

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний авіаційний університет

Кочіна Марія Вікторівна

УДК 533.6.08:532.527

**КЕРУВАННЯ КОГЕРЕНТНИМИ ВИХРОВИМИ
СТРУКТУРАМИ В КАМЕРАХ ЗМІШУВАННЯ КРИЛОВИМИ
ВИХОРОГЕНЕРАТОРАМИ**

01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Турик Володимир Миколайович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», професор кафедри прикладної
гідроаеромеханіки і механотроніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник відділу гідробіоніки та
керування примежовим шаром
Інституту гідромеханіки НАН України
Воскобійник Володимир Анатолійович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник відділу
високотемпературної термогазодинаміки
Інституту технічної теплофізики НАН України
Кобзар Сергій Григорович.

Захист дисертації відбудеться 06 грудня 2018 року о 15⁰⁰ годині в ауд. 9.209 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.05 в Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розісланий 29 жовтня 2018 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



І.О. Ластівка

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Вихрові камери змішування (ВК) широко використовуються в різних галузях: від енергетики та авіації до харчової і легкої промисловості, зокрема в котлах, циліндрах двигунів внутрішнього згоряння, камерах згоряння ракетних і газотурбінних двигунів, змішувачах тощо. Локальна або глобальна закрутка потоків застосовується, головним чином, з метою інтенсифікації процесів переносу маси, імпульсу та енергії в потоках рідин і газів. Однак дія відцентрових сил за наявності як радіальних, так і осьових градієнтів тиску в зсувних потоках ВК спричиняє формування когерентних вихрових структур (КВС) різних видів та гідроаеродинамічні процеси з далеко не завжди прогнозованими особливостями. Механізми формування, розвитку та взаємодії таких утворень в обмежених закручених потоках вивчені недостатньо, що спричиняє і відсутність загальноприйнятих методик щодо принципів керування КВС в порожнинах ВК, зокрема на мікрорівні. Це певним чином гальмує пошуки найбільш ефективних шляхів впливу на структуру потоків для покращення таких характеристик, як аерогідродинамічний опір, якість перемішування робочих середовищ, повнота згоряння палив в топкових пристроях і теплових двигунах і т. п. Звичайні для практики проектування ВК методики базуються на інтегральних підходах при варіюванні конструктивних параметрів традиційних вузлів і елементів апаратів. Більш раціональними видаються підходи, які враховують тонку структуру закручених потоків, специфіку примезових шарів на криволінійних стінах та передбачають організацію малозатратних спрямованих керувальних дій на їх найбільш енергоємні КВС (ЕКВС), оскільки вони генерують низькочастотні складові турбулентного руху та зумовлюють максимальний внесок в турбулентну дифузію. Виходячи з цього, розробка одного із способів реалізації такого підходу до керування вихровими структурами для удосконалення масо- та енергообмінних процесів в апаратах вихрового типу є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на експериментальному стенді «Вихрова камера» кафедри прикладної гідроаеромеханіки та механотроніки Механіко–машинобудівного інституту КПІ ім. Ігоря Сікорського відповідно до діючого Договору № 1 про творче співробітництво від 29 листопада 2006 р. з Інститутом гідромеханіки Національної академії наук України за темою: «Дослідження закономірностей внутрішніх закручених течій і методів управління ними».

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає в розробці ефективного способу спрямованого керування ЕКВС у камерах змішування за допомогою кінцевих вихорів від нерухомих і відносно тонких крилових елементів, які вмонтовані у впускному соплі камер. Перспективність запропонованого методу керування обумовлена тим, що інтенсивність та енергетичні параметри кінцевих вихорів, які генеруються крилом, прогнозовані та можуть бути вибраними у відповідності до характеристик ЕКВС у ВК згідно з принципом взаємної сприйнятливості вихрових утворень.

Основні задачі дослідження:

1. На основі аналізу фізичної картини течії в обмеженому просторі ВК

змішування з розвиненою тупиковою частиною обґрунтувати можливість ефективного і малозатратного керування ЕКВС.

2. Розробити програму і розрахункову методику експериментального дослідження фізичного механізму керувальних впливів на ЕКВС застосуванням нерухомих крил у впускному соплі ВК та знайти критерій ефективності такого застосування.

3. Використовуючи знайдений критерій ефективності, здійснити обґрунтований вибір найбільш раціональних геометричних та аеродинамічних параметрів крил для спрямованих керувальних дій.

4. Дослідити особливості формування керувальних вихрових шнурів, які генеруються нерухомим крилом вихорогенератора за умов обмеженості проточного тракту вхідного сопла камери.

5. Розробити аеродинамічну модель крилового вихорогенератора, яка може бути узгодженою з характеристиками керованої ЕКВС відповідно до принципу взаємної сприйнятливості вихрових утворень.

6. Проаналізувати реакцію ЕКВС у тупиковій та проточній частинах камери на керувальні дії соплового вихорогенератора.

7. Здійснити узагальнення отриманих експериментальних результатів та надати практичні рекомендації щодо запропонованого способу керування структурою течії у ВК змішування.

Об'єкт дослідження – гідромеханічні процеси, що відбуваються в обмежених закручених потоках робочих середовищ у вихрових камерах змішування.

Предмет дослідження – малозатратне керування когерентними вихровими структурами, що визначають ефективність процесів переносу в камерах змішування.

Методи досліджень – фізичне моделювання на основі фундаментальних положень аеродинаміки та статистичної обробки результатів експериментів. Достовірність отриманих результатів обумовлена використанням випробуваних методів дослідження відповідно до прийнятих стандартів, застосуванням методики контрольних вимірювань на еталонній моделі профілів швидкості на різних режимах течії при порівнянні їх з класичними даними теорії примежового шару, коректною постановкою задач, чіткою логікою їх розв'язання, застосуванням сучасних методик статистичної обробки інформації та узагальнення експериментальних даних, а також узгодженням результатів розрахунків з даними експериментів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розвитку методів керування когерентними вихровими структурами течії в камерах змішування. Наукову новизну роботи становлять наступні результати і положення:

1. На основі розробленої методики аеродинамічного розрахунку знайдено критерій оцінки ефективності крилових вихорогенераторів для керування інтенсивністю процесів перемішування в порожнині камери змішування із зосередженим тангенціальними підведенням середовища.

2. Вперше запропоновано розрахунково–експериментальний метод вибору найбільш ефективної конструкції соплового вихорогенератора для спрямованого

керування процесами перемішування у вихрових камерах у діапазоні чисел $Re = 50\,000\text{--}100\,000$.

3. Розроблено теоретичне обґрунтування методики узгодження характеристик керувальних впливів та ЕКВС обмежених течій у полях відцентрових сил на підставі принципу взаємної сприйнятливості вихрових структур.

4. Шляхом термоанемометрування течії та застосування статистичних методів аналізу експериментально доведена можливість раціональним вибором параметрів крилових елементів соплового вихорогенератора суттєво підвищити інтенсивність пульсацій швидкості течії, а отже, процесів переносу маси, імпульсу та енергії в закручених потоках камер змішування.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблений спосіб малозатратного керування ЕКВС у ВК шляхом застосування нерухомих крил у впускних соплах відкриває перспективу вдосконалення існуючих конструкцій камер змішування та розробки новітнього обладнання з покращеними масогабаритними, енергетичними, екологічними показниками та ресурсом експлуатації.

2. Доведена ефективність практичного застосування принципу взаємної сприйнятливості вихрових структур щодо систем керування процесами переносу в робочих середовищах ВК різного призначення.

3. Запропонована методика зазначеного принципу керування ЕКВС за допомогою крилових вихорогенераторів у впускних соплах дозволяє використовувати в інженерній практиці проектування камер змішування дані продувок аеродинамічних профілів.

4. Результати дисертаційних досліджень реалізовані на Монастирищенському котельному заводі ТОВ МВВФ «Енергетик» при розрахунках та проектуванні пальникових пристроїв котлів і теплообмінного обладнання, в яких рух газів і рідин відбувається під впливом відцентрових сил. Матеріали дисертації дають можливість підвищити ефективність та надійності експлуатації устаткування, що виготовляє підприємство ТОВ МВВФ «Енергетик».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення і результати, які виносяться на захист, належать автору особисто. Автор брала активну участь в удосконаленні експериментального стенду і засобів візуалізації картини течії в порожнині камери і на криловому вихорогенераторі, приймала участь в плануванні та розробці методик проведення візуалізації, інструментальних вимірювань, здійснювала обробку отриманих експериментальних даних, що дозволило зробити висновки щодо процесів перемішування, які відбуваються в об'ємі вихрової камери, та ефективності керування ними.

