

## ВПЛИВ НАПІВЦИЛІНДРИЧНОЇ КАНАВКИ НА ІНТЕГРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИМЕЖОВОГО ШАРУ НАД ПЛАСТИНОЮ

Turick<sup>1</sup> V., Voskoboinick<sup>2</sup> V., Voskoboinick<sup>2</sup> A.

1-The National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine ([Turick46@gmail.com](mailto:Turick46@gmail.com));

2-The National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

### INFLUENCE OF SEMICYLINDRICAL CAVITY ON INTEGRAL CHARACTERISTICS OF WALL BOUNDARY LAYER

*Наведено експериментальні дослідження з вивчення характеристик примежового шару над плоскою пластиною з напівциліндричною канавкою, яка обтікається поперечним потоком. Встановлено, що формування вихрового руху усередині заглиблення суттєво впливає на профілі поздовжньої швидкості у примежовому шарі, на товщину витіснення, товщину втрати імпульсу та формпараметр. Обрана методика дослідження робить достатньо інформативними дані, що отримані використанням однопиткового датчика термоанемометра. Виявлений характер змін інтегральних характеристик примежового шару перед заглибленням, над ним та за ним відображає вплив дисипативних та інерційних ефектів на структуру течії як уверх проти потоку, так і за ним, а також дозволяє визначити зони розташування когерентних вихрових структур в порожнині канавки, оцінити умови та, частково, природу їх виникнення*

*Ключові слова:* примежовий шар, канавка, дефекти швидкостей, товщини витіснення та втрати імпульсу, формпараметр, когерентні вихрові структури

#### Вступ

Обтікання поверхонь із западинами різних форм та розмірів повсякчас зустрічається на практиці. Заглиблення та порожнини конструктивного або випадкового походження присутні на поверхнях багатьох технічних виробів, в яких використовуються різноманітні технологічні процеси із застосуванням внутрішньої і зовнішньої течії рідини. У заглибленнях формується складний вихровий рух залежно від режимів обтікання та геометричних параметрів неоднорідності поверхні. Вихори періодично займають увесь об'єм заглиблення, після чого, за відповідних умов, викидаються у потік, що набігає. Це призводить до зміни структури примежового шару, утвореного на обтічній поверхні. З передньої кромки заглиблення відбувається відрив примежового шару (для досить великих швидкостей потоку) та його взаємодія з задньою (кормовою) частиною заглиблення. В результаті чого частина рідини проникає усередину заглиблення, виникає циркуляційний рух, який породжує великомасштабні вихрові системи та дрібномасштабні вихори, кількість яких збільшується із зростанням швидкості обтікання [1–4]. У ряді випадків ці вихрові системи застосовуються для цілеспрямованої дії на структуру течії над обтічною поверхнею. Вивчення та керування вихровим рухом у неглибоких та глибоких локальних заглибленнях, до яких відносяться напівциліндричні заглиблення, а також раціональне їх використання є визначальними під час проектування енергозберігаючих технологій у теплоенергетиці та комплексів, що зменшують опір в аеро- і гідродинаміці [5–7].

Один з актуальних напрямів у сучасній аеромеханіці пов'язаний з керуванням потоками за допомогою виступів або заглиблень різноманітної геометрії та масштабу [8, 9]. Геометрія задньої кромки формує відповідні умови приєднання потоку до поверхні, та, відповідальна за високу інтенсивність пульсуючої течії. Як відомо [10 – 12], наявність неоднорідності обтічної поверхні у вигляді опуклості або увігнутості (заглиблення) призводить до зміни характеристик потоку, що набігає, а також його дії на саму обтічну поверхню. Це призводить до зміни опору таких поверхонь, тепло- й масопереносу, аерогідродинамічних та акустичних шумів і вібрацій обтічних конструкцій, та ряду інших характеристик об'єктів, які рухаються у рідині чи газі [3, 13, 14].

#### Постановка задачі

Незважаючи на інтенсивний розвиток чисельних методів, ключову роль у дослідженні складних турбулентних вихрових течій грає експеримент. Найчастіше нові теоретичні положення та гіпотези будуються саме на основі отриманої в експериментах інформації. У зв'язку з цим, в представленій роботі ставиться

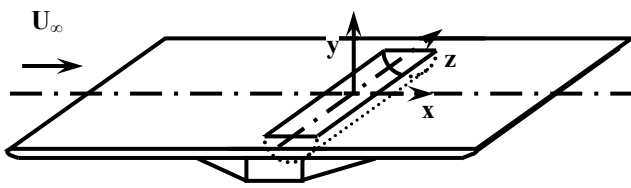


Рис. 1. Схема розташування канавки на пластині та система координат

завдання експериментально дослідити вплив локальної поперечно обтічної напівциліндричної канавки на інтегральні характеристики прилеглої поверхні над плоскою пластинною для різних режимів обтікання. Водночас реалізація цього завдання передбачає апробацію такої методики обробки експериментальних даних, яка б дозволила за допомогою одноститкового датчика термоанемометра отримати максимально інформативні результати з особливості складної течії у прилеглому шарі на пластині перед заглибленням, безпосередньо над ним і у ближньому сліді за заглибленням.

**Експериментальна установка**

Для проведення досліджень вихрового руху в заглибленнях, зокрема у вигляді поперечно розташованого напівциліндра радіуса  $R=9,25 \cdot 10^{-3}$  м та завдовжки 0,08 м, зробленому на поверхні плоскої пластини (рис. 1), співробітниками НТУУ «КПІ» та ІГМ НАНУ був створений спеціальний аеродинамічний стенд [15, 16]. Основу стенда складає аеродинамічна труба відкритого типу, що працює на всмоктування повітря, яке заповнює лабораторне приміщення. Робоча ділянка труби – це прозора циліндрична вставка з оргскла з внутрішнім діаметром  $d_0=0,102$  м і завдовжки близько 0,7 м. Перед робочою ділянкою розташовувалася вхідна ділянка завдовжки майже 0,4 м і діаметром  $d_0=0,102$  м.

