

УДК 533.6.08: 532.574

В.В. Бабенко, В.А. Кочін, В.М. Турик, М.В. Кочіна

МЕТОД КЕРУВАННЯ ВИХОРОУТВОРЕННЯМ
НА ВХОДІ ДО КАМЕР ЗМІШУВАННЯ

Предложены результаты экспериментальных исследований метода управления процессами переноса в рабочих средах камеры смешивания вихревого типа. Изучена реакция на управляющие действия наиболее энергонасыщенной когерентной вихревой структуры путем сравнения статистических характеристик пульсирующего течения, амплитудно-частотных спектров среднеквадратичного отклонения актуальной скорости, а также пространственно-частотного разделения энергии пульсационного движения. Определена возможность эффективного руководства структурного течения, в частности достижением «обратного распада вихрей».

Ключевые слова: вихревая камера, флаттер, когерентная вихревая структура, статистические характеристики, вихрегенератор, «обратный распад вихрей».

Запропоновано результати експериментального дослідження методу керування процесами переносу в робочих середовищах камери змішування вихревого типу. Вивчена реакція на керувальні дії найбільш енергонасиченої когерентної вихревої структури шляхом порівняння статистичних характеристик пульсуючої течії, амплітудно-частотних спектрів середньоквадратичного відхилення актуальної швидкості, а також просторово-частотного розподілу енергії пульсаційного руху. Виявлена можливість ефективного керування структурою течії, зокрема досягненням «зворотного розпаду вихорів».

Ключові слова: вихрова камера, флаттер, когерентна вихрова структура, статистичні характеристики, вихрогенератор, «зворотний розпад вихорів».

The experimental results of method on control of transfer processes in continuous mediums of the vortex mixing chambers are proposed. It is studied the response on control actions of the most energy-consuming coherent vortex structures by comparing of statistical characteristics of pulsating flow, amplitude-frequency spectra of standard deviation of actual speed, and spatial-frequency distribution of pulsating flow energy. The possibility of effective control of the flow structure, including the achievement of «reverse vortex decay», is revealed.

Keywords: vortex chamber, flutter, coherent vortex structures, statistical characteristics, vortex generator, «reverse vortex decay».

© Бабенко В.В., Кочін В.А., Турик В.М., Кочіна М.В., 2015

Вступ. Визначальна роль в процесах переносу маси, імпульсу й теплоти в потоках робочих середовищ камер змішування різного призначення, характерних для циліндрів дизелів, топкових пристроїв, систем кондиціонування, камер ракетних двигунів, плазмотронів, ядерних енергоустановок тощо, належить низькочастотним складовим турбулентного руху, які зумовлюють основний внесок в турбулентну дифузію [1]. До-слідження структури течії у вихрових камерах (ВК) [2] вперше виявили, що низькочастотні складові пульсацій у ВК генерують, головним чином, спіралеподібні енергоємні когерентні вихрові структури (ЕКВС) великих масштабів, які розповсюджуються вздовж активної і тупикової зон камери у різних напрямках відносно впускних соплових пристроїв (рисунок 1).

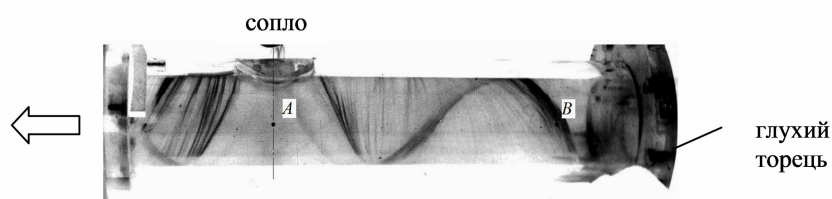


Рис. 1. Вихрова камера та досліджувана область ЕКВС:
А – точка вимірювань; В – приклад ЕКВС

Доведено також, що на стадії формування цих ЕКВС шляхом підживлення їх енергією беруть участь більш дрібні вихрові системи типу Гьортлера-Людвіга, які утворюють поблизу внутрішньої поверхні циліндричної частини камери безпосередньо за впускними соплами область у вигляді несиметричного криволінійного конуса з кутом конусності приблизно 55° . Цілком очевидно, що пошуки шляхів подальшого підвищення економічності й надійності машин і апаратів вихрового типу мають включати розробку новітніх методів ефективного керування зазначеними вище вихровими структурами, оскільки саме вони визначають в цілому топологію й кінематику течії у камерах змішування, а отже, їх теплові й гідродинамічні характеристики.

