

**Секція 10. КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТА  
МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ. СИСТЕМИ  
АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ  
СИСТЕМАХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ. КОМП'ЮТЕРНІ  
ТЕХНОЛОГІЇ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ І МАШИНАХ**

**МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ  
ХВИЛЬОВИХ ГЕНЕРАТОРІВ ХОЛОДУ ДИНАМІЧНОГО  
ГАЗОРОЗПОДІЛУ**

**Димерцов Дмитро Олександрович**, старший викладач,  
Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця,  
e-mail: [dmytro.dymertsov@hneu.net](mailto:dmytro.dymertsov@hneu.net), ORCID: [0009-0001-8155-0498](https://orcid.org/0009-0001-8155-0498)

Розглянувши розвиток холодильної техніки та математичного моделювання, було обрано перспективний спосіб отримання холоду, який базується на коливальному процесі газів, виникаючих в заглушених трубках, так званих «хвильових генераторах холоду». Простота конструкцій та швидка зміна процесів в таких генераторах, дала можливість використання математичного моделювання, що більш досконало дозволяє вивчити процеси. В роботі розглянуті гіпотези виникнення хвильових процесів в приймальних трубках генераторів різних типів. Приведена математична модель газодинамічних процесів, де використовується система диференціальних рівнянь газової динаміки з різними граничними умовами.

Система вирішується з допомогою методу кінцевих різниць. Показано вибір кроків роботи моделі, а також перевірку моделі на достовірність. Представлені результати в залежності від частоти обертання газового розподільника від зміни температури на вході, потужність пристрою, а також коефіцієнта корисної дії. Результати дослідження, отримані за допомогою розробленої програми у мові програмування Lazarus Free Pascal.

Одним з перспективних напрямів розвитку техніки низьких температур є отримання холоду за допомогою хвильових процесів в заглушених трубках хвильових генераторах холоду [1, 2, 6]. Швидка інтенсивність хвильових процесів не дозволяє детально вивчити пристрій, що приводить до використання математичного моделювання і також програмування самих процесів, що разом призведе до дослідження теплових та газодинамічних процесів в хвильових генераторів холоду. Низькі температури, математичне моделювання і програмування пройшли різні стадії розвитку, внаслідок чого проникли в різні сфери діяльності людей, наприклад в енергетиці, космічних технологіях, харчової промисловості та інших напрямів.

Аналізуючи розвиток холодильної техніки та математичного моделювання стає зрозуміло, що сучасна цивілізація не може існувати і розвиватися без математики, програмування та низьких температур. Тому дана робота

буде включати в себе описання різних гіпотез виникнення процесів, складання математичної моделі та зміни граничних умов та демонстрації результатів роботи.

Розглянувши різні конструкційні хвильових генераторів, їх можна розділити по типу збудження хвильового процесу на статичні та динамічні [3]. В так званих статичних генераторах хвильовий процес виникає при певних умовах, а саме при розташуванні сопла на необхідній відстані від приймальної трубки, характерних розмірах сопла та трубки.

Газ поступаючи в приймальну трубку створює автоколивальний процес самостійно. В динамічних генераторах коливальний процес створюється газовим розподільником (рис. 1).

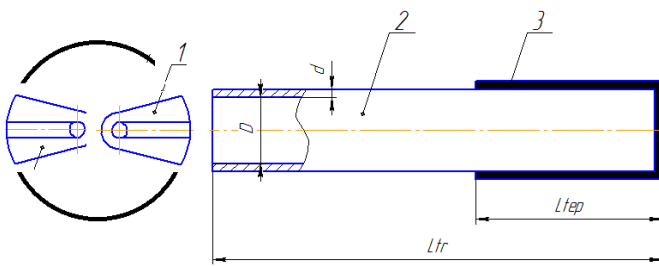


Рисунок 1 – Схема хвильового генератора холоду динамічного генератора (1 – газовий розподільник; 2 – приймальна трубка; 3 – теплообмінна поверхня)

