

DOI: 10.20535/1810-0546.2018.4.133918

УДК 533.6.08 : 532.527

В.М. Турик^{1*}, В.О. Кочін², М.В. Кочіна¹¹КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна²Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ КОГЕРЕНТНИМИ ВИХРОВИМИ СТРУКТУРАМИ В КАМЕРІ ЗМІШУВАННЯ КРИЛОВИМИ ВИХОРОГЕНЕРАТОРАМИ

Проблематика. Малозатратне керування енергоємними когерентними вихровими структурами (ЕКВС), а отже, процесами переносу маси, імпульсу та енергії у вихрових камерах змішування (ВК) для підвищення ефективності робочих процесів вихрових технологічних і енергетичних апаратів.

Мета дослідження. На основі принципу взаємної сприйнятливості вихрових структур дослідити реакцію ЕКВС у тупиковій частині камери і на виході з неї на спрямовані керувальні дії кінцевих вихрових шнурів, які створюють крилові вихорогенератори у вхідному соплі ВК. Надати кількісну оцінку “тонкому” впливу на ЕКВС, які визначають характеристики змішування потоків у ВК.

Методика реалізації. Поєднання експериментального дослідження формування керувальних вихорів та експериментальних характеристик ЕКВС з теоретичним аналізом аеродинамічної моделі крилового вихорогенератора.

Результати дослідження. Виявлено явища перерозподілу енергії середнього руху газу на користь енергії пульсацій у тупиковій зоні камери, а також “перекачування” енергії пульсацій від дрібних вихорів до більш крупних на виході з камери змішування. Попри відносно невеликі прояви позитивного ефекту впливу керувальних дій на ЕКВС в об’ємі тупикової частини камери засвідчено підвищення енергії пульсацій швидкості потоку в характерній зоні вихідного перерізу ВК до 72 %.

Висновки. Експериментально доведено можливість ефективного керування ЕКВС, які визначають процеси масо- і теплопереносу у вихрових камерах змішування. Керування здійснюється системою неперервних упорядкованих вихрових шнурів, що генеруються нерухомими крилами кінцевого розмаху, вмонтованими у вхідному соплі камери.

Ключові слова: камера змішування; когерентні вихрові структури; керування; криловий вихорогенератор; вихрові шнури; взаємна сприйнятливість.

Вступ

У вузлах та елементах широкого класу енергетичних і технологічних машин і апаратів – у камерах згоряння теплових двигунів, у топкових пристроях котлів і печей, у каналах ядерних енергетичних установок, у плазмотронах, сепараторах тощо – рух робочих середовищ відбувається під впливом відцентрових сил. Дія складних зсувних явищ, притаманних закрученим потокам, викликає певні труднощі при аналізі гідроаеродинамічних і теплообмінних процесів. На сьогодні найбільш відомі матеріали аналітичних, експериментальних і числових досліджень гідроаеродинаміки у вихрових камерах (ВК) завдяки роботам М.О. Гольдштїка, В.К. Шукіна, А.А. Халатова, А. Гупти, Д. Ліллі, Н. Сайреда, С.С. Кутутеладзе, Е.П. Волчкова, І.І. Смутьського, А.О. Авраменко, О.В. Митрофанової та інших авторів [1–7]. Безумовно, дані зазначених джерел мають певну важливість для практики проектування подібних до досліджува-

них технічних пристроїв. Проте слід зазначити, що переважна більшість цих робіт присвячена вивченню інтегральних картин течій з відповідними рекомендаціями щодо керування ними на макрорівні. Результати досліджень пропонуються у вигляді графіків розподілу усереднених гідромеханічних і теплофізичних параметрів потоку або сукупності умовних векторів, траєкторій течії, що схематично вказують на приблизний напрямок руху частинок рідини (газу) у ВК. Найчастіше в основу покладено або дуже наближені, або не підкріплені фізичним експериментом дані комп’ютерного моделювання зсувної турбулентної течії існуючими програмними пакетами, або дані інтегрального фізичного експерименту в каналах і апаратах із завихрювачами традиційних конструкцій. Відповідним чином, на макрорівні розглядається проблема організації процесів обміну масою, імпульсом, енергією в робочих середовищах ВК. Частковим винятком є низка сучасних досліджень, наприклад [8–10], у яких вивчається структура

* corresponding author: turick46@gmail.com

закручених турбулентних струменів і потоків застосуванням панорамних методів вимірювання швидкості течії (PIV – Particle Image Velocimetry). Особливе значення ці дослідження мають для технологій ефективного спалювання вуглеводневих палив у камерах згоряння при знижених рівнях шкідливих викидів NO_x і CO . Так, у роботі [8] методом потрійної ортогональної декомпозиції досліджувалась просторово-часова еволюція сильно закрученого турбулентного струменя, в якому відбувається руйнування вихору. Показано, що динаміка течії визначається глобальною спіральною модою нестійкості, якій відповідає прецесія вихрового ядра струменя. У зовнішньому шарі зміщення виявлена вторинна вихрова структура спіральної форми. Саме така когерентна структура пульсацій сильно закрученої течії була показана і технікою умовного усереднення в [9]. У роботі [10] досліджено два характерних для камер згоряння газотурбінних установок (ГТУ) випадки закрутки потоків: слабку та сильну. При сильній закрутці при спонтанному розширенні потоку в камері виникає розпад вихрового ядра та утворення зони рециркуляції. Зворотна течія забезпечує тепломасообмін між продуктами горіння та реагентами, що подаються до камери. Це стабілізує фронт полум'я та при значних надлишках повітря зменшує викиди оксидів азоту. Однак відзначається підвищена чутливість бідного полум'я до збурень, що може призводити до термоакустичного резонансу в камері згоряння. Механізми цього явища визначаються складними взаємодіями між гідродинамічною структурою потоку, полем тиску, процесами переносу і хімічною кінетикою, які до сьогодні недостатньо вивчені. Дослідження показують [10], що динаміка як потоку без горіння, так і потоку сильно закрученого полум'я визначається сумісною прецесією двох спіральних вихорів, розмішених у двох зсувних шарах. Тобто підтверджується результат роботи [8], що як при горінні, так і без нього динаміка сильно закрученої течії визначається глобальною спіральною модою нестійкості. Саме це й пояснює значний відгук сильно закрученого полум'я виключно до високоамплітудного зовнішнього впливу, що виявляється при керуванні термоакустичним резонансом з метою його усунування. У цьому сенсі багато обіцяє шлях переходу до технології слабкої закрутки без вираженої центральної зони рециркуляції при одночасній схожості характеристик стійкості й компактності полум'я до характеристик за умов

сильної закрутки. Відсутність зони рециркуляції зменшує рівень викидів NO_x , оскільки суттєво знижує час перебування молекул азоту й кисню в області високої температури. Проте технологія слабкої закрутки в камерах згоряння ГТУ передбачає заміну соплових блоків, а це породжує при зменшенні густини газу в процесі горіння небезпеку викликаного ним розпаду вихрового ядра та проскоку полум'я всередину пальникового пристрою навіть за великих витрат пальної суміші. Разом із тим у праці [10] відзначається доцільність використання слабкої закрутки при організації бідного полум'я через можливе викликання значної амплітуди когерентної моди, що розглядається як сприятливий фактор для ефективного застосування зовнішніх впливів при керуванні потоком. Очевидно, незважаючи на високий рівень постановки таких досліджень, їх прикладне значення, з точки зору можливості спрямованого керування когерентними вихровими структурами, очікує на справжню оцінку в майбутньому.

Таким чином, на сьогодні відчувається брак повної і несуперечливої інформації щодо складної тонкої вихрової структури обмежених та напівобмежених закручених потоків і практичного застосування методів керування ними. Через це традиційно запропоновані засоби керування процесами переносу не можна вважати не тільки обґрунтованими з точки зору мінімізації енергетичних і матеріальних затрат, але й цілком адекватними фізичним особливостям течії у вихрових камерах.

У роботах останніх років, наприклад [11–16], уперше була послідовно проаналізована структура течії у п'яти специфічних областях вихрової камери з подовженою тупиковою зоною: течія біля сопла, течія в периферійній пристінній області, течія біля глухого торця циліндричної частини камери, течія у внутрішній тупиковій області камери і течія в проточній частині вихрової камери. Деталізація складових загального потоку в камері відкрила перспективу пошуків принципово нових методів розробки та досліджень більш раціональних способів керування вихровими структурами, а відтак і процесами масо- й теплопереносу в апаратах вихрового типу. За основу методів було запропоновано покласти метод сприйнятливості вихрових утворень, який бере свої початки щодо керування примежовим шаром у перших розробках В. Шильца, М. Морковіна і Е. Решотко [17–19]. Суттєві розвиток і поглиблення цього методу привели до більш повного

формулювання В.В. Бабенком концепції взаємної сприйнятливості різноманітних збурень прирежовим шаром [20]. За пропозицією В.В. Бабенка і В.М. Турика в 2003 р. [21] цей метод було узагальнено на вихрові структури в цілому щодо внутрішньої задачі гідромеханіки та експериментально перевірено в роботах [22–25] стосовно проблеми керування когерентними вихровими структурами у вихрових камерах.

