

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОАКУСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ ДВОХ ДАТЧИКІВ

В. В. КОРОБКО, В. О. БОБОШКО, О. В. КОРОБКО, О. О. МОСКОВКО

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Николаєв

Метою роботи є верифікація запропонованої авторами методики експериментальних досліджень комплексу акустичних, гідродинамічних і тепломасообмінних процесів в елементах термоакустичних (ТА) теплових машин з використанням модифікованого методу двох датчиків Fusco і розробленої мікропроцесорної вимірювальної системи.

ВСТУП

Термоакустичні апарати – двигуни (ТАД) і рефрижератори – це порівняно новий вид теплових машин, які відрізняються від традиційних відсутністю рухомих механічних частин, простою конструкцією, високою надійністю [1]. У термоакустичних теплових машинах (ТАТМ) можна реалізувати прямий і зворотний цикл Стірлінга, створити на їх базі нові та ефективні технічні рішення різного призначення.

Робота ТАТМ заснована на термоакустичному ефекті – процесі перетворення теплової енергії в механічну енергію акустичних хвиль високої інтенсивності [2, 3]. У ТАТМ акустичні хвилі є основним виконавчим механізмом, який забезпечує взаємну трансформацію різних форм енергії. Очевидно, що в елементах ТАТМ мають місце складні взаємодії явищ акустичної, теплофізичної і гідродинамічної природи.

Завдання дослідження різних фізичних параметрів в умовах потужних акустичних коливань потребує створення спеціалізованої реєструючої мікропроцесорної вимірювальної системи реального масштабу часу.

МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ТЕРМОАКУСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ ДВОХ ДАТЧИКІВ

Головними характеристиками, що описують звукову хвилю [3], є акустичний тиск p та коливальна швидкість v часток середовища, в якому розповсюджується звук. Саме ці параметри визначають інтенсивність (1) звукової хвилі, що представляє собою [3, 4] усереднений за часом потік акустичної енергії в резонаторі ТАТМ, а отже чисельно дорівнює енергії, яку переносить хвиля протягом секунди через одиничну площадку в просторі

$$I = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(\tilde{p} v \right), \quad (1)$$

де I – інтенсивність звукової хвилі; v – коливальна швидкість часток газу; \tilde{p} – комплексно спряжене значення акустичного тиску p .

Величина інтенсивності звукової хвилі має безпосередній вплив на ефективність термоакустичних процесів. Так, зниження інтенсивності при розповсюдженні хвилі в резонаторі ТАА пов'язано з в'язкісними втратами при взаємодії акустичної хвилі зі

стінками акустичних каналів, а наявність достатнього температурного градієнту (2) в стеку може збільшити інтенсивність звукової хвилі.

$$\nabla T_m = \Delta T_m / L_s, \quad (2)$$

де ∇T_m – значення градієнту температур; L_s – довжина стеку; $\Delta T_m = T_H - T_C$ – різниця температур на краях стеку.

В практиці термоакустичних досліджень традиційним способом визначення інтенсивності звукової хвилі є прямий метод [5] одночасного вимірювання p і v за допомогою датчику тиску і лазерного доплерівського вимірювача швидкості. Даний підхід дозволяє визначати значення акустичного тиску і коливальної швидкості з високою точністю, проте потребує коштовного обладнання та наявності прозорої ланки резонатору для проходження лазерних променів. Дані недоліки обмежують можливості застосування прямого методу та роблять недоцільним його впровадження в автоматизовані системи контролю промислових ТАА.

Альтернативою описаному способу є двоточковий метод Fusco [6, 7], згідно з яким значення p і v розраховуються за допомогою показників двох датчиків тиску, розташованих на відстані Δx один від одного. За даним методом значення тиску $p(0)$ та швидкості $v(0)$ в точці «0» (посередині між двома датчиками) можуть бути визначені за виразами (3), (4), а значення інтенсивності після підстановки рівнянь (3) та (4) в (1) визначається за виразом (5).