У опублікованих у співавторстві працях здобувачу належить наступне: [1, 2, 3, 12, 15, 16-18] – аналіз зсувних явищ у потоках вихрової камери; [1, 2, 4] – активна участь у формулюванні робочої гіпотези та розробці експериментальної методики дослідження; [5] – узгодження аеродинамічної моделі крилового вихорогенератора з характеристиками керованої ЕКВС; [6, 8, 12, 14] – проведення експериментальних

досліджень, обробка та аналіз результатів експериментів; [7, 9–11] – проведення експериментальних досліджень потоку робочої рідини; [8, 13, 14] – удосконалення дослідного стенду; [14,15-23] – аналіз впливу керувального елемента на структуру потоку у вихровій камері.

Апробація результатів дисертації. Отримані результати дисертаційного дослідження доповідались і отримали позитивну оцінку на: засіданнях кафедри прикладної гідроаеромеханіки механіко-машинобудівного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», XXI Міжнародній науково–технічній конференції: «Прикладні задачі математики і механіки» (м. Севастополь, 2013 р.), XIV Міжнародній науково–технічній конференції «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Одеса, 2013 р.), XIX Міжнародній науково–технічній конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (м. Кіровоград 2014 р.), XX Міжнародній науково–технічній конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (м. Київ, 2015 р.), XVI Міжнародній науково–технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Одеса, 2015 р.), XVI Міжнародній науково–технічній конференції АС ПП «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Суми, 2015 р.), Міжнародній науково–технічній конференції «Актуальні проблеми судноплавства, суднобудівництва та судноремонту» м. Одеса, 2015 р.), XXI Міжнародній науково–технічній конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (м. Київ, 2016 р.), XVII Міжнародній науково–технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Одеса, 2016 р.), XVIII Міжнародній науково–технічній конференції «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Вінниця, 2017 р.), ВНТК молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню» (м. Київ, 2017 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 23 наукові праці, з них 5 статей у журналах, що входять до переліку фахових видань України з технічних наук, з них 3 видання, що включені до міжнародних наукометричних баз даних, 1 патент на корисну модель та 17 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Обсяг і структура дисертації.

Дисертаційна робота викладена на 169 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і двох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 123 сторінки основного друкованого тексту, 8 таблиць, 45 рисунків. Список використаних джерел містить 140 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, розкрито наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про апробацію та наявні наукові публікації.

У першому розділі наведено результати критичного огляду літературних джерел щодо дослідження впливу закручених потоків в процесах масопереносу в вихрових камерах та їх використання в енергетиці та промисловості. На основі

проведеного аналізу обґрунтовано актуальність вибору теми дисертаційного дослідження, сформульована мета роботи, а також перелік задач, які треба розв'язати для досягнення поставленої мети.

Дослідженню поведінки закручених потоків та їх практичному використанню присвячені роботи таких вітчизняних і зарубіжних вчених, як Вулліс Л.А., Гольдштїк М.О., Щукїн В.К., Халатов А.А., Авраменко А.О., Волчков Е.П., Гупта А., Ліллі Д., Сайред Н., Мочалїн Є.В. та їн. Переважна більшість робїт присвячена наближеним оцїнкам характеристик закручених потокїв на основї їнженерних пїдходїв. В основу аналітичних та теоретико-чисельних робїт покладено їснуючі моделї турбулентних течїй, а експериментальних – дослідження картин течїї, головним чином, на макрорївнї. В результатї пропонуються графіки розподїлу усереднених параметрїв потоку або сукупностї умовних векторїв, траєкторїй течїї, які схематично вказують напрямок руху частинок рїдини або газу. Застосування таких методїв обмежене особливостями конкретних конструкцїй та не завжди адекватними результатами комп'ютерного моделювання зсувної турбулентної течїї. Відповідним чином, на макрорївнї розглядається проблема органїзацїї процесїв переносу в робочих середовищах у внутрїшніх течїях в каналах та камерах.

Використання більш ускладнених моделей турбулентностї на основї їснуючих пїдходїв не розв'язує низки принципових проблем. Крім труднощїв пов'язаних з обчисленням, одна з головних проблем полягає в тому, що в турбулентних течїях їз зсувом статистична сукупність вихорїв, які формують актуальні значення параметрїв, не є взаємно незалежною сукупністю. Поряд їз стохастичними присутні детермінованї механїзми взаємодїї складових турбулентних течїй в полі відцентрових сил, що супроводжується рухом упорядкованих вихорїв, у тому числі найбільш енергетично «заряджених».

Результати досліджень Бабенка В.В., Турика В.М., Макаренка Р.О., Воскобїйника В.А. та Воскобїйника А.В. показують, що традиційно пропонованї засоби їнтегрального аналізу та керування турбулентним переносом в обмежених закручених потоках рїзномасштабної вихрової структури не можна вважати достатніми. Одним з найбільш перспективних напрямкїв пошуку ефективних засобїв покращення процесїв змїшування потокїв у вихрових камерах вважається напрямок розвитку методу спрямованих впливїв на ЕКВС на стадїї їх формування згїдно з принципом взаємної сприйнятливостї вихорїв. Розробцї цього методу керування ЕКВС у вихрових камерах присвячено дану дисертацїйну роботу.

Другий роздїл присвячений розробцї методики та програми проведення експерименту: удосконаленню експериментальної установкї, попереднїй візуалїзацїї та термоанемометруванню течїї в порожнинї ВК; візуалїзацїї течїї на крилових елементах у сопловому пристрої; зменшенню механїчних вїбрацїй основних вузлїв аеродинамїчного стенда та їх впливу на результати термоанемометричних вимїрювань полїв актуальної швидкостї, а також плануванню експериментальних досліджень.

Принципову схему експериментального стенда для дослідження макро- ї мїкроструктури течїї, а також ескїз вхїдного перерїзу впускного сопла з встановленим керувальним криловим елементом наведено на рис.1.

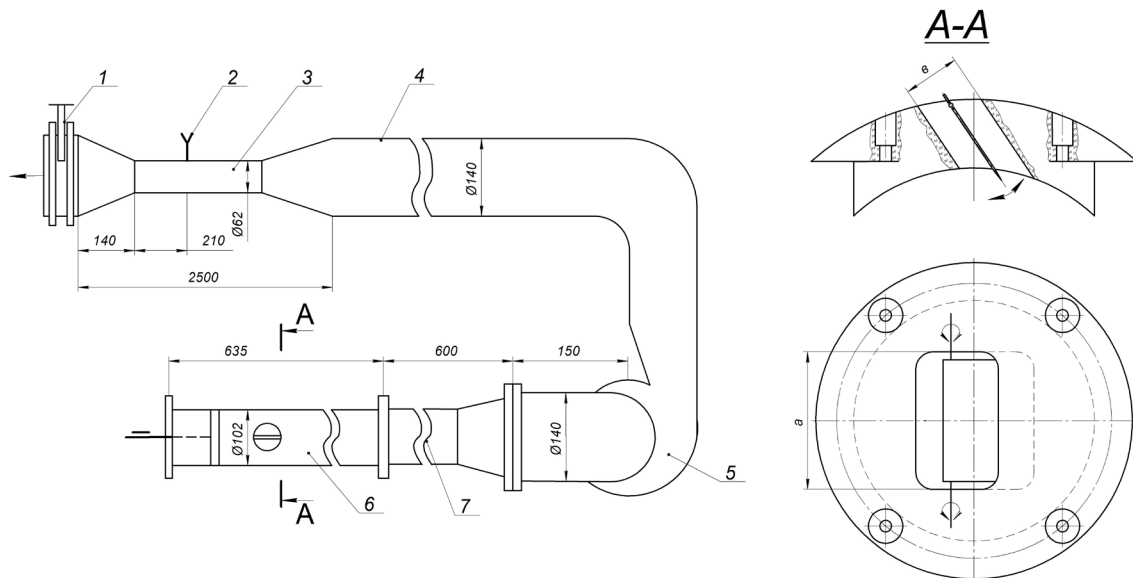


Рис. 1. Принципова схема експериментальної установки: 1 – змінна діафрагма, 2 – пневмометрична трубка, 3 – витратомірна ділянка, 4 – трубопровід, 5 – відцентровий вентилятор, 6 – робоча ділянка, 7 – проміжна ділянка.