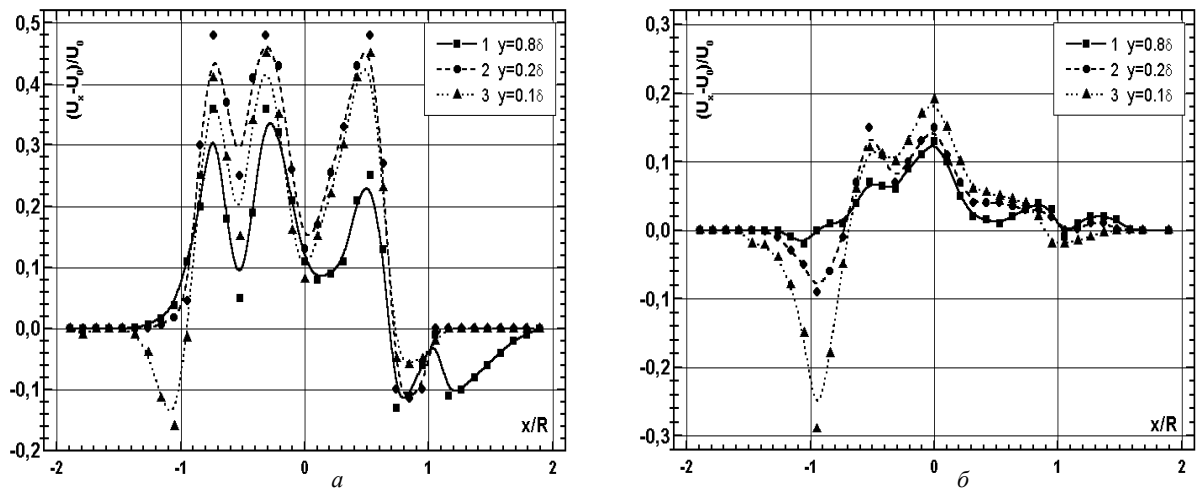


Рис. 2. Дефекти поздовжніх середніх швидкостей вздовж перерізу прилеглої поверхні над пластинною з напівциліндричним заглибленням: а –  $U_\infty=1,11$  м/с; б –  $U_\infty=10,1$  м/с

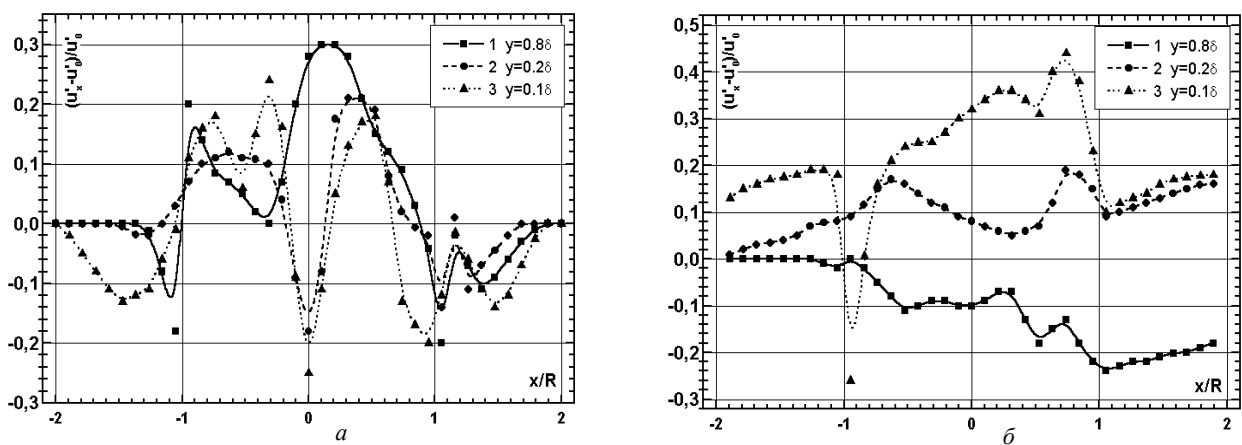


Рис. 3. Дефекти поздовжніх пульсацій швидкостей вздовж перерізу прилеглої поверхні над пластинною з напівциліндричним заглибленням: а –  $U_\infty=1,11$  м/с; б –  $U_\infty=10,1$  м/с

Вона закінчувалася повітрязабірником завдовжки близько 0,1 м, спрофільованим за законом лемніскати, щоб забезпечити безвідривний вхід повітряного потоку з досить рівномірними профілями швидкості та тиску. Гідравлічно гладку пластину завдовжки 0,635 м та завширшки 0,1 м із заглибленням було змонтовано у горизонтальному осьовому перерізі робочої ділянки аеродинамічної труби. Носова та кормова частини пластини, для забезпечення їх безвідривного обтікання, були загострені. Вимірювання проводилися уздовж осьового перерізу пластини ( $z=0$ ) при швидкостях незбуреного потоку, що набігає,  $U_\infty=(1,11\dots 10,1)$  м/с, числа Рейнольдса  $Re_\infty=U_\infty x/\nu=(0,373\dots 3,4)\cdot 10^5$  та, відповідно, відносних товщинах примежового шару перед лункою  $\delta/d=(0,734\dots 0,243)$ , де  $x=504,75\cdot 10^{-3}$  м – відстань від передньої кромки пластини до передньої кромки заглиблення,  $d=2R$ . Товщина примежового шару  $\delta$  визначалась як відстань по нормалі до пластини, на якій місцева середня швидкість складала  $0,95 U_\infty$ . Методично дослідження починалися з проведення візуалізації потоку як у заглибленні, так і в його околі. Згодом проводилися інструментальні вимірювання з визначенням кількісних параметрів течії у характерних областях, де вихровий рух середовища виразно простежується.