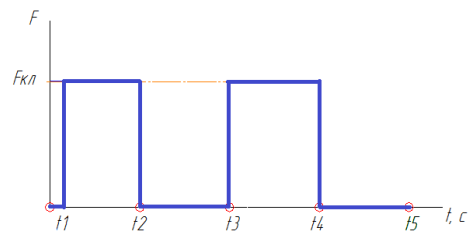


Рисунок 2 – Діаграма роботи розподільника

Розглянувши різні конструкційні хвильових генераторів, їх можна розділити по типу збудження хвильового процесу на статичні та динамічні [3]. В так званих статичних генераторах хвильовий процес виникає при певних умовах, а саме при розташуванні сопла на необхідній відстані від приймальної трубки, характерних розмірах сопла та трубки. Газ поступаючи в приймальну трубку створює автоколивальний процес самостійно. В динамічних генераторах коливальний процес створюється газовим розподільником. Роздивимось кожний тип генератора окремо.

Складена математична модель була запрограмована на мові програмування Lazarus Free Pascal, та представлена у вигляді програми розрахунку хвильових генераторів динамічного типу. За допомогою програми, можна досліджувати хвильові та теплові процесі, які виникають в приймальній трубці та стінки приймальної трубки. Перед проведенням дослідів модель була перевірена на існуючих результатах [4, 5].

Обрана геометрія приймальної трубки - довжина трубки 2.26 м, діаметр трубки 0.01 м. Сопло діаметром 0.01 м. Вхідна температура газу 293 К, тиск нагнітання 2.6 МПа. Частота обертання газового розподільника 800 Гц. Робоча речовина - повітря. Математична модель пристрою забезпечує похибку 5% або перепад температури у 20К (рис. 4).

Розглядаючи сучасні конструкції хвильових [7, 8, 9] генераторів холоду для дослідів були обрані наступні геометричні характеристики приймальної трубки: довжина трубки варіюється 0.1–0.5 м, внутрішній діаметр 8 мм,

товщина стінки 1 мм, діаметр сопла 6 мм. Обрані параметри роботи генератора: робоча речовина - повітря, тиск нагнітання в діапазоні  $1.5 \cdot 10^6$ - $2 \cdot 10^6$  Па , вхідна температура газу 293 К, температура навколишнього середовища 273 К. Газовий розподільник розглядався у вигляді оберտального клапана. Клапан працює за законом (рис. 3).

