УДК 532. 536.2. 621 **doi: 10.32620/aktt.2025.4sup1.03**

**В. В. КОРОБКО, О. О. МОСКОВКО, А. П. ШЕВЦОВ**

***Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Україна***

# CFD МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ТЕРМОКОНВЕКЦІЙНИХ ТЕЧІЙ НА ПРОЦЕСИ ЗАПУСКУ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕРМОАКУСТИЧНИХ ДВИГУНІВ

*Термоакустичні двигуни (ТАД) є перспективним рішенням для ефективного перетворення низькопотенційної теплоти в акустичну енергію та механічну роботу. Суттєвою проблемою для практичного впровадження ТАД може стати потреба забезпечення надійного запуску, тобто стабільного самозбудження термоакустичних коливань. Механізми їх ініціювання залишаються недостатньо дослідженими.* ***Метою*** *дослідження є встановлення умов, які забезпечать гарантований запуск ТАД. Була сформульована гіпотеза про ключову роль у процесі виникнення самочинних термоакустичних коливань термоконвективних ефектів.* ***Об'єкт дослідження*** *– процеси розвитку термоконвективних потоків, а* ***предмет*** *– характеристики їх вихрових структур, зокрема масштаби та частоти. Для цього* ***методами*** *CFD-моделювання проведено дослідження теплофізичних процесів, які мають місце під час запуску ТАД.* ***Завдання*** *дослідження полягало в побудові, верифікації та валідації тривимірної нестаціонарної числової моделі запуску ТАД зі «стоячою» хвилею. У розрахунках було використано власні експериментальні дані - температурні тренди основних конструктивних елементів ТАД.* ***Результати.*** *Уперше експериментально встановлено, а CFD розрахунками підтверджено, що поздовжній температурний градієнт у матриці ТАД є необхідною, але недостатньою умовою для виникнення термоакустичних коливань. Показано, що в резонаторі ТАД формуються термоконвективні потоки у вигляді вихрових структур із широким спектром частот і масштабів. Установлено, що за певних умов виникають вихрові структури з частотами, що збігаються з власною резонансною частою ТАД.* ***Висновки.*** *У результаті дослідів визначено, що динамічні характеристики нагрівачів, зокрема їх теплова інерційність і швидкість нагрівання, суттєво впливають на ефективність запуску. Установлено, що в низькотемпературних ТАД систем енергозбереження доцільно використовувати додаткові нагрівачі, які забезпечать виникнення інтенсивних термоконвективних потоків. Результати роботи сприяють практичному впровадженню термоакустичних систем використання низькотемпературних джерел теплоти, скидних або відновлювальних.*

***Ключові слова:*** *термоакустичний двигун; температурний градієнт; термоконвекція; термоакустичні пульсації; виникнення коливань.*

## Вступ

Робота будь-якого теплового двигуна супроводжується значними тепловими втратами в широкому діапазоні температур. Викиди газів тепловими двигунами становлять суттєву частину загального обсягу парникових газів [1, 2]. Тенденції зміни клімату, що переконливо підтверджені численними міжнародними дослідженнями [3], зумовили підвищену увагу до вдосконалення технологій утилізації відпрацьованого тепла.

Термоакустичні двигуни ефективно перетворюють низькопотенційне тепло в акустичну енергію та механічну роботу, що сприяє зменшенню викидів парникових газів та споживання викопного палива.

Однак розвиток потужних термоакустичних систем гальмується обмеженим досвідом експлуатації, особливо щодо ініціювання термоакустичних коливань [4, 5]. Тому забезпечення надійного запуску має вирішальне значення для їх інтеграції в промислові енергозберігаючі системи.

## 1. Аналіз досліджень та публікацій

Відомо, що основою ТАД є теплообмінний вузол, який складається з нагрівача, охолоджувача та розташованої між ними пористої матриці [5, 6]. Завдяки теплообмінникам в матриці формується повздовжній градієнт температури. При досягненні певних значень цього градієнту в резонаторі самочинно виникають акустичні коливання і, оскільки система є резонансною, ці пульсації набувають значної інтенсивності.

Основи теорії термоакустики були закладені N. Rott, G. Zouzoulas [6, 7], а згодом ці ідеї були розвинені A. Atchley, G. Swift у праці [9]. У ряді досліджень аналізувалися теоретичні питання щодо вдосконалення ТАД, їх конструктивні особливості та потенційні напрямки застосування [10, 11].

У роботах [4, 10] зазначено, що на ефективність роботи ТАД істотно впливають процеси енергообміну між основними елементами термоакустичного агрегату – матрицею та теплообмінниками.

Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

Крім того суттєво впливає на роботоспроможність термоакустичних установок тип теплообмінників.