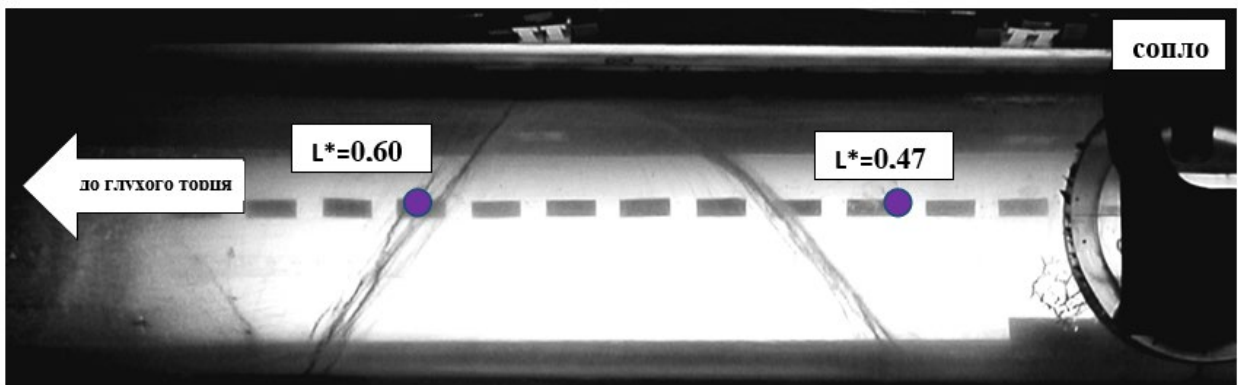


Рис. 2. Візуалізація ЕКВС у вихровій камері

Попереднє термоанемометрування було проведено по всій довжині тупикової зони вихрової камери з кроком 5 мм на відстані 5 мм від стінки камери (рис.2). Величини кроку були обрані на основі попередньої візуалізації течії у ВК. Для термоанемометрування за перерізом ВК були обрані дві найбільш характерні точки з безрозмірними координатами $L^*=0,605$ (безпосередньо на ЕКВС) та $L^*=0,470$ (на максимальному віддаленні від неї в зоні зародження вихрових структур біля вхідного сопла), де $L^*=L/L_0$ – безрозмірна координата відносно середини впускного сопла (L – поточна координата; L_0 – довжина тупикової частини ВК).

Попередня візуалізація течії олійною фарбою на криловому вихорогенераторі в проточному тракті сопла необхідна для наочного відображення кінцевих вихорів. За мету було поставлено отримати контрастну візуальну картину обтікання крила малого видовження і пересвідчитися в наявності кінцевих вихорів на крилі за допомогою нанесення масляної плівки на поверхню крила. В результаті обтікання поверхні потоком було отримано ряд знімків (рис. 3). При нанесенні фарби на нижню поверхню крила після обтікання потоком спостерігався характерний

«намив» її на верхній поверхні. Це явище пояснюється перетіканням повітряних мас з-під крила вгору разом з фарбою.

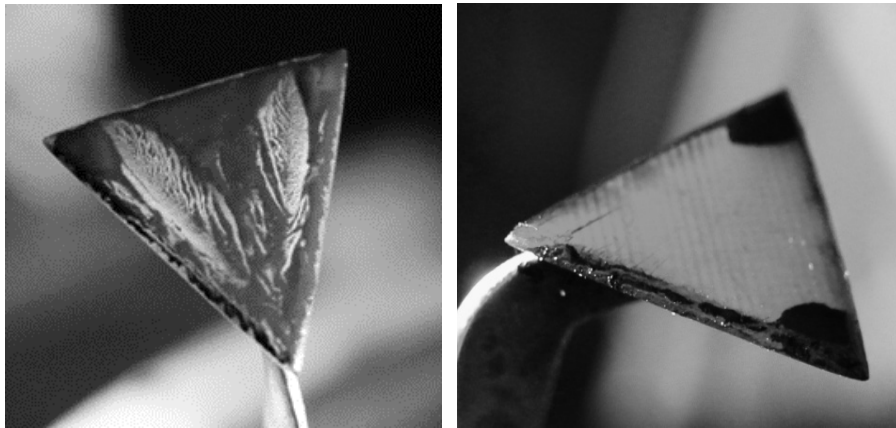


Рис. 3. Візуалізація формування кінцевих вихорів на нерухомому криловому елементі за допомогою олійної фарби

При підготовці до проведення досліджень було вжито низку заходів щодо зниження рівня вібрацій.

Планування експерименту в дисертаційній роботі включало всі необхідні етапи: кодування факторів, складання план-матриці експерименту, реалізацію плану експерименту, статистичну обробку результатів спостережень, але й мало низку особливостей. В якості вихідних досліджуваних параметрів прийняті: місцева осереднена за часом осьова швидкість в тупиковій зоні вихрової камери, місцева осереднена за часом колова швидкість в тупиковій зоні ВК, місцева осереднена за часом осьова швидкість на виході з ВК та місцева осереднена за часом колова швидкість на виході з ВК.

Аналіз був проведений на 3-х типах крила-вихорогенератора: прямокутне крило в плані з профілем MB253515, прямокутне крило в плані з профілем у вигляді плоскої пластини і трикутне крило в плані з профілем у вигляді плоскої пластини.

Третій розділ присвячено розробці методики оцінки ефективності крилового елемента у впускному соплі камери та побудові аеродинамічної моделі крилового вихорогенератора.

Виведення характеристики ефективності використання крила-вихорогенератора та аналіз основних факторів впливу на неї проведено двома етапами.

Безмежне обтікання крила. Повна аерогідродинамічна потужність крила N_R (кількість енергії, що відбирається крилом від потоку рідини за одиницю часу) дорівнює:

$$N_R = R \cdot v_\infty,$$

де v_∞ – швидкість потоку, що набігає на крило; R – повна аеродинамічна сила на крилі в потоці, що дорівнює

$$R = \sqrt{c_x^2 + c_y^2} \frac{\rho v_\infty^2}{2} S,$$

де ρ – густина середовища; S – площа крила в плані; c_y – коефіцієнт піднімальної сили крила у швидкісній (поточній) системі координат; c_x – коефіцієнт повного опору крила у швидкісній системі координат, який при дозвуковому обтіканні без

урахування впливу твердих меж дорівнює сумі коефіцієнтів профільного та індуктивного опорів відповідно: $c_x = c_x^{np} + c_{xi}$, причому коефіцієнт профільного опору складається з коефіцієнтів опору тиску c_x^p та опору тертя c_x^f .

В контексті даної роботи затрати енергії потоку на утворення та підтримку кінцевих вихрових шнурів за одиницю часу можна вважати корисною потужністю крила як вихорогенератора $N_i = R_i \cdot v_\infty$, де $R_i = c_{xi} \frac{\rho v_\infty^2}{2} S$ – індуктивний опір крила.

Ефективність використання крила-вихорогенератора можна оцінити коефіцієнтом η , що дорівнює відношенню витраченої на утворення та підтримку вихрових шнурів потужності до повної аеродинамічної потужності крила:

$$\eta = \frac{N_i}{N_R} = \frac{c_{xi}}{\sqrt{c_x^2 + c_y^2}}. \quad (1)$$

З урахуванням коефіцієнта індуктивного опору для крил малого видовження формула (1) набуває вигляду

$$\eta = \frac{2}{\pi\lambda} \sqrt{\frac{K_\infty^2}{1 + K_\infty^2}} c_y, \quad (2)$$

де λ – видовження крила; K_∞ – аерогідродинамічна якість крила в безмежному потоці.

Дослідження отриманої функції (2) дозволяє зробити висновок, що найбільший вплив на неї має відносне видовження крила λ та коефіцієнт піднімальної сили c_y , в той час як аерогідродинамічна якість крила K_∞ виявляє незначний вплив на коефіцієнт ефективності η .

Вплив близькості границь вхідного сопла на обтікання крила. Коефіцієнт ефективності крила малого видовження як вихорогенератора для випадку обтікання обмеженим потоком з урахуванням реального коефіцієнта опору крила $c_x^T = c_x + c_{xi}^T$,

де $c_{xi}^T = -\varepsilon \frac{S}{F} c_y^2$ – додатковий коефіцієнт індуктивного опору від «тунельного ефекту», F – площа поперечного перерізу проточного тракту сопла; ε – коефіцієнт, що залежить від форми прохідного перерізу, при відповідній границі $K_\infty \rightarrow K$ складатиме

$$\eta = \frac{2c_y}{\pi\lambda\sqrt{1 + \frac{1}{K^2}}} = \frac{2c_y}{\pi\lambda\sqrt{1 + \left(\frac{1}{K_\infty} - \varepsilon \frac{S}{F} c_y\right)^2}}, \quad (3)$$

де $1/K_\infty$ – обернена аеродинамічна якість крила в безмежному потоці.

