УДК 533.011 : 621-752(031)
DOI: http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.81.116579

Мінімізація вібраційного фактору при експериментальних дослідженнях мікроструктури обмежених закручених потоків

В.О. Кочін[1] ● В.М. Турик[2] ● М.В. Кочіна[2]

1 – Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна;
2 – КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Received: 30 October 2017 / Accepted: 27 November 2017

Анотація. *Експериментальні дослідження тонкої структури складних закручених потоків та нестандартних засобів керування процесами переносу у вихровій камері виявили необхідність модернізації вузлів аеродинамічного стенда для зменшення похибки від їх механічної вібрації при інструментальних вимірюваннях через появу в сигналах додаткових складових від наведених миттєвих переносних швидкостей течії. Цей фактор ускладнює аналіз характеристик вихрових структур різних масштабів. Метою роботи є моніторинг вібраційно небезпечних зон установки та зменшення негативних наслідків вібрації щодо результатів термоанемометричних вимірювань. Для мінімізації шкідливого впливу вібрації елементів аеродинамічного стенда на результати досліджень в його конструкцію було внесено ряд змін. Оцінка якості цих змін передбачала вимірювання віброприскорень в двох зонах: 1 – безпосередньо біля двох основних джерел вимушених коливань (електродвигун та вентилятор); 2 – в зоні розташування координатного пристрою з державками термоанемометричних датчиків. Експериментально доведено, що модернізація аеродинамічного стенда знизила величини віброприскорення в напрямку поздовжньої осі камери приблизно в 4 рази та уздовж вертикальної осі приблизно в 2 рази. Отримані дані дозволяють зменшити похибки визначення статистичних характеристик течії та коригувати ідентифікацію виявлених вихрових структур у вихровій камері*

Ключові слова: вихрова камера, вихрові структури, характеристики течії, термоанемометричні вимірювання, вібродіагностика, віброприскорення

Вступ

На аеродинамічному стенді «Вихрова камера» кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки «КПІ ім. Ігоря Сікорського» та Інституту гідромеханіки НАН України виконуються спільні експериментальні дослідження структури обмежених зсувних течій. Вони спрямовані на відкриття нових видів когерентних вихрових утворень, детальне вивчення їх кінематичних і енергетичних характеристик, а також мають за мету напрацювання засобів тонкого керування процесами переносу маси й теплоти в машинах і апаратах вихрового типу [1]. По мірі ускладнення завдань при дослідженнях структури складних закручених потоків у порожнині вихрової камери (ВК) зростають і вимоги до чистоти постановки експериментів. Засоби придушення впливу вібрацій елементів аеродинамічного стенда на характеристики течії протягом попередніх етапів виконання циклу досліджень були адекватні постановкам та методикам реалізації тих чи інших серій дослідів: візуалізації потоків контрастними речовинами з метою вивчення загальної структури течії на макрорівні [2, 3]; вимірюванням розподілів проекцій усередненої за часом та актуальної швидкості в порожнині камери відповідно пневмометричними насадками [4] та термоанемометром [5, 6]. Задача ускладнюється при переході до методів дослідження засобів ефективного керування на мікрорівні когерентними вихровими структурами (КВС) обмежених потоків у полях відцентрових сил [7, 8].

Специфіка вимірювань пульсацій швидкостей і тиску повітряних потоків за допомогою термоанемометричної і лазерної апаратури накладає підвищені вимоги до конструкції аеродинамічного стенда [9]. Вібрації елементів стенда, особливо при наявності небезпечних резонансних коливань, що теоретично не можна повністю виключити, можуть зменшити точність вимірювань, спотворити уявлення про природу та динаміку пульсацій, які відображають топологію вихрових структур в окремих зонах течії, а отже — про фізичну картину досліджуваних процесів і, відповідно, до вибору параметрів керувальних дій.