Більшість досліджень зосереджена на аналізі робочих процесів у ТАД у сталих режимах. У лабораторних установках зазвичай застосовують відкриті електричні нагрівачі або газові пальники, що забезпечують температури робочого тіла та теплообмінних поверхонь у межах 600–900 °С і вище. Значно менше робіт присвячено аналізу роботи низькотемпературних ТАД із діапазоном робочих температур 200–400 °С, де передбачається використання рекуперативних теплообмінників.

Попри конструктивні відмінності та рівень робочих температур, для різних типів ТАД спостерігаються подібні закономірності протікання робочих процесів. Зокрема, показано, що після запуску ТАД, із появою акустичних пульсацій у резонаторі, спостерігається зниження температур нагрівача, матриці та робочого тіла (рис. 1) [10, 11]. У деяких випадках ці зміни незначні (рис. 1, а), однак є приклади суттєвого зниження температур поверхонь теплообмінників, матриці та робочого середовища (рис. 1, б).

Таким чином, за наявності джерела теплової енергії з температурою близько 450 °С, дослідний ТАД переходить у сталий режим роботи при максимальній температурі робочого тіла, що не перевищує 250 °С, що, безумовно, знижує ефективність його функціонування. Очевидно, що в умовах утилізації низькопотенційних теплових ресурсів подібні втрати є неприйнятними.

Аналіз експериментальних даних (рис. 1) свідчить про те, що в багатьох випадках поздовжній температурний градієнт у матриці на початковому етапі роботи ТАЕ суттєво перевищує або є порівнянним із температурною різницею, що спостерігається у сталому режимі.

У процесі функціонування термоакустичні двигуни проходять два принципово різні режими: початковий прогрів та сталу роботу. Основна відмінність між ними полягає в наявності або відсутності акустичних коливань. Саме в режимі прогріву повинні бути сформовані умови, необхідні для ініціювання термоакустичних коливань.

Слід зазначити, що існуюча лінійна теорія термоакустики – «model Rott Swift» (MRS), не дає пояснення механізму спонтанного виникнення акустичних коливань у резонаторі ТАД [9]. Згідно з MRS коливання в резонаторі виникають спонтанно при наявності в пористій матриці повздовжнього градієнті температури – $\Delta T_{onset}$ .

Отже, ТАД що реалізує цикл Брайтона, працює як термоакустичний двигун або «prime mover» за умови наявності в матриці поздовжнього градієнта температури,

$$\nabla T_m = \frac{dT_m(x)}{dx} \approx (T_H - T_C)/l_m , \qquad (1)$$

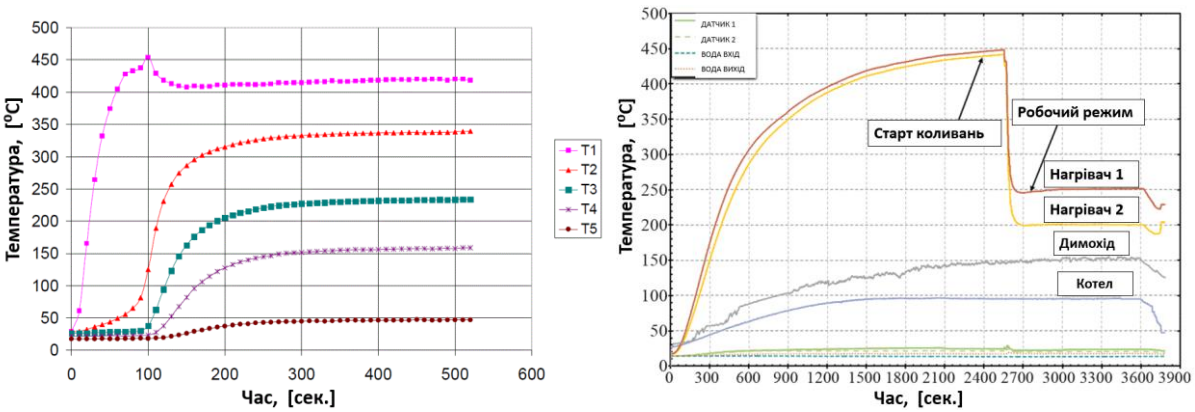
який перевищує критичний градієнт – $\nabla T_{crit}$ ,

$$\nabla T_{crit} = \frac{\omega A}{\rho_m c_p}\frac{|p_1|}{|U_1|} . \qquad (2)$$

Іншими словами, ТАД функціонує тільки в тому випадку, якщо $\nabla T_m > \nabla T_{crit}$ , при цьому наявність акустичних хвиль вважається апріорі.

Як показано на рис.2, під час нестаціонарного пускового процесу тепло від нагрівачів, – $Q_H$ , витрачається на підігрів робочої рідини – $Q_{gas}$ та компонентів ядра ТАД– пористої матриці $-Q_m$ та резонатора $Q_r$. Якщо припустити, що з зовнішньої поверхні резонатора відсутні втрати тепла, тоді

$$Q_H = Q_{gas} + Q_m + Q_r . \qquad (3)$$




а - дослідній зразок ТАД [10]

б - ТАД проект SCORE [11]

Рис. 1. Типовий вигляд температурних трендів основних елементів ТАД

Отже, цей процес призведе до підвищення температури елементів ТАД, та утворення поздовжнього градієнту температури в матриці $-\nabla T_m$. Результатом має стати виникнення в резонаторі спонтанних акустичних коливань - "onset" момент.

