

УДК 533.6.08:53.082.6

DOI: 10.20535/1810-0546.2016.5.77463

В.М. Турик¹, В.О. Кочін²¹НТУУ "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна²Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

ПАСИВНІ МЕТОДИ КЕРУВАННЯ КОГЕРЕНТНИМИ ВИХРОВИМИ СТРУКТУРАМИ У ВИХРОВИХ КАМЕРАХ. ЧАСТИНА 2. ДИСПЕРСІЙНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ

Background. Improvement of the working processes efficiency of power and technological machinery and installations of vortex type.

Objective. Statistical analysis of experimental test of the new methods of power-capacious coherent vortical structures control. Just their positive influence on processes of the transfer of mass, momentum and energy in swirling flows determines to a great extent the operating effectiveness of equipment.

Methods. Spectral valuations data of represented in the present article, part 1, methods of artificial vortical disturbances influence on power-capacious coherent formation were subjected to the more detailed numerical processing on digital foundation.

Results. Analysis of distributions of the composite swirling flow average actual velocities and the fluctuating movement intensity in characteristic area of the most power-capacious coherent vortical structure testifies to its definite stability and quasi-steady current. On the strength of this fact the detailed estimation of fluctuating movement energy balance according to determined characteristic frequency bands was carried out along the researching zone. The features of action of various eddy-generator types from the standpoint of control "stiffness" of the transfer processes were shown. Dispersion analysis confirmed the data of spectral processing of the information, put in part 1 of the article regarding to discovered phenomenon of "reverse decay of the vortices", that is the most typical for two-dimensional eddy-generator (EG № 1).

Conclusions. Developed methods and their possible modifications offer the prospect of efficacious low-expended control on micro-level by hydromechanical, thermal and chemical processes in the cylinders of internal combustion engines, in vortex burners, combustion chambers of rocket engines, furnaces, plasmotrons, in mixers, chemical reactors, nuclear powerplants etc.

Keywords: coherent vortical structures; control; vortex chamber; probability density distribution; vortices mutual susceptibility; dispersion; velocity fluctuations energy.

Вступ

Першу частину цієї роботи [1] було присвячено пошуку і принциповому доведенню можливості практичної реалізації новітніх методів інтенсифікації процесів переносу транспортельних субстанцій у потоках вихрових камер (ВК) енергетичного і технологічного призначення завдяки малозатратному керуванню найбільш енергоємними когерентними вихровими структурами (ЕКВС). В основу запропонованого підходу при розв'язанні цієї проблеми було покладено сформульовану раніше [2] концепцію взаємної сприйнятливості вихрових структур як узагальнення одноїменного принципу, який розроблявся щодо зовнішньої задачі гідромеханіки при дослідженнях прилежового шару на жорстких та еластичних обтічних поверхнях [3, 4].

У роботі [1] керувальні дії було спрямовано на пристінні спіралеподібні ЕКВС, усереднені та пульсаційні характеристики яких, завдяки низькочастотним складовим турбулентного руху

та перетворенню тупикової частини ЕКВС біля глухого торця ВК на центральний квазітвердотільний торнадоподібний вихор (ЦКТВ), великою мірою визначають процеси турбулентної дифузії, а відповідно, масо- й теплообміну в цілому у ВК. Керувальні дії створювалися вихорогенераторами (ВГ) у вигляді прямокутної канавки або системи трьох напівсферичних лунок малого діаметра, які розміщено безпосередньо у впускному соплі камери, що практично не викликало помітного зростання гідродинамічного опору її проточного тракту. Було показано, що застосовані способи керування приводять до істотного перерозподілу спектральної щільності пульсацій швидкості в досліджуваній тупиковій частині ЕКВС, у т.ч. до так званого "зворотного розпаду вихорів", тобто до ефекту коагуляції вихорів меншого масштабу в більш крупні вихрові утворення, які інтенсифікують процеси переносу. Отримані в роботі [1] результати базувалися на аналізі щільності розподілу ймовірності трансверсальної складової актуальної швидкості та на спек-

тральних оцінках потужності пульсацій відповідної швидкості, проведених для найбільш характерних точок спіралеподібної ЕКВС. Трансверсальні складові швидкості вибрано у зв'язку з найбільшими за модулем значеннями, стабільними і найбільш точно визначеними за знаком розподілами їх усереднених за часом величин уздовж діаметра та осі циліндричної частини ВК порівняно з квазігармонічним характером профілів решти усереднених складових швидкості. Однак для більш повного уявлення про фізичну картину впливу вибраних видів пасивних (тобто без спеціального зовнішнього підведення механічної, електричної або інших видів енергії) керувальних дій на вихрову структуру закрученого потоку, обмеженого циліндричними стінками ВК, необхідно провести детальний енергетичний аналіз характеристик течії в досліджуваних точках ЕКВС. Експериментальний матеріал такого дослідження, як і отримані в роботі [1] результати, має стимулювати застосування нових конструктивних рішень при створенні теплових двигунів, топкових пристроїв котлів і печей, хімічних реакторів, змішувачів, плазмотронів тощо для підвищення їх ефективності, надійності та довговічності.

Постановка задачі

Робота спрямована на розроблення та реалізацію спеціальних методик експериментального дослідження, які дають змогу запропонованими в [1] методами керувати великомасштабними вихровими системами у ВК через вплив на вихрові утворення менших масштабів, що беруть участь у формуванні перших. Результати застосування цих методик має показати аналіз у досліджуваних просторово-частотних областях ЕКВС таких статистичних характеристик течії:

- 1) математичного сподівання та відносної інтенсивності пульсацій швидкості;
- 2) розподілу кінетичної енергії пульсацій у зазначених просторово-частотних областях.