Постановка завдання. Основна мета роботи – це експериментальна перевірка методу малозатратного керування (згідно з принципом взаємної сприйнятливості вихрових структур) процесами змішування робочого середовища у ВК шляхом дії на вхідний потік вихровими утвореннями, що генеруються вихрогенераторами (ВГ) у вигляді спеціально підібраних флатеруючих крилових елементів різної жорсткості у тангенціальному впускному соплі. Під дією повітряного потоку кожне крило набуває режим автоколивань, що безумовно має впливати на структуру течії та процеси переносу у потоці. Спочатку необхідно здійснити попередню кількісну оцінку ефективності запропонованого «флатерного» засобу керування цією структурою в

камері. Потім при застосуванні ВГ у вхідному соплі та за їх відсутністю пропонується здійснити аналіз розподілу питомої енергії пульсацій швидкості по різних частотним смугам досліджуваного робочого діапазону 0-320 Гц в центральній точці А пристінної частини зони формування ЕКВС та гьортлер-людвігівської області течії [2] в центральній сопловій площині нормального перерізу ВК на радіальній відстані 0,002 м від її внутрішньої стінки, полярний кут θ розташування точки відносно вертикальної осі нормального перерізу складав 90° (рисунок 1).

Для цього передбачено розв'язати такі задачі:

1) визначити можливість застосування традиційно використовуюваного при подібних дослідженнях спектрального аналізу щодо обраної просторово-частотної області дослідження ЕКВС у камері;

2) здійснити статистичний аналіз кінематичних характеристик руху газу в досліджуваній області при наявності та відсутності керувальних дій.

Експериментальна установка та методика. Дослідження проведене на аеродинамічній установці, робоча ділянка якої виконана з оргскла у вигляді прозорої циліндричної ВК внутрішнім діаметром $d_0 = 0,102$ м і довжиною $l_0 = 0,635$ м (рисунок 1) [2; 3]. Відносна глибина розташування глухого торця від середини сопла $\bar{L} = L/d_0 = 4,4$. Вентилятор працює на всмоктування повітря через впускне сопло прямокутного прохідного перерізу $a \times b = 0,041 \times 0,025$ м² із заокругленими вершинами кутів (рисунок 2). Кути тангенціальності входу потоку до ВК та осьового розташування довшої сторони сопла відносно твірної циліндра склали відповідно $\gamma = 88^\circ$ та $\alpha = 0^\circ$.

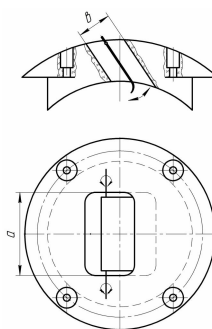
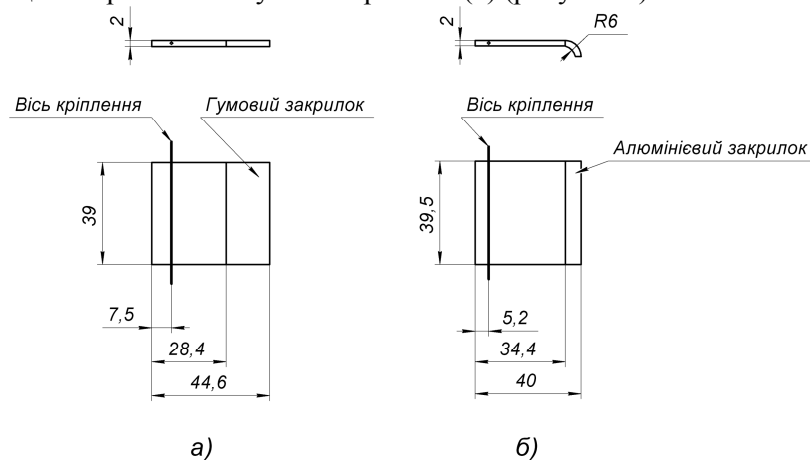


Рис. 2. Впускне сопло з крилоподібним елементом

Опис експериментальної установки та загальна частина методики проведення експерименту наведені в роботі [3]. В даному дослідженні у вхідному соплі камери по черзі були розташовані пластмасові крилоподібні елементи малого подовження – жорстке крильце з еластичним

закрилком, що виконаний із матеріалу низької жорсткості (j), та жорстке крильце з жорстким загнутим закрилком (k) (рисунок 3).



