

УДК 533.6.08 : 532.574

Турик¹ В.М. к.т.н., доц., Кочін² В.О., к.т.н., с.н.с., Кочіна¹ М.В.
1-НТУУ «Київський політехнічний інститут», м.Київ, Україна;
2-Інститут гідромеханіки НАН України, м.Київ, Україна

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ФЛАТЕРНОГО КЕРУВАННЯ КОГЕРЕНТНИМИ УТВОРЕННЯМИ В ПОТОКАХ ВИХРОВИХ КАМЕР

Turick¹ V., Kochin² V., Kochina¹ M.
1-National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (Turick46@gmail.com)
2-Institute of Hydromechanics, Ukraine National Academy of Sciences, Kyiv, Ukraine (kochin@meta.ua)

ANALYSIS OF FLUTTER CONTROL POSSIBILITY BY COHERENT FORMATIONS IN VORTEX CHAMBERS FLOWS

Предложены результаты экспериментального исследования нестандартного метода управления процессами переноса массы и импульса в рабочих средах вихревых камер, который основан на внесении во входной поток вихревых возмущений от крылообразного элемента, находящегося в режиме флаттера. Изучена реакция наиболее энергонесущей когерентной вихревой структуры на управляющие воздействия путём сравнения статистических характеристик течения, амплитудно-частотных спектров среднеквадратичного отклонения актуальной скорости, а также пространственно-частотного распределения энергии пульсационного движения при условиях наличия и отсутствия внешних вихревых возмущений. Обнаружена возможность управления структурой течения на микроуровне, в том числе достиганием «обратного распада вихрей»

Ключевые слова: вихревая камера, флаттер, управление, когерентная вихревая структура, статистические характеристики, вихрегенератор, «обратный распад вихрей»

Вступ

У роботах [1–3] здійснено аналіз складних, витягнутих в поздовжніх напрямках об'ємних і пристінних велико- та дрібномасштабних когерентних вихрових структур (КВС), що були виявлені за допомогою візуалізації, пневмо- і термоанемометрування потоків у вихровій камері (ВК) із відносно протяжною тупиковою частиною. Показано, що пристінні вихрові структури мають ознаки тейлор-куеттівських, гьортлерівських і людвигівських вихорів, але з певними, досить суттєвими характерними особливостями формування, місця розташування в камері, просторових контурів, кінематики і динаміки взаємодії.

Істотні зміни закономірностей тепломасообміну в місцях локалізації згаданих "класичних" вихрових утворень відомі. Наприклад, згідно з дослідженнями Дюрао, Макормака, Уилкера, Келхера, Фленті, Маккі та ін. [4], за ідеалізованих умов створення систем вихорів Гьортлера в ламінарному примежовому шарі на увігнутій стінці ізольованого прямокутного каналу зростання місцевих теплових потоків може досягати 190% в порівнянні з відповідними значеннями при обтіканні плоскої пластини. За даними Ейбека і Ітона введення ізольованого поздовжнього вихору в двовимірний турбулентний примежовий шар на пластині призводить до місцевого зростання критерію конвективного перенесення теплоти - числа Стентона - на 27% у порівнянні з умовами незбуреної течії на пластині. Результати теоретичного та чисельного моделювання КВС навіть у настільки ідеалізованих умовах далеко не завжди є задовільними. Але в умовах ВК має місце взаємодія вказаних вище КВС як між собою в пристінній області, так і з об'ємними організованими вихровими утвореннями при істотному впливі осьових (уздовж циліндричної частини камери) і радіальних градієнтів тиску. Звідси стають зрозумілими не досить вдалі спроби отримання адекватних результатів теоретичних методів дослідження структури основних і вторинних потоків у зазначеному класі течій, а звідси й брак вивченості раціональних методів керування процесами переносу у ВК різного призначення: змішувачах, циліндрах дизелів, палинкових пристроях котлів і промислових печей, камерах згоряння газотурбінних і ракетних двигунів тощо. Тому практика проектування ВК великою мірою базується на досвіді експлуатації вже створених конструкцій і, у кращому випадку, на дуже наближених уявленнях про інтегральні картини течії закручених обмежених потоків.

На сьогодні відомо, що визначальний внесок в турбулентну дифузію, а отже в процеси переносу маси, імпульсу й теплоти, забезпечують низькочастотні складові руху рідин і газів [5]. Такі складові, як правило, генеровані найбільш енергоємними когерентними вихровими структурами (ЕКВС) в потоках. Отже, проблема

виявлення, дослідження ЕКВС, а також пошуку принципово нових засобів ефективного й малозатратного керування їх характеристиками для підвищення економічності й надійності вихрових апаратів, є дуже актуальною.

В наших попередніх експериментальних дослідженнях макро- та мікроструктури течії у ВК на спеціалізованому аеродинамічному стенді [1–3, 6] показано, що основна ЕКВС (так звані «вуса») має спіралеподібну форму, утворена принаймні двома зустрічно обертаючими вихровими джгутами та розповсюджується від впускного тангенціального сопла як у бік активної (проточної) частини камери, так і в напрямку її глухого торця. Досить складна, але цілком упорядкована структура течії в «пасивній» (тупиковій) зоні дозволяє розглядати її як додатковий вихорогенератор, що підсилює перемішування робочої рідини в ВК при мінімальних затратах енергії. Оскільки спіралеподібна структура «вуса» є визначальною в складній картині тупикової течії, а зароджується безпосередньо поблизу сопла, то видається доцільною перевірка дієвості керуючих впливів, які вносяться в потік впускного сопла, на зазначену ЕКВС в різних характерних зонах, а отже й процеси переносу, саме в «пасивній» зоні камери.

Постановка задачі дослідження

Мета дослідження полягає в експериментальній перевірці можливості одного із запропонованих В. М. Туриком енергетично малозатратних засобів керування мікроструктурою КВС внесенням організованих вихрових збурень в потік впускного сопла ВК від природно створюваного зривного флатеру мініатюрного крила з певними механічними властивостями (пружністю і демпфуванням) і горизонтальною віссю коливань — соплового вихорогенератора (ВГ). Ставиться завдання дослідити реакцію відгуку у вигляді зміни кінематичних і енергетичних характеристик пристінної течії повітря в різних точках спеціально визначених фіксованих зон ЕКВС "вуса" шляхом порівняння між собою значень усереднених за часом трансверсальних швидкостей, статистичних характеристик течії, амплітудно-частотних спектрів пульсацій швидкості, а також просторово-частотного розподілу енергії пульсаційного руху за умов наявності («ВГ») та відсутності («без ВГ») зовнішніх вихрових збурень.

