

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 621.536.483; 621.593

Моделювання теплових процесів у газодинамічному тепло-холодильному акустичному генераторі з газовим розподільником

Д. О. Димерцов

Харківський Національний Економічний Університет імені Семена Кузнеця, проспект Науки, 9А, Харків, 61166, Україна

✉ e-mail: dmytro.dymertsov@hneu.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4894-3495>

З розвитком сучасних технологій, застосування математичного моделювання у вивченні різних фізичних процесів стало доволі актуальною темою для дослідників. Швидка зміна фізичних процесів не дозволяє вивчати процес глибше, що як раз і спонукає дослідника до використання моделювання та послідовного програмування математики. Одним з таких процесів є коливання газу в резонансній трубці у газоструминному акустичному холодильно-нагрівальному генераторі. Простота конструкцій та швидка зміна процесів в генераторі дала можливість використання математичного моделювання, що більш досконало дозволяє вивчити процеси генераторів. Робота генераторів доволі цікава з точки зору теплового та холодильного напряму розвитку безмашинних газодинамічних методів отримання зміни температур. Даний пристрій сполучає в собі простоту й надійність конструкції на відміну від інших холодильних машин, оскільки має у своїй конструкції прості рушійні частини або не має їх зовсім. Газоструминні акустичні холодильно-нагрівальні генератори знайшли своє застосування у нафтовому та газовому видобуванні, космічних технологіях. Тому актуальність вивчення самих генераторів і, головне, процесів в них займає не останнє місце в холодильній та тепловій техніці. Розглянувши розвиток технологій та математичного моделювання, було обрано перспективний спосіб отримання зміни температури, який базується на коливальному процесі газів, виникаючих в заглушених трубках. В роботі розглянуті гіпотези виникнення теплових ефектів. Представлена власна одновимірна математична модель газодинамічних процесів, де використовується система диференціальних рівнянь, яка розв'язується різнцевими методами. Створена модель запрограмована у мові програмування Lazarus Free Pascal та представлена у вигляді програми розрахунку характеристик газоструминного холодильно-теплового акустичного генератора. Використовуючи створену програму, проведено дослідження виникнення теплового ефекту на різних температурних рівнях.

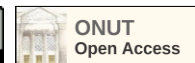
Ключові слова: Трубка Гартмана-Шпренгера; Резонансна трубка; Холодильно-нагрівальний генератор; Низькі температури; Акустичний генератор

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i2.2995>

© The Author(s) 2024. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Вступ

Швидка зміна фізичних параметрів, які відбуваються в пристроях з коливальними гідродинамічними процесами, не дозволяє бачити повної

картини, використовуючи технічні засоби спостереження, тому перед дослідником постає задача пошуку альтернативних способів дослідження газових процесів.

Одним з таких способів є математичне моделю-

вання процесів, використовуючи рівняння газовой динаміки. Розвиток математичного моделювання зіткнувся з різними труднощами, які привели до створення складних багатовимірних задач, розв'язання яких є доволі складним процесом, вимагаючи використання цілої системи методів, що ускладнює розв'язок. Тому дослідники для спрощення розв'язку, звертаються до більш простих одновимірних задач, використання яких останнім часом є доволі актуально.

2. Літературний огляд джерел інформації

Одним з таких швидкісних процесів є рух пульсуючої хвилі газу, яка гальмується надзвучковим не розширеним струменем та перешкодою у вигляді порожнини з одним закритим торцем. В таких порожнинах, завдяки створеному акустичному полю всередині трубки, інтенсифікується тепловий процес, що призводить до суттєвого нагрівання закритого кінця трубки та зниження температури газу на виході з неї. Такою порожниною є резонансна трубка у генераторі Гартмана-Шпренгера [2, 3], класична схема якого представляє собою співвісне розташовані звужене сопло та приймальна трубка з одним закритим торцем. Завдяки співвідношення геометрії трубки та сопла створюється автоколивальний процес, який якраз і призводить до зміни температури газу та стінок самої трубки. Також пульсацію газу у резонансній трубці можна створити за допомогою механічного розподільника, який з визначеною частотою подає газ у резонансну трубку.

