



**Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Кафедра двигунів внутрішнього згоряння**

ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

Міжнародна науково-практична конференція

11-12 березня 2024 року (онлайн)

61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25 (Посвідчення УкрІНТЕІ від 05 грудня 2023 р. № 497)

Харківський Національний Економічний Університет імені Семена Кузнеця

*МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОДИНАМІЧНИХ
ПРОЦЕСІВ ХВИЛЬОВИХ ГЕНЕРАТОРІВ
ХОЛОДУ ДИНАМІЧНОГО ГАЗОРОЗПОДІЛУ*

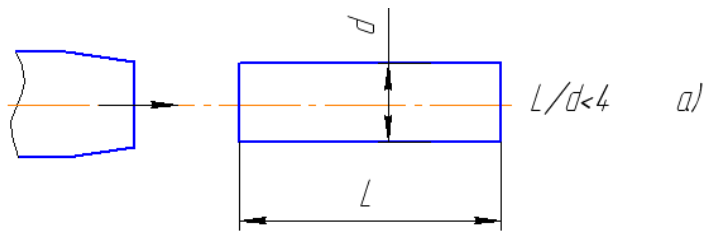
Доповідач Димерцов Дмитро Олександрович

Вступ

Обрано перспективний спосіб отримання “тепла” та 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.

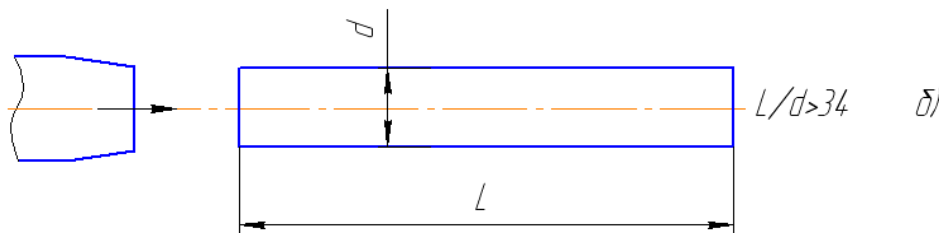
1. В роботі розглянуті гіпотези виникнення хвильових процесів в приймальних трубках генераторів різних типів
2. Складена математична модель газодинамічних процесів.
3. Показано вибір кроків роботи моделі, а також перевірку моделі на достовірність.
4. Модель запрограмована в мові програмування Lazarus Free Pascal у вигляді програми, за допомогою якої велись досліди.
5. Представлені результати в залежності від частоти обертання газового розподільника від зміни температури на вході, потужність пристрою, а також коефіцієнта корисної дії.

Схематичне зображення хвильового генератора



а - генератор Гартмана

б - генератор Гартмана-Шпренгера



Конструкції хвильових генераторів, так званих трубках Гартмана-Шпренгера складається з дох головних елементів, а саме сопло та приймальна трубка.

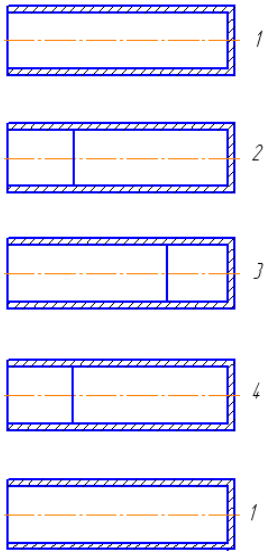
Як працює хвильовий генератор

Наповнення газом приймальної трубки з сопла, приводить до виникнення автоколивального процесу.

Взаємодія між собою, хвилі стиснення і розрядження посилюються і на деякій відстані від входу утворюють ударну хвилю кінцевої амплітуди.

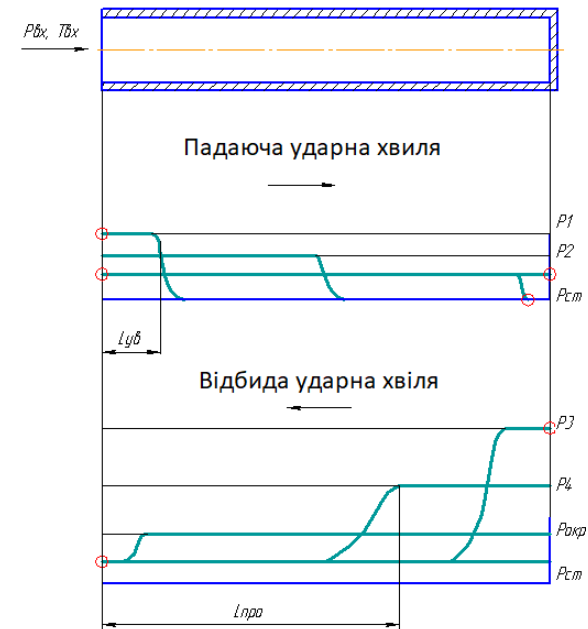
Проходження прямої і відбитої хвилі від заглушеного кінця порожнини (приймальної трубки) супроводжується зростанням ентропії, тобто незворотним виділенням тепла, що призводить до зростання температури газу. Кінцева температура газу в резонансній трубці залежатиме від умов тепловіддачі, а саме зовнішній потік через стінки, а також від інтенсивності масообміну біля відкритого кінця трубки. Таким чином, охолодження газу відбувається за рахунок здійснення потоком роботи стиснення, яка у вигляді тепла відводиться через теплообмінну поверхню трубки у навколишнє середовище.