Постановка задачі

Оскільки процеси переносу маси, імпульсу та енергії залежать головним чином від інтенсивності великомасштабних і найбільш потужних вихрових утворень у потоках, то задача зводиться до раціональної організації спрямованих керувальних дій саме на енергоємні когерентні вихрові структури (ЕКВС), зокрема на потужне спіралеподібне утворення типу “вуса” [11, 13, 16].

Аналіз даних робіт [11–16] показує, що при зосередженому тангенціальному підведенні газу до камери до 70 % витрати вхідного потоку спрямовуються у бік глухого торця, а звідти – до проточної частини камери. Таким чином, розвинена тупикова частина досліджуваної ВК являє собою додатковий, досить потужний вихорогенератор через наявність декількох зсувних шарів складної течії, що забезпечує високий рівень інтенсивності пульсаційного руху. Тому доцільно дослідити реакцію ЕКВС на керувальні впливи як у тупиковій частині ВК, так і на виході з камери, оскільки картини течії в цих областях взаємопов’язані.

Генератором керувальних збурень для впливу на процеси перемішування робочих середовищ у ВК може слугувати мініатюрне крило скінченного розмаху відповідних геометричних і аерогідродинамічних параметрів, яке встановлюється у проточному тракці впускного сопла ВК. За певних умов обтікання крило створює систему неперервних упорядкованих вихрових збурень у вигляді кінцевих вихрових шнурів, що на макро- та мікрорівнях можуть спрямовано та з мінімальними втратами енергії, “тонко” впливати на вихрову структуру та характеристики змішування потоків у ВК. Підсилення або блокування процесів змішування можна регулювати відповідно до принципу взаємної сприйнятливості вихрових структур. Отже, наша робота присвячена експериментальній перевірці цього способу керування структурою течії у ВК згідно із зазначеним принципом.

Експериментальний стенд і методика проведення дослідження

Досліди здійснено на аеродинамічному стенді, що був створений В.М. Туриком у Відділі інформаційних систем у гідроаеромеханіці та екології Інституту гідромеханіки НАНУ для дослідження внутрішніх вихрових течій. Стенд складається з експериментальної установки з прозорою робочою ділянкою у вигляді вихрової камери внутрішнього радіуса $d_0 = 0,102$ м і загальною довжиною $L_0 = 0,635$ м, із традиційних приладів контролю витрати й тиску, координатних пристроїв, а також вимірювального комплексу. До його складу входять набір пневмометричних насадків, засоби візуалізації та кінофотореєстрування течії, запам’ятовувальний осцилограф, аналізатор спектра, апаратура термоанемометрування фірми “DISA Elektronik” з одностороннім дротяним датчиком, з’єднаним з аналого-цифровим перетворювачем L-264 фірми “L-Card”, що встановлений у вигляді плати розширення до IBM-сумісного комп’ютера. Обробка вимірювальної інформації проводилась за допомогою ліцензійного програмного пакета “PowerGraph Professional”.

Такий вимірювальний комплекс дає змогу безпосередньо вивчати різномасштабні вихрові структури, інтегральні та локальні характеристики турбулентності в закручених напівобмежених та обмежених потоках.

Схема експериментальної установки наведена на рис. 1. Регулювання витрати повітря здійснюється за допомогою набору змінних діафрагм 1. Пневмометрична трубка 2 типу ВТІ слугує для вимірювання загальної витрати повітря. Елементи віброзахисту та компенсації пульсацій потоку, диференціальні манометри та координатний пристрій на схемі не показані.

Робоча ділянка підключена до всмоктувального тракту вентилятора. Таким чином, забір повітря до вхідного сопла ВК здійснюється з великого об’єму (об’єму лабораторії). Досліди з візуалізації та термоанемометрування течії проводились у діапазоні чисел Рейнольдса $Re_c \approx 55000-95000$, обчислених за параметрами потоку в проточній частині впускного сопла прямокутного профіля $a \times b = 0,04 \times 0,02$ м² із заокругленими кутами, де сторона a спрямована вздовж осі ВК. Відносна глибина розміщення торця циліндричної частини ВК від середини сопла дорівнювала $\bar{L} = L/d_0 = 4,4$; кути танге-

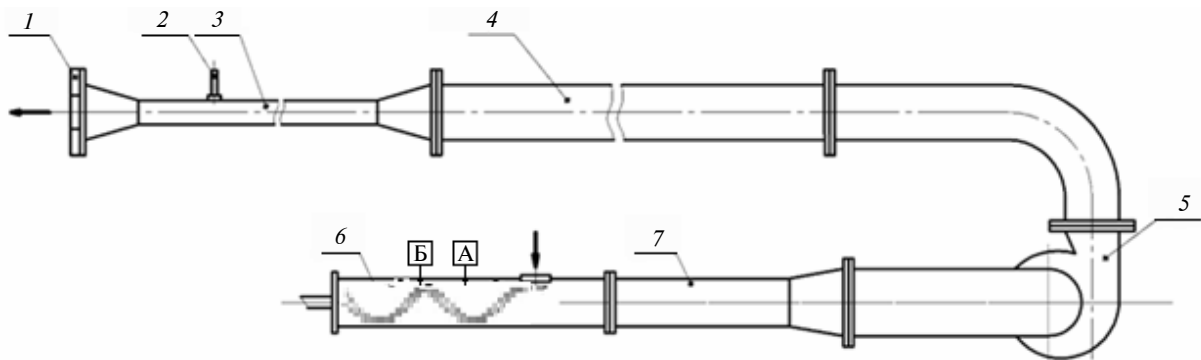


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 – змінна діафрагма, 2 – пневмометрична трубка, 3 – витратомірна ділянка, 4 – передвключений трубопровід стабілізації потоку, 5 – відцентровий вентилятор, 6 – вихрова камера, 7 – проміжна ділянка; А, Б – характерні зони вимірювання

ціальності входу потоку до ВК та осевого розміщення довшої сторони a вхідного отвору сопла відносно твірної циліндра становили відповідно $\gamma = 85^\circ$ та $\alpha_{oc} = 0^\circ$. У вхідному соплі камери було встановлене крило малого видовження ($\lambda = 1$) прямокутної форми в плані розмірами $0,02 \times 0,02 \text{ м}^2$, передня і задня крайки якого паралельні більшим сторонам прохідного перерізу сопла (рис. 2). Крило як вихорогенератор (ВГ) має трансформувати частину енергії турбулентної течії вхідного потоку в енергію кінцевих вихрових шнурів, які формуються на бічних кромках крила та мають функцію керувальних вихорів відносно ЕКВС [16] у камері. Застосування крила малого видовження дає такі переваги: а) значно розширює діапазон кутів атаки, при яких відсутній небажаний відрив примежового шару, який міг би руйнувати упорядковані кінцеві вихрові шнури та порушувати узгодженість характеристик керувальних вихорів з характеристиками системи вихорів, якими необхідно керувати; б) мінімізує величину профільного опору крила, а отже, гідравлічний опір усієї вихрової камери в процесі керування вихровими системами в порожнині ВК. До того ж у профілів відносно невеликої товщини коефіцієнт підйімальної сили крила в широкому діапазоні чисел Рейнольдса залишається майже постійним. З огляду на відомий зв'язок коефіцієнтів підйімальної сили та індуктивного опору можна стверджувати, що при зміні режимних параметрів застосоване крило малого видовження забезпечуватиме найсприятливіші умови стійкого генерування кінцевих вихрових джгутів, які мають впливати на характеристики ЕКВС у ВК. Сприятиме цим умовам також близькість крила до нижньої частини проточного тракту сопла, що спричиняє дію

екранного ефекту. Останній збільшує коефіцієнт підйімальної сили, а відповідно, й індуктивний опір, природа якого зв'язана саме з утворенням “вільних вихорів”. Факт цілковитої визначеності цих вихрових шнурів, прогнозованості їх енергетичних характеристик залежно від геометричних параметрів та орієнтації крила в обмеженому просторі проточного тракту сопла дає змогу використати механізм індуктивного опору для керування ЕКВС.

Додаткові керувальні вихрові структури, що вводяться в запропонованому сопловому пристрої до вхідного потоку, мають забезпечити отримання більш якісного керування процесом змішування у ВК і зменшити енергетичні та матеріальні затрати на систему керування. Для наближеного виконання умов взаємної сприйнятливості при керуванні когерентними структурами, а отже, процесом змішування, геометричні та режимні характеристики вихорів від крила в соплі мають бути сумірними з характеристиками таких систем: вихорів Гьортлера–Людвіга в присопловій зоні ВК, які поглинаються більш потужними спіралеподібними ЕКВС, квазітейлорівських вихорів, або ж бути сумірними одразу з характеристиками ЕКВС [16], що може визначити тільки експеримент з різними типами крилових вихорогенераторів.