В генераторах для виникнення хвильових процесів в трубках, використовуються механічні органи газорозподілу, так званий ротор, в який вбудовані сопла-розподільник (див. рис. 1). Обертання забезпечується зовнішнім приводом, наприклад, електродвигуном. При обертанні ротора відбувається періодична взаємодія струменя з газом у приймальній трубці, що призводить до його стиснення та нагрівання. Тепло від стінок приймальної трубки відводиться в довкілля. Газ, який відпрацював у приймальних трубах, виходить із них з нижчою температурою, ніж та, що він мав перед потраплянням у трубку. Ефект зміни температури газу в резонансній трубці дуже цікавий для дослідження. Тепловий ефект, який виникає у резонансній трубці, пов'язаний з тим, що протягом газодинамічного циклу наповнення-випорожнення трубки [4, 5], деяка кількість газу, протягом більшої кі-

лькості циклів, утримується поблизу закритого торця трубки.

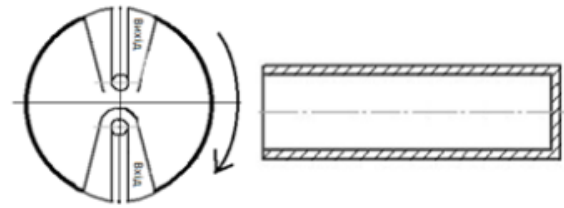


Рисунок 1 – Газоструминний тепло-холодильний акустичний генератор

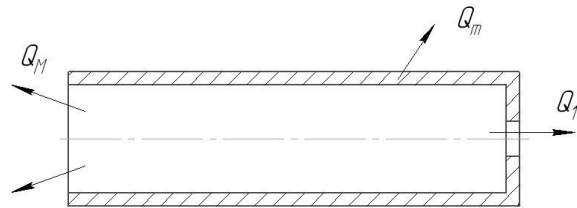


Рисунок 2 – Процеси відведення тепла приймальної трубки

Кожний наступний газодинамічний цикл наповнення-випорожнення трубки проходить систему стрибків стиснення та розширення вздовж трубки, що призводить до передачі енергії газу який залишається в трубці [6, 7]. Оскільки збільшення локальної ентропії при стисканні більше, термічний ефект призводить до збільшення локальної температури. Такий процес відбувається з частотою у кілька сотень циклів на секунду, що призводить до швидкого нагрівання утриманого газу.

Механізми відведення тепла (рис. 1) від трубки можна поділити на такі складові:

- відведення теплоти (Q_m) через стінку трубки у зовнішній теплоносій;
- відведення теплоти (Q_m) з трубки, що проникає в трубку струменем газу із сопла у фазі її закінчення;
- відведення теплоти, що виділяється (Q_1), випуском з енергоутворювальної трубки частин нагрітого газу.

Кількість теплоти, що відводиться від нагрітого газу через стінки резонансної трубки, визначає ефективність хвильового генератора холоду, як холодопровідного пристрою.

Використовуємо дослідні дані, наведені у роботах [3,4], для аналізу механізмів тепловідділення від резонансної трубки. Встановлено, що у разі відведення тепла від трубки до зовнішнього теплоносія величина Q_m становить 10-23 % від Q . При теплоізоляції резонансної трубки Q_m стає дуже ма-

лою в порівнянні з Q . Це дає підставу припустити, що в трубці з заглушеним кінцем найбільш істотним є тепло з резонансної трубки, що проникає в неї струменем газу. Таке припущення підтверджується тим фактом, що на довжині порядку $3L$ з боку сопла температура стінок дорівнює температурі струменя газу, що затікає.

3. Одновимірна математичної модель

Для дослідження газодинамічних процесів була складена одновимірна математична модель, яка представляє собою систему рівняння газової динаміки,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho w}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho w^2 + p) = -\xi \frac{\rho w^2}{2d} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho \left(e + \frac{w^2}{2} \right)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho w \left(e + \frac{p}{\rho} + \frac{w^2}{2} \right) \right] = -\frac{4\alpha_c}{d} (T_c - T_{cm}) \quad (3)$$

Також, для описання теплових процесів у стінці приймальної труби, використовується одновимірне нестационарне рівняння теплопровідності.

$$c_c \rho_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial x} + \frac{\alpha}{\delta_c} (T_c - T) + \frac{\alpha_e}{\delta_c} (T_c - T_o) \quad (4)$$

Для розрахунку параметрів газу у трубці використовується метод кінцевих різниць з заданням просторової сітки. На обраній сітці будується явна центральна різницева схема, з завданням розпаду довільного розриву у половинних точках просторової сітки.

