

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.20535/kpi-sn.2019.5-6.178246

УДК 533.6.08:532.527

В.М. Турик*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

*corresponding author: turick46@gmail.com

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИХРОВОГО ТА СТРУМИННОГО КЕРУВАННЯ СТРУКТУРОЮ ТЕЧІЙ В ОБМЕЖЕНИХ ЗАКРУЧЕНИХ ПОТОКАХ

Проблематика. Малозатратне керування енергоємними когерентними вихровими структурами (КВС), що визначають процеси переносу маси, імпульсу та енергії у вихрових камерах (ВК) енергетичних і технологічних апаратів для підвищення ефективності їх робочих процесів.

Мета дослідження. Дослідити реакцію КВС на виході з ВК на спрямовані керувальні дії згідно з принципом взаємної сприйнятливості вихрових структур за двома методами впливу на КВС: 1 – кінцевими вихровими шнурами від крилового вихорогенератора у вхідному соплі ВК; 2 – за допомогою турбулентних струменів, підведених із різною орієнтацією відносно КВС у тупиковій частині ВК з боку її торця. Ставиться задача порівняння результатів застосування таких керувальних впливів через аналіз профілів усередненої швидкості та відносної інтенсивності пульсацій швидкості на виході з ВК.

Методика реалізації. Експериментальне дослідження формування та взаємодії керувальних вихорів і КВС у порожнині камери в поєднанні з розрахунковими оцінками.

Результати дослідження. Засвідчено підвищення відносної інтенсивності пульсацій швидкості потоку у вихідній зоні ВК за окремими компонентами: від 22 до 63 % при першому (вихровому) методі керування КВС та від 6 до 38 % при другому (струминному) методі керування. Таким чином, доведено ефективність застосування принципу взаємної сприйнятливості керувальних і керованих вихрових структур в обмежених закручених потоках, покладеного в основу реалізації методів керування.

Висновки. Експериментально доведено можливість ефективного та малозатратного керування енергоємними КВС, а отже, процесами масо- і теплопереносу у ВК змішування. Показано працездатність, особливості та переваги вихрового та струминного методів керування.

Ключові слова: вихрова камера; когерентні вихрові структури; взаємна сприйнятливість; керування; вихрові шнури; торцеві струмені.

Вступ

Проблема раціонального керування процесами переносу маси, імпульсу та енергії в теплових двигунах, топках енергетичних і промислових котлів, магнітогідродинамічних генераторах, плазмотронах, циклонних пристроях, хімічних реакторах та інших пристроях, які працюють за вихровим принципом, залишається актуальною попри зусилля багатьох дослідників. Причина полягає в суттєвому впливі масових відцентрових сил на потоки робочих середовищ, що може проявлятися або в інтенсифікації, або, навпаки, в частковому блокуванні тепломасообмінних, фізико-хімічних, електрофізичних процесів. Незважаючи на спрямованість таких впливів відповідно до бажаної мети керування, кінематичні та динамічні особливості закручених обмежених потоків мають деякі спільні риси. Утворення когерентних вихрових структур (КВС) ґюртлер-тейлорівського, людвігівського та інших типів у пристінних зонах течії [1, 2]

спричиняє неоднорідність структури потоків в усередненому і пульсаційному рухах, що змінює локальні та інтегральні характеристики переносу всіх видів транспортабельних субстанцій у робочих порожнинах вихрових апаратів. Це може викликати суттєве погіршення показників економічності, надійності та екологічної ефективності енергетичних і технологічних установок у цілому, до складу яких входять вихрові апарати [3–5]. Традиційні засоби здійснення керувальних впливів на процеси переносу базуються на емпіричному підборі конструктивних елементів вихрових пристроїв на стадії доводки апаратів з метою одержання більш-менш прийнятних режимних характеристик на макрорівні, що найчастіше дається ціною зростання аеродинамічного опору системи. Цілком зрозуміло, що така практика не забезпечує повної узгодженості прийнятих технічних рішень зі складною структурою обмежених вихрових течій у полях відцентрових сил, що негативно позначається на процесах масо- й теплообміну. Тому

необхідні пошуки більш ефективних способів керування структурою закручених потоків у вихрових пристроях із мінімальними енергетичними та матеріальними затратами. Найбільш доцільним видається підхід, який полягає в організації керувальних дій, спрямованих безпосередньо на великомасштабні та найбільш енергоємні КВС (назвемо їх ЕКВС), оскільки саме вони головним чином визначають процеси перемішування або, навпаки, сепарації компонентів робочих середовищ у камерах. Аналіз праці [2] показує, що при тангенціальному уведенні газу до вихрової камери (ВК) до 70 % витрати вхідного потоку спрямовується у бік глухого торця, а звідти – до проточної частини камери. В разі видовженої тупикової зони камери наявність утворених зсувних шарів зумовлює в цій її частині дію механізму достатньо потужного додаткового вихорогенератора, що забезпечує в цілому високий рівень інтенсивності пульсаційного руху, а отже, й процесів перемішування у ВК. Складність фізичних процесів течії в порожнині такої камери на сьогодні не дає можливості коректного їх математичного моделювання. Таким чином, вирішення загальної проблеми суттєвого підвищення економічності й надійності машин і апаратів вихрового типу потребує розробки новітніх експериментальних методів досліджень, а також засобів ефективного керування ЕКВС в обмежених закручених потоках.

Наша робота присвячена експериментальній перевірці ефективності малозатратних керувальних дій на основні великомасштабних ЕКВС у камері з метою інтенсифікації обмінних процесів у робочому середовищі.

Постановка задачі

Мета роботи – дослідити реакцію ЕКВС на виході з ВК на спрямовані керувальні дії згідно з принципом взаємної сприйнятливості вихрових структур за двома методами впливу на структуру течії: 1 – кінцевими вихровими шнурами від крилового вихорогенератора у вхідному соплі ВК; 2 – за допомогою турбулентних струменів, підведених з боку глухого торця ВК. Ставиться задача порівняння результатів здійснення керувальних впливів на ЕКВС двома зазначеними методами через аналіз профілів усередненої швидкості та відносної інтенсивності пульсацій на виході з ВК.

Загальна постановка досліджень та експериментальний стенд

Серед складових течії у тупиковій частині ВК найбільш придатними, з огляду на сформульований вище підхід до організації керування, є спіралеподібна ЕКВС типу “вуса” з максимальним моментом кількості руху, а також торнадоподібний “центральный квазітвердотільний вихор” (ЦКТВ), який формується за типом течії Бюдевадта [1] поблизу глухого торця камери, поширюючись у напрямку виходу з ВК [2] (рис. 1).

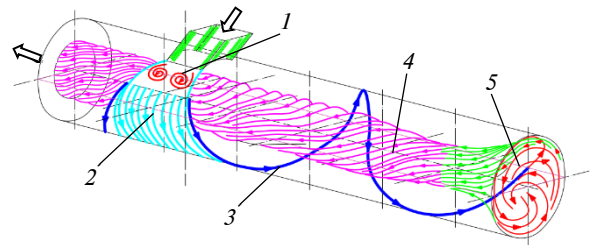


Рис. 1. Спрощена схема течії газу в камері: 1 – торнадоподібні вихори у відривній зоні за соплом; 2 – система вихорів типу Гьортлера–Людвіга; 3 – енергоємна когерентна вихрова структура типу “вуса”; 4 – центральный квазітвердотільний вихор; 5 – торцева течія Бюдевадта

Перший метод керування передбачає здійснення енергетично малозатратного спрямованого “тонкого” впливу на ЕКВС “вуса” та характеристики змішування за допомогою кінцевих вихрових шнурів, генерованих мініатюрним нерухомим крилом малого видовження, яке вмонтоване у впускному соплі камери. Як широко відомо, кінцеві вихрові системи за крилом у вигляді стійких вихрових шнурів, які сходять з бічних його крайок, спричиняють індуктивний опір, що його намагаються всіляко зменшувати при проектуванні літальних апаратів. У нашому ж циклі робіт, з огляду на прогнозованість параметрів кінцевих вихорів, пропонується саме їх застосувати для керування ЕКВС. З метою компенсації зазначеного вище негативного чинника передбачено використання відомих позитивних властивостей гідравлічно гладких крил малого видовження, які можуть працювати як ефективні вихорогенератори. Другий метод передбачає застосування спрямованих дій як на спіралеподібну ЕКВС типу “вуса”, так і на ЦКТВ за допомогою турбулентних струменів, спеціально сформованих і підведених з різною орієнтацією

відносно зазначених вихрових утворень до тупикової частини ВК з боку її торця.

