

УДК 532. 536-12. 536.2. 621

doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.17

В. В. КОРОБКО**ОСОБЛИВОСТІ ТЕРМОАКУСТИЧНИХ ТЕПЛОВИХ МАШИН СИСТЕМ
ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕПЛОВИХ РЕСУРСІВ**

АНОТАЦІЯ Розглянути питання розробки ефективних систем використання низькотемпературних теплових ресурсів з застосуванням термоакустичних теплових машин. Проведено аналіз наявних теоретичних моделей термоакустичних апаратів, виявлені фактори, які суттєво впливають на ефективність як термоакустичних апаратів так і систем на їх основі. Розглянуті результати експериментальних досліджень робочих процесів в термоакустичних апаратах. Показаний вплив характеристик теплообмінників на ефективність термоакустичних систем. Визначені найбільш доцільні напрямки подальших робіт.

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

V. KOROBKO**FEATURES THERMOACOUSTIC THERMAL MACHINES USING LOW-TEMPERATURE
THERMAL ENERGY SOURCE**

ABSTRACT Technological systems based on thermoacoustic heat machines (TAHM) are promising for use with low temperature heat sources – waste and renewable. TAHM differs from the mechanical machines because absence of moving parts, ecological safety and high reliability. These TAHM are able to operate from external power sources. It is shown that currently there is no universal theory. These machines are less common and the main disadvantage is their low power. The aim of work is to define the elements of TAHM of low-temperature utilization systems that are currently in need of improvement. Methods for solving – analysis of modern mathematical models and experimental data for generalizing approach synthesis. Results – it is shown that the thermoacoustic theory of Rott-Swift allows you to calculate the possible acoustic power and thermal heat capacity of TA machine, but has significant limitations. Finite Time Thermodynamic model of thermo-acoustic engine takes into account the impact of external sources of thermal energy and heat exchangers design features on the TATM characteristics. This model makes it possible to optimize the parameters of TATM by power or efficiency. By combining different models several issues concerning the TA systems design can be solved, also could be designed the requirements for the design of TATM heat exchangers. Conclusions - for the design of such systems it is necessary to conduct additional studies for the development of special heat transfer surfaces and for providing the uniform temperature field.

Key words: heat engine, thermoacoustics, thermodynamics, mathematical model, heat transfer.

Вступ

Питання підвищення ефективності використання теплової енергії є важливою задачею. Вдосконалення теплових двигунів, технологічних процесів та систем енергозаощадження зумовило стійку тенденцію до зменшення як об'ємів, так і температурного рівня наявних 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 що до утилізації низькотемпературних (НТ) вторинних енергоресурсів (ВЕР) є застосування систем на базі термоакустичних теплових машин (ТАТМ). Ці апарати дозволяють створювати ефективні технічні рішення для використання низькотемпературних вторинних та відновлювальних теплових енергоресурсів [1–3].

ТАТМ суттєво відрізняються від механічних машин відсутністю рухомих частин та шкідливих робочих речовин. Завдяки цьому ТАТМ притаманні висока надійність, відносна мала вартість, нейтральність до довкілля. ТАТМ бувають

двох типів – двигуни (ТАД) та теплові насоси (ТАТН), або термоакустичні рефрижератори.

За конструкцією будь яка ТАТМ складається з однакових вузлів – резонатору, теплообмінників, навантаження. Резонатор виконує роль об'єднуючого конструктивного елемента, одночасно його довжина визначає робочу частоту ТАТМ. В порожнині резонатору розташовані теплообмінники – нагрівач, охолоджувач та пориста матриця між ними.

В якості корисного навантаження для ТАД можуть використовуватись п'єзоперетворювачі, лінійні генератори, двонаправлені імпульсні турбіни, або ТАТМ зворотної дії – ТАР. Існують приклади застосування ТАТМ в аерокосмічній галузі, нафтохімії, енергозбереженні, та відновлювальній енергетиці.

За своєю конструкцією, принципом дії та якостями ТАТМ суттєво відрізняються від механічних машин. Так в ТАТМ відсутні рухомі вузли, в них не використовуються шкідливі для довкілля речовини, це забезпечує їх високу надійність, екологічність та відносно малу вартість. ТАД здатні працювати від будь яких зовнішніх джерел теплової енергії, в тому разі низькотемпературних та криогенних. В ТАТМ можна реалізувати термодинамічні цикли Брайтона та Стірлінгу.