На вході в резонансну трубку моделюється газовий розподільник, робота якого представляє собою зміну границі на вході в трубку. Спочатку трубка закрита, потім трубка відкривається і розглядається умова сопла, далі трубка закривається і розглядається умова заглушеного торця. Потім трубка знову відкрита і газ виходить з трубки в область низького тиску, і останнє трубка знову закрита, де знову розглядається умова заглушеного торця. На вході в трубку задається умова звуженого сопла, яке зводиться до визначення розмірів вихідного отвору за заданою витратою газу та зада-

ною швидкістю закінчення. При розрахунку вважають, що перебіг газу в соплі адіабатичний, тому що за короткий час протікання газових частинок через теплообмін тепло з навколишнім середовищем практично не встановлюється. Якщо знехтувати впливом тертя, то перебіг можна вважати ізентропічним. Прийнято граничні умови на вході в приймальну трубку та на заглушеному кінці, також умови для теплопровідної стінки.

4. Мета та задачі дослідження

Метою даної роботи є дослідження теплового ефекту на різних температурних рівнях роботи газострумінного акустичного теплового та холодильного генератора. Для вивчення процесів застосовані методи порівняння, аналізу, спостереження, вимірювання, розрахунку, моделювання та експерименту. А саме для математичного моделювання процесів використовувався кінцево-різницевий метод апроксимації диференціальних рівнянь. Також чисельні експерименти та обробка отриманих результатів з подальшою їх систематизацією.

5. Моделювання теплових процесів в резонансній трубці

Для моделювання процесу зміни температури газу (рис. 3) розглянемо резонансну трубку, приведену в роботі [1]. Резонансна трубка є елементом генератора Гартмана-Шпренгера, який слугує в конструкції доочистки суміші, елементом до охолодження робочого газу.

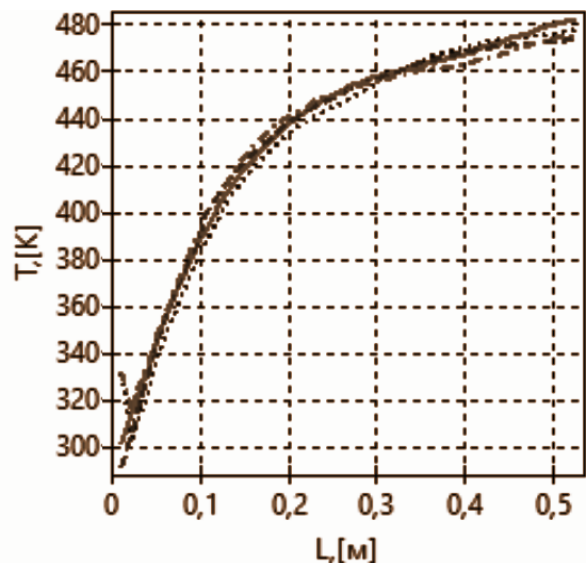


Рисунок 3 – Температура газу по довжині резонансної трубки на рівні 300 K

Для моделі задані крок за часом 10^{-7} с та кількість точок просторової одновимірної сітки 80, що відповідає просторовому кроку 0.000656 м. Тиск нагнітання 1 МПа, який заявлений в роботі для використання внутрішньої енергії потоку при різних тисках.

Розглянемо дослідження теплового процесу для двох температурних рівнів – перший температурний рівень відповідає «кімнатній» температурі 293 К, другий температурний режим відповідає рівню рідкого азоту 66 К (рис. 4). Для створення коливального режиму руху газу в резонансній трубці, застосуємо в конструкції газовий розподільник, як елемент, який створює пульсації газу.