На підставі розрахунків за формулою (3) було здійснено пошук оптимального профілю крила з відомих атласів крилових профілів для характерного діапазону чисел Рейнольдса $Re = 40\,000 \div 100\,000$. Орієнтуючись на максимальні значення коефіцієнта піднімальної сили c_y^{\max} , на найширший діапазон відповідних безвідривних кутів атаки $\alpha(c_y^{\max})$ при мінімальних величинах коефіцієнта лобового

опору C_x , а також на малу залежність коефіцієнта C_y від числа Re , найбільш прийнятним для даних цілей було обрано профіль типу MB253515 прямокутної форми в плані.

Згідно з теорією М.Є. Жуковського, в наближених розрахунках розглядають еквівалентну П-подібну аеродинамічну модель крила з постійною середньою циркуляцією Γ вздовж його розмаху: два напівнескінченні вихрові шнури, які збігаються з кінцевих краєвих крила, замикаються одним приєднаним вихором. Оскільки циркуляція швидкості має бути постійною за довжиною всієї вихрової системи, то циркуляція навколо вільних вихорів дорівнює циркуляції навколо приєднаного вихору.

Піднімальна сила несучого вихору при відстані між вихровими шнурами l_1 дорівнює $R_y = \rho_\infty v_\infty \Gamma l_1$. З іншого боку $R_y = c_y \frac{\rho_\infty v_\infty^2}{2} S$. Із цих співвідношень випливає так зване рівняння зв'язку для будь-якого перерізу крила

$$\Gamma = \frac{1}{2} c_y \frac{S}{l_1} v_\infty. \quad (4)$$

Умова рівності індуктивних опорів П-подібної вихрової системи та реального крила вимагає, щоб відстань між вільними вихорами l_1 була дещо більшою, ніж розмах крила l : $l_1 = lk$, де $k > 1$. Величина k залежить від форми крила в плані, від відносного видовження кила, але змінюється в межах $k = 1,02 \div 1,04$. Для крил прямокутної форми в плані (тонке прямокутне крило, крило MB253515) $S = b \cdot l$, де b – хорда крила. Тоді при $b = l = 0,02$ м з (4) маємо $\Gamma = \frac{1}{2,04} c_y v_\infty b$.

Згідно з теоремою Стокса, циркуляція Γ навколо крила дорівнює потоку вихорів через поверхню σ , пронизану сукупністю вихрових ниток із місцевою завихреністю $\vec{\Omega}$: $\Gamma = I = \iint_{\sigma} \vec{\Omega} \cdot d\vec{\sigma}$. Якщо увести усереднене значення модуля завихреності

вздовж розмаху крила $\bar{\Omega} = \frac{1}{\sigma} \iint_{\sigma} \Omega_i d\sigma$, то приходимо до рівності $\Gamma = I = \bar{\Omega} \sigma$. Але всі

вихрові нитки, які спрямовані вздовж розмаху крила, входять до кінцевих вільних вихорів із завихреністю $\bar{\Omega}_b$ та площею поперечного перерізу σ_b . Тоді за другою кінематичною теоремою Гельмгольца маємо $\bar{\Omega} \sigma = \bar{\Omega}_b \sigma_b$. Переходячи до усередненого значення кутової швидкості $\bar{\omega}_b$ вільних вихорів, відповідно до загальноприйнятої моделі локально недеформованих об'ємів газу можна записати:

$$\Gamma = 2 \bar{\omega}_b \sigma_b, \quad (5)$$

що дозволяє оцінити масштаб керувальних вихрових джгутів і перевірити можливість керування ЕКВС за принципом взаємної сприйнятливості вихрових структур.

У **четвертому розділі** наведено результати візуалізації, розрахунків та інструментального дослідження та основі термоанемометрування течії.

Візуалізація течії необхідна для визначення діапазону безвідривних додатних та від'ємних кутів атаки крил при зберіганні найбільш прийнятних умов стійкої

генерації керувальних вихорів за умов обмеженості проточного тракту вхідного сопла. Досліджувався характер обтікання двох крил прямокутної форми в плані з хордою 0,02 м та крила трикутної форми з висотою та основою по 0,02 м. За характером руху відбиваючих світло шовковинки робився висновок про безвідривне або відривне обтікання крил (рис. 4). За наявності кінцевих вихорів кожна точка шовковинки здійснює обертовий рух з частотою, що відповідає частоті обертання кінцевих вихорів, а вся шовковинка у цілому описує конічну поверхню. Величина частоти визначалася за кількістю кадрів відеоряду при одному оберті шовковинок при зйомці цифровими фотокамерами.

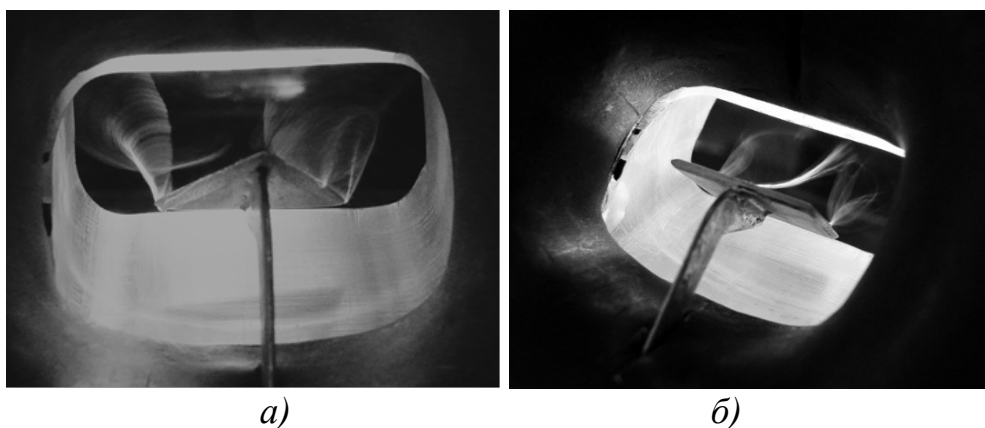


Рис. 4. Приклади картин візуалізації течії при кутах атаки крил: а – максимальному безвідривному (трикутне крило), б – відривному (пластина).

У табл. 1 наведено експериментальні дані щодо частот обертання кінцевих вихорів в зонах формування, необхідні для розрахунку площ перерізу вільних вихорів σ_v , а отже і їх діаметрів d_v згідно з формулою (5) (табл. 2). При цьому коефіцієнти піднімальної сили обрано при таких, визначених експериментально, максимальних безвідривних величинах кутів атаки за умов сопла: для крила MB253515 $\alpha(c_y^{\max})=14^\circ$; для пластини $\alpha(c_y^{\max})=12^\circ$, що відрізняється від аналогічних характерних кутів атаки тих самих крил у вільному потоці.

Таблиця 1

Частота обертання кінцевих вихорів при $\alpha_{\max} > 0$

Профіль крила	Середня частота обертання кінцевих вихорів n , 1/с	
	$Re = 55000$	$Re = 95000$
MB253515	189	259
Плоска пластина	176	236

Таблиця 2

Характеристики вихрової системи крил прямокутної форми в плані

Профіль крила	$Re = 55\ 000$			$Re = 95\ 000$		
	Γ , м ² /с	$\bar{\omega}_v$, 1/с	d_v , мм	Γ , м ² /с	$\bar{\omega}_v$, 1/с	d_v , мм
MB253515	0,32	1186,92	13,14	0,56	1626,52	14,76
Пластина	0,22	1105,28	11,25	0,38	1482,00	12,76

У попередніх дослідженнях (В.М. Турик, А.В. Воскобійник) були виміряні значення діаметрів d_1 і d_2 двох основних вихорів, з яких складається спіралеподібна ЕКВС «вуса» у пристінній області досліджуваної нами ВК при відповідному максимальному значенні числа Рейнольда Re . На відстані 2 мм від внутрішньої стінки камери $d_1=29,18$ мм, $d_2=10,20$ мм; на відстані 4 мм – $d_1=24,48$ мм, $d_2=21,42$ мм. Середні для пристінної області значення діаметрів вихрових складових ЕКВС дорівнюють відповідно $d_{1,c}=26,83$ мм і $d_{2,c}=15,81$ мм. Порівняння наведених в табл. 2 величин діаметрів вільних вихрових шнурів з вище зазначеними свідчить про однакові порядки величин аж до наближеної рівності. Таким чином, виконано одну з головних вимог взаємної сприйнятливості вихрових утворень. Цей факт обумовлений спільними геометричними та кінематичними умовами формування в обмеженому просторі тракту сопла як керувальних вихрових шнурів за крилом, так і спіралеподібної ЕКВС в кутових зонах сопла.

