриці та рекуперативних теплообмінників – заходи з його вдосконалення доцільно впроваджувати з урахуванням умов роботи кожної з них та особливостями теплофізичних процесів, які зумовлено осцилюючим рухом робочого середовища.

Визначення найбільш дієвих шляхів підвищення ефективності ТАТМ за рахунок інтенсифікації теплообміну в складових елементах МТП є метою даної роботи.

### 3. Аналіз факторів, що визначають інтенсивність процесів теплообміну в МТП

Розглянемо окремо процеси теплообміну в елементах МТП – пористій матриці та рекуператорах. Такий підхід є цілком виправданим, якщо взяти до уваги, що механізми, які визначають інтенсивність теплообміну в цих теплообмінниках, суттєво відрізняються.

#### 3.1. Процеси в пористій матриці

Пориста матриця є найбільш важливим елементом ТАТМ, оскільки в її об'ємі відбуваються процеси термоакустичних перетворень. Тому зрозуміло, що найбільша кількість досліджень в термоакустиці присвячена саме вивченню матриці.

Основні параметри, що характеризують пористі матриці, пов'язані з розміром пор. В термоакустиці, в якості узагальнюючого критерію зручно використовувати сталу Лютрека (Lautrec), яка враховує як розмір каналів, так і її наявність пульсації робочого середовища. Ця стала, визначається як

$$Lc_k \equiv r_h / \delta_k \quad \text{або} \quad Lc_v \equiv r_h / \delta_v, \quad (8)$$

де  $r_h$  – гідравлічний радіус каналу.

Якщо  $Lc_k \geq 1$ , тоді матрицю називають стеком, а ТАТМ працює за циклом Брайтону, а в разі  $Lc_k \ll 1$ , матрицю називають регенератором, а в ТАТМ реалізований цикл Стірлінгу [ 6 ].

Аналізуючи данні, опубліковані різними дослідниками, можна прийти до висновку, що для матриці ТАТМ проведено найбільше число досліджень, детально вивчені питання оптимізації їх геометричних характеристик та їх впливу на зовнішні показники термоакустичних апаратів.

Так, в фундаментальній роботі [10] досліджувались вплив різних чинників на ефективність ТАД, в тому разі вивчався вплив форми та розмірів каналів пористої матриці, її довжини стеку, положення в резонаторі ТАД та інші.

Деякі результати цих досліджень наведено на рис. 2. Можна побачити, що найбільш суттєво впливають на ефективність регенератору «структурні» характеристики, які пов'язані з його геометрією, це – стала  $Lc_k$  та пористість. Важливим є те, що ці функції мають чітко виражений екстремум. Слід зауважити, що наведені залежності справедливі лише для даного апарату, тому можуть розглядатися лише, як ілюстративні.

Відомо, що теплообмін між матрицею та робочим тілом здійснюється за рахунок двох механізмів – конвекційного теплообміну та теплопровідності. Інтенсивність теплообміну за звичай характеризують з допомогою критерію Нуссельту, який визначається, як

$$Nu_r = h_p r_h / k = \frac{r_h}{\langle T_{gas} \rangle - T_{reg}} \frac{\partial (T_{gas} - T_{reg})}{\partial y}. \quad (9)$$

Такий підхід цілком прийнятний для умов одностороннього руху теплоносія, він базується на використанні емпіричних даних, які отримуються за відомими методиками. В ході таких експериментів, потрібно забезпечити вимірювання температур робочого тіла –  $T_{gas}$  та теплообмінних  $T_{reg}$ , теплових балансів, тощо. Експериментальні дослідження теплообміну в умовах пульсуючого руху теплоносія при наявності потужних акустичних коливань є складною задачею, оскільки присутній зсув фаз між пульсаціями тиску, температури та швидкості та інше. Крім того виникають питання відносно можливості поширення емпіричних результатів для умов, відмінних від дослідних.