Експериментальна установка та методика проведення дослідження

Дослідження проведені на аеродинамічній установці, робоча ділянка якої (рис. 1) виконана з оргскла у вигляді прозорої циліндричної ВК внутрішнім діаметром $d_0 = 0,102\text{ м}$ і довжиною $l_0 = 0,635\text{ м}$ [1,2,6]. Відносна глибина розташування глухого торця від середини сопла $\bar{L} = L/d_0 = 4,4$. Вентилятор працює на всмоктування повітря через впускне сопло прямокутного прохідного перерізу $a \times b = 0,041 \times 0,025\text{ м}^2$ із заокругленими вершинами кутів (рис. 2). Кути тангенціальності входу потоку до ВК та осьового розташування довшої сторони сопла відносно твірної циліндра склали відповідно $\gamma = 88^\circ$ та $\alpha = 0^\circ$

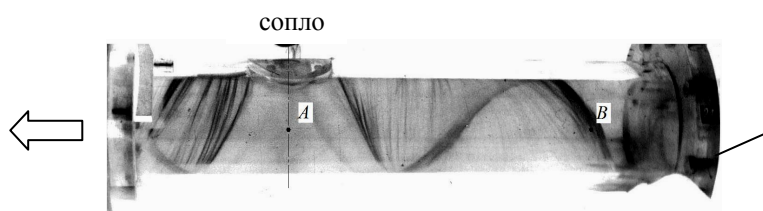


Рис. 1. Вихрова камера та досліджувана область ЕКВС

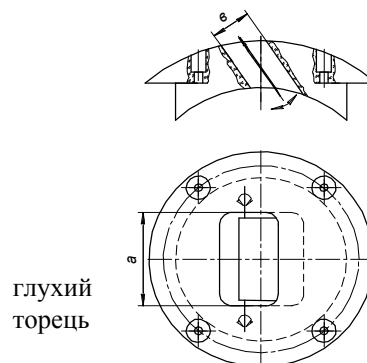


Рис. 2. Впускне сопло з крилоподібним елементом

Легкий крилоподібний елемент у впускному соплі генерує в режимі автоколивань вихори, співмірні по геометричним і енергетичним масштабам з параметрами досліджуваної ЕКВС, що наближено відповідає умовам взаємної сприйнятливості вихрових структур — в даному випадку, вихорів від джерела збурень та складових ЕКВС «вуса». Вивчалася реакція на ці збурення таких когерентних вихрових утворень поблизу циліндричної стінки ВК: відносно дрібних вихрових структур типу Гьортлера-Людвіга [3] в околі розташування точки А (азимутальний кут 90° відносно вертикальної осі поперечного перерізу ВК) за соплом, які зрештою поглинаються крупними ЕКВС при їх формуванні, а також потужної тупикової ділянки ЕКВС в п'ятьох точках вздовж виділеного елемента твірної внутрішньої циліндричної поверхні камери з околу базової точки В. Це дозволило дослідити область енергоємного вихору на протяжності приблизно $0,08\text{ м}$. Положення точок А і В обиралися на підставі візуалізації течії монодисперсним порошком як центральні в контрастних слідах зазначених характерних вихрових зон на їх перетині з горизонтальною площиною поздовжнього діаметрального перерізу ВК: відповідно, присоплової зони (повного обертання та розділення вхідного потоку

при великій тангенціальності впуску газу [3] — окіл точки **A**) та зони цілком сформованої частини ЕКВС з найбільшою концентрацією контрастного середовища (зона точки **B**, яка віддалена від середини вхідного сопла на 0,324 м). Досліди проводились при фіксованій величині числа Рейнольдса $Re_c = 87560$, обчисленого по параметрам потоку в проточній частині сопла. Параметри повітря на вході до сопла вихрової камери становили: температура $t_0 = 20^0 C$, атмосферний тиск $p_0 = 10^5 Pa$. Після попередньої візуалізації течії за допомогою монодисперсного порошку були проведені інструментальні вимірювання актуальних швидкостей в характерних зонах ЕКВС з використанням термоанемометричної апаратури постійної температури “DISA-55M” з однопровідним дрютяним датчиком, сполученим з аналого-цифровим перетворювачем L-264 фірми “L-Card”, який установлений в якості плати розширення до IBM-сумісного комп’ютера. Обробку вимірювальної інформації здійснено за допомогою ліцензійної програми «PowerGraph Professional». Частота дискретизації сигналу при опитуванні датчика термоанемометра процесором комп’ютера обиралась на рівні 640 Гц для задоволення умовам теореми Котельникова, оскільки робочий діапазон частот, визначений попередньо за допомогою аналізатора спектра, не перевищував 320 Гц [7]. До аналізу було залучено трансверсальні складові швидкості у зв’язку з найбільшими за модулем значеннями, стабільними і найбільш точно визначеними за знаком розподілами їх усереднених за часом величин вздовж діаметра і осі циліндричної частини ВК порівняно з квазігармонічним характером профілів усереднених осьових складових швидкості. Алгоритм обробки експериментальних даних, отриманих для камери з ВГ та без ВГ (при тому ж значенні числа Рейнольдса), полягав у визначенні спектральних смуг сигналу, вилученні енергонасичених частотних смуг із загального сигналу за допомогою смугових фільтрів та в обчисленні дисперсії сигналу у кожній з енергонасичених частотних смуг для кожної з досліджуваних точок вихрового сліду

