

УДК 534.142

Е.П. Ясиніцький, к.т.н., доц.

С.В. Левонюк, інж.

С.О. Пустовий, к.т.н., с.н.с.

## МЕТОДИ БОРОТЬБИ З ЯВИЩЕМ ВІБРАЦІЙНОГО ГОРІННЯ В НИЗЬКОЕМІСІЙНИХ КАМЕРАХ ЗГОРЯННЯ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

*Виконано порівняльний аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду боротьби з явищем вібраційного горіння в низькоемісійних камерах згоряння газотурбінних установок, який дав змогу умовно виділити дві основні групи методів боротьби: пасивні й активні. Показано основні переваги й недоліки кожної з виділених груп методів, перспективність та високу ефективність активних систем придушення вібраційного горіння.*

*The comparative analysis of domestic and foreign experience of vibration burning suppression in low emission combustion chambers of the gas-turbine units is executed, which enabled de bene esse to select two basic groups of methods of vibration burning suppression: passive and active. Basic advantages and failings are shown to each of the selected groups of methods, perspective and high efficiency of the active vibration burning suppression.*

### Вступ

Унаслідок посилення вимог щодо екологічних та економічних показників нові газоперекачувальні агрегати (ГПА), які встановлюються замість тих, що відпрацювали ресурс у газотранспортній галузі, повинні мати істотно вищу економічність за нижчих питомих викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах газотурбінних приводів.

Однак тенденції у розвитку таких приводів супроводжуються значним зростанням теплових і динамічних навантажень на елементи їх конструкцій, виникненням нових проблем під час їх експлуатації.

Однією з таких проблем є виникнення режимів вібраційного горіння.

Проблема боротьби з вібраційним горінням загострилась у зв'язку зі створенням низькоемісійних камер згоряння (КЗ) для газотурбінних установок (ГТУ).

Обмеження температури в зоні горіння для зниження вмісту оксидів азоту у відпрацьованих газах потребує спеціальної організації процесу горіння збідненої паливно-повітряної суміші регулюванням її складу залежно від режимів і умов роботи ГПА. Незважаючи на те, що нестійкому процесу вібраційного горіння присвячені достатньо глибокі фундаментальні дослідження [1; 2], ця проблема далека від її повного розв'язання через багатовекторність завдань. Її складність визначається не тільки різноманітністю процесів, що відбуваються одночасно під час горіння: фізико-хімічних перетворень, гідродинамічних нестационарних вихрових течій, акустичних хвильових явищ тощо, а й різними механізмами виникнення автоколивань тиску в КЗ ГТУ.

### Аналіз досліджень і публікацій

Пошук оптимальних геометричних параметрів – одне з нагальних завдань сучасного машинобудування.

Розрахункам та доведенню елементів газотурбінних двигунів присвячено велику кількість робіт [3], в яких в основному розроблені методи доведення конкретних моделей КЗ на підставі натурних, модельних випробувань або математичного моделювання. Значну увагу в цих дослідженнях приділено роботі форсунок, тому що вони є елементами двигуна як складної динамічної системи і функціонують в умовах змінних параметрів у системі живлення, газоводі, КЗ.

Виходячи з того що явища вібраційного горіння – це за природою акустичні коливання, для мінімізації ймовірності їх виникнення потрібно враховувати акустичні властивості КЗ.

Розробка нових моделей запальних пристроїв, зміна довжини та діаметрів жарових труб, застосування розгалуженої системи подачі палива та повітря та багато інших методів доведення КЗ дають змогу забезпечити нормальну роботу двигуна на розрахункових режимах. Але як свідчить досвід практичної експлуатації ГТУ, зазначеним методам бракує досконалості в разі змінення основних режимів роботи агрегатів, зносу елементів ГТУ.

Дотепер було розроблено велику кількість різноманітних моделей процесів горіння взагалі і процесів вібраційного горіння зокрема [1–4], що протікають у КЗ ГТУ. Так, у збірнику [3] запропоновано математичну модель віброгоріння в КЗ, що ґрунтується на визначенні процесу вібраційного горіння як автоколивального процесу зі зворотним зв'язком між відхиленням збурювання площі фронту полум'я й збурюванням швидкості потоку.

