

УДК 532.517

## ПУЛЬСАЦІЇ ТИСКУ ВСЕРЕДИНИ ТА ПОБЛИЗУ ПАРИ ОВАЛЬНИХ ЛУНОК НА ПЛОСКІЙ ПОВЕРХНІ

В. А. ВОСКОБІЙНИК, А. В. ВОСКОБІЙНИК, О. А. ВОСКОБОЙНИК

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ  
вул. Желябова, 8/4, 03680, МСП, Київ-180, Україна  
E-mail: vlad.vsk@gmail.com

Отримано 23.03.2015

Наведено результати експериментальних досліджень характерних особливостей обтікання пари овальних заглиблень на гідравлічно гладкій плоскій пластині. Отримано профілі пульсацій поздовжньої швидкості та вивчені поля пульсацій динамічного і пристінного тиску усередині та на обтічній поверхні пари нахилених під кутом 30 градусів до напрямку потоку овальних лунок, а також в їх околі. Отримано інтенсивності й частотні спектри пульсацій динамічного та пристінного тиску над лунками, на обтічній поверхні лунки та поблизу них. Найбільші рівні пульсацій пристінного тиску відзначені на кормових стінках лунок. У спектрах пульсацій тиску спостерігаються тональні складові, які відповідають частотам коливання вихрової течії усередині лунок і частотам викидів великомасштабних вихрових структур із лунок назовні. У середньому перерізі між овальними лунками на відстані до двох їх діаметрів не спостерігалося взаємодії вихрових структур, що викидалися із кожної з лунок. Інтенсивність тональних осциляцій у спектрах пульсацій тиску, характерних для вихрового руху всередині лунок, зменшувалася з віддаленням від них, а примежовий шар поступово відновлювався.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** пара овальних лунок, вихрова течія, датчики тиску, пульсації динамічного тиску, пульсації пристінного тиску, спектри пульсацій тиску, тональні осциляції

Представлены результаты экспериментальных исследований характерных особенностей обтекания пары овальных углублений на гидравлически гладкой плоской пластине. Получены профили пульсаций продольной скорости и изучены поля пульсаций динамического и пристеночного давления внутри и на обтекаемой поверхности пары наклоненных под углом 30 градусов к направлению потока овальных лунок, а также в их окрестности. Получены интенсивности и частотные спектры пульсаций динамического и пристеночного давления над лунками, на обтекаемой поверхности лунок и вблизи них. Наибольшие уровни пульсаций пристеночного давления отмечены на кормовых стенках лунок. В спектрах пульсаций давления наблюдаются тональные составляющие, которые отвечают частотам колебаний вихревого течения внутри лунок и частотам выбросов крупномасштабных вихревых структур из лунок наружу. В срединном сечении между овальными лунками на расстоянии до двух их диаметров не наблюдалось взаимодействия вихревых структур, которые выбрасывались из каждой из лунок. Интенсивность тональных осцилляций в спектрах пульсаций давления, характерных для вихревого движения внутри лунок, уменьшалась с удалением от них, а пограничный слой постепенно восстанавливался.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пара овальных лунок, вихревое течение, датчики давления, пульсации динамического давления, пульсации пристеночного давления, спектры пульсаций давления, тональные осцилляции

This paper deals with presenting of experimental results for characteristic features of the flow around the pair of oval dimples on a hydraulically smooth flat plate. The profiles of longitudinal velocity fluctuations are obtained and fields of the dynamic and wall-pressure fluctuations are studied inside and on the streamlined surface of the pair of oval dimples inclined at the angle of 30 degrees to the streamline, as well as in their vicinity. The intensities and frequency spectra of the dynamic and wall-pressure fluctuations are obtained above and on the streamlined dimple surfaces and in their vicinity. The maximum wall-pressure fluctuation levels are pointed out on the aft walls of the dimples. The tonal components corresponding to oscillation frequencies of vortical flow inside the dimples and ejection frequencies of the large-scale vortical structures outside the dimples are observed in pressure fluctuation spectra. In a middle section between the oval dimples at the distance up to two their diameters, there was observed no interaction of the vortical structures ejected from each of the dimples. With a deletion from the pair of oval dimples, the intensity of tonal frequency oscillations in wall-pressure fluctuation spectra typical for the vortex flow inside the oval dimples is diminishing and boundary layer is gradually restoring.

**KEY WORDS:** pair of oval dimples, vortex flow, pressure sensors, dynamic pressure fluctuations, wall-pressure fluctuations, pressure fluctuation spectra, tonal oscillations

### ВСТУП

Один з важливих чинників, якими визначається ефективність руху тіл з заданою швидкістю – мінімум енергетичних втрат, пов'язаних з опором тертя і форми. У багатьох гідротехнічних спорудах і конструкціях присутні різноманітні неоднорідності обтічної поверхні, що мають вигляд заглиблень. За відповідних умов обтікання заглиблень усередині них утворюються великомасшта-

бні когерентні вихрові системи. Останні, у свою чергу, генерують інтенсивні пульсації швидкості, тиску, температури, завихреності та інших параметрів турбулентності, які можуть використовуватись для керування примежовим шаром. У залежності від режиму обтікання, геометричних параметрів і форми заглиблень, усередині них генеруються вихрові структури, що мають різні масштаби, напрямки руху, частоти обертання й осциляцій у просторі та часі. Ці вихрові структури, взаємодію-

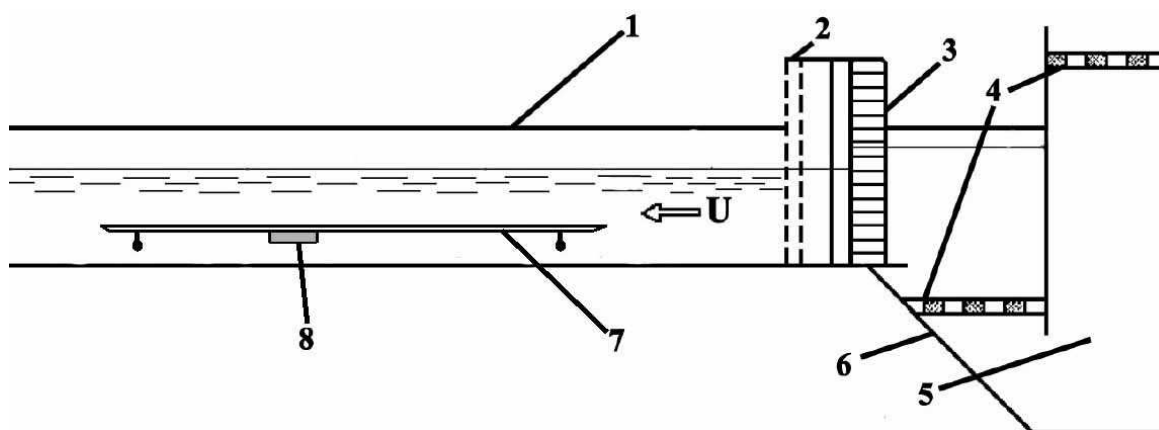


Рис. 1. Схема експериментальної установки:

1 – гідродинамічний лоток, 2 – сітки, 3 – хонейкомб, 4 – решітки,  
5 – заспокоїлива камера, 6 – конфузори, 7 – пластина, 8 – пара овальних лунок

чи між собою та з обтічною поверхнею, за певних умов викидаються назовні з заглиблення, змінюючи структуру прилеглої області й інтегральні характеристики процесів обтікання, теплообміну та змішування, якість аеродинамічних профілів тощо [1–3].