Результати вимірювань та їх аналіз

При обтіканні потоком повітря легке крило у впускному соплі входило в режим автоколивань з амплітудою до 0,005 м і частотою основної гармоніки біля 58 Гц, практично не впливаючи на гідравлічний опір ВК. Аналіз вимірюваних значень актуальної швидкості в присоплової зоні ВК дозволив установити, що закон щільності ймовірності миттєвої швидкості поблизу циліндричної стінки в околі точки **A** істотно відрізняється від нормального як полімодальністю, так і величинами коефіцієнтів асиметрії та ексцесу за умов дії або відсутності ВГ. Це свідчить про складні, нестаціонарні у статистичному розумінні й багатofакторні процеси формування та взаємного впливу КВС різних масштабів у цій зоні, що ускладнює коректне застосування спектрального та дисперсійного аналізу. Бажання уникнути цієї проблеми без втрати основного напрямку даного дослідження й спричинило вибір точки **B** як умовного центру зони, яка б належала цілком сформованій частині ЕКВС. Здійснювалось вимірювання швидкостей в п’яти точках зазначеної зони при дії та відсутності ВГ у соплі на відстанях Z від точки **B** (див. рис. 1): вправо -0,002 м, -0,014 м; вліво +0,020 м, +0,042 м, 0,052 м. Спочатку перевірка на нормальність розподілу вибірок випадкових величин для визначення коректності статистичного аналізу в даній просторово-частотній області дослідження здійснювалась інтегральним методом – за величинами центральних моментів та коефіцієнтів контр ексцесу [8]. Відповідно, алгоритм обробки осцилограм термоанемометрування в п’ятьох точках ЕКВС передбачав обчислення основних статистичних параметрів кожної реалізації для випадків відсутності ВГ (файли CP) і його підключення (файли FP), та зводився до наступного:

1. Визначення центральних моментів від другого до четвертого порядків:

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

де μ_x – математичне сподівання стаціонарної випадкової функції x_i (середнє значення актуальної швидкості),

яке з огляду на гіпотезу про ергодичність процесу дорівнює $\mu_x = \frac{1}{T} \int_0^T x_i(t) dt$, де T – часовий період реалізації

процесу (в наших дослідах $T = 10c$); γ – порядок центрального моменту (при $\gamma = 2$ маємо другий центральний момент – дисперсію $m_2 = D$); n – кількість елементів у вибірці (одиничних вимірювань в реалізації за період T), $n = 6400$.

2. Визначення безрозмірних характеристик як комбінацій другого, третього та четвертого центральних моментів: асиметрію $Sk = m_3/m_2^{1,5}$; ексцес $\varepsilon = m_4/\sigma^4 - 3$, де $\sigma = \sqrt{D}$ – середнє квадратичне відхилення (с. к. в.); контр ексцес $\varepsilon = 1/\sqrt{\varepsilon}$.

3. Наближена оцінка середніх квадратичних похибок с. к. в. та контр ексцесу за формулами: $\delta(\sigma) \approx \sqrt{\varepsilon - 1} / (2\sqrt{n})$; $\delta(\varepsilon) \approx \sqrt{2 / (3n)}$ (їх величини в процентах наведені нижче в таблицях 1, 2).

Відповідні розрахунки розподілу відносної інтенсивності пульсації швидкості від точки до точки у виділеній зоні ЕКВС на підставі експериментальних даних наведені на рис.1.

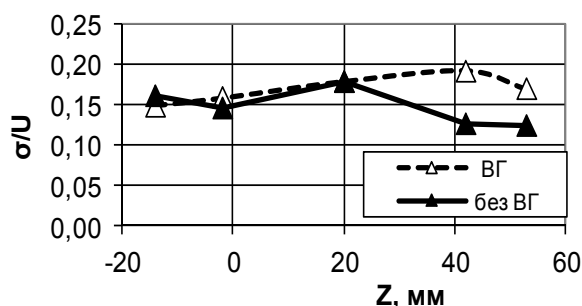


Рис. 3. Відношення с. к. в. до трансверсальної проекції середньої швидкості при використанні ВГ (пунктир) та без ВГ (суцільна лінія) для п'яти точок ЕКВС

Як видно з графіка, найменший вплив ВГ на відносну інтенсивність пульсацій в ЕКВС спостерігається в точці $Z = +20$ мм, найбільший вплив — в діапазоні $Z = +40 \div +57$ мм. З огляду на наведене, оберемо дві характерні точки досліджуваної зони ЕКВС, а саме $Z = +20$ мм і $Z = +52$ мм (це і є перші дві цифри в позначеннях режиму роботи ВК) при розміщенні датчика термоанемометра на радіусі $r = 46$ мм (останні дві цифри в позначеннях). Зведемо основні результати розрахунків статистичних параметрів до табл. 1 і 2

Таблиця 1

Параметри в точці $Z = +20$ мм

Параметр	CP2046 («без ВГ»)	FP2046 («ВГ»)
Среднее, Ум/с	$9,636 \pm 0,034$	$8,619 \pm 0,034$
Мода, U_M м/с	9,384	8,252
С.к.в., σ м/с	$1,683 \pm 0,8\%$	$1,475 \pm 0,8\%$
σ/U	0,1746	0,1711
Контрекссес, α	$0,567 \pm 1,5\%$	$0,581 \pm 1,5\%$

Таблиця 2

Параметри в точці $Z = +52$ мм

Параметр	CP5346 («без ВГ»)	FP5246 («ВГ»)
Среднее, Ум/с	$11,938 \pm 0,034$	$12,206 \pm 0,034$
Мода, U_M м/с	11,618	12,206
С.к.в., σ м/с	$1,434 \pm 0,8\%$	$2,067 \pm 0,8\%$
σ/U	0,1201	0,1693
Контрекссес, α	$0,555 \pm 0,8\%$	$0,623 \pm 1,5\%$

Початковий аналіз даних табл. 1 указує на близькість значень середніх швидкостей та мод між собою в точці $Z = +20$ мм у межах однакових режимів роботи ВК, проте на істотну зміну (відповідно до $10 \div 12\%$) величин цих параметрів при зміні умов, тобто при підключенні керуючого ВГ. Це справляє враження, що при режимах «без ВГ» та «ВГ» має місце статистична відмінність вибірок, але справедливості цього твердження потребує подальшого аналізу, наведеного нижче. З огляду на близькість величин контрекссесу α в обох режимах до гауссова значення 0,577 (з точністю, відповідно, 1,7% та 0,7%) та невелику різницю (до 2,5%) величин α для цих режимів, можна вважати, що обидві вибірки є близькими до нормального розподілу. Інтегральний параметр інтенсивності пульсацій швидкості σ/U для обох випадків відрізняється лише на 2%

Як видно з табл. 2, в точці $Z = +52$ мм при порівнянні режимів «без ВГ» та «ВГ» спостерігається протилежна картина: при значно меншій різниці значень середніх швидкостей та мод (відповідно до $2 \div 5\%$) маємо суттєве розходження в значеннях σ/U (до 41%) та контрекссесу α (порядку 12% при відмінності від гауссового значення, відповідно, на 4% та 8%). Це свідчить про «розмиття» кривої розподілу та перехід закону щільності ймовірності миттєвої швидкості, відповідно, від приблизно нормального до близького до трапеціоїдного. Тобто спостерігається деякий локальний детермінований вплив на поведінку ЕКВС в околі даної точки, можливо спричинений спіновою закруткою складових вихрових джгутів, що утворюють ЕКВС, відносно її поздовжньої осі.

