

ВПЛИВ НАХИЛЕНОЇ ОВАЛЬНОЇ ЛУНКИ НА ПРОСТОРОВО-ЧАСОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСАЦІЙ ШВИДКОСТІ ТА ТИСКУ

**В. А. ВОСКОБІЙНИК, О. А. ВОСКОБОЙНИК, А. В. ВОСКОБІЙНИК,
П. Ю. РОМАНЕНКО, В. М. СТЕПАНОВИЧ**

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

Наведено результати фізичного моделювання вихрової течії, що утворюється усередині та поблизу овальної лунки, розташованої на пласкій гідравлічно гладкій поверхні. Особливості формування та еволюції вихрового руху усередині та околі овальної лунки досліджувалися за допомогою візуалізації течії. Просторово-часові характеристики полів пульсацій швидкості та тиску вимірювалися плівковими термоанемометрами та мініатюрними п'єзокерамічними датчиками пульсацій тиску. Установлено, що для перехідного режиму течії усередині овальної лунки формуються великомасштабні веретеноподібні вихрові структури та дрібномасштабні вихори зсувного шару. Спектральні залежності пульсацій швидкості та тиску мають тональні компоненти, які обумовлені частотами викиду великомасштабних вихорів назовні з лунки, частотами обертання циркуляційної течії усередині лунки та частотами автоколивань дрібномасштабних вихорів зсувного шару і їх взаємодії з кормовою стінкою лунки.

ВСТУП

Застосування лункових рельєфів на обтічній поверхні призводить до істотного виграшу в енергозберігаючих технологіях та пристроях, де інтенсифікують теплопереніс, зменшують гідродинамічний опір, підвищують якість аеродинамічних профілів та знижують гідродинамічні шуми. Сферичні лунки не є найкращими за турбулентного режиму течії, наприклад, теплоносія, а у ламінарних потоках їх використання практично не виправдане. Усередині таких лунок залежно від ряду параметрів, у тому числі геометричних і гідродинамічних, формуються симетричні і асиметричні вихрові системи, які здійснюють біфуркації. У цих умовах в отворах сферичних лунок, особливо глибоких, генеруються симетричні аркоподібні або підковоподібні вихори та нахилені моновихрові структури, розташовані під кутом близько 45° відносно напрямку потоку. Джерело нахиленого вихору знаходиться на стінці лунки поблизу її дна, а стік викидається назовні з лунки [1-3]. Надання лунці такої форми, яка б генерувала стійкі вихрові системи з регульованою інтенсивністю і циркуляцією, що дозволить поліпшити техніко-економічні показники обтічних поверхонь, є одним з основних завдань керування примежовим шаром. До таких лунок можна віднести овальні лунки, які розташовують під певним розрахунковим кутом до напрямку набігаючого потоку. В овальних лунках поперечна завихореність, генерована у результаті взаємодії сил в'язкості та інерції, а також циркуляційної і вторинної течії усередині отвору лунки, трансформується, наприклад, у поздовжню завихореність, яка, викидаючись з лунки і пересуваючись у пристінному шарі, може істотно впливати на примежовий шар та його структуру. Як показали дослідження [1, 4], відносний тепловідвід сферичних лунок помітно нижчий, ніж від асиметричних овальних лунок. Здатність овальних лунок створювати вихрові структури з інтенсивною вторинною течією зумовлює їх перевагу та забезпечує їх працездатність. Наприклад, для асиметричної лунки, що поєднує неглибоку сферичну лунку з циліндричною вставкою, має місце значне (близько 10% [1,4,5]) збільшення тепловіддачі

від стінки. Треба відмітити, що у цьому випадку спостерігається висока стійкість автоколивань нахиленої структури, що забезпечує стабільність ефекту вихрової інтенсифікації теплообміну та керування примежовим шаром.

Створення вихрогенераторів, які б мали мінімальний гідродинамічний опір та генерували штучні вихрові системи із заданими кінематичними і динамічними параметрами, можливо, як показують останні наукові дослідження, під час використання асиметричних овальних заглиблень помірної глибини (близько 0.2 діаметру лунки або її ширини). У зв'язку з цим мета представлених експериментальних досліджень – визначення просторово-часових характеристик поля пульсацій швидкості та пристінного тиску, що мають псевдозвукову природу, обумовлену дією вихрових структур, які генеруються усередині та поблизу овальної лунки, розташованої на гідравлічно гладкій плоскій поверхні під кутом 60° до набігаючого потоку.