Інструментальні дослідження за допомогою дротяних однопроводних термоанемометрів постійної температури дозволили отримати інтегральні та спектральні характеристики поля швидкості і завихреності у примежовому шарі над плоскою пластинною, а також над напівциліндричним заглибленням. В даній роботі основна увага приділяється кінематичним та інтегральним характеристикам течії. Похибка вимірювань інтегральних величин не перевищувала 10 % з надійністю 95 %.

### Результати вимірювань та їх аналіз

Вплив локального поперечно обтічного напівциліндричного заглиблення на зміни профілів швидкостей примежового шару на пластині показаний на рис. 2 та 3. Тут представлені розподіли дефектів швидкостей для поздовжньої складової швидкості у вигляді  $(U_x-U_0)/U_0$  (для усереднених за часом значень  $U_x$  (рис. 2)) та  $(u'_x-u'_0)/u'_0$  (для середньоквадратичних значень пульсаційної складової поздовжньої швидкості  $\sqrt{u'^2}$ , що надалі позначаються через  $u'$  (рис. 3)) в залежності від відносної відстані  $x/R$  від центру канавки;  $U_0$  та  $u'_0$  – усереднена за часом величина поздовжньої швидкості та середньоквадратичне значення пульсацій швидкості в місці розташування  $x=-7R$  вище за потоком від заглиблення на зовнішній межі примежового шару;  $R$  – радіус канавки. Криві 1 відображають дані для зовнішньої області примежового шару в перерізі, паралельному площині пластини на віддаленні по нормалі від стінки  $y=0,8\delta$ , де  $\delta$  – товщина примежового шару перед переднім зрізом заглиблення ( $x=-R$ ). Криві 2 – для інерційної області або для зовнішньої межі логарифмічної області  $y=0,2\delta$ , а криві 3 – для внутрішньої або пристінної області примежового шару  $y=0,1\delta$ .

При малій швидкості обтікання  $U_\infty=1,11$  м/с спостерігається прискорення потоку над канавкою аж до кормової її частини, за винятком пристінної області, де перед канавкою середня поздовжня швидкість знизилася, течія загальмувалася, що було зафіксовано під час аналізу швидкостей над напівциліндричним заглибленням [15]. Мінімальне значення поздовжньої швидкості в цьому перерізі примежового шару спостерігається при  $x=-1,08R$ . Практично над усією канавкою, а точніше на 85 % її площі, потік прискорюється в досліджуваних перерізах примежового шару, причому не рівномірно, а за деяким квазігармонійним законом. У носовій частині заглиблення виявлено дві зони максимуму прискорення течії для  $x=-0,32R$  та  $-0,76R$ , а у кормовій – одна для  $x=0,5R$ . Над кормовою частиною канавки і безпосередньо за нею до  $x=1,08R$  в усіх трьох перерізах примежового шару спостерігається гальмування потоку, а на зовнішній межі шару є ще одна область гальмування з максимумом при  $x=1,2R$ . Відповідно до результатів, представлених на рис. 2а, найбільші прискорення потоку над заглибленням спостерігаються в логарифмічній області примежового шару ( $y=0,2\delta$ ), а найменші – в його зовнішній області. Найбільше ж гальмування виявлене у передній частині канавки у внутрішній області примежового шару, а у кормовій частині – в зовнішній його області. Таким чином, при малій швидкості обтікання  $U_\infty=1,11$  м/с в напівциліндричній каверні існує три відносно сталі області низькошвидкісної циркуляційної течії, що сформовані, головним чином, в придонній та кормовій частинах заглиблення.

Високошвидкісна течія спостерігається у напрямку від кормової стінки заглиблення вздовж придонної поверхні до точки відриву примежового шару. Замикається ця циркуляційна течія об'єднанням із нижньою межею шару змішування, який взаємодіє, у свою чергу, з кормовою стінкою заглиблення. Отримана картина течії у заглибленні добре узгоджується з даними роботи [17].

Зі збільшенням швидкості обтікання вплив заглиблення на профіль швидкості дещо змінюється. Якісна картина течії залишається у чомусь схожою на попередню: в цьому випадку також спостерігаються зони прискорення та гальмування потоку. Але тепер кінетична енергія взаємодії потоку, що набігає, з кормовим краєм заглиблення значно збільшується, оскільки вона пропорційна квадрату середньої швидкості; циркуляційна область також формується з більш високою швидкістю завдяки відповідному зворотному потоку. Тому геометричні та кінематичні характеристики зазначених зон відрізняються іншими параметрами.

Необхідно відмітити, що максимальні амплітуди змін дефектів швидкостей області прискорення при  $U_\infty=10,1$  м/с (рис. 2б) значно зменшилися та змістилися ближче до кормової частини канавки. При цьому, найбільші значення прискорення спостерігаються у внутрішній області примежового шару і максимум

прискорення виявлений при  $x=0$ , тобто над віссю напівциліндричного заглиблення. Області гальмування у кормовій частині канавки практично немає, в межах точності вимірювань, та середні значення поздовжньої складової швидкості в усьому перерізі примежового шару за канавкою виходять на рівень незбуреного примежового шару ( $x=-7R$ ). У передній частині заглиблення, відразу ж за точкою відриву, проявляється різке гальмування потоку (до 30 % швидкості в пристінній області та до 10 % в логарифмічній). Зона гальмування у внутрішній області примежового шару тягнеться від  $x=-1,5R$  до  $-0,7R$ , тобто охоплює майже 15 % площі над канавкою. Слід зазначити, що область прискорення займає площу над заглибленням майже 85 %. Але, якщо у разі малої швидкості обтікання  $U_\infty=1,11$  м/с область прискорення була зміщена в носову частину заглиблення, з наявністю зони гальмування, головним чином, у кормі, то для  $U_\infty=10,1$  м/с зона гальмування змістилася в область відриву примежового шару.