© В. В. Коробко, 2016

Низька енергонасиченість ТАТМ, малий досвід їх практичного використання та складність безпосереднього отримання механічної енергії перешкоджають широкому впровадженню цих апаратів.

Мета роботи

Метою роботи є проведення аналізу теоретичних моделей термоакустики, наявної експериментальної інформації та відомих конструктивних рішень, встановити чинники, які суттєво впливають на робочі характеристики ТАТМ систем використання низькотемпературних джерел теплової енергії, та визначення найбільш доцільних напрямів подальших досліджень.

Викладення основного матеріалу

Розглянемо задачу розробки установки для використання НТ ВЕР з використанням ТАТМ. Принципова схема такої установки наведена на рис. 1 [4]. Її основні структурні елементи це – ТАД та його корисне навантаження, два зовнішні контури теплоносіїв. Ці контури забезпечують енергообмін між джерелом теплової енергії, докільям та ТАД. ТАТМ мають розглядатися саме в такий постановці, як складова частина технологічної схеми, яка призначена працювати використовуючи наявні зовнішні джерела енергії.

На етапі проектування необхідно обрати робочий цикл ТАД – Брайтону або Стірлінгу, робочу частоту, матеріал матриці, робоче тіло, тип навантаження та інші характеристики.

В якості проміжних теплоносіїв можуть застосовуватися спеціальні термічні рідини або вода. За подібною схемою побудована дослідно-промислова термоакустична установка фірми *ASTER* (рис. 1).

В даній роботі тип ТАД, параметри робочого тіла, тип навантаження не важливі, оскільки основну увагу буде зосереджено на більш загальних питаннях, а саме – моделюванню процесів енергообміну та енергоперетворення в системі «теплообмінники – матриця – джерела енергії».

Лінійна теоретична модель термоакустики

Робота ТАТМ основана на термоакустичному ефекті – взаємному перетворенні різних форм енергії – теплоти в механічну енергію хвиль тиску (акустичних хвиль). В ТАТМ акустичні коливання в газовому середовищі – це єдиний механізм, що забезпечує робочий процес.

Відомо, що при взаємодії акустичних хвиль з твердою поверхнею – в даному випадку пористою проникною матрицею (рис. 2) – їх механічна енергія витрачається, формуючи повздовжній температурний градієнт. В цьому випадку ТАТМ пра-

цює як рефрижератор. Можливий і зворотній процес, коли в матриці вже присутній достатній повздовжній градієнт (1) температур, більший за критичний (2), в порожнині резонатора виникають акустичні хвилі, і оскільки маємо резонансну систему, то ці акустичні пульсації сягають значної інтенсивності [1–3]. Цей градієнт формується в матриці за допомогою теплообмінників-нагрівача та охолоджувача (рис. 1, 2).

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

$$\nabla T_{crit} = \frac{p_1 \omega}{\rho_m c_p u_1}, \quad (2)$$

де ρ_m – щільність середовища; ω – кутова швидкість акустичної хвилі; p_1 – акустичний тиск в резонаторі; T_m – температура в матриці, що залежить тільки від повздовжньої координати.

У випадку, коли $\nabla T / \nabla T_{crit} > 1$, маємо ТАД, а в разі $\nabla T / \nabla T_{crit} < 1$, ТАТМ працює як рефрижератор.

Сучасну теорію термоакустики створив N. Rott [1], в подальшому G. W. Swift [2], розвинув її, розглядаючи матрицю, як елемент ТАТМ.

Модель *Rott-Swift (MRS)* була побудована для ідеалізованої матриці-пакета паралельних пластин, при цьому до розгляду брався окремий елементарний канал, як показано на рис. 2. При створенні лінійної моделі були зроблені суттєві спрощуючі припущення.

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

$$\left[1 + \frac{(\gamma - 1)}{(1 + \epsilon_s)} f_k \right] p_1 + \frac{c^2}{\omega} \rho_m \frac{d}{dx} \left[\frac{(1 - f_v)}{\rho_m} \frac{dp_1}{dx} \right] + \beta \frac{c^2}{\omega (\sigma - 1)(1 + \epsilon_s)} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} = 0, \quad (3)$$

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 – термоакустичні функції Ротта [1, 2].

Акустичну потужність, яку продукує або поглинає елемент матриці, можна винайти за допомогою рівняння (4). Перші дві складові цього рівняння характеризують в'язкісні та терморелаксацийні дисипативні процеси, які виникають при взаємодії акустичної хвилі з твердою поверхнею і завжди є витратними компонентами. Третя складова характеризує саме механізм термоакустичних перетворень теплоти в енергію акустичної хвилі або зворотно.