✉ В.О. Кочін kochin@meta.ua ✉ В.М. Турик Turick46@gmail.com ✉ М.В. Кочіна mariakochina@gmail.com

© Mechanics and Advanced Technologies, 2017

Постановка задачі

Для мінімізації впливу вібрацій на результати інструментальних вимірювань та оцінки ефективності керування процесами переносу виникає необхідність виявлення вібраційно небезпечних зон експериментальної установки, аргументованого внесення ряду змін в її конструкцію та проведення моніторингу механічних коливань, які можуть впливати на точність аеродинамічних досліджень.

Отже, метою роботи є дослідження механічної вібрації основних (принципово важливих з огляду на направленість експериментів) елементів аеродинамічного стенда та зменшення її негативних наслідків на результати термоанемометричних вимірювань полів актуальної швидкості в порожнині ВК. Результати роботи необхідні для зменшення похибок визначення кінематичних та енергетичних характеристик КВС складних зсувних течій на багатофункціональному стенді «Вихрова камера».

Експериментальний стенд та методологія дослідження

Схематично основні вузли аеродинамічного стенда «Вихрова камера» наведено на рис. 1. Стенд складається з двох основних вузлів: мотор-вентиляторного агрегату «Краб» (*Д, В*) і циліндричної прозорої робочої ділянки — вихрової камери (*ВК*), в якій згідно з програмою досліджень проводяться візуалізація течії та аеродинамічні вимірювання. Основним джерелом вібрацій стенду є мотор-вентиляторний агрегат, який включає в себе трифазний асинхронний електродвигун (*Д)* марки 2ДМШ потужністю 0,55 кВт номінальною частотою обертання 2835 об/хв і відцентровий вентилятор (*В*). Обидва основні вузли стенду мають свої власні опори у вигляді тривимірних рамних зварних конструкцій на фундаментах, що спираються на підлогу лабораторії. Крім того, фундамент мотор-вентиляторного агрегату скріплений з капітальною стіною лабораторії. Значна масивність фундаментів дозволяє зобразити їх як одне ціле на механічній моделі установки. Моніторинг рівня коливань передбачав вимірювання у таких, потенційно найбільш вібронебезпечних, зонах (відповідно поз. 1 і 2 на рис.1): 1) безпосередньо біля двох джерел змушених коливань (електродвигун та вентилятор); 2) в зоні торця ВК, де на столі розташовано тривимірний координатний пристрій (*К*), що забезпечує затиснення державок консольного типу датчиків швидкості або тиску.

При підготовці до проведення досліджень на стенді «Віхрова камера» з метою зниження рівня вібрацій були зроблені наступні заходи: заміна підшипників, статичне й динамічне балансування вала електровентилятора; збільшення жорсткості моноблока електродвигун-вентилятор і напірної частини трубопровідної системи установки; заміна віброізолюючих та вібродемпфуючих кріплень, амортизаторів, прокладок (зокрема, типу «сендвіч»); модернізація динамічної розв'язки електровентилятора і циліндричної частини робочої ділянки шляхом заміни гнучкої манжети (*М)* між трубопровідними елементами всмоктувальної частини установки манжетою з більш еластичного матеріалу (див. рис 1).

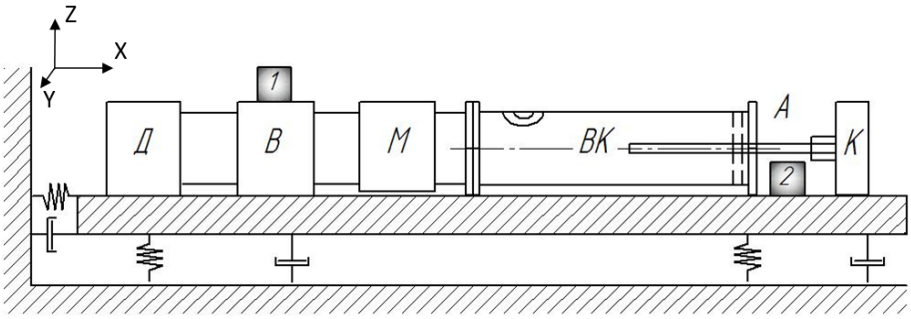


Рис. 1. Механічна модель аеродинамічного стенда «Вихрова камера»