Пульсаційні складові поздовжньої швидкості поводяться трохи інакше, ніж її середні значення, що проілюстровано на рис. 3а та 3б. При  $U_\infty=1,11$  м/с перед заглибленням зареєстровані знижені рівні пульсацій швидкості не лише в пристінній області, а й вздовж усього перерізу примежового шару. Над поверхнею заглиблення пульсації зросли у зовнішній області примежового шару так само, як і усереднені значення, із зонами підвищення та зниження пульсацій, що чергуються, в напрямку  $x$ . При цьому, в області відриву примежового шару можна відмітити високий позитивний градієнт  $\partial \bar{u}'/\partial x$  на зовнішній межі примежового шару. У внутрішній та логарифмічній областях, аналогічно до середніх значень швидкостей (рис. 2а), позитивний приріст пульсацій швидкості спостерігається до  $x=0,76R$ , але в районі осьового перерізу канавки зареєстровані значні рівні зниження пульсацій швидкості відносно умов незбуреного примежового шару (до (20÷25) %). Крім того, максимальні значення зростання пульсацій швидкості відбуваються при тих самих поздовжніх координатах, що і значення прискорень середньої швидкості по всьому перерізу примежового шару. В кормовій частині канавки, де має місце взаємодія потоку, що набігає, із задньою поверхнею заглиблення, спостерігається пониження рівнів пульсацій швидкості, особливо для внутрішньої області примежового шару. Для зовнішньої та інерційної області максимальний прояв цього зниження відзначається вже за межами заглиблення (місце розташування, де значення дефекту середньої швидкості дорівнює нулю вздовж усього перерізу примежового шару (див. рис. 2а)). При  $x=1,19R$  пульсації поздовжньої швидкості практично досягають значень, які були в незбуреному примежовому шарі у місці розташування  $x=-7R$ . Далі, вниз за потоком, спостерігається наступна і остання хвиля падіння пульсацій швидкості за межами напівциліндричної канавки.

Із зростанням швидкості набігаючого потоку до  $U_\infty=10,1$  м/с в зовнішній області примежового шару виявлено зниження рівнів пульсацій поздовжньої швидкості, причому з наростаючим темпом у кормовій

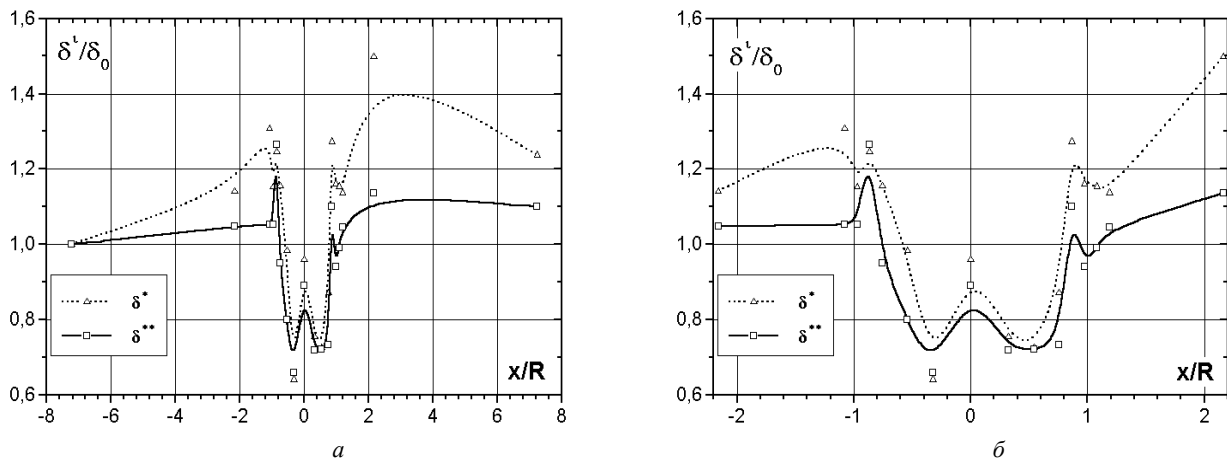


Рис. 4. Товщини витіснення та втрати імпульсу вздовж пластини с поперечно обтічною канавкою для  $U_\infty = 1,11$  м/с

частині заглиблення (рис. 3б). Максимум цього зниження проявляється у безпосередній близькості до кормової стінки канавки, а саме при  $x/R=1,1$ . На відміну від режиму обтікання  $U_\infty=1,11$  м/с (рис. 3а), пульсації швидкості в логарифмічній або інерційній області примежового шару при усіх значеннях  $x/R$ , представлених на рис. 3б, перевищують відповідні значення для незбуреного примежового шару. У пристінній області пульсації також зросли, за винятком області відриву примежового шару, де пульсаційна складова поздовжньої швидкості різко впала, знизившись на 25 % відносно початкового стану при  $x=-7R$ . У інших досліджуваних положеннях вздовж поздовжньої координати, у внутрішній області примежового шару, зафіксовано найбільший приріст пульсацій швидкості, що досягає свого максимуму до 45 % при  $x=0,76R$ . Саме тут спостерігаються локальні екстремуми пульсацій поздовжньої швидкості і для інших двох перерізів примежового шару, представлених на рис. 3б.

Аналіз розподілів зазначених кінематичних параметрів течії, при всій його важливості, не дозволяє повною мірою оцінити динамічні ефекти у примежовому шарі перед, над та поза заглибленням на пластині.