*Рис. 3. Ескіз конструкції крилець вихорогенераторів:
а) крильце з еластичним закрилком; б) крильце із жорстким закрилком*

Обидва вихорогенератори мали горизонтальні осі поворотно-коливального руху та знаходились в режимі флатера. Досліди проводились при фіксованій величині числа Рейнольдса $Re_c = 87560$, обчисленого по параметрам потоку в проточній частині сопла.

Параметри повітря на вході до сопла ВК становили: температура $t_0 = 20^\circ\text{C}$, атмосферний тиск $p_0 = 10^5 \text{ Па}$. Після попередньої візуалізації течії за допомогою монодисперсного порошку були проведені інструментальні вимірювання актуальних швидкостей в досліджуваній зоні течії з використанням термоанемометричної апаратури постійної температури «DISA-55M» з однопровідним дротяним датчиком, сполученим з аналого-цифровим перетворювачем L-264 фірми «L-Card», який установлений в якості плати розширення до IBM-сумісного комп'ютера. Обробку вимірювальної інформації здійснено за допомогою ліцензійної програми «PowerGraph Professional». Частота дискретизації сигналу при опитуванні датчика термоанемометра процесором комп'ютера обиралась на рівні 640 Гц для задоволення умовам теореми Котельникова, оскільки робочий діапазон частот, визначений попередньо за допомогою аналізатора спектра, не перевищував 320 Гц .

До аналізу було залучено трансверсальні складові швидкості у зв'язку з найбільшими за модулем значеннями, стабільними і найбільш точно визначеними за знаком розподілами їх усереднених за часом величин вздовж діаметра і осі циліндричної частини ВК порівняно з квазігармонічним характером профілів усереднених осьових складових швидкості.

Дослідження енергетичних особливостей течії на макрорівні у ВК в області вимірювань передбачало попередній аналіз розподілу відносної інтенсивності пульсацій в точці А, для чого було проведено процедуру вилучення «хибних викидів» (цензурування вибірки). Критерії вибору досліджуваної області аналізу – статистична стаціонарність та наближення кривих щільності розподілу ймовірності (PDF) актуальної швидкості в характерній точці течії до виду Гаусса. З метою коректного порівняння кривих PDF та спектральних характеристик при обробці експериментальних даних було здійснено режекцію гармоніки 50 ± 1 Гц, яка може відображати частоту наводки зовнішньої мережі на вимірювальний тракт термоанемометра.

Результати. Перевірка на «нормальність» розподілу ймовірності актуальної швидкості, що була проведена шляхом побудови гістограм та кривих щільності розподілу як їх обвідних при граничному переході «гістограма-полігон розподілу-неперервна функція» (рисунок 4), показала їх наближену відповідність закону Гаусса при відносно невеликих відхиленнях математичного очікування, що розраховано по середньому арифметичному, від моди реального закону розподілу. Це дозволяє здійснювати в досліджуваній області вимірювань порівняння різних засобів керування класичною побудовою амплітудно-частотних спектрів пульсацій швидкості, а також аналізом частотного розподілу енергії пульсаційного руху за умов як наявності ВГ різних видів, так і відсутності джерел зовнішніх вихрових збурень у впускному соплі.

Алгоритм обробки осцилограм термоанемометрування в досліджуваній зоні ЕКВС передбачав обчислення основних статистичних параметрів кожної реалізації для випадків відсутності ВГ і їх підключення, та зводився до наступного:

1. Визначення центральних моментів від другого до четвертого порядків

$$m_r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^r,$$

де μ_x – математичне сподівання стаціонарної випадкової функції x_i (середнє значення актуальної швидкості), яке з огляду на гіпотезу про ергодичність процесу дорівнює

$$\mu_x = \frac{1}{T} \int_0^T x_i(t) dt,$$

де T – часовий період реалізації процесу (в наших дослідах $T = 10$ с);

γ – порядок центрального моменту (при $\gamma = 2$ маємо другий центральний момент – дисперсію $m_2 = D$);

n – кількість елементів у вибірці (одичних вимірювань в реалізації за період T), $n = 6400$.