Теоретичний аналіз [26] дав змогу вивести характеристику доцільності використання механізму індуктивного опору – коефіцієнт ефективності крила малого видовження ($1 \leq \lambda \leq 3$) як ВГ в обмеженому потоці:

$$\eta = \frac{2c_y}{\pi \lambda \sqrt{1 + \left(\frac{1}{K_\infty} - \varepsilon \frac{S}{F} c_y \right)^2}},$$

де c_y – коефіцієнт підйимальної сили крила у швидкісній (потоковій) системі координат; $1/K_\infty$ – обернена аеродинамічна якість крила в безмежному потоці; ε – коефіцієнт, що залежить від форми перерізу проточної частини сопла; F – площа цього перерізу; S – площа крила в плані.

Виходячи з цього, було здійснено пошук оптимального профілю крила з відомих атласів крилових профілів. Однак досліджуваний нами діапазон чисел Рейнольдса відрізняється від типових для авіації величин $Re = 10^6 - 10^7$, тому було залучено найбільш сучасні дані продувок крил, що використовуються в авіамоделюванні при проектуванні планерів, безпілотних апаратів малих розмірів, малих повітряних турбін тощо [27, 28]. У результаті з орієнтацією на бажані максимальні значення коефіцієнта підйимальної сили c_y , який істотно впливає на коефіцієнт індуктивного опору крила та критерій ефективності η , а також з урахуванням технологічності виготовлення крила було вибрано криловий профіль типу MB253515 (табл. 1).

Попередня візуалізація течії показала певне стиснення потоку у вхідному соплі камери (рис. 2, а). Це спричиняє нерівномірність профілів швидкості та тиску потоку, що набігає на

крило в проточному тракті сопла, та веде до зниження коректності постановки експерименту. До того ж відповідний відрив суттєво стисненого потоку від внутрішніх стінок сопла може спричинити утворення вихрової зони та пульсацій тиску. Для запобігання цим небажаним явищам серед відомих засобів підвищення плавності течії та рівномірності епюр швидкості й тиску на вході до сопла вибрано насадок із профілем лемніскати Бернуллі. Крім аеродинамічності доцільності, це зберігає максимальні можливості візуального контролю безвідривності обтікання крила, а також здійснення швидкісної фото-відеозйомки процесу формування кінцевих вихорів, що виконують функцію керувальних збурень. Профіль насадка формувався з термопластику марки Fimo Professional, що забезпечило зберігання форми та високої якості стану обтічної поверхні.

Візуалізація вхідного потоку, виконана після встановлення лемніскатного насадка, показала значне зменшення стиску потоку (рис. 2, б).

Методика статистичної обробки даних термометрування

Найчастіше при дослідженнях турбулентних течій апріорно покладається, що крива щільності розподілу (“щільності ймовірності”)

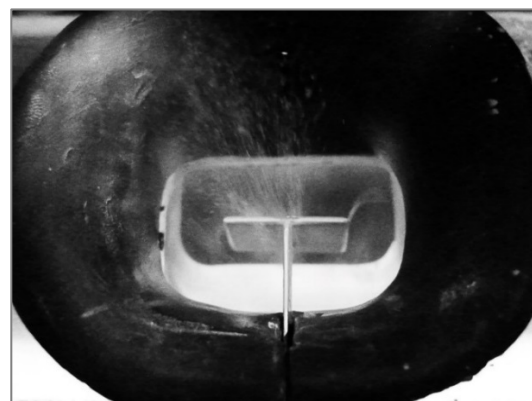
Таблиця 1. Параметри досліджуваного крилового профілю

Вид профілю	\bar{c} , %	\bar{f} , %	c_y^{\max}	$c_x(c_y^{\max})$	$\alpha(c_y^{\max})$	$K(c_y^{\max})$	η_{\max}
MB253515	14,96	2,43	1,10	0,0260	14–18	42,3	0,25

Примітка: \bar{c} – відносна товщина профілю; \bar{f} – відносна кривина профілю; c_x – коефіцієнт лобового опору; α – кут атаки; K – аеродинамічна якість крила.



а



б

Рис. 2. Візуалізація течій у вхідному соплі ВК за відсутності (а) та за наявності (б) лемніскатного входу для випрямлення епюри швидкості вхідного потоку

випадкової величини в досліджуваній точці одномодальна, симетрична і підпорядковується закону Гаусса. При нульовій моді цей закон визначається відомою формулою [29]

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2\right],$$

де $p(x)$ – щільність імовірності; x – можливе значення випадкової величини, наприклад миттєвої швидкості; σ – середньоквадратичне відхилення (с.к.в.), тобто середньоквадратична пульсація i -ї проекції швидкості.

Таке припущення може бути виправданим, наприклад, при дослідженні ізотропної й однорідної турбулентності, що суттєво спрощує отримання основних статистичних параметрів потоку (середнє значення швидкості, дисперсія). На апаратному рівні такий підхід дає змогу застосовувати у вимірювальних системах уніфіковані й стандартизовані модулі, а на програмному рівні – використовувати загальноприйняті пакети програм з математичної статистики для комп'ютерної обробки експериментальних даних, що спрощує її процедуру. Проте аналіз проведених авторами численних термоанемометричних експериментів із зсувними турбулентними потоками у ВК показав, що криві щільності розподілу ймовірності випадкових величин (актуальної швидкості, тиску) можуть суттєво відрізнятися від гауссового закону, що свідчить про досить складну структуру течії у ВК, особливо в зоні енергоємного вихору, яка характеризується істотним впливом детермінованих факторів. Характер кривих розподілу випадкових величин можна описати за допомогою коефіцієнтів асиметрії та ексцесу, а також процедури виділення “помилкових викидів” (“грубих похибок”), що й було реалізовано в спеціальному алгоритмі обробки експериментальних даних (рис. 3).

Обчислення основних статистичних параметрів кожної реалізації включало в себе обчислення центральних моментів другого, третього і четвертого порядків за формулою

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

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

$$= \frac{1}{T} \int_0^T x_i(t) dt, \text{ де } T \text{ – час реалізації процесу (в}$$

дослідах $T = 100$ с); r – порядок центрального моменту (при $r = 2$ маємо другий центральний момент – дисперсію $m_2 = D_i$); n – кількість елементів у вибірці (одиничних вимірювань у реалізації за період T), $n = 50000$.

Ексцес ε (контрексес $\varkappa = 1/\sqrt{\varepsilon}$) і асиметрія α є комбінаціями центральних моментів другого, третього і четвертого порядків і обчислюються за відомими формулами математичної

$$\text{статистики: } \varepsilon = \frac{m_4}{m_2^2} - 3; \quad \alpha = \frac{m_3}{m_2^{1.5}}.$$

Перевірка на нормальність кривої щільності ймовірності миттєвих швидкостей кожної вибірки здійснювалася інтегральним методом – обчисленням ексцесу і контрексесу вибірки (в пакеті Microsoft Excel) і порівнянням обчисленого значення з його значенням для основних законів розподілу [29] (табл. 2).

Серія дослідів з термоанемометрування актуальних швидкостей пристінної області течії у 12 точках на відносному радіусі $r^* = r/r_0 = 0,88$ ($r_0 = d_0/2$) характерних зон вимірювання А і Б (див. рис. 1) показала, що криві щільності роз-

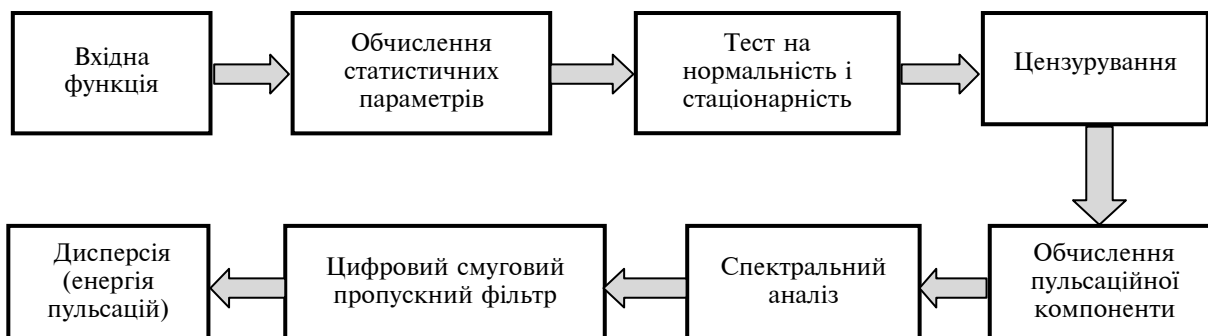


Рис. 3. Блок-схема алгоритму обробки експериментальних даних

Таблиця 2. Порівняльні характеристики законів розподілу

Вид розподілу	Лапласа	Нормальне (Гаусса)	Сімпсона	Трапецієподібне	Рівномірне	Арксинусоїдне
Коефіцієнт контрекссесу α	0,408	0,577	0,645	0,730	0,745	0,816

поділу ймовірностей мають гостровершинний одномодальний характер без ознак явної асиметрії, причому коефіцієнт контрекссесу змінюється в діапазоні $\alpha = 0,45\text{--}0,55$ з відповідною відмінністю від гауссового значення α за модулем на 22–4,7 %.