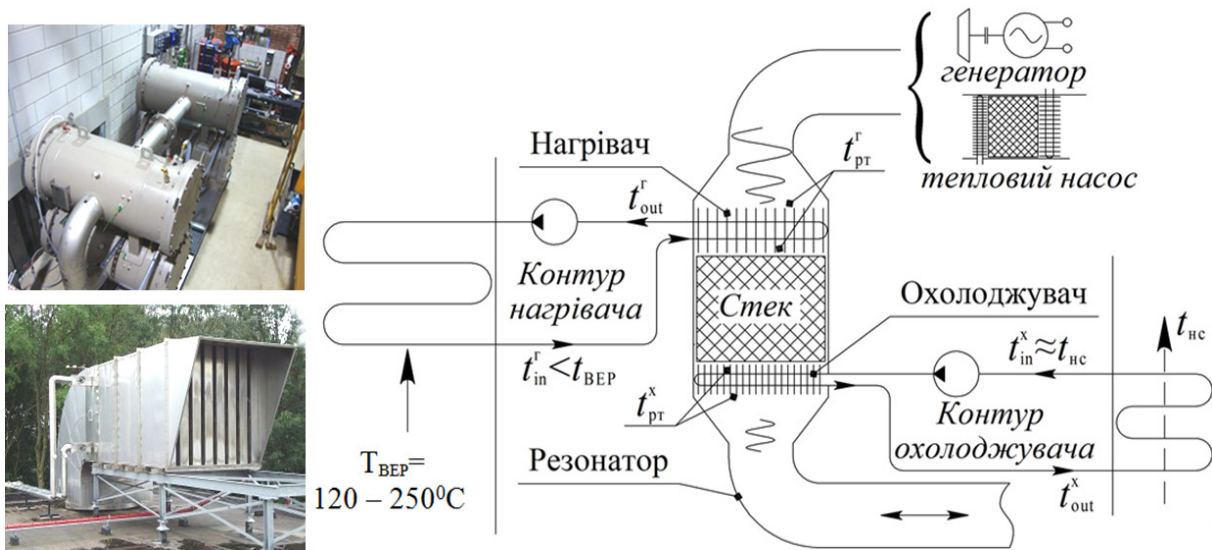


Рис. 1 – Зовнішній вигляд та принципова схема системи утилізації ВЕР з ТАТМ

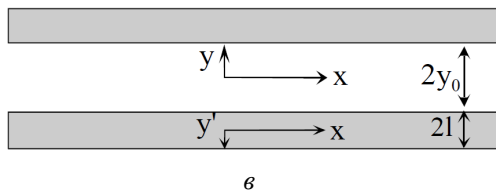
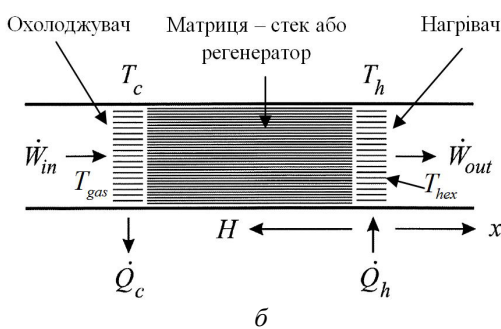
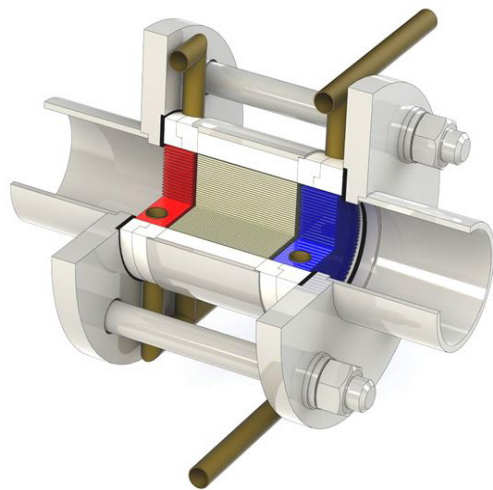