Оскільки поле миттєвих швидкостей відображає як детермінований, так і стохастичний характер турбулентної течії, то необхідний детальний аналіз розподілу актуальних швидкостей вздовж пристінної зони тупикової частини камери (обрано 12 точок). Щільність розподілу ймовірностей була представлена у вигляді гістограм при інтервалах групування 0,5 м/с і кількості їх, що відповідає одномодальним розподілам. Кількість інтервалів групування s експериментальних даних обиралась у межах $0,55n^{0,4} < s < 1,25n^{0,4}$, де n – кількість елементів у вибірці (одиничних вимірювань в реалізації за період T), $n=50000$. Перевірка на стаціонарність здійснювалась шляхом поділу кожної реалізації (100 с) на ряд інтервалів (10 с), обчислення для кожного інтервалу основних статистичних параметрів (середнього і дисперсії) та аналізу зміни даних параметрів за допомогою статистичних критеріїв (гіпотез). Алгоритм 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 12 точок. Аналіз гістограм засвідчив певний вплив керувальних дій крилового вихорогенератора на спіралеподібну ЕКВС – головну складову течії середовища в тупиковій зоні ВК. Для порівняння гістограм різних вибірок використовувався метод перевірки статистичних гіпотез за критерієм згоди Пірсона 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 критерію χ^2 для колових та осьових складових швидкості наведено на рис. 5.

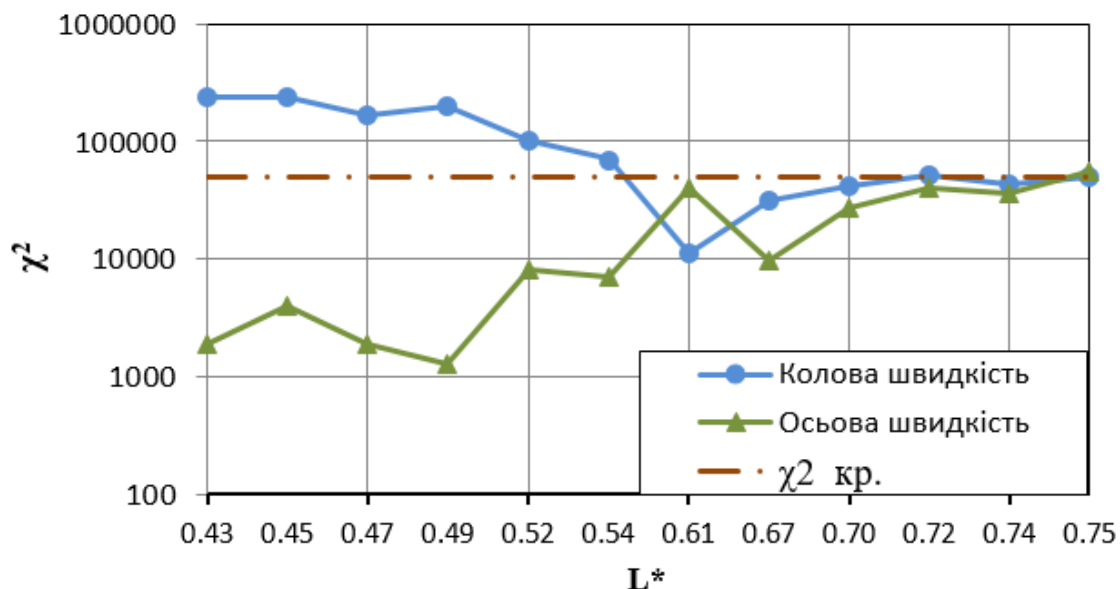


Рис. 5. Розподіл критерію Пірсона вздовж тупикової зони ВК при керувальних діях у вхідному соплі камери порівняно з випадком без керувальних дій

Як видно з рис. 5, вздовж 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 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. В 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 (для прикладу, колових) (рис. 6), так і амплітудно-частотних характеристик (рис. 7), особливо при їх зіставленні. Як видно з рис. 7, при роботі вихрових джгутів крилового вихорогенератора в соплі в зазначеній характерній точці тупикової зони спостерігається явне зменшення середньої швидкості течії. Натомість, з амплітудно-частотних характеристик впливає таке ж явне зростання амплітуд пульсаційного руху з появою низки нових енергонесучих частот при наявності керувальної дії. Це може свідчити про перерозподіл енергії середнього руху на користь енергії пульсацій в результаті взаємної сприйнятливості керувальних вихорів крила і керованих КВС в тупиковій зоні камери.

Оцінку ефективності керувальних впливів на ЕКВС в камері здійснено вимірюванням актуальних швидкостей у вертикальному напрямку вихідного перерізу ВК, а також виділенням усереднених за часом та пульсаційних складових. Це дозволило вирахувати відносні інтенсивності пульсацій за наявності крилового вихорогенератора при граничних безвідривних кутах атаки та за відсутності керувальної дії.

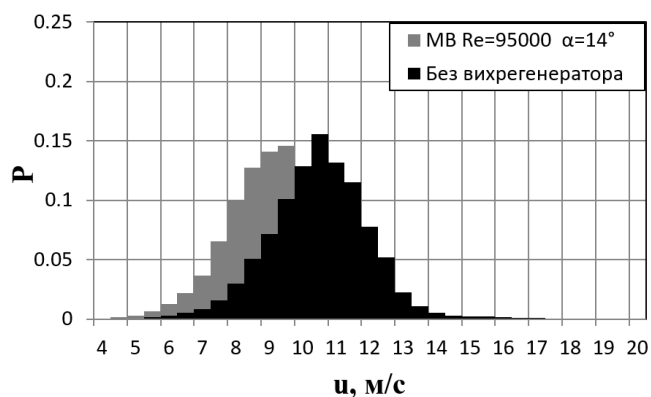


Рис. 6. Гістограми розподілу колової складової миттєвої швидкості в точці $L^*=0,75$

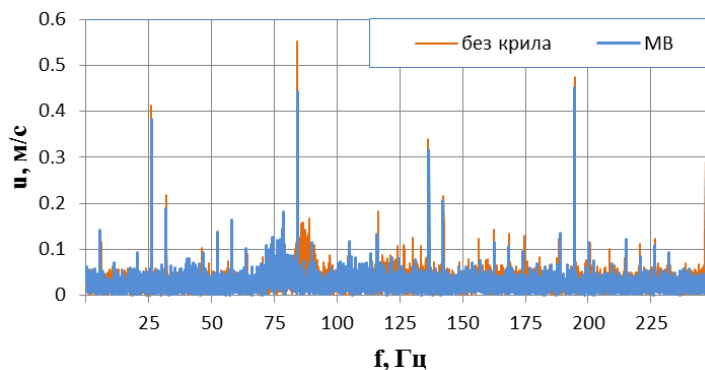


Рис. 7. Амплітудно-частотні характеристики миттєвих колових швидкостей потоку в точці $L^*=0,75$

На графіках (рис. 8) для прикладу наведено найбільш характерні залежності при $Re=95\,000$ при таких позначеннях: $r^* = r/r_0$ – безрозмірний радіус (r_0 – внутрішній радіус циліндричної частини ВК); $U^* = U/W_a$ – безрозмірна колова проекція усередненої місцевої швидкості (W_a – середнє за вихідним перерізом ВК значення швидкості потоку); $\varepsilon_U = \sqrt{u'^2} / U$ – локальна відносна інтенсивність пульсацій колової швидкості (штрихом позначено миттєву пульсаційну складову швидкості). Зростання величин швидкості по мірі наближення до верхньої циліндричної поверхні камери (рис. 8, а) свідчить про дію пристінної зони спіралеподібної ЕКВС в активній частині камери. Характерне для варіантів «без керування» та «з керуванням» зростання інтенсивності пульсацій колової швидкості ближче до осі камери (рис. 8, б) відображає значну зсувну взаємодію оберткових мас газу з різними коловими складовими швидкості в області течії між квазітейлорівськими вихорами та приосьовим торнадоподібним квазітвердотільним вихором.