Для детального аналізу статистичного ряду експериментальних спостережень над випадковою величиною здійснено побудову гістограм – графіків, наведених нижче (рис. 4), на яких по осі ординат відкладено число значень функції, що потрапляють у задані інтервали, а по осі абсцис – межі цих інтервалів (інтервали групування – через кожних 0,5 м/с). Більш наочно форму апроксимуючої кривої щільності розподілу ймовірностей експериментальних даних актуальної швидкості відображають полігони, які були побудовані з'єднанням прямими середин верхніх основ кожного стовпчика гістограм. Це дало змогу визначити реальну форму кривої розподілу випадкової величини і порівняти її з нормальним законом Гаусса.

Перевірка на стаціонарність здійснювалася через поділ кожної реалізації (100 с) на ряд інтервалів (10 с), обчислення для кожного інтервалу основних статистичних параметрів (середнього і дисперсії) та аналізу зміни цих параметрів за допомогою статистичних критеріїв (гіпотез). Така перевірка здійснювалася засобами пакета Microsoft Excel.

Вимірювання показали, що застосування крилового ВГ приводить до приблизно однакової тенденції перерозподілу ймовірностей як колових, так і осьових складових миттєвої швидкості. Однак, з огляду на абсолютні значення вимірюваних величин швидкостей, за основу визначення наведених і наступних статистичних характеристик досліджуваного методу керування ЕКВС вважається за доцільне аналізувати розподіли щодо колових складових швидкості. Вони найбільшою мірою відображають характерні особливості отриманих відгуків вихрових утворень. Для побудови гістограм число інтервалів групування s експериментальних даних вибиралось у межах $0,55n^{0,4} < s < 1,25n^{0,4}$ [29]. Для порівняння гістограм різних вибірок використовувався метод перевірки статистичної гі-

потези за критерієм згоди Пірсона [29, 30] як міри розходження спостереженої щільності ймовірностей при керувальних діях та щільності ймовірностей щодо умовної аналітичної моделі закону розподілу без керувальних дій у вхідному соплі:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - F_i)^2}{F_i},$$

де f_i, F_i – спостережена (сопло з крилом) та очікувана (сопло без крила) частоти в i -му швидкісному інтервалі одних і тих самих стовпців гістограми, Гц; k – кількість інтервалів швидкості.

Розраховані величини χ^2 наведено в табл. 3 для двох точок на безрозмірних відстанях від середини вхідного сопла L^* (відносно повної глибини 0,446 м тупикової частини ВК) у зонах вимірювання А і Б (див. рис. 1) при максимальних за модулем безвідривних додатному і від'ємному кутах атаки α крила у вхідному соплі (їх величини визначалися візуалізацією течії за допомогою тонких шовкових ниток). Вибрані точки вимірювань є одними з найбільш характерних у картині розподілу вихрових структур, наведеної у праці [16].

Таблиця 3. Значення критерію згоди Пірсона χ^2

L^*	Re = 95000		Re = 55000	
	$\alpha = +14^\circ$	$\alpha = -6^\circ$	$\alpha = +14^\circ$	$\alpha = -6^\circ$
0,471	168111	69927	589281	362180
0,605	11256	2725	701533	554731

Критичне значення критерію, вираховане за формулою Уілсона–Хілферті [31] за кількості вимірювань $n > 30$, дорівнює

$$\chi_{кр}^2 \approx n \left(1 - \frac{2}{9n} + u_p \sqrt{\frac{2}{9n}} \right)^3 \approx 50404,$$

де $u_p = 1,2815$ (за довірчої ймовірності $P = 0,9$) – верхній p -квантиль стандартного нормального розподілу. Порівняння з ним вирахову-

ваних величин χ^2 приводить до таких нерівностей: 1) $\chi^2 > \chi_{кр}^2$ у точці $L^* = 0,471$ – усі чотири гістограми розподілу є статистично розрізненими з довірчою ймовірністю $P = 0,9$, що вказує на явний вплив ВГ на миттєву швидкість; у точці $L^* = 0,605$ при $Re = 55000$ гістограми розподілу є також статистично розрізненими, що теж свідчить про відгук на керувальні збурення у вхідному соплі; 2) $\chi^2 < \chi_{кр}^2$ у точці $L^* = 0,605$ при $Re = 95000$ – гістограми є статистично нерозрізненими, що безпосередньо не вказує на наявність такого відгуку, проте це не означає неможливості перерозподілу енергії між вихорами різних масштабів.

Відомо, що невід’ємною частиною вимірювань у реальних умовах експерименту є так звані “грубі похибки”. Тому перед порівнянням вибірок було передбачено процедуру їх цензурування, тобто операцію видалення “помилкових викидів” випадкової величини (актуальної швидкості). Хоча відносна кількість таких “помилкових викидів” виявилася зовсім невеликою, але їх певне відставання від генеральної сукупності теоретично може змінити положення центра вибірки. Межі цензурування вибірок визначались як

$$X_{гр} = \mu_x \pm t_{гр} \sigma,$$

де $t_{гр} = 1,55 + 0,8\sqrt{\varepsilon - 1} \lg(n/10)$ – квантильні множники розподілів (вибраних меж цензурування) [29].

Алгоритм статистичної обробки даних передбачав визначення спектральних смуг сигналу, вилучення енергонасичених частотних смуг із загального сигналу за допомогою смугових фільтрів та побудову амплітудно-частотних характеристик миттєвих швидкостей для кожної з вибраних для дослідження 12 точок уздовж пристінної зони тупикової частини камери.

При спектральному аналізі осцилограм експериментальних даних, а також при застосуванні цифрових смугових фільтрів і фільтрів нижніх частот були використані процедури ліцензійного пакета програм PowerGraph Professional. Методика визначення енергій пульсаційних швидкостей описана нижче.

Результати вимірювань та їх аналіз

Для аналізу впливу крилових ВГ на структуру течії в пристінній зоні ВК на рис. 4 пока-

зані гістограми як статистичні аналоги кривих щільності ймовірностей миттєвої швидкості для 2-х зазначених вище характерних точок вихрових структур у ВК на відстанях $L_A = 0,21$ м і $L_B = 0,27$ м (відповідно $L^* = 0,471$ і $L^* = 0,605$) від середини впускного сопла з крилом типу MB253515 та без нього за різних значень числа Рейнольдса. Аналіз гістограм показує, що застосування ВГ у впускному соплі призводить до зміни диференціальних законів розподілу ймовірностей [29] порівняно з випадком без ВГ. Це свідчить про вплив кінцевих вихрових шнурів крила на структуру течії в тупиковій області ВК, а отже, слід очікувати також на відповідний вплив на закручений потік в активній (проточній) частині камери. Характерно, що центри розподілів при дії ВГ в обох точках вимірювання зміщуються у бік менших швидкостей, причому за максимальної витрати повітря ($Re_c \approx 95000$) чим ближче до вхідного сопла (зона А), тим більше зміщення. Це можна пояснити незавершеністю початкової фази процесу взаємної сприйнятливості керувальних і керованих вихрових структур у цій зоні тупикової частини ВК. Натомість у зоні Б за максимального значення Re , завдяки дії турбулентної дифузії, підсиленої інтенсивними зсувними явищами при зустрічному осьовому русі спіралеподібної ЕКВС та зворотної течії від торця [16], процес сприйнятливості стає більш завершеним, у результаті чого статистична сукупність вимірюваних даних набуває більш регулярного характеру.

Для виявлення впливу керувальних вихорів на структуру течії в зонах А і Б тупикової частини ВК в експериментальних даних актуальної швидкості було виділено основні частотні смуги в таких областях: 1) енергонасичена область у частотному діапазоні 0–250 Гц, яка містить зони вузькосмугового шуму та гармонічних сигналів; 2) область білого шуму в діапазоні 250–320 Гц. Типові спектри з енергонасиченими смугами для двох характерних точок досліджуваних зон ВК показано на рис. 5, 6 за різних чисел Re .