У даному циклі робіт для вивчення аеродинаміки течій в порожнині камери з боку її глухого торця через спеціальний отвір у ньому від координатного пристрою (*К*) уводиться датчик термоанемометра на жорсткій металевій державці діаметром $7\cdot10^{-3}$м з максимальним плечем виходу до $0{,}65$м. Чутливим елементом датчика є платиновий дріт діаметром $5\cdot10^{-6}$м завдовжки $1{,}1\cdot10^{-3}$м, наварений на голкоподібні кінцеві опори. Датчик термоанемометра може бути орієнтований на вимірювання колових або осьових швидкостей течії газу (рис. 2). Поверхні стенда, включаючи стіл і встановлений на ньому координатний пристрій, у тій чи іншій мірі знаходяться під дією вібрацій, викликаних мотор-вентиляторним агрегатом, що може обумовлювати відповідний вплив на державку з термоанемометричним датчиком. Вібрації державки датчика призводять до появи в сигналі певних ознак додаткових миттєвих переносних швидкостей, які не відповідають реальній структурі потоків в камері.

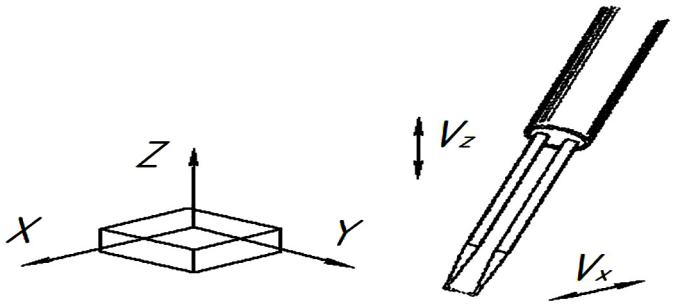


Рис. 2. Відповідність орієнтацій датчиків вібрацій (акселерометра) та термоанемометра

Ці додаткові швидкості складаються з шуканими миттєвими відносними швидкостями повітряного потоку та реєструються термоанемометричною апаратурою, що зменшує точність вимірювань. Вісь датчика термоанемометра завжди спрямована перпендикулярно вектору відповідних компонент вимірюваних швидкостей. На рис. 2 також показана орієнтація осей чутливості датчика вібрацій (акселерометра). З рис.2 випливає, що при вимірюванні осьових швидкостей необхідно враховувати віброколивання датчика уздовж осі *X*, а при вимірюванні колових швидкостей необхідно враховувати віброколивання датчика уздовж осі *Z*.

Для аналізу кінематики складного коливального руху повітря в ВК і датчика відносно повітря були обрані дві системи координат: рухома система координат, пов'язана з датчиком термоанемометра і нерухома система координат, пов'язана зі спостерігачем. Згідно з принципом відносності руху, очевидно, що датчик може реєструвати миттєві значення швидкості повітря, перебуваючи нерухомо відносно системи відліку, або він може реєструвати миттєві значення швидкості повітря, здійснюючи коливання щодо відносно нерухомого повітря.

Шукана відносна миттєва швидкість визначалася як геометрична (векторна) різниця між абсолютною миттєвою швидкістю повітряного потоку і переносною миттєвою швидкістю:

$$\vec{\upsilon}_{відн} = \vec{\upsilon}_{абс} - \vec{\upsilon}_{пер} .$$

Абсолютну миттєву швидкість повітря $\vec{\upsilon}_{абс}$ можна визначити методом термоанемометрування з подальшою оцифровкою сигналу. Переносну миттєву швидкість $\vec{\upsilon}_{пер}$ можна визначити як віброшвидкість коливання датчика термоанемометра.