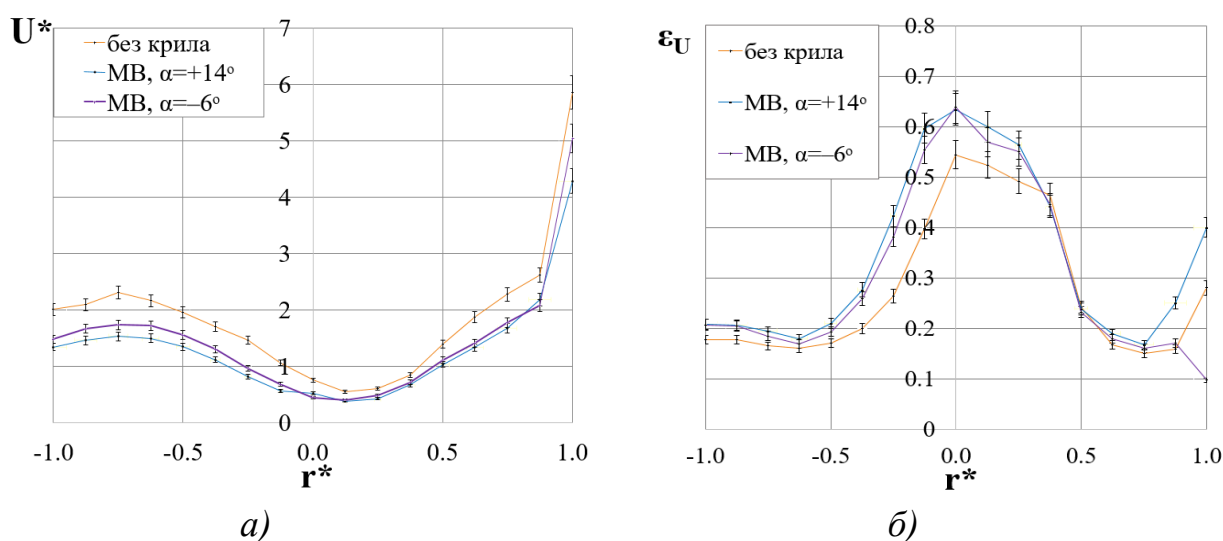


Рис. 8. Характеристики потоку у вихідному перерізі ВК: а – профілі колової проекції усередненої швидкості; б – розподіл інтенсивності пульсацій колової швидкості.

Розрахунки зміни усередненої за перерізом камери інтенсивності пульсацій колової та осьової швидкостей при наявності керувальних дій $\Delta\varepsilon_{u,a}$, $\Delta\varepsilon_{w,a}$ (крило MB253515) по відношенню до значень $\varepsilon_{u,0}$ і $\varepsilon_{w,0}$ за відсутністю керування дозволяють увести відповідні показники впливу крилового вихорогенератора: $k_u = (\Delta\varepsilon_{u,a}/\varepsilon_{u,0}) \cdot 100\%$ та $k_w = (\Delta\varepsilon_{w,a}/\varepsilon_{w,0}) \cdot 100\%$ в залежності від числа Re (рис. 9). Як видно з рис. 9, дослідні точки з достатньо високою точністю апроксимуються лінійними законами. Порівняльний аналіз зміни усереднених за вихідним перерізом ВК величин $\Delta\varepsilon_{u,a}$ і $\Delta\varepsilon_{w,a}$ при максимальному значенні числа Рейнольдса $Re_{max}=95\,000$ показав наступне. При безвідривному значенні кута атаки крила MB253515 $\alpha=14^\circ$ зростання відносної інтенсивності пульсацій при керуванні складає: за коловою швидкістю 22 %, за осьовою швидкістю 63 %. При від'ємному куті атаки $\alpha=-6^\circ$ відповідні зміни становлять: за коловою швидкістю +10 %, за осьовою +47 %. Максимальне відносне зростання втрат тиску при роботі ВК з вихорогенераторами в соплі не перевищує 1,7 % порівняно з втратами у ВК без соплового керування структурою течії.

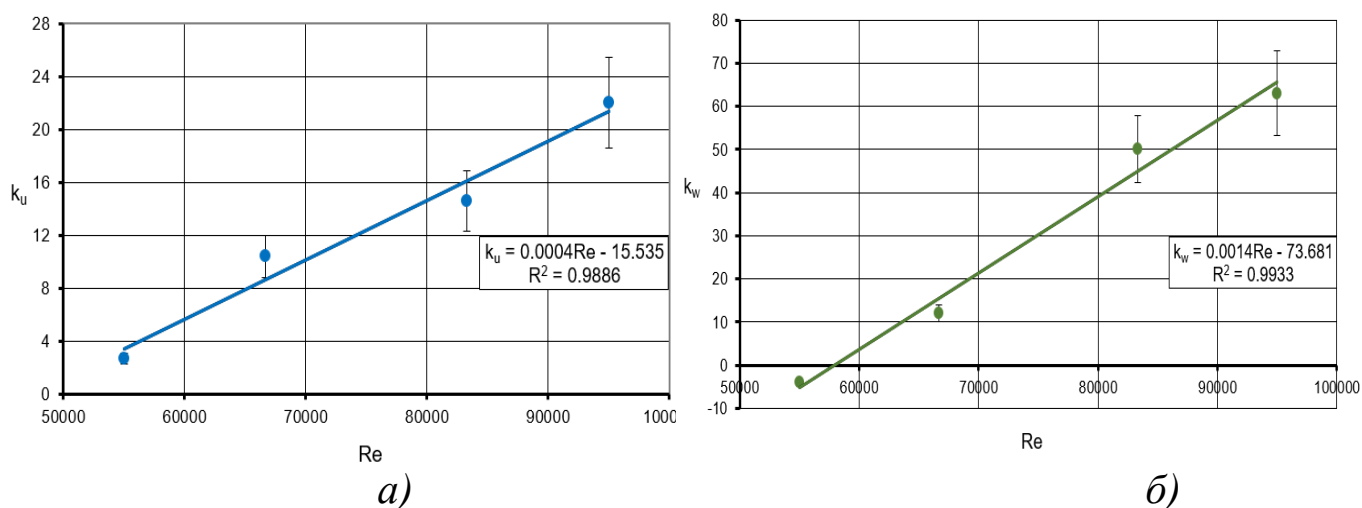


Рис. 9. Вплив керувальної дії крила MB253515 на інтенсивність пульсацій: а – за коловою швидкістю; б – за осьовою швидкістю

Для з'ясування впливу керування структурою течії в порожнині ВК на її вихідні параметри проведено аналіз енергетичного балансу пульсаційних швидкостей в характерній точці $r^*=r/r_0=0,823$ вихідного перерізу ВК у найбільш енергоємній смузі частот 0–100 Гц. Енергія пульсаційних швидкостей визначається рівнянням $E'=0,5D$, де D – дисперсія актуальної швидкості. Для прикладу на рис. 10 представлені графіки зміни енергії пульсації колової швидкостей потоку у вихідному перерізі ВК без крила-вихорогенератора та з його використанням в залежності від смуги пропускання фільтра нижніх частот. Аналіз рис. 10 дозволяє зробити висновок, що наявність крила-вихорогенератора підвищує енергію пульсаційної швидкості в смузі частот 0–35 Гц приблизно в 1,5–2 рази, а смузі частот 35–85 Гц зменшує її на 20–30%. Виявлено також, що в частотному діапазоні 0–250 Гц наявність вихорогенератора більш ніж на 70% підвищує енергію пульсацій швидкості

поток в тій самій точці. Таким чином, доведена ефективність застосування запропонованого узагальненого принципу взаємної сприйнятливості вихрових утворень щодо керування структурою течії у ВК.