Постановку експериментальних досліджень здійснено на аеродинамічному стенді “Вихрова камера” кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського для дослідження обмежених закручених потоків. Стенд являє собою експериментальну установку типу відкритої аеродинамічної труби. Робочою ділянкою установки слугує ВК, виконана з прозорого органічного скла, внутрішнім діаметром $d_0 = 0,102$ м і загальною довжиною $L_0 = 0,635$ м із поодиноким вхідним соплом. Глибина тупикової частини ВК відносно середини сопла в цих дослідах дорівнювала $L = 0,446$ м. Проточний тракт сопла, що має прямокутний переріз розмірами $0,02 \times 0,04$ м² із закругленнями по кутах, забезпечує тангенціальне підведення повітря до порожнини камери (кут тангенціальності становить $\gamma = 85^\circ$). Передбачено можливість зміни осьового положення сопла варіюванням кута розміщення більшої осі вхідного перерізу сопла відносно поздовжньої осі ВК у діапазоні від -20° до $+20^\circ$ (у цій роботі обмежимося значенням 0°). Плавність течії та рівномірність розподілу швидкості й тиску повітряного потоку на вході до камери досягнуті за рахунок формування вхідної частини сопла за профілем лемніскати Я. Бернуллі, а також підключення ВК до всмоктувального патрубку вентилятора. Аеродинамічний стенд включає апаратуру термоанемометрії постійної температури фірми “DISA Elektronik” (Данія) з однопітківим дротяним датчиком, з’єднаним з аналого-цифровим перетворювачем L-264 фірми “L-Card” (Росія) у вигляді плати розширення до IBM-сумісного комп’ютера. Обробка первинних даних вимірювання здійснювалася за допомогою ліцензійного програмного пакета “PowerGraph Professional”. Для збільшення точності термоанемометричних вимірювань складових швидкості в потоці передбачено попереднє проведення візуалізації течії з кінофотореєструванням, а також вимірювання пневмометричними насадками профілів усереднених у часі швидкостей за окремими компонентами. Така комплексна постановка досліджень дає змогу безпосередньо вивчати вихрові структури зсувних течій, їх інтегральні та локальні характеристики. Досліджуваний діапазон чисел Рейнольдса потоку на виході з ВК становив $Re_a = 19128\text{--}33040$.

Методика і результати проведення досліджень першим методом

Вихідні положення та отримання попередніх даних. Цей метод передбачав установку в проточному тракті вхідного сопла мініатюрного крила (рис. 1, де розміри “ a ” і “ b ” фіксують кути атаки α). Теоретичні положення, які було викладено в праці [6], дали змогу отримати коефіцієнт ефективності використання крила малого видовження як вихорогенератора (коли $1 \leq \lambda \leq 3$, де $\lambda = l^2/S$ – видовження крила; l – розмах крила, S – площа крила в плані) при обтіканні потоком, обмеженим стінками проточного тракту впускного сопла ВК:

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

де K – реальна аеродинамічна якість крила, встановленого у впускному соплі; K_∞ – аеродинамічна якість крила в безмежному потоці (відповідно до даних відомих атласів крилових профілів); c_y – коефіцієнт підйомної сили крила у швидкісній (поточній) системі координат; F – площа поперечного перерізу проточного тракту вхідного сопла; ε – коефіцієнт, який залежить від форми прохідного перерізу сопла (визначається за даними Тіт’енса, Глауєрта та оцінок впливу обмеженості потоку [6]).

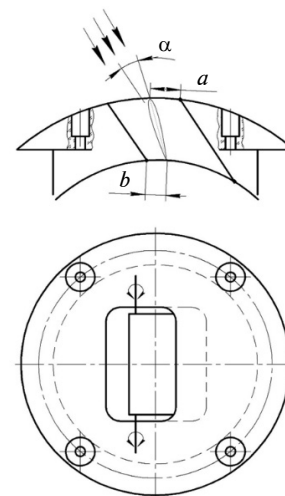


Рис. 2. Ескіз вхідного сопла

Пошук найбільш раціонального профілю крила здійснювався з використанням формули (1) на підставі даних атласів крилових профілів [7, 8] з урахуванням досліджуваного діапазону чисел Рейнольдса на вході до сопла (за його еквівалентним діаметром) $Re \approx 55000-95000$. Основні критерії пошуку профілю – максимальні значення коефіцієнта підйомної сили c_y , аеродинамічної якості K_∞ і технологічність виготовлення крила. З огляду на це прийнятним для таких цілей виявився ряд аеродинамічних профілів: A-18, GM15, Davis 3R із системою турбулізаторів, AG16, AG40d-02r Flap20deg (крило із закритком, відхиленим на 20°), MB253515, плоска пластина (прямокутник у плані, $\lambda = 2,5$). Їх параметри відповідають діапазону чисел Рейнольдса $Re = 40000-100000$. З урахуванням технологічного фактора, а також з огляду на цілком задовільне значення максимального коефіцієнта підйомної сили $c_y^{\max} = 1,1$, якому відповідають максимальний діапазон безвідривних кутів атаки крила $\alpha(c_y^{\max}) = 14^\circ-18^\circ$, найбільше серед порівнюваних профілів значення аеродинамічної якості $K_\infty(c_y^{\max})$ та цілком прийнятна величина коефіцієнта ефективності крила-вихорогенератора $\eta = 0,25$, як базовий керувальний елемент було вибрано крило з профілем двосторонньої опуклості типу MB253515 прямокутної форми в плані розмірами $0,02 \times 0,02 \text{ м}^2$. Щодо профілю у вигляді плоскої пластини, то зазначені вище параметри виявились найгіршими з наведеного ряду профілів. Проте в подальшому з метою порівняння іноді будуть наведені деякі дані дослідження характеристик обтікання не тільки вибраного за базове крила з профілем MB253515, а й крила у вигляді плоскої пластини з тими ж розмірами в плані.

Експерименти з продувками в соплі ВК зазначених крил у діапазоні чисел Рейнольдса $Re \approx 55000-95000$ потоку визначили такі максимальні за модулем безвідривні кути атаки крил: $\alpha_{\max} = 14^\circ$, $\alpha_{\min} = -6^\circ$ для крила MB253515 та $\alpha_{\max} = 12^\circ$, $\alpha_{\min} = -6^\circ$ для плоскої пластини. Вихід за межі цих значень за будь-яких досліджуваних режимів було повністю виключено для запобігання небезпеці відриву примежового шару з поверхонь крил, оскільки утворення в його супутньому сліду нестійкої та неупорядкованої вихрової системи принципово не може розглядатися як фактор керування течією. Відповідне ж

зростання індуктивного опору крил скомпенсоване зменшенням профільної складової їх аеродинамічного опору за рахунок витримування високих вимог до геометричних характеристик обтічної поверхні: крила мають відносно невелику товщину профілю та гідравлічно гладку поверхню; до того ж використано особливу властивість крил малого видовження: вони мають достатньо широкий діапазон безвідривних кутів атаки. Тому, як засвідчили дослідження, установка в соплі камери таких крил-вихорогенераторів не призводить до істотного зростання її гідравлічного опору. Важливо також, що коефіцієнт підйомної сили крил таких профілів практично не залежить від числа Рейнольдса в досить широкому діапазоні його зміни. Це забезпечує можливість підтримання максимального значення коефіцієнта підйомної сили c_y^{\max} у наведених вище границях діапазону Re , що важливо для підвищення ефективності використання крилового вихорогенератора [6]. Певному зростанню c_y^{\max} частково сприяє і наявність екранного ефекту від стінок сопла при ненульових кутах атаки крила.

Вивчення меж безвідривного обтікання крил та особливостей формування керувальних вихрових шнурів було здійснено візуалізацією течії класичним методом шовковинок (шовкові нитки різної довжини діаметром $0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$) (рис. 3).

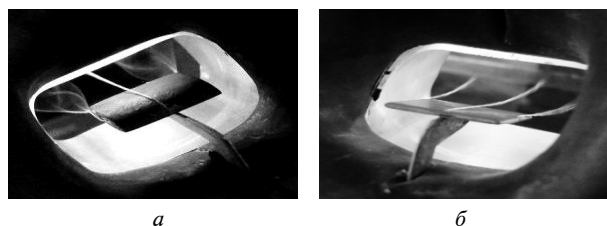


Рис. 3. Візуалізація течії шовковими нитками при кутах атаки крил: *a* – максимальному безвідривному (профіль MB253515); *б* – нульовому (плоска пластина)

В експериментах проводилася відео- та фотозйомка при спеціальному освітленні з подальшою комп'ютерною обробкою отриманих матеріалів (розкадровкою відеофрагментів за допомогою комп'ютерної програми VirtualDub v.1.5.4). На досліджуваних крилах-вихорогенераторах в обмежених умовах проточного тракту впускного сопла камери було виявлено стійкі кінцеві вихрові шнури. Частота обертання кінцевих вихорів у зонах їх формування, що відповідає частоті обертання шовковинок, визначалася за кількістю кадрів відеоряду при одному оберті

шовковинок. За даними швидкісної відеозйомки з частотою до 1200 кадрів за секунду, біля кромок крила шовковинки обертаються у взаємно протилежних напрямках, причому зміна знака кута атаки крил призводить до зміни напрямків обертання шовковинок. Обертання шовковинок не відбувалося при нульових кутах атаки крил. Дані з частот обертання кінцевих вихорів для двох типів вихорогенераторів при $\alpha_{\max} > 0$, наведені в табл. 1, характеризують напруженість кінцевих вихрових шнурів у обмеженому просторі сопла. Знання величин частот обертання кінцевих вихорів у зонах їх формування необхідні для можливості розрахунку поперечних розмірів вихрових шнурів.

Таблиця 1. Частоти обертання кінцевих вихорів

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

Згідно з прийнятою концепцією [6, 9], установка нерухомих крилових елементів у тракті впускного сопла камери має задовольняти умови сприйнятливості взаємодіючих керувальних і керованих вихрових структур (взаємної узгодженості за формою, геометричними та енергетичними характеристиками). Спільні умови формування кінематичних та енергетичних параметрів зазначених взаємодіючих вихрових систем у межах вхідного потоку, єдиного як для проточної частини впускного сопла, так і для вмонтованих у нього мініатюрних крил, дають змогу припустити можливість автоматичного “вибору” керувальними вихорами або безпосередньо ЕКВС, або проміжних її складових елементів на різних фазах перетворень для резонансної (антирезонансної) взаємодії з ними. Справедливість такого припущення буде доведена результатами досліджень нижче. Коротко зупинимось на механізмі такої вибіркової дії на вихрові утворення в камері.