В даному випадку ТАД (рис. 2в) починає працювати, реалізуючи прямий, незворотній цикл, перетворюючи тепло – $Q_H$ в акустичну енергію $-\Delta\dot{E}_2$ та розсіюючи тепло $-Q_C$ в довкілля, що завершує цикл теплового двигуна.

Отже, відповідно до другого закону термодинаміки, для робочого режиму ТАД, маємо:

$$\Delta\dot{E}_2 = Q_H - Q_C - Q_{lost}, \quad (4)$$

В MRS, запроваджено поняття "total power" - $\dot{H}_2$, яке можна вважати за термоакустичну форму другого закону термодинаміки:

$$\dot{H}_2 = \dot{E}_2 + \frac{1}{2}\rho_m T_m \int \mathrm{Re}\left[s_1 \tilde{u}_1\right] dA - (A_{gas}k_{gas} + A_{solid}k_{solid})\frac{dT_m}{dx}. \quad (5)$$

Варто підкреслити, що рівняння (2), (5) включають в себе терміни, що описують параметри акустичної хвилі - $p_1$ $\dot{E}_2$, і $\tilde{U}$, що вказують, що наявність акустичних коливань передбачається MRS з самого початку. Отже, механізм виникнення спонтанних термоакустичних пульсацій у ТАД не може бути пояснений лише лінійною MRS. Крім того, оскільки модель Свіфта є одновимірною, вона не враховує втрати тепла, пов'язані з нагріванням структурних компонентів реального ТАД.

## 2. Матеріали та методи дослідження

Дане дослідження зосереджено на виявленні та аналізі процесів, що впливають на запуск низькотемпературних ТАД зі «стоячою» хвилею, які працюють за циклом Брайтона.

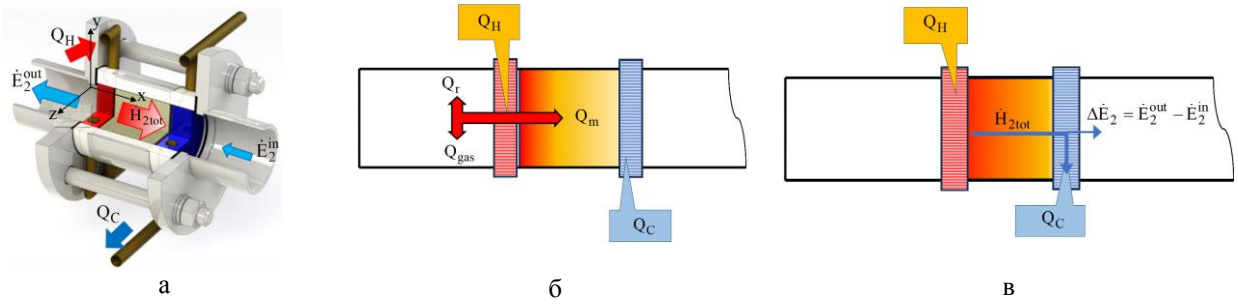
Дослідження проводились в два етапи, перший фізичний експеримент, інформація надана в [12], другий етап – розрахунковий експеримент методом CFD моделювання. 3D модель та поперековий перетин моделі ТАД надано на рис. 3.

**Гіпотеза.** На основі принципів лінійної термоакустичної теорії, та аналізу експериментальних даних можна стверджувати, що єдиним ініціатором термоакустичних коливань в ТАД є процеси розвитку термоконвективних потоків які ініціюють нагрівачі.

**Мета дослідження** - отримання нових знань щодо процесів запуску ТАД, а саме, взаємозв'язку між потужністю нагрівачів, термоконвективними течіями в термобуферній порожнині ТАД, виникненням і розвитком термоакустичних пульсацій.

**Чисельний експеримент.** CFD-моделювання було спрямоване на отримання якісного уявлення про гідродинамічні процеси як у тепловій буферній порожнині, так і в резонаторі. Вважалося, що всі стінки мають ізотермічну температуру 300 K, за винятком стінок нагрівача, матриці та резонатора, для яких було задано адіабатичні умови. На всі стінки були накладені граничні умови «відсутність ковзання» (no-slip). Граничні та початкові умови включаючи температури робочого тіла та структурних компонентів ТАД, таких як матриця, теплообмінники та резонатор були визначені на основі експериментальних даних [10]. Параметри режимів моделювання ТАД надані в таблиці 1.