Системне вивчення вихрових структур, які формуються під час обтікання заглиблень на площині, почалося у другій половині минулого сторіччя [2, 4, 5]. Експериментальні результати аеродинамічних і теплофізичних досліджень показали досить високу ефективність деяких рельєфів заглиблень для збільшення тепло- і масопереносу за незначного зростання рівня гідродинамічних втрат. У роботах [6, 7] відзначено, що сферичні заглиблення за теплогідродинамічною ефективністю – не найкращі для турбулентного режиму обтікання теплоносія, а в ламінарному режимі їх використання практично не виправдане. Розрахунки показують, що відносний тепловідвід від обтічної поверхні зі сферичними лунками суттєво нижчий, ніж від поверхні з овальними заглибленнями. Здатність овальних лунок створювати вихрові структури з інтенсивною вторинною течією визначає їхню перевагу, зокрема, за ламінарного режиму обтікання.

З метою зниження гідродинамічних втрат у роботах [8, 9] досліджувались асиметричні лунки краплеподібної форми зі значним заокругленням кромки нижче за потіком. Відомо, що течія у симетричних струменево-вихрових структурах – слабка і нестійка, а для того, щоб її інтенсифікувати, слід зробити обтікання несиметричним, створивши лунку асиметричної форми. У статті [9] продемонстровано, що одностороння попере-

чна деформація глибокої лунки істотно видозмінює вихрову картину усередині лунки й викликає інтенсифікацію руху в ній уперек до набігаючого потоку. Виявлено, що за ламінарного режиму обтікання зберігається вихрова структура течії з двома великомасштабними вихровими системами, які подібні виявленим під час обтікання сферичних лунок.

Іншу логіку побудови асиметричних лунок обумовлюють принципи штучної організації вихрової структури всередині них. Асиметрія форми лунки за рахунок її бічної деформації дозволяє трансформувати вихрову структуру й посилити поперечне перетікання рідини в її межах. Певний прогрес у пошуках раціональної форми заглиблень, що призводить до їх асиметричного обтікання, пов'язується з розділенням сферичної лунки на дві половини, рознесені на деяку відстань за допомогою циліндричної вставки [6, 9]. Тут, на додаток до відносної глибини й радіуса закруглення, довжина вставки й кут нахилу поздовжньої осі симетрії лунки до зовнішнього потоку служать додатковими геометричними характеристиками, які дозволяють ефективніше керувати процесом обтікання таких об'єктів.

Надання неглибокій лунці асиметричної форми призводить до перебудови течії під час обтікання. Двокомірчаста вихрова структура, що генерується всередині симетричної лунки під час її ламінарного обтікання, змінюється на моновихрову видовжену нахилену структуру. Ця перебудова супроводжується перерозподілом зсувних напруг і теплових навантажень у межах лунки та за нею. Аналіз поля вторинної течії показує, що за асиметричною лункою також формується моновихро-

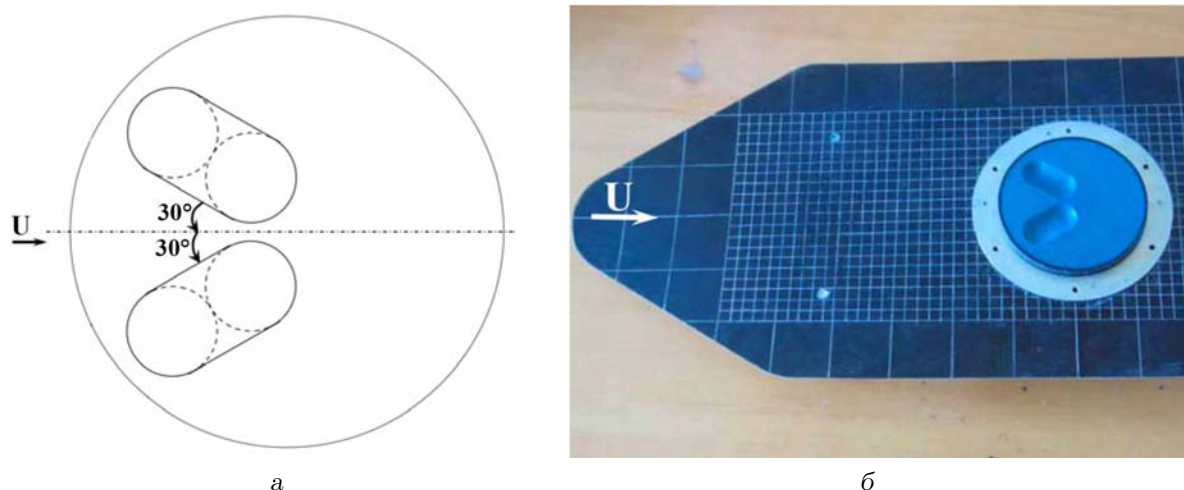


Рис. 2. Розташування пари овальних лунок на плоскій поверхні:  
а – схематичне зображення, б – фрагмент експериментального стенду

ва спіралеподібна структура потоку, на відміну від симетричної двовихрової структури за сферичною лункою. Так, для комбінації неглибокої сферичної лунки з циліндричною вставкою спостерігається помітне (на  $\sim 10\%$ ) збільшення тепловіддачі від її стінки. Слід відзначити високу стійкість генерованої нахиленої вихрової структури, яка забезпечує стабільність ефекту інтенсифікації конвективного теплообміну [10, 11]. Як показано в роботах [12–14], розташовані на стінці вузького мікроканалу овальні лунки здатні, на відміну від сферичних заглиблень, інтенсифікувати теплообмін, зі збільшенням тепловіддачі приблизно на  $10\%$ . За рахунок зниження гідравлічних втрат теплогідравлічна ефективність лункової поверхні зростає ще вище – до  $13\%$ .

Мета даної роботи полягає в експериментальному дослідженні характерних особливостей обтікання системи овальних заглиблень на плоскій пластині, а також вивченні полів пульсацій динамічного і пристінного тиску усередині та на обтічній поверхні нахилених під кутом  $30^\circ$  до напрямку потоку овальних лунок та в їх околі.