$$p(0) = \frac{p_A + p_B}{2 \cos(k\Delta x / 2)}, \quad (3)$$

$$v(0) = \frac{kF}{\omega\rho} \frac{p_A - p_B}{2j \sin(k\Delta x / 2)}, \quad k = k_0 \left\{ 1 + \frac{1-j}{2} \frac{\delta_v}{r_0} \left(1 + \frac{\gamma-1}{\sqrt{\sigma}} \right) \right\}, \quad (4)$$

$$I = \frac{1}{8\omega\rho} \left[\operatorname{Im}(H) \left(|p_A|^2 - |p_B|^2 \right) + 2 \operatorname{Re}(H) |p_A| |p_B| \sin \theta \right], \quad H = \frac{kF}{\tilde{k} \cos(k\Delta x / 2) \sin(k\Delta x / 2)}, \quad (5)$$

де $k_0 = \omega / a$ – хвильове число у вільному просторі; a – адіабатична швидкість звуку; γ – показник адіабати; σ – число Прандтля; $\operatorname{Im}(H)$, $\operatorname{Re}(H)$ – уявна та дійсна складові комплексної величини; θ – різниця фаз між сигналами p_A та p_B ; \tilde{k} – комплексно спряжене значення k .

Слід зазначити, що головним недоліком методу Fusco є складність визначення різниці фаз θ , величина якої є дуже малою, що накладає певні обмеження на можливості застосування методу двох датчиків. Так, для точного визначення θ необхідно використовувати додаткове обладнання, таке як фазочутливі підсилювачі або аналізатори спектру [3, 5], а також встановлювати датчики тиску поблизу вузлових точок акустичного тиску або швидкості, де фазові коливання є найбільшими.

Для позбавлення розробленої вимірювальної системи зазначеного недоліку метод Fusco модифіковано за рахунок використання комплексної форми представлення акустичних параметрів для визначення інтенсивності звукової хвилі безпосередньо за виразом (1). Це дозволяє оминати складнощі, пов'язані з визначенням різниці фаз θ , адже акустичний тиск та коливальна швидкість визначаються за виразами (3), (4), а їх комплексні модуль та фаза відповідно розраховуються за виразами (6) та (7).

$$|x| = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^2}, \quad (6)$$

$$\varphi(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\arctg \left(\frac{\text{Im}(x_k)}{\text{Re}(x_k)} \right) \right]^2}. \quad (7)$$

ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТАТМ

При здійсненні комплексу експериментальних досліджень описаного методу в якості дослідного зразка було обрано термоакустичний двигун з напівхвильовим резонатором, що працює за циклом Брайтону. Такий ТАД має просту конструкцію та придатний до подальшої модернізації. В якості стеку використана високотемпературна сотова кераміка. Нагрівач резистивного типу зроблено з керамічних циліндрів діаметром $4 \cdot 10^{-3}$ м, на які намотана ніхромова спіраль. Максимальна потужність такого нагрівача досягає 400 Вт, а максимальна температура розігріву стеку сягає 700°C . В якості холодного теплообмінника використовується мідний трубчасто-ребристий теплообмінник з перехресним током.

Фотографія та структурна схема експериментального стенду наведені на рис. 1 та 2, відповідно. Для збору фізичних параметрів ТАД використано два комбінованих блоки датчиків термоанемометру 9 та акустичного тиску 8. Контроль температурних параметрів проводився за допомогою термопар 7. Для підтримки сталого значення холодного теплообмінника 3 через нього за допомогою насосу 13 прокачувалася вода. Контроль підведеної до нагрівача електричної потужності проводився за допомогою датчиків напруги 6 та струму 5.

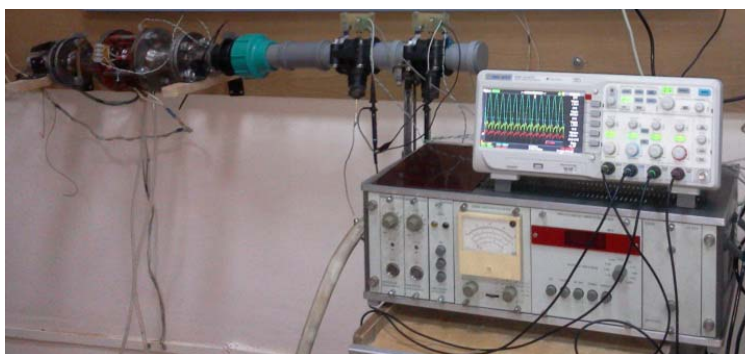


Рис. 1. Дослідний стенд теплофізичних процесів у термоакустичному двигуні

Методикою досліджень передбачалась одночасна фіксація всіх параметрів дослідного зразка. Послідовність вимірювань під час досліджень була однаковою для всіх дослідів. За допомогою електричного нагрівача в регенераторі ТАД формувався повздовжній температурний градієнт ∇T . Максимальна температура в досліді задавалась у межах $200 - 400^\circ\text{C}$. З моменту подачі електричного струму на нагрівач контрольно-вимірювальна система фіксувала в реальному масштабі часу експериментальні данні від датчиків температури, тиску, струму, напруги та зондів термоанемометрів.