Статистичний аналіз характерних просторово-частотних областей пульсацій швидкості в ЕКВС

Загальна методика проведення експериментів, опис робочої ділянки (ВК) аеродинамічного стенда, описаного раніше [2, 5–7], та визначення просторово-частотних областей дослідження наведені в [1]. Результати попередньої візуалізації течії за допомогою монодисперсного порошку у ВК з прозорою циліндричною стінкою внутрішнім діаметром $d_0 = 0,102$ м дали змогу виконати три серії термоанемометричних вимірювань актуальних величин трансверсальних швидкостей $u(t)$ в околі центральної точки В сліду повністю сформованої частини спіралеподібної ЕКВС (рис. 1) при внесенні різноманітних вихрових збурень до повітряного потоку у впускному соплі камери. Цю зону характеризує найбільша концентрація контрастного середовища.

Вимірювання проводились у п'яти точках з координатами $Z = -0,014; -0,002; +0,02; +0,042; +0,052$ м, що дало змогу докладно дослідити область ЕКВС уздовж відрізка довжиною 0,066 м, паралельного твірній циліндричної частини ВК у її горизонтальному поздовжньому перерізі. Перша серія дослідів проводилась при установці впускного сопла без вихорогенераторів, друга і третя серії – відповідно з вихорогенераторами ВГ № 1 і ВГ № 2 [1]. Усього було проведено 15 вимірювань, кожне тривалістю 10 с. Попередній досвід проведення експериментів на основі термоанемометрування течії у ВК [7] показує, що та-

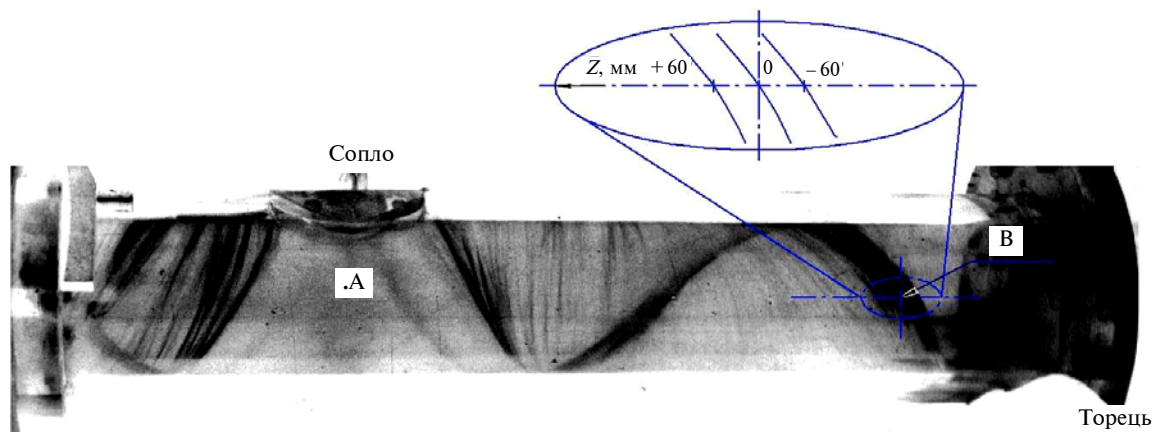


Рис. 1. Вихрова камера: візуалізація течії та зони вимірювань

кий часовий інтервал є близьким до оптимального з точки зору можливості максимального охоплення всіх особливостей вихрових взаємодій.

Для кожної точки досліджуваного діапазону були обчислені такі статистичні параметри: математичне сподівання (U); дисперсія ($D[u(t)]$); середнє квадратичне відхилення (с.к.в.), тобто середньоквадратична пульсація швидкості, $\sigma[u(t)]$; ексцес, тобто надвишок, (ϵ); контрексцес (κ); коефіцієнти асиметрії (Sk); також були побудовані гістограми щільності розподілу ймовірностей трансверсальної складової актуальних швидкостей. Були вираховані величини похибок: середньоквадратичної похибки визначення контрексцесу $\delta(\kappa) \approx \sqrt{2/(3n)} \approx 0,01$, де n – кількість елементів у вибірці, та середньоквадратичної похибки визначення с.к.в. $\delta(\sigma) \approx \sqrt{\epsilon-1}/(2\sqrt{n}) < 0,01$, [8]. Перевірка на “нормальність” розподілу щільності ймовірності актуальних швидкостей кожної вибірки здійснювалась інтегральним методом – через порівняння обчислених значень контрексцесу з величиною контрексцесу нормального розподілу ($\kappa_n = 0,577$). Для всіх досліджуваних точок обчислені значення контрексцесу знаходились у межах $0,539 \leq \kappa \leq 0,577$. Побудовані гістограми щільності ймовірності досліджуваних швидкостей дають змогу вважати їх наближено одномодальними. Аналіз засвідчив близькість усіх розподілів щільності ймовірності до нормального закону з дуже незначним відхиленням у бік розподілу Лапласа, тому оцінки центрів розподілу можна обчислювати у вигляді середнього арифметичного. Похибка визначення моди миттєвої

швидкості, тобто усереднених величин трансверсальних швидкостей U , не перевищувала 0,4 % з довірчою ймовірністю $P = 0,90$. Отже, попередній статистичний аналіз дав змогу кваліфікувати досліджувані сигнали як стаціонарні випадкові процеси і застосувати для їх обробки добре розвинену теорію математичної статистики та пакети прикладних програм.

Подальший аналіз і трактування його результатів потребують ідентифікації точок вимірювання з урахуванням різних типів збурювальної дії на вхідний струмінь. Для цього введено такі позначення: перша літера відповідає джерелу керувальних впливів з боку проточного тракту сопла (С – без керування, D – прямокутна канавка (ВГ № 1), Е – 3 напівсферичні лунки малого діаметра (ВГ № 2)); друга літера вказує на знак положення точки на осі Z відносно $Z = 0$ (Р – плюс, тобто в напрямку впускного сопла; М – мінус, тобто у зворотному напрямку) (див. рис. 1); на третій і четвертій позиціях – пари двозначних чисел, що показують відповідно абсолютну величину осової координати Z та значення радіуса r положення точки вимірювання в міліметрах. Ці позначення використано на рис. 2 і 3, які ілюструють суттєвий вплив положення точки вимірювання на закономірності розподілів величин усередненої трансверсальної швидкості та середньоквадратичної пульсації швидкості за наявності або за відсутності ВГ застосованих типів. Разом із тим, як видно з рис. 4, відношення с.к.в. до усередненої швидкості в кожній точці вимірювання мало залежить від наявності чи відсутності ВГ у соплі в досліджуваному діапа-