Більш детальний аналіз експериментальних даних, зокрема перевірка на «нормальність» розподілу ймовірності актуальної швидкості, було проведено для кожної точки після побудови гістограм та кривих щільності розподілу як їх обвідних при граничному переході «гістограма—полігон розподілу—неперервна функція», що дозволило порівняти реальні форми кривих розподілу з гауссовим законом. Для цього кількість інтервалів групування s експериментальних даних обиралась у межах $0,55n^{0,4} < s < 1,25n^{0,4}$, що є справедливим для всіх одномодальних розподілів від рівномірного до розподілу Лапласа [8]. Аналіз гістограм показує, що застосування флатеруючого ВГ призводить до зміни закону розподілу щільності ймовірності порівняно з випадком відсутності ВГ в чотирьох точках з п'яти, що свідчить про безумовний вплив досліджуваної керувальної дії на ЕКВС — цей головний елемент течії середовища в «пасивній» зоні ВК. В точці $Z = +20 \text{ мм}$ помітної зміни кривої щільності розподілу при підключенні ВГ не відбувається (рис. 4,а). У двох точках $Z = -2 \text{ мм}$ і $Z = -14 \text{ мм}$ має місце деяке зміщення центра графіка щільності ймовірності в бік менших швидкостей. Увагу привертають особливості двох інших точок області дослідження $Z = +42 \text{ мм}$ і $Z = +52 \text{ мм}$, де спостерігаються зміни законів розподілу — їх «розмиття» при прийнятті кривими розподілу більш плоскої форми, що свідчить про суттєве підсилення пульсацій трансверсальної швидкості. Це добре ілюструє графік щодо вибраної нами для дослідження другої характерної точки (рис. 4,б) та підтверджує зроблений вище висновок, отриманий в результаті аналізу інтегральним методом. В решті точок істотної зміни інтенсивності пульсацій не спостерігається.

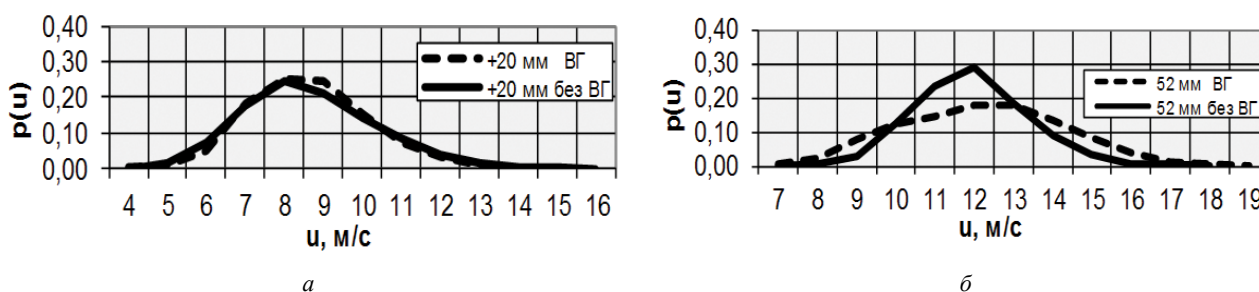


Рис. 4. Криві щільності розподілу ймовірностей актуальної швидкості при наявності та відсутності флатерного керування в характерних точках ЕКВС: а) $Z = +20 \text{ мм}$; б) $Z = +52 \text{ мм}$

Перевірку на *стаціонарність* кривих розподілу було здійснено шляхом розділення кожної реалізації періодом 10 с на ряд інтервалів протяжністю в 1 с , обчислення для кожного інтервалу основних статистичних параметрів (середніх значень, дисперсії, с. к. в.), аналізу зміни даних параметрів за допомогою статистичних критеріїв (гіпотез).

Повернемося до більш детального аналізу статистичних характеристик ЕКВС в точці $Z = +20 \text{ мм}$ для відповіді на можливе запитання про істотність або випадковість відмінностей актуальних швидкостей при режимах роботи ВК «ВГ» та «без ВГ», оскільки через суттєву різницю середніх значень швидкості може здаватися, що відповідні вибірки статистично розрізняльні. Перед порівнянням вибірок було проведено операцію цензурування для вилучення хибних викидів випадкової величини (актуальної швидкості). Для цього були визначені такі величини [8]: максимальне та мінімальне значення актуальної швидкості, квантильні множники згідно із співвідношенням

$$t_{ГР} = 1,55 + 0,8\sqrt{\varepsilon - 1} \cdot \lg(n/10),$$

межі цензурування кожної вибірки за формулою

$$X_{ГР} = \mu_x \pm t_{ГР} \cdot \sigma.$$

Результати розрахунків показали, що хибних викидів випадкової величини у вибірках немає. Далі здійснено порівняння гістограм вибірок експериментальних даних швидкостей в режимах «без ВГ» та «ВГ» методом перевірки статистичних гіпотез з використанням критерію узгодженості Пірсона [7,8]

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

де F_i , f_i — очікувана (варіант «без ВГ») та спостережена (варіант «ВГ») частоти в i -му швидкісному інтервалі, Гц; k — кількість інтервалів швидкостей.

Результати розрахунків зведемо до табл. 3 при ширині інтервалів швидкостей в 1 м/с.

Таблиця 3

Розрахунок критерію узгодженості Пірсона

Інтервали актуальних швидкостей, м/с	CP2046 F_i , Гц	FP2046 f_i , Гц	$f_i - F_i$	$(f_i - F_i)^2$	$(f_i - F_i)^2 / F_i$
4–5	0	5	5	25	5
5–6	2	51	49	2401	47
6–7	78	308	230	52900	171,8
7–8	470	1183	713	508369	429,7
8–9	1142	1624	482	232324	143
9–10	1568	1555	13	169	0,109
10–11	1344	966	378	142884	147,9
11–12	894	466	428	183184	393,1
12–13	521	195	326	106276	545
13–14	259	43	216	46656	1085
14–15	86	3	83	6889	2295
15–16	24	0	24	578	578
16–17	10	0	10	100	100
17–18	1	0	1	1	1
Сума:					$\chi^2 = 5941$

Визначивши критичне значення $\chi_{кр}^2$ за формулою Уилсона-Хілферті [9] за умови $n > 30$

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

де u_p – верхня квантіль стандартного нормального розподілу ($u_p = 1,2815$ при довірчій ймовірності $P = 0,90$), знаходимо $\chi_{кр}^2 \approx 6545$ і $\chi^2 < \chi_{кр}^2$. Звідси випливає, що гістограми розподілу є статистично нерозрізненими з довірчою ймовірністю $P = 0,90$. Оскільки з'ясована статистична нерозрізненість вибірок даних актуальних швидкостей при режимах з флатерним керуванням та без нього, то можна вважати, що інтегрально енергія пульсацій в точці $Z = +20$ мм практично не змінилася.