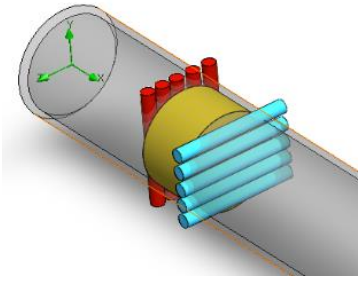
Матриця була змодельована як пористе середовище, з теплоємністю та теплопровідністю, визначеними відповідно до теплофізичних властивостей керамічного матеріалу та повітря, аналогічно [13]. CFD експерименти були виконані за допомогою пакету Flow Modulation, SolidWorks 2024. Було проведено 3D-моделювання перехідних процесів на основі нестаціонарних рівнянь URANS з використанням методу скінченного об'єму (FVM). Перехід від ламінарного до турбулентного моделювався за допомогою підходу SST k-ε.



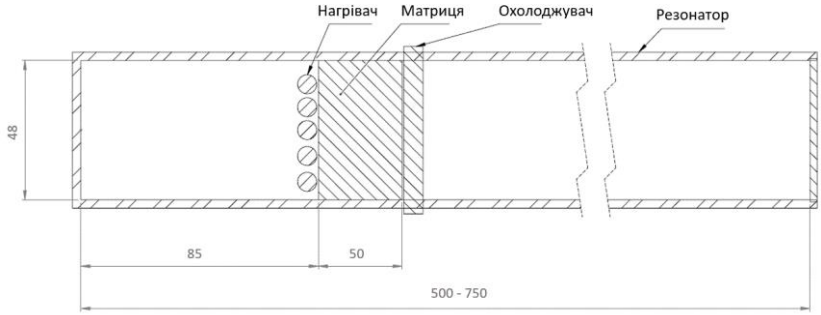

а б в

Рис. 2. Теплообмінне ядро ТАД і енергетичні потоки:
а – ядро ТАД; б – зона розігріву (термоакустичні коливання відсутні); в – робоча зона ТАД

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)



а




б

Рис. 3. Розрахункова модель термоакустичного двигуна:
а – CFD 3D модель термоакустичного двигуна; б – поперековий перетин моделі ТАД

Таблиця 1

Режими моделювання ТАД

| Тест | P, W | $\Delta T_{onset}$ , K | $\nabla T_{m,onset}$ , K/mm | $\nabla T_{m,W}$ , K/mm | $\tau_{onset}$ , sec. | $(T_H - T_C)_W$ , K | $p_2$ , Pa | $\dot{P}_{ac}$ ,W |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 125 | 135 | 4.5 | 4,5 | 88 | 285 | 2021 | 6,2 |
| 2 | 100 | 150 | 5.0 | 4,0 | 150 | 280 | 1753 | 4,9 |
| 3 | 80 | 170 | 5.7 | 3,9 | 330 | 275 | 965 | 2,1 |
| 4 | 60* | 162* | – | – | – | 272* | – | – |
| * - запуск ТАД не відбувся | | | | | | | | |

Застосування стратегії адаптивного рішення сітки забезпечувало підвищення точність чисельної моделі та скорочення обчислювального часу. На початку розрахунків внутрішнє середовище ТАД вважалося стаціонарним, ніякі сторонні збудження не задавались, всі гідродинамічні процеси всередині резонатора виникали виключно за рахунок нагрівання поверхні нагрівача.

## 3. Результати та обговорення

З метою визначення як потужність нагрівача (тобто швидкість підвищення температури нагрівача) впливає на виникнення термоакустичних пульсацій в експериментальному ТАД було проведено ряд розрахунків.

Ключовий результат CFD моделювання полягає у тому, що вперше отримана інформація щодо відмінностей у гідродинамічній ситуації в об'ємі термобуферної частини резонатора при різній інтенсивності розігріву.

На рис. 4 показані результати чисельного моделювання розподілу параметрів середовища по поздовжній осі резонатора при різних рівнях потужності нагрівача. Дані, представлені на Рис. 4а, 4б, 4в, відповідають режиму при потужності нагрівача 125 Вт, коли запуск ТАД відбувся.

При зменшенні потужності нагрівача до 60 Вт, (рис. 4г, 4д, 4є), інтенсивність термоконвективних потоків стає значно нижчою, навіть при досягненні необхідного рівня температури термоакустичні коливання не виникають. Отже потужність нагрівача істотно впливає на ініціацію первинних термоконвективних збуджень, так і на їх подальший розвиток.

Дійсно, інтенсивність термоконвекційних потоків визначається двома факторами: різницею температур між складовими частинами ТАД та швидкістю підвищення температури нагрівача, яка, в даному випадку, визначається електричною потужністю, що підведена до електричного нагрівача. Це дозволяє зробити висновок, що саме термоконвективний механізм відповідає за ініціацію термоакустичних коливань. Термоконвективні потоки всередині резонатора існують у вигляді макровихрових структур. Виникнення в газовому середовищі «турбулентних» макровихрових структур з різною вихорністю є результатом розвитку саме термоконвективних потоків. Інтенсивність цих структур кількісно характеризує вихровість середовища. Вихровість кількісно визначає інтенсивність вторинних вихрових структур.