## 1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експерименти було проведено в гідродинамічному лотку з відкритою поверхнею води довжиною  $16\text{ м}$ , шириною  $1\text{ м}$  і глибиною  $0.4\text{ м}$ . Схему експериментальної установки й місце розташування вимірювальної пластини з системою овальних лунок наведено на рис. 1. На відстані близько  $8\text{ м}$  від вхідної частини лотка роз-

ташовувалась вимірювальна ділянка, обладнана контрольно-вимірювальною апаратурою й засобами реєстрації характеристик потоку, координатними пристроями та іншими допоміжними інструментами, необхідними для проведення експериментальних досліджень [15]. Конструкція й устаткування гідродинамічного лотка дозволяли в широких межах регулювати швидкість потоку і його рівень. Найявністю різноманітних добре обтічних координатних елементів та ножів дало можливість з належною точністю (відповідно до розрахункових значень) встановлювати досліджувані моделі, вимірювальні прилади, інструменти та датчики.

Гідравлічно гладка пластина, виготовлена з полірованого органічного скла товщиною  $0.01\text{ м}$ , шириною  $0.5\text{ м}$  і довжиною  $2\text{ м}$ , мала загострення як з фронтального, так і з кормового боку для забезпечення її безвідривного обтікання. До бічних сторін пластини кріпилися кінцеві шайби (матеріал – органічне скло товщиною  $0.005\text{ м}$  і шириною  $0.2\text{ м}$ ). На відстані  $0.8\text{ м}$  від фронтального носка пластини знаходився отвір, де встановлювалася система двох овальних лунок, розташованих під кутом  $30^\circ$  до напрямку потоку (рис. 2). Діаметр лунки становив  $d=0.025\text{ м}$ , ширина і довжина циліндричної вставки – по  $0.025\text{ м}$ . Таким чином, овальні лунки, розташовані на відстані  $0.005\text{ м}$  одна від одної, мали ширину  $0.025\text{ м}$ , довжину  $0.05\text{ м}$  при відношенні глибини до ширини  $0.22$ .

Дослідження полів пульсацій тиску на обтічній поверхні системи овальних заглиблень і пластини, а також полів швидкості у вихровому потоці над досліджуваними поверхнями проводилися за допомогою мініатюрних п'єзокерамічних і п'є-



Рис. 3. П'єзореzистивні та п'єзокерамічні датчики пульсацій динамічного та пристінного тиску

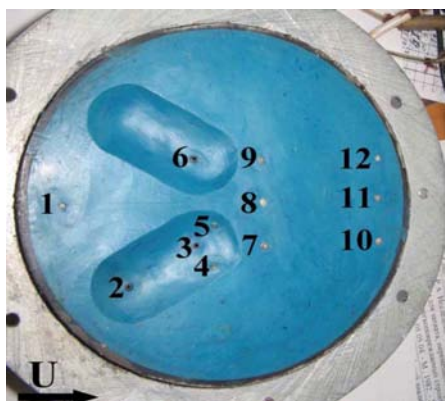


Рис. 4. Розташування датчиків пульсацій пристінного тиску на обтічній поверхні овальних лунки і пластини

зореzистивних датчиків пульсацій тиску та диференційних електронних манометрів (рис. 3). Для вимірювання пристінних пульсацій тиску урівень з обтічною поверхнею встановлювалися спеціально розроблені й виготовлені датчики тиску [15, 16]. Відносно малі розміри чутливої поверхні датчиків давали можливість реєструвати джерела псевдозвукових пульсацій пристінного тиску з просторовими масштабами  $\geq 0.003$  м, а саме, вихорі з масштабом більше двох діаметрів чутливої поверхні датчиків пульсацій тиску. Поле пульсацій швидкості усередині пари овальних заглиблень та над обтічною поверхнею пластини вимірювалося датчиками пульсацій динамічного тиску або швидкісно-го напору на базі п'єзокерамічних датчиків тиску.

Для дослідження поля пульсацій пристінного тиску усередині системи овальних заглиблень та у ближньому сліді застосовувались 12 датчиків пульсацій тиску, схема розташування яких представлена на рис. 4. Координати розташування датчиків наведені в таблиці. Тут  $x$  – поздовжня коор-

дината;  $y$  – вертикальна координата, яка відповідає напрямку нормалі до обтічної поверхні пластини;  $z$  – азимутальна координата. Початок координат знаходиться на осі симетрії системи навпроти центрів сферичних кормових частин овальних заглиблень урівень з обтічною поверхнею пластини.

З метою зменшення похибки експерименту й урахування віброкомпенсації датчиків тиску на вимірювальний магнітофон чи безпосередньо на аналого-цифровий перетворювач (АЦП) одночасно реєструвалися сигнали від віброакселерометрів, які встановлювалися як на досліджуваній пластині, так і під лункою. Сигнали віброакселерометрів і вимірювальних датчиків перед надходженням до засобу реєстрації підсилювалися і, за необхідності, фільтрувалися. Усі електричні лінії зв'язку були ретельно екрановані. Окрім того, для зменшення вібраційних паразитних реактивних опорів, які є однією зі складових перешкод під час вимірювань, кабелі й провідники підв'язувалися до несучих конструкцій лотка.

У результаті проведених робіт зі зменшення перешкод, які впливають на значення досліджуваних кількісних параметрів вихрової течії, було досягнуто задовільних умов проведення досліджень з достатньо високим ступенем точності й повторюваності результатів. Це дозволяло проводити статистичний аналіз даних, які реєструвалися впродовж вимірювання тривалістю не менше однієї хвилини. Ступінь турбулентності набігаючого потоку не перевищував 10 % для діапазону швидкостей від 0.03 до 0.5 м/с. Рівні акустичного випромінювання у районі заглиблення складали не більше 90 дБ відносно  $2 \cdot 10^{-5}$  Па у діапазоні частот від 20 Гц до 20 кГц, а рівні вібрацій досліджуваної пластини з лункою та державок датчиків не перевищували  $-55$  дБ відносно прискорення вільного падіння  $g$  у частотному діапазоні від 2 Гц до 12.5 кГц. Похибка вимірювання осереднених параметрів поля швидкості й тиску не перевищувала 10 % (при надійності 0.95). Похибка вимірювання спектральних складових пульсацій швидкості не перевищувала 1 дБ, а пульсацій тиску та прискорення  $-\leq 2$  дБ у відповідних частотних діапазонах.