Для оцінки ефективності застосованого методу керування ЕКВС необхідно виділити основні енергонасичені частотні смуги експериментальних даних актуальної швидкості. Спектральний аналіз сигналів термоанемометра у вигляді розподілу с. к. в. за частотами показав, що усю досліджувану частотну смугу можна поділити на дві області: 1) *енергонасичена область* частот в діапазоні 0–150 Гц, яка містить зони вузькосмугового шуму та гармонічних сигналів; 2) *область «білого шуму»* в діапазоні частот 150–320 Гц. До складу енергонасиченої області можна віднести три найбільш характерні частотні смуги в діапазонах 38–53 Гц (вузькосмуговий шум), 56–61 Гц (гармонічний сигнал) та 82–99 Гц (вузькосмуговий шум, нижня границя якого при відсутності керування складає близько 77 Гц). Важливо відзначити, що ці три енергонасичені частотні смуги притаманні всім досліджуваним точкам ЕКВС.

Розглянемо типові спектри з енергонасиченими смугами для двох характерних точок ЕКВС (рис. 5). Аналіз графіків показує деяку схожість спектрів при дії та відсутності ВГ. Відмінність полягає в наявності в цих точках основної домінуючої гармоніки частотою 58 Гц, спричиненої автоколиваннями ВГ, а також у очевидному підвищенні за таких умов загального енергетичного рівня пульсацій на усій смузі частот 0–320 Гц. Частотний розподіл с. к. в. швидкостей в точках може свідчити про суттєві відмінності щодо внеску в загальну енергію пульсацій при наявності ВГ та без нього, що більш коректно буде підтверджено нижче. В досліджуваних точках ЕКВС підключення ВГ призводить до таких ефектів: переважання на 10% амплітуди основної гармоніки з частотою 58 Гц в точці $Z = +52$ мм порівняно з точкою $Z = +20$ мм, в якій в режимі «ВГ» має місце зменшення амплітуд решти гармонік та деяке збільшення рівня шуму сигналу в частотній смузі 100–320 Гц (рис. 5,а); на відміну від останньої точки, в точці $Z = +52$ мм спостерігається загальне переважання рівнів с. к. в. у всьому частотному діапазоні, за виключенням смуги 87–93 Гц (рис. 5,б).

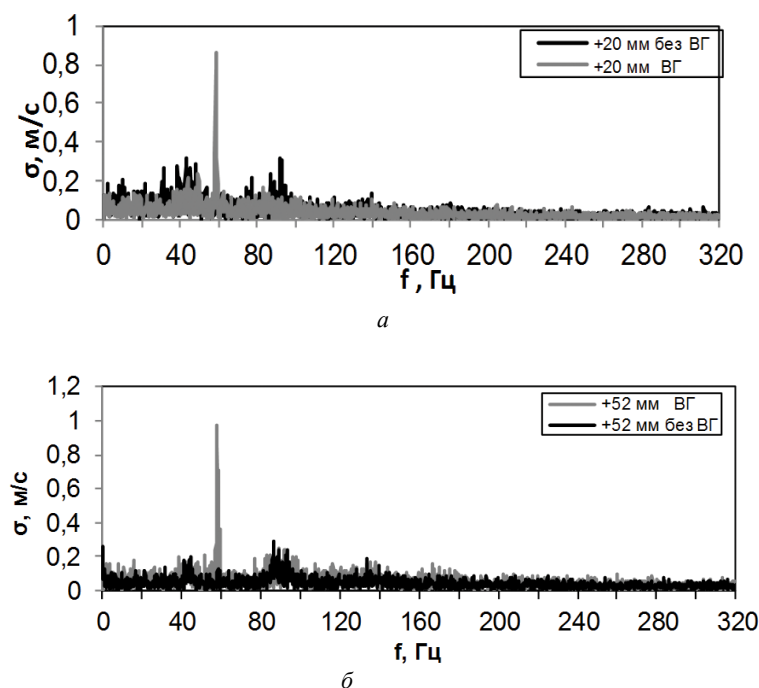


Рис. 5. Частотні спектри с. к. в. актуальних трансверсальних складових швидкостей при наявності та відсутності флатерного керування в характерних точках ЕКВС: а) $Z = +20$ мм; б) $Z = +52$ мм

Для виявлення ефективності впливу флатера використано енергетичний підхід, згідно з яким дисперсію миттєвих швидкостей в конкретних точках ЕКВС та в певних частотних смугах можна розглядати як подвійну кінетичну енергію пульсаційного руху, зведену до одиниці маси середовища $e_{ij} = 0,5D_{ij}$, де i – індекс однієї з п'яти точок досліджуваної зони ЕКВС; j – індекс однієї з q енергонасичених частотних смуг пульсацій швидкості. Враховуючи нетривалий період термоанемометричних вимірювань під час проведення експерименту, постійні температуру і вологість повітря, густину його можна вважати постійною. У загальному вигляді сумарну енергію пульсацій по всій досліджуваній зоні ВК можна визначити як $E \approx \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^q e_{ij}$.

З теорії ймовірностей відомо, що принцип суперпозиції дисперсій є справедливим тільки для точно некоррельованих випадкових величин. Оскільки в даному дослідженні використовувався однопунктовий датчик термоанемометра, то проведений дисперсійний аналіз слід вважати наближеним. За допомогою пакета «PowerGraph Professional» застосуванням КІХ-фільтру було здійснено смугову фільтрацію кожної осцилограми. Для кожної точки виділеної зони ЕКВС обчислювались дисперсії, потім проводилося їх підсумовування у кожній з енергонасичених смуг. Розрахунки здійснювались для двох видів ЕКВС: «без ВГ» і «ВГ». З метою зручності порівняння отриманих результатів величини дисперсій у межах кожної з q виділених енергонасичених частотних смуг представлені у вигляді діаграм (рис. 6), під якими для кожної досліджуваної точки указані значення дисперсії.