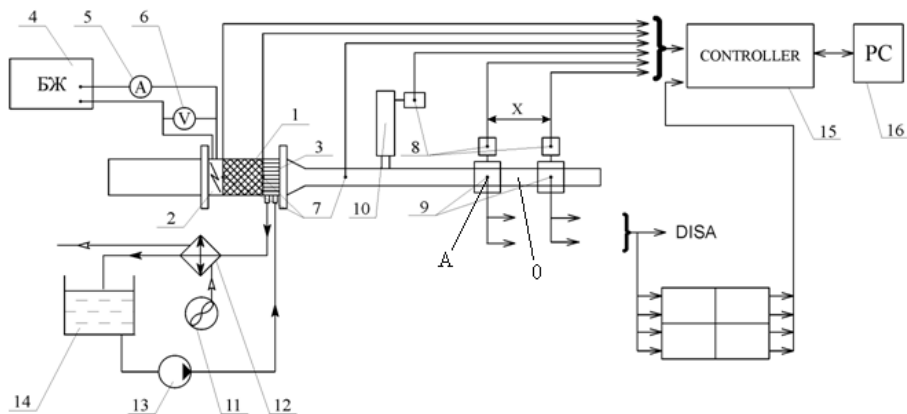


Рис. 2. Схема експериментальної установки для теплофізичних досліджень ТАТМ
 1 – стек, 2 – нагрівач, 3 – охолоджувач, 4 – блок живлення, 5, 6 – амперметр та вольтметр,
 7 – термопари, 8 – датчики тиску, 9 – зонди термоанемометру, 10 – акустичне навантаження, 11- вентилятор, 12 – охолоджувач допоміжний, 13 – насос, 14 – бак, 15 – блок контролерів, 16 – PC

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОАКУСТИЧНОГО ДВИГУНА

Верифікація наведеного алгоритму непрямого контролю акустичних параметрів ТАТМ за допомогою модифікованого методу двох датчиків здійснена з використанням термоанемометру DISA 55D00 [8], а тому критерієм адекватності наведеного алгоритму є відповідність значень коливальної швидкості v , отриманої за результатами вимірювань термоанемометра, та розрахованої (4) з використанням методу двох датчиків.

Результати прямих вимірювань акустичного тиску та коливальної швидкості наведені на рис. 3, а. Слід зазначити, що конструктивні особливості термоанемометру дозволяють проводити вимірювання модулю значення швидкості. На рис. 3, б наведено результати розрахунку акустичного тиску та коливальної швидкості з використанням модернізованого методу двох датчиків.

На рис. 3, в показані середньоквадратичні значення коливальної швидкості, визначені за різними методиками: методом двох датчиків (v_{tsm}) та шляхом безпосереднього вимірювання термоанемометром (v_{disa}). Різниця у наведених значеннях пов'язана з тим, що існує відстань $\Delta x_v = 80 \cdot 10^{-3}$ м між перетинами вимірювання швидкості «А» (рис. 2) та розрахунку «0» (за методом двох датчиків), а отже розрахована за методом двох датчиків швидкість завжди буде меншою через синусоїдальний характер розподілу амплітуди швидкості в резонаторі ТАД. Для компенсації цієї різниці доцільно скористатись математичною моделлю термоакустичних процесів Ротта (8), що дозволяє з достатньою точністю обчислити розподіл акустичних параметрів при переході від розрахункової точки «0» до точки вимірювання «А» (рис. 2). Значення коливальної швидкості з внесеною поправкою наведені на рис. 3, в ($v_{tsm ad}$).