1. УСТАТКУВАННЯ ТА ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження проводилися в гідродинамічному лотку довжиною 16 м, шириною 1 м і глибиною 0.8 м з вільною поверхнею води глибиною 0.4 м, для швидкості потоку 0.25 м/с. На висоті близько 0.1 м від дна каналу встановлювалася гідравлічно гладка пластина, обладнана кінцевими шайбами. Пластина, виготовлена з полірованого органічного скла товщиною 0.01 м, шириною 0.5 м і довжиною 2 м, була загострена з двох сторін для забезпечення безвідриного її обтікання. На відстані 1 м від початку пластини було зроблено поодинокі заглиблення овальної форми у вигляді сферичного сегменту діаметром 0.04 м, розділеного циліндричною вставкою довжиною 0.04 м. В результаті заглиблення набуло овальної форми діаметром 0.04 м, довжиною 0.08 м і глибиною 0.09 м, яке має відносну глибину 0.22d. Поворотний пристрій на плоскій пластині, в якому розташовувалося овальне заглиблення, давав можливість повертати останнє навколо свого центру на кут від 0° до 360° з кроком 15° [5].

Урівень з обтічною поверхнею овальної лунки і на пластині поблизу заглиблення встановлювалися 13 мініатюрних датчиків пульсацій пристінного тиску (рис. 1а). П'єзокерамічні датчики мембранного типу мали діаметр чутливої поверхні $1.6 \cdot 10^{-3}$ м [6]. Разом з датчиками пульсацій пристінного тиску в експериментах використовували плівкові термоанемометри фірми Діза. Термоанемометри через відповідні державки та координатні пристосування вводилися всередину примежового шару та у вихровий потік заглиблення для вимірювання поля швидкості (рис. 1б).

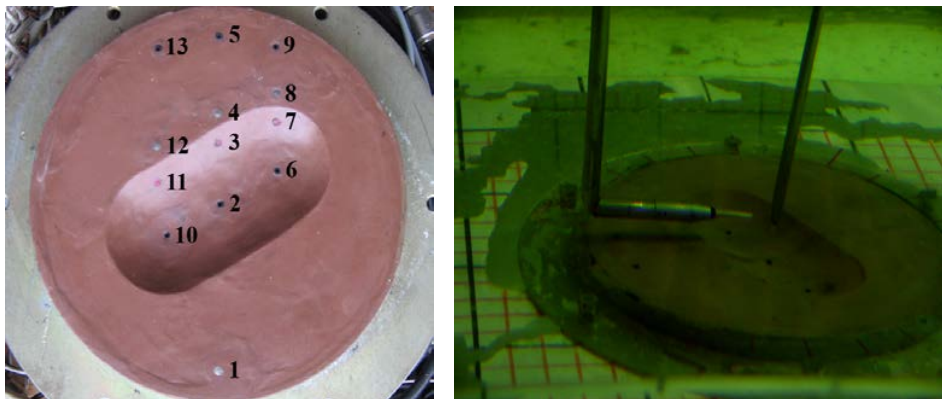


Рис. 1

Електричні сигнали датчиків пульсацій пристінного тиску і плівкових термоанемометрів фільтрувались, посилювались, реєструвались і вимірювались відповідною апаратурою. Виміряні сигнали подавались на багатоканальні аналогово-цифрові перетворювачі, вбудовані у персональний комп'ютер, де реєструвались, а згодом оброблялись за стандартними та спеціально розробленими програмами і методиками.

Перед проведенням інструментальних вимірювань проводилась візуалізація потоку. Візуалізація здійснювалась за допомогою введення у потік фарбувальних речовин та контрастних покриттів, що змивалися, які дозволяли оцінити поле течії і дотичну напругу на обтічній поверхні. Матеріали візуалізації реєструвались цифровими відеокамерами та фотоапаратами, а згодом оброблялись і аналізувались відповідними програмами на персональних комп'ютерах. Обробка та аналіз траєкторій руху мічених часток дозволив визначити напрям руху та швидкість їх перенесення.