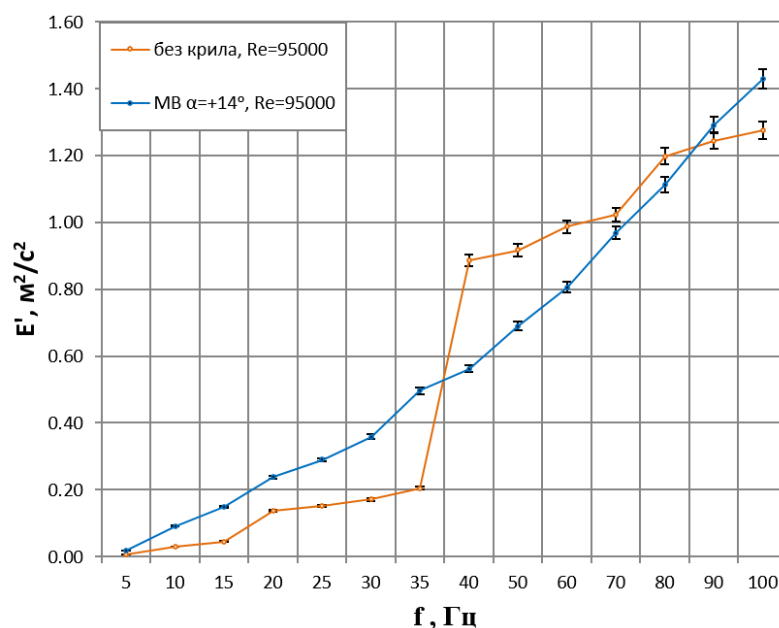


Рис. 10. Енергія пульсації колових швидкостей потоку в точці $r^*=0,823$ вихідного перерізу ВК

Важливо підкреслити, що розміри поперечного перерізу кінцевих вихорів складають до 30 % від поперечних розмірів керованої спіралеподібної ЕКВС. Очевидно, визначальними факторами чутливості потужного вихрового утворення в камері до дії керувальних вихрових шнурів є такі: колінеарність осей збудження взаємодіючих систем; вплив керувальних вихрових шнурів на початкову фазу формування ЕКВС, оскільки хорда крила сумірна з протяжністю соплового тракту; сумірність енергетичних характеристик взаємодіючих вихорів, які формуються вхідним потоком. Таким чином, навіть наближена П-подібна аеродинамічна модель крила, доповнена експериментальними даними щодо частоти обертання вільних вихрових шнурів, дає позитивний результат. Перспективність запропонованого методу керування обумовлена тим, що інтенсивність та енергетичні параметри кінцевих вихорів крила прогнозовані та можуть бути розраховані.

ВИСНОВКИ

У дисертації отримано наступні наукові та практичні результати:

1. Розроблено новий спосіб керування енергоємними когерентними вихровими структурами, що полягає у спрямованих керувальних діях на них системою неперервних упорядкованих вихрових шнурів, які генеруються нерухомими крилами малого розмаху, вмонтованими у впускному соплі камери змішування.

2. Експериментально і теоретично доведено, що невеликі керувальної дії на вхідний потік вихрової камери криловим вихорогенератором згідно з принципом

взаємної сприйнятливості вихрових структур здатні значно інтенсифікувати процеси масо- та енергообміну на виході камери при мінімальних втратах енергії.

3. Проведена розрахункова оцінка ефективності застосування крила як вихорогенератора в умовах ВК та отримано аналітичний вираз коефіцієнта ефективності η . Визначено, що найбільший вплив на його величину має відносне видовження крила λ та коефіцієнт піднімальної сили C_y , в той час, як аерогідродинамічна якість крила K_∞ виявляє незначний вплив на коефіцієнт ефективності. На підставі запропонованого критерію ефективності визначено раціональну конфігурацію крилового вихорогенератора в діапазоні чисел Рейнольдса $Re = 50\ 000 \div 100\ 000$.

4. Експериментально виявлене явище «перекачування» енергії пульсацій від дрібних вихорів до більш крупних, яке дозволяє використовувати його для керування аеро- та гідродинамічними процесами змішування середовищ у вихрових камерах технологічних і енергетичних апаратів.

5. Експериментально доведена дієвість запропонованого методу керування енергоємними когерентними вихровими структурами: збільшення усереднених значень відносної інтенсивності пульсацій швидкості на виході з камери від 10 % до 63%, а в зоні впливу енергоємної когерентної вихрової структури до 72%, при зростанні аеродинамічного опору камери на величину не вище похибки вимірювань (від 0,7% до 1,7%).

6. Результати дисертаційних досліджень реалізовано на Монастирищенському котельному заводі ТОВ МВВФ «Енергетик» при розрахунках та проектуванні пальникових пристроїв котлів та теплообмінного обладнання, в яких рух газів і рідин відбувається під впливом відцентрових сил.

У якості перспективи розвитку досліджень планується продовження робіт у напрямку варіювання відносного розмаху та форми крила в плані з проведенням спектрального і дисперсійного аналізу пульсаційного руху газу. Це дозволить більш точно визначити просторово-частотні області розподілу енергії пульсацій як в ЕКВС, так і в керувальних збуреннях для удосконалення запропонованого методу керування, а отже, масо- і енергообмінними процесами в промислових установках.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових фахових виданнях України (з технічних наук)

1. Турик В. М., Кочін В. О., Кочіна М. В. Аналіз можливості флатерного керування когерентними утвореннями в потоках вихрових камер. Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Машинобудування. 2014. Вип. 2 (71). С. 84 – 94.
2. Бабенко В. В., Кочін В. О., Турик В. М., Кочіна М. В. Метод керування вихороутворенням на вході до камер змішування. Вісник Одеського національного морського університету. 2015. № 3 (45). С. 157–166.
3. Бабенко В. В., Турик В. М., Кочін В. О., Кочіна М. В. Спосіб керування інтенсивністю змішування потоків у вихровій камері: пат. 110914 Україна. № 201603982; заявл. 12.04.16; опубл. 25.10.16, Бюл. № 20. 6 с.
4. Турик В. М., Кочін В. О., Кочіна М. В. Мінімізація вібраційного фактору при експериментальних дослідженнях мікроструктури обмежених закручених потоків. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2017. Вип. 3 (81). С. 40–46.
5. Turick V., Kochin V., Kochina M Examining the technique to control the structure of current in vortex chambers by wing vortex generators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol 1, No 5 (91). 2018. P. 28-38. (SCOPUS).
6. Turick V., Kochin V., Kochina M. A new method of control of coherent structures in vortex apparatuses. *Екологічна безпека та природокористування*. 2017. Вип. 1 (25). С. 24-33.

Публікації у збірниках матеріалів конференцій

7. Кочіна М. В., Турик В. М. Квазідинамічне керування структурою течії в вихровій камері: матеріали загальноунів. наук.-техн. конф. молодих вчених та студентів, присвячена дню Науки. Секція «Машинобудування», підсекція «Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка». (Київ, 2013 р.). Київ: НТУУ «КПІ», 2013. С. 3–4.
8. Турик В. Н., Милуков Д. Е., Кочина М. В. Об одном способе управления структурой ограниченных закрученных потоков. *Прикладные задачи математики и механики: материалы XXI междунар. науч.-техн. конф. (Севастополь, 16-20 сент. 2013 г.)*. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. С. 61–65.
9. Турик В. Н., Кочин В. А., Кочина М. В. Флаттер как средство управления когерентной структурой в вихревой камере. *Промислова гідравліка і пневматика: матеріали XIV Міжнар. наук.-техн. конф. АС ПГП (Одеса, 18-19 жовт. 2013 р.)*. Одеса. 2013. С. 28.
10. Турик В. М., Кочіна М. В. Зворотний розпад вихорів як результат флатерного керування когерентною структурою. *Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XIX міжнар. наук.-техн. конф. (Кіровоград, 21–24 трав. 2014 р.)*. Кіровоград. 2014. С. 58–59.
11. Кочіна М. В., Турик В. М. Дисперсійний аналіз ефективності флатерного керування детермінованими вихровими утвореннями: матеріали загальноунів. наук.-техн. конф. молодих вчених та студентів, присвячена дню Науки. Секція

«Машинобудування». Підсекція «Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка». Ч. 1 (Київ, 2014 р.). Київ: НТУУ «КПІ», 2014. С. 26–28.

12. Турик В. М., Кочіна М. В., Кочін В. О. Вплив керувальних дій вихорогенераторів флатерного типу на формування структури вхідного потоку вихрової камери. Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XX Міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 26–29 трав. 2015 р.). Київ. 2015. С. 42–43.

13. Турик В. М., Кочін В. О., Кочіна М. В. Вибір засобу квазідинамчного управління структурою обмеженого закрученого потоку. Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: матеріали XVI міжнар. наук.-техн. конф. (Одеса, 22–25 черв. 2015 р.). Київ. 2015. С. 145–146.

14. Турик В. М., Кочін В. О., Кочіна М. В. Динамічне керування вихороутворенням у вхідних потоках камер змушування. Промислова гідравліка і пневматика: матеріали XVI міжнар. наук.-техн. конф. АС ПГП (Суми, 14–16 жовт. 2015 р.). Вінниця: ГЛОБУС-ПРЕС, 2015. С. 30.

15. Турик В. М., Кочін В. О., Кочіна М. В. Крило як вихорогенератор для керування процесом змішування потоків у вихрових камерах. Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XXI міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 24–27 трав. 2016 р.). Київ. 2016. С. 16–17.