Відповідно до зазначених умов взаємодії вихрових систем характеристики керувальних вихрових шнурів мають бути сумірними з характеристиками вихрових структур Гьортлера—Людвіга в присопловій зоні ВК або квазітейлорівських вихорів у зоні “вторинного” пристінного струменя [2]. Утворені за цих умов модифіковані вихрові системи вступають у взаємодію

з ЕКВС типу “вуса”, спрямованими в “пасивну” (тупикову) та “активну” (проточну) зони ВК. Якщо за певних геометричних або режимних параметрів роботи ВК характеристики зазначених пристінних вихорів у присопловій області та в зоні вторинного струменя набули деякої відмінності від характеристик керувальних вихрових шнурів, то може відбутися безпосередня взаємодія останніх із вихорами типу “вуса” або одразу за соплом, або через один оберт у зоні “первинного” та “вторинного” пристінних струменів.

Отже, створена крилом система неперервних упорядкованих вихрових збурень у вигляді кінцевих вихрових шнурів на макро- та мікрорівнях спрямовано та з мінімальними втратами енергії впливає на вихрову структуру і характеристики змішування потоків у ВК. Варіюванням кутів атаки крила в соплі можна регулювати підсилення або часткове блокування процесів змішування робочого середовища в камері.

Розрахунково-експериментальний аналіз масштабі і кінематики взаємодіючих вихрових систем. Застосуємо простішу П-подібну аеродинамічну модель крила скінченного розмаху, яка базується на вихровій теорії М.Є. Жуковського [6]. Для цього замінимо крило з постійною середньою циркуляцією Γ швидкості вздовж його розмаху приєднаним вихором із такою ж циркуляцією. Відповідно до наслідку з другої теореми Гельмгольца, вихор не може обірватися. Це дає підстави припустити, що кінці приєданого вихору уносяться потоком у нескінченність, утворюючи так звані “вільні вихори”, тобто два напівнескінченні вихрові шнури, які збігають із бічних торців крила. При продувках моделей крил в аеродинамічних трубах такі вихори легко спостерігати. Постійність циркуляції за довжиною вихору передбачає рівність циркуляцій навколо вільних вихорів та приєданого вихору.

Підйомна сила приєданого (несучого) вихору при відстані між вихровими шнурами h дорівнює $R_y = \rho_\infty v_\infty \Gamma l_1$. З іншого боку,

$R_y = c_y \frac{\rho_\infty v_\infty^2}{2} S$. Порівняння цих формул приводить до рівняння зв'язку щодо будь-якого поперечного перерізу крила:

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

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 : $\ell_1 = \ell k$, де $k > 1$. Коефіцієнт k змінюється в межах $k = 1,02 - 1,04$ залежно від відносного видовження крила та його форми в плані. Для крил прямокутної форми в плані (зокрема, для тонкого прямокутного та крила MB253515) $S = b \cdot \ell$, де b – хорда крила. Тоді при $b = \ell = 0,02$ м на підставі (2) маємо

$$\Gamma = \frac{1}{2,04} c_y v_\infty b. \quad (3)$$

Згідно з теоремою Стокса, $\Gamma = I = \iint_{\sigma} \vec{\Omega} \cdot d\vec{\sigma}$,

де $\vec{\Omega}$ – місцева завихреність; I – потік вихорів через поверхню σ , пронизану сукупністю вихрових ниток. Якщо увести усереднене значення модуля завихреності вздовж розмаху крила

$\bar{\Omega} = \frac{1}{\sigma} \iint_{\sigma} \Omega_i d\sigma$, то приходимо до рівності

$\Gamma = I = \bar{\Omega} \sigma$. Кінцеві вихрові шнури площею поперечного перерізу σ_v поглинають усі вихрові нитки вздовж розмаху крила із завихреністю $\bar{\Omega}_v$. Тоді на підставі другої кінематичної теореми Гельмгольца маємо $\bar{\Omega} \sigma = \bar{\Omega}_v \sigma_v$. Відповідно до моделі локально недеформованих об'ємів газу з уведенням усередненого значення кутової швидкості $\bar{\omega}_v$ вихрових шнурів маємо

$$\Gamma = 2\bar{\omega}_v \sigma_v, \quad (4)$$

що дає змогу оцінити масштаб вихрових шнурів як одну з вихідних умов застосування принципу взаємної сприйнятливості керувальних вихорів і керованих КВС у камері.

Наведемо розрахунки циркуляції швидкості Γ згідно з формулою (3) для досліджуваних крил-вихорогенераторів за граничних значень діапазону чисел Рейнольдса $Re = 55000 - 95000$. Коефіцієнти підйомної сили c_y^{\max} вибираємо з даних атласів [7, 8] при таких, визначених експериментально, максимальних безвідривних величинах кутів атаки крил за умов обтікання в соплі: для крила MB253515 $\alpha(c_y^{\max}) = 14^\circ$; для пластини $\alpha(c_y^{\max}) = 12^\circ$. На підставі даних табл. 1 знайдемо також відповідні значення усередненої кутової швидкості $\bar{\omega}_v$ вільних вихорів за

формулою $\bar{\omega}_v = 2\pi n, 1/c$. Формула (4) дає змогу розрахувати значення площ перерізу вільних вихорів σ_v , а отже, і їх діаметрів d_v . Основні розрахункові параметри внесено до табл. 2.

Таблиця 2. Характеристики вихрових систем крил-вихорогенераторів прямокутної форми в плані

Профіль крила	Re = 55000			Re = 95000		
	$\Gamma, \text{м}^2/\text{с}$	$\bar{\omega}_v, 1/\text{с}$	$d_v, \text{мм}$	$\Gamma, \text{м}^2/\text{с}$	$\bar{\omega}_v, 1/\text{с}$	$d_v, \text{мм}$
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

Згідно з даними праць [2, 6], спіралеподібна ЕКВС “вуса” у пристінній області досліджуваної ВК утворена двома основними вихорами, розрахунково-експериментальне визначення діаметрів яких за подібної максимальної величини числа Рейнольда Re дало такі значення: $d_{1,2} = 29,18$ мм, $d_{2,2} = 10,20$ мм на відстані 2 мм від внутрішньої стінки камери; $d_{1,c} = 24,48$ мм, $d_{2,c} = 21,42$ мм на відстані 4 мм. Відповідно, середні значення для пристінної області течії в межах ЕКВС дорівнюють $d_{1,c} = 26,83$ мм і $d_{2,c} = 15,81$ мм. Очевидно, завдяки спільним геометричним і кінематичним умовам формування керувальних “вільних вихорів” та спіралеподібної ЕКВС в обмеженому просторі проточного тракту сопла величини діаметрів вихорів, які утворюють ЕКВС, і дані табл. 2 щодо вихрових шнурів від крил мають однакові порядки і частково навіть наближену рівність. Це відповідає умовам реалізації взаємної сприйнятливості вихрових структур. Інтегрально ефективність керування ЕКВС кінцевими вихорами крила в соплі можна оцінити, здійснюючи аналіз полів актуальної швидкості у вихідному перерізі ВК на відстані 4,1 калібру від соплового перерізу камери (рис. 4) та 7 калібрів від всмоктувального патрубку вентилятора з додатковими вставками демпфування коливань потоку. Згідно з величинами n, Γ і $\bar{\omega}_v$ (див. табл. 1, 2), крило MB253515 (іменоване в подальшому “MB”) при максимальних кутах атаки є більш ефективним з порівнюваних варіантів крил, тому проведемо аналіз експериментальних даних при роботі крила типу MB та за відсутності керувальної дії. Розподіли усереднених за часом (U, W) та пульсаційних швидкостей, виділених з актуальних величин швидкості за окремими компонентами при $Re = 95000$, наведені на рис. 5, 6 у

безрозмірному вигляді, де $r^* = r/r_0$ – безрозмірний радіус; $U^* = U/W_a$; $W^* = W/W_a$ – відносні величини трансверсальної та осьової складових локальної усередненої швидкості; W_a – середня за перерізом камери поздовжня швидкість вихідного потоку; $\varepsilon_u = \sqrt{u'^2} / U$, $\varepsilon_w = \sqrt{w'^2} / W$ – відповідні величини інтенсивності пульсацій швидкості.