Вимірювальна система

Схема інформаційно-вимірювальної системи вібродіагностики стенда представлена на рис. 3 з позначеннями основних елементів системи. Датчиком для реєстрації віброприскорень аеродинамічного стенда є трьохосьовий мікромеханічний акселерометр MMA7260Q виробництва Freescale semiconductor (блок А) з робочим діапазоном вимірювання прискорення *±1,5g* з чутливістю *800мВ/g*. Частотна полоса сигналу була обмежена фільтром нижніх частот (ФНЧ) зі смугою пропускання 0-350Гц. Оцифровування сигналів віброприскорень здійснювалися за допомогою плати введення інформації L-761 (L-Card) (АЦП). Реєстрація інформації відбувалася на комп'ютері Advantech UNO-3074 (ПК). Обробка сигналу здійснювалась за допомогою програмного забезпечення «PowerGraph» Ver.3.7 Professional (ООО «Интероптика-С»). Калібровка акселерометра проводилася на поворотному столі шляхом його обертання відносно вектора гравітаційного прискорення. Для точного визначення кута між віссю чутливості акселерометра і вектором гравітаційного прискорення використовувався оптичний квадрант КО-30. Межа допустимої похибки вимірювання кута квадранта складала ±30".

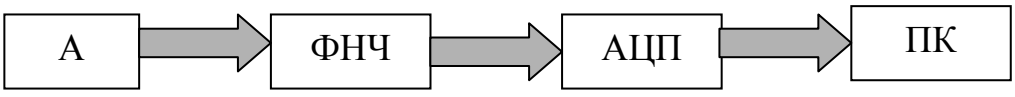


Рис. 3. Блок-схема вимірювальної системи

Основні математичні співвідношення та особливості обробки сигналів

У загальному випадку датчик термоанемометра реєструє одночасно 3 сигнали різної природи: 1) швидкість потоку повітря; 2) наведені швидкості від механічних коливань датчика відносно незбуреного повітря; 3) електро-магнітний шум приладів і електромагнітні наведення на лінії зв'язку (інформаційні кабелі). Кожен з цих сигналів вносить свою складову в сумарну похибку сигналу і являє собою суму стаціонарного випадкового сигналу і відповідних гармонік коливань.

У разі некорельованості цих складових сумарну випадкову похибку (сумарний розкид сигналу) термоанемометра можна представити у вигляді рівняння [10]:

$$\Delta_e^2 = \Delta_U^2 + \Delta_{вібр}^2 + \Delta_{ем}^2, \quad (1)$$

де Δ_U – дифузність (розкид) експериментальних даних, яка викликана флуктуаціями повітряного потоку (об'єкта вимірювання), $\Delta_{вібр}$ – дифузність експериментальних даних, яка викликана вібрацією датчика термоанемометра відносно нерухомого повітря, $\Delta_{ем}$ – дифузність експериментальних даних, яка викликана внутрішніми електромагнітними шумами приладів і електромагнітними наведеннями на лінії зв'язку.

Численними вимірюваннями електромагнітних шумів вимірювальної системи (при вимкненому вентиляторі) встановлено, що $\Delta_{ем} \approx 0$.

У контексті даних оцінок сигнал термоанемометра можна розглядати як стаціонарний випадковий процес із законом розподілу щільності ймовірності, близьким до нормального. В цьому випадку дифузність сигналу можна представити у вигляді

$$\Delta_e = t_{P,N} \cdot \sigma_e,$$

де $t_{P,N}$ – квантильний множник, що залежить від довірчої ймовірності P і кількості одиничних вимірювань N; σ_e – середньоквадратичне відхилення (СКВ) сумарного сигналу.

Тоді рівняння (1) можна перетворити і визначити шукану СКВ флуктуації повітряного потоку

$$\sigma_U^2 = \sigma_e^2 - \sigma_{вібр}^2. \quad (2)$$

З рівняння (2) випливає два способи визначення шуканої величини σ_U^2:

1. Зменшити величину механічної вібрації до значень $\sigma_{вібр}^2 \approx 0$, тоді $\sigma_U^2 = \sigma_e^2$, що дозволяє визначити σ_U^2 безпосередньо за сигналом термоанемометра.

2. Експериментально визначити $\sigma_{вібр}^2$ і σ_e^2, потім визначити σ_U^2 за рівнянням (2).