## 2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Інтенсивність пульсацій поздовжньої швидкості над обтічною поверхнею овальної лунки  $u'/U$ , розрахованих на базі даних про пульсації динамічного тиску  $u'_{\text{rms}} = \sqrt{2(p'_{\text{rms}})_{\text{dyn}}/\rho}$ , зареєстровані п'єзокерамічними датчиками, в залежності від відстані до обтічної поверхні представлено на рис. 5. По осі

Таблиця. Розташування ансамблю з дванадцяти датчиків

№	$x$ (м)	$y$ (м)	$z$ (м)	координати відносно $d$
1	-0.040	0	0	( -1.6d; 0; 0 )
2	-0.022	-0.005	0.027	( -0.88d; -0.2d; 1.08d )
3	0	-0.005	0.015	( 0; -0.2d; 0.6d )
4	0.005	0.003	0.022	( 0.2d; -0.12d; 0.88d )
5	0.005	-0.003	0.008	( -0.2d; -0.12d; 0.32d )
6	0	-0.005	-0.015	( 0; -0.2d; -0.6d )
7	0.020	0	0.015	( 0.8d; 0; 0.6d )
8	0.020	0	0	( 0.8d; 0; 0 )
9	0.020	0	-0.015	( 0.8d; 0; -0.6d )
10	0.060	0	0.015	( 2.4d; 0; 0.6d )
11	0.060	0	0	( 2.4d; 0; 0 )
12	0.060	0	-0.015	( 2.4d; 0; -0.6d )

ординат відкладено нормовані значення  $y/\delta$ , де  $\delta$  – товщина прилежого шару перед овальною лункою. Ці результати було отримано для двох швидкостей потоку, а саме,  $U=0.25$  м/с ( $Re_x=250000$ ) і  $U=0.45$  м/с ( $Re_x=450000$ ). Вказані значення  $U$  вимірювались над обтічною поверхнею однієї з овальних лунок (рис. 6) над датчиком пульсацій пристінного тиску № 2 з координатами  $x=-0.88d$  та  $z=1.08d$  при змінному  $y$ . При наближенні до обтічної поверхні пульсації поздовжньої швидкості зростають, досягають максимуму, після чого зменшуються на рівні поверхні пластини над отвором овальної лунки. Коли датчик пульсацій динамічного тиску заглиблювали в отвір овальної лунки, пульсації швидкості знову збільшувались (досягалась межа зсувного шару), а потім зменшувались (досягалось ядро циркуляційної течії усередині лунки) – див. рис. 5.

Зміну середньоквадратичних значень пульсацій пристінного тиску, виміряних на обтічній поверхні овального заглиблення та в його околі, в залежності від числа Рейнольдса у безрозмірному вигляді представлено на рис. 7. Тут нумерація кривих співпадає з номерами датчиків пульсацій пристінного тиску, встановлених урівень з обтічною поверхнею відповідно до рис. 4.

Згідно з результатами, наведеними на рис. 7, пульсації пристінного тиску підпорядковуються квадратичній залежності за швидкістю потоку, особливо на плоскій поверхні перед лункою. Значимо, що пульсації пристінного тиску, нормовані швидкісним напором у незбуреному прилежовому шарі перед овальними заглибленнями становили приблизно 0.01, практично у всьому діапазоні досліджуваних чисел Рейнольдса. Як відомо, це значення відповідає інтенсивності пульсацій

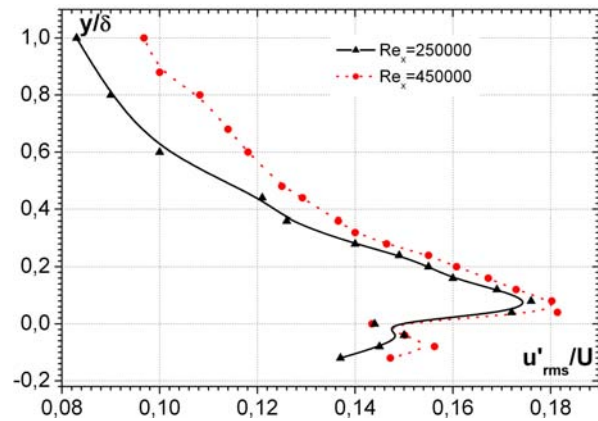


Рис. 5. Профіль пульсацій поздовжньої швидкості над обтічною поверхнею овальної лунки

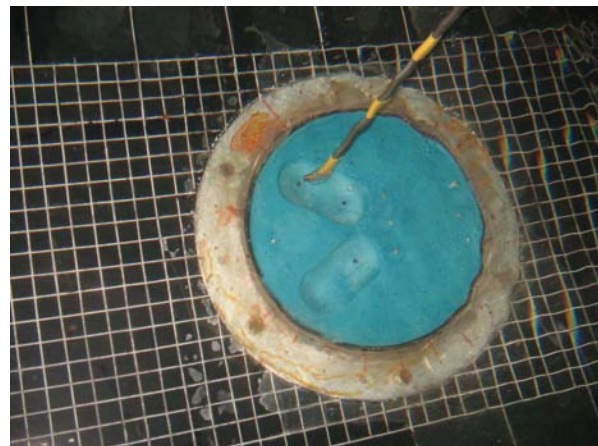


Рис. 6. Розташування датчиків пульсацій динамічного тиску над обтічною поверхнею овальної лунки



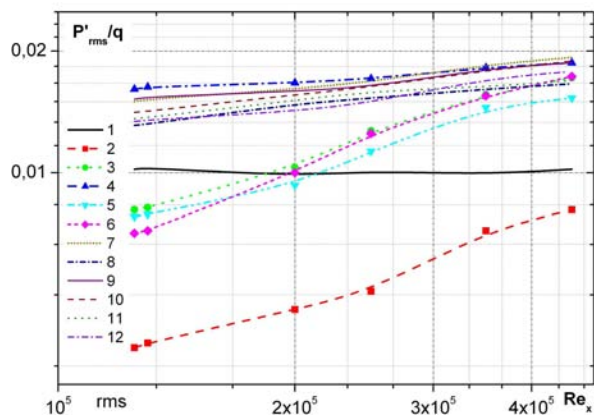


Рис. 7. Акустико-гідродинамічний коефіцієнт пульсацій пристінного тиску в залежності від числа Рейнольдса

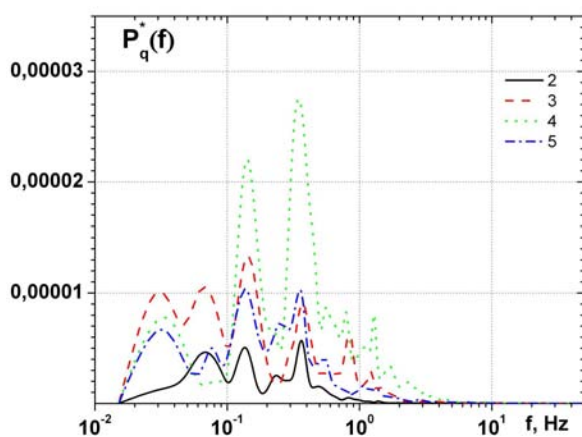


Рис. 8. Спектральні щільності потужності пульсацій пристінного тиску на обтічній поверхні овального заглиблення для  $U=0.25$  м/с

пристінного тиску, виміряній точковими датчиками, діаметр чутливої поверхні яких не перевищує 19 довжин внутрішніх змінних примежового шару [17–19]. Тут  $u_\tau$  – динамічна швидкість, а  $\nu$  – кінематична в'язкість. Слід нагадати, що у представлених дослідженнях датчики пульсацій пристінного тиску, діаметр чутливої поверхні яких був не більшим за 16 довжин внутрішніх змінних, можна вважати точковими. Зокрема, це підтверджують дані, зображені на рис. 7.