$$\begin{cases} \frac{dp}{dx} = -\frac{1}{A} \frac{i\omega\rho_m}{1-f_v} u_1, \\ \frac{du_1}{dx} = -A \frac{i\omega[1+(\gamma-1)f_k]}{\gamma\rho_m} p + \frac{f_k-f_v}{(1-f_v)(1-\sigma)} \frac{1}{T_m} \frac{dT_m}{dx} u_1, \end{cases} \quad (8)$$

де ρ_m – щільність середовища; u_1 – об’ємна швидкість; T_m – функція розподілу поля температур повздовж резонатора; p – акустичний тиск; f_v та f_k - параметри, що названі функціями Ротга, залежать від геометрії стеку та теплофізичних якостей газу та матеріала стеку; ω – частота акустичної хвилі, рад/с; $i = \sqrt{-1}$.

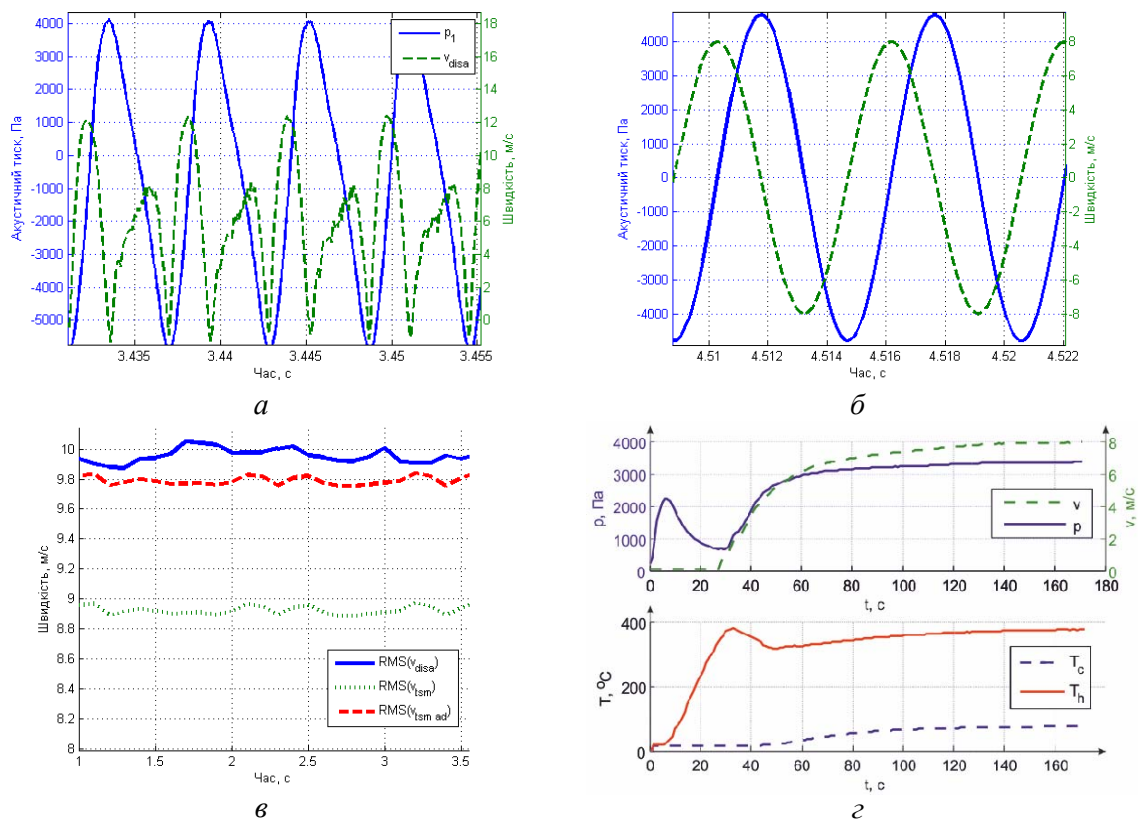


Рис. 3. Результати експериментальних досліджень робочих процесів ТАД:
 а – результати прямих вимірювань тиску та модулю швидкості в перетині «А»;
 б – тиск та швидкість, визначені з використанням модернізованого методу двох датчиків в точці «0»; в – середньоквадратичні значення коливальної швидкості;
 г – результати експериментальних досліджень процесу старту дослідного ТАД

Слід зазначити, що до різниці в виміряних та розрахованих значеннях можуть привести і інші фактори гідродинамічної природи, такі, як наявність потужних вторинних течій, що виникають при акустичному тиску, що перевищує 140 dB SPL. Виходячи з наведених результатів, можна стверджувати, що запропонований алгоритм вимірювання акустичних параметрів ТАТМ за допомогою модернізованого методу двох датчиків може бути використаний при дослідженні теплофізичних процесів у ТАТМ.