Обидва способи ведуть до додаткових витрат. Перших спосіб — до витрат на віброзахист, другий — на проведення спеціальних досліджень з визначення рівня вібрацій. На нашу думку, при аеродинамічних експериментах на стенді «Вихрова камера» доцільніше застосувати метод, заснований на комбінації першого та другого зазначених способів, а саме: зменшити рівень вібрацій не до гранично низької величини ($\sigma_{вібр}^2 \approx 0$), а до такої величини, яка приведе до прийнятної похибки через наявність вібрації. Тоді позитивного ефекту можна досягти відносно простими невитратними методами (без теоретичного розрахунку). Якщо ж похибка експериментальних даних внаслідок вібрації не буде задовільною, то можна зменшити похибку, використовуючи рівняння (2).

Перетворимо рівняння (2) до виду

$$\left(\frac{\sigma_U}{\sigma_e}\right)^2 = 1 - \left(\frac{\sigma_{вібр}}{\sigma_e}\right)^2. \quad (3)$$

Наприклад, при застосуванні згаданих вище засобів зниження рівня вібрацій цілком справедливою є умова $\frac{\sigma_{вібр}}{\sigma_e} \le 0,20$, тоді з рівняння (3) отримуємо, що $\frac{\sigma_U}{\sigma_e} \approx 0,98$. В цьому випадку похибка експерименту збільшується всього на 2% внаслідок вібрації.

Результати дослідження

Спочатку були проведені вимірювання фонових механічних вібрацій вузлів аеродинамічного стенда внаслідок коливань будівельних конструкцій лабораторного приміщення та фонових електромагнітних наведень на вимірювальні прилади та інформаційні кабелі. Ці вимірювання, проведені при вимкнутому та увімкнутому електродвигуні, показали дуже малий вплив цих чинників на результати досліджень структури вихрових течій. Для оцінки якості заходів по зменшенню рівня вібрацій були здійснені вимірювання та порівняння віброприскорень в двох характерних зонах (поз. 1, 2, див. рис.1): біля мотор-вентиляторного агрегату і біля координатного пристою, коливання якого можуть спричиняти неприпустимі вібрації державок датчиків.

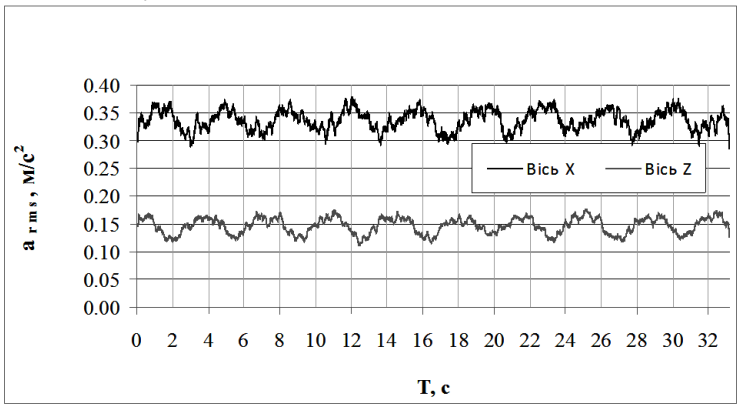
Для кількісного опису якості віброізоляції використовувався такий параметр, як середнє квадратичне значення (RMS) віброприскорення

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n} a_i^2},$$

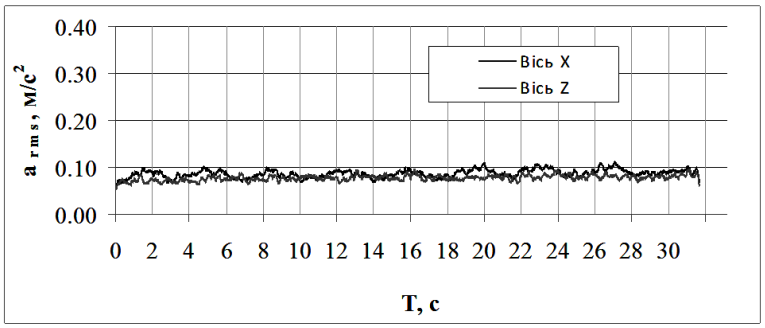
де a_i – миттєва величина прискорення, N – кількість одиничних вимірювань.