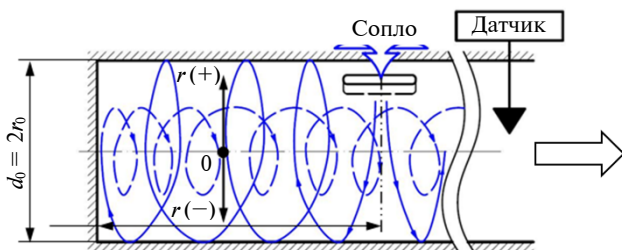


Рис. 4. Схема розміщення зони вимірювання швидкості

Аналіз графіків показує, що КВС у вихідному перерізі ВК мають однаковий напрямок обертового руху. В пристінній зоні камери ($0,7 \leq r^* < 1$) виявлено дію активної частини спіралеподібної ЕКВС (див. рис. 5, а). Різниця трансверсальних швидкостей руху об'ємів повітря в проміжній зоні між ЦКТВ та вихорами квазітейлорівського типу [2] завдяки ефектам просторового зсуву спричиняє зростання величин ε_u ближче до приосьової області камери при $-0,4 \leq r^* \leq 0,4$ (див. рис. 5, б). У цьому діапазоні радіусів значне зменшення відцентрових сил обумовлює, відповідно, і їх меншу блокувальну дію. Зону зворотної течії відображає характер функції $W^*(r^*)$ при $r^* < 0$ (рис. 6, а). Певною мірою подібні зони зворотної течії використовують для інтенсифікації процесів перемішування компонент пального та для стабілізації фронту полум'я в камерах згоряння різноманітного призначення. Інтенсивність пульсацій осьової складової швидкості ε_w має два піки різкого зростання в області $0 \leq r^* < 1$ за граничних значень додатного і від'ємного кутів атаки крила (рис. 6, б), що в 2–4 рази перевищує інтенсивність у цій області ВК без керування КВС. Суттєво нееквідистантна поведінка функцій $\varepsilon_w(r^*)$ і $\varepsilon_u(r^*)$ на цій ділянці радіусів ВК свідчить про дуже складний характер збурень на мікрорівні при тривимірній зсувній взаємодії між вихорними елементами закрученої течії когерентної природи, хоча при $0,75 \leq r^* < 1$ вплив

пристінної ЕКВС типу “вуса” на обидві характеристики пульсаційного руху, особливо для випадку відсутності керувальних дій, є більш однозначним.

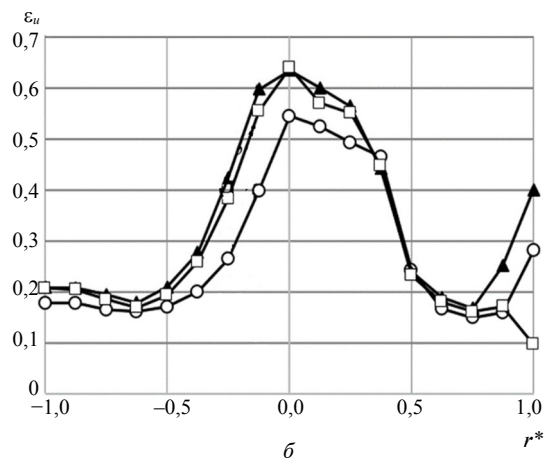
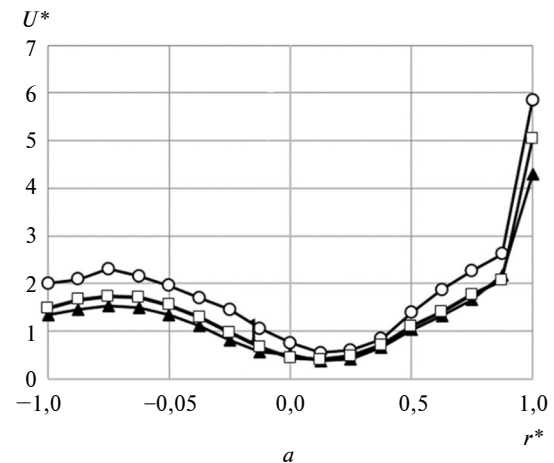


Рис. 5. Параметри трансверсальної складової швидкості течії у вихідному перерізі вихрової камери: а – профілі усередненої швидкості; б – розподіл інтенсивності пульсацій: —○— без крила; —▲— МВ, $\alpha = +14^\circ$; —□— МВ, $\alpha = -6^\circ$

З наведених на рис. 5, б та рис. 6, б графіків інтенсивності пульсацій швидкості можна зробити висновок про більшу доцільність використання як вихорогенераторів у соплах ВК крилових елементів із кутом атаки $\alpha_{\max} = 14^\circ$. Для оцінки зміни усередненої за вихідним перерізом камери інтенсивності пульсацій за компонентами $\Delta\varepsilon_{u,a} = \varepsilon_{u,a} - \varepsilon_{u,0}$ та $\Delta\varepsilon_{w,a} = \varepsilon_{w,a} - \varepsilon_{w,0}$ при керувальних діях від крила МВ відносно значень $\varepsilon_{u,0}$ і $\varepsilon_{w,0}$ за відсутності керування уведемо інтегральні показники впливу крилового вихорогенератора:

$$k_u = (\Delta\varepsilon_{u,a}/\varepsilon_{u,0}) \cdot 100 \% \text{ та } k_w = (\Delta\varepsilon_{w,a}/\varepsilon_{w,0}) \cdot 100 \%$$

Відповідні величини цих показників за різних значень числа Рейнольдса потоку на вході до сопла Re наведено в табл. 3. Легко перевірити, що залежності $k_u = f(Re)$ і $k_w = \varphi(Re)$ з достовірністю $R^2 = 0,99$ апроксимуються такими лінійними залежностями:

$$k_u = 4 \cdot 10^{-4} Re - 15,535; \quad k_w = 1,4 \cdot 10^{-3} Re - 73,681.$$

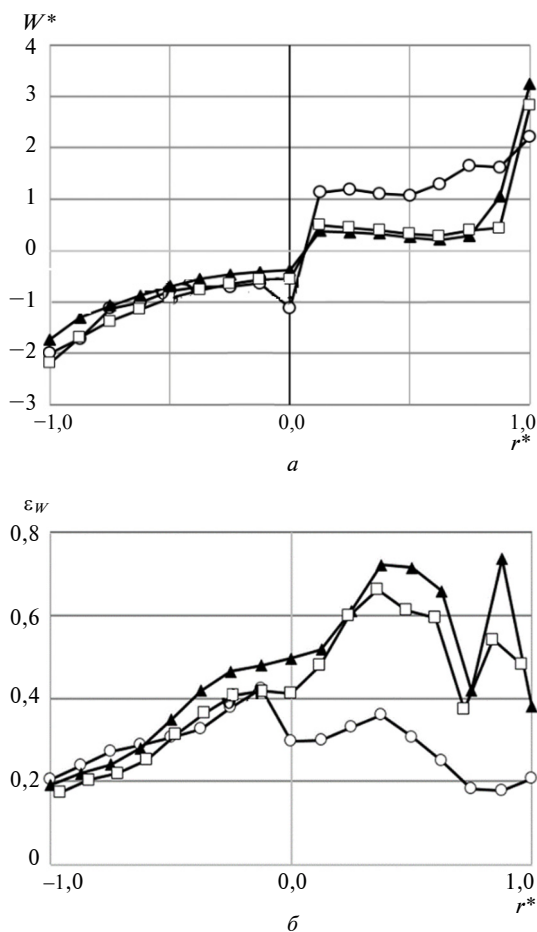


Рис. 6. Параметри осьової складової швидкості течії у вихідному перерізі вихрової камери: a – профілі усередненої швидкості; b – розподіл інтенсивності пульсацій: \circ – без крила; \blacktriangle – МВ, $\alpha = +14^\circ$; \square – МВ $\alpha = -6^\circ$

Таблиця 3. Інтегральні показники впливу вихорогенератора МВ

Re	55000	66700	83300	95000
$k_w, \%$	-4	12	50	63
$k_u, \%$	2,7	10,4	14,6	22

Порівняльний аналіз зміни усереднених за вихідним перерізом ВК величин $\Delta \epsilon_{u,a}$ і $\Delta \epsilon_{w,a}$ при $Re_{\max} = 95\,000$ згідно з рис. 5 і 6 показує таке. При керуванні ЕКВС установкою крила МВ у соплі на кут атаки $\alpha_{\max} = 14^\circ$ зростання відносної інтенсивності пульсацій становить 22 % за трансверсальною і 63 % за осьюовою складовими швидкості. Натомість відповідні зміни при куті атаки $\alpha_{\min} = -6^\circ$ становлять +10 і +47 %. Однак зміна інтенсивності пульсацій за модулем за двома складовими не перевищувала 5 % при $\alpha_{\max} = 14^\circ$ і $Re_{\min} = 55\,000$.

Як бачимо, попри те що розміри поперечного перерізу вихрових шнурів на кінцях крила-вихорогенератора становлять не більше 30 % від поперечних розмірів керованої спіралеподібної ЕКВС типу “вуса”, вона виявляє істотну чутливість до керувальної дії шнурів. Цей факт обумовлений тим, що оскільки керовані та керувальні вихори формуються за умов єдиного потоку у вхідному соплі, енергетичні характеристики взаємодіючих вихорів є сумірними. До того ж сумірність хорди крила з протяжністю соплового тракту забезпечує вплив керувальних вихрових шнурів саме на початкову фазу формування ЕКВС при наближеному зберіганні колінеарності осей збудження взаємодіючих вихрових систем. Як показав експеримент, зазначені аеродинамічно “м’які” керувальні дії навіть за максимальних чисел Рейнольдса не призводять до зростання незворотних втрат тиску в камері більш ніж на 2 % (без соплового керування структурою течії вони становлять 2253 Па).

Важливо відзначити, що позитивний результат керування структурою течії у ВК отриманий застосуванням простішої наближеної аеродинамічної моделі крила, доповненої експериментальними даними тільки щодо частоти обертання кінцевих “вільних вихорів”.

Все це підтверджує достатньо високу ефективність першого, квазидинамічного, методу керування КВС (а отже, процесами змішування), заснованого на принципі взаємної сприйнятливості вихрових утворень у ВК із видовженою тупиковою частиною.