Вважаючи на ці обставини, можна вважати доцільним використання підходу, який був запропонований в роботі [11]. Авторами показано, що використання комплексного представлення сталої Нуссельту та впровадження термов'язкісних або термоакустичних функцій  $f_k \propto r_h / \delta_k$  та  $f_v \propto r_h / \delta_k$  дозволяють врахувати теплофізичні та геометричні характеристики різних матриць. Термоакустичні функції Ротту  $f_v$  та  $f_k$  покладено в основу математичної теорії термоакустики. Ці функції або отримано теоретично, або визначено експериментально для більшості поверхонь, які використовуються на практиці.

Автори, користуючись підходами лінійної моделі термоакустики Ротта-Свіфта, розглянули теплообмін між матрицею та осцилюючим середовищем та отримали вирази для середніх значень по перетину температури робочого середовища та коливної швидкості:

$$T_1 = \frac{1}{c_p \rho_m} (1 - f_k) - \frac{1}{i \omega A} \frac{dp_1}{dx} \frac{(1 - f_k) - \sigma (1 - f_v)}{(1 - f_v)(1 - \sigma)}, \quad (10)$$

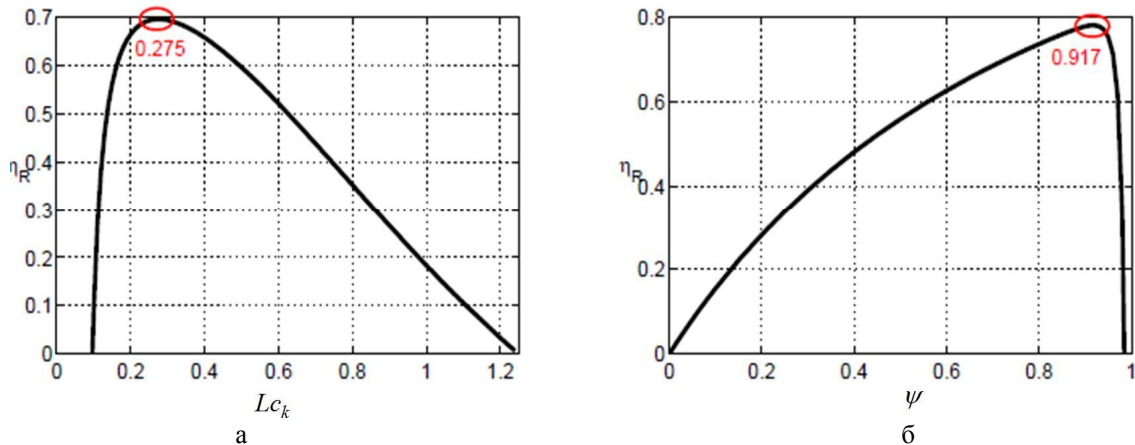


Рис. 2. Залежність ефективності регенератору від: а - сталой Лютрека,  $Lc_k$ , та б – пористості,  $\psi$

$$u_1 = \frac{1}{i\omega\rho_m}(1-f_v)\frac{dp_1}{dx} \quad (11)$$

Це дало змогу отримати вирази для розрахунку теплообміну як при наявності повздовжнього градієнту температури  $dT_m(x)/dx$ , так і без нього.

Для осцилюючого середовища, за умов  $dT_m(x)/dx = 0$ , для сталой Нуссельту, отримаємо вираз

$$Nu_p = h_p r_h / k = 2i(Lc_k)^2 \left( \frac{f_k}{1-f_k} \right) \quad (12)$$

та у випадку, коли  $dT_m(x)/dx \neq 0$

$$Nu_T = h_T r_h / k = 2i(Lc_k)^2 \left[ \frac{(1-f_v)(1-\sigma)}{(1-f_k) - \sigma(1-f_v)} - 1 \right] \quad (13)$$

В ліміті, для граничного шару ці вирази мають вигляд відповідно

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} Nu_p = r_h / k (1+i) = (1+i)Lc_k \quad (14)$$