В основу прямого зв'язку покладено принцип Релея, відповідно до якого зусилля, що виникає під час коливань середовища КЗ тим більше, чим менший зсув фаз між теплопідведенням і тиском у камері згоряння.

У роботі [4] запропоновано систему активного керування подачею палива в КЗ з метою придушення виникнення вібраційного горіння в ГТУ АЛ-31СТ. Для ідентифікації виходу КЗ на вібраційні режими роботи використовується сигнал від датчиків пульсацій тиску, які встановлені в КЗ.

Актуальна проблема вібраційного горіння вимагає глибокого вивчення, та пошуку оптимальних конструктивних рішень для забезпечення стійкості спалювання палива в низькоемісійних КЗ ГТУ.

**Постановка завдання** – доведення необхідності розробки й удосконалення методики виявлення та придушення автоколивань тиску в низькоемісійних КЗ ГТУ для попередження виходу двигуна на режими вібраційного горіння.

#### **Аналіз методів пасивної й активної боротьби з вібраційним горінням**

Відомі методи боротьби з вібраційним горінням можна умовно поділити на дві основні групи:

- методи пасивної боротьби;
- методи активного придушення вібраційного горіння.

Ураховуючи актуальність проблеми боротьби з нестійкими режимами горіння, багато розробників сучасних ГТУ намагаються її вирішити, застосовуючи методи пасивної боротьби [3; 5]. До цієї групи методів доцільно віднести математичне моделювання процесу віброгоріння, розрахункове дослідження й відповідне доведення КЗ на основі розрахункового дослідження.

Аналіз цієї групи досліджень показав, що для успішного застосування методів пасивного гасіння коливань тиску, що виникають під час вібраційного горіння, потрібна оптимізація конструкції КЗ з урахуванням обмежень, що накладаються заданим рівнем емісії шкідливих речовин і втратами тиску в КЗ цього типу. Рішення такого завдання передбачає створення математичної моделі КЗ, що враховує її акустичні характеристики.

У результаті проведення цих досліджень встановлено, що в КЗ, підданих вібраційному горінню,

спостерігаються термоакустичні коливання паливо-повітряної суміші. При цьому виявлені такі закономірності:

– частота коливань тиску обернено пропорційна довжині КЗ й дорівнює власній частоті коливань тиску в камері;

– зі збільшенням середньомасової швидкості потоку в ГТУ відбувається перехід частоти коливань з однієї власної частоти коливань тиску в КЗ на іншу власну частоту, тобто в процесі коливань може виникати великий спектр власних частот;

– амплітуда пульсацій тиску має періодичну залежність від часу змішання.

Отже, під час створення динамічної моделі КЗ слід враховувати стискальність і нестационарність плин у жаровій трубі, змішувачі та в паливній магістралі.

Найбільш простим методом зниження амплітуди коливань у КЗ повітрянагрівачів є встановлення лопатей, що закручують потік у пальниковому пристрої. При цьому в КЗ створюється вихровий рух з опором

$$h = k (Q_t)^2,$$

де

$k$  – коефіцієнт гідравлічного опору, створеного пристроєм КЗ;

$Q_t$  – об'ємна витрата газу.

Опір накладається на напірну характеристику та змінює її.

Одним із методів зменшення амплітуди коливань тиску під час віброгоріння й повної стабілізації режиму (забезпечуючи його стаціонарність) є підвищення хвильового опору  $Z$  КЗ:

$$Z = \sqrt{\frac{L_a}{C_a}} = \frac{\rho_t c_t}{S},$$

де

$L_a$  – акустична маса;

$C_a$  – акустична гнучкість;

$\rho_t$  – щільність;

$c_t$  – швидкість звуку;

$S$  – площа поперечного перерізу КЗ.

Збільшення хвильового опору досягається зменшенням діаметра КЗ, а для зниження гідравлічної напруженості варто збільшити кількість КЗ.

Мінімальним хвильовим і гідравлічним опором характеризується так звана стільникова КЗ з оптимальним діаметром, сформована з набору невеликих КЗ, кожна з яких має свій пальник з подачею повітря від загального вентилятора.

У КЗ прямиотечійних двигунів для виключення попережних коливань тиску використовують антиімпульсні перегородки у вигляді променів, хрестів, циліндричних поверхонь. Хвильовий опір таких камер збільшується, й саме завдяки цьому здійснюється стабілізація з придушенням вібраційного горіння.

