

Турик¹ В. М., Кочін² В. А., Кочіна¹ М. В.

1 – КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

2 – Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна

ЕФЕКТИВНИЙ СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВИХРОВИХ АПАРАТІВ

Запропоновано спосіб спрямованого керування енергоємними когерентними вихровими структурами у вихровій камері за допомогою стійких вихрових джгутів, що сходять з бічних крайок нерухомого крила малого видовження, вмонтованого у впускному соплі камери. Були отримані дані аеродинамічних продувок для трьох типів профілів. Відносно тонкі профілі були обрані для забезпечення постійності коефіцієнта підйімальної сили в досить широкому діапазоні чисел Рейнольдса ($Re=55000\div95000$). Керувальні дії навіть при максимальному значенні числі Рейнольдса на вході до сопла $Re_{max}=95\,000$ та при максимальних безвідривних кутах атаки крила MB253515 практично не впливають на аеродинамічний опір камери. Але застосування крилового вихорогенератора забезпечує перерозподіл енергії середнього руху на користь енергії пульсацій в результаті взаємної сприйнятливості керувальних вихорів крила і керованих КВС в тупиковій зоні камери. Виявлено також, що в частотному діапазоні 0–250 Гц наявність вихорогенератора більш ніж на 70% підвищує енергію пульсацій швидкості потоку в пристінній зоні вихідного перерізу вихрової камери. Запропоновано теоретико-експериментальне обґрунтування досліджуваного способу на основі принципу взаємної сприйнятливості вихрових структур.

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

Вступ

Дія відцентрових сил — це основна характерна ознака робочих процесів топкових пристроїв енергетичних та промислових котлів, камер згоряння газотурбінних установок, циклонів, сепараторів і подібних вихрових апаратів. Попри використання різних напрямків застосування цього фактора у різних групах апаратів, особливості впливу поля масових сил на потоки поблизу криволінійних стінок є багато в чому спорідненими. Так, відоме явище відцентрової нестійкості призводить до формування в пристінних областях течії когерентних вихрових структур (КВС) типу Гьортлера-Тейлора, Людвіга та інших [1, 2]. Це викликає неоднорідність структури течії в усередненому і пульсаційному рухах, що може суттєво змінювати локальні та інтегральні характеристики переносу маси, імпульсу й теплоти в робочих порожнинах вихрових апаратів. Наслідками є такі: або зниження повноти згоряння палив, димний вихлоп продуктів згоряння, підвищення шкідливих викидів оксидів азоту та вуглецю, погіршення показників економічності та надійності енергетичних машин і установок, або зниження якості очищення й поділу на фракції багатокомпонентних середовищ в циклонах та сепараторах [3, 4]. На сьогодні існує брак повної і несуттєвої інформації щодо вихрових складових різних масштабів в обмежених та напівобмежених закручених потоках. Тому традиційно пропонувані засоби керувальних впливів на процеси переносу зорієнтовані головню на зміну загальних картин течії [3, 4]. Цілком зрозуміло, що їх не можна вважати адекватними фізичним особливостям тонкої вихрової структури течії в апаратах, а отже, енергетично вигідними. Тому пошуки ефективних способів керування КВС, що визначають процеси перемішування, або навпаки, сепарації компонентів робочих середовищ є актуальними.

Відомо, що максимальний внесок в явища переносу зумовлюють найбільш енергоємні КВС. У вихрових камерах (ВК) з подовженою тупиковою частиною найбільш потужними виявилися стійкі спіралеподібні вихрові утворення типу «вуса» [2, 5]. Вони починають формуватися в пристінній області камери поблизу вхідного соплового пристрою із зосередженим підведенням газу та розходяться від сопла в сторони проточної та тупикової частин камери. Очевидно, слід вважати доцільною організацію керувальних впливів саме по відношенню до них згідно з принципом взаємної сприйнятливості вихрових структур [6]. Цьому й присвячена дана робота.

Постановка задачі дослідження

Для досягнення зазначеної мети були поставлені такі завдання: розробити аргументовану методику застосування нерухомих крил як генераторів вихрових джгутів в соплі ВК для керувальних впливів на енергоємні КВС у ВК; здійснити обґрунтований вибір геометричних та аеродинамічних параметрів крил даного призначення; дослідити особливості формування керувальних вихорів за умов обмеженості проточного тракту вхідного сопла камери; проаналізувати реакцію енергоємних КВС в пасивній та активній зонах камери на керувальні дії соплового вихорогенератора (ВГ).