Рис. 2 – Модуль термоакустичних перетворень та його складові елементи:
 а – конструкція; б – принципова схема блоку теплообмінників ТАТМ; в – елемент матриці

$$\frac{d\dot{W}_2}{dx} = -\frac{1}{2} \omega A_g \left[\rho_m \frac{\text{Im}(-f_v)}{|1+f_v|^2} |u_1|^2 + \frac{(\gamma-1)\text{Im}(-f_k)}{\rho_m c^2 |1+\epsilon_s|^2} |p_1|^2 \right] + \frac{c^2}{\omega} \rho_m \frac{d}{dx} \left[\frac{(1-f_v) dp_1}{\rho_m} \right] + \frac{1}{2} \omega A_g \times \left[\frac{\beta}{\omega(1-\sigma)(1+\epsilon_s)} \frac{dT_m}{dx} \text{Re} \left(\frac{f_k - f_v}{1+f_v^2} \right) p_1 |u_1|^2 \right]. \quad (4)$$

Втрати акустичної енергії на внутрішніх поверхнях резонаторів, теплообмінників та інших вузлів можна визначити як

$$d\dot{E}_{diss} = \frac{\omega}{8} \frac{p_s^2}{\rho c^2} \left[\delta_k \frac{(\gamma-1)}{(1+\epsilon_s)} \left(1 + \frac{2r}{L} \right) + \delta_v \right] dS. \quad (5)$$

На поточний момент, ця лінійна MRS є загально визнаною. На її основі розроблені програмні пакети для моделювання характеристик ТАТМ та проведення проектних розрахунків.

Однак, ця модель має певні обмеження, деякі з них безпосередньо пов'язані з темою наявного дослідження, а саме:

- всі викладки та припущення зроблені для елементарного каналу матриці, при цьому вважається, що всі канали матриці є однаковими як за розмірами, так і за теплофізичними умовами;
- всі теплофізичні параметри залежать лише від повздовжньої координати;
- модель побудована для умов акустичних хвиль у вигляді гармонійних коливань з плоским фронтом хвилі;
- повздовжній градієнт температури в матриці ТАД вважається заданою величиною;
- теплообмінники, як окремі елементи в наявній моделі RS, не розглядаються;
- модель не враховує особливостей взаємодії робочого тіла з теплообмінниками ТАТМ.

Отже, *MRS* достатньо коректно відображає комплекс теплофізичних процесів, які мають місце в матрицях та резонаторах ТАТМ при наявності акустичної хвилі. Безпосередньо на механізми обміну енергією з зовнішніми джерелами енергії ця модель не поширюється.

Враховуючи ці обставини можна стверджувати, що для випадку НТ ТАТМ саме ці фактори мають бути взяті до уваги.

Феноменологічна модель ТАТМ

У зв'язку з цим, продуктивним здається підхід, запропонований в [5], в якому за допомогою апарату оптимізаційної термодинаміки, або «*Finite Time Thermodynamic*» (*FTT*) була побудована феноменологічна модель ТАТМ. Такий підхід дозволяє врахувати особливості процесів обміну енергією між зовнішніми джерелами, теплообмінниками та робочим тілом ТАТМ (рис. 3).

Особливість *FTT* моделі полягає в запровадженні узагальненого закону енергообміну, який базується на урахуванні параметрів джерел енергії, потужності теплової машини, періоду робочого циклу, у даному випадку частоти звукової хвилі.

Пульсації тиску, та пов'язані з ними зміни температури та коливний рух робочого середовища суттєвим образом впливають на процеси теплообміну між робочим тілом та теплообмінниками в ТАТМ. В теплообмінниках ТАТМ мають місце складні процеси різної природи [5–7]. В зв'язку з цим, узагальнений феноменологічний закон задано у вигляді

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

де $n = n_1 + in_2$ – комплексний показник, що враховує вплив частоти робочого циклу ТАТМ на процеси теплообміну. Уявна частина цього показника n_2 – відображає релаксаційну складову процесу теплообміну.

Згідно першого закону термодинаміки в ТАТМ, має виконуватись умова

$$T_H > T_{H0} > T_{L0} > T_L. \quad (6)$$

Оскільки в порожнині резонатору маємо потужні акустичні хвилі, то відповідно до цього там присутні як пульсації тиску, так і пульсації температури. Миттєві значення температури робочого тіла в ТАД задаємо у вигляді

$$T_{HC} = T_{H0} + T_1 e^{i\omega t}, \quad (7)$$

$$T_{LC} = T_{L0} + T_2 e^{i\omega t}, \quad (8)$$

де T_1 і T_2 – величини першого порядку, пов'язані з коливанням температури в залежності від акустичного тиску та частоти акустичної хвилі.