Зміна товщини витіснення  $\delta^*$  та товщини втрати імпульсу  $\delta^{**}$  залежно від відстані уздовж поздовжньої координати  $x/R$  представлена на рис. 4 для  $U_\infty=1,11$  м/с і на рис. 5 для  $U_\infty=10,1$  м/с. Малюнки з літерою (а) відповідають діапазону  $x/R$  від -8 до 8, а на малюнках з літерою (б) були побудовані ті ж криві, але для вузького діапазону  $x/R$  від -2 до 2 – для наочності ефекту впливу заглиблення на примежовий шар. Тут товщини обеззмірені відповідними значеннями, які вони мали в незбуреному примежовому шарі ( $x/R=-7$ ), а саме  $\delta^*/\delta_0^*$  та  $\delta^{**}/\delta_0^{**}$ , відповідно. Як випливає з рис. 4 і 5, товщини витіснення й втрати імпульсу з наближенням до місця розташування канавки мають загальну тенденцію зростання в діапазонах  $x/R$ : від -7,2 до -0,87 для  $\delta^*$  і до -1,2 для  $\delta^{**}$  при мінімальній швидкості, та до -1,5 для обох характеристик для максимальної швидкості. При цьому, темп зростання товщини витіснення домінує, однак при максимальній швидкості незбуреного потоку різниця темпів, цілком природно, нівелюється. Зростання величин  $\delta^*$  та  $\delta^{**}$  з наближенням до каверни (та безпосередньо

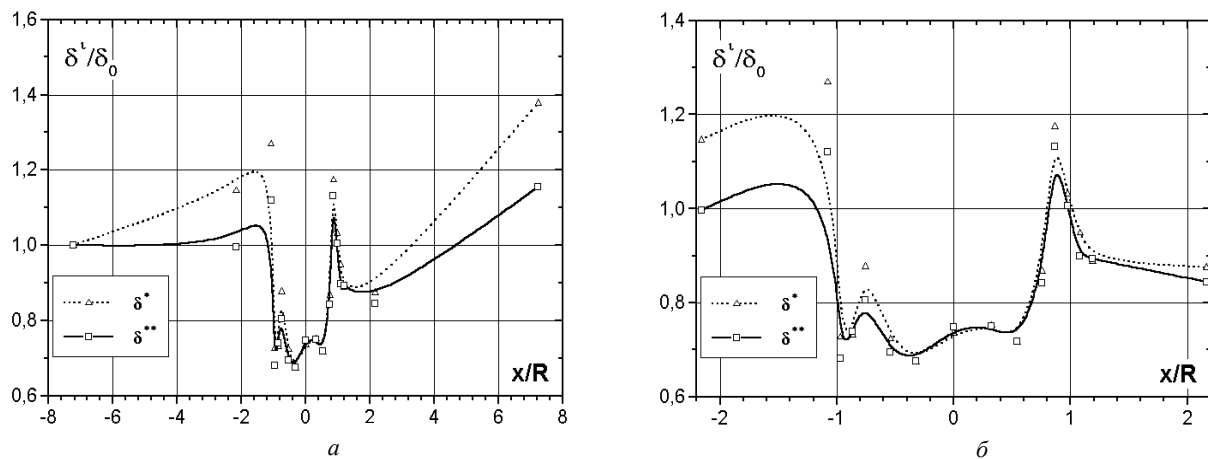


Рис. 5. Товщини витіснення та втрати імпульсу вздовж пластини с поперечно обтічною канавкою для  $U_\infty = 10,1$  м/с

за її передньою кромкою, принаймні, для мінімальної швидкості) свідчить про вплив уверх по потоку дисипативного ефекту «раптового розширення». Пониження верхньої межі діапазону  $x/R$  дії цього ефекту проти напрямку течії при збільшенні її швидкості до максимальної пояснюється зростанням стійкості потоку завдяки посиленню його інерційних властивостей. Потрібно відмітити, що у передвідривній області та відразу ж за точкою відриву ( $x/R=-1,0$ ) на рис. 4б спостерігається деякий локальний мінімум товщини витіснення ( $x/R=-0,97$ ). У цілому ж, при будь-якій швидкості на більшій частині площі перерізу заглиблення, за винятком крайових областей, зафіксовані значні зменшення товщин  $\delta^*$  і  $\delta^{**}$ . Необхідно відмітити, що як товщина витіснення, так і товщина втрати імпульсу визначалися за позитивними значеннями поперечної координати  $y$ , спрямованою по нормалі від обтічної поверхні пластини і над канавкою [18]

$$\delta^* = \int_0^{\infty} (1 - U/U_o) dy \quad \text{та} \quad \delta^{**} = \int_0^{\infty} U/U_o (1 - U/U_o) dy$$

У розрахунках цих товщин верхня межа інтегрування приймалася такою, коли задовольнялася рівність  $U=U_o$ , а саме, при  $y|_{U=U_o}$ , тобто дефект швидкості був відсутній.

Згідно з рис. 4 і 5, в осьовому перерізі заглиблення за передньою кромкою можна відмітити деякий підйом у значеннях обох товщин, що свідчить про вихроутворення в результаті часткового відриву примежового шару, на відміну від профілів середніх та пульсаційних швидкостей, де в цьому перерізі спостерігається їх спад у внутрішній області примежового шару  $y=0,1\delta$ , а також спад середньої швидкості  $u$  для інерційної області або для зовнішньої межі логарифмічної області  $y=0,2\delta$  (див. рис. 2а). Перед кормовою поверхнею канавки, також як і в післявідривній області, з'являється різке зростання товщин, з випереджаючим темпом для товщини витіснення. Це зростання зумовлено ударними явищами при зустрічі шару зміщення з задньою прикормовою стінкою каверни, формуванням зони зворотної течії в ній та з інтенсивною зсувною взаємодією останньої з нижньою частиною шару змішування. За цією областю підйому в околі вихідної крайки заглиблення виявлена невеличка область деякого зниження товщин витіснення та втрати імпульсу: при  $U_\infty=1,1$  м/с — в діапазонах  $x/R$  від 0,87 до 1,0 для  $\delta^{**}$  і до 1,1 для  $\delta^*$ ; при  $U_\infty=10,1$  м/с — в діапазонах  $x/R$  від 0,87 до 2,0 для  $\delta^{**}$  і до 1,6 для  $\delta^*$ . Більш широкий діапазон, до того ж, більш глибокого падіння значень характерних