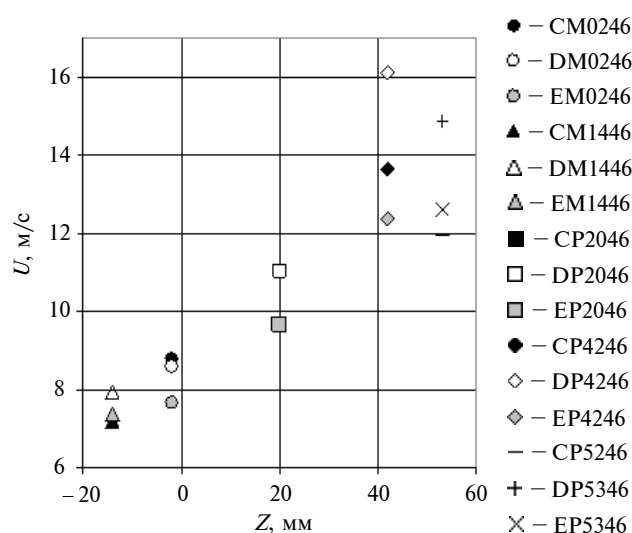


Рис. 2. Розподіл усередненої величини трансверсальної швидкості в досліджуваній зоні ЕКВС за різних видів зовнішнього збурення

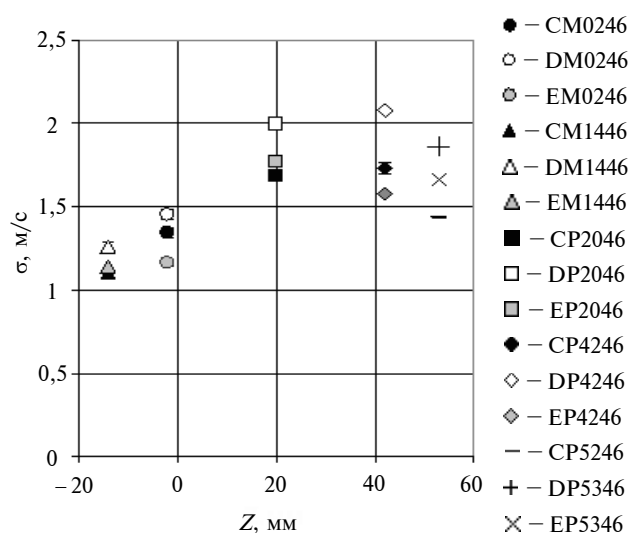


Рис. 3. Зміна с.к.в. трансверсальної швидкості в досліджуваній зоні ЕКВС за різних видів зовнішнього збурення

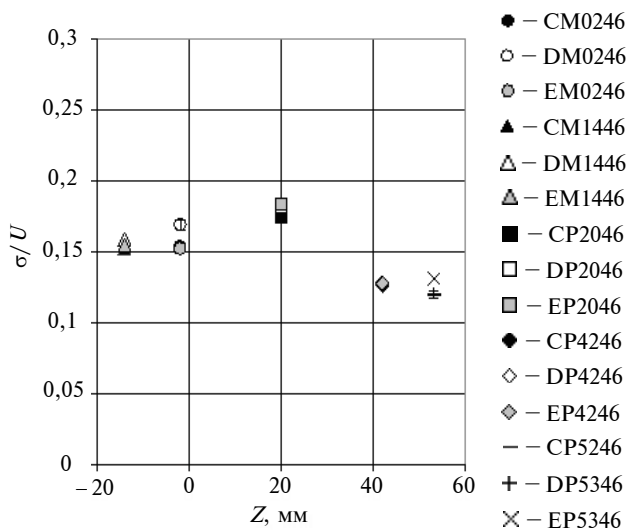


Рис. 4. Співвідношення усереднених кінематичних характеристик течії в досліджуваній зоні ЕКВС за різних видів зовнішнього збурення

зоні зміни осової координати. Це дає змогу зробити висновок про односпрямований вплив застосованих видів керувальної дії одночасно як на середньоквадратичні значення пульсацій трансверсальної складової швидкості, так і на усереднені значення цієї складової у кожній точці досліджуваної області ЕКВС у камері. Сталість співвідношення наведених кінематичних характеристик ЕКВС у цій зоні ВК свідчить про певну стійкість і квазістаціонарність руху найбільш потужного спіралеподібного вихрового утворення.

Частково більш детальне оцінювання впливу зовнішньої керувальної дії від ВГ на характер течії ЕКВС у камері в усіх точках зазначеного діапазону осової координати Z було здійснене в [1] із застосуванням спектрального аналізу пульсаційних швидкостей у найбільш цікавій смузі частот від 0 до 320 Гц. Аналіз засвідчив, що цю смугу можна умовно розділити на ряд характерних складових областей, споріднених між собою за частотними діапазонами та з якісно схожою поведінкою автоспектрів, причому це притаманно практично всім точкам вимірювання в досліджуваній області ЕКВС. На прикладі статистичних параметрів для двох типових точок $Z = +0,02$ м і $Z = +0,042$ м в ЕКВС при застосуванні як ВГ № 1, так і ВГ № 2 в [1] було виявлено явище “зворотного розпаду вихорів”, тобто ефект коагуляції вихорів меншого масштабу до найбільш крупних складових ЕКВС з відповідним потужним “перекачуванням” енергетичної щільності пульсацій у напрямку, протилежному традиційно існуючому уявленню [9]

про каскадне перенесення турбулентної енергії. Отриманий результат вважаємо дуже важливим, оскільки саме великомасштабні вихрові утворення домінують у процесах переносу маси й теплоти, значно інтенсифікуючи їх [10]. Така зміна спектральних характеристик пульсаційних швидкостей під впливом малих зовнішніх збурень від запропонованих вихорогенераторів потребує необхідності проведення подальшого детального дослідження енергетичного балансу в різних частотних діапазонах при взаємодії вихорів досліджуваної зони ЕКВС.