Час одного вимірювання (час реалізації, T_r) в експериментах складав 30 ÷ 35 секунд. Частота дискретизації сигналу дорівнювала f_d = 1000 Гц. Тоді, за формулою $N = f_d \cdot T_r$, кількість одиничних вимірювань одного експерименту становила N = 30000 ÷ 35000 одиниць.

На рис. 4 наведено графіки статистичних характеристик віброприскорення, обчислених за допомогою функції RMSPt (X; N) пакета програм «PowerGraph» Ver.3.7 Professional (ТОВ «Інтероптика-С»), в зазначених вище точках вимірювання для осей чутливості X і Z.



а



б

Рис. 4. Середнє квадратичне значення віброприскорення в характерних зонах стенда: а) електродвигун; б) торець вихрової камери

Періодичний характер функції середнього квадратичного значення віброприскорення говорить про наявність биття у вузлі електродвигун-вентилятор. Оскільки, графіки функцій по осях X и Z подобні, має місце як радиальне, так і торцеве биття. Коефіцієнт ефективності виброізоляції стенда визначається за формулою

$$K_{еф} = \frac{a_{rms}^{двиг}}{a_{rms}^{вк}},$$

де $a_{rms}^{двиг}$ - середнє квадратичне значення (RMS) віброприскорення в зоні джерела коливань, а $a_{rms}^{вк}$ - середнє квадратичне значення (RMS) віброприскорення в зоні торця ВК (в зоні установки координатного пристрою термоанемометра). Аналіз графіків говорить про зниження величини віброприскорения на відстані між точкою вимірювання ”електродвигун” і точкою вимірювання ”торець ВК” по осі X приблизно в 4 рази, а по осі Z приблизно в 2 рази. Більш детальний аналіз виброгасіння можна здійснити шляхом спектрального анализу. Спектри віброприскорення, виміряні на електродвигуні і торці ВК наведені на рис. 5. Аналіз результатів дозволяє зробити висновок про те, що віброприскорення двигуна після модернізації стенда представляє собою суму кількох гармонік з частотами приблизно 49,6 Гц; 99,4 Гц; 149,1 Гц; 218,7 Гц; 299,9 Гц і шумів в полосах частот 27…72 Гц і 130…160 Гц. Термоанімометричними дослідженнями, проведеними раніше, показано, що ці механічні коливання потрапляють у частотні смуги пульсацій швидкості вихрових структур. Віброприскорення торця ВК відповідає тільки гармоніці приблизно 49,6 Гц, наявність якої можна пояснити роботою електродвигуна стенда. Гармоніки 99,4 Гц, 149,1 Гц і 299,9 Гц близькі до вищих гармонік, викликаних основною гармонікою в 49,6 Гц. Аналіз рис. 4 та 5 демонструє ефективність проведених дій по зменшенню вібрацій стенда. Всі гармонічні коливання, крім 49,6 Гц в зоні торця ВК, відсутні. Гармоніка 49,6 Гц зменшена приблизно в 10 разів и складає приблизно 0,04 м/с^2 .

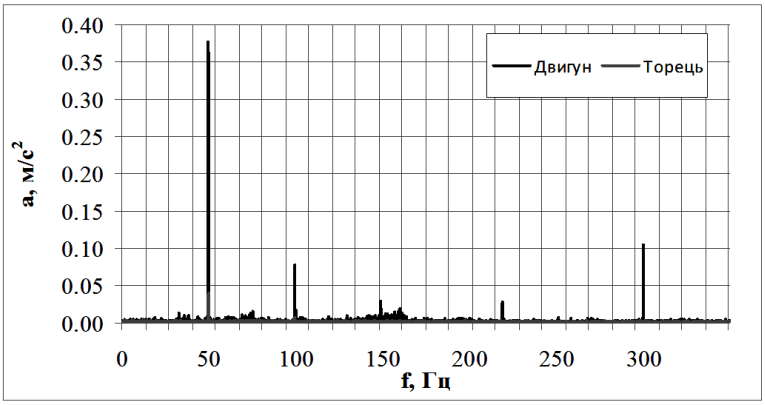


Рис. 5. Спектри віброприскорень, виміряних на електродвигуні і торці ВК

Оскільки вібрації являють собою гармонічні коливання, величини миттєвих прискорень a_i і швидкостей υ_i описуються наступними синусоїдальними законами, що є величинами взаємозалежними і пов'язаними між собою наступними співвідношеннями.

$$a_i = A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0), \qquad (4)$$
$$\upsilon_i = -A\omega\cos(\omega t + \varphi_0),$$

де $\omega = 2\pi f$ – колова частота.