Методика і результати проведення досліджень другим методом

Вплив на течію в тупиковій зоні камери. Цей квазидинамічний метод керування структурою течії в тупиковій частині ВК (рис. 7) заснований на взаємодії затопленого струменя, підведеного через додаткове торцеве сопло (ТС), як з

пристінною спіралеподібною ЕКВС типу “вуса”, так і з об’ємним (внутрішнім) “центральною квазітвердотільним вихором” (ЦКТВ). При цьому передбачено застосування природної, а також “вимушеної” ежекції торцевого струменя повітря із зовнішнього середовища при різних кутах орієнтації ТС α_m [10]. ТС на сферичній опорі виконане у вигляді конусоподібного збіжного насадка (конусність $\sim 1^\circ$) довжиною $l_m = 0,051$ м і діаметром вихідного отвору $d_m = 0,014$ м. Підстави для вибору саме такого діаметра обумовлені наближеним дотриманням на макрорівні умови взаємної сприйнятливості вихрових структур: величини добуток площі поперечного перерізу вихідного отвору ТС і середніх швидкостей витікання з нього мають бути достатньо близькими до величин добуток площ поперечного перерізу керованих енергоємних вихрових систем і середніх швидкостей руху робочого середовища вздовж їх осей. Кількісне оцінювання параметрів ЕКВС “вуса” та ЦКТВ було здійснено на підставі попередніх дослідів [2, 6]. Центр сферичної опори, в яку вмонтоване ТС, було зміщено від осі камери вертикально вниз на 0,033 м. Такий ексцентриситет, як і решта геометричних параметрів ТС, пов’язаний із конструктивними особливостями накладної торцевої планки для забезпечення відхилень сопла від вихідного положення паралельності поздовжній осі камери у будь-який бік у межах кутів $\alpha_m = \pm 20^\circ$, які б дали змогу досягти найбільш результативної взаємодії керу-

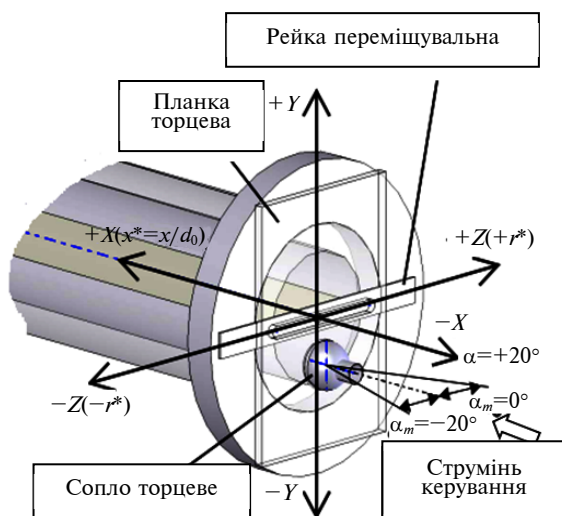


Рис. 7. Торць вихрової камери із соплом керування

вального струменя і керованих КВС. Торцевому соплу передував передвключений патрубок довжиною $\sim 15d_m$ (на рис. 7 умовно не показаний), призначений для стабілізації епюри швидкості торцевого струменя. В патрубок встановлена мініатюрна напірна трубка, сполучена з диференціальним манометром для вимірювання витрати повітря через ТС.

В експерименті спочатку була визначена витратна характеристика ВК з ТС при різній орієнтації торцевого струменя відносно КВС у тупиковій області ВК – коаксимального з ЦКТВ, супутнього обертання з ЕКВС “вуса” та при зустрічній взаємодії з нею. Отримане співвідношення витрат через ТС і через проточну частину

ВК $\frac{Q_{ТС}}{Q_{\Sigma}} \approx 0,0028-0,0031$ у досліджуваному діа-

пазоні чисел Рейнольдса свідчить про практично лінійний закон зв’язку $Q_{ТС} = f(Q_{\Sigma})$ та незначну залежність гідравлічного опору всієї камери від зазначеної орієнтації. На наступному етапі візуалізація течії контрастними монодисперсним порошком, а також дрібною і легкою тирсою з реєстрацією цифровими камерами картин течії дала можливість виявити локалізацію й макроструктуру зон взаємодії керованих струменів із КВС у камері. В цих зонах було проведено інструментальні вимірювання розподілу трансверсальних і осьових складових усередненої швидкості за допомогою мініатюрного Т-подібного екранованого насадка швидкості. Результати вимірювань опрацьовувались за допомогою програмного пакета SigmaPlot 11.0 (Systat Software, Inc.), що дало змогу побудувати розподіл ізотак течії у вигляді контурних діаграм, а також графіків, наведених нижче, які адекватно відтворюють картини течії у порожнині ВК.

Коаксимальний торцевий струмінь. Картини візуалізації показали, що при дії на ЦКТВ таким керованим струменем (за нульового ексцентриситету ТС) загальна структура течії в тупиковій частині камери в основному зберігається. Однак аналіз ізотак усередненої швидкості виявив, що в зоні основного вхідного сопла камери ЦКТВ прискорюється, збільшується в діаметрі та підискає меандруюче циліндричне вихрове утворення до периферії ВК. Розглянемо більш детально випадки супутнього та зустрічного рухів торцевого струменя відносно напрямку обертання ЕКВС “вуса”.

Супутнє введення керувального струменя ($\alpha_m = -20^\circ$). Розміщення ТС поблизу нижньої частини циліндричної поверхні камери спричиняє прилипання струменя до стінки під дією як відцентрової сили, так і ефекту Коанда. Це певною мірою сприяє формуванню в затопленому струмені керування профілю швидкості, наближеного до профілю напівобмеженого турбулентного струменя, який має більшу кінетичну енергію порівняно з хвостовою частиною ЕКВС на периферії ВК та з вихровим утворенням Бьодевадта біля торця. При його взаємодії з ЕКВС “вуса” виникає спільний обертовий рух, що призводить до утворення вихрового кільця, яке проявляє ознаки прецесії вздовж осі камери (рис. 8, а, б, в). При зміні кута підведення керувального струменя $-20^\circ \rightarrow \alpha_m \rightarrow 0^\circ$ площина вихрового кільця наближається до положення, перпендикулярного поздовжній осі камери, але при цьому вихрове кільце збільшує свою ширину. Утворення вихрового кільця в структурі течії викривлює вісь закрутки ЦКТВ, сприяючи водночас більш рівномірному переміщенню мас повітря вздовж тупикової частини ВК за рахунок підживлення енергією торцевим струменем. Ця особливість, яку поки що не відтворюють сучасні програмні пакети, є важливою при створенні методів розрахунку робочих режимів ВК, особливо при потребі збільшити час перебування робочого середовища в порожнині

камери для більш рівномірного його перемішування.

Зустрічне введення керувального струменя ($\alpha_m = +20^\circ$). Макроструктура течії при зустрічному, відносно ЕКВС “вуса”, напрямку підведення торцевого струменя показана на фотографіях візуалізації тої самої картини течії за незмінних умов дослідів, але в різних експериментах (рис. 8, г, д, е, ж). Неоднозначність положення пари торнадоподібних вихорів указує на її осциляцію поблизу циліндричної поверхні вздовж осі ВК. Це пояснює складність теоретичного розв’язання такої задачі: в процесі взаємодії досліджуваних потоків генеруються вторинні вихрові утворення, до чого додається вплив в’язкої відцентрової нестійкості пристінної течії через близькість циліндричної поверхні камери. Результати вимірювань трансверсальних і осьових компонент швидкості свідчать про домінування ЕКВС “вуса” в зоні утворення пари вихорів, що перешкоджає переміщенню цієї пари до центра камери. Таким чином, зустрічно спрямований торцевий струмінь може створювати біля торця “мертву” зону, порушуючи течію за Бьодевадтом, але за межами цієї зони загальна структура течії зберігається, лише з певною зміною швидкості поширення спіралеподібної ЕКВС “вуса”. Детальне визначення параметрів результуючого руху в цьому випадку дуже ускладнене через нестабільність взаємодії вихрових структур.

