

МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСІВ У РЕЗОНАНСНО-ХВИЛЬОВИХ АКУСТИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ГАРТМАНА–ШПРЕНГЕРА

Димерцов Дмитро Олександрович, старший викладач Харківський Національний Економічний Університет імені Семена Кузнеця,
e-mail: dmytro.dymertsov@hneu.net , ORCID: 0009-0000-4894-3495

Актуальність роботи пов'язана з питаннями підвищення енергоефективності та раціонального використання ресурсів. Збільшення споживання енергії є невід'ємним наслідком розвитку цивілізації, що супроводжується зростанням витрат на видобуток первинних паливно-енергетичних ресурсів та поглибленням екологічних проблем. Це протиріччя стимулює пошук комплексних рішень, які включають не лише використання альтернативних джерел енергії, але й ефективну мобілізацію та застосування існуючих вторинних джерел енергії. Одним з таких видів енергії є надлишкового тиск, який виникає у різноманітних технологічних процесах, пов'язаних із видобутком, транспортуванням та розподілом природного газу, його очищенням, а також при отриманні інертних газів шляхом фракційної дистиляції. Значне застосування надлишкового тиску спостерігається у виробництві геотермальної енергії, нафтопереробній промисловості (каталітичний крекінг, гідрокрекінг), у хімічній промисловості (виробництво азотних добрив, полімерів), гірничодобувній сфері (пневматичні інструменти та обладнання), а також у харчовій промисловості під час виробництва газованих напоїв.

Фізичною основою перетворення механічної роботи газу в теплову енергію є процеси адіабатного стиснення та розширення. Ці процеси найефективніше реалізуються у компресорах та детандерах. У той же час, у більшості технологічних процесів регулювання або підтримка необхідного рівня тиску здійснюється за допомогою дроселя, який є джерелом необоротних енергетичних втрат. Заміна дроселя детандером дозволяє не лише ефективніше використовувати енергію газу, але й додатково виробляти електричну енергію на газорозподільних станціях або охолоджувати газ перед транспортуванням. Окрім детандерів, існують також пристрої, що забезпечують одночасне отримання тепла та холоду, використовуючи зовнішній надлишковий тиск як джерело енергії. До таких пристроїв належать системи, що працюють на основі вихрового ефекту, термоакустичного ефекту та резонансно-хвильових акустичних генераторів.

Резонансно-хвильові акустичні генератори, відзначаються широким спектром практичного застосування — від систем мікроелектроніки до масштабних об'єктів газопереробної промисловості. Одним з таких генераторів є генератори Гартмана-Шпренгера. Принцип роботи такого генератора

ґрунтується на періодичній подачі газу під високим тиском, який задається геометричними параметрами трубки та сопла генератора (так званий авто коливальний процес). Потік спрямовується в енергообмінний канал, що проходить уздовж осі генератора, де відбувається інтенсивний теплообмін і зниження температури газу. Охолоджений газ виходить через окремі канали. Такий режим роботи дозволяє ефективно застосовувати генератори для локального кондиціонування повітря, охолодження технологічних середовищ або апаратури, що потребує тепловідведення. Особливо перспективним є використання цих генераторів у шахтній та газовидобувній промисловості, а також у системах ожигення та очищення кріогенних газів, де критично важливим є раціональне використання енергії залишкового тиску [1].

Газодинамічні коливання є типовим явищем у процесах функціонування газоструменевих акустичних генераторів. Проста конструкція та швидкоплинність протікаючих процесів створюють сприятливі умови для застосування математичного моделювання, що забезпечує можливість детального дослідження динаміки внутрішніх процесів і характеристики газового потоку.

Метою дослідження є тривимірне моделювання процесів, які протікають у газоструменевих акустичних генераторів.

З розвитком сучасних технологій застосування математичного моделювання для дослідження фізичних процесів набуває особливої актуальності. Висока швидкоплинність цих процесів ускладнює їх експериментальне вивчення, що стимулює використання чисельного моделювання та математичного програмування. Розвиток теорії нелінійних коливань у реальних системах супроводжується низкою складнощів, тому дослідження газодинамічних коливань є важливим і актуальним напрямом наукових досліджень.

Об'єктом дослідження є газодинамічні процеси, які протікають у газоструменевих акустичних генераторів.

Для глибшого розуміння особливостей течії газу, термодинамічних явищ та хвильових процесів у приймальній трубці генератора Гартмана–Шпренгера було застосовано тривимірне чисельне моделювання. Такий підхід дає змогу відтворити складні газодинамічні процеси у просторі й часі, провести детальний аналіз розподілу основних параметрів (тиску, температури, швидкості) та врахувати локальні флуктуації, що істотно впливають на формування акустичних і теплових ефектів.

Попри певні обмеження, пов'язані з використанням демо-версії програмного забезпечення, вдалося якісно відтворити основні фази роботи генератора: наповнення трубки, формування та відбиття ударних хвиль, а також процес спорожнення. На відміну від одновимірних моделей, тривимірний підхід забезпечив більш глибоку інтерпретацію явищ, зокрема дозволив зафіксувати турбулізацію потоку, обтікання внутрішніх поверхонь і локальні зони перегріву.

Для аналізу використано модельну трубку довжиною 1,5 м, внутрішнім діаметром 8 мм та товщиною стінки 1 мм, що відповідає типовим лабораторним

зразкам. Початкові умови: тиск повітря 0,11 МПа, температура 300 К. На вхід подавалося повітря з надлишковим тиском 0,25 МПа та температурою 300 К, тоді як відпрацьований газ відводився у зону зниженого тиску (0,1 МПа, 300 К). Таке задання граничних умов дозволило змодельовати реальні режими роботи системи.