Цикл наповнення-опорожнення



процес 1-2 адіабатичне стискання газу
процес 2-3 відвід тепла,
процес 3-4 адіабатне розширення газу
процес 4-1 підвід тепла.

Від циклу до циклу температура підвищується, і в результаті може виникнути значний перепад температури між стінкою труби і навколишнім середовищем



Цикл наповнення-опорожнення приймальної резонансної трубки. Процес наповнення трубки має ударно - хвильовий характер

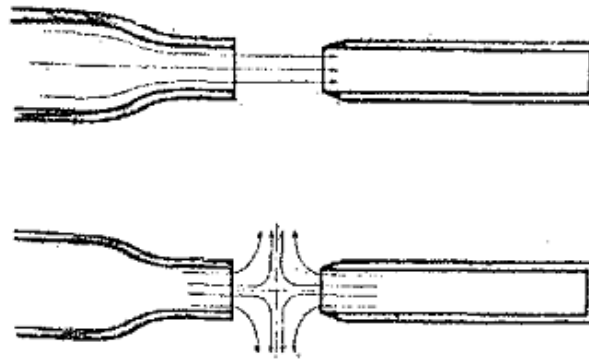
Основні параметри

Дані пристрої працюють із частотою коливань газу у кілька сотень циклів на секунду, то навіть мале збільшення температури може призвести до швидкого нагрівання утриманого газу. Для більш детального розуміння теплового ефекту в резонансній трубці наведемо деякі спостереження та гіпотези, наведені в роботі:

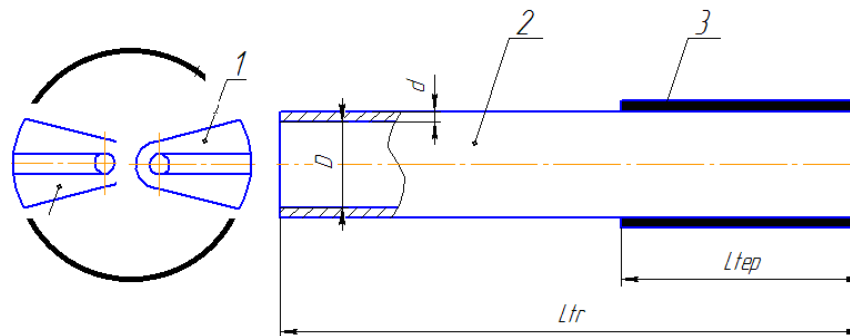
- найбільший тепловий ефект спостерігається при геометричних характеристиках системи сопло-трубка, які відповідають умовам максимальної амплітуди коливань тиску на закритому торці трубки;
- рівноважна температура газу трубці залежить від властивостей системи сопло-трубка, т.як. L/B , s/d і збільшується від відкритого кінця трубки до торця при незмінному перерізі трубки;
- найбільша температура газу на торці резонансної трубки характерні для легких газів (гелій і водень).

Джерело коливального процесу

Автоколивальний процес



Коливальний процес газовим розподільником



Математична модель

одновимірна система диференціальних рівнянь газової динаміки.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho w}{\partial x} = 0$$