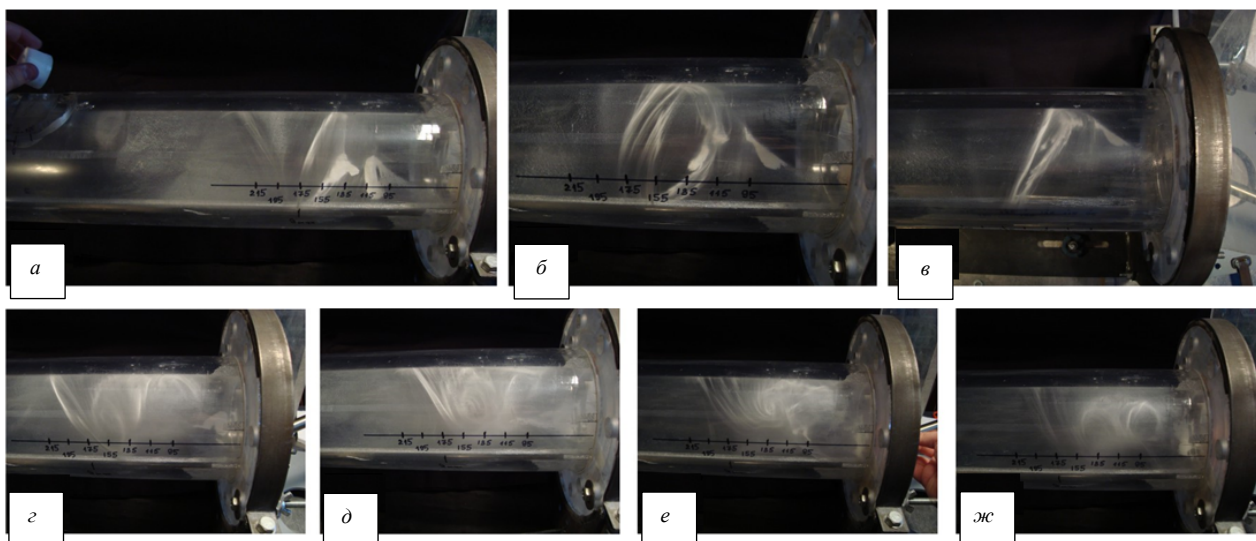


Рис. 8. Фрагменти розвитку взаємодії струменя керування з енергоємною когерентною вихровою структурою “вуса”: а, б, в – вихрове кільце при супутньому обертанні потоків (в – вигляд зверху), $\alpha_m = -20^\circ$; г, д, е, ж – формування пари “торнадо-вихорів” при зустрічній взаємодії, $\alpha_m = +20^\circ$

Зазначеним вище особливостям взаємодії керувальних і керованих струменів у тупиковій частині ВК має відповідати певна реакція вихідного потоку з камери (на відстані 0,418 мм від центра основного вхідного сопла). Очевидно, саме ця реакція і є найбільш цікавою з практичної точки зору.

Інтегральна оцінка ефективності керувальних впливів по параметрах потоку на виході з ВК. Для можливості проведення такої оцінки наведемо спочатку дані термоанемометрії розподілів осевої та трансверсальної складових місцевої усередненої швидкості потоку й інтенсивності відповідних пульсацій швидкості за вертикальним діаметром вихідного перерізу ВК із глухим торцем без керувальних дій. Результати вимірювань у безрозмірному вигляді ілюструє рис. 9, де Re^{PY} відповідає Re_a на виході з ВК (див. п. “Розрахунково-експериментальний аналіз масштабів та кінематики взаємодіючих вихрових систем”).

Як видно з графіків, найбільші значення трансверсальної проекції швидкості, чого не можна сказати про інтенсивність пульсацій ε_u під верхньою стінкою камери, чітко визначають зону проходження спіралеподібної ЕКВС “вуса” детермінованої природи з максимальним моментом кількості руху. В результаті відповідного перерозподілу енергії величини осевої проекції швидкості на значній частині досліджуваної зони близькі до мінімальних. Натомість, унаслідок

дії ефектів потужної зсувної взаємодії ЕКВС із модифікованим (після проходження зони вхідного сопла) ЦКТВ, інтенсивність осевих пульсацій ε_w на сегменті $-0,4 \leq r^* \leq 0,9$ досягає 40–50 % проти 15–25 % інтенсивності ε_u у цій зоні.

Значний пік інтенсивності трансверсальних пульсацій у діапазоні $-0,4 < r^* < 0,4$ при провалі профілю усередненої трансверсальної швидкості та максимальному рівні осевих пульсацій у центральній зоні течії пояснюються послабленням стабілізуючої дії відцентрових сил, що призводить до посилення змішування робочого середовища в зоні поширення ЦКТВ.

На рис. 10 наведені результати термоанемометрії потоку в проточній частині ВК із торцевим коаксіальним керувальним струменем. Режим протікання робочого середовища у керувальному торцевому соплі варіювався в діапазоні чисел Рейнольдса $Re^{TC} = 14000-30000$ за рахунок комбінації режимів “вільна ежекція–примусовий вдув”. Як показують графіки, зростання співвідношення витрат у досліджуваному діапазоні $Q_{TC}/Q_{\Sigma} = 0,0906-0,1484$ веде до збільшення обох проекцій усередненої швидкості течії, локально сягаючи поблизу центральної частини камери (при $-0,2 \leq r^* \leq 0,4$) 75–200 % від значень, які відповідають мінімальному співвідношенню витрат (рис. 10, а). При цьому інтенсивність пульсаційного руху істотно знижується:

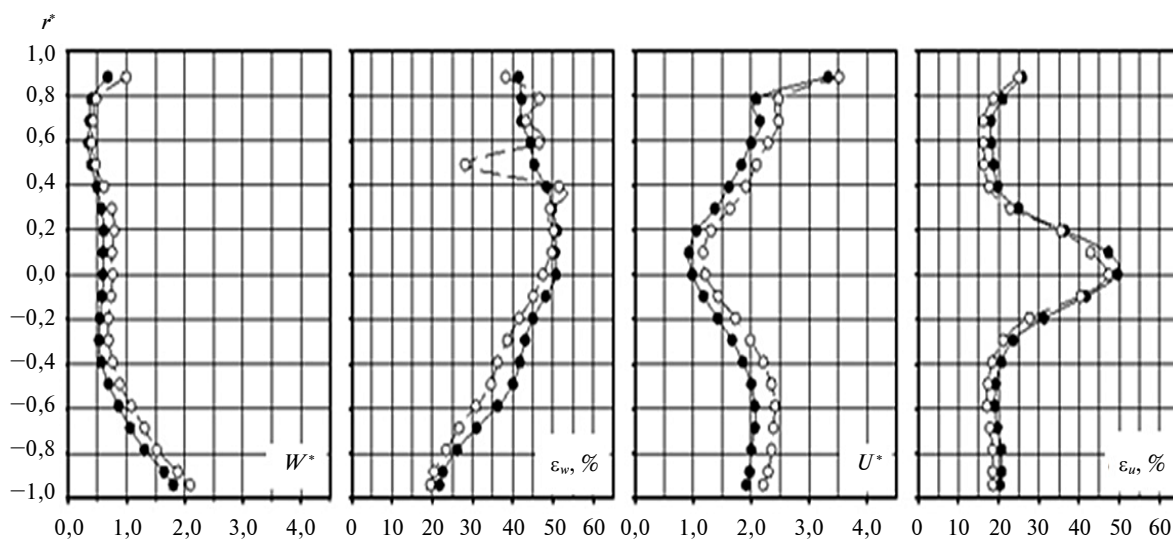


Рис. 9. Профілі проекцій швидкості та інтенсивності їх пульсацій на виході вихрової камери без струминного керування

—●— Q_{min} , $Re^{PY} = 21336$; —○— Q_{max} , $Re^{PY} = 27690$

в середньому як осьова, так і трансверсальна складові більш ніж на 40 % (рис. 10, б, з) у діапазоні $-0,4 \leq r^* \leq 0,4$. Таким чином, процес перемішування робочого середовища саме в ЦКТВ частково пригнічується коаксіальним торцевим струменем. Живлення енергією вихрових утворень коаксіальним струменем у торцевій зоні ВК сприяє збільшенню кроку спіралеподібного утворення “вуса” в проточній частині ВК. На це непрямо вказує той факт, що порівняно з випадком без керування, наприклад у діапазоні $Re^{PY} \approx 21000-29000$, відбувається швидке, але нерівнозначне, зростання величин обох проекцій безрозмірної усередненої швидкості $W^* = W/W_a$ і $U^* = U/W_a$ у верхній частині графіків ($r^* > 0,8$): якщо осьової швидкості на 400 %, то трансверсальної – тільки на 23 %.

Профілі проекцій швидкості та інтенсивності пульсацій у проточній частині ВК на рис. 11 відображають результат дії торцевого керувального струменя назустріч ЕКВС “вуса”.

Утворення пари торнадоподібних вихорів і застійної (“мертвої”) зони на відстані приблизно $1,5d_0$ від торця (див. рис. 8, з–ж) різко змінює область взаємодії крупних вихрових

структур у тупиковій частині ВК та призводить локально до значного перерозподілу усереднених швидкостей: при $r^* > 0,8$ і близьких значеннях числа Re^{PY} стрибок осьової швидкості приблизно в 3 рази (рис. 11, а), а трансверсальної в 1,7 разу (рис. 11, в) перевищують їх приріст у тій самій зоні ВК із глухим торцем (див. рис. 9). У верхній частині пристінної області зростання співвідношення Q_{TC}/Q_{Σ} призводить до стрибка усередненої осьової швидкості до 300 % (див. рис. 11, а), трансверсальної – менш однозначно: від -27 до $+23$ % (див. рис. 11, в) у різних діапазонах Q_{TC}/Q_{Σ} , що позначається на переміщенні середовища в складі ЦКТВ. Найбільшу зміну інтенсивність пульсацій зазнає в діапазоні радіусів $-1,0 \leq r^* \leq 0,5$ (див. рис. 11, б, з), причому при $-1,0 \leq r^* \leq -0,3$ спостерігається зростання на 25–30 % інтенсивності пульсацій обох складових, а в діапазонах $-0,2 \leq r^* \leq 0,5$ для осьової (див. рис. 11, б) і $0 \leq r^* \leq 0,4$ для трансверсальної (див. рис. 11, з) складових збільшення Q_{TC}/Q_{Σ} спричиняє спад інтенсивності пульсацій до 20 %. При супутньому відносно ЕКВС “вуса” введенні керувального струменя