Методика оцінки розподілу енергії пульсацій

Із теорії статистичної гідромеханіки відомо, що мірою інтенсивності пульсацій швидкості можуть слугувати дисперсія і с.к.в. стаціонарного випадкового процесу. В цьому контексті дисперсію можна розглядати як подвійну питому кінетичну енергію пульсаційного руху, зведену до одиниці маси рідини (протягом відносно нетривалого часу термоанемометрування в дослідних практично виконуються умови постійності температури й вологості повітря в приміщенні лабораторії).

Отже, в основу енергетичного підходу при пошуках способів керування ЕКВС покладемо обчислення величин дисперсії $D[u(t)]$ трансверсальних складових актуальних швидкостей пристінної течії в кожній із п'яти точок досліджуваної області. Сумарна пульсаційна енергія вздовж твірної ВК протяжністю 0,066 м може бути подана у вигляді

$$E' \approx \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 e'_{ij},$$

де e'_{ij} — питома енергія пульсацій у конкретній i -й точці вимірювання і в конкретній j -й енергоємній смузі частот спектра пульсаційної швидкості.

Питома енергія пульсацій визначається знаходженням відповідної величини дисперсії:

$$e'_{ij} = \frac{1}{2} D_{ij}.$$

З теорії ймовірності відомо, що підсумовування дисперсій відповідає принципу суперпозиції $D_{\Sigma} = \Sigma D_{ij}$ тільки для некорельованих випадкових величин. Умова некорельованості вимірюваних величин у досліджуваних точках покладалася апріорно у зв'язку із застосуванням у

дослідженні одноканальної термоанемометричної апаратури і, відповідно, одного термоанемометричного датчика.

Алгоритм розрахунків, який зображено на рис. 5, є таким. Для кожної реалізації трансверсальної швидкості $x_j(t)$ виділялась її пульсаційна компонента $x'_j(t) = x_j(t) - \mu_x$, де μ_x — математичне сподівання випадкового процесу. Математичне сподівання було визначено з урахуванням ергодичності процесу у вигляді

$$\mu_x(j) = \frac{1}{T} \int_0^T x_j(t) dt,$$

де T — час реалізації процесу (покладался 10 с).

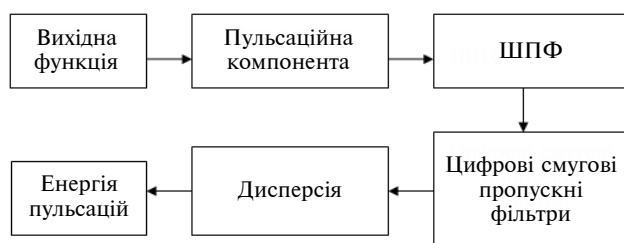


Рис. 5. Блок-схема обробки сигналу

Кожна пульсаційна трансверсальна швидкість була представлена у частотній області через використання швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), потім сигнал проходив через три смугові пропускні фільтри.

Для оцінки частотного розподілу енергії пульсаційного руху за дисперсіями застосовувалась цифрова фільтрація сигналів. Смуги пропускання сигналів через цифрові фільтри було вибрано однаковими для всіх реалізацій.

Результати дослідження енергетичного балансу в ЕКВС

1. У частотній смузі сигналу 0–320 Гц (рис. 6) у випадку відсутності ВГ спостерігається нерівномірний розподіл енергії пульсацій (ЕП) у досліджуваному діапазоні довжини вихрової камери (ВК). Максимальна ЕП відповідає точці $Z = +0,042$ м. По обидва боки її спостерігаються спади ЕП. У таблицях під графіками наведені значення дисперсії для кожної досліджуваної точки ВК і для кожної частотної смуги.

Аналіз рис. 6 указує на те, що наявність ВГ змінює ЕП у кожній точці досліджуваного діапазону довжини ВК. Характер зміни ЕП залежить від виду ВГ. Величини сумарної ЕП досліджуваного діапазону довжини ВК дорівнюють:

для випадку відсутності ВГ

$$D_{\Sigma} = 1,22 + 1,81 + 2,83 + 2,99 + 2,0663 \approx 10,91 \left(\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \right);$$

для випадку керування КВС за допомогою ВГ № 2

$$D_{\Sigma}^{\text{ВГ2}} = 1,31 + 1,36 + 3,14 + 2,50 + 2,76 \approx 11,07 \left(\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \right).$$

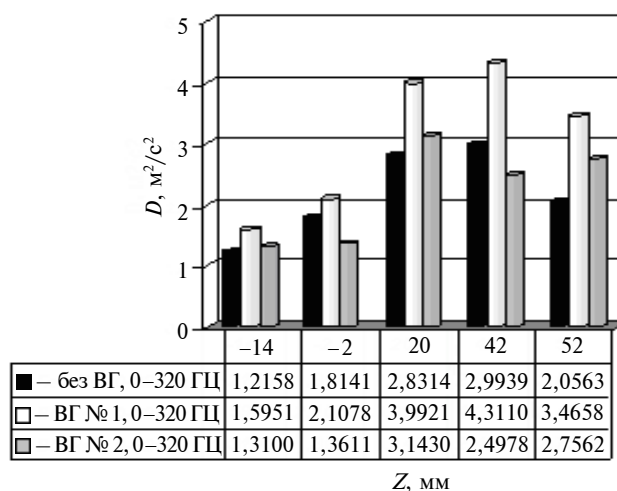


Рис. 6. Порівняння абсолютних величин питомих енергій пульсацій у смузі сигналів 0–320 Гц за відсутності та за наявності ВГ у впускному соплі

Незначна відмінність отриманих величин, яка є сумірною з похибкою визначення дисперсії, свідчить, найімовірніше, про те, що отримані дисперсії сигналів статистично нерозрізненні. Застосування ВГ № 2 призводить до такого перерозподілу ЕП усередині досліджуваного діапазону довжини ВК: у трьох точках $Z = -0,014$; $+0,02$; $+0,052$ м ЕП збільшується (максимально до 34 % у точці $Z = +0,052$ м), проте у двох точках $Z = -0,002$; $+0,042$ м ЕП зменшується (максимально до 33 % у точці $Z = -0,002$ м). Точка максимуму ЕП дещо зміщується ближче до торця камери, що може свідчити про часткове порушення одномодальності щільності розподілу ймовірностей трансверсальної складової актуальних швидкостей у зоні ЕКВС у відповідних точках досліджуваного діапазону довжини ВК при застосуванні ВГ № 2.