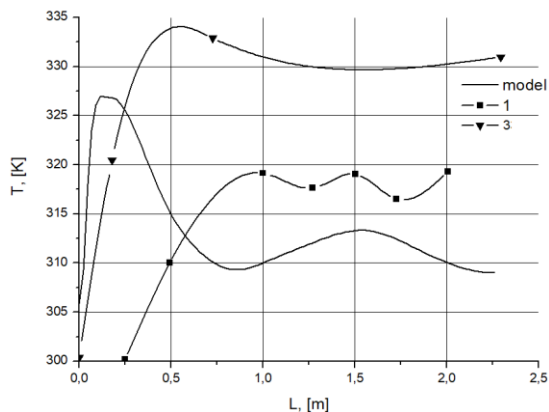


Рисунок 4 – Перевірка моделі на існуючих результатах моделі

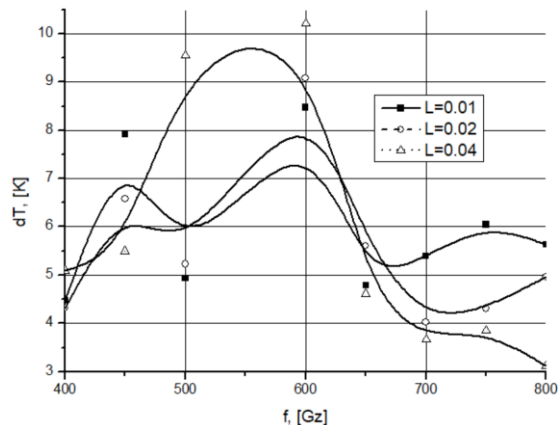


Рисунок 3 – Зміна температури в залежності від частоти обертання

Розглядаючи існуючі конструкції хвильових генераторів холоду для дослідів були обрані наступні геометричні характеристики приймальної трубки: довжина трубки варіюється 0.1–0.5 м, внутрішній діаметр 8 мм, товщина стінки 1 мм, діаметр сопла 6 мм. Обрані параметри роботи генератора: робоча речовина - повітря, тиск нагнітання в діапазоні  $1.5 \cdot 10^6$ - $2 \cdot 10^6$  Па , вхідна температура газу 293 К, температура навколишнього середовища 273 К. Газовий розподільник розглядався у вигляді оберտального «сопла-клапана». Робота «сопла-клапана» моделювалася за залежністю (рис. 2), де при відкритті клапана площа вхідного та вихідного отвору приймала максимальне значення. За залежністю, на проміжку  $t_2$ - $t_1$ , газ поступає в трубку з резервуару високого тиску, а на проміжку  $t_4$ - $t_3$  газ виходить з трубку в об'єм низького тиску.

$$t = \frac{\alpha}{360f} \quad (1)$$

Кожен момент часу прив'язаний до кута повороту газового розподільника. Розглядалися кути повороту в діапазоні  $1$ - $5^\circ$ , при яких клапан впуску та випуску газу були відкриті. Відкритий вхідний клапан при куті від  $10^\circ$ - $11^\circ$ , відкритий вихідний клапана при куті від  $180^\circ$ - $181^\circ$ .

## Висновки

Розглянуті способи виникнення хвильових процесів в приймальних трубках хвильових генераторів холоду. Приведені гіпотези виникнення коливального процесу в приймальних трубках, а також виникнення теплових процесів. Швидка зміна процесів в приймальних трубках, дозволяє математич-

ному моделюванню ширше заглянути в процеси. Тому була складена математична модель газодинамічних процесів. Досліджено кроки по довжині та часу стабільної роботи моделі. Обрані наступні значення: крок по часу  $10^{-8}$ - $10^{-7}$  с, кількість точок по довжині по довжині 80-200. Порівняно результати з існуючими роботами. Математична модель дає похибку при малих поворотах клапана до 8 % або різницю температур у 20 К. Розглядаючи зміну температури на виході з приймальної трубки при різних частотах обертання газу розподільника найбільша зміна температурі відбувається при частотах в діапазоні частот 500-600 Гц (рис. 3).

### Література

Dapeng Hu, Yichao Li, Peiqi Liu, Yang Yu, Fengxia Liu. Numerical Study on the Effect of Nozzle Incident Angle on the Overall Performance of Gas Wave Refrigerator International Journal of Refrigeration, 2022, p. 61-70.

John T Solomon, Rhys Lockyer, Tailor Jones. High-Frequency Pulsed Coaxial Injectors for High-Speed Flow Mixing and Control AIAA Journal, vol. 61, issue 12, pp. 5332-5346. 2023.

Бондаренко В.Л. Створення та дослідження хвильових криогенераторів та їх застосування в технології отримання неона великої чистоти. Дис. д-ра техн. наук 05.04.03 М. 2003.

V.N. Kukharenko. Mathematical Model of a Wave Cooler. Cryocoolers 10, edited by R. G. Ross, Jr. Kluwer Academic/Plenum Publishers. p. 405-409. 1999.

Galiullin R.G., Ermakov R.A. A gas compressor based on a piston-type acoustic resonator. Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 44. Nos. 7. p 387-392. 2008.

Zhimin Hu. Gaseous wave refrigeration device with flow regulator. Patent 6089026. (USA). Date Jul.18. 2000.

Yan Beliavsky. Experimental arguments in favour of heat transfer in compressible fluids by Pressure Gradient Elastic Waves. International Journal of Heat and Mass Transfer 107. P.G.W 2014 Ltd., Israel. 2017. pp 723-728.

Xiuzhi Xi, Yuhang Xin, Dingli Duan, Bo Zhang Experimental investigation on the performance of a novel resonance-assisted ejector under low pressurization. Energy Conversion and Management. Volume 280. 2023

C. Bauer, P. Lungu and O.J. Haidn. Numerical Investigation of a Resonance Ignition System. Conference: 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS). Spain. 2019