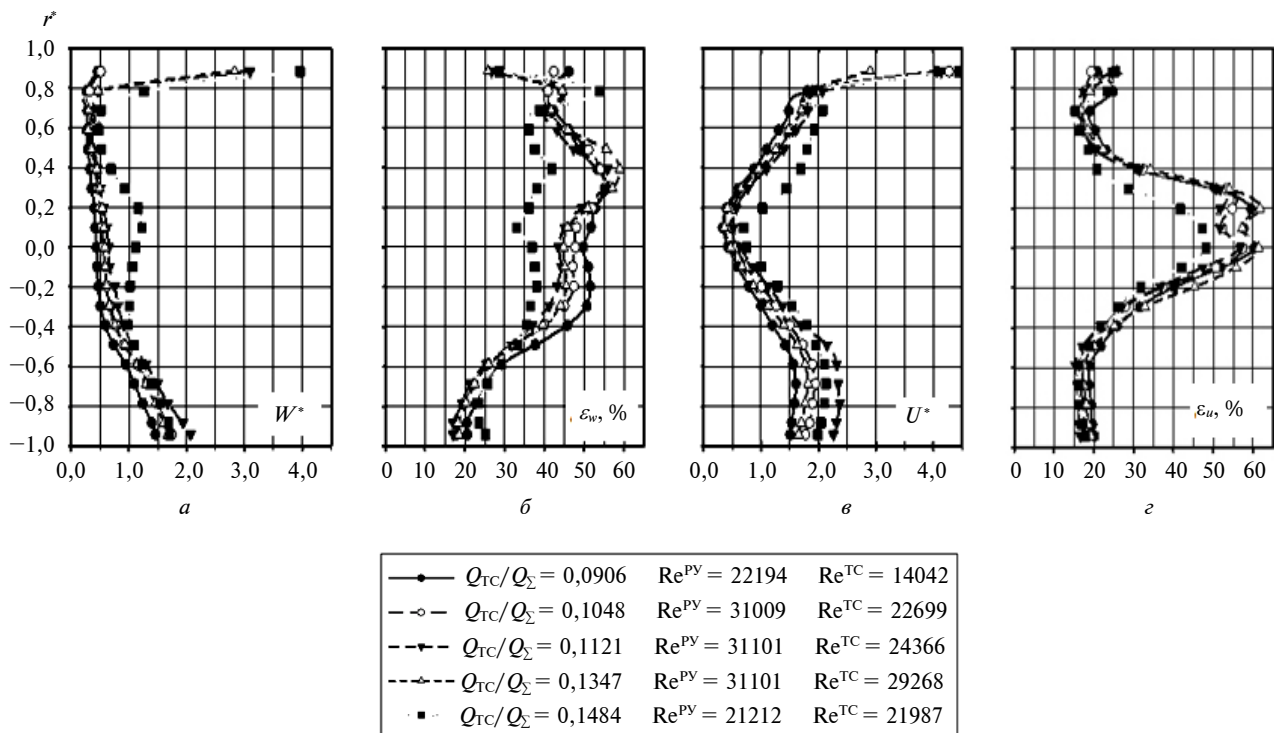


Рис. 10. Профілі проекцій швидкості та інтенсивності їх пульсацій на виході вихрової камери при керуванні коаксіальним струменем: а – $W^*(r^*)$; б – $\varepsilon_w(r^*)$; в – $U^*(r^*)$; з – $\varepsilon_u(r^*)$

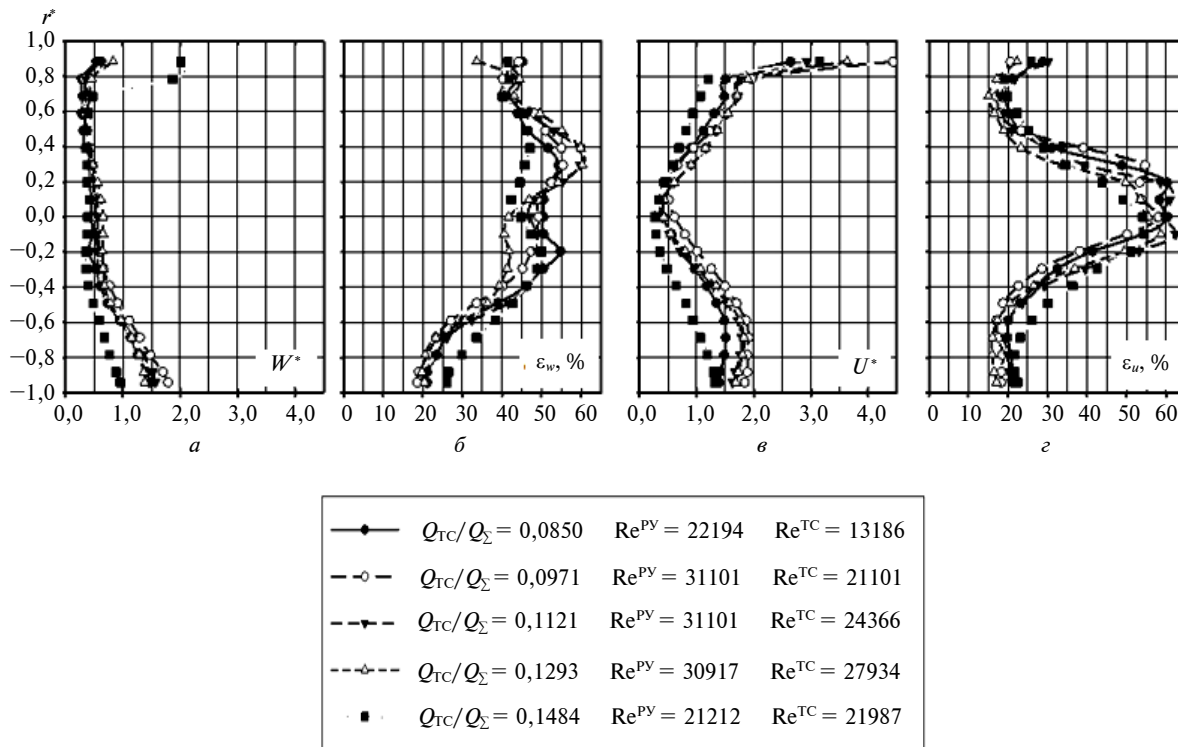


Рис. 11. Профілі проекцій швидкості та інтенсивності їх пульсацій на виході вихрової камери для випадку зустрічного до енергоємної когерентної вихрової структури “вуса” введення керувального струменя

зміна співвідношення Q_{TC}/Q_{Σ} істотно впливає на положення згаданого вище (див. рис. 8, а–в) вихрового кільця: зі зростанням Q_{TC}/Q_{Σ} площина обертання кільця віддаляється від торця. Кільцеве обертання в тупиковій зоні викликає в структурі течії суттєві зміни (рис. 12). Так, порівняно з випадком без керування, в осьовому напрямку різко зростає крок поширення спіралеподібної ЕКВС “вуса”, що підтверджується профілями $W^* = W/W_a$ і $U^* = U/W_a$ при $0,75 \leq r^* < 1,0$ (рис. 12, а, в): наприклад, у межах $Re^{PY} \approx 21000-29000$ осьова швидкість зростає на 400 %, а трансверсальна – тільки на 18 %. Крім того, зі зростанням співвідношення Q_{TC}/Q_{Σ} до верхньої границі 0,1484 спостерігається нетипове для інших досліджуваних випадків розшарування профілів інтенсивності пульсацій (рис. 12, б, г): в інтервалі $-1 < r^* < 0$ спостерігається максимальне зростання величини ϵ_u на 74 %, а в інтервалі $0 < r^* \leq 0,8$ – різкий спад на максимальну величину 65 % за значно менших відхилень у поведінці профілів $\epsilon_w(r^*)$ на таких саме інтервалах r^* (відповідні макси-

мальні значення зміни ϵ_w становлять приблизно 30 і 28 %).

Аналіз графіків на рис. 10–12 показує, що найменш чутливими до зміни параметра Q_{TC}/Q_{Σ} є профілі усередненої швидкості та інтенсивності пульсацій при керувальних діях на КВС зустрічним торцевим струменем. Відзначимо також загальну особливість усіх розглянутих варіантів як за наявності керування, так і за його відсутності: найбільші значення трансверсальної проекції швидкості чітко відповідають зоні проходження спіралеподібної ЕКВС “вуса”. Стійкість і відтворюваність топології цієї потужної структури підкреслює її детермінований характер, незважаючи на загальний турбулентний фон у вигляді пульсації та вихорів стохастичної природи.