Похибка вимірювань швидкості руху мічених часток і підфарбованої рідини складає менше 12% за довірчого інтервалу 0.95. Похибка вимірювань усереднених і інтегральних величин не перевищувала 10 %. Похибка вимірювань спектральних залежностей полів пульсацій швидкості та тиску складала не більше 2 дБ у діапазоні частот від 0 Гц до 12.5 кГц.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати візуальних досліджень показали, що для швидкості течії $U=0.25$ м/с усередині овальної лунки формується веретеноподібний вихор у придонній частині лунки майже по всій довжині циліндричної вставки. У передній та кормовій сферичних частинах лунки зароджуються вихрові структури, які мають вертикальну або точніше викривлену за напрямком течії вісь, подібні за формою тим великомасштабним вихровим структурам, які у роботі [7] названо смерчеподібними струменями. У передній частині овальної лунки смерчеподібна вихрова структура була інтенсивнішою і мала більш стійкий характер, ніж у кормовій сферичній частині лунки. Ці вихрові структури, а також середня частина веретеноподібного вихору, який розташовувався між ними, періодично, а точніше квазіперіодично викидалися назовні з лунки (рис. 2). У ході візуальних досліджень було проведено оцінку частот викидів вихрових структур з овальної лунки: з передньої за потоком сферичної частини лунки $f=0.8$ Гц ($St = fd/U = 0.12$), з серединної частини лунки – $f=0.9$ Гц ($St=0.14$) та з кормової сферичної частини лунки – $f=0.6$ Гц ($St=0.1$).

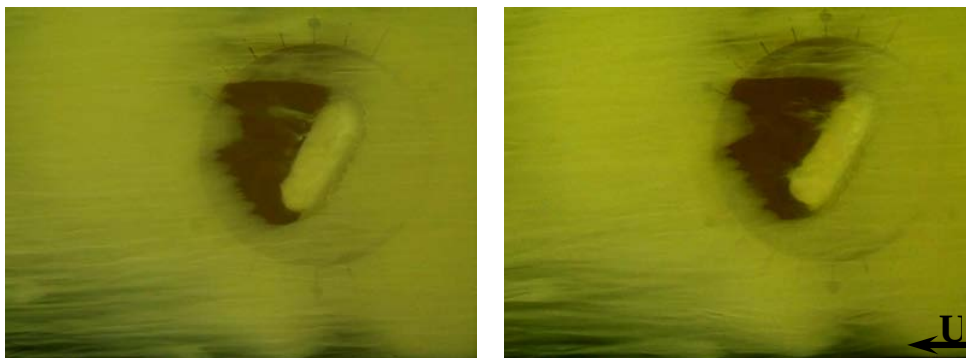


Рис. 2

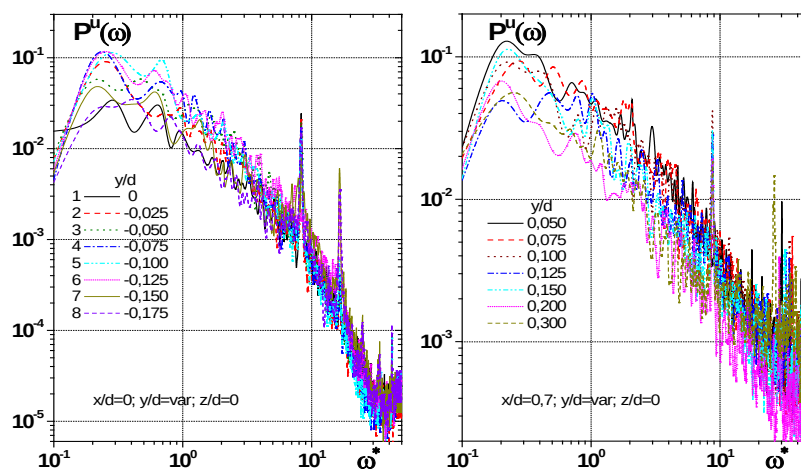


Рис. 3

Зафіксовано, що найбільш інтенсивний викид вихрових структур назовні з лунки для цього режиму течії спостерігається у її передній за потоком частині, що викликало більший змив водорозчинного покриття позаду лунки у цій області, як показано на рис. 2. Визначено, що за фіксований час площа змитого покриття позаду передньої частини лунки майже у 1.3 рази більша, ніж позаду серединної частини лунки, і майже у 2.5 більша, ніж позаду кормової сферичної частини овальної лунки.