товщин при максимальній швидкості обтікання пояснюється більш інтенсивним ударом потоку при зустрічі з прикормовою стінкою та, відповідно, локальним зростанням швидкості газу при обтіканні задньої крайки каверни. Далі спостерігається приблизно однаковий для всіх величин  $U_\infty$  інтервал зростання обох товщин вздовж осі ординат: у ближньому сліді (до  $x/R=3,0$ ) при  $U_\infty=1,1$  м/с (див. рис. 4) та у всьому супутньому сліді (принаймні, до  $x/R=7,2$  у межах вимірювань) при  $U_\infty=10,1$  м/с (див. рис. 5). Причина монотонного зростання величин  $\delta^*$  та  $\delta^{**}$  (з більшим темпом для  $\delta^*$ , що природно) у всьому супутньому сліді за каверною при максимальній швидкості полягає в тому, що викинуті з неї вихрові утворення руйнуються швидкісним зовнішнім потоком, що супроводжується інтенсивним перемішуванням, розпадом в результаті турбулентної і молекулярної дифузії і, в результаті, зростанням втрат енергії потоку. Навпаки, при швидкості  $U_\infty=1,11$  м/с, починаючи з координати  $x/R=3,0$ , спостерігається явний спад товщин, особливо, товщини витіснення. Це явище, характерне для обтікання заглиблень з певними співвідношеннями геометричних параметрів при відносно невеликих швидкостях незбуреного потоку, можна пояснити локальним позитивним впливом на аеродинамічний опір сформованих і частково упорядкованих вихрових структур у прилеглому шарі на пластині після їх викидів за межі каверни у супутній потік. У цьому — прояви ефектів, які стимулюють пошуки можливості використання заглиблень різної форми у якості вихрогенераторів для керування процесами масо- і теплообміну в технічних системах [1–9].

Що стосується центральної області напівциліндричного заглиблення, то для всього діапазону варіювання  $U_\infty$  в післявідривної зоні вниз за потоком має місце певна хвилеподібна зміна характерних товщин над основною частиною простору каверни. Але для швидкості потоку, що набігає  $U_\infty=10,1$  м/с, протяжність цієї зони більша, що свідчить про більш складну, насичену вихорами структуру течії в каверні.

На рис. 6 наведено розподіл функції формпараметра  $H_1 = \delta_x^* / \delta_x^{**}$  залежно від безрозмірної поздовжньої координати в тих самих діапазонах зміни  $x/R$ , що й на попередніх ілюстраціях, а саме, при значеннях (-8; 8) та, більш докладно, при (-2; 2). Пунктирні криві відображають поведінку формпараметра при  $U_\infty=1,11$  м/с; суцільні криві – для  $U_\infty=10,1$  м/с. Слід зазначити, що в обох випадках загальний напрямок зміни функції формпараметра  $H_1$  відповідає його зростанню із збільшенням поздовжньої координати в досліджуваному її діапазоні, але з деякими особливостями.

В області, безпосередньо прилеглої до напівциліндричної канавки, формпараметри для швидкостей 1,11 м/с та 10,1 м/с поводяться, в деякому розумінні, узгоджено, а саме: 1) у районі передньої стінки заглиблення спостерігаються мінімуми, а далі – максимуми  $H_1$  при  $x/R=-0,6$  та  $-0,7$  відповідно; 2) в області поздовжньої осі поперечної канавки  $x=0$  маємо майже незмінний стан  $H_1$ , хоча з деякою хвилястістю при малій швидкості; більш регулярний та монотонний характер кривої при загальному незначному падінні  $H_1$  для великій швидкості обтікання заглиблення (див. рис. 6б) обумовлений значно більшою, ніж при мінімальній швидкості, кількістю взаємодіючих вихрових утворень дещо менших масштабів і, отже, більш рівномірним розподілом кількості руху та енергії в результаті взаємного обміну між ними по всьому об'єму каверни; за цих умов проявляється також інтегральний за визначенням характер досліджуваних характеристик, які спроможні відображати лише «усереднені» за простором розподіли параметрів; 3) при збільшенні координати  $x$ , в області взаємодії потоку з задньою стінкою канавки, бачимо подальше зростання значень форм параметра, що корелюється з характером змін величин  $\delta^*$  та  $\delta^{**}$ ;

4) безпосередньо за заглибленням наявне невелике зменшення  $H_1$  (що також корелюється з поведінкою характеристик  $\delta^*$  та  $\delta^{**}$ ), більше виражене для малої швидкості обтікання, з наступним зростанням величин  $H_1$ .

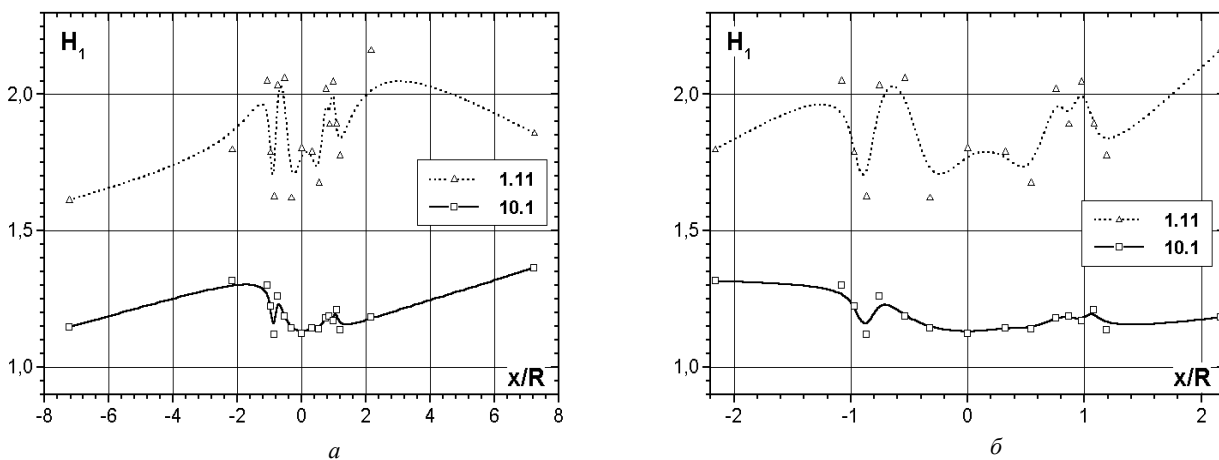


Рис. 6. Зміна формпараметра вздовж пластини с поперечно обтічною напівциліндричною канавкою (числові значення швидкості як параметру на полях графіків мають розмірність м/с)