Результати CFD моделювання показують, що термоконвективні потік містять вихрові структури різного масштабу з частотами від $10^1$ до $10^2$ $c^{-1}$. Таким чином, як тільки в матриці встановлюється достатній поздовжній градієнт температури, створюються умови для настання термоакустичних коливань. При підвищенні температури нагрівача виникають і зростають термоконвективні потоки. В області, прилеглій до нагрівача, ці потоки генерують внутрішні збурення, які кількісно вимірюються вихором.

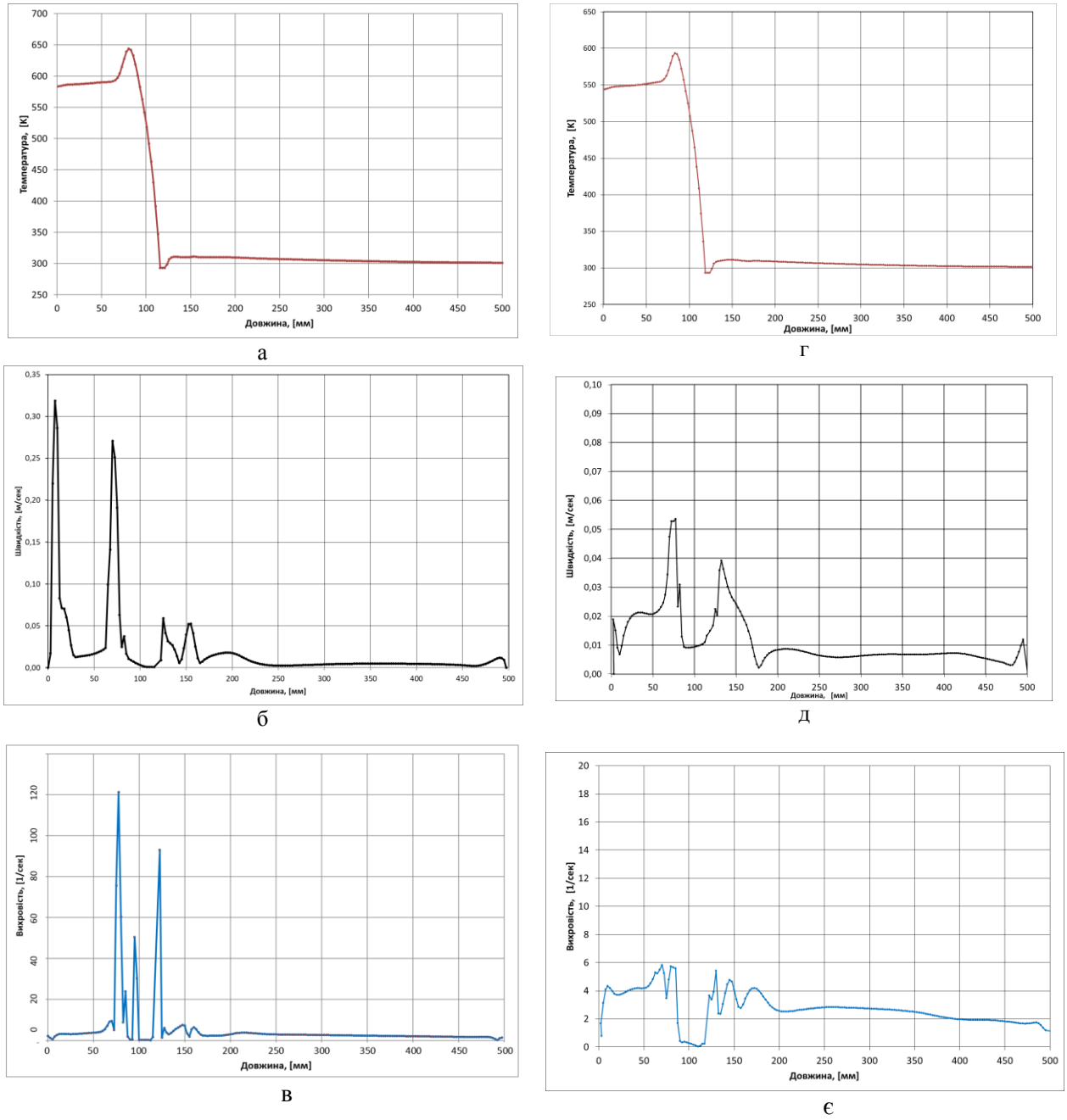



Рис. 4. Моделювання процесу запуску ТАД, розподіл параметрів по осі резонатора:
а, г – температура матриці; б, д) – швидкість конвективних потоків;
в, є – вихорність середовища в резонаторі

Оскільки ТАД є резонансною системою, очікується, що вона перейде в нестабільний стан і посилить коливання на кратній власній частоті резонатора.