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

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

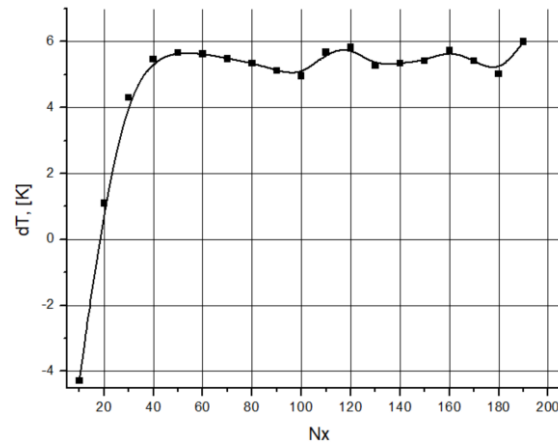
нестационарне рівняння теплопровідності

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

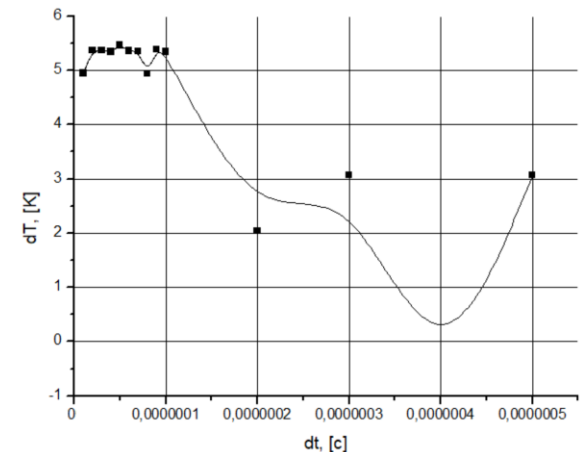
Для розрахунку параметрів газу трубі використовується метод кінцевих різниць. В цьому випадку обирається, так звана сітка, з часовим та просторовим кроком. На обраній сітці, будується явна центральна різницева схема, що забезпечує перший порядок апроксимації по t другий порядок по h .

Між вузлами розрахункової сітки в трубі, можливе виникнення стрибків, що призводить до помилки розрахунків і згодом до розвалу різницевої схеми. Для того, щоб уникнути цього, одним із варіантів є вирішення задачі довільного розриву між вузлами розрахункової сітки.

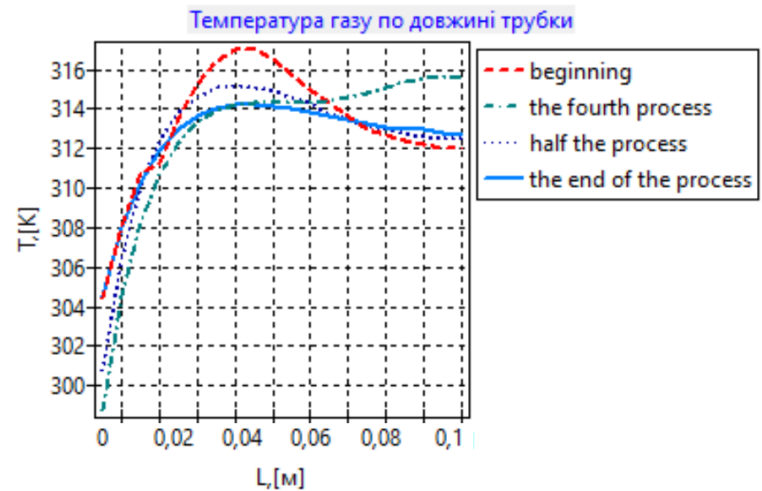
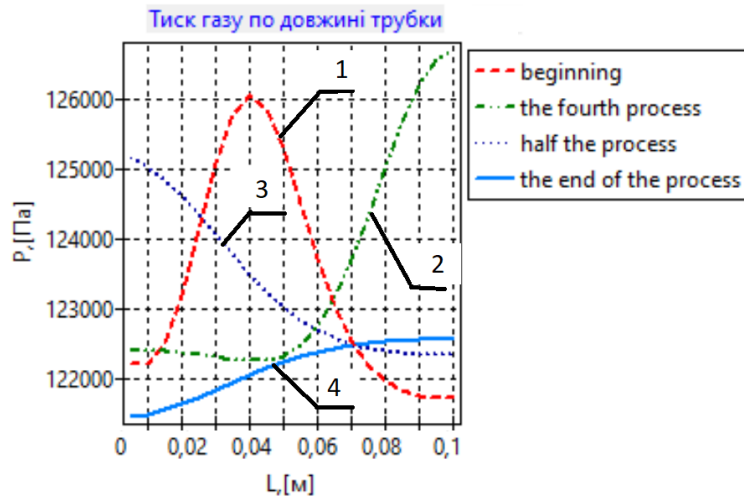
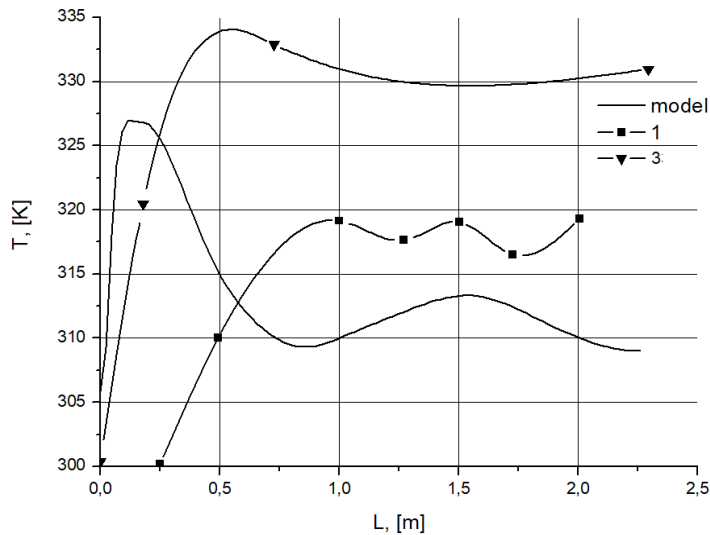
Проведено вибір кроків моделі по довжині приймальної трубки та кроків за часом. Стабільність моделі починаючи від 80