та 
$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} Nu_T = r_h / k (1+i) \frac{1-\sqrt{\sigma}}{1-\sigma} \quad (15)$$

Дані, наведені на рис. 3, свідчать, що в разі  $Lc_k \ll 1$   $Nu_p$  та  $Nu_T$  залежать від геометричних характеристик матриці (типу матриці) і інтенсивність теплообміну визначається теплопровідністю, що цілком зрозуміло, вважаючи на малий розмір каналів. Так, в регенераторах ТАТМ з циклом Стірлінгу використовуються матриці з розміром пор – 20 – 40 мкм. Таким чином, можна бачити, що можливості вдосконалення матриць ТАТМ досить обмежені, оскільки позначаються фізичними якими матриці і робочого тіла, розмірами каналів – пор та робочою частотою ТАТМ.

Але для теплообмінників, коли  $Lc_k \geq 1$ , на інтенсивність теплообміну починають суттєво впли-

вати гідродинамічні фактори, що дає змогу запровадити методи інтенсифікації теплообміну та, завдяки цьому, підвищити ефективність ТАТМ.

### 3.2. Теплообмін в теплообмінниках ТАТМ

В ТАТМ теплообмінники МТП є основними вузлами, які забезпечують підвід енергії від зовнішніх джерел теплоти до робочого тіла та скид її до довкілля. Як було показано в [7,8,14], їх теплова продуктивність може бути обмежуючим фактором для потужності ТАТМ. Тому, питання розробки спеціальних теплообмінників для термоакустичних апаратів набувають першочергового значення.

У цьому зв'язку продуктивним видається підхід, запропонований в [12,13], в якому за допомогою апарату оптимізаційної термодинаміки «FTT thermodynamic» побудовано феноменологічну модель ТАТМ. Цей підхід дозволяє врахувати послідовно процеси теплообміну між джерелом енергії, робочим тілом та теплообмінниками. Особливість такої моделі полягає в використанні узагальненого закону підводу теплоти до робочого тіла, який базується на урахуванні циклічності дії теплової машини,

$$Q \propto \Delta(T_H^n - T_L^n), \quad (16)$$

де  $n = n_1 + n_2 i$  - комплексний показник, що враховує частоту робочого циклу ТАТМ.

В загальному випадку кількість теплоти, що передана нагрівачем  $\dot{Q}_{hex}^h$  або охолоджувачем  $\dot{Q}_{hex}^c$  до робочого тіла з температурою  $T_{gas}^n$ , можна виразити, як

$$\dot{Q}_{hex}^h = h_{hex}^h F_{hex}^h (T_{hex}^n - T_{gas}^n), \quad (17)$$

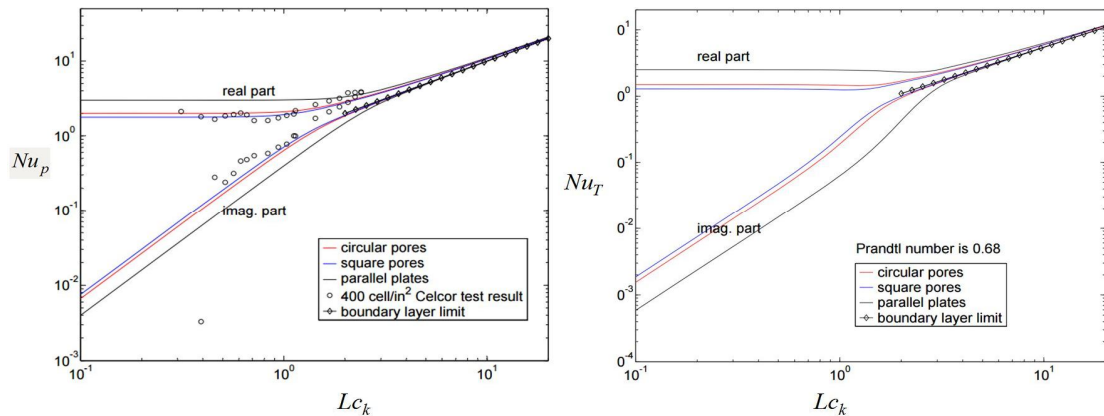


Рис. 3. Залежність  $Nu_p, Nu_T = F(Lc_k)$  для різних типів матриц при  $Pr = 0.68$  [ 10 ]