На рис. 3, г наведені результати експериментальних вимірювань процесу старту дослідного ТАД на режимі максимальної температури розігріву стеку ($P_{el} = 259$ Вт). Слід зауважити, що максимальна температура нагрівача не перевищувала 400 °С. За таких умов дослідний ТАД розвинув максимальну акустичну потужність на рівні 24 Вт. На цьому режимі ТАТМ має певний резерв для підвищення потужності, що пов’язано з суттєвим зростанням мінімальної температури стеку, в цьому випадку ця температура

зросла на 60°C , що знизило повздовжній градієнт і відповідно потужність та ККД ТАД. Максимально досягнений ККД для дослідного двигуна становить 8,56%.

Слід зазначити, що дослідний ТАД працює в режимі стоячої хвилі, за термодинамічним циклом Брайтону, коли максимальна ефективність термоакустичного двигуна не може перевищувати 19% від ефективності циклу Карно, а тому отримані значення ККД є типовими для даного типу установок [3, 9] за наявних параметрів. Подальшого підвищення ефективності ТАТМ можна досягти структурними змінами двигуна, підвищенням робочого тиску в резонаторі та заміною робочого тіла ТАД з повітря на гелій.

ВИСНОВОК

При вивченні особливостей функціонування термоакустичних теплових машин важливим завданням є дослідження таких параметрів ТАТМ, як акустичний тиск в резонаторі та коливальна швидкість часток робочого середовища в умовах потужних акустичних коливань. Традиційні методики вимірювання даних параметрів накладають ряд конструктивних та функціональних обмежень на дослідні установки. Запропонована авторами методика використовує модернізований метод двох датчиків Fusco в поєднанні з сучасною мікропроцесорною системою цифрової обробки сигналів для визначення параметрів акустичної хвилі в комплексній площині. Даний підхід дозволяє оминати структурні недоліки існуючих вимірювальних систем, а експериментальні дослідження, результати яких наведені в даній статті (рис. 3), підтверджують його адекватність.

ЛІТЕРАТУРА

1. Rott N. Thermoacoustics // Adv. Appl. Mech. – №20 (135). – 1980.
2. Wheatley J. C., Swift G. W., Migliori A. The natural heat engines // Los Alamos Science.– 1986. – №2 (14).
3. Swift G.W. Thermoacoustic: A unifying perspective for some engines and refrigerators.– American Institute of Physics, 2002, 300 p.
4. Кондратенко Ю. П., Коробко О. В. Спеціалізована комп'ютерна система автоматичного контролю параметрів для оцінювання ефективності термоакустичних процесів // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.– 2012. – Вип. 5 (82). –С. 104–111.
5. Biwa T., Tashiro Y., Nomura H., Ueda Y., Yazaki T. Experimental verification of a two-sensor acoustic intensity measurement in lossy ducts // J. Acoust. Soc. Am. 2008.– **124**.– P. 1584–1590.
6. Кондратенко Ю. П., Коробко О. В. Програмно-апаратні засоби для непрямого визначення і контролю параметрів електроакустичних сигналів на основі двоточкового методу // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2012. – Вип. 6 (58).– С. 114–118.
7. Fusco A. M. Two-sensor power measurements in lossy ducts / A. M. Fusco, W. C. Ward, G. W. Swift // J. Acoust. Soc. Am. – 1992. – **91**. – P. 2229–2235.
8. Huelsz G., Lopez-Alquicira F. Hot-wire anemometry in acoustic waves // Experiments in Fluids. – 2001. – **30**. – 283–285.
9. Mehta S. M., Desai K. P., Naik H. B., Atrey M. D. Design of standing wave type thermoacoustic prime mover for 300 hz operating frequency // Proceedings of the 16th International Cryocooler Conference, USA. – 2011. – P. 343–352.