Як тільки встановлюється достатній поздовжній градієнт температури, ці процеси завершуються розвитком термоакустичних пульсацій, що в кінцевому рахунку ініціює ТАД. Незважаючи на те, що в фізичних експериментах та CFD моделюванні необхідні температурні параметри були досягнуті (Рис. 4г) ТАД не запустився. Це однозначно свідчить що поздовжній температурний градієнт у матриці є недостатнім для збудження термоакустичних коливань, і що мають діяти додаткові чинники. Дійсно, інтенсивність термоконвективних потоків (швидкість, вихровість) при 125 Вт (рис. 4б, 4в) значно вища порівняно з тією, що спостерігається при 60 Вт (рис. 4д, 4є).

Так у тесті 4 різниця температур уздовж матриці ТАД ($\Delta T$ = 162ºС) перевищує ту, що спостерігалася в тесті 1 ($\Delta T$ = 135 º С) і тесті 2 ($\Delta T$ = 150 º С) (таблиця 1). Це можна пояснити відсутністю акус-

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

тичних коливань, які виступали б пусковим механізмом для термоакустичних процесів. Можна помітити, що в тесті 4 в матриці був температурний градієнт, який є достатнім для запуску ТАЕ (тест 3). Таким чином, наявна ситуація, коли теплові умови, необхідні для запуску і роботи ТАЕ, присутні, але механізму, необхідного для запуску коливального процесу немає.

Дані на рис. 5 показують, що існує диспропорція у витраті теплоти під час запуску ТАД. Наприклад, коли нагрівальний елемент працює на потужності 125 Вт, на процес запуску витрачається всього 11 Дж тепла. Однак при зниженні потужності нагрівального елементу до 80 Вт витрата тепла при запуску збільшується в 2,7 рази. Отримані результати свідчать що термоконвективні потоки діють як основний механізм ініціації, та подальшого розвитку термоакустичних коливань.

Врахування термоконвективних ефектів має важливе значення для підвищення ефективності та загальної продуктивності ТАД. Ці висновки мають значні наслідки для проектування та оптимізації систем термоакустичної енергії.

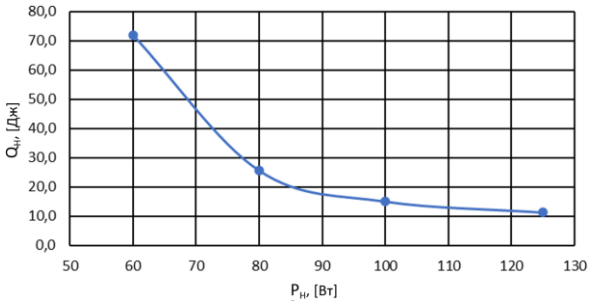



Рис. 5. Залежність теплоти від нагрівача – $Q_H$ необхідної для запуску ТАД від потужності нагрівача – $P_H$

У реальному ТАД максимальна температура рекуперативних нагрівачів обмежена параметрами джерела теплоти. Крім того, швидкість нагріву рекуператорів повинна бути регульована, щоб запобігти надмірним тепловим деформаціям, які можуть порушити структурну цілісність ТАД.

## Висновки

1. CDF моделюванням підтверджено, що в ТАД, який працює в режимі стоячої хвилі, термоакустичні пульсації можуть не виникати, навіть за наявності достатнього поздовжнього температурного градієнта в матриці, а термоконвективні потоки в термобуфері ТАД є механізмом ініціювання термоакустичних коливань.

2. Показано, що для надійного запуску ТАД критичними є – доступна температура нагрівача і швидкість її зростання, так наприклад, ТАД спожив 11 кДж теплоти для запуску при потужності нагрівача 125 Вт, а при зменшення потужності нагрівача до 80 Вт вимагав збільшення енергоспоживання для запуску більш ніж у 2,5 рази.

3. Використання допоміжних нагрівачів має забезпечити надійність запуску потужних ТАД.

4. Подальші дослідження доцільно зосередити на вдосконаленні механізмів запуску ТАД, що має сприяти використанню термоакустичних установок на практиці.

**Внесок авторів:** огляд та аналіз інформаційних джерел – **В.В. Коробко**, **О.О. Московко**, **А.П Шевцов**; формулювання мети і постановка задач дослідження – **В.В. Коробко**, **О.О. Московко**,; проведення математичного моделювання – **В.В. Коробко**, **О.О. Московко**; аналіз результатів дослідження – **В.В. Коробко**, **О.О. Московко**, **А.П Шевцов**; формулювання висновків – **В.В. Коробко**, **О.О. Московко**, **А.П Шевцов**; написання статті – **В.В. Коробко**, **О.О. Московко**, **А.П Шевцов.**

**Конфлікт інтересів**

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті

**Фінансування**

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

**Доступність даних**

Рукопис не має пов'язаних даних.