Відмінність форми кривих  $H_1$  при різних швидкостях обтікання заглиблення свідчить про відмінність топологічних, кінематичних та динамічних особливостей вихрових структур при їх формуванні та взаємодії. Порівняння графіків поведінки характеристик на рис. 2 – 5 та рис. 6 цілком підтверджує доцільність використання для більш детального аналізу картин течії уведеного А.Е. Дьонхофом, Н. Тетервіним і Г.К. Гарнером [18] формпараметра  $H_1$ . Криві його зміни є більш показовими порівняно з розподілами характеристик на рис. 4 та 5, хоча й побудовані на підставі останніх. Дуже чітко розшарування кривих  $H_1$  та зміна їх форми за координатою  $x/R$  в залежності від швидкості обтікання пластини підкреслюють різні умови формування вихрових утворень в каверні при різних величинах  $Re_\infty$ . Для більш докладного дослідження цих умов вивчення поведінки інтегральних характеристик течії вже недостатньо, необхідна окрема постановка досліджень мікроструктури сукупності взаємодіючих вихорів та їх еволюції від зародження до викидів із заглиблення. Згідно з відомими вимірюваннями Г.Б. Шубауера і П.С. Клебанова [18] на пластині,  $H_1$  різко зменшується в області переходу ламінарного примежового шару в турбулентний. Крім того, відомо [18], що формпараметри у наведеній вище формі, або у формі Е. Грушвітца (між якими існує універсальний взаємно-однозначний зв'язок по І. Пречу, що підтверджується вимірюваннями И. Нікурадзе, Е. Грушвітца та А. Келя) можуть розглядатися як своєрідний критерій відриву турбулентного примежового шару з градієнтом тиску на пластині. Незважаючи на інтегральний характер формпараметра, саме ділянки «сплесків» та наступних «провалів» на кривих рис. 6 показують локальні зони як ламінарно-турбулентних переходів у примежовому шарі, так і відриву турбулентного примежового шару в умовах градієнтів тиску у просторі заглиблення та його околі [18]. Чим менше змінюється величина  $H_1$ , тим більший «запас» енергії примежового шару для запобігання його відриву.

Слід додати, що при малої швидкості незбуреного потоку простежується область зниження  $H_1$  у далекому супутньому сліді за заглибленням, подібно до поведінки товщини витіснення (див. рис. 4а), а для більшої швидкості у цьому місці примежового шару спостерігається майже лінійне зростання  $H_1$ , що також узгоджується з рис. 5а, тобто характеристики  $\delta^*$  та  $\delta^{**}$  поводяться приблизно так само. Той факт, що значення формпараметра при  $U_\infty=1,11$  м/с вищі, ніж при  $U_\infty=10,1$  м/с, є цілком природним, оскільки відомо, що для безумовно ламінарного примежового шару на пластині при мінімальній швидкості потоку величина  $H_1$  майже в два рази вища, ніж для турбулентного [18, 19]. Значна відмінність усереднених рівнів значень формпараметра, а також виду функціональних залежностей для  $H_1$  при різних величинах швидкості обтікання пластини з заглибленням чітко вказує на абсолютну невідповідність суттєвої залежності формпараметра від числа Рейнольдса для турбулентного примежового шару в досліджуваному випадку традиційним уявленням про слабку, як вважається, залежність формпараметра від числа  $Re_\infty$  для примежового шару з довільним розподілом швидкості на зовнішній межі [20].

Таким чином, завдяки прийнятій в даній роботі методики дослідження, отримані інтегральні характеристики відображають основні особливості формування вихрових структур у примежовому шарі при обтіканні заглиблення значно детальніше, ніж експериментальні дані попередніх робіт авторів [15–17].

## Висновки

1. Показано, що відносно неглибока поперечно обтічна напівциліндрична канавка на поверхні пластини суттєво впливає на профілі дефектів середньої та пульсаційної складових поздовжньої швидкості, а отже, й на інтегральні характеристики примежового шару як над каверною, так і поблизу неї.

2. Виявлений характер змін товщин витіснення та втрати імпульсу у примежовому шарі на пластині перед заглибленням, над ним та за ним, відображає вплив дисипативних ефектів на структуру течії як уверх проти потоку, так і за ним, дозволяє визначити зони розташування вихрових структур в об'ємі каверни, оцінити умови та, частково, природу їх виникнення. Це стосується також упорядкованих структур, які генеруються заглибленням, викидаються у супутній потік, викликаючи позитивну, з точки зору зменшення аеродинамічного опору, реакцію основної течії.

3. Введення зазначених характеристик примежового шару для аналізу досліджуваної течії дозволило ефективно використати формпараметр як своєрідний критерій ламінарно-турбулентних переходів та відриву турбулентного примежового шару за умов течії в області заглиблення. Виявлено кількісні і якісні зміни формпараметра вздовж поздовжньої координати в функції від швидкості незбуреного потоку, що суттєво відрізняються від традиційних уявлень про слабку залежність цієї характеристики від числа Рейнольдса.

4. Обрана форма аналізу аеродинамічних особливостей течії на пластині поблизу канавки в термінах інтегральних характеристик примежового шару є досить результативною навіть при використанні одностикових датчиків термоанемометра.