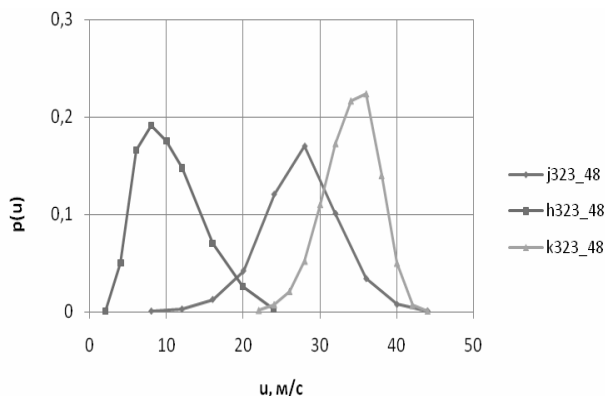


Рис. 4. Щільність розподілу ймовірності миттєвої швидкості для випадків:

h – сопло без вихорогенератора; j – флатеруюче крильце з еластичним закрилком; k – флатеруюче крильце із жорстким закрилком; цифрові позначення відповідають координатам досліджуваної точки

2. Визначення безрозмірних характеристик як комбінацій другого, третього та четвертого центральних моментів: асиметрію $Sk = m_3/m_2^{1.5}$; ексцес $\varepsilon = m_4/\sigma^4 - 3$, де $\sigma = \sqrt{D}$ – середнє квадратичне відхилення (с. к. в.); контрексцес $\varkappa = 1/\sqrt{\varepsilon}$.

3. Наближена оцінка середніх квадратичних похибок с. к. в. та контрексцесу за формулами $\delta(\sigma) \approx \sqrt{\varepsilon - 1}/(2\sqrt{n})$; $\delta(\varkappa) \approx \sqrt{2/(3n)} \approx$.

Основні розрахункові величини наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри в точці А течії

σ/U	0,40	0,13	0,49
Контрексцес, \varkappa	0,578	0,573	0,87
Параметр	h323_48 (без ВГ)	k323_48 (крильце із жорстким закрилком)	j323_48 (крильце з еластичним закрилком)
Середнє, U м/с	10,65	34,3	27,463
С.к.в., σ м/с	4,23	4,34	13,55

Як видно з таблиці 1, відносна інтенсивність пульсацій швидкості σ/U у випадку ВГ з еластичним закрилком на 22,5 % перевищує відповідне значення для режиму без ВГ та є майже в 3,8 рази більшим за інтенсивність пульсацій при застосуванні ВГ з жорстким закрилком. Це свідчить про доволі низьку ефективність останнього типу генерації вихрових збурень (варіант k вихорогенератора), принаймні щодо впливів керувальних вихорів на пристінну частину зони формування ЕКВС та Гьортлер-Людвігівську область біля циліндричної поверхні камери за впускним соплом. Очевидно жорсткий закрилок крильця, незважаючи на його коливальний рух, частково відхиляє вхідний напівобмежений струмінь від циліндричної стінки та спрямовує його у напрямку центрального квазітвердотільного приосьового вихора (ЦКТВ), який рухається з боку глухого торця до виходу з ВК [2], що певним чином має позначитись на структурі останнього. Цілком можливо, що пульсаційні характеристики ЦКТВ компенсуватимуть низьку інтенсивність пульсацій в пристінній зоні камери і це позитивно відобразиться на процесі змішування. Але перевірка такої гіпотези потребує постановки окремого дослідження.