В енергонасиченій області з вузькосмуговим шумом були виділені найбільш енергоємні частотні смуги: 5–33 Гц (гармонічні сигнали значної інтенсивності); 50–67 Гц (гармонічні сигнали незначної інтенсивності); 75–100 Гц (гармонічні сигнали великої інтенсивності); 125–150 Гц (гармонічні сигнали); 160–175 Гц (гармонічні сигнали незначної інтенсивності);

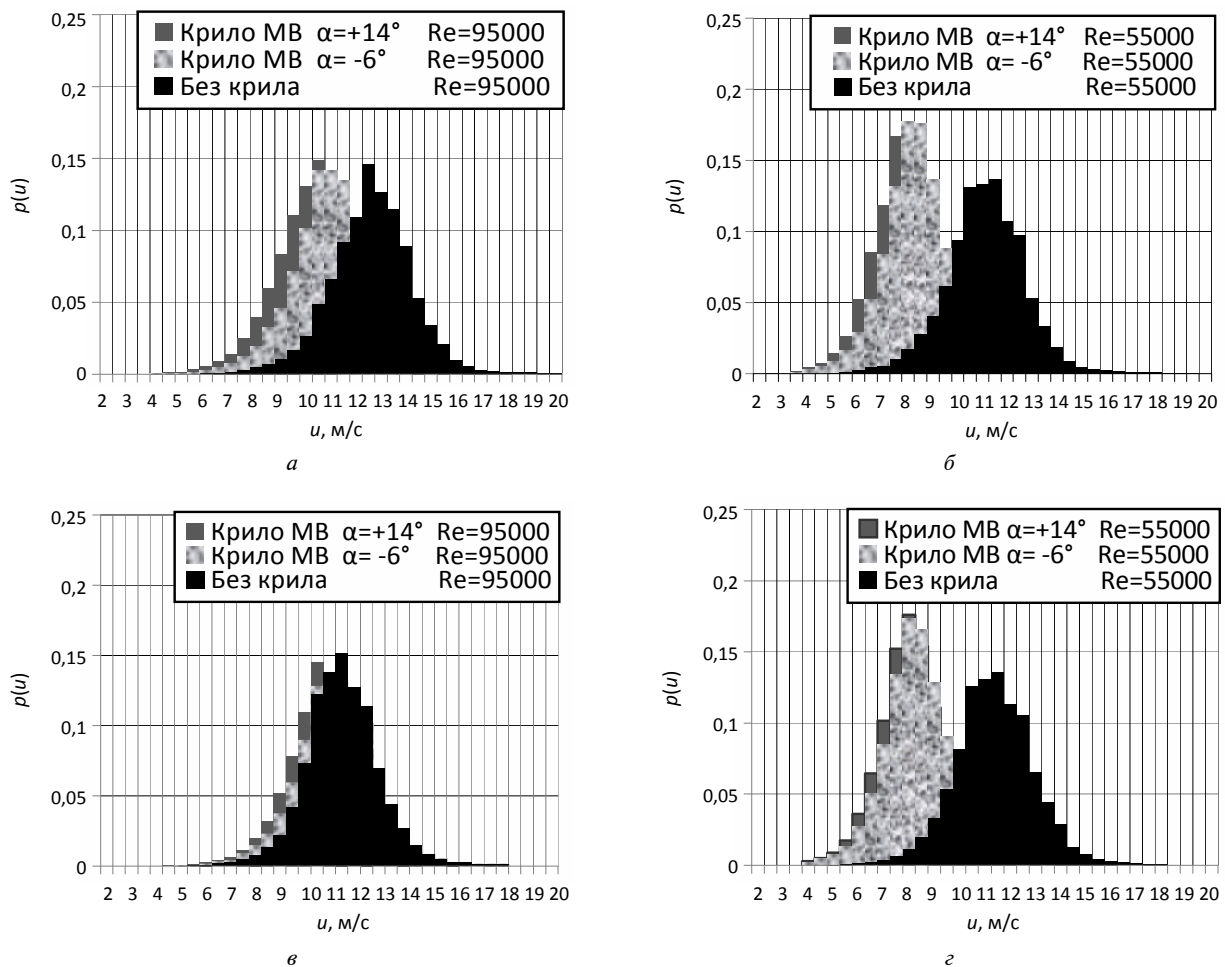


Рис. 4. Гістограми розподілу колової складової миттєвої швидкості за відсутності та за наявності керувальної дії: а, б – у точці $L^* = 0,471$, $r^* = 0,88$ зони вимірювання А; в, г – у точці $L^* = 0,605$, $r^* = 0,88$ зони вимірювання Б

190–210 Гц (гармонічні сигнали максимальної інтенсивності); 225–250 Гц (гармонічні сигнали). Спектральний аналіз усіх сигналів показав, що “енергоємні” частотні смуги мають місце для всіх досліджуваних точок ВК у випадку дії ВГ і без них.

Як видно з рис. 5 і 6, вплив крилових вихорогенераторів у зазначених вище точках усередині камери, незважаючи на засвідчені при візуалізації характерні особливості течії в їх околах, проявляє себе незначною мірою, крім певних “дискретів” гармонічних сигналів у діапазонах частот 5–33 Гц і 125–150 Гц, що відображають зростання амплітуд як позитивну реакцію вихрової течії на керувальні впливи. Колові складові актуальної швидкості лише незначно зміщуються в зону низьких частот.

Більш досконале виявлення спектральних особливостей КВС потребувало розширення

досліджуваної області та проведення аналізу зміни гістограм, а отже, законів щільності розподілу ймовірностей актуальної швидкості, для кожної з 12 точок уздовж пристінної зони тупикової частини камери, а також побудови амплітудно-частотних характеристик осьових і колових складових миттєвих швидкостей потоку за наявності та за відсутності керувальних дій ВГ у соплі. Порівняння гістограм різних вибірок (рис. 7) здійснювалось згідно з наведеним вище алгоритмом перевірки статистичної гіпотези за критерієм згоди Пірсона за максимального безвідривного додатного значення кута атаки крила MB253515 у вхідному соплі $\alpha = +14^\circ$ і при $Re = 95000$.

Згідно з рис. 7, уздовж більшої частини тупикової зони розподіли χ^2 для колової та осьової складових швидкості є різними. При $\chi^2 > \chi_{кр}^2$ гістограми розподілу є статистично

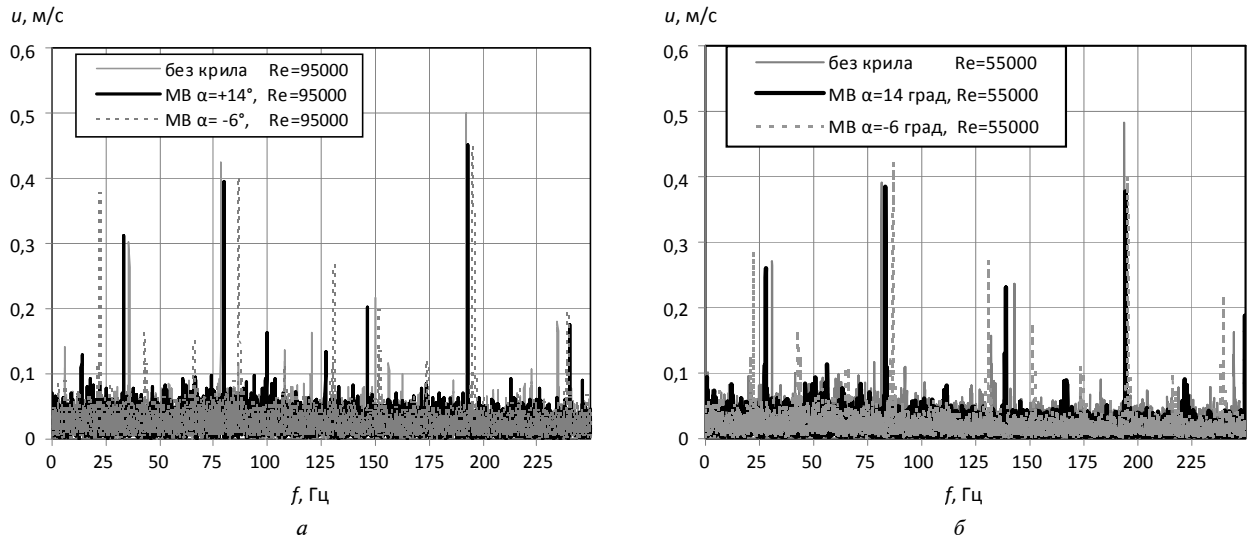


Рис. 5. Основні енергоємні частотні смуги експериментальних даних колової складової миттєвої швидкості в точці $L^* = 0,471$ зони А: а – $Re = 95000$; б – $Re = 55000$