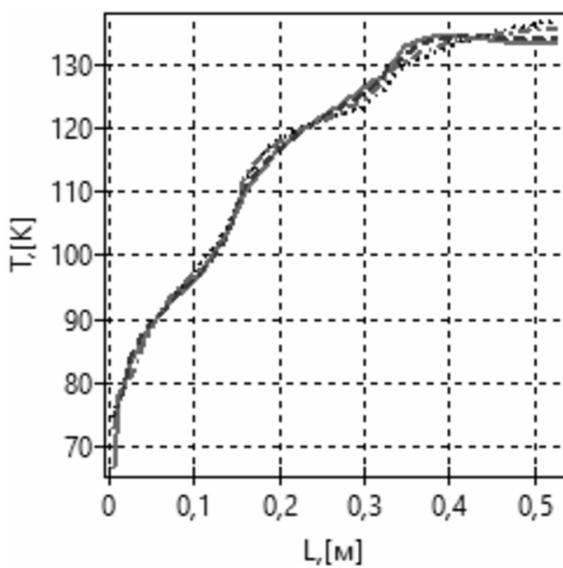


Рисунок 4 – Температура газу по довжині резонансної трубки на рівні 66 К

Для дослідження зміни температури газу на обох температурних рівнях, задана частота пульсації газу 550 Гц. Результати розрахунку зміни температури газу вздовж резонансної трубки приведені для 2-5-4-3 циклу обертання газового розподільника, що відповідає виходу генератора на робочий режим (рис. 5).

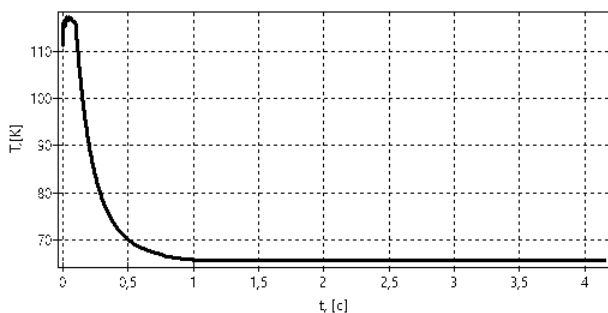


Рисунок 5 – Температура газу на виході з резонансної трубки для азотного рівня

Дослідження зміни температури приймальної суміші на температурному рівні 293 К, показало зміну температури на виході з резонансної трубки 7 К (див. рис. 3). Температура ж газу в області закритого торця трубки досягає значення 480...520 К. При розгляданні температурного рівня рідкого азоту, можна бачити як за час виходу на режим роботи температура суміші зменшується на 0,7...1,5 К (див. рис. 4). Дослідження температури робочої суміші в залежності від часу роботи на виході з резонансної трубки представлено на рис.5. Можна бачити як температура суміші поступово зменшується до 65.3 К.

6. Висновки

За допомогою одновимірної моделі отримані результати для дослідження очистки неон-гелієвої суміші, які можна використовувати для подальших досліджень в цьому напрямі видобутку газів. За отриманими результатами температури по довжині резонансної трубки можна бачити як за час виходу на режим роботи температура суміші зменшується на 0,7...1,5 К. Температура робочої суміші по довжині трубки збільшується в сторону зачиненого кінця трубки від 60 до 150 К.

Література

1. Кошевой С., Зімін Д., Димерцов Д. Експериментальне дослідження роботи газодинамічного не машинного генератора холоду на основі трубки Гартмана-Шпренгера при температурі 78К // Холодильна техніка і технологія. – 2010. – №.2. – С. 9-15.
2. Bouch D.J., Cutler A.D. Investigation of a Hartmann-Sprenger tube for passive heating of scramjet injectant gases // 41th Aerospace Sciences meeting and exhibit. – 6-7.01.2003, Reno, Nevada. – P. 1-9. <https://doi.org/10.2514/6.2003-1275>.
3. Brocher E., Kawahashi M. Wave and thermal phenomena in H-S tubes with an area constriction // Proceedings of the 15th international symposium on shock waves and shock tubes. – Berkeley, CA, USA, 1986. – P.179-185.
4. Brocher E., Maresca C. Etude des phenomenes thermiques dans un tube de Hartmann-Sprenger // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1973. – Vol. 16. – P. 529-538. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(73\)90221-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(73)90221-4).
5. Bauer C., Hauser M., Haidn O. Investigation of

stabilization effects in Hartmann-Sprenger-Tubes // Proceedings of the 30th International Symposium on Space Technology and Science. – Kobe-Hyogo, Japan, 4-9 July, 2015.