**Використання засобів штучного інтелекту**

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

## Література

*1. Benveniste, H. Climate change increases resource-constrained international immobility [Text] / H. Benveniste, M. Oppenheimer, & M. Fleurbaey // Nature Climate Change. – 2022. – Vol. 12. – P. 634–641. doi: 10.1038/s41558-022-01401-w.*

*2. Near-term transition and longer-term physical climate risks of greenhouse gas emissions pathways [Text] / A. Gambhir, M. George, H. Mc Jeon, & et al. //*

*Nature Climate Change. – 2022. – Vol. 12. – P. 88–96. doi: 10.1038/s41558-021-01236-x.*

*3. Technology Assessment on Low-Temperature Waste Heat Recovery in Industry [Text] / A. Thekdi, S. U. Nimbalkar, S. Sundar Moorthy, & et al. // United States: N.p. – 2021. – 103 p. doi: 10.2172/1819547.*

*4. Impact of the type of heat exchanger on the characteristics of low-temperature thermoacoustic heat engines [Text] / V. Korobko, A. Shevtsov, S. Serbin, & et al. // International Journal of Thermofluids. – 2024. – Vol. 24. – Article no. 100953. doi: 10.1016/j.ijft.2024.100953.*

*5. Korobko, V. Exploration of a model thermoacoustic turbogenerator with a bidirectional turbine [Text] / V. Korobko, S. Serbin, & H. C. Le // Polish Maritime Research. – 2023. – Vol. 30, iss. 4. – P. 102–109. doi: 10.2478/pomr-2023-0063.*

*6. Rott, N. Thermally driven acoustic oscillations. Part IV: tubes with variable cross section [Text] / N. Rott, & G. Zouzoulas // Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik (ZAMP). – 1976. – Vol. 27. – P. 197–224.*

*7. Atchley, A. A. Standing wave analysis of a thermoacoustic prime mover below onset of self- oscillation [Text] / A. A. Atchley // Journal of the Acoustical Society of America. – 1992. – Vol. 92 (5). – P. 2907–2914. doi: 10.1121/1.404355.*

*8. Atchley, A. A. Analysis of the initial buildup of oscillations in a thermoacoustic prime mover [Text] / A. A. Atchley // Journal of the Acoustical Society of America. – 1994. – Vol. 95, iss. 3. – P. 1661–1664. doi: 10.1121/1.408554.*

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

*10. Jaworski, A. J. Editorial for Special Issue: "Heat Transfer Processes in Oscillatory Flow Conditions" [Text] / A. J. Jaworski // Applied Sciences. – 2017. – Vol. 7, iss. 10. – 3 p. doi: 10.3390/app7100994.*

*11. Yu, Z. Impact of viscous and heat relaxation loss on the critical temperature gradients of thermoacoustic stacks [Text] / Z. Yu, & A. J. Jaworski // International Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2009. – Vol. 5, iss. 3. – P. 152–158.*

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

*13. Abduljalil, A. S. Experimental testing of the flow resistance and thermal conductivity of porous materials for regenerators [Text] / A. S. Abduljalil, Z. Yu, A. J. Jaworski // Proceedings of the 23rd IIR International Congress of Refrigeration. – 2011. – Vol. 32. – P. 217–228.*

## References

1. Benveniste, H., Oppenheimer, M., Fleurbaey, M. Climate change increases resource-constrained international immobility. *Nature Climate Change*, 2022, vol. 12, pp. 634–641. doi: 10.1038/s41558-022-01401-w.

2. Gambhir, A., George, M., McJeon, H., Arnell, N. W., Bernie, D., Mittal, S., Köberle, A. C., Lowe, J., Rogelj, J., & Monteith, S. Near-term transition and longer-term physical climate risks of greenhouse gas emissions pathways. *Nature Climate Change*, 2022, vol. 12, pp. 88–96. doi: 10.1038/s41558-021-01236-x.

3. Thekdi, A., Nimbalkar, S. U., Sundaramoorthy, S., Armstrong, K. O., Taylor, A., Gritton, J. E., Wenning, T., & Cresko, J. Technology Assessment on Low-Temperature Waste Heat Recovery in Industry. *United States: N.p.*, 2021. 103 p. doi: 10.2172/1819547.

4. Korobko, V., Shevtsov, A., Serbin, S., Wen, H., & Dzida, M. Impact of the type of heat exchanger on the characteristics of low-temperature thermoacoustic heat engines. *International Journal of Thermofluids*, 2024, vol. 24, article no. 100953. doi: 10.1016/j.ijft.2024.100953.

5. Korobko, V., Serbin, S., & Le, H. C. Exploration of a model thermoacoustic turbogenerator with a bidirectional turbine. *Polish Maritime Research*, 2023, vol. 30, iss. 4, pp. 102–109. doi: 10.2478/pomr-2023-0063.

6. Rott, N., & Zouzoulas, G. Thermally driven acoustic oscillations. Part IV: tubes with variable cross section. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik (ZAMP)*, 1976, vol. 27, pp. 197–224.