Керування ЕКВС за допомогою ВГ № 1 має зовсім інший характер. Значно збільшується сумарна ЕП — приблизно в 1,42 разу. Збільшення ЕП відбувається в кожній точці досліджуваного

діапазону довжини ВК. Максимальне зростання ЕП (на 69 %) має місце у точці $Z = +0,052$ м. У цілому при керувальній дії ВГ № 1 і при роботі камери без ВГ загальний характер розподілу ЕП у ВК зберігається (за розміщенням точки максимуму, очевидною одномодальністю кривої розподілу).

2. У частотній смузі досліджуваного сигналу 0–150 Гц (рис. 7) характер загального розподілу ЕП за частотами та довжиною ВК є близьким до розподілу в частотній смузі 0–320 Гц. У цій смузі також спостерігається зміщення інтенсивності ЕП ближче до торця ВК – від точки $Z = +0,042$ м до точки $Z = +0,02$ м, що відповідає найбільш інтенсивному зростанню ЕП при цьому до 42 % при роботі ВГ № 2 (для порівняння: при роботі камери без ВГ – зростання ЕП до 8 %; при роботі ВГ № 1 – зростання до 3 %). Аналіз дисперсій показує, що в цій смузі, яка становить 47 % від діапазону 0–320 Гц, зосереджено приблизно 82 % сумарної ЕП у досліджуваному діапазоні довжини ВК. Спектральний склад частотного діапазону 0–150 Гц досліджуваного сигналу являє собою “рожевий шум” (зниження рівня сигналу від нижніх частот до верхніх), у якому знаходяться три “енергоємні” частотні смуги: 33–36, 41–53 і 86–99 Гц. Аналіз виявив, що в цих трьох частотних смугах сумарним інтервалом лише 28 Гц (або 18,7 % смуги 0–150 Гц) зосереджено більше 53 % енергії пульсацій. Спектральний аналіз показав, що зазначені три “енергоємні” частотні смуги мають місце для всіх досліджуваних точок ВК у випадках

як наявності керувальних дій на КВС у ВК, так і їх відсутності.

3. Смуга частот 150–320 Гц являє собою “білий шум” і, очевидно, не несе інформації про ЕКВС у ВК.

4. Було проведено ретельний аналіз зміни ЕП у кожній із трьох, зазначених у п. 2, “енергоємних” частотних смуг за відсутності та за наявності керування потоком за допомогою ВГ № 1 і ВГ № 2 у впускному соплі ВК.

Висновки для частотної смуги 86–99 Гц (рис. 8).

1. За відсутності ВГ у соплі розподіл ЕП у ЕКВС є наближено подібним до розподілу ЕП у смугах 0–320 і 0–150 Гц.

2. Застосування ВГ № 2 зменшує сумарну величину ЕП у ЕКВС приблизно на 7 % порівняно з випадком відсутності керувальної дії на потік; зниження величини ЕП спостерігається для всіх досліджуваних точок, крім точки $Z = +0,052$ м (наближеної до сопла), де ЕП зростає на 37 %.

3. Натомість застосування ВГ № 1 збільшує сумарну величину ЕП у ЕКВС на 34 % порівняно з випадком відсутності ВГ у соплі; таке істотне збільшення ЕП відбувається переважно за рахунок зростання рівня ЕП у точках ЕКВС, що наближені до сопла ВК: при $Z = +0,042$ м на 59 % та при $Z = +0,052$ м – більш ніж на 80 %.

4. Обидва методи керування потоком (ВГ № 1 і ВГ № 2) у цій частотній смузі не вирізняються високим рівнем ЕП у зоні торця ВК, що може свідчити про певне структурування ЕКВС при початку формування вихрової картини Бюдевад-та [11] поблизу диска глухого торця.

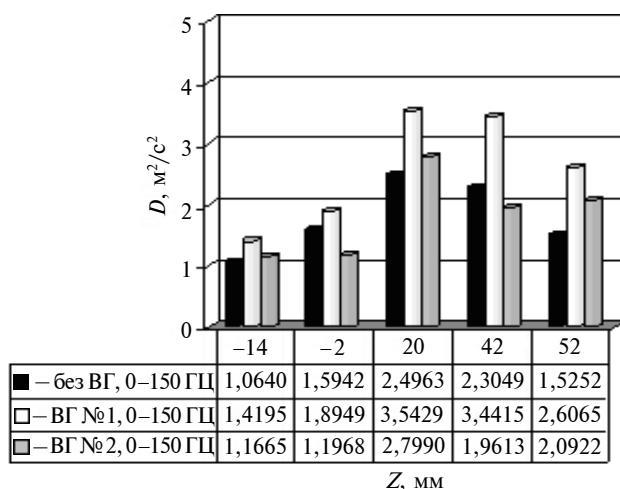


Рис. 7. Порівняння абсолютних величин питомих енергій пульсацій у смузі сигналів 0–150 Гц за відсутності та за наявності ВГ у впускному соплі