Відповідно до цього, миттєві теплові потоки між теплообмінниками ТАД та робочим тілом виначаємо як

$$\dot{Q}'_{HC} = \alpha F_H (T_H^n - T_{HC}^n), \quad (9)$$

$$\dot{Q}'_{LC} = \beta F_L (T_{LC}^n - T_L^n), \quad (10)$$

де α і β – коефіцієнти тепловіддачі на зовнішніх поверхнях теплообмінників – F_H та F_L .

Перейдемо до усереднених за часом величин, тоді можемо записати, що

$$\dot{Q}_{HC} = \alpha F_H (T_H^n - T_{H0}^n), \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{LC} = \beta F_L (T_{L0}^n - T_L^n). \quad (12)$$

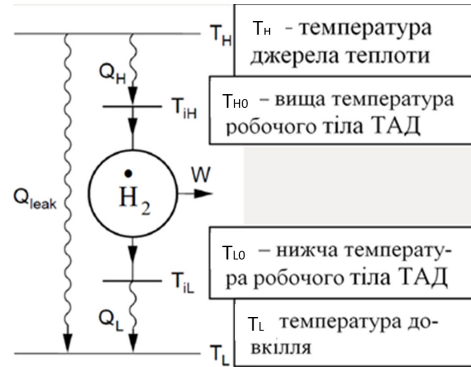


Рис. 3 – Модуль термоакустичних перетворень та потоки енергії в ТАТМ

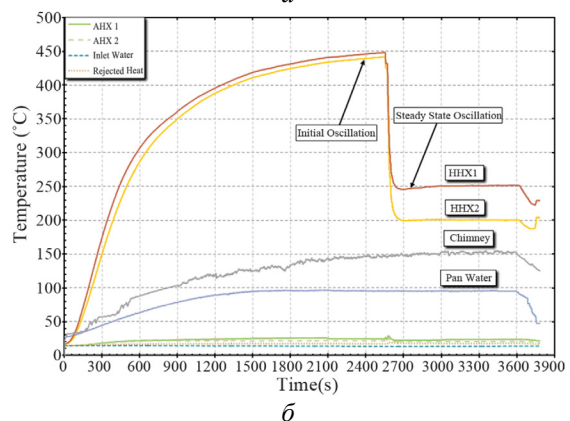
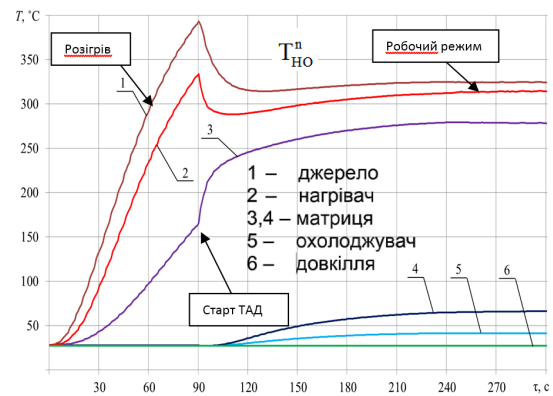


Рис. 4 – Типовий вигляд температурних трендів основних елементів ТАД: а – дослідний зразок ТАД [7]; б – ТАД проект SCORE

В *FTT* моделі враховуються прями перетоки теплоти між джерелом енергії, робочим тілом та доквіллям, які пов'язані з конструкцією теплової машини. Ці втрати задаються як постійна величина – q .

Тоді повні потоки теплоти становлять

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_{HC} + \dot{q}, \quad (13)$$

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_{LC} + \dot{q}. \quad (14)$$

Вплив незворотних процесів різної природи, що мають місце в матриці ТАД, враховується з допомогою коефіцієнта внутрішньої незворотності – $\varphi \geq 1$.

Такий узагальнюючий підхід дозволяє визначити потрібну теплову продуктивність теплообмінників в залежності від заданої акустичної потужності ТАД.

В [5] були отримані вирази для потоків теплоти від кожного з теплообмінників ТАД

$$\dot{Q}_{HC} = \frac{\alpha f F (\chi^n T_H^n - T_L^n)}{(1+f)(\chi^n + \varphi \chi \delta f)}, \quad (15)$$

$$\dot{Q}_{HL} = \varphi \chi \frac{\alpha f F (\chi^n T_H^n - T_L^n)}{(1+f)(\chi^n + \varphi \chi \delta f)}, \quad (16)$$

де $\chi = T_{L0}/T_{H0}$, $f = F_H/F_L$, $\delta = \alpha/\beta$, $F = F_H + F_L$.