$$\dot{Q}_{hex}^c = h_{hex}^c F_{hex}^c (T_{gas}^n - T_{hex}^n), \quad (18)$$

$$h_{hex} = 2ik(Lc_k)^2 / \Gamma_h \left[ \frac{(1-f_v)(1-\sigma)}{(1-f_k) - \sigma(1-f_v)} - 1 \right]. \quad (21)$$

де  $F_{hex}^h$  та  $F_{hex}^c$  - зовнішні площі теплообмінників;

$T_{hex}^{h,c}$ ,  $T_{gas}^n$  - температури теплообмінників, та робочого тіла (рис. 1);

$h_{hex}^h$  та  $h_{hex}^c$  - коефіцієнти тепловіддачі.

Згідно першому закону термодинаміки потужність ТАТМ (6) -  $\dot{W}$  може бути записана

$$\dot{W} = \dot{W}_{out} - \dot{W}_{in} = \dot{Q}_{hex}^h - \dot{Q}_{hex}^c. \quad (19)$$

Але наявність осцилюючого руху робочого тіла в акустичній хвилі ускладнює застосування такого традиційного підходу, оскільки відсутні надійні дані відносно інтенсивності теплообміну [9, 14], і коефіцієнти  $h_{hex}^h$  та  $h_{hex}^c$  не визначено.

В зв'язку з цим, використання підходу, який базується на комплексних термоакустичних функціях Ротту, суттєво спрощує вирішення проблеми.

Тобто, в даному випадку теплообмінники МТП можна розглядати, як пористе середовище, в якому виконується умова  $Lc_k \geq 1$ , що цілком відповідає реальним конструкціям теплообмінників [3-5].

В більшості випадків, коли повздовжній розмір теплообмінників суттєво менший ніж довжина матриці, можна вважати температуру поверхні теплообмінників в повздовжньому напрямку постійною, тобто  $dT_m(x)/dx = 0$ .

Тоді, для розрахунків, використавши (12), отримаємо

$$h_{hex} = 2i(Lc_k)^2 k / \Gamma_h \left( \frac{f_k}{1-f_k} \right). \quad (20)$$

В разі наявності значного градієнту температур вздовж теплообмінника слід використовувати (13)

### Висновок

В ТАТМ блок теплообмінників, який складається з пористої матриці та рекуператорів доцільно розглядати в комплексі, як єдиний елемент.

Інтенсивність теплообміну в пористій матриці (регенераторі, або стеку) в більший мірі залежить від її «структурних» параметрів: розміру пор, пористості, теплофізичних якостей матеріалу, тому можливості вдосконалення її характеристик обмежені.

Недостатня ефективність рекуперативних теплообмінників суттєво впливає на показники ТАТМ. Процеси теплообміну в умовах акустичних коливань в пульсуючому середовищі мало досліджені. Крім того відсутні загальноприйняті критерії для співставлення експериментальних даних, що значно ускладнює їх подальше використання на практиці.

Застосування термоакустичних функцій Ротту дозволяє поширити використання наявної експериментальної інформації та спростити процеси розробки ефективних ТАТМ. Коректність такого підходу потребує експериментальної перевірки.