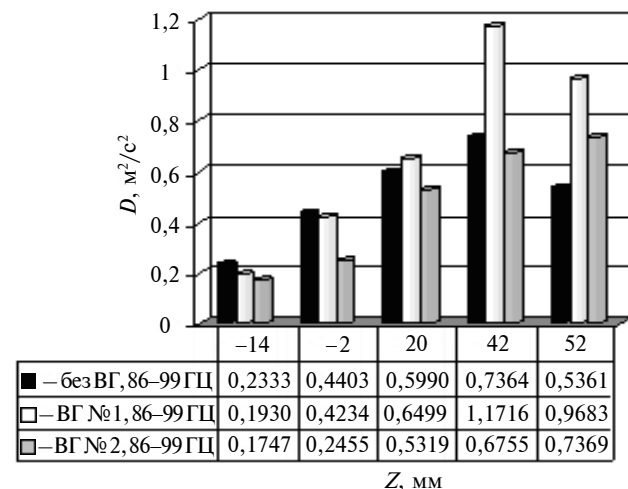


Рис. 8. Порівняння абсолютних величин питомих енергій пульсацій у смузі сигналів 86–99 Гц за відсутності та за наявності ВГ

Висновки для частотної смуги 41–53 Гц (рис. 9).

1. Застосування ВГ № 1 збільшує сумарну величину ЕП у ЕКВС приблизно на 44 % порівняно з випадком відсутності керувальної дії на потік; зростання ЕП спостерігається для всіх точок досліджуваного діапазону довжини ВК.

2. Найбільше зростання ЕП має місце в крайніх точках діапазону вимірювань (наприклад, у точці $Z = +0,052$ м – до 109 %, у точці $Z = +0,042$ м – до 69 %).

3. Збільшення ЕП у середній частині досліджуваного діапазону довжини ВК, як і точка максимального значення енергії, є менш помітними.

4. Застосування ВГ № 2 викликає збільшення ЕП у крайніх точках діапазону вимірювань та зменшення її рівня всередині діапазону, практично не змінюючи сумарної величини ЕП порівняно з випадком “без керування”.

5. Можна сказати, що керування ЕКВС за допомогою ВГ № 2 “розмазує” енергію пульсацій по довжині досліджуваної ділянки ВК.

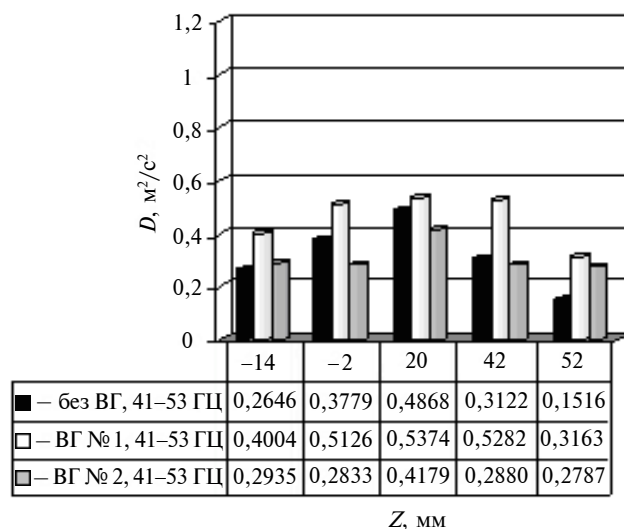


Рис. 9. Порівняння абсолютних величин питомих енергій пульсацій у смузі сигналів 41–53 Гц за відсутності та за наявності ВГ

Висновки для частотної смуги 33–36 Гц (рис. 10).

1. Застосування ВГ № 1 значно збільшує сумарну величину ЕП у цій смузі відносно рівня енергії ЕКВС “без керування” (приблизно на 80 %); зростання ЕП є характерним для всіх точок досліджуваного діапазону довжини ВК, а в

точці, наближеній до середини діапазону ($Z = +0,02$ м), зростання ЕП сягає 137 %.

2. Застосування ВГ № 2 призводить до менш помітного збільшення сумарної ЕП (приблизно на 33 %) відносно рівня енергії ЕКВС “без керування”; найбільший приріст ЕП, що перевищує 87 %, відповідає також точці $Z = +0,02$ м; у крайніх точках $Z = -0,014$; $+0,052$ м це зростання є меншим (68 і 42 % відповідно), а в точках $Z = -0,002$; $+0,042$ м спостерігається навіть зменшення величин ЕП у ЕКВС для цієї частотної смуги (відповідно на 27 і 33 %).

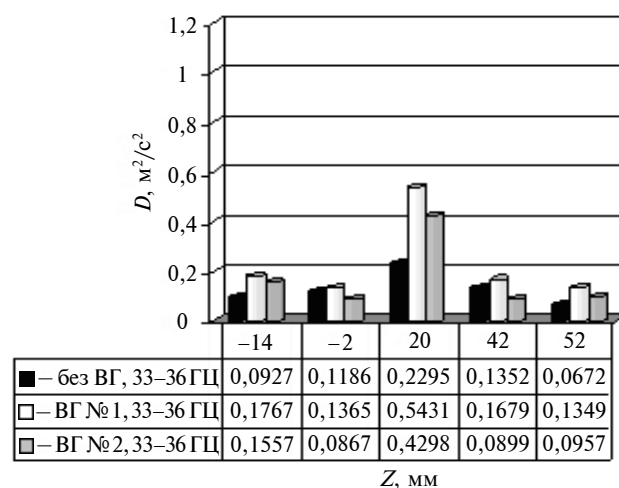


Рис. 10. Порівняння абсолютних величин питомих енергій пульсацій у смузі сигналів 33–36 Гц за відсутності та за наявності ВГ

Наочну якісну картину напрямку зміни ЕП у ЕКВС (відносно величини енергії за відсутності керувальних дій) для повного частотного діапазону та для трьох “енергоємних” частотних смуг у досліджуваних точках з координатами Z уздовж ВК дають табл. 1 і 2 залежно від виду керування ЕКВС через застосування ВГ.

У таблицях використано такі умовні позначення величини ЕП: знак “+” відповідає її збільшенню, знак “–” – зменшенню.