Методика та технічні засоби проведення дослідження

Кінцеві вихрові системи за крилом спричиняють індуктивний опір, який в авіації традиційно послаблюють різними засобами. Але в даному випадку для керування КВС передбачено використання саме вихрових шнурів. Згідно з узагальненим принципом взаємної сприйнятливості вихрових структур, характеристики вихрових шнурів мають бути сумірними або з характеристиками вихорів Гьортлера-Людвіга в присоплової зоні ВК, або безпосередньо з характеристиками енергоємної КВС [2, 5]. Для компенсації впливу нестійкої вихрової системи у супутньому сліді за крилом на аеродинамічний опір обрано відносно тонкі крила малого видовження ($\lambda < 3$) з гідравлічно гладкою поверхнею. Застосування крил малого видовження значно збільшує критичні кути атаки, що в поєднанні з високими вимогами до стану обтічної поверхні крил (особливо поблизу передньої кромки) зменшує їх профільний опір. Для забезпечення постійності максимального значення коефіцієнта підйімальної сили $C_{y,max}$ в достатньо широкому діапазоні чисел Рейнольдса ($Re=55000 \div 95000$) профілі досліджуваних крил обрано відносно тонкими.

Досліди здійснено на аеродинамічному стенді «Вихрова камера» для дослідження внутрішніх вихрових течій. Стенд складається з експериментальної установки з прозорою робочою ділянкою у вигляді ВК внутрішнім діаметром $d_0=0,102$ м та загальною довжиною $L_0=0,635$ м з одиночним соплом. Сопло має тангенціальний по відношенню до порожнини камери проточний тракт прямокутного перерізу $0,02 \times 0,04$ м² зі скругленнями по кутах. До вимірювального комплексу стенду входить апаратура термоанемометрування фірми "DISA Elektronik", Данія, з однопроводним дротяним датчиком і стандартні прилади контролю витрати та тиску з набором пневмометричних насадків. Апаратура термоанемометрування з'єднана з аналого-цифровим перетворювачем L-264 фірми "L-Card", Росія, що встановлений у вигляді плати розширення до IBM-сумісного комп'ютера. Також стенд укомплектований засобами візуалізації, кінофотореєстрування течії та координатними пристроями. Обробка вимірювальної інформації проводилась за допомогою ліцензійного програмного пакету «PowerGraph Professional», ООО «ДИСофт», Росія.

Обмеженість перерізу проточного тракту вхідного сопла ВК обумовлює зміну аеродинамічних коефіцієнтів сумірного з ним крила-ВГ відносно тих значень, які відповідають його безмежному обтіканню. До того ж, при великих кутах атаки можлива наявність екранного ефекту від стінки сопла, який суттєво впливає на коефіцієнт підйімальної сили крила. Для мінімізації впливу обмеженості перерізу проточного тракту вхідного сопла треба застосовувати методику перерахунку аеродинамічних коефіцієнтів, характерних для досліджень в галузі звукової авіації, введенням додаткового поправкового коефіцієнта індуктивного опору від стінок труби. Мале видовження крила-ВГ також потребує коригування аеродинамічних характеристик, отриманих при традиційних продувках крил в аеродинамічних трубах. Всі ці фактори неможливо врахувати розрахунковим шляхом, у тому числі чисельним моделюванням. Це обумовлює необхідність постановки фізичних, і перш за все, візуалізаційних експериментів для коректного вибору геометричних та аеродинамічних параметрів крил-ВГ при стійкій генерації кінцевих вихрових джгутів, що сходять з крил, які мають виконувати функцію

керувальних вихорів. Також важливо оцінити топологію з точки зору спроможності виконання певних вимог концепції взаємної сприйнятливості вихрових структур для керування ними у порожнині ВК. Передбачено проведення термоанемометричних вимірювань актуальної швидкості течії у 12 точках вздовж тупикової зони камери у пристінній області течії, а також у вихідному перерізі камери. Доцільно здійснити вимірювання осьової та колової складових швидкості, оскільки вони домінують на більшій частині течії. 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 досліджуваних точок пристінної зони циліндричної частини камери.

Результати розрахунків та інструментального дослідження

Проведена теоретична оцінка ефективності застосування крила в умовах проточного тракту сопла ВК. Показано, що найбільший вплив на його величину має відносне видовження крила λ та коефіцієнт підйимальної сили c_y . Найбільш прийнятним для даних цілей виявився ряд аеродинамічних профілів, параметри яких в діапазоні чисел Рейнольдса $Re=40000\div100000$ наведені в сучасних атласах профілів. В результаті, з урахуванням технологічності виготовлення крила, в якості базового об'єкта досліджень було обрано крило з профілем типу MB253515 прямокутної форми в плані розмірами $0,02\times0,02$ м². Встановлено, що установка як зазначеного крила, так і ще 2-х досліджуваних типів крилових елементів тонкого профілю (навіть при максимальних безвіддривних кутах атаки) у впускному соплі камери не призводить до суттєвого зростання аерогідродинамічного опору ВК, оскільки додаткове дроселювання потоку є дуже неістотним.