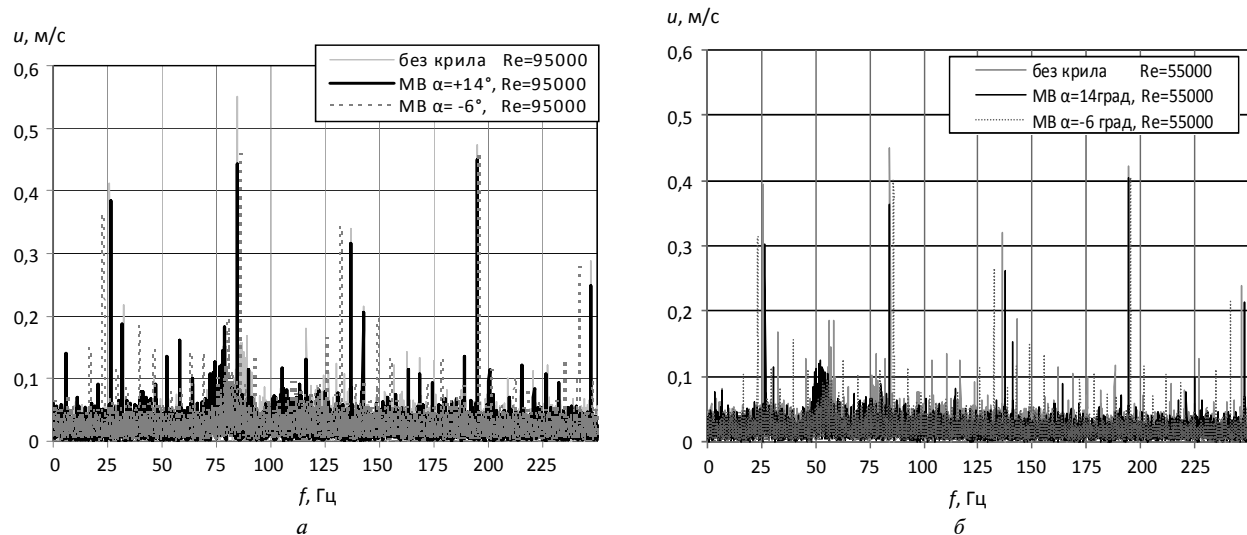


Рис. 6. Основні енергоємні частотні смуги експериментальних даних колової складової миттєвої швидкості в точці $L^* = 0,605$ зони Б: а – $Re = 95000$; б – $Re = 55000$

розрізненими з довірчою ймовірністю $P = 0,9$, що вказує на явний вплив керувальних дій на колову складову миттєвої швидкості. При $\chi^2 < \chi_{кр}^2$ гістограми є статистично нерозрізненими, що безпосередньо не вказує на наявність такого відгуку, проте це не означає неможливості перерозподілу енергії між вихорами різних масштабів. У безпосередній близькості до глухого торця при $L^* = 0,75$ криві розподілу χ^2 для обох складових швидкості збігаються з прямою $\chi_{кр}^2$. Ця характерна точка потребує більш детального аналізу як гістограм розподілу складових швидкості (рис. 8), так і амплі-

тудно-частотних характеристик (рис. 9), особливо при їх зіставленні. Позначення “МВ” на графіках означає керувальні впливи крила МВ253515.

Як видно з рис. 8, при роботі вихрових джгутів крилового ВГ у соплі в зазначеній характерній точці тупикової зони відбувається явне зменшення середньої швидкості течії. Натомість, з амплітудно-частотних характеристик (див. рис. 9) впливає таке ж явне зростання амплітуд пульсаційного руху з появою низки нових енергоємних частот за наявності керувальної дії. Це може свідчити про перерозподіл енергії середнього руху на користь енергії

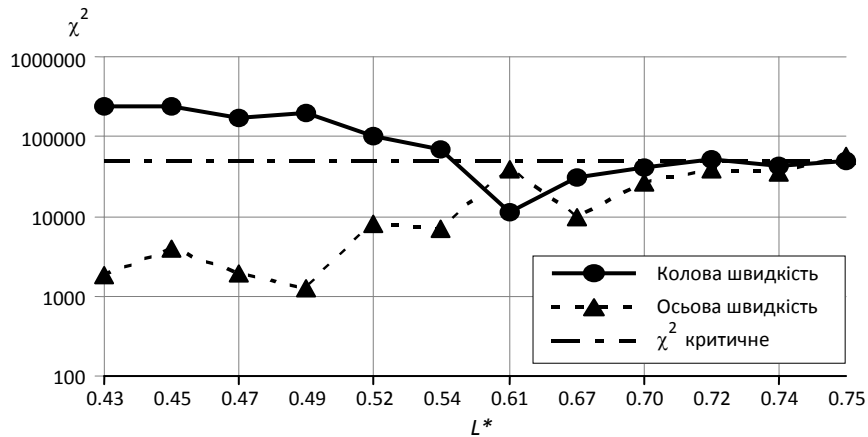


Рис. 7. Розподіл критерію Пірсона вздовж тупикової зони вихрової камери при керувальних діях у вхідному соплі камери порівняно з випадком без керувальних дій

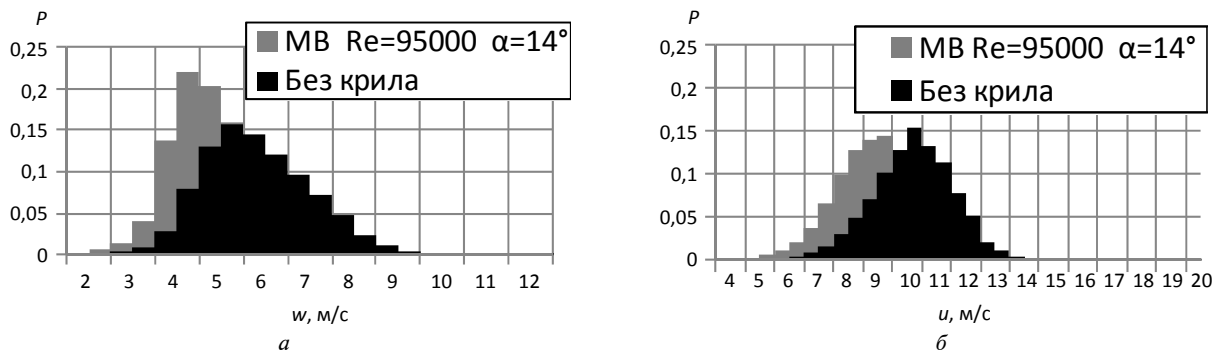


Рис. 8. Гістограми розподілу осьової (а) та колової (б) складових миттєвої швидкості в точці $L^* = 0,75$

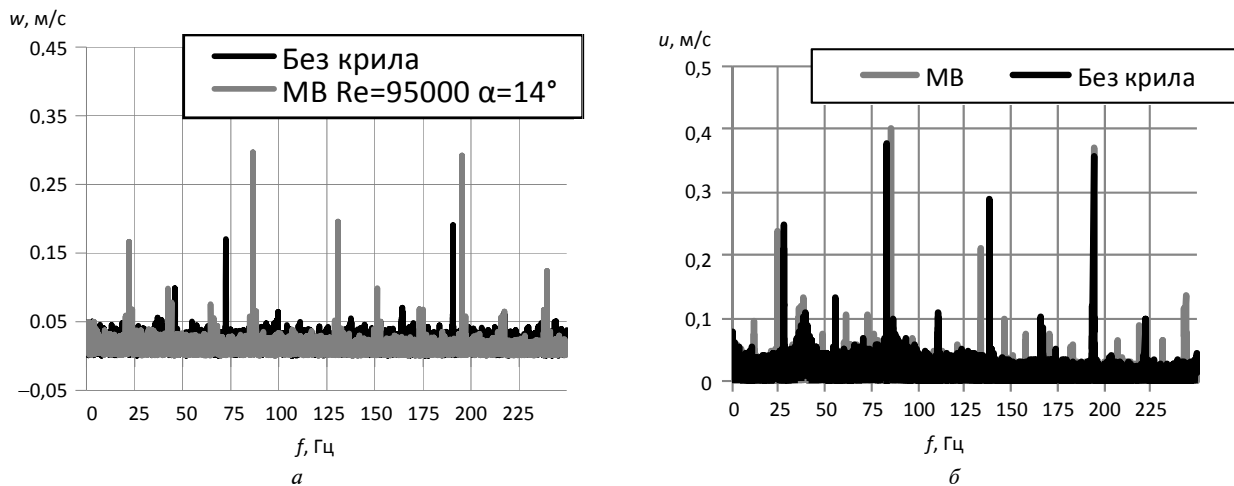


Рис. 9. Амплітудно-частотні характеристики миттєвих осьових (а) та колових (б) швидкостей течії в точці $L^* = 0,75$ при $Re = idem, \alpha = idem$

пульсацій у результаті взаємної сприйнятливості керувальних вихорів крила і керованих КВС у тупиковій зоні камери. Ефект керування структурою течії в порожнині камери може бути з'ясований аналізом характеристик течії у вихідному перерізі ВК. Проаналізуємо, наприклад, амплітудно-частотну характеристику

миттєвих колових швидкостей потоку в зоні максимального впливу спіралеподібної ЕКВС активної частини ВК на безрозмірному радіусі $r^* = r/r_0 = 0,823$ вихідного перерізу для варіантів із використанням крила-вихорогенератора та без нього (рис. 10). Основні статистичні параметри сигналів зведено в табл. 3.