Дані рис. 6–10, а також табл. 1, 2 свідчать про досить складний характер течії в зоні енергоємного вихрового утворення, яке має одночасно стохастичні (з огляду на характер поведінки дисперсії) та детерміновані властивості. Як видно, міра стохастичності або детермінованості залежить від положення конкретної точки дослідження в камері, частотної смуги досліджуваного сигналу та від способу впливу на вихрову структуру у ВК.

Таблиця 1. Зміна енергії пульсацій у ЕКВС при підключенні ВГ № 1

Частоти, Гц	Положення точки вимірювання вздовж ВК Z, м				
	-0,014	-0,002	+0,02	+0,042	+0,052
0–320	+	+	+	+	+
86–99	–	–	+	+	+
41–53	+	+	+	+	+(109 %)
33–36	+	+	+(137 %)	+	+

Таблиця 2. Зміна енергії пульсацій у ЕКВС при підключенні ВГ № 2

Частоти, Гц	Положення точки вимірювання вздовж ВК Z, м				
	-0,014	-0,002	+0,02	+0,042	+0,052
0–320	+	–	+	–	+
86–99	–	–	–	–	+
41–53	+	–	–	–	+
33–36	+	–	+(87 %)	–	+

Висновки

Розроблена методика експериментального дослідження найбільш енергоємної когерентної вихрової структури (ЕКВС) в обмежених закручених потоках на основі комплексного застосування візуалізації, термоанемометрування течії, а також аналізу статистичних характеристик течії при цифровій обробці сигналів дала змогу визначити межі використання традиційного спектрального методу при подібних дослідженнях та на цій підставі аргументовано виділити придатні для цього просторово-частотні області дослідження ЕКВС у вихрових камерах, типових для енергетичних і технологічних установок і систем.

Експериментально досліджена можливість нового підходу до вирішення проблеми керування внутрішньою структурою течії у вихрових камерах, який ґрунтується на запропонованій раніше концепції взаємної сприйнятливості вихрових структур [2]. Цей підхід полягає у спрямованій дії на виділену ЕКВС спеціально організованими “збурювальними” вихровими системами.

Статистичний аналіз і наближене оцінювання енергетичного балансу пульсаційного руху в зазначеній складній ЕКВС показали, що керувальні вихори від двовимірного заглиблення (ВГ № 1) у впускному соплі є більш доцільними

для інтенсифікації вихрових складових (особливо великомасштабних, тобто низькочастотних) процесів переносу маси, імпульсу та енергії у вихровій камері. Вихори від серії тривимірних заглиблень (ВГ № 2) здійснюють більш “м’яке” керування, більшою мірою сприяючи перерозподілу енергії пульсаційного руху на користь дрібномасштабних складових процесів переносу, за винятком окремих точок досліджуваної області ЕКВС. Такий спосіб керування може бути корисним для здійснення спеціальних хімічних технологій.

При застосуванні обох видів вихрогенераторів виявлено явище, аналогічне “від’ємній” турбулентній в’язкості [10], що має назву “зворотного розпаду вихорів”, або інакше ефекту “перекачуванням” енергетичної щільності пульсацій уверх по спектру, тобто протилежно традиційному для стохастичної турбулентності каскадному перенесенню турбулентної енергії. Розроблені методи, як і можливі їх модифікації, відкривають перспективу малозатратного (пасивного), тобто оптимального, керування гідромеханічними, тепловими та хімічними процесами. Однак у подальшому побудова повних фізичної та математичної моделей керування потребує постановки комплексу робіт із тривимірного спектрального аналізу енергоємних когерентних вихрових структур в обмежених закручених потоках.

Список літератури

1. Турик В.М., Кочін В.О. Пасивні методи керування когерентними вихровими структурами у вихрових камерах. Частина 1. Спектральні оцінки ефективності // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2015. – № 6. – С. 54–65.
2. Турик В.Н. Когерентные вихревые структуры в ограниченных закрученных потоках // Вісник Черкаського держ. технолог. ун-ту. – 2004. – № 2. – С. 58–67.

3. *Формирование турбулентности в сдвиговых течениях* / Л.Ф. Козлов, А.И. Цыганюк, В.В. Бабенко и др. — К.: Наук. думка, 1985. — 284 с.
4. *Бабенко В.В., Канарский М.В., Коробов В.И.* Пограничный слой на эластичных пластинах. — К.: Наук. думка, 1993. — 264 с.
5. *Makarenko R.A., Turick V.N.* Kinematics of flow in a dead end part of a vortex chamber // *Int. J. Fluid Mech. Res.* — 2004. — **31**, № 3. — P. 299–306.
6. *Бабенко В.В., Турик В.Н.* Макет вихревых структур при течении потока в вихревой камере // *Прикладна гідромеханіка*. — 2008. — **10 (82)**, № 3. — С. 3–19.
7. *Кочин В.А., Турик В.Н.* Особенности методики проведения термоанемометрического эксперимента при исследовании структуры течений в вихревой камере // *Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Машинобудування*. — 2005. — Вип. 47. — С. 54–57.
8. *Бендат Дж., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных данных / Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 540 с.
9. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Ч. 1. — М.: Наука, 1965. — 640 с.
10. *Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета)* / В.И. Субботин, М.Х. Ибрагимов, П.А. Ушаков и др. — М.: Атомиздат, 1974. — 408 с.
11. *Bödewadt U.T.* Die Drehströmung über festem Grund // *Z. Angew. Math. Mech.* — 1940. — **20**. — S. 241–253.