Використовуючи алгоритм швидкого перетворювання Фур'є та вагову функцію Ханнінга, як рекомендовано у роботі [8], проведено спектральний аналіз пульсацій поздовжньої швидкості у примезовому шарі над обтічною пластиною та усередині овальної лунки, розташованій на ній під кутом 60° . Спектральні густини потужності пульсацій поздовжньої швидкості усередині лунки вздовж її вертикальної осі наведені на рис. 3а для швидкості потоку 0.25 м/с і чисел Рейнольдса, розрахованих за діаметром лунки $Re_d = 10000$ і за відстанню від носка пластини до місця розташування лунки $Re_x = 2.5 \times 10^5$. Тут спектри нормовані як $P^u(\omega) = P(\omega)/Ud$, а частота, як $\omega^* = 2\pi fd/U$.

Зі збільшенням глибини спектральні густини потужності пульсацій поздовжньої швидкості ростуть, особливо в області низьких частот, яким відповідають частоти обертання циркуляційної течії усередині лунки та частотам викидів великомасштабних вихорів назовні з овальної лунки, а також частоті коливального руху вихрового потоку усередині лунки. Для серединного перетину досліджуваного заглиблення максимальні рівні пульсацій швидкості спостерігаються на глибині (0.08...0.1) діаметру лунки. З подальшим збільшенням глибини, рівні спектральної густини потужності пульсацій поздовжньої швидкості зменшуються, що проілюстровано на рис. 3а.

Максимальні значення пульсацій швидкості у серединному перетині овального заглиблення, для швидкості набігаючого потоку 0.25 м/с, спостерігаються на безрозмірних частотах $\omega^* \approx 0.3$ і $\omega^* \approx 0.8$, практично по всій глибині лунки, яким відповідають числа Струхалі $St = 0.05$ і 0.13 , відповідно. Низька частота обумовлена частотою викидів великомасштабних вихрових структур назовні з лунки, а частота $\omega^* \approx 0.8$ відповідає частоті обертання циркуляційної течії, яка формується усередині лунки. У придонній області заглиблення підвищені рівні пульсацій швидкості реєструються на частоті $\omega^* \approx 3$, якій відповідає число Струхалі 0.48. Цей частотний діапазон зміни пульсацій швидкості поблизу дна заглиблення обумовлений частотою взаємодії вихрових структур зсувного шару з кормовою стінкою. Вихрові структури

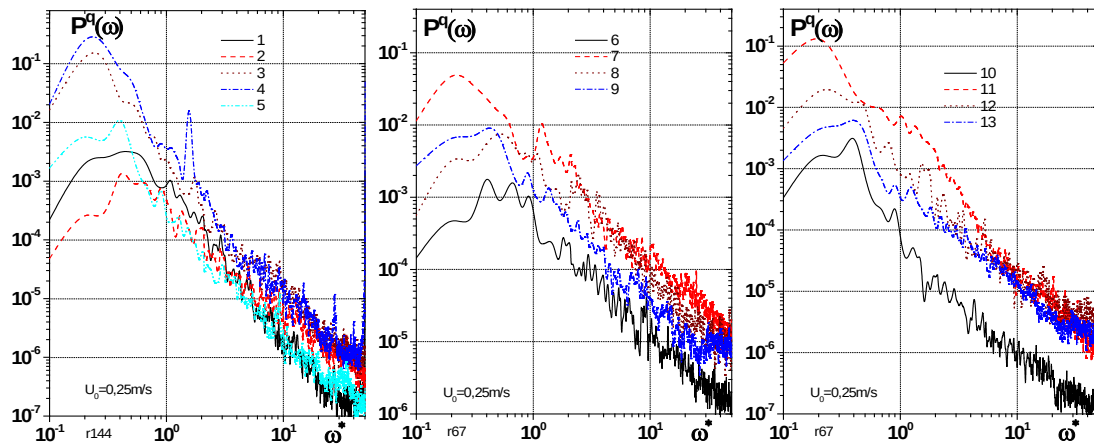


Рис. 4

зсувного шару, які взаємодіють з кормовою стінкою лунки, породжують струменеву течію, яку спрямовано назустріч потоку вздовж дна лунки, що викликає осциляції поля швидкостей у цій області з частотою взаємодії.