Відповідно до першого закону термодинаміки можна записати вираз для комплексного представлення потужності ТАД

$$\dot{E} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = \dot{Q}_{HC} - \dot{Q}_{LC} \quad (17)$$

або

$$\dot{E} = \alpha f F \frac{(1-\varphi \chi)[T_H^n - (T_L/\chi)^n]}{(1+f)(1+\varphi \delta f \chi^{1-n})}. \quad (18)$$

Таким чином, маємо вираз, котрий визначає акустичну потужність, яку може розвинути ТАД в заданому температурному діапазоні в залежності від характеристик теплообмінників. Зауважимо, що ту ж саму потужність було визначено раніше згідно *MRS*, рівняння (3).

Аналіз результатів

Розглянувши дві основні математичні моделі для термоакустичних апаратів можна зробити висновок, про доцільність синтезу узагальненої методики оптимізації ТАТМ.

В будь якій ТАТМ основні термоакустичні процеси відбуваються в модулі термоакустичних перетворень – елементі, що складається з двох рекуперативних теплообмінників та пористої матриці. Отже питання підвищення характеристик ТАТМ безпосередньо пов'язані з вдосконаленням цих теплообмінників та раціональною організацією теплообміну.

Теоретична модель *Rott-Swift* або *MRS* опієнтована на «внутрішні» процеси в ТАТМ і побудована на базі класичної системи рівнянь механіки, акустики та термодинаміки.

Ця модель дозволяє розрахувати можливі характеристики ТАТМ, виходячи з параметрів матриці, робочого тіла та інших конструктивних чинників. Найбільша кількість досліджень в тер-

моакустиці присвячена саме вивченню процесів в матриці.

В фундаментальних роботах [2] та [8] показано, що для матриці інтенсивність теплообміну та ефективність термоакустичних енергоперетворювань однозначно встановлюють наступні фактори:

- тип матриці, розміри каналів, основні визначаючі параметри – це число Lc_k та термоакустичні функції Ротта – f_v, f_k ;

- теплофізичні характеристики матеріалу матриці та робочого тіла – стала Прандтля, та ϵ_s .

Таким чином, спираючись на висновки роботи [8] та *MRS*, бачимо, що відносно матриці можливості винаходу принципово нових рішень досить обмежені.

Задавши тип матриці, температурний градієнт та бажані параметри ТАТМ, можна розраховувати її розміри та виконати компоновку апарату. Максимальна потужність ТАД можлива за умов наявності в матриці максимального градієнту температури (1).

Отже, необхідно забезпечити можливості створення цього градієнту та забезпечити потрібний потік енергії від зовнішніх джерел до робочого тіла.

Феноменологічна *FTT* модель, розглядає ТАТМ як термодинамічну систему, безпосередньо пов'язуючи термоакустичні перетворення з процесами енергообміну між джерелами енергії, робочим тілом та елементами ТАТМ.

В *FTT* моделі є теплообмінники, це елементи теплової машини, які забезпечують відвід теплової енергії до робочого тіла. Для забезпечення максимальної потужності ТАД ці теплообмінники мають утримувати температури робочого тіла максимально близькими до температур джерел.

Отже теплообмінники ТАТМ повинні відповідати певним вимогам, а саме – мати високий рівень тепловіддачі, низький термічний опір та забезпечити однорідне температурне поле в матриці.

Як було показано в [6, 7], невідповідність потужності теплообмінників потенційній енергоємності матриці суттєво впливає на характеристики ТАД і є фактором, що обмежує його потужність.

Дослідним шляхом встановлено, що частіше за все в момент виникнення акустичних пульсацій – запуску ТАД, має місце різке падіння температури поверхні нагрівачів та робочого тіла – рис. 4.

Це явище можна пояснити недостатньою потужністю нагрівачів в порівнянні з енергоспоживанням матриці. В результаті, ТАТМ працює з меншим температурним градієнтом і втрачає потужність, одночасно зростає внутрішня термодинамічна незворотність в ТАТМ.

В *MRS* температурний фактор враховується величиною повздовжнього градієнту dT_m/dx , в

разі і його зменшення очікувана потужність ТАТМ падає.