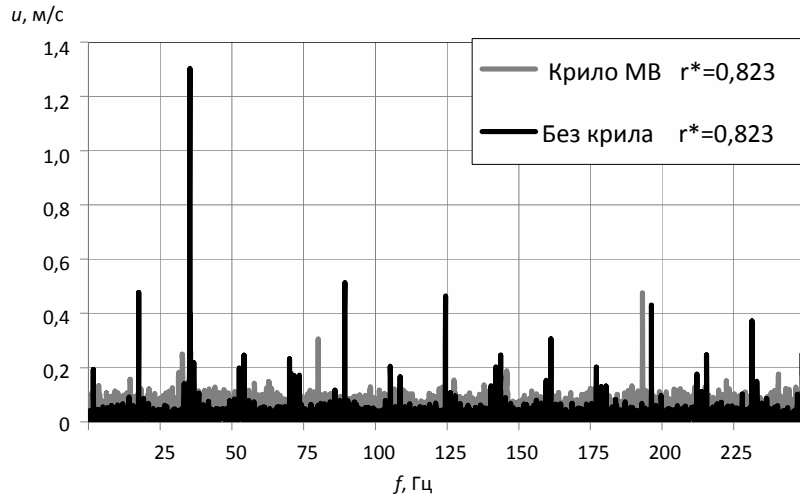


Рис. 10. Вплив крила-вихорогенератора МВ253515 у вхідному соплі на амплітудно-частотну характеристику колових швидкостей у характерній зоні вихідного перерізу вихрової камери при $\alpha = +14^\circ$, $Re = 95000$

Таблиця 3. Статистичні характеристики течії в точці $r^* = 0,823$ вихідного перерізу вихрової камери

Вхідне сопло ВК	Средня швидкість, м/с	С.к.в.	Дисперсія	Число Кармана	Енергія пульсацій
Без крила-вихорогенератора	12,71	2,02	4,10	0,16	2,05
З крилом-вихорогенератором МВ253515	10,58	2,65	7,03	0,25	3,52

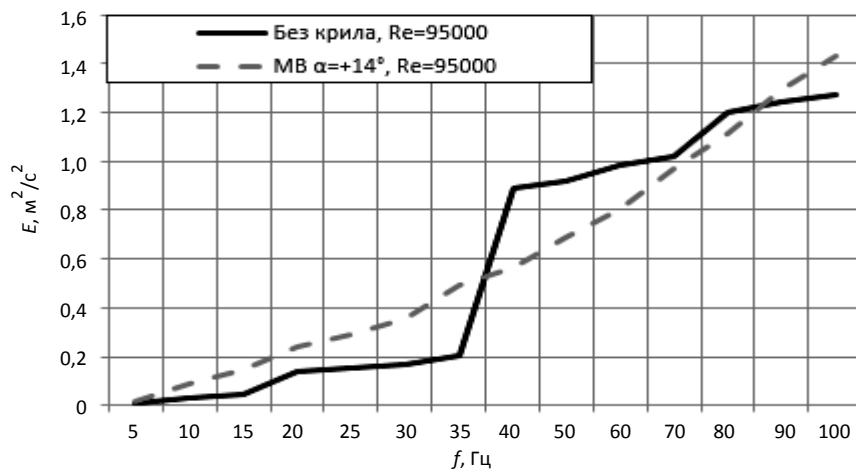


Рис. 11. Енергія пульсації колових швидкостей потоку в зоні $r^* = 0,823$ вихідного перерізу вихрової камери

Останній стовпець табл. 3 відображає результати впливу керувальних дій на енергію пульсаційного руху газу в точці $r^* = 0,823$ вихідного перерізу ВК. Енергія пульсацій визначається рівнянням $E = 0,5D$, де D – дисперсія колової складової актуальної швидкості. Аналіз рис. 10 і табл. 3 дає змогу зробити висновок про те, що наявність вихорогенератора на 72 % підвищує енергію пульсацій швидкості потоку в характерній зоні на виході з ВК у частотній смузі 0–250 Гц. Крім того, було проведено

аналіз енергетичного балансу пульсацій колових швидкостей залежно від смуги пропускання фільтра нижніх частот у точці $r^* = 0,823$ вихідного перерізу камери для найбільш енергоємного діапазону частот 0–100 Гц. Смуги пропускання цифрового фільтра нижніх частот збільшувалися від 0–5 Гц, 0–10 Гц і так далі до 0–100 Гц. Графіки зміни енергії пульсацій швидкості потоку без крила-вихорогенератора і з його використанням залежно від смуг пропускання фільтра зображені на рис. 11.

Аналіз рис. 11 дає змогу зробити висновок, що наявність крила-вихорогенератора підвищує енергію пульсаційної швидкості в смузі частот 0–35 Гц приблизно в 1,5–2 рази, а в смузі частот 35–85 Гц зменшує її на 20–30 %. Таким чином, спостерігається “перекачування” енергії пульсацій від відносно дрібних вихорів до вихорів більш крупних масштабів, які найбільшим чином впливають на процеси переносу маси, імпульсу та енергії в потоках.

Визначальними факторами такої реакції вихідної частини ЕКВС на дію керувальних вихорових шнурів є їх безпосередній вплив на початкову фазу утворення ЕКВС, оскільки хорда крила сумірна з протяжністю соплового тракту; колінеарність осей збудження керувальних вихорів і керованих вихрових утворень при їх зародженні; сумірність енергетичних характеристик взаємодіючих вихрових систем, що зумовлена формуванням їх вхідним потоком за єдиних топологічних умов.

Висновки

У роботі експериментально доведена можливість ефективного керування ЕКВС, які визначають процеси масо- і теплопереносу у вихрових камерах змішування. Запропонований спо-

сіб полягає у керувальних діях на ЕКВС системою неперервних упорядкованих вихрових шнурів, які генеруються нерухомими крилами кінцевого розмаху, вмонтованими у вхідному соплі камери.

Незважаючи на відносно невеликі прояви позитивного ефекту впливу керувальних дій на ЕКВС в об’ємі тупикової частини камери, засвідчено підвищення енергії пульсацій швидкості потоку в характерній зоні вихідного перерізу ВК на 72 %.

Застосований метод дослідження дав змогу при реалізації запропонованого способу керування ЕКВС виявити явища перерозподілу енергії середнього руху газу на користь енергії пульсацій у тупиковій зоні камери, а також “перекачування” енергії пульсацій від дрібних вихорів до більш крупних на виході з камери змішування. Це дає змогу використовувати цей метод для керування аеро- і гідродинамічними процесами змішування середовищ.

Потребують подальшого дослідження механізми “зворотного каскаду” передачі турбулентної енергії в обмежених закручених потоках для практичного використання їх з метою підвищення ефективності процесів переносу у вихрових технологічних і енергетичних апаратах.

References

- [1] M.A. Goldshtik, *Vortex Flows*. Moscow, SU: Nauka, Siberian Branch, 1981, 366 p.
- [2] V.K. Schukin and A.A. Khalatov, *Heat Transfer, Mass Transfer and Hydrodynamics of the Swirl Flows in Axisymmetric Channels*. Moscow, SU: Mashinostroenie, 1982, 200 p.
- [3] A.A. Khalatov *et al.*, *Heat Transfer and Fluid Flow in the Fields of Centrifugal Forces*, vol. 3, *Swirl Flows*. Kyiv, Ukraine: Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, 2000, 474 p.
- [4] A.K. Gupta *et al.*, *Swirl Flows*. Kent: Abacus Press, 1984, 475 p.
- [5] S.S. Kutateladze *et al.*, *Aerodynamics and Heat and Mass Exchange in Bounded Vortex Flows*. Novosibirsk, SU: Institute of Thermophysics, Academy of Sciences of the USSR, Siberian Branch, 1987, 283 p.
- [6] I.I. Smulsky, *Aerodynamics and Processes in Vortex Chambers*. Novosibirsk, Russia: VO Nauka, 1992, 301 p.
- [7] O.V. Mitrofanova, *Hydrodynamics and Heat Transfer of the Swirl Flows in Channels of Nuclear Power Installations*. Moscow, Russia: Fizmatlit, 2010, 288 p.
- [8] K. Oberleithner *et al.*, “Three-dimensional coherent structures in a swirling jet undergoing vortex breakdown: stability analysis and empirical mode”, *J. Fluid Mech.*, vol. 679, pp. 383–414, 2011. doi: 10.1017/jfm.2011.141
- [9] C.E. Cala *et al.*, “Coherent structures in unsteady swirling jet flow”, *Exp. Fluids*, vol. 40, pp. 267–276, 2006. doi: 10.1007/s00348-005-0066-9
- [10] S.V. Alekseenko *et al.*, “Study of vortex core precession in combustion chamber”, *Teplofizika i Aeromehanika*, vol. 20, no. 6, pp. 695–703, 2013.
- [11] R.A. Makarenko and V.N. Turick, “Kinematics of flow in a dead end part of a vortex chamber”, *Int. J. Fluid Mech. Res.*, vol. 31, no. 3, pp. 299–306, 2004. doi: 10.1615/InterJFluidMechRes.v31.i3.70
- [12] V.N. Turick, “Coherent vortical structures in bounded swirling flows”, *Journal of Cherkassy State Technological University*, no. 2, pp. 58–67, 2004.
- [13] V.A. Kochin and V.N. Turick, “Methodical features of the hot-wire experimental investigation of flow structure in vortex chamber”, *Journal of Mechanical Engineering of NTUU “KPI”*, no. 47, pp. 54–57, 2005.