Окрему увагу приділено впливу форми осьового стрижня на газодинамічні характеристики. Було розглянуто два варіанти:

- стрижень зі згладженим (обтічним) торцем,
- стрижень із різко окресленою (кутовою) формою торця.

Геометрія (див. Рисунок 1.) обох варіантів відтворювалася за даними дисертаційної роботи [2], що забезпечило можливість коректного порівняння результатів із літературними даними.

Для чисельних розрахунків застосовано спрощену квазідвовимірну постановку (сітка $100 \times 150 \times 1$), що дозволило зменшити обчислювальні витрати при збереженні ключових особливостей хвильового процесу. Часовий крок становив $10^{-8} - 10^{-7}$ с, чого було достатньо для відображення швидкоплинних явищ — утворення та розвитку ударних хвиль, хвиль розрідження, а також пульсацій у режимах періодичного наповнення й спорожнення трубки.

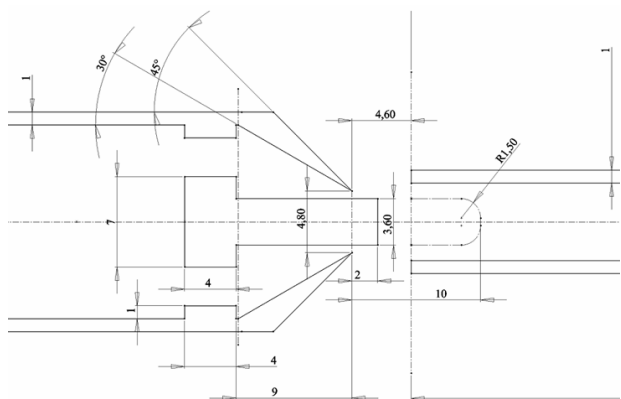


Рисунок 1 - Геометричні параметри сопла та стрижня

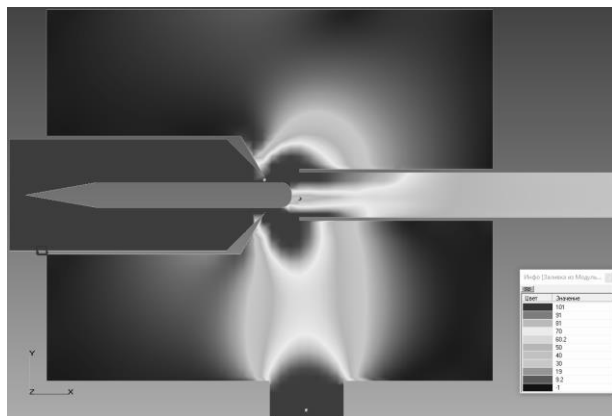


Рисунок 2 - Розповсюдження газу у приймальну трубку

Результати показали, що вже на $t = 0,02$ с формується «каверна» (див. рисунок 2.), геометрія якої визначається формою торця стрижня:

- обтічний торець створює більш плавну, розподілену «каверну»;
- гострокутний — локалізовану з різким перепадом тиску й температури.

У момент відбиття хвилі стискання від закритого торця трубки формується зворотна хвиля, яка, проходячи через каверну, ініціює розвиток зворотного осьового струменя — ключового елементу фазової динаміки

генератора. Подальша взаємодія відбитих хвиль із новим імпульсом вхідного газу спричиняє турбулентне перемішування зустрічних потоків і витік газу у камеру низького тиску.

Повторення цього циклу забезпечує пульсаційний режим роботи системи, що супроводжується ударно-хвильовими взаємодіями та нерівномірним розподілом тиску.

Висновки

У роботі було досліджено поведінку потоку газу при різних видах осьового стрижня, який розміщувався у центр основного потоку газу.

Використання такого стрижня не лише модифікує структуру вхідного струменя, а й визначає характер хвильових процесів та сприяє розвитку кумулятивних термогазодинамічних ефектів, які критично впливають на ефективність генератора.

Література

1. Димерцов Д.О., Потапов В.О. Перспективи застосування газоструменевих акустичних генераторів у якості вторинних джерел енергії. // Refrigeration Engineering and Technology, №61(2), 2025, <https://doi.org/10.15673/ret.v61i2.3178>.

2. Кошовий С.О. Підвищення ефективності технології очищення неонотелієвої суміші на основі газодинамічних криогенераторів. Дисертаційна робота, Одеса, 2011.

UDC 004.05

DIGITAL PHOTOGRAMMETRY IN MACHINE BUILDING

Ivanov Evgen Martynovich, Ph.D. in Engineering,
Associate Professor, Department of Computer Graphics,
Kharkiv National Automobile and Highway University “KhADI”,
e-mail: repositiv@gmail.com, ORCID: [0000-0001-9011-7269](https://orcid.org/0000-0001-9011-7269)

Visual perception of analytical information is important for humans, and the volume and speed of perception of visual images are significant. It takes only a few seconds to perceive the characteristics of spatial objects while looking at a visual image. However, it takes hours to decipher and compare thousands of numbers that can represent the same objects. Therefore, the importance of visual representation of calculation results cannot be overestimated.

Laser scanning has recently been used for the visual representation of spatial objects. Laser scanners are used for spatial scanning of objects. A laser scanner uses laser beams to obtain a three-dimensional, positioned, single point cloud. The advantage of a laser scanner is that it creates a highly accurate image that is used in