З рівнянь (4) можна визначити максимальні за модулем значення миттєвого прискорення $a_{\max} = A\cdot(2\pi f)^2$ і швидкості $\upsilon_{\max} = A\cdot(2\pi f)$, або $\upsilon_{\max} = \frac{a_{\max}}{2\pi f}$. Використовуючи експериментальні дані з рис. 5, вирахуємо максимальну актуальну швидкість вібрації на торці ВК $\upsilon_{\max} = \frac{0,04\ м/с^2}{2\cdot 3,14\cdot 49,6\ Гц} = 1,3\cdot 10^{-4}\ м/с$.

Цілком очевидно, що такі малі значення, викликані вібрацією експериментальної установки, не впливатимуть на точність аеродинамічних досліджень на стенді «Вихрова камера».

Висновки

Діагностика аеродинамічного стенда «Вихрова камера» і виявлення вібраційно небезпечних зон установки показали можливість появи в вимірювальних сигналах ознак додаткових миттєвих переносних швидкостей, що не відповідають реальній вихровій картині складної закрученої течії в камері. Ряд конструктивних змін, що було внесено до елементів стенда, дозволив суттєво зменшити негативні наслідки вібрації на результати термоанемометричних вимірювань характеристик КВС в потоках аж до повного нівелювання зазначеного впливу. Про це свідчать отримані дані середнє квадратичних значень та частотних спектрів віброприскорень досліджуваних зон установки. Запропонована методика моніторингу рівня вібрацій стенда згідно із спрямованістю дослідження мікроструктури зсувної течії також дає можливість корегування ідентифікації нових видів КВС та відповідних характеристик течії при постановці подальших серій дослідів при необхідності ускладнення умов організації потоків з метою інтенсифікації процесів переносу маси та енергії в порожнинах вихрових камер енергетичного та технологічного призначення.

Минимизация вибрационного фактора при экспериментальных исследованиях микроструктуры ограниченных закрученных потоков

В.А. Кочин, В.Н. Турик, М.В. Кочина

Аннотация. *Экспериментальные исследования тонкой структуры сложных закрученных потоков и нестандартных способов управления процессами переноса в вихревой камере выявили необходимость модернизации узлов аэродинамического стенда для уменьшения погрешности от их механической вибрации при инструментальных измерениях из-за появления в сигналах дополнительных составляющих от наведенных мгновенных переносных скоростей течения. Этот фактор усложняет анализ характеристик вихревых структур различных масштабов. Цель работы состоит в мониторинге вибрационно-опасных зон установки и уменьшение негативных последствий вибрации относительно результатов термоанемометрических измерений. Для минимизации вредного влияния вибрации элементов аэродинамического стенда на результаты исследований в его конструкцию был внесен ряд изменений. Оценка качества этих изменений предполагала измерения виброускорений в двух зонах: 1 — непосредственно вблизи двух основных*

источников вынужденных колебаний (электродвигатель и вентилятор); 2 — в зоне размещения координатного устройства с державками термоанемометрических датчиков. Экспериментально доказано, что модернизация аэродинамического стенда снизила величины виброускорения в направлении продольной оси камеры приблизительно в 4 раза и вдоль вертикальной оси приблизительно в 2 раза. Полученные данные позволяют уменьшить погрешности определения статистических характеристик течения и корректировать идентификацию выявленных вихревых структур в вихревой камере.