References

1. V.M. Turick and V.O. Kochin, "Passive methods of coherent vortical structures control in vortex chambers. Part 1. Spectral evaluation of efficiency", *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 6, pp. 54–65, 2015 (in Ukrainian).
2. V.N. Turick, "Coherent vortical structures in bounded swirling flows", *Visnyk Cherkas'koho Derzhavnoho Tekhnolohichnoho Universytetu*, no. 2, pp. 58–67, 2004 (in Russian).
3. L.F. Kozlov *et al.*, *Turbulence Formation in Shear Layers*. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka, 1985 (in Russian).
4. V.V. Babenko *et al.*, *Boundary Layer on Elastic Plates*. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka, 1993 (in Russian).
5. R.A. Makarenko and V.N. Turick, "Kinematics of flow in a dead end part of a vortex chamber", *Int. J. Fluid Mech. Res.*, vol. 31, no. 3, pp. 299–306, 2004.
6. V.V. Babenko and V.N. Turick, "Breadboard model of flow in the vortex chamber", *Prykladna Hidromekhanika*, vol. 10 (82), no. 3, pp. 3–19, 2008 (in Russian).
7. V.A. Kochin and V.N. Turick, "Methodical features of the hot-wire experimental investigation of flow structure in vortex chamber", *Visnyk NTUU KPI. Ser. Mashynobuduvannya*, no. 47, pp. 54–57, 2005 (in Russian).
8. J. Bendat and A. Piersol, *Random Data*. Moscow, USSR: Mir, 1989 (in Russian).
9. A.S. Monin and A.M. Yaglom, *Statistical Hydromechanics*, vol. 1. Moscow, USSR: Nauka, 1965 (in Russian).
10. V.I. Subbotin *et al.*, *Hydrodynamics and Heat Transfer in Nuclear Powerful Equipment (Foundation of Calculations)*. Moscow, USSR: Atomizdat, 1974 (in Russian).
11. U.T. Bödewadt, "Die Drehströmung über festem Grund", *Z. Angew. Math. Mech.*, no. 20, ss. 241–253, 1940.

В.М. Турик, В.О. Кочин

ПАСИВНІ МЕТОДИ КЕРУВАННЯ КОГЕРЕНТНИМИ ВИХРОВИМИ СТРУКТУРАМИ У ВИХРОВИХ КАМЕРАХ. ЧАСТИНА 2. ДИСПЕРСІЙНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ

Проблематика. Підвищення ефективності робочих процесів енергетичних і технологічних машин й апаратів вихрового типу.

Мета дослідження. Статистичний аналіз експериментальної перевірки нових методів керування енергоємними когерентними вихровими структурами, вплив яких на процеси переносу маси, імпульсу та енергії в закручених потоках суттєво визначає ефективність роботи устаткування.

Методика реалізації. Дані спектральних оцінок запропонованих у частині 1 статті методів керувального впливу штучних вихрових збурень на енергоємне когерентне утворення піддані більш детальній числовій обробці на основі цифрових технологій.

Результати дослідження. Аналіз розподілів усереднених величин актуальної швидкості складної закрученої течії, а також ступеня інтенсивності пульсаційного руху в характерній області найбільш енергоємної когерентної вихрової структури свідчить про її певну стійкість та квазістаціонарність руху. На цій підставі вздовж досліджуваної області проведено детальну оцінку енергетичного балансу пульсаційного руху відповідно до окремо визначених характерних частотних діапазонів. Показано особливості дій різних типів вихрогенераторів з точки зору "жорсткості" керування процесами переносу. Дисперсійний аналіз підтвердив дані спектральної обробки інформації, наведені в частині 1 статті, щодо виявленого явища "зворотного розпаду вихорів", найбільш типового для роботи двовимірного вихрогенератора (ВГ № 1).

Висновки. Розроблені методи, як і можливі їх модифікації, відкривають перспективу ефективного малозатратного керування на мікрорівні гідромеханічними, тепловими та хімічними процесами в циліндрах двигунів внутрішнього згоряння, у вихрових пальниках, камерах згоряння ракетних двигунів, топкових пристроїв, плазмотронів, у змішувачах, хімічних реакторах, ядерних енергоустановках тощо.

Ключові слова: когерентні вихрові структури; керування; вихрова камера; щільність розподілу ймовірності; взаємна сприйнятливості вихорів; дисперсія; енергія пульсацій швидкості.

В.Н. Турик, В.А. Кочин

ПАССИВНЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ КОГЕРЕНТНЫМИ ВИХРЕВЫМИ СТРУКТУРАМИ В ВИХРЕВЫХ КАМЕРАХ.
ЧАСТЬ 2. ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Проблематика. Повышение эффективности рабочих процессов энергетических и технологических машин и аппаратов вихревого типа.

Цель исследования. Статистический анализ новых методов управления энергонесущими когерентными вихревыми структурами, влияние которых на процессы переноса массы, импульса и энергии в закрученных потоках в большой мере определяет эффективность работы установок.

Методика реализации. Данные спектральных оценок предложенных в части 1 статьи методов управляющего воздействия искусственных вихревых возмущений на энергонесущее когерентное образование подвергнуты более детальной численной обработке на основе цифровых технологий.

Результаты исследования. Анализ распределений усредненных величин актуальной скорости сложного закрученного течения, а также степени интенсивности пульсационного движения в характерной области наиболее энергонесущей когерентной вихревой структуры свидетельствует о ее полной устойчивости и квазистационарности движения. На основе этого вдоль исследуемой области проведена детальная оценка энергетического баланса пульсационного движения в соответствии с отдельно определенными характерными частотными диапазонами. Показаны особенности воздействия различных типов вихрегенераторов с точки зрения “жесткости” управления процессами переноса. Дисперсионный анализ подтвердил данные спектральной обработки информации, приведенные в части 1 статьи, об обнаруженном явлении “обратного распада вихрей”, наиболее типичном для работы двумерного вихрегенератора (ВГ № 1).

Выводы. Разработанные методы, как и возможные их модификации, открывают перспективу эффективного и малоэнергетического управления на микроуровне гидромеханическими, тепловыми и химическими процессами в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания, в вихревых горелках, камерах сгорания ракетных двигателей, топочных устройств, плазматронов, в смесителях, химических реакторах, ядерных энергоустановках и т.п.

Ключевые слова: когерентные вихревые структуры; управление; вихревая камера; плотность распределения вероятности; взаимное восприятие вихрей; дисперсия; энергия пульсаций скорости.

Рекомендована Радою
Механіко-машинобудівного інституту
НТУУ “КПІ ім. І. Сікорського”

Надійшла до редакції
30 серпня 2016 року