В *FTT* моделі ці зміни температури впливають на співвідношення – $\chi = T_{L0}/T_{H0}$ та на параметр внутрішньої незворотності процесів в матриці $\varphi = \dot{Q}_{LC}/\dot{Q}_{H0} \geq 1$.

Ці коефіцієнти входять у вирази для теплових потоків в теплообмінниках (15) та (16) та в формулу загальної потужності ТАД (18). Можна бачити, що зростання коефіцієнту, що зменшує можливу потужність ТАТМ. Теплообмінники ТАТМ мають досить специфічну конструкцію.

Найбільш доцільним можна вважати застосування трубчасто-реберної теплообмінної поверхні, повздовжній розмір якої визначається подвійною амплітудою коливного руху робочого тіла – ζ [1].

Ця величина залежить від акустичного тиску та робочої частоти і може бути розрахована, як

$$l = (0,07 - 0,1) \frac{2P_m(x)}{\rho c \omega} = (0,07 - 0,1) \zeta. \quad (19)$$

За умов реальних ТАТМ цей повздовжній розмір може сягати 0,02–0,06 м. В такому разі рідинний теплоносій, що рухається в трубах, вважаємо ідеально змішаним, а робоче тіло ТАТМ – газовий теплоносій – здійснює виключно коливний рух.

Така ситуація дуже ускладнює конструювання ефективних теплообмінників для ТАТМ. Тому доцільно окреслити найбільш важливі питання.

По-перше. Коливний рух робочого тіла формує специфічну гідродинамічну картину, яка впливає на інтенсивність теплообміну. Однак, процеси теплообміну в умовах потужних акустичних хвиль звукової частоти – (40–160) Гц досі малодосліджені.

Числове моделювання показало наявність низки гідродинамічних чинників, які зумовлюють специфічні механізми теплообміну, а саме – присутність як застійних зон так і зон зі складною гідродинамічною структурою [7].

Тому для використання можливостей *FTT* моделі та розробки узагальнюючих рекомендацій потрібні додаткові експериментальні дослідження.

По-друге. Важливим фактором, який буде суттєво впливати на характеристики потужних НТ ТАД, (рис. 1) є схема руху теплоносіїв в рекуперативних теплообмінниках.

Можна бачити, що в ТАТМ маємо теплообмінники з перехресним рухом. З теорії теплообміну відомо, що така схема гарантовано формує неоднорідне температурне поле. Неоднорідність розподілу температури по фронту матриці погіршить умови для термоакустичних перетворень. Особливу увагу має бути зосереджена на нагрівачі, оскільки його характеристики є вирішальними (18).

Отже зрозуміло, що питання вдосконалення конструкції теплообмінників набуває першочергового значення і має бути розглянуто окремо.

Висновки

Системи використання низькотемпературних теплових ресурсів на базі ТАТМ є перспективними технічними рішеннями. Для їх впровадження потрібна розробка спеціальних ТАД та створення відповідних методик проектування.

Модель *Rott-Swift* – *MRS* дозволяє розрахувати потужність ТАТМ в залежності від конструкції та типу ТАТМ, провести компоновочні розрахунки. Суттєвим недоліком цієї моделі є її вузька спрямованість. Ця модель дозволяє розглядати процеси в матрицях, резонаторах, але вона не є ефективною для розрахунку та проектування теплообмінників, особливо коли ТАТМ працює від зовнішніх низькотемпературних джерел.

FTT модель ТАТМ пов'язує вплив процесів енергообміну між елементами ТАТМ, робочим тілом та зовнішніми джерелами енергії на загальну ефективність системи. Ця модель дозволяє врахувати вплив конструктивних особливостей теплообмінників на роботу ТАТМ та системи в цілому.

Теплообмін в ТАТМ в умовах потужних акустичних коливань в пульсуючому середовищі малодосліджений, крім того, відсутні обґрунтовані критерії узагальнення та аналізу експериментальних даних, в зв'язку цим потрібно провести спеціальні дослідження.

Особливу увагу слід зосередити на отриманні однорідного температурного поля по фронту теплообмінників, в першу чергу нагрівача.

Список літератури

- 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 thermoacoustic 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. Можливі шляхи використання термоакустичних теплових машин в системах СЕУ [Текст] / В. В. Коробко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – Херсон : ХДМА, 2014. – № 2(11). – С. 69–76. – ISSN 2077-3617.
- 5 **Wu, F.** 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.
- 6 **Коробко, В. В.** Влияние интенсивности теплообмена на характеристики термоакустичних двигателів / **В. В. Коробко, А. А. Московко** // Сучасні інформаційні технології на транспорті [Текст] : матеріали. VI Міжнар. наук.-практ. конф. (MINTT-2014), Херсон. 2014. – С. 257–260.