Розглянемо типові частотні спектри в досліджуваній зоні ЕКВС та вихрової системи Гьортлера-Людвіга (рисунок 5). Для оцінки ефективності застосованих методів керування структурою течії необхідно виділити основні енергонасичені частотні смуги експериментальних даних актуальної швидкості. Спектральний аналіз сигналів термоанемометра у вигляді розподілу с. к. в. за частотами показав, що усю досліджувану частотну смугу можна поділити на дві області:

- 1) енергонасичена область частот в діапазоні 0-180 Гц, яка містить зони вузькосмугового шуму та гармонічних сигналів;
- 2) область «білого шуму» в діапазоні частот 180-320 Гц. До складу енергонасиченої області можна віднести три найбільш характерні частотні смуги в діапазонах 57-59 Гц (гармонічний сигнал), 105-120 Гц та 165-180 Гц.

Як видно з рисунка 5, загальний характер спектрів, що відповідають випадкам ВГ із жорстким закрилком та без ВГ, не відрізняється різкими змінами, за виключенням деяких локальних сплесків амплітуди при флатері крильця із жорстким закрилком та незначної різниці кутів нахилу відповідних апроксимуючих кривих. Проте вихрові структури, створені крильцем з еластичним закрилком, відрізняються появою найбільш потужних дискретних сигналів у трьох частотних діапазонах зазначеної вище енергонасиченої області та суттєвим перерозподілом енергонесучих частот у бік їх менших величин на спектрі пульсацій, що означає збільшення масштабів вихорів порівняно з іншими варіантами впливу на структуру течії.

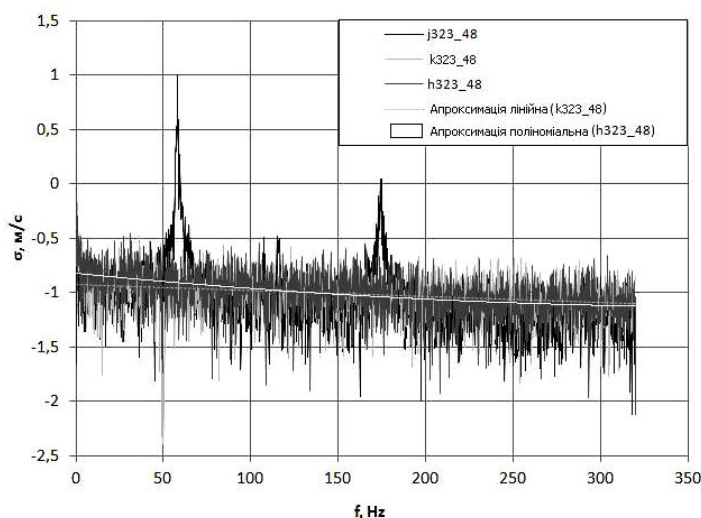


Рис. 5. Зведені частотні спектри с. к. в. актуальних трансверсальних складових швидкостей при наявності та відсутності флатерного керування в характерній точці течії для випадків:
h – сопло без вихорогенератора;
j – флатеруюче крильце з еластичним закритком;
k – флатеруюче крильце із жорстким закритком

Це – типовий режим із «загостренням», характерний для відкритої нелінійної системи, в якій підживлення енергією від вихорів, що генеруються крильцем, та її синфазне сприйняття вихровими утвореннями Гьортлера-Людвіга відбувається не за усім спектром мод, а селективно, лише для певних гармонік. Таким чином, замість розсіяння структурних неоднорідностей у вхідному потоці, що передбачає відома в теорії турбулентності схема «каскадного переносу енергії» униз за спектром, маємо значне підсилення крупних вихрових утворень, яке називають «зворотним розпадом вихорів». Це явище свідчить про наявність роботи механізмів нелінійного додатного зворотного зв'язку в досліджуваній зоні ЕКВС. Після визначення спектральних смуг сигналу, вилученні енергонасичених частотних смуг із загального сигналу за допомогою смугових фільтрів, алгоритм подальшої обробки експериментальних даних, отриманих для камери з ВГ та без ВГ (при тому ж значенні числа Рейнольдса) полягав в обчисленні дисперсії сигналу у кожній з енергонасичених частотних смуг для досліджуваної зони течії. Для виявлення ефективності впливу флатера крилець на тонку структуру течії в вихрових утвореннях камери було використано енергетичний підхід, згідно з яким дисперсію миттєвих швидкостей можна розглядати як подвійну кінетичну енергію пульсаційного руху, зведену до одиниці маси середовища. Результати розрахунків дисперсії занесено до таблиці 2.