Результати вимірювань спектральних густин потужності пульсацій поздовжньої швидкості у ближньому сліді овальної лунки (серединний перетин) показані на рис. 3б. Ці криві пульсацій швидкості зареєстровані у примежовому шарі над датчиком пристінних пульсацій тиску № 4 (див. рис. 1а). Координати місця розташування плівкового термоанемометра є наступними $x/d=0.7$; $y/d=(0.05\dots0.3)$ і $z/d=0$. Треба відмітити, що пульсації швидкості позаду лунки (безпосередньо за її кормовою кромкою) виросли у (4...5) разів відносно непорушеного примежового шару і над самим локальним заглибленням. При цьому найменші рівні пульсацій поздовжньої швидкості спостерігаються над центром лунки, що вказує на відповідний вплив локального заглиблення на примежовий шар над плоскою поверхнею. Наявність викидів вихрових структур з частотою (0.3...2) Гц або $\omega^*=(0.3\dots2)$ призводить до підйому спектральних рівнів на цих частотах, особливо у пристінній області примежового шару у ближньому сліді заглиблення. Наряду з цим, низькочастотні викиди $\omega^* \approx 1$ мають максимальну інтенсивність на віддаленні $y/d=(0.1\dots0.125)$. У цьому місці інтенсивність пульсацій поздовжньої швидкості у пристінній області примежового шару у (3...4) рази вище, ніж на його зовнішній межі у частотному діапазоні $0.2 < \omega^* < 10$.

Спектральні густини потужностей пульсацій пристінного тиску виміряні усередині овальної лунки та в її сліді наведені на рис. 4. Тут номери кривих співпадають з номерами датчиків, які представлено на схемі їх розташування (рис. 1а). Результати виміряні для швидкості обтікання 0.25 м/с і розташування овальної лунки під кутом 60° відносно напрямку потоку. Нормування даних проводилось швидкісним напором ($q = \rho U^2 / 2$) та зовнішніми змінними, а саме, діаметром овальної лунки та швидкістю потоку ($p^q(\omega) = p^2(\omega)U / (q^2 d)$). Частота нормувалася, як $\omega^* = 2\pi f d / U$.

У відповідності з наведеними результатами максимальна інтенсивність спектральних залежностей пульсацій пристінного тиску спостерігається позаду овальної лунки в її ближньому сліді, що показано кривою 4 на рис. 4а. В цій області течії максимальні рівні пульсацій пристінного тиску спостерігаються на частотах $\omega^*=(0.23\dots0.25)$ та $\omega^* \approx 1.3$, яким відповідають числа Струхалі $St \approx 0.04$ та 0.21. Для цього режиму обтікання рівні спектральних густин, які спостерігаються на кормовій стінці, в

області низьких частот тільки у два рази менші, ніж у ближньому сліді лунки, на відміну від ламінарної течії, де різниця складала майже порядок [6]. У середині овальної лунки (на її дні) інтенсивність пульсацій пристінного тиску суттєво нижче, особливо в області низьких частот (див., криві 2 і 4 на рис. 4а). На віддаленні від обтічного заглиблення спектральні характеристики, поміряні датчиком № 5 і зареєстровані перед лункою, майже подібні, що характеризує ступінь відновлення примежового шару від дії вихрових структур, які генеруються овальною лункою. Але повного відновлення примежового шару на відстані $x=1.3d$, де розташовано датчик № 5, ще не відбулося, що пересвідчує різниця у спектральних рівнях в області низьких частот для кривих 1 та 5.

З нормуванням спектральних густин потужності пульсацій пристінного тиску їх середніми значеннями квадратів витікало [6], що на відміну від непорушеного примежового шару на дні овальної лунки превалюють високочастотні пульсації, а низькочастотні пульсації вносять менший вклад у загальну енергію поля пульсацій тиску. У ближньому сліді овальної лунки в її серединному перетині найбільше інтенсивними є низькочастотні пульсації тиску, а вклад високочастотних компонент менший, ніж у спектрі пульсацій пристінного тиску перед овальною лункою. На кормовій стінці лунки і особливо у її дальньому сліді частотне наповнення спектральних залежностей близьке одне до одного.

На відміну від ламінарного режиму течії овального заглиблення, де максимальна інтенсивність пульсацій пристінного тиску спостерігалася у ближньому сліді лунки позаду її кормової сферичної частини [6], у досліджуваному режимі течії максимальна інтенсивність пульсацій тиску має місце на кормовій стінці сферичної частини лунки, що показано на рис. 4б. Мінімальні рівні спектральних густин потужності пульсацій пристінного тиску спостерігаються на дні кормової сферичної частини лунки у всьому досліджуваному діапазоні частот. Позаду лунки інтенсивність пульсацій тиску росте, що проілюстровано на рис. 4б. Наповнення спектральних залежностей частотними складовими залишається майже незмінним вздовж перетину, який проходить через кормову сферичну частину лунки, за винятком області взаємодії вихрових структур зсувного шару з кормою стінкою, де превалюють низькочастотні пульсації.