Відповідно до вищевикладеного, найбільший інтерес являє частотний діапазон 0–150 Гц, який складає 47% від смуги 0–320 Гц, проте містить понад 80% сумарної енергії пульсацій досліджуваної зони ЕКВС. Саме три енергонасичені області цього діапазону (вузькосмуговий шум в діапазоні 38–53 Гц, гармонічний сигнал в діапазоні 56–61 Гц та вузькосмуговий шум в діапазоні 82–99 Гц) несуть інформацію про особливості ЕКВС як при керуванні дії, так і за її відсутності. Судячи по якісному аналізу частотних спектрів с. к. в. швидкості, при долі в 25% від діапазону 0–150 Гц у цих трьох областях зосереджено понад 70% сумарної енергії пульсацій, що підтверджує обґрунтованість вибору даних частотних смуг для дослідження. Очевидно, діапазон частот 150–320 Гц («білий шум») не несе інформацію про КВС у ВК. Зупинимося на дисперсійному аналізі щодо частотних смуг пульсацій швидкості в таких діапазонах: 0–320 Гц ($j = 1$), 0–150 Гц ($j = 2$), 82–99 Гц ($j = 3$), 56–61 Гц ($j = 4$), 38–53 Гц ($j = 5$). У межах кожного діапазону було визначено сумарні дисперсії актуальної швидкості

для досліджуваної зони ЕКВС, відповідно, для випадків «без ВГ» $D_j = \sum_{i=1}^5 D_i$ та при керувальній дії («ВГ»)

$D_j^{BG} = \sum_{i=1}^5 D_i^{BG}$. Результати розрахунків занесено до табл. 4.

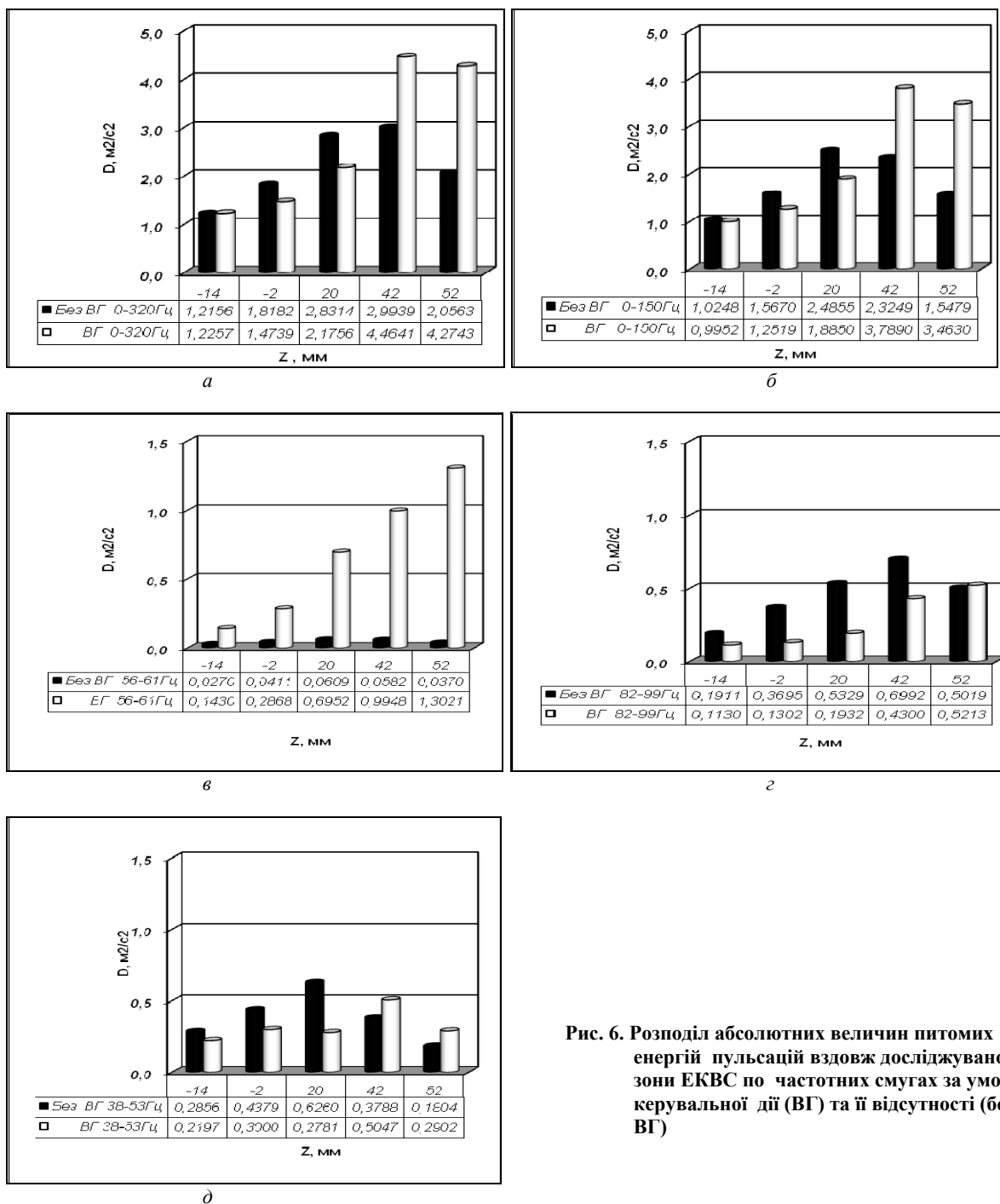


Рис. 6. Розподіл абсолютних величин питомих енергій пульсацій вздовж досліджуваної зони ЕКВС по частотних смугах за умов керувальній дії (ВГ) та її відсутності (без ВГ)

Таблиця 4

Розподіл сумарних дисперсій актуальної швидкості по частотних смугах

Дисперсії, m^2/c^2	Діапазони частот, Гц				
	0-320	0-150	82-99	56-61	38-53
D_j	10,9154	8,9501	2,2946	0,2242	1,9087
D_j^{BG}	13,6136	11,3841	1,3877	3,4219	1,5927

Проведемо аналіз отриманих результатів, спираючись на дані рис. 6 та табл. 4.