В теоретичній частині роботи застосовано еквівалентну П-подібну аеродинамічну модель М. Є. Жуковського крила з постійною середньою циркуляцією Γ вздовж його розмаху — два напівнескінченні вихрові шнури, які збігаються з кінцевих країв крила, замикаються одним приєднаним вихором. Оскільки циркуляція швидкості має бути постійною за довжиною всієї вихрової системи, то циркуляція навколо вільних вихорів дорівнює циркуляції навколо приєданого вихору. Показано, що наближена П-подібна аеродинамічна модель крила, доповнена експериментальними даними щодо частоти обертання вільних вихрових шнурів, дає позитивний результат.

Порівняння наведених в роботі [2] величин 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 Рейнольдса Re з діаметрами вільних вихрових шнурів від крилового ВГ 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. Важливо підкреслити, що розміри поперечного перерізу кінцевих вихорів складають до 30 % від узагальнених 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.

Експериментальні дані показують, що поля миттєвих швидкостей в найбільш енергоємній — пристінній області течії ВК відображають як детермінований, так і стохастичний характер турбулентної течії. Для визначення форми та порівняння кривих щільності розподілу ймовірностей для кожної з досліджуваних точок поля течії вибірки були представлені у вигляді гістограм. 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). Аналіз гістограм показав, що застосування крилового ВГ в соплі камери призводить до зміни гістограм, а отже, законів щільності розподілу ймовірностей в досліджуваних точках порівняно з випадком без керування, що свідчить про певний вплив керувальних дій на потужну спіралеподібну КВС — головну складову течії середовища в тупиковій зоні ВК. Встановлено, що при роботі вихрових джгутів крилового ВГ в соплі в одній з найбільш характерних точок тупикової зони відбувається 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. Для з'ясування ефекту керування структурою течії в порожнині ВК на її вихідні характеристики проведено аналіз енергетичного балансу пульсаційних швидкостей в залежності від смуги пропускання фільтра нижніх частот в пристінній зоні вихідного перерізу ВК у смузі частот 0–100 Гц. Енергія пульсаційних швидкостей визначається рівнянням $E' = 0,5D$, де D – дисперсія актуальної швидкості. Смути пропускання цифрового фільтра нижніх частот збільшувалися з 0–5 Гц, 0–10 Гц і далі до 0–100 Гц. Побудовано графіки зміни енергії пульсації колової швидкостей потоку у вихідному перерізі ВК без крила-ВГ та з його використанням в залежності від смуг пропускання фільтра. Їх аналіз дозволяє зробити висновок, що наявність крила-ВГ 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%. Таким чином, спостерігається «перекачування» енергії пульсацій від відносно дрібних вихорів до вихорів більш крупних масштабів, які найбільшим чином впливають на процеси переносу маси, імпульсу та енергії в потоках. Виявлено також, що в частотному діапазоні 0–250 Гц наявність вихорогенератора більш ніж на 70% підвищує енергію пульсацій швидкості потоку в пристінній зоні вихідного перерізу вихровий камери.

Список літератури

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя : [монография] / Г. Шлихтинг ; пер. с нем. Г. А. Вольперта под ред. Л. Г. Лойцянского. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974. – 712 с.
2. Турик В.Н. О гидродинамической неустойчивости течений в вихревых камерах / В.Н. Турик // Промислова гідроліка і пневматика. – 2006. – № 3(13). – С. 32–37.
3. Lilley A.K. Swirl Flows / A.K. Lilley, D.G. Gupta, N. Syred. – Kent., USA: Abacus Press, 1984. – 475 p.
4. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил: [монография] В 4 т. / А. А. Халатов, А. А. Авраменко, И. В. Шевчук. — К. : Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2000. — Т. 3: Закрученные потоки. — 474 с.
5. Бабенко В. В. Макет вихревых структур при течении потока в вихревой камере / В. В. Бабенко, В. Н. Турик // Прикладна гідромеханіка. — 2008. — Т. 10 (82), № 3. — С. 3–9.
6. Babenko V. Coherent Vortical Structures Control in Flat and Curvilinear Parietal Flows / V. Babenko, V. Turick // Proc. of the World Congress “Aviation in the 21-st Century” (14-16 Sept., 2003). – Kyiv : NAU, 2003. – P. 2.54–2.58.

УДК 621.031:664.292

Берник І.М., докторант

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ І ПАРАМЕТРІВ АКУСТИЧНОЇ ОБРОБКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ

Анотація. Відомі розрахункові моделі для визначення параметрів ультразвукової кавітаційної обробки дисперсних технологічних середовищ та режимів не враховують зміну їх у часі. При цьому параметри, що пропонуються, визначаються на основі роздільного дослідження динаміки акустичного