- [14] V.N. Turick, "On hydrodynamic instability of flows in vortex chambers", *Promyslova Gidravlika i Pnevmatyka*, no. 3, pp. 32–37, 2006.
- [15] V.V. Babenko *et al.*, "Görtler vortices over concave surface of the vortex chambers inlet part", *Applied Hydromechanics*, vol. 19, no. 2/3, pp. 25–36, 2007.
- [16] V.V. Babenko and V.N. Turick, "Breadboard model of flow in the vortex chamber", *Applied Hydromechanics*, vol. 10, no. 3, pp. 3–19, 2008.
- [17] W. Schilz, "Untersuchungen über den Einfluss biegeformiger Wandschwingungen auf die Entwicklung der Strömungsgrenzschicht", *Acustica*, vol. 15, no. 1, pp. 27–36, 1965.
- [18] O.H. Wehrmann, "Tollmien-Schlichting waves under the influence of a flexible wall", *The Phys. of Fluids*, vol. 8, no. 7, pp. 1389–1390, 1965. doi: 10.1063/1.1761414
- [19] M.V. Morkovin and E. Reshotko, "Dialogue on progress and issues in a stability and transition research", in *Opening Invited Lecture Third IUTAM Symp. on Laminar-Turbulent Transition*, Toulouse, France, Sept., 1989, pp. 1–24.
- [20] V.V. Babenko, "Control of the coherent vortical structures of a boundary layer", in *Aerodynamic Drag Reduction Technologies*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2001, pp. 341–350 [Proc. CEAS/DragNet Eur. Drag Red. Conf., Potsdam, Germany, 19–21 June, 2001].
- [21] V. Babenko and V. Turick, "Coherent vortical structures control in flat and curvilinear parietal flows", in *Proc. World Congress "Aviation in the 21-st Century"*, Kyiv, 14–16 Sept., 2003, pp. 2.54–2.58.
- [22] V.N. Turick *et al.*, "On dynamic technique of the flow structure control in the vortex chamber", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5/7, pp. 52–59, 2012.
- [23] V.N. Turick and D.Ye. Milukov, "The outlet flow structure of vortex chamber with end jet actions", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 3/8, pp. 45–51, 2014.
- [24] V.N. Turick and V.O. Kochin, "Passive methods of coherent vortical structures control in vortex chambers. Part 1. Spectral evaluation of efficiency", *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 6, pp. 54–65, 2015 (in Ukrainian).
- [25] V.N. Turick and V.O. Kochin, "Passive methods of coherent vortical structures control in vortex chambers. Part 2. Dispersion analysis of efficiency", *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 5, pp. 68–77, 2016. doi: 10.20535/1810-0546.2016.5.77463
- [26] V.O. Kochin *et al.*, "Features of the choice and operation conditions of wing eddy-generator in inlet nozzle of vortex chamber", in *Proc. XVII Int. Conf. Progressive Technics, Technology and Education*, Kyiv-Odessa, 21–24 June, 2016, pp. 144–146.
- [27] M.S. Selig *et al.*, *Summary of Low-Speed Airfoil Data*, vol. 1. Virginia: SoarTech Publications, 1995, 292 p.
- [28] M.S. Selig *et al.*, *Airfoils at Low Speeds*. Virginia: SoarTech Publications, 1989, 398 p.
- [29] P.V. Novitskii and I.L. Zograf, *Estimation Error of Measuring Results*. St. Petersburg, Russia: Energoatomizdat, 1991, 304 p.
- [30] J. Bendat and A. Piersol, *Random Data*. Moscow, SU: Mir, 1989, 540 p.
- [31] A.I. Kobzar, *Applied Mathematical Statistics. For Engineers and Scientists*. Moscow, Russia: Fizmatlit, 2006, 816 p.

В.Н. Турик, В.А. Кочин, М.В. Кочина

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КОГЕРЕНТНЫМИ ВИХРЕВЫМИ СТРУКТУРАМИ В КАМЕРЕ СМЕШЕНИЯ КРЫЛЬЕВЫМИ ВИХРЕГЕНЕРАТОРАМИ

Проблематика. Малозатратное управление энергонесущими когерентными вихревыми структурами (ЭКВС), а следовательно, и процессами переноса массы, импульса и энергии в вихревых камерах смешения (ВК) для повышения эффективности рабочих процессов вихревых технологических и энергетических аппаратов.

Цель исследования. На основе принципа взаимной восприимчивости вихревых структур исследовать реакцию ЭКВС в тупиковой части камеры и на выходе из нее на направленные управляющие воздействия концевых вихревых шнуров, которые создают крыльевые вихрегенераторы во входном сопле ВК. Дать количественную оценку "тонкому" влиянию на ЭКВС, которые определяют характеристики перемешивания потоков в ВК.

Методика реализации. Сочетание экспериментального исследования формирования управляющих вихрей и экспериментальных характеристик ЭКВС с теоретическим анализом аэродинамической модели крыльевого вихрегенератора.

Результаты исследования. Обнаружены явления перераспределения энергии среднего движения газа в пользу энергии пульсаций в тупиковой зоне камеры, а также "перекачивания" энергии пульсаций от малых вихрей к более крупным на выходе из камеры смешения. Несмотря на относительно небольшие проявления положительного эффекта влияния управляющих воздействий на ЭКВС в объеме тупиковой части камеры, обнаружено повышение энергии пульсаций скорости потока в характерной зоне выходного сечения ВК до 72 %.

Выводы. Экспериментально доказана возможность эффективного управления ЭКВС, которые определяют процессы массо- и теплопереноса в вихревых камерах смешения. Управление осуществляется системой непрерывных упорядоченных вихревых шнуров, которые генерируются неподвижными крыльями конечного размаха, смонтированными во входном сопле камеры.

Ключевые слова: камера смешения; когерентные вихревые структуры; управление; вихревые шнуры; крыльевой вихрегенератор; взаимная восприимчивость.

V.N. Turick, V.O. Kochin, M.V. Kochina

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF COHERENT VORTEX STRUCTURES CONTROL IN THE MIXING CHAMBER BY MEANS OF WING EDDY-GENERATORS

Background. Low-expended control of energy-carrying coherent vortex structures (ECVS), and, consequently, of mass, momentum and energy transfer in vortex mixing chambers (VC) to increase the working processes efficiency of vortical technological and power devices.

Objective. The aim of the paper is to investigate the reaction of ECVS in the dead-end part of the chamber and its exit on the directed control actions of the tip vortex cords, created by wing eddy-generators in the inlet nozzle of VC, based on mutual susceptibility principle of vortex structures. To give a quantitative assessment of the "subtle" effect on the ECVS, which determine the characteristics of mixing flows in the VC.

Methods. Combination of the experimental study of controlling vortices formation and the ECVS experimental characteristics with the theoretical analysis of the aerodynamic model of the wing eddy-generator.

Results. The phenomenon of average gas motion energy redistribution for the advantage of pulsation energy in the dead-end zone of the chamber, as well as pulsation energy "pumping" from small vortices to larger ones at the mixing chamber outlet were discovered. In spite of relatively small manifestations of the positive influence of controlling actions on the ECVS in the volume of the chamber dead-end part, an increase of the flow velocity pulsation energy in the characteristic zone of the VC outlet section was up to 72 %.

Conclusions. The possibility of the effective control of ECVS, which determine the processes of mass and heat transfer in vortex mixing chambers, is experimentally proved. Control is carried out by a system of continuous ordered vortex cords, which are generated by fixed wings of finite span, mounted in the chamber input nozzle.

Keywords: mixing chamber; coherent vortex structures; control; vortex cords; wing eddy-generator; mutual susceptibility.

Рекомендована Радою
Механіко-машинобудівного інституту
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
17 червня 2018 року

Прийнята до публікації
6 вересня 2018 року