16. Кочін В. О., Турик В. М., Кочіна М. В. Особливості вибору та умови роботи крилового вихорогенератора у впускному соплі вихрової камери. Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: матеріали XVII міжнар. наук.-техн. конф. (Одеса, 21–24 черв. 2016 р.). Київ. 2016. С. 144–146.

17. Кочіна М. В., Турик В. М. Криловий керувальний вихорогенератор спрямованої дії. Інновації молоді – машинобудуванню: матеріали всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених та студентів, секція «Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка». (Київ, 2016 р.). Київ: НТУУ «КПІ», 2016. С. 72–74.

18. Турик В. М., Кочін В. О., Кочіна М. В. Експериментальне дослідження обтікання крил малого подовження в обмеженому газовому потоці. Промислова гідравліка і пневматика: матеріали XVII міжнар. наук.-техн. конф. АС ПГП (Харків, 19–21 жовт. 2016 р.). Вінниця: «Глобус-Прес», 2016. С. 29–30.

19. Турик В. М., Кочін В. О., Кочіна М. В. Аеродинаміка крил малого видовження в обмеженому просторі. Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XXII міжнар. наук.-техн. конф. (Черкаси, 23–26 травня 2017 р.). Київ. 2017. С. 24–25.

20. Кочіна М. В., Турик В. М. Візуалізація кінцевих вихорів на крилах різної форми. Інновації молоді – машинобудуванню: матеріали Всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих вчених та студентів, секція "Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка (Київ, 30 травня 2017 р.). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. С. 37.

21. Турик В. М., Кочін В. О., Кочіна М. В. Вібродіагностика стенда «Вихрова камера» як засіб зменшення похибки аеродинамічного експерименту. Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: матеріали XVIII міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 29 черв. – 1 лип. 2017 р.). Київ. 2017. С. 214.

22. Турик В. М., Кочін В. О., Кочіна М. В. Аеродинамічні характеристики потоку в камері змішування при керуванні Криловими вихорогенераторами.

Промислова гідравліка і пневматика: матеріали XVIII міжнар. наук.-техн. конф. АС ПП (Вінниця, 3–6 жовт. 2017 р.). Вінниця: «Глобус-Прес», 2017. С. 33–34.

23. Турик В. М., Кочіна М. В. До керування інтенсивністю змішування потоків у вихрових апаратах. Інновації молоді – машинобудуванню: матеріали всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених та студентів, секція «Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка» (Київ, 30 травня 2017 р.). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. С. 37.

АНОТАЦІЯ

Кочіна М.В. Керування когерентними вихровими структурами в камерах змішування криловими вихорогенераторами– На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми. – Національний авіаційний університет Міністерство освіти і науки України, Київ, 2018.

Дисертація присвячена дослідженню нового способу керування енергоємними когерентними вихровими структурами (ЕКВС), які визначають процеси масо- і енергообміну у вихрових камерах. Він полягає в раціональній організації напрямлених керувальних дій на ЕКВС системою неперервних упорядкованих вихрових шнурів від мініатюрного крила малого видовження, яке встановлене у проточному тракті впускного сопла камери. Запропоновано розрахунково-експериментальне обґрунтування досліджуваного способу на основі принципу взаємної сприйнятливості вихрових структур. Експериментально виявлене явище «перекачування» енергії пульсацій від дрібних вихорів до більш крупних, яке дозволяє використовувати його для керування аеро– і гідродинамічними процесами змішування середовищ у вихрових камерах технологічних і енергетичних апаратах. Також в роботі експериментально та теоретично доведено що невеликі керувальної дії на вхідний потік вихрової камери криловим вихорогенератором здатні значно інтенсифікувати процеси масообміну на виході камери при мінімальних втратах енергії на основі принципу взаємної сприйнятливості вихрових структур. Перспективність запропонованого методу керування обумовлена тим, що інтенсивність та енергетичні параметри кінцевих вихорів крила прогнозовані та можуть бути розраховані.

Ключові слова: *когерентні вихрові структури, керування структурою течії, вихрова камера, криловий вихорогенератор, взаємна сприйнятливість вихорів.*

АННОТАЦИЯ

Кочина М.В. Управление когерентными вихревыми структурами течения в камерах смешения крыльевыми вихрогенераторами. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы. - Национальный авиационный университет Министерство образования и науки Украины, Киев, 2018.

Диссертация посвящена исследованию нового способа управления энергоемкими когерентными вихревыми структурами (ЭКВС), которые определяют процессы массо- и энергообмена в вихревых камерах. Он заключается в рациональной организации направленных управляющих воздействий на ЭКВС системой непрерывных упорядоченных вихревых шнуров от миниатюрного крыла малого удлинения, которое установлено в проточном тракте впускного сопла камеры. Предложено расчетно-экспериментальное обоснование исследуемого способа на основе принципа взаимной восприимчивости вихревых структур. Экспериментально обнаружено явление «перекачивания» энергии пульсаций от мелких вихрей к более крупным, которое позволяет использовать его для управления аэро- и гидродинамическими процессами смешивания сред и процессами в вихревых камерах технологических и энергетических аппаратах. Также в работе экспериментально и теоретически доказано, что небольшие управляющей воздействия на входной поток вихревой камеры крыловым вихрогенератором способны значительно интенсифицировать процессы массообмена на выходе камеры при минимальных потерях энергии на основе принципа взаимной восприимчивости вихревых структур. Перспективность предложенного метода управления обусловлена тем, что интенсивность и энергетические параметры конечных вихрей крыла прогнозируемые и могут быть рассчитаны.

Ключевые слова: *когерентные вихревые структуры, управление структурой течения, вихревая камера, крыльевой вихрогенератор, взаимная восприимчивость вихрей.*

SUMMARY

Kochina M.V. Control of coherent vortex structures in vortex chambers by wing vortex generators – The manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical science in specialty 01.02.05 – mechanics of liquid, gas and plasma. – National aviation university, Ministry of Education and Sciences of Ukraine, Kyiv, 2018.

The dissertation is devoted to studding of a new technique which is aimed to control energy-intensive coherent vortex structures (ECVS) that define the processes of mass- and heat transfer in vortex chambers. This is important because the swirled flows are employed in a wide class of machines and devices. The basic principle of the method implies rational organization of targeted controlling actions on ECVS using the systems of ordered vortex cords that run down the end edges of a miniature thin wing. The wing is mounted in a flow-through tract of the inlet nozzle of the vortex chamber at different angles of attack. Using the wing with a small elongation significantly extends the range of continuous angles of attack. Combined with strict requirements to the streamlined surfaces (especially near the leading edge of the wing), it reduces the aerodynamic drag. We obtained data on aerodynamic blowing for three types of profiles. Relatively thin profiles were selected to ensure the permanence of lifting coefficient over a rather wide range of the Reynolds numbers. Controlling actions at the maximum value of Reynolds number at the inlet to a nozzle $R_{e \max} = 95,000$ and at the maximum continuous angles of attack of the wing

MB253515 almost do not affect the chamber's aerodynamic drag. We proposed a new method to control energy-intensive coherent vortex structures (ECVS) that define the processes of mass- and heat exchange in vortex chambers. It implies the execution of controlling actions on ECVS by the system of continuous ordered vortex cords that are generated by the fixed wings of a finite span, mounted in the inlet nozzle of the chamber.

It is important to emphasize that dimensions of the cross-section of trailing vortices make up to 30 % of the transverse dimensions of the controlled spiral-like ECVS. Obviously, the determining factors of the sensitivity of a powerful vortex formation in the chamber to the action of controlling vortex cords are the following:

- collinearity of axes of excitation of interacting systems;
- the effect of controlling vortex cords on the initial phase of ECVS formation since the wing's chord is commensurate to the length of a nozzle tract;
- commensurate energy characteristics of the interacting vortices, which are formed by the incoming flow.

The theoretical estimation of the effectiveness of using a wing as the vortex generator under conditions of a vortex chamber was performed, and obtained an analytical expression for the criterion of efficiency η . It was determined that the greatest influence on its magnitude is produced by the relative wing elongation λ and the lifting strength coefficient c_y . Based on the proposed criterion of efficiency the optimal wing profile was selected in order to execute subtle control over ECVS, and determined that the most rational is to use wings with a small elongation. The effectiveness of the proposed method to control the structure of flow in VC is proven by an increase in the averaged values of relative intensity of velocity pulsation at the outlet of the chamber from 10 % to 63 % while a growth of the chamber's aerodynamic resistance did not exceed the magnitude of a measurement error.

Key words: coherent vortex structures, control over the structure of current, vortex chamber, wing vortex generator, mutual susceptibility of vortices.