- 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. – ISSN 1727-7337.
- 8 **Panhuis, P.H.M.W. in't.** Mathematical Aspects of Thermoacoustics [Text] / **P.H.M.W. in't Panhuis**. – Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, Netherland, 2009. – 190 p.
- 7 **Коробко, В. В.** *tific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*], no. 2(11), pp. 69–76, ISSN. 2077-3617.
- 5 **Wu, F., Wu, C., Guo, F., Li, Q. and Chen, L.** (2003), "Optimization of a Thermoacoustic Engine with a Complex Heat Transfer Exponent", *The Int. J. Entropy*, no. 5, pp. 444–451.
- 6 **Korobko, V. V. and Moskovko, A. A.** (2014), "Vliyaniye yntensyvnoy teploobmena na kharakterystyky termoakustychnykh dvigateley [Impact of heat transfer rate on the characteristics of the thermoacoustic engines]", *Suchasni informatsiyi tekhnolohiyi na transporti: materialy. VI Mizhnar. nauk.- prakt. konf. (MINTT-2014) [Modern information technologies in transport]*, Kherson, pp. 257–260.
- 7 **Korobko, V. V. (2013)** "Ysledovanye protsessov teploobmena y hydrodynamyky v elementakh termoakustycheskykh dvigateley [Investigation of heat transfer and hydrodynamics in thermoacoustic engine components]", *Avyatsyonno-kosmycheskaya tekhnika i tekhnolohyya [Aerospace Technic and Technology]*, no. 8 (105), pp. 123–130, ISSN 1727-7337.
- 8 **Panhuis, P.H.M.W. in't.** (2009), *Mathematical Aspects of Thermoacoustics*, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Netherland. 2009. – 190 p.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Rott, N.** (1980), "Thermoacoustics", *Adv. Appl. Mech.*, no. 20(135), pp. 250–272.
- 2 **Swift, G. W.** (2002), *Thermoacoustic: A unifying perspective for some engines and refrigerators*, American Inst. of Physics, US.
- 3 **De Blok, K.** (2008), "Low operating temperature integral thermo acoustic devices for solar cooling and waste heat recovery", *Acoustic-2008, International conference*, Paris, pp. 18–24.
- 4 **Korobko, V. V.** (2014), "Mozhlyvi shlyakhy vykorystannya termoakustychnykh teplovykh mashyn v systemakh SEU [The possible uses of thermoacoustic heat engines in MPP systems]", *Naukovyy visnyk Kherson's'koyi derzhavnoyi mors'koyi akademiyi [Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy]*, no. 2(11), pp. 69–76, ISSN. 2077-3617.

Відомості про авторів (About authors)

Коробко Володимир Владиславович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет кораблебудування, доцент кафедри ССЕРУ, м. Миколаїв, Україна; e-mail: volodymyr.korobko@nuos.edu.ua, kvv001@gmail.com.

Korobko Volodymyr Vladyslavovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National university of Shipbuilding, Docent Dep. Marine and Stationary Power Plants, Mykolaiv, Ukraine; e-mail: volodymyr.korobko@nuos.edu.ua, kvv001@gmail.com;

Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Коробко, В. В. Особливості термоакустичних теплових машин систем використання низькотемпературних теплових ресурсів [Текст] / **В. В. Коробко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 111–117. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.17.

Please cite this article as:

Korobko, V. (2016), "Features Thermoacoustic Thermal Machines using low-temperature thermal energy source". *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1182), pp. 111–117, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.17.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Коробко, В. В. Особенности термоакустических тепловых машин систем использования низкотемпературных тепловых ресурсов [Текст] / **В. В. Коробко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 111–117. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.17.

АННОТАЦИЯ Рассмотрены вопросы разработки эффективных систем использования низкотемпературных тепловых ресурсов на базе термоакустических тепловых машин. Проведён анализ существующих теоретических моделей термоакустических аппаратов, выявлены факторы, которые существенно влияют на эффективность как термоакустических аппаратов, так и систем на их основе. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований рабочих процессов в термоакустических аппаратах. Показано влияние характеристик теплообменников на эффективность термоакустических систем. Определены наиболее целесообразные направления дальнейших исследований.

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

Надійшла (received) 14.01.2016