Таким чином, для досліджуваних режимів обтікання пластини з локальними заглибленнями найменші рівні пульсацій пристінного тиску спостерігаються на дні овальних заглиблень, а також у їхніх передніх частинах, особливо для малих швидкостей потоку і чисел Рейнольдса (крива 2 рис. 7). Найбільша інтенсивність пульсацій пристінного тиску наявна у ближньому сліді заглибле-

ння в його серединному перетині. Усередині овальних заглиблень, розташованих під кутом  $30^\circ$  до напрямку потоку, найбільші значення рівні пульсацій пристінного тиску мають у кормовій сферичній частині заглиблення й у ближньому сліді відразу за ним (див. криві 4, 7 та 9 на рис. 7). Так, акустико-гідродинамічний коефіцієнт або коефіцієнт трансформації кінетичної енергії потоку в енергію турбулентних пульсацій тиску, який виражається відношенням  $p'_{rms}/q = p'_{rms}/(\rho U^2/2)$ , на дні кормовій сферичній частині лунки майже в чотири рази вищий, ніж у передній її сферичній частині. На кормовій стінці лунки та в її ближньому сліді спостерігається істотна трансформація кінетичної енергії потоку в енергію пульсацій пристінного тиску. З віддаленням від лунки інтенсивність пульсацій тиску стає меншою, але зі збільшенням швидкості потоку вона наближається до своїх максимальних рівнів (див. криві 10 та 12 на рис. 7). Між заглибленнями, як у ближньому сліді (крива 8), так і з віддаленням від них (крива 11), спостерігаються нижчі рівні пульсацій пристінного тиску. Слід зазначити, що зі збільшенням числа Рейнольдса акустико-гідродинамічний коефіцієнт, виміряний усередині лунок, збільшується більш ніж удвічі, наближаючись до зафіксованих максимальних значень. З віддаленням від овальних лунок середньоквадратичні значення пульсацій пристінного тиску поступово зменшуються до рівнів незбуреного примежового шару.

Відповідно до рекомендацій [20,21], з використанням алгоритму швидкого перетворювання Фур'є та вагової функції Ханнінга проведено спектральний аналіз пульсацій пристінного тиску на обтічних поверхнях овальних лунок і пластини. Спектральні щільності потужності пульсацій пристінного тиску на обтічній поверхні овальних заглиблень і на плоскій пластині поблизу них мають виражені дискретні піки, які визначаються характером вихрового руху в цих зонах.

На рис. 8 представлено спектральні щільності потужності пульсацій пристінного тиску, виміряні усередині однієї з досліджуваних овальних лунок для швидкості потоку 0.25 м/с. Відповідні числа Рейнольдса, розраховані по діаметру лунки й відстані від переднього краю пластини, мають значення  $Re_d = Ud/\nu = 6250$  і  $Re_x = UX/\nu = 250000$ . Спектр нормувався швидкісним напором  $q = \rho U^2/2$  і зовнішніми змінними – діаметром овальної лунки та швидкістю потоку  $p'_q(f) = (p'(f))^2/q^2$ . Частота  $f$  не нормувалася і наведена на графіках у Гц. Номери кривих відповідають номерам датчиків пульсацій тиску, встановлених урівень з обтічною поверхнею (їхне

розташування показане на рис. 4). Максимальні рівні пульсацій пристінного тиску досягаються на кормовій стінці лунки, де відбувається інтенсивна взаємодія вихрової течії, яка викидається з заглиблення, та примежового шару, що утворюється над обтічною поверхнею пластини. Найменші рівні пульсацій фіксуються на дні передньої за потоком сферичної частини овальної лунки (крива 2). Викиди великомасштабних вихрових структур спостерігаються з частотою (0.35...0.37) Гц. Коливання вихрової течії усередині овальної лунки відбуваються з частотами (0.03...0.035) Гц і (0.13...0.15) Гц у поздовжньому й поперечному напрямках відносно осей овальної лунки відповідно. При цьому осциляції вихрового руху і поля пульсацій пристінного тиску усередині самої лунки відповідають субгармонікам і гармонікам вищих порядків зазначених частот. Це наочно ілюструє рис. 8.

На рис. 9 представлені спектральні щільності потужності пульсацій пристінного тиску, виміряні всередині овальної лунки (на кормовій стінці) та у її ближньому сліді для швидкості потоку 0.25 м/с. Позаду кормової сферичної частини заглиблення спектри пульсацій загалом подібні до зафіксованих на кормовій стінці (див., рис. 9 криві 7 та 4), але їхня інтенсивність на частотах коливань вихрового руху і викидів великомасштабних вихрових структур дещо нижча. В серединному перерізі системи лунок, де розташовано датчик № 8, характер спектру пульсацій тиску відрізняється від характерного для кормової стінки лунки: тут максимум спектральних рівнів спостерігається при 0.2 Гц, а для частот порядку 0.03 Гц інтенсивність пульсацій пристінного тиску незначна.

Спектри пульсацій пристінного тиску усередині овальних лунок і в їхніх ближніх слідах наведені на рис. 10. Частотні компоненти поля пульсацій тиску позаду кормових сферичних частин овальних лунок майже ідентичні тим, які мають місце усередині них. У серединному перерізі ближнього сліду системи овальних лунок частотний спектр пульсацій пристінного тиску має особливий характер, відзначений вище.

Результати вимірювань спектральних щільностей потужності пульсацій пристінного тиску вздовж серединного перерізу системи овальних лунок, а також усередині останніх наведено на рис. 11. Відзначимо, що спектри пульсацій пристінного тиску під примежовим шаром на плоскій поверхні гідравлічно гладкої пластини (крива 1) мінімальні за своєю інтенсивністю і не мають тональних чи дискретних піків, які спостерігаються усередині лунок та поблизу них [22–24]. Позаду

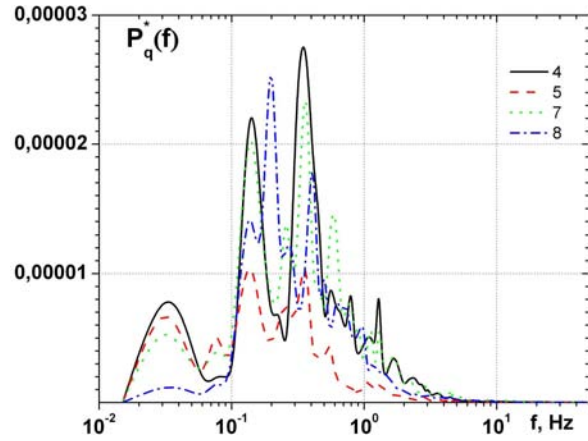


Рис. 9. Спектральні щільності потужності пульсацій пристінного тиску на поверхні овальної лунки та в її ближньому сліді для  $U = 0.25$  м/с

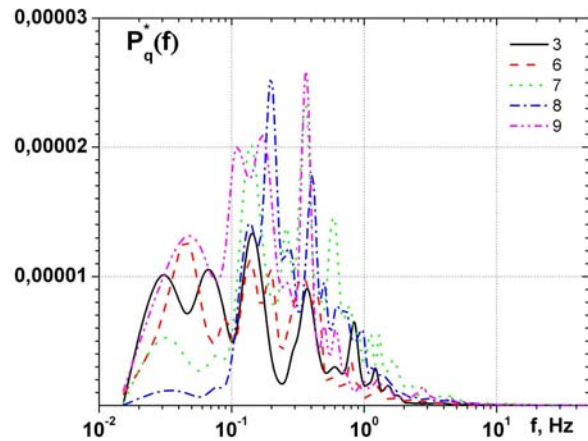


Рис. 10. Спектральні щільності потужності пульсацій пристінного тиску усередині овальних лунок та в їхніх ближніх слідах для  $U = 0.25$  м/с

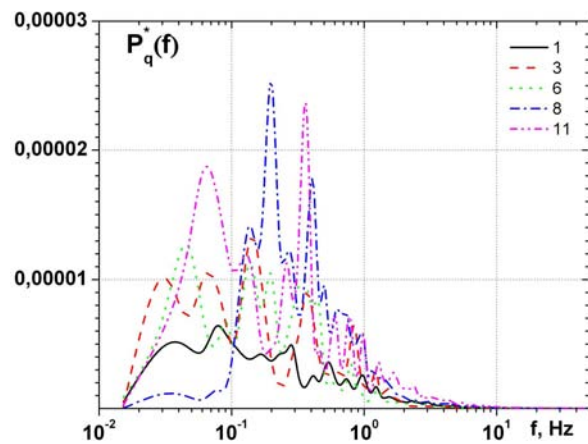


Рис. 11. Спектральні щільності потужності пульсацій пристінного тиску вздовж серединного перерізу системи овальних лунок для  $U = 0.25$  м/с

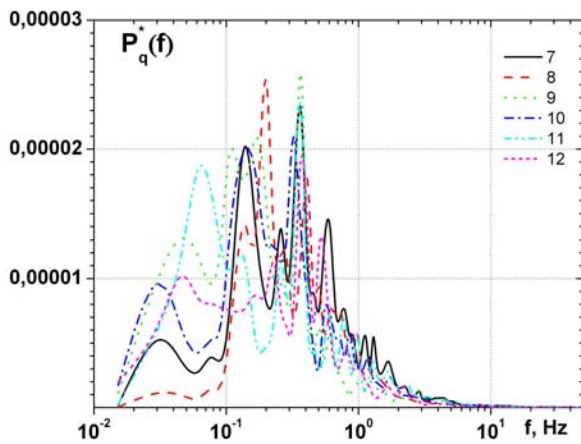


Рис. 12. Спектральні щільності потужності пульсацій пристінного тиску позаду системи овальних лунок для  $U=0.25$  м/с

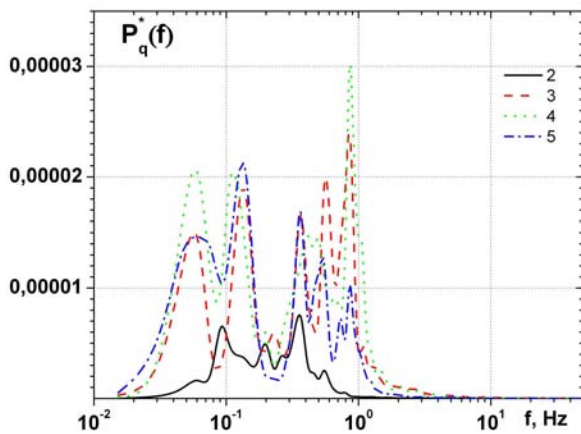


Рис. 13. Спектральні щільності потужності пульсацій пристінного тиску на обтічній поверхні овального заглиблення для  $U=0.45$  м/с

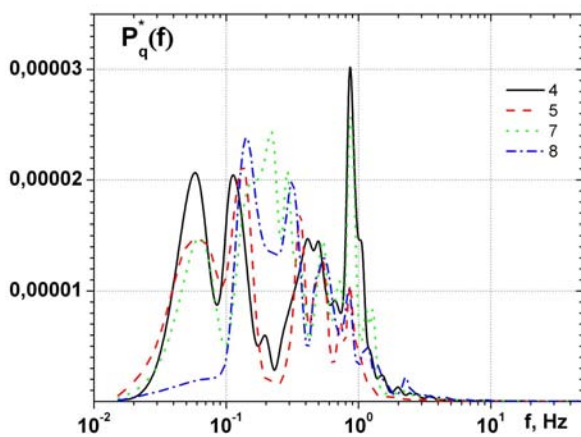


Рис. 14. Спектри пульсацій пристінного тиску на обтічній поверхні овальної лунки та в її ближньому сліді для  $U=0.45$  м/с

овальних лунок ці дискретні підйоми добре помітні у спектрах, але тональні частоти у ближньому сліді (крива 8) відрізняються від зареєстрованих на відстані понад  $2d$  від лунок (крива 11 на рис. 11), де з'являються тональні піки, що відповідають частотам викидів великомасштабних вихрових структур назовні. Таким чином, сліди вихрової течії, яка викидається назовні з овальних лунок і генерує інтенсивні тональні пульсації пристінного тиску, перетинаються в місці розташування датчика № 11.

Спектральні щільності потужності пульсацій пристінного тиску позаду системи овальних лунок показані на рис. 12. Усі датчики, розташовані на відстані  $2d$  нижче за потоком, реєструють поле пульсацій тиску, тональні піки у спектрах якого відповідають частотам викидів великомасштабних вихрових структур назовні з лунок, частотам коливального руху усередині них, а також їхнім субгармонікам і гармонікам вищих порядків [25, 26]. При цьому спектральні рівні мають менші значення, ніж у ближньому сліді. Це вказує на те, що з віддаленням від системи овальних лунок дискретні підйоми спектральних рівнів пульсацій пристінного тиску, характерні для вихрового руху усередині лунок, поступово зменшуються, а примезовий шар відновлюється.

Спектральні характеристики поля пульсацій пристінного тиску, типові для розвинутого турбулентного режиму обтікання системи овальних лунок на гідравлічно плоскій поверхні пластини при швидкості течії  $0.45$  м/с та числах Рейнольдса  $Re_d=11250$  і  $Re_x=450000$ , наведені на рис. 13–17. У цілому вони аналогічні даним, отриманим при  $U=0.25$  м/с. Наприклад, спектральні щільності потужності пульсацій пристінного тиску, виміряні усередині однієї з овальних лунок, показані на рис. 13. Як і для меншої швидкості потоку, максимальні спектральні рівні пульсацій тиску й тональні піки спостерігаються на кормовій сферичній частині лунки. Мінімальні ж рівні відповідають передній відносно потоку сферичній частині лунки (крива 2). Дискретні піки, характерні для вихрового руху усередині овальної лунки, розташованої під кутом  $30$  градусів відносно напрямку течії, спостерігаються на частотах  $(0.05 \dots 0.06)$  Гц,  $(0.11 \dots 0.13)$  Гц і  $(0.8 \dots 0.9)$  Гц відповідно. Перші два діапазони відповідають частотам коливального руху всередині овальної лунки, а частотний діапазон  $(0.8 \dots 0.9)$  Гц обумовлений викидом великомасштабних вихрових структур з лунки назовні. Також у спектральних характеристиках поля пульсацій пристінного тиску усередині овальної лунки спостерігаються дискре-



тні піки, які відповідають субгармонікам або гармонікам вищих порядків домінуючих частот вихрового руху.

Особливості вихрового руху і поля пульсацій пристінного тиску, яке він генерує у ближньому сліді системи овальних лунок, в її серединному перерізі та на відстані більше  $2d$  заглиблення, відображено на наступних графіках. Як і для меншої швидкості течії, спектральні рівні пульсацій тиску в сліді за кормовою сферичною частиною лунки подібні до отриманих усередині овальної лунки. Водночас, спектри у серединному перерізі системи у ближньому сліді овальних лунок мають особливий характер, подібний до результатів, отриманих для швидкості потоку  $0.25$  м/с, але з максимумом на частоті  $0.13$  Гц (крива 8 на рис. 14). Позаду кормових сферичних частин лунок у спектральних залежностях поля пульсацій пристінного тиску спостерігаються тональні підйоми, характерні для вихрового руху усередині овальних лунок (див. рис. 15). У серединному перерізі системи на відстані більше  $2d$  від заглиблень у спектрах з'являються дискретні підйоми, характерні для низькочастотного коливання вихрового руху усередині лунок, а також для викидів великомасштабних вихрових структур назовні.

Інтенсивність пульсацій пристінного тиску на частоті викидів виявилася значно нижчою, ніж для швидкості потоку  $0.25$  м/с (порівняй рис. 11 і 16). Це обумовлюється тим, що для великої швидкості течії взаємодія між вихровими слідами кожної з лунок відбувається на більшій відстані від них, а віддалення, близьке до  $2d$ , для цього режиму знаходиться у початковій стадії цієї взаємодії. На цих же дистанціях від системи лунок у вимірювальних точках позаду їхніх кормових сферичних частин спостерігаються інтенсивні пульсації пристінного тиску на частоті викидів великомасштабних вихорів із заглиблень назовні (рис. 17). Зауважимо, що інтенсивність пульсацій пристінного тиску тут нижча, ніж у ближньому сліді сферичних лунок (див. криві 10 і 12 та 7 і 9 на рис. 17).

## ВИСНОВКИ

На базі отриманих експериментальних даних щодо особливостей формування й розвитку вихрової течії всередині пари овальних лунок, розташованих на плоскій поверхні під кутом  $30$  градусів відносно напрямку потоку, та в їхньому ближньому сліді можна зробити такі висновки.

1. Інтенсивність поля пульсацій швидкості мала найбільші значення поблизу обтічної поверх-

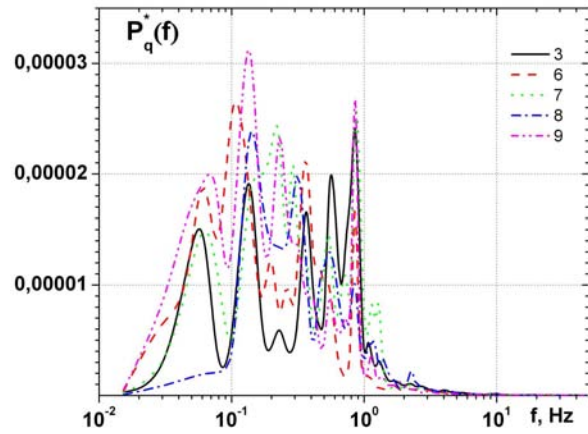


Рис. 15. Спектри пульсацій пристінного тиску усередині овальних лунок та в їхніх ближніх слідах для  $U=0.45$  м/с

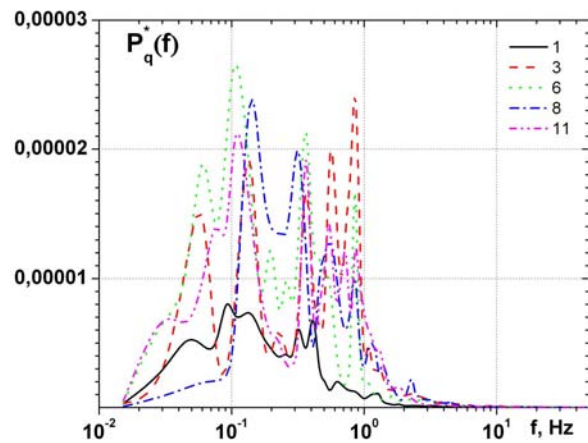


Рис. 16. Спектри пульсацій пристінного тиску вздовж серединного перерізу системи овальних лунок для  $U=0.45$  м/с

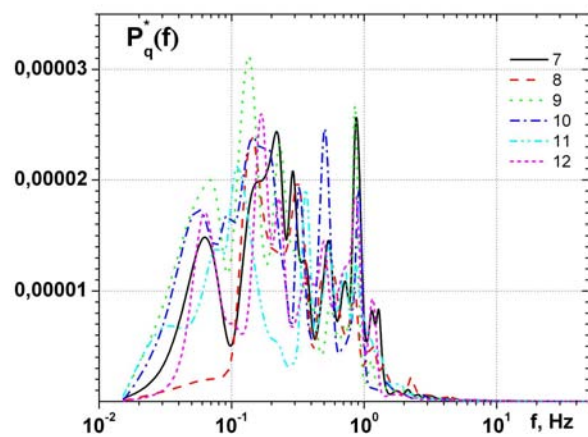


Рис. 17. Спектральні щільності потужності пульсацій пристінного тиску позаду системи овальних лунок для  $U=0.45$  м/с

- ні, а також на межі зсувного шару в отворі овальних лунок. Інтенсивність поля пульсацій пристінного тиску була максимальною в області взаємодії вихрових структур зсувного шару й великомасштабних вихрових систем, які викидалися назовні з лунок, із кормовою стінкою овальних лунок. Найменша інтенсивність пульсацій пристінного тиску спостерігалась на дні овальної лунки в її передній відносно потоку сферичній частині.
2. В залежності від режимів обтікання в спектральних характеристиках поля пульсацій пристінного тиску, виміряного на обтічній поверхні, з'являються характерні дискретні піки, які відповідають частотам низькочастотних коливань вихрової течії усередині овальних лунок та частотам викидів великомасштабних вихрових систем із лунок назовні.
  3. В серединному перерізі системи овальних лунок (в їхньому ближньому сліді) не спостерігалось взаємодії вихрових структур, що викидалися із лунок назовні. В цій області обтічної поверхні спектральні щільності потужності пульсацій пристінного тиску мають особливий характер (з домінуванням окремих тональних компонент), що відрізняє їх від спектрів пульсацій пристінного тиску як усередині овальних лунок, так і у ближньому сліді їхніх кормових сферичних частин та в сліді пари овальних лунок на відстані більшій, ніж 2d.
  4. На відстані більшій, ніж два діаметри лунок, у спектральних залежностях спостерігались тональні компоненти, які відповідали частотам викидів великомасштабних вихорів і частотам коливань вихрового руху усередині лунок у серединному перерізі системи лунок і позаду їхніх кормових сферичних частин. З віддаленням від системи овальних лунок інтенсивність тональних коливань, які характерні для вихрового руху усередині лунок, зменшувалась, а примежовий шар поступово відновлювався.
1. Ермишин А. В., Исаев С. А. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование).– М.-СПб.: б/и, 2001.– 360 с.
  2. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок).– К.: ИТТФ НАНУ, 2005.– 140 с.
  3. Воропаев Г. А., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Гринченко В. Т., Исаев С. А., Розумнюк Н. В. Источники псевдозвуковых пульсаций давления при обтекании сферической лунки // Акуст. вісн.– 2008.– 11, № 3.– С. 27–49.
  4. Кикнадзе Г. И., Краснов Ю. К., Подымако Н. Ф., Хабенский В. Б. Самоорганизация вихревых структур при обтекании водой полусферической лунки // Докл. АН СССР.– 1986.– 291, № 6.– С. 1315–1318.
  5. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Корнев Н. В. Численное моделирование смерчевого теплообмена при обтекании поверхностей с лунками (состояние и перспективы) // VI Минск. межд. форум по теплообмену (ММФ 2008).– Минск, Беларусь.– 2008.– С. 1–11.
  6. Гринченко В. Т., Воропаев Г. А., Исаев С. А. Управление ламинарным пограничным слоем вихрями, генерируемыми овальной лункой // Вісник Донецького Університету, Сер. А: Природничі науки.– 2009.– Вип. 1.– С. 191–198.
  7. Гортышов Ю. Ф., Попов И. А., Олимшиев В. В., Щелчков А. В., Каськов С. И. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования.– Казань: Центр иннов. технол., 2009.– 532 с.
  8. Chyu M. K., Yu Y., Ding H., Downs J. P., Soechting F. O. Concavity enhancement heat transfer in an internal cooling passage // ASME Pap. 97-GT-437.– 1997.
  9. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Усачов А. Е., Фролов Д. П. Идентификация самоорганизующихся струйно-вихревых структур при численном моделировании ламинарного течения и теплообмена в окрестности несимметричной уединенной лунки // Изв. РАН: Энергетика.– 1999.– № 2.– С. 126–136.
  10. Воропаев Г. А., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Исаев С. А. Визуализация ламинарного обтекания овального углубления // Прикл. гидромех.– 2009.– 11, № 4.– С. 31–46.
  11. Isaev S., Voropaev G., Grinchenko V., Sudakov A., Voskoboynick V., Rozumnyuk N. Drag reduction of lifting surfaces at the use of oval dimples as vortex generators // Abstr. EDRFCM 2010.– Kyiv, Ukraine, 2010.– P. 32–33.
  12. Исаев С. А., Леонарди Э., Тимченко В., Усачов А. Е. Вихревая интенсификация теплообмена в микроканалах с овальными лунками // Третья межд. конф. “Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках”.– М.– 2008.– С. 1–10.
  13. Turnow J., Kornev N., Isaev S., Hassel E. Vortex mechanism of heat transfer enhancement in a channel with spherical and oval dimples // Heat Mass Transf.– 2011.– 47, № 3.– P. 301–313.
  14. Turnow J., Kornev N., Zhdanov V., Hassel E. Flow structures and heat transfer on dimples in a staggered arrangement // Int. J. Heat Fluid Flow.– 2012.– 35, № 3.– P. 168–175.
  15. Воскобойник В. А., Воскобойник А. В. Когерентні вихрові структури в поперечно обтічній овальній лунці // Наукоєм. технол.– 2014.– 23, № 3.– С. 352–358.
  16. Воскобойник В. А. Распределение давления на обтекаемой поверхности со сферической лункой // Вод. трансп.– 2014.– 18, № 3.– С. 90–96.
  17. Farabee T. M., Casarella M. J. Spectral features of wall pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers // Phys. Fluids.– 1991.– 3, № 11.– P. 2410–2420.

18. *Voskoboinick V., Kornev N., Turnow J.* Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements // *Flow Turbul. Combust.*– 2013.– **90**, № 2.– P. 86–99.
19. *Воскобойник В. А.* Трансформация энергии турбулентного течения в поле пульсаций пристеночного давления // *Акуст. вісн.*– 2012.– **15**, № 1.– С. 3–21.
20. *Бендат Дж., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных данных.– М.: Мир, 1989.– 540 с.
21. *Марпл-мл. С. Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения.– М.: Мир, 1990.– 584 с.
22. *Blake W. K.* Mechanics of flow-induced sound and vibration: in 2 vols.– New York: Academic Press, 1986.– 974 p.
23. *Willmarth W. W.* Pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers // *Ann. Rev. Fluid Mech.*– 1975.– **7**.– P. 13–37.
24. *Bull M. K.* Wall-pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers: Some reflections on forty years of research // *J. Sound Vib.*– 1996.– **190**, № 3.– P. 299–315.
25. *Воскобойник В. А., Воскобойник А. В.* Структура течії та пульсації тиску усередині овальної лунки // *Наукоєм. технол.*– 2012.– **13**, № 1.– С. 12–18.
26. *Voskoboinick V., Voskoboinick A., Stepanovitch V.* Generation of vortex structures by pair oval dimples on flat plate // *Proc. EDRFCM 2015.*– Cambridge, UK, 2015.– P. 43–44.