Одним зі способів руйнування граничних циклів і тим самим придушення автоколивань є введення в КЗ “шумів”, створюваних свистками. Механізм негативного теплового опору, що є основним під час виникнення вібраційного горіння, можна послабити, підвищуючи показник політропи процесу горіння в КЗ.

Таким чином, методи пасивної боротьби з віброгорінням полягають у керуванні амплітудою віброгоріння за рахунок зміни вихрового опору КЗ і її хвильового опору. Амплітуда коливань зменшується зі збільшенням гідравлічного опору камери горіння і її хвильового опору.

До переваг пасивних методів можна віднести:

- відносно невисоку вартість конструктивних змін у КЗ під час їх доведення;
- простоту виготовлення;
- застосовність методів до всіх типів КЗ.

До недоліків пасивних методів слід віднести:

- необхідність створення складної математичної моделі КЗ;
- застосування тільки на етапі доведення КЗ;
- незабезпечення абсолютного виключення віброгоріння на всіх режимах роботи в реальній експлуатації.

Незважаючи на ретельне доведення, під час експлуатації КЗ ГТУ часто виходять на режими нестійкого горіння. Це спричиняє необхідність створення систем активного керування горінням палива в КЗ. Подібним розробкам приділяють велику увагу як вітчизняні, так і закордонні дослідники [2; 4; 6].

Провідні закордонні фірми, такі, як Rolls-Royce, ABB, Siemens вирішують проблему нестійких режимів горіння за рахунок створення систем керування, що підтримують постійне співвідношення між витратами повітря й палива, які надходять у КЗ, або використовують системи придушення коливань тиску, що включають у себе виконавчі механізми, котрі містять рухливі частини в паливному й повітряному трактах КЗ. Застосування першого методу зменшує ККД ГТУ, а використання систем придушення коливань значно збільшує вартість КЗ. Крім того, застосування рухливих частин, що працюють із високою частотою, знижує надійність камери згорання.

У дослідницькому центрі NASA розроблено систему автоматичного керування процесами горіння в КЗ [6], яка здатна вирішити такі основні завдання:

- придушення віброгоріння – активне гасіння термоакустичних коливань;
- керування мінімізацією емісії;
- керування температурним полем.

Рішення цих завдань досягнуто за рахунок математичного моделювання й наступного створення відповідного прототипу системи автоматичного керування (САК).

Система автоматичного керування отримує сигнали від датчиків пульсацій тиску, датчиків емісії й температури, і певним чином реагує, змінюючи подачу палива. Стала витрата забезпечується основним паливним клапаном, а модуляція витрати палива – додатковим обертовим клапаном (див. рисунок).

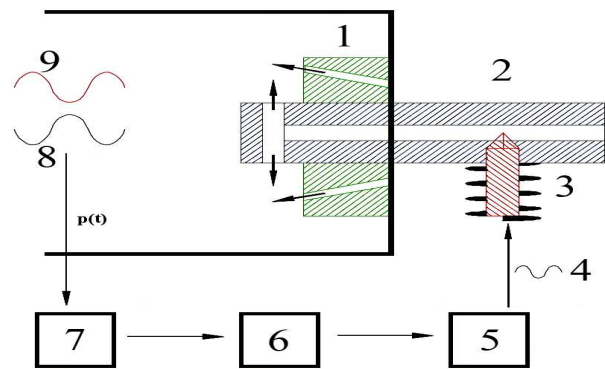


Схема активно керованої КЗ:

- 1 – первинний паливний канал;
- 2 – вторинний паливний канал;
- 3 – дозатор подачі палива;
- 4 – керуючий сигнал;
- 5 – часовий перетворювач сигналу;
- 6 – контролер, що реалізує роботу без зворотного зв'язку;
- 7 – модуль спостереження  $P(t)$  у реальному часі;
- 8 – тиск;
- 9 – тепловиділення

Інший метод оснований на гасінні коливань тиску в КЗ за рахунок створення примусових пульсацій палива з дуже точним завданням їхньої частоти. Під час накладення коливання демпфуються таким чином, що відновлюється нормальний режим горіння.

Система являє собою тандем датчиків тепловиділення й тиску, модуля спостереження за процесом у КЗ у масштабі реального часу й спеціально розробленого інжектора.