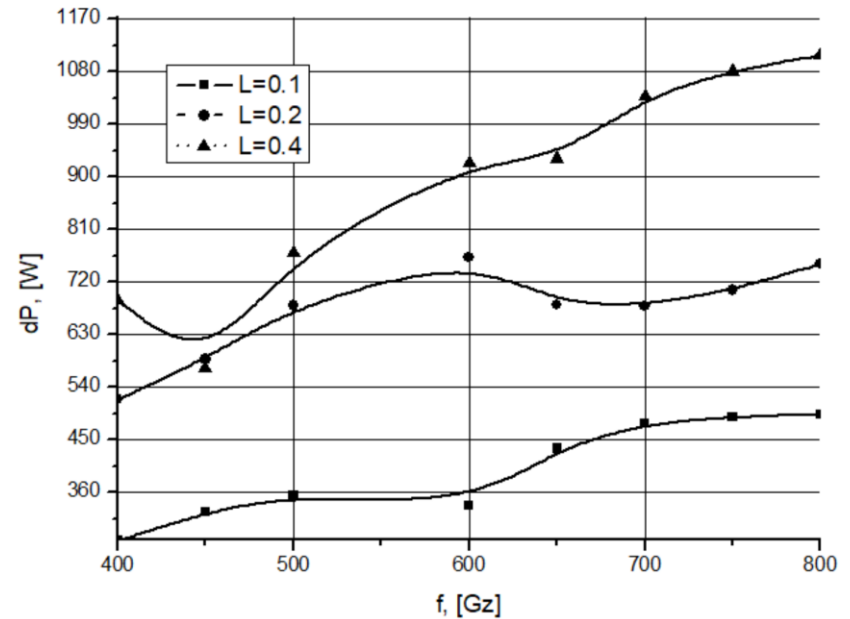
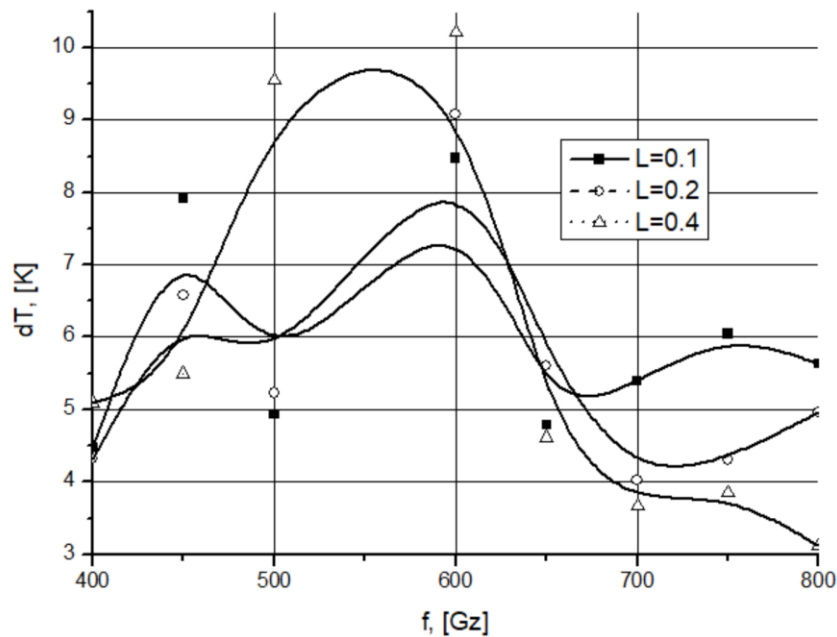


Модель стабільна при 10^{-8} - 10^{-7} с.



Результати розрахунку





ВИСНОВОК

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 математичному 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 $dt=10^{-8}-10^{-7}$ с, кількість точок по довжині по довжині $N \times 80 - 200$. 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.