Таблиця 2

Величина дисперсії в різних частотних смугах

Діапазони частот, Гц	Варіанти керувальної дії на вхідний потік камери		
	<i>h</i> 323_48 (без ВГ)	<i>k</i> 323_48 (крильце із жорстким закрилком)	<i>j</i> 323_48 (крильце з еластичним закрилком)
	Сумарні дисперсії актуальної швидкості, м ² /с ²		
0-320	17,87	18,83	183,5
0-180	13,09	13,54	180,64
180-320	4,78	5,27	2,84
57-59	0,08	0,08	160,85
165-180	0,70	0,71	6,6
105-120	0,84	0,76	1,21

Аналіз наведених даних парами (по відношенню до сопла без ВГ) показує таке:

1. **Порівняння варіантів *k* та *h*.** Реалізації *h* та *k* являють собою сигнали, наближені до «білого шуму». Однак застосування ВГ варіанту *k* збільшило сумарну енергію пульсацій на 0,96 м²/с², тобто на 5,4 % у частотній смузі 0-320 Гц. У смузі 57-59 Гц дисперсія є практично незмінною.
2. **Порівняння варіантів *j* та *h*.** Енергія пульсацій реалізації *j* у смузі 0-320 Гц більш, ніж на порядок вище порівняно з реалізацією *h*, а 87,6 % енергії реалізації *j* зосереджено в діапазоні частот 57-59 Гц. Реалізація *j* є суперпозицією «білого шуму» приблизно тієї ж енергії, як і у реалізацій *h* і *k*, гармонічного сигналу у смузі 57-59 Гц та двох енергонасичених частотних смуг 165-180 Гц і 105-120 Гц.

3. Очевидно, що горизонтально розташоване у впускному соплі крильце малого подовження із еластичним закрилком низької жорсткості є більш ефективним, ніж повністю жорстке крильце, оскільки генерує низькочастотні складові турбулентного руху та певною мірою визначає загальну структуру течії, а отже й процеси переносу маси, імпульсу й теплоти у вихровій камері змішування.

З цього випливає, що подальші дослідження мають бути спрямовані на виявлення залежності між жорсткістю керувального елемента розташованого у впускному соплі камери та ефективністю його впливу на найбільш енергонасичені когерентні вихрові структури.

Висновки

1. Дослідження, що має пошуковий характер, доводить реальну можливість застосування малозатратного методу керування вихровою структурою течії на мікро- та макрорівнях у камерах змішування на основі використання вільного флатера крилоподібних елементів у впускних соплах згідно з принципом взаємної сприйнятливості вихрових структур, що дозволяє ефективно управляти процесами переносу у робочих середовищах.

2. Показано, що при застосуванні запропонованих типів вихорогенераторів у впускних вузлах вихрових камер змішування енергія пульсацій при формуванні енергонесучих вихрових структур може перерозподілятися між енергонасиченими частотними смугами, в тому числі передаватися від вихорів меншого масштабу до більш крупних вихорів. Вдалося отримати так званий «зворотний розпад вихорів», певним чином споріднений із явищем «від'ємної турбулентної в'язкості», що при правильному виборі геометричних та пружних характеристик легких крилоподібних елементів ВГ може значно інтенсифікувати процеси змішування в робочих середовищах.

3. Простота конструкцій флатеруючих вихорогенераторів та незначні енергетичні втрати при їх функціонуванні дозволяють вважати запропонований метод керування перспективним.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Структура турбулентного потоку і механізм теплообміну в каналах* / М.Х. Ібрагімов, В.И. Субботин, В.П. Бобков і др. – М.: Атомиздат, 1978. – 296 с.
2. *Бабенко В.В. Макет вихрових структур в вихрової камері* / В.В. Бабенко, В.Н. Турик // *Прикладна гідромеханіка*. – 2008. – 10 (82). – № 3. – С. 3-19.
3. *Турик В.М. Аналіз можливості флатерного керування когерентними утвореннями в потоках вихрових камер* / В.М. Турик, В.О. Кочін, М.В. Кочіна // *Вісник Нац. техн. ун-ту України «Київ. політехн. ін-т»: серія «Машинобудування»*. – 2014. – № 71. – С.54-57.

Стаття надійшла до редакції 10.11.2015