6. Pang Y., Zhang G., Gu H., Yuan D., Chen Y., Wu L., Yao H., Lin C. Flow and sound field characteristics of a Hartmann whistle with flow-sound-separation feature // Applied Acoustics. –2022.

– Vol. 201. – P. 109103. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.109103>.

7. Xia G., Li D., Merkle C. Effects of a Needle on Shrouded Hartmann-Sprenger Tube Flow // AIAA Journal. – 2007. – Vol. 45. – No. 5. – P. 1028-1035. <https://doi.org/10.2514/1.18591>.

Отримана в редакції 17.05.2024, прийнята до друку 03.06.2024

Modeling of thermal processes in the Hartmann-Sprenger gas-dynamic heat-cooling acoustic generator

Dmytro Dymertsov

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, 9A Nauki, Ave, Kharkiv, 61001, Ukraine

✉ e-mail: dmytro.dymertsov@hneu.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4894-3495>

With the development of modern technologies, the application of mathematical modeling in the study of various physical processes has become a very relevant topic for researchers. The rapid change of physical processes does not allow to study the process more deeply, which is precisely what prompts the researcher to use modeling and sequential programming of mathematics. One of these processes is gas oscillations in a resonance tube in a Hartmann-Sprenger gas-jet acoustic cooling-heating generator. Simplicity of constructions and quick change of processes in the generator made it possible to use mathematical modeling, which allows to study the processes of generators in a more perfect way. The operation of generators is quite interesting from the point of view of the thermal and cooling direction of the development of machineless gas-dynamic methods of obtaining temperature changes. This device combines simplicity and reliability of the design, unlike other refrigerating machines, as it has simple moving parts in its design or does not have them at all. Gas-jet acoustic refrigerating and heating generators have found their application in oil and gas production, space technologies. Therefore, the relevance of studying the generators themselves and, most importantly, the processes in them occupies not the last place in refrigeration and heating technology. After considering the development of technologies and mathematical modeling, a promising method of obtaining a temperature change was chosen, which is based on the oscillating process of gases occurring in choked tubes. Hypotheses of thermal effects are considered in the paper. Our own one-dimensional mathematical model of gas-dynamic processes is presented, which uses a system of differential equations, which is solved by difference methods. The created model is programmed in the Lazarus Free Pascal programming language and is presented in the form of a program for calculating the characteristics of a gas-jet refrigerating-thermal acoustic generator. Using the created program, studies of the occurrence of the thermal effect at different temperature levels were conducted

Keywords: Hartmann-Sprenger tube; Resonant tube; Refrigeration-heating generator; Low temperatures; Acoustic generator

References

1. Dymertsov, D., Koshevoy, S., Zimin, D. (2010) Experimental study of the operation of a gas-dynamic non-machine cold generator based on a Hartmann-Sprenger tube at a temperature of 78K. *Refrigeration engineering and technology*, 2, 9-15.
2. Bouch, D.J., Cutler, A.D. (2003) Investigation of a

Hartmann-Sprenger tube for passive heating of scram-jet injectant gases. *41th Aerospace Sciences meeting and exhibit, Reno, Nevada, 1-9*.

3. Brocher, E., Kawahashi, M. (1986) Wave and thermal phenomena in H-S tubes with an area constriction. *Proceedings of the 15th international symposium on shock waves and shock tubes, Berkeley, CA, USA, 179-185*.

4. **Brocher, E., Maresca, C.** (1973) Study of thermal phenomena in a Hartmann-Sprenger tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 16, 529-538.

5. **Bauer, C., Hauser, M., Haidn, O.** (2015) Investigation of stabilization effects in Hartmann-Sprenger-Tubes. *Proceedings of the 30th International Symposium on Space Technology and Science, Kobe-Hyogo, Japan, 4-9 July*.

6. **Pang, Y., Zhang, G., Gu, H., Yuan, D., Chen, Y., Wu, L., Yao, H., Lin, C.** (2022) Flow and sound field

characteristics of a Hartmann whistle with flow-sound-separation feature. *Applied Acoustics*, 201, 109103.

7. **Xia, G., Li, D., Merkle, C.** (2007) Effects of a Needle on Shrouded Hartmann-Sprenger Tube Flow. *AIAA Journal*, 45, 5, 1028-1035.

Received 17 May 2024

Approved 03 June 2024

Available in Internet 30 June 2024