У частотній смузі 0–320 Гц (рис. 6,а) спостерігається нерівномірний розподіл дисперсії швидкості вздовж зони ЕКВС із схожою загальною тенденцією за умов «без ВГ» та «ВГ», але в останньому випадку маємо значний сплеск енергії пульсацій в точках $Z = +42 \text{ мм}$ і $Z = +52 \text{ мм}$. З табл. 4 видно, що застосування ВГ призводить до збільшення дисперсії швидкості в зазначеному діапазоні частот приблизно на 25%. Це збільшення здійснюється за рахунок більш віддалених точок досліджуваної зони ЕКВС від глухого торця ВК, причому в точці $Z = +42 \text{ мм}$ енергія пульсацій зростає на 49%, а в точці $Z = +52 \text{ мм}$ — на 108%. У частотній смузі 0–150 Гц маємо якісно схожу картину: сумарна дисперсія збільшується на 27,2%, в точці $Z = +42 \text{ мм}$ енергія пульсацій зростає на 63%, а в точці $Z = +52 \text{ мм}$ — на 123,7%. Натомість у частотній смузі 82–99 Гц наявність ВГ зменшує сумарну дисперсію на 39,5%; зменшення характерно для всіх точок, крім точки $Z = +52 \text{ мм}$. Найбільш показовим у сенсі впливу флаетерного керування є діапазон частот 56–61 Гц, у якому сумарна дисперсія актуальної швидкості для всіх точок зростає порівняно з режимом «без ВГ» більше, ніж у 15 разів, до того ж зростання дисперсії збільшується з віддаленням від глухого торця камери. В частотному діапазоні 38–53 Гц зменшення енергії пульсацій в точках $Z = -14, -2, +20 \text{ мм}$ переважає за абсолютною величиною її збільшення в найбільш віддалених від торця точках $Z = +42, +52 \text{ мм}$, тому в цьому діапазоні частот спостерігається загальне зменшення сумарної дисперсії на 16,5%. Таким чином, розрахунки показали, що застосування ВГ спричинило значне зростання дисперсії швидкості у смузі 56–61 Гц при одночасному зниженні її у смугах 38–53 Гц та 82–99 Гц.

Проаналізуємо зміни дисперсій $\Delta D_j = D_j^{BG} - D_j$ з урахуванням знаків при застосуванні флаетерного керування ЕКВС порівняно з режимом «без ВГ» для складання балансу питомих енергій пульсацій швидкості в частотних смугах (табл. 5), орієнтуючись на найбільш інформативний, енергонасичений діапазон 0–150 Гц (дані щодо максимального робочого діапазону 0–320 Гц наводяться для довідки).

З даних табл. 5 випливає такий висновок: порівняно з режимом «без ВГ» при флаетерному керуванні ЕКВС сумарне зростання дисперсії в трьох енергонасичених частотних смугах складає $\sum_{j=3}^5 \Delta D_j = +1,9748 \text{ м}^2/\text{с}^2$, що менше від зростання $\Delta D_2 = 2,4340$ у ширшій частотній смузі 0–150 Гц на

величину $\Delta D_2 - \sum_{j=3}^5 \Delta D_j = 2,4340 - 1,9748 = 0,4592 \text{ м}^2/\text{с}^2$, тобто на 19%. Це можна пояснити навмисним

нехтуванням при аналізі малоінформативними «шумовими» проміжками між виділеними вузькосмуговими діапазонами частот. Таким чином, ми врахували більше 80% загального енергетичного рівня пульсацій актуальної швидкості в найбільш інформативному частотному діапазоні 0–150 Гц. Отриманий результат підтверджує, що виділення в спектрах сигналів трьох вузькосмугових діапазонів частот є виправданим при проведенні оцінки впливу досліджуваної керувальної дії на течію у важливій КВС для процесів переносу в камері.

Таблиця 5

Зміни сумарних дисперсій ($\text{м}^2/\text{с}^2$) в режимі флаетерного керування ЕКВС

Номер частотної смуги, j	1	2	3	4	5
Діапазони частот, Гц	0–320	0–150	82–99	56–61	38–53
$\Delta D_j = D_j^{BG} - D_j$	+2,6982	+2,4340	-0,9069	+3,1977	-0,3160
$\sum_{j=3}^5 \Delta D_j$	—	—	+1,9748		
$\Delta D_1 - \sum_{j=3}^5 \Delta D_j$			+0,7234		
$\Delta D_2 - \sum_{j=3}^5 \Delta D_j$			+0,4592		

Аналіз частотних спектрів с. к. в. (див. рис. 5), а також порівняння розподілів дисперсії актуальної швидкості на рис. 6,б,г,д виявляють особливий процес, частково схожий на явище «від'ємної» турбулентної в'язкості, або «зворотного розпаду»: утворення крупних вихорів з більш дрібних високочастотних вихорів.

Очевидно, тут має місце режим із загостренням, притаманний відкритим нелінійним системам. У нашому випадку при збуреннях вхідного потоку флатеруючим крилом генеруються вихори, наближені по геометричним та динамічним характеристикам до ЕКВС і які сприймаються цією структурою не по всьому спектру мод, а вибірково, тільки для певних гармонік. Спостерігається укрупнення та підсилення відносно низькочастотних вихорів на базових енергонасичених частотах саме з діапазону 56–61 Гц.

Висновки

1. В роботі запропоновано та реалізовано один з принципово нових підходів до керування процесами переносу маси, імпульсу та енергії у вихрових апаратах шляхом направленої дії на енергоємні когерентні вихрові структури спеціально організованими збуреннями вхідного потоку від крилоподібного елемента, що довільно входить в режим автоколивань.

2. Комплексна методика експериментального дослідження (поєднання візуалізації, термоанемометрії та спеціальна методика статистичної обробки результатів) дозволила коректно визначити та описати просторово-часові поля досліджуваної течії.

3. Доведено, що при застосуванні запропонованого вихорогенератора енергія пульсацій перерозподіляється як за довжиною досліджуваної області утворення, так і між найбільш енергонасиченими частотними смугами у кожній точці вихрового сліду, в тому числі передається від вихорів меншого масштабу до більш крупних вихорів. Спостерігається так званий «зворотний розпад вихорів», споріднений з «від'ємною турбулентною в'язкістю», що значно інтенсифікує процеси переносу в робочому середовищі.