5. Отримані результати доповнюють базу даних щодо крайових умов при моделюванні обтікання поверхонь з геометричними неоднорідностями, а також можуть бути корисними при проектуванні таких поверхонь при розробці методів малозатратного керування течіями та процесами масо- і теплопереносу в технічних пристроях.

**Аннотация.** Приведены экспериментальные исследования изучения характеристик пограничного слоя над плоской пластиной с полужидкоцилиндрической канавкой, обтекаемой поперечным потоком. Установлено, что формирование вихревого движения внутри углубления существенно влияет на профили дефектов продольной скорости в пограничном слое, на толщину вытеснения, толщину потери импульса и формпараметр. Выбранная методика исследования делает достаточно информативными данные, полученные с помощью применения однониточного датчика термоанемометра. Обнаруженный характер изменения интегральных характеристик пограничного слоя перед углублением, над ним и за ним отражает влияние диссипативных и инерционных эффектов на структуру течения как вверх против потока, так и вниз по потоку, а также позволяет определить зоны расположения когерентных вихревых структур в полости канавки, оценить условия и, частично, природу их возникновения

**Ключевые слова:** пограничный слой, канавка, дефекты скоростей, толщины вытеснения и потери импульса, формпараметр, когерентные вихревые структуры

**Abstract.** Process control of mass and heat transfer in liquid and gas flows by means of cavities at the streamlined surfaces is one of the most promising ways to save energy in industrial, transport and power units and machines. The cause of this experimental study setting was deficit of information about coherent vortex structures (CVS) formation and emission from the grooves in the wake flow. To obtain this information in this work we investigate the profiles of the defects of the longitudinal velocity, displacement thickness, momentum thickness and shape factor in the boundary layer of air flow in front, above and behind the surface semi-cylindrical indentation on a flat plate. Analysis of these data shows that they reflect the influence of dissipative and inertial effects on the structure of the flow and allow us to determine the location of the CVS zones in the cavity of the groove and to better understand the conditions and nature of their beginning. Quantitative and qualitative changes of shape factor along the longitudinal coordinate as a function of flow velocity are significantly differ from traditional notions about weak dependence of this characteristic from Reynolds number, that is peculiar to flow over the plates and wing profiles without indentations. The proposed organization and implementation of experiments allow to receive sufficiently effective data by using per single hot-wire sensor of thermoanemometer. Pictures of the formation and evolution of the CVS expend complementary to the boundary conditions database for numerical calculations of heat transfer and aerodynamic drag in the flow with small Mach numbers over surface indentations. Results of investigation may be useful in designing of surfaces for aircrafts, ships and ground transports, as well as efficient compact heat exchangers

**Keywords:** boundary layer, boundary conditions, cavity, indentation, velocity defects, displacement thickness, momentum thickness, shape factor, coherent vortex structures

1. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок) / А.А. Халатов – К.: ИТТФ НАН Украины, 2005. – 76 с.
2. Rowley C. W. On self-sustained oscillations in two-dimensional compressible flow over rectangular cavities / C.W. Rowley, T. Colonius, A. Basu // J. Fluid Mech. – 2002. – 455. - P. 315–346.
3. Бабенко В. В. Визуализация обтекания полусферических углублений / В.В. Бабенко, В.П. Мусиенко, В.Н. Турик, Д.Е. Милуков // Прикладна гідромеханіка. – 2010. – 12, № 4. – С. 3–25.
4. Ермишин А. В. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки / Под ред. А.В. Ермишина, С.А. Исаева. – М.: СПб., 2001. – 360 с.
5. Гортышов Ю. Ф. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования / Ю.Ф. Гортышов, И.А. Попов, В.В. Олимпиев, А.В. Щелчков, С.И. Каськов. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.
6. Кикнадзе Г. И. Явление самоорганизации смерчеобразных струй в потоках сплошной среды и технологий на его основе / Г.И. Кикнадзе // Труды XVI Школы- семинара молодых ученых и специалистов под руков. академика РАН А.И.Леонтьева. Санкт-Петербург. В 2 т: Т.2. М.: Изд-ский дом МЭИ, 2007. – С.341–345.
7. Pereira J. C. F. Experimental and numerical investigations in a rectangular cavity / J.C.F. Pereira, J.M.M. Sousa // J. Fluids Eng. – 1995. – 117. – P. 68-74.
8. Савельев А. Д. О влиянии задней кромки каверны на интенсивность пульсаций потока / А.Д. Савельев // Изв. РАН. МЖГ. – 2001. – N 3. – С. 79-89.
9. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика поверхностно-вихревых систем: Украинские исследования / А.А. Халатов // VI Минский Междунар. Форум по Тепломассообмену, ММФ 2008. – Минск, Беларусь, 2008. – С. 1-20.
10. Rockwell D. Vortex-body interactions / D. Rockwell // Annu. Rew. Fluid Mech. – 1998. – 30. – P. 199-229.
11. Воскобійник В. А. Взаємні статистичні характеристики пульсацій швидкості та тиску в напівсферичному заглибленні / В.А. Воскобійник, А.В. Воскобійник // Вісник Донецького Університету, Сер. А: Природничі науки. – 2010. – Вип. 2. С. 64 – 70.
12. Розумнюк Н. В. Мгновенные и осредненные характеристики вязкого потока около прямоугольной каверны / Н.В. Розумнюк // Прикладна гідромеханіка. – 2007. – 9, № 4. – С. 49 – 58.
13. Lin J. –C. Organized oscillations of initially turbulent flow past a cavity / J.–C. Lin, D. Rockwell // AIAA J. – 2001. – 39, N 6. – P. 1139-1151.
14. Коваленко Г.В. Границы режимов течения в углублениях на плоской поверхности, имеющих форму сферических сегментов / Г.В. Коваленко, А.А. Халатов // Прикладна гідромеханіка. – 2008. – 10, № 1. – С. 23–32.
15. Турик В. М. Швидкості у примежовому шарі над пластиною з напівциліндричним заглибленням