Ключевые слова: вихревая камера, вихревые структуры, характеристики течения, термоанемометрические измерения, вибродиагностика, виброускорение

Minimization of vibrational factor in experimental investigations of limited swirling flows microstructure

V. Kochin, V. Turick, M. Kochina

Abstract. *Purpose. The article presents results of vibration monitoring of aerodynamic test bench for experimental investigations of the limited swirling flows microstructure and for development of new methods of mass eddy transfer control in mixture chambers. The subject of research is increase of identification accuracy of coherent vortex structures in chambers by reducing of influence of additional components in measurement signals induced by instantaneous translatory velocities of current owing to oscillations of test bench elements.*

Design/methodology/approach. To reduce the negative effects of mechanical vibration on the results of aerodynamic measurements, a series of changes were made to the design of the aerodynamic stand. To evaluate the quality of these changes in vibration levels, measurements of vibration acceleration in two zones were made: 1) directly near two sources of forced oscillations (motor and fan); 2) in zone of coordinate station with location of the holders of hot-wire anemometer sensors.

Findings. Vibration monitoring of the aerodynamic bench proved that its modernization reduced the magnitude of vibration acceleration in direction of longitudinal axis of the chamber in about 4 times, and the magnitude of vibration acceleration along the vertical axis in approximately 2 times. The obtained data and testing technique made possible to correct identification of detected vortical structures, to reduce errors in determining pulsations of velocities and their statistical characteristics in shear flows of the vortex chambers of power or technological application.

Keywords: vortex chamber, vortical structures, flow characteristics, hot-wire anemometer measurements, vibration diagnostics, vibration acceleration

References

1. Babenko V. Coherent Vortical Structures Control in Flat and Curvilinear Parietal Flows / V. Babenko, V. Turick // Proc. of the World Congress “Aviation in the 21-st Century” (14–16 Sept., 2003). — Kyiv: NAU, 2003. — P. 2.54–2.58.
2. Бабенко В. В. Визуализация структуры течения в вихревой камере / В. В. Бабенко, В. Н. Турик, А. В. Воскобойник // Вестник Нац. техн. ун-та “Харьковский политехнический институт”. Технологии в машиностроении. — Харьков, 2001. — Вып. 129, Ч.1. — С.215–221.
3. Бабенко В. В. Исследование когерентных вихревых структур в ограниченных закрученных потоках методом скоростной кинорегистрации / В. В. Бабенко, В. Н. Турик, А. В. Воскобойник // Вестник Нац. техн. ун-та Украины “КПИ”. Машиностроение. – К., 2001. — Вып. 40. — С. 426–432.
4. Makarenko R. A. Kinematics of Flow in a Dead End Part of a Vortex Chamber / R. A. Makarenko, V. N. Turick // International Journal of Fluid Mechanics Research. — 2004. — Vol.31, No.3. — P.299–306. DOI: 10.1615/InterJFluidMechRes.v31.i3.70
5. Турик В. Н. О гидродинамической неустойчивости в вихревых камерах / В. Н. Турик // Промислова гідравліка і пневматика. — 2006. — №3(13). — С.32–37.
6. Турик В. Н. Структура выходного потока вихревой камеры при торцевых струйных воздействиях / В. Н. Турик, Д. Е. Милюков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 3/8 (69). – С. 45–51.
7. Babenko V. V. Velocity Fluctuations in a Swirling Jet of Vortex Chamber / V. V. Babenko, V. A. Blohin, A. V. Voskobojnick, V. N. Turick // International Journal of Fluid Mechanics Research. — 2005. — Vol.32, No.2. — P.184–198.
8. DOI: 10.1615/InterJFluidMechRes.v32.i2.40
9. Турик В. М. Аналіз можливості флатерного керування когерентними утвореннями в потоках вихрових камер / В. М. Турик, В. О. Кочін, М. В. Кочіна // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування. — К., 2014. — Вип. 2 (71). — С. 84–94.
10. Турик В.М. Вібродіагностика стенда «Вихрова камера» як засіб зменшення похибки аеродинамічного експерименту / В.М. Турик, В.О. Кочін, М.В. Кочіна // «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта»: матеріали XVIII Міжнар. наук.-техн. конф. (29 червня – 1 липня 2017 р.). — Київ, 2017. — С. 214.
11. Новицкий П. В. Оценка погрешности результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.