4. Простота конструкції флатеруючого вихорогенератора та незначні енергетичні втрати дозволяють вважати запропонований метод керування перспективним.

Анотація. *Запропоновано результати експериментального дослідження нестандартного методу керування процесами переносу маси та імпульсу в робочих середовищах вихрових камер, який полягає у внесенні до вхідного потоку вихрових збурень від крилоподібного елемента, що знаходиться у режимі флатера. Вивчена реакція найбільш енергонасиченої когерентної вихрової структури на керувальні дії шляхом порівняння статистичних характеристик течії, амплітудно-частотних спектрів середньо квадратичного відхилення актуальної швидкості, а також просторово-частотного розподілу енергії пульсаційного руху за умов наявності та відсутності зовнішніх вихрових збурень. Виявлена можливість керування структурою течії на мікрорівні, зокрема досягненням «зворотного розпаду вихорів»*

Ключові слова: *вихрова камера, флатер, керування, когерентна вихрова структура, статистичні характеристики, вихорогенератор, «зворотний розпад вихорів»*

Abstract. Purpose. *The investigation is devoted to the quest for new effective means of control by coherent vortical structures for improvement of mass and momentum transfer processes in the vortex chambers.*

Design/methodology/approach. *Non-standard method of selective control by current characteristics is based on the admission to inlet flow the vortical disturbances from wing-shaped fluttering element in intake nozzle of chamber. Using complex technique of experimental research combined visualization of flow, measurements by hot-wire anemometer and special methodology of statistic processing of data. This technique allowed to define and to describe correctly space-time flow fields. The response of the most powerful coherent vortical structure on control actions was studied by means of comparison of current statistic characteristics, amplitude-frequency spectra of actual velocity root-mean-square deviations and space-time distribution of fluctuating velocity energy under conditions of existence or absence of external vortex disturbing influences.*

Findings. *It is proved that employment of the vortex generator carries out to redistribution of velocity fluctuations energy between different points along the chosen coherent vortical structure region and between the most powerful frequency bands of vortex zone. The “reverse vortices decay” was found inside some of the typical frequency bands. This phenomenon is related to “negative turbulent viscosity” and creature intensifies transfer processes in the working medium.*

Originality/value. *Design simplicity of fluttering vortex generator, the possibility of microlevel control and little energy consumption allow to consider suggested method of control as perspective.*

Keywords: *vortex chamber, flutter, control, coherent vortical structure, statistical characteristics, vortex generator, “reverse vortices decay”.*

Бібліографічний список використаної літератури

1. *Makarenko R. A. Kinematics of Flow in a Dead End Part of a Vortex Chamber / R. A. Makarenko, V. N. Turick // International Journal of Fluid Mechanics Research. — 2004. — Vol. 31, No. 3. — P. 299—306.*
2. *Babenko V. V. Velocity Fluctuations in a Swirling Jet of a Vortex Chamber / V. V. Babenko, V. A. Blohin, A. V. Voskoboinick, V. N. Turick // International Journal of Fluid Mechanics Research. — 2005. — Vol. 32, No. 2. — P. 184—198.*
3. *Бабенко В. В. Макет вихревых структур в вихровой камере / В. В. Бабенко, В. Н. Турик // Прикладная гидромеханика. — 2008. — 10 (82), №3. — С. 3—19.*

4. *Эйбек П., Итон Дж.* Влияние продольного вихря, погруженного в турбулентный пограничный слой, на теплообмен / П. Эйбек, Дж. Итон // Теплопередача. — 1987. — № 1. — С. 14—24.
5. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах / [Ибрагимов М. Х., Субботин В. И., Бобков В.П. и др.]. — М. : Атомиздат, 1978. — 296 с.
6. *Кочин В. А.* Особенности методики проведения термоанемометрического эксперимента при исследовании структуры течения в вихревой камере / В. А. Кочин, В. Н. Турик // Вест. Нац. техн. ун-та Украины «Киев. политехн. ин-т» : серия «Машиностроение». — 2005. — № 47. — С.54—57.
7. *Бендат Дж.* Прикладной анализ случайных данных: [монография] / Дж. Бендат, А. Пирсол; пер. с англ. В. Е. Привальского и А. И. Кочубея под ред. акад. И. Н. Коваленко. — М.: Мир, 1989. — 540 с.
8. *Новицкий П.В.* Оценка погрешности результатов измерений: [монография] / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. — Л. : Энергоатомиздат, 1991. — 304 с.
9. *Кобзарь А. И.* Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников : [монография] / А. И. Кобзарь. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 816 с.

References

1. *Makarenko R. A., Turick V. N.* Kinematics of Flow in a Dead End Part of a Vortex Chamber. International Journal of Fluid Mechanics Research. 2004. Vol. 31, No. 3. P. 299—306.
2. *Babenko V. V., Blohin V. A., Voskoboynick A. V., Turick V. N.* Velocity Fluctuations in a Swirling Jet of a Vortex Chamber. International Journal of Fluid Mechanics Research. 2005. Vol. 32, No. 2. P. 184—198.
3. *Babenko V. V., Turick V. N.,* Applied hydromechanics, 2008, 10 (82), No 3, pp. 3—19.
4. *Eibeck P., Eaton J.* Teploperedacha (Heat transfer), 1987, No 1, pp. 14—24.
5. *Struktura turbulentnogo potoka i mehanizm teploobmena v kanalah* (Structure of turbulent flow and mechanism of heat and mass transfer). Ibragimov M. Kh., Subbotin V. I., Bobkov V. P. i dr., Moscow : Atomizdat, 1978, 296 p.
6. *Kochin V. A., Turick V. N.* Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Politechnic Institute”. 2005, No. 47, pp. 54—57.
7. *Bendat J., Piersol A.,* Prikladnoij analiz sluchajnyh dannyh (Random data. Analysis and measurement procedures), Moscow : Mir, 1989, 540 p.
8. *Novitskij P. V., Zograf I. A.,* Ocenka pogreshnostej rezul'tatov izmerenij (Output errors estimation of measurements), Leningrad : Energoatomizdat, 1991, 304 p.
9. *Kobzar A. I.* Prikladnaja matematicheskaja statistika. Dlja inzhenerov i nauchnyh rabotnikov (Applied mathematical statistics. For engineers and scientists), Moscow : FIZMATLIT, 2006, 816 p.

Подана до редакції 28.08.2014