Відмінності в розподілах величин ϵ_w і ϵ_u у близьких інтервалах r^* , але за різних значень керувального параметра Q_{TC}/Q_{Σ} свідчать про існування суттєвої анізотропії та неоднорідності пульсаційного руху в обмеженому закрученому потоці, що відповідає областям з різною ефективністю процесів переносу маси й енергії у

Таблиця 5. Вплив керувальних дій при вимушеному вдуванні повітря через торцеве сопло при $Q_{\Sigma} = \text{var}$

Діапазон Re_a	27690–31101									
Вид керувальної дії торцевого струменя на КВС	Відносна витрата, Q_{TC}/Q_{Σ}									
	0,085	0,091	0,097	0,101	0,105	0,112	0,130	0,135	0,148	
	Зміна трансверсальної складової пульсацій k_u , %									
Коаксіальний з ЦКТВ						+(22–38)				
Зустрічний до ЕКВС				+(31–26)						
Супутній до ЕКВС				+(11–13)						
	Зміна осрової складової пульсацій k_w , %									
Коаксіальний з ЦКТВ					+4	–1		+4		
Зустрічний до ЕКВС			+6			+12	+6			
Супутній до ЕКВС				+4			–3			

Варіювання величин Q_{TC}/Q_{Σ} при дослідженні всіх типів керування здійснювалось завдяки вільній ежекції струменів через ТС (1 режим), а також вимушеному нагнітання повітря через ТС (4 режими) дискретним регулюванням потужності приводу допоміжного вентилятора в режимах як збереження загальної витрати $Q_{\Sigma} = \text{idem}$ дроселюванням потоку на виході з установки, так і без дроселювання. Ця обставина, а також складність аеродинамічних процесів взаємодії торцевих струменів із керованими КВС при $Q_{TC}/Q_{\Sigma} = \text{var}$, що позначається на витратній характеристиці установки, зумовлюють локальні порушення монотонності функцій $k_u = f(Q_{TC}/Q_{\Sigma}, Re_a)$, $k_w = \varphi(Q_{TC}/Q_{\Sigma}, Re_a)$ і певний розрив між зазначеними в таблицях діапазонами чисел Re_a . Тож пусті клітинки в табл. 4, 5 відповідають або нереалізованим режимам роботи камери з огляду на технічні можливості підтримання витратної характеристики ВК з ТС при різній орієнтації торцевого струменя відносно керованих КВС, або абсолютним величинам показників ефективності, меншим 1 %. Із даних таблиць випливає, що найбільш ефективними, з точки зору інтенсивності пульсацій (а отже, процесів перемішування в камері), в найбільш широкому діапазоні параметра Q_{TC}/Q_{Σ} є зустрічне введення керувального струменя відносно ЕКВС “вуса”, в менш широкому діапазоні Q_{TC}/Q_{Σ} – коаксіальне введення торцевого струменя, а найменш ефективним є керування супутнім введенням струменя.

Досліди показали, що максимальне відносне зростання гідравлічних втрат за трактом ВК при другому методі керування не перевищує 4 %

порівняно з втратами у ВК без керування структурою течії, що є сумірним із похибкою вимірювань. Але цей метод, на відміну від першого, все ж передбачає залучення додаткових джерел енергії, хоча й відносно невеликої потужності, для вимушеної подачі торцевих струменів.

Як видно, за певних геометричних і режимних параметрів організації першого і другого методів керування структурою течії у ВК отримано додатні й досить значні (від 6 до 63 % за різними компонентами швидкості) величини відносної зміни інтенсивності пульсацій k_u , k_w . Це дає можливість вважати застосовані методи інтенсифікації обмінних процесів ефективними, особливо при $Re_a > 27000$, що відповідає типовим робочим режимам промислових ВК.

Висновки

Експериментально доведено ефективність принципу взаємної сприйнятливості вихрових утворень, покладеного в основу досліджуваних методів керування КВС у вихрових камерах: підвищення відносної інтенсивності пульсацій швидкості потоку у вихідній зоні камери за окремими компонентами становить від 22 до 63 % при першому (вихровому) методі керування та від 6 до 38 % при другому (струминному) методі керування.

Обидва методи керування призводять до зростання гідравлічних втрат за трактом ВК, сумірних із точністю постановки експериментів (2–4 %).

Метод керування структурою закрученого потоку за допомогою кінцевих вихорів від мініатюрного крила малого видовження потребує

менших енергетичних затрат на організацію керувальних дій та має очевидні конструктивні переваги.

У цілому досліджувані методи керування структурою течії є конкурентоспроможними і можуть ефективно застосовуватись у практиці проектування ВК для інтенсифікації робочих процесів у них. Однак за необхідності роздільного підведення окремих компонентів робочого середовища до порожнини ВК струминний метод керування є більш доцільним.

Цикл досліджень ефективності керування структурою течії у вихрових камерах у подальшому передбачає проведення дисперсійного та спектрального аналізу щільності потужності пульсацій швидкості й тиску для більш точного визначення геометричних масштабів, кінематичних і енергетичних параметрів керувальних дій та реакції відгуку на них, а також для поглибленого розуміння складного механізму взаємодії торцевих турбулентних струменів з енергоємними вихровими структурами.

References

- [1] H. Schlichting, *Theory of Boundary Layer*. Moscow, SU: Nauka, 1974, 712 p.
- [2] 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.
- [3] A. Hupta *et al.*, *Swirl Flows*. Moscow, SU: Mir, 1987, 588 p.
- [4] 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.
- [5] Ye.V. Mochalin and A.A. Khalatov, *Heat Transfer and Fluid Flow in the Fields of Centrifugal Forces*, vol. 8, *Hydrodynamics of Swirl Flow in Rotary Filters*. Kyiv, Ukraine: Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, 2010, 428 p.
- [6] V. Turick *et al.*, "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, pp. 28–38, 2018. doi: 10.15587/1729-4061.2018.121962
- [7] M.S. Selig *et al.*, *Airfoils at Low Speeds*. Virginia: H.A. Stokely Publ., 1989, 398 p.
- [8] M.S. Selig *et al.*, *Summary of Low-Speed Airfoil Data*, vol. 1. Virginia: SoarTech Publications, 1995, 292 p.
- [9] V.V. Babenko, "Control of the coherent vortical structures of a boundary layer", in *Proc. CEAS/DragNet European Drag Reduction Conf.*, Potsdam, Germany, 2001, pp. 341–350. doi: 10.1007/978-3-540-45359-8_36
- [10] V. Turick and D. Miliukov, "The outlet flow structure of vortex chamber with dead end jet actions", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 8, pp. 45–51, 2014. doi: 10.15587/1729-4061.2014.24861.

В.Н. Турик

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВИХРЕВОГО И СТРУЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ ТЕЧЕНИЯ В ОГРАНИЧЕННЫХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ

Проблематика. Малозатратное управление энергонесущими когерентными вихревыми структурами (КВС), которые определяют процессы переноса массы, импульса и энергии в вихревых камерах (ВК) энергетических и технологических аппаратов для повышения эффективности их рабочих процессов.

Цель исследования. На основе принципа взаимной восприимчивости вихревых структур исследовать реакцию КВС на выходе из ВК на направленные управляющие действия согласно двум методам воздействия на КВС: 1 – концевыми вихревыми шнурами от крыльцевого вихрегенератора во входном сопле ВК; 2 – с помощью турбулентных струй, подведенных с разной ориентацией относительно КВС в тупиковой части ВК со стороны ее торца. Поставлена задача сравнения результатов применения таких управляющих воздействий путем анализа профилей усредненной скорости и относительной интенсивности пульсаций скорости на выходе из ВК.

Методика реализации. Экспериментальное исследование формирования и взаимодействия управляющих вихрей и КВС в полости камеры в сочетании с расчетными оценками.

Результаты исследования. Засвидетельствовано повышение относительной интенсивности пульсаций скорости потока в выходной зоне ВК по отдельным компонентам: от 22 до 63 % при первом (вихревом) методе управления КВС и от 6 до 38 % при втором (струйном) методе управления. Таким образом, доказана эффективность применения принципа взаимной восприимчивости управляющих и управляемых вихревых структур в ограниченных закрученных потоках, положенного в основу реализации методов управления.

Выводы. Экспериментально доказана возможность эффективного и малозатратного управления энергоёмкими КВС, а следовательно, процессами массо- и теплопереноса в вихревых камерах смешивания. Показаны работоспособность, особенности и преимущества вихревого и струйного методов управления.

Ключевые слова: вихревая камера; когерентные вихревые структуры; взаимная восприимчивость; управление; вихревые шнуры; торцевые струи.

V.N. Turick

EFFICIENCY OF VORTICAL AND JET CONTROL OF CURRENT STRUCTURE IN LIMITED SWIRLING FLOWS

Background. Low-cost control by energy-carrying coherent vortex structures (CVS), determining transfer processes of mass, momentum and energy in vortex mixing chambers (VC) to increase working processes efficiency in vortex technological and power apparatuses.

Objective. The purpose of the paper is to investigate the response of the CVS at the outlet of the VC on directional control actions according to two methods of influence on the CVS based on mutual susceptibility principle of vortex structures: 1 – by means of the end vortex cords from the wing eddy-generator in the inlet nozzle of the VC; 2 – with the help of turbulent jets with different orientation relative to the CVS in the deadlock part of the VC from the side of its end. The aim is to compare the results of the implementation of such control actions by analyzing the profiles of the average velocity and the relative intensity of flow velocity fluctuations at the outlet of the VC.

Methods. Experimental study of the formation and interaction of control vortices and CVS in the chamber cavity in combination with the rated estimates.

Results. An increase of the relative intensity of flow velocity fluctuations in the outlet zone of the VC by individual components is shown: from 22% to 63% in the first (vortex) method of control of the CVS and from 6% to 38% in the second (jet) control method. Thus, the effectiveness of applying the principle of mutual susceptibility of control and driving vortex structures in limited swirling flows, which is the basis of the control methods realization, is proved.

Conclusions. The possibility of efficient and low-cost control by energy-carrying CVS, which determines mass and heat transfer processes in vortex mixing chambers, is experimentally proved. Operability, features and advantages of vortex and jet control methods are shown.

Keywords: vortex chamber; coherent vortex structures; mutual susceptibility; control; vortex cords; end jets.

Рекомендована Радою
Механіко-машинобудівного інституту
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
11 вересня 2019 року

Прийнята до публікації
31 жовтня 2019 року