7. Atchley, A. A. Standing wave analysis of a thermoacoustic prime mover below onset of self- oscillation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1992, vol. 92, iss. 5, pp. 2907–2914. doi: 10.1121/1.404355.

8. Atchley, A. A. Analysis of the initial buildup of oscillations in a thermoacoustic prime mover. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1994, vol. 95, iss. 3, pp. 1661–1664. doi: 10.1121/1.408554.

9. Swift, G. W. Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators. *American Institute of Physics*, 2002. 300 p.

10. Jaworski, A. J. Editorial for Special Issue: "Heat Transfer Processes in Oscillatory Flow Conditions". *Applied Sciences*, 2017, vol. 7, iss. 10. 3 p. doi: 10.3390/app7100994.

11. Yu, Z., & Jaworski, A. J. Impact of viscous and heat relaxation loss on the critical temperature gradients of thermoacoustic stacks. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2009, vol. 5, iss. 3, pp. 152–158.

12. Korobko, V., & Moskovko, O. Osoblyvosti protsesu zapusku termoakustychnykh dvyguniv za umov vykorystannia nyzkotemperaturnykh dzherel teplovoi energii [Features start thermoacoustic engine under conditions using low-temperature thermal energy source]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aer-*

*ISSN 1814-4225 (print)*
*ISSN 2663-2012 (online)*

*ospace technic and technology*, 2014, no. 8 (115), pp. 50–54.

13. Abduljalil, A. S., Yu, Z., & Jaworski, A. J. Experimental testing of the flow resistance and thermal conductivity of porous materials for regenerators. *Proceedings of the 23rd IIR International Congress of Refrigeration*, 2011, vol. 32, pp. 217–228.

*Надійшла до редакції 16.07.2025, розглянута на редколегії 18.08.2025*

## CFD MODELING OF THE DEVELOPMENT OF THERMOCONVECTION CURRENTS ON THE PROCESSES OF STARTING LOW-TEMPERATURE THERMOACOUSTIC ENGINES

***Volodymyr Korobko, Olexiy Moskovko, Anatoliy Shevtsov***

Thermoacoustic engines (TAEs) represent a promising solution for the efficient conversion of low-grade heat into acoustic energy and mechanical work. A major challenge for their practical implementation is the need to ensure reliable startup, i.e., stable self-excitation of thermoacoustic oscillations. **This study aims** to identify methods that ensure the guaranteed startup of TAEs. Theoretical convective effects play a key role in the onset of self-sustained thermoacoustic oscillations. **The object of this study is** the development of thermoconvective flow, while the subject is the characteristics of its vortex structures, particularly their scales and frequencies. To investigate the thermal processes involved in TAE startup, **CFD modeling** was performed. **The main task** was to develop, verify, and validate a three-dimensional unsteady numerical model of a TAE operating in a standing wave configuration. The simulation employed original experimental data, specifically, temperature trends of the engine's key structural components. **Results.** For the first time, it was experimentally confirmed and validated by CFD calculations that a longitudinal temperature gradient in the TAE core is a necessary but insufficient condition for the onset of thermoacoustic oscillations. Thermoconvective flows are formed in the TAE resonator as vortex structures with various frequencies and scales. It was also established that vortex structures arise with frequencies matching the engine's natural resonance frequency under certain conditions. **Conclusions.** The experimental results indicate that the heaters' dynamic characteristics, particularly their thermal inertia and heating rate, significantly influence startup efficiency. In low-temperature TAEs for energy-saving applications, the use of auxiliary heaters is advisable because they promote the formation of intense thermoconvective flows. The outcomes of this study support the practical implementation of thermoacoustic systems for using low-temperature heat sources, whether waste or renewable.

**Keywords**: thermoacoustic engine; temperature gradient; thermoconvection; thermoacoustic pulsations; onset.

**Коробко Володимир Владиславович** – д-р техн. наук, доц. каф. експлуатації суднових стаціонарних енергетичних установок та теплоенергетики Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна.

**Московко Олексій Олексійович** – ас. каф. експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна.

**Шевцов Анатолій Павлович** – д-р техн. наук, проф., Освітньо-науковий центр морської інфраструктури, Національний університет кораблебудування ім. адм. С.О. Макарова, Миколаїв, Україна.

**Volodymyr Korobko** – Doctor of Tech. Sciences, Associate Professor of the Department of Operation of Ship Power Plants and Thermal Power Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,
e-mail: vololymyr.korobko@nuos.edu.ua, kvv001@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5761-6824.

**Oleksiy Moskovko** – Assistant at the Department of Operation of Ship Power Plants and Thermal Power Engineering of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,
e-mail: oleksiy.moskovko@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3848-5651.

**Anatoliy Shevtsov** – Doctor of Tech. Sciences, Professor, Educational and Scientific Center of Marine Infrastructure, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,
e-mail: aootnet@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8692-6458.