Контролер, який реалізує роботу без зворотного зв'язку, формує сигнал керування, який перетворюється в часовому перетворювачі в керуючий сигнал, який подається на привод дозатора вторинного паливного каналу.

Система ґрунтується на математичній моделі, в основу якої покладений критерій Релея.

Лабораторією аерокосмічних систем університету Аоуата Гакуін запропоновано систему активного гасіння віброгоріння для КЗ з попереднім змішуванням палива [7].

У розробленій системі здійснюється активне керування витратою не палива, а реактивного повітряного потоку через інжектори, розташовані вздовж кільця навколо пристрою упорскування паливно-повітряної суміші. Форсунки нахилені під кутом 60° до осі КЗ.

За рахунок керування потоком повітря забезпечується стабільність роботи КЗ.

Інформаційною основою цієї системи є сигнал п'єзорезисторного датчика абсолютного тиску.

Потоком повітря керує САК за допомогою клапана з сервоприводом.

Цей метод дав змогу не тільки забезпечити стійке горіння палива в КЗ, але й знизити емісію NO<sub>x</sub>, а також збільшити ефективність згорання палива.

Отже, до переваг методів активної боротьби з віброгорінням можна віднести:

- забезпечення ефективного захисту КЗ від віброгоріння на всіх режимах її роботи;
- можливість установа цієї системи практично на будь-які ГТУ, що експлуатуються.

Недоліки такі:

- необхідність використання датчиків пульсації тиску, що мають низьку надійність й малий ресурс;
- зниження ККД ГТУ;
- складність конструкції, зниження надійності КЗ;
- висока вартість.

### Висновки

Аналіз стану питання виявлення й боротьби з вібраційним горінням показав, що незважаючи на багаторічні зусилля розробників з доведення й стабілізації процесів горіння в КЗ за рахунок застосування різних пасивних методів, на ГТУ деяких типів режими вібраційного горіння проявляються в експлуатації й, зазвичай, приводять до виходу з ладу й аварійних зупинок ГТУ, що пов'язано зі значними матеріальними втратами.

Проведене дослідження виявило, що досить перспективними й ефективними є розроблені методи активного керування витратою палива або повітря в КЗ. Останнім часом вже розроблені й апробовані САК, що реалізують алгоритми гасіння вібраційного горіння, проте їх практичне застосування ускладнене у зв'язку з потребою використання низьконадійних і малоресурсних датчиків пульсації тиску.

Таким чином, актуальним напрямом наукових досліджень є розроблення методики виявлення вібраційного режиму роботи низькоемісійних КЗ ГТУ без використання низьконадійних і малоресурсних датчиків пульсації тиску з метою її реалізації в перспективних системах активного придушення вібраційного горіння або попередження виходу КЗ на режими вібраційного горіння.

### Література

1. Раушенбах Б.В. Вибрационное горение. – М.: Физматгиз, 1961. – 500 с.
2. Zinn B. T., Neumeier Y., Lubarsky E., Johnson C.E. Active adaptive control of combustion instabilities using fuel injection rate modulation. Schools of Aerospace and Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332-0150. Presented at Workshop on "Goals and Technologies of Future Turbine Engines". Georgia Tech. – December 4–5 . 2000. – P. 288–295.
3. Вибрационное горение: сб. ст. / науч. ред. В.Н. Подымов. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1977. – 59 с.
4. Проблемы пульсационного горения в низкоэмиссионных камерах сгорания / Е.Ю. Марчуков, В.В. Куприк, С.А. Федоров и др. // Газотурбинные технологии. – Рыбинск. – 2005. – № 3. – С. 26–28.
5. Еришов В.Н. Неустойчивые режимы турбомашин. – М.: Машиностроение, 1966. – 180 с.
6. Active Combustion Control Technology. Provided by NASA Glen Research Center at Lewis Field. Presented by John DeLaat. Other NASA team members: Clarence Chang, Dan Paxson, Joe Saus, Dzu Le, Emeriti Kevin Breiseacher, Jim May.
7. A. Koichi Hayashi, Hiroyuki Sato, Tomohiro Ide. Takanobu Sawada Combustion Control of Premixed Swirl Flame Using Additional, Injection 10th International Workshop on Premixed Turbulent Flames, Hotel Mainzer Hof. – Mainz, Germany, 2006. – P. 12–13.

Стаття надійшла до редакції 25.11.08.