### Література

1. 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.
2. Rott, N. *Thermoacoustics* [Text] / N. Rott // *Adv. Appl. Mech.* – 1980. – № 20 (135). – P. 250-272.
3. Wheatley, J. C. *The natural heat engines* [Text] / J.C. Wheatley, G.W. Swift, A. Migliori // *Los Alamos Science.* – 1986. – № 2 (14). – P. 28-32.
4. Tomonaga, T. *Fundamental Thermoacoustics* [Text] / T. Tomonaga. – Tokyo : Uchida Rokakuno

Publishing, 1998. – 280 p.

5. Beckhaus, S. A thermoacoustic stirling heat engine: Detailed study. [Text] / S. Beckhaus, G. Swift // *Journal of Acoustical Society of America*. – 2000. – № 107. – P. 3148-3166.

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

7. 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.

8. Коробко, В. В. Особливості процесу запуску термоакустичних двигунів за умов викоистання низькотемпературних джерел теплової енергії [Текст] / В. В. Коробко, О. О. Московко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 8 (115). – С. 50-54.

9. Довгялло, А. И. Особенности теплообмена в термоакустических преобразователях [Текст] / А. И. Довгялло, С. О. Некрасова // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического универси-*

*meta* – 2013. – № 3 (41), Ч. 2. – С. 113-121.

10. Panhuis, P. H. M. W. in't. *Mathematical Aspects of Thermoacoustics*. [Text] / P. H. M. W. in't Panhuis. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2009. – 190 p.

11. Liu, Jin. Relationship between Nusselt number and the thermoviscous (Rott) functions [Text] / Jin Liu, S. Garrett // *Journal of Acoustical Society of America*. – 2009. – № 119 (3). – P. 1457-1461.

12. Wu, C. Effect of heat transfer law on finite time exergoeconomic performance of heat engines [Text] / C. Wu, L. Chen, F. Sun // *Energy, The Int. J.* – 1996. – № 21(12). – P. 1127-1134.

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

14. Коробко, В. В. Влияние интенсивности теплообмена на характеристики термоакустичних двигателей. [Текст] / В. В. Коробко, А. А. Московко // *Сучасні інформаційні технології на транспорті MINTT-2014 : зб. наук.-практ. конф.* – Херсон, 2014. – С. 257-260.

Поступила в редакцію 22.04.2015, рассмотрена на редколлегии 19.06.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., директор Машинобудівного інституту С. І. Сербін, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв.

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ МАШИН ПУТЕМ РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА

**В. В. Коробко**

В статье рассмотрены возможности совершенствования термоакустических тепловых машин за счет повышения интенсивности теплообмена между основными структурными элементами. Проведен анализ теоретических и экспериментальных исследований процессов теплообмена в элементах модуля термоакустических преобразований - пористой матрицы и рекуперативных теплообменниках. Анализируются особенности теплофизических процессов в теплообменниках термоакустических аппаратов в условиях пульсирующей среды. Получены зависимости, которые связывают внешние характеристики термоакустических тепловых машин с параметрами теплообменников. Определены наиболее целесообразные направления дальнейших работ.

**Ключевые слова:** тепловая машина, термоакустика, теплообмен.

## ANALYSIS OF OPPORTUNITIES FOR IMPROVEMENTS OF THERMOACOUSTIC HEAT ENGINES THROUGH THE HEAT EXCHANGE PROCESSES RATIONALIZATION

**V. V. Korobko**

Ways to improve thermoacoustic heat engines by increasing the intensity of heat exchange between the main structural elements have been considered in the article. The theoretical and experimental studies of heat transfer processes in the elements of the module of thermoacoustic conversion - a porous matrix and recuperative heat exchangers was analysed. Features of thermal processes in heat exchangers of thermoacoustic devices in a pulsating environment were examined. Dependencies that connect the external characteristics of thermoacoustic systems with parameters of heat exchangers have been received. The most suitable areas for further work have been formulated.

**Keywords:** heat engine, thermoacoustics, thermodynamics, heat transfer.

**Коробко Володимир Владиславович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри суднових та стаціонарних енергетичних установок Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: volodymyr.korobko@nuos.edu.ua, kvv001@gmail.com.