Зміни спектральних залежностей пульсацій пристінного тиску уздовж перетину, що проходить через передню за потоком сферичну частину овальної лунки і має поперечну координату $z/d=-0.5$, для швидкості потоку 0.25 м/с показано на рис. 4в. У перетині, що проходить через передню сферичну частину овального заглиблення, максимальні спектральні рівні пульсацій пристінного тиску спостерігаються на кормовій стінці лунки (див. криву 11 на рис. 4в). Разом з цим, інтенсивність пульсацій тиску в області високих частот, практично, однакова на кормовій стінці і позаду неї. На дні передньої сферичної частини лунки рівні спектральних густин потужності пульсацій пристінного тиску суттєво нижчі, ніж у других вимірювальних точках на цьому бічному перетині лунки. Енергія поля пульсацій тиску на поверхні лунки та позаду неї більш насичена високочастотними спектральними компонентами у дальньому сліді лунки і низькочастотними компонентами на кормовій стінці, через взаємодію вихрових структур зсувного шару з останньою.

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано і використано методику проведення експериментальних робіт за допомогою візуальних та інструментальних методів дослідження просторово-

часових та інтегральних характеристик примежового шару і вихрового руху під час обтікання поверхонь із неоднорідностями.

2. Отримано візуальні картини вихрових течій, які утворюються усередині овальної лунки, та визначено характерні особливості вихроутворення. Для перехідного режиму течії усередині лунки формуються веретеноподібні та смерчоподібні вихори. Ці вихори, досягаючи масштабів лунок, викидаються назовні з овальних лунок, порушуючи структуру примежового шару та утворюючи високочастотні викиди дрібномасштабних вихорів.
3. Показано, що інтенсивність поля пульсацій швидкості має максимальні значення поблизу обтічної поверхні, а також на межі зсувного шару в отворі овальної лунки. Інтенсивність поля пульсацій пристінного тиску найбільша в області взаємодії вихрових структур зсувного шару та великомасштабних вихрових систем, що викидаються назовні з лунки, з кормовою стінкою овальної лунки. Найменша інтенсивність пульсацій пристінного тиску має місце на дні лунки в її передній за потоком сферичній частині.
4. Установлено, що в спектрах пульсацій швидкості та тиску спостерігаються тональні компоненти, які обумовлені частотою викидів великомасштабних вихрових структур назовні з лунки ($\omega^* \approx (0.2...0.3)$), частотою обертання циркуляційної течії, яка формується усередині овальної лунки ($\omega^* \approx (0.8...1.3)$) та частотою автоколивань вихрових структур зсувного шару та їх взаємодії з кормовою стінкою лунки ($\omega^* \approx (2...3)$).

ЛІТЕРАТУРА

1. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). – К.: ИТТФ НАНУ, 2005. – 76 с.
2. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Корнев Н. В. Численное моделирование смерчевого теплообмена при обтекании поверхностей с лунками (состояние и перспективы) // VI Минский межд. форум по теплообмену, ММФ 2008. – Минск (Беларусь). – 2008. – С. 1–9.
3. 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**, № 4. – P. 709–722.
5. Turnow J., Kornev N., Isaev S., Hassel E. Vortex mechanism of heat transfer enhancement in a channel with spherical and oval dimples // Heat Mass Transfer. – 2011. – **47**, № 3. – P. 301–313.
6. Воропаев Г. А., Воскобойник В. А., Воскобойник А. В., Исаев С. А. Визуализация ламинарного обтекания овального углубления // Прикл. гідромех. – 2009. – **11**, № 4. – С. 31–46.
7. Воскобойник В. А. Пульсации пристеночного давления в низкоскоростном потоке вблизи овального углубления // Акуст. вісн. – 2009. – **12**, № 2. – С. 3–15.
8. Кикнадзе Г. И., Гачечиладзе И. А., Алексеев В. А. Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация тепломассообмена, сопровождающая это явление. – М.: 2005. – 82 с.
9. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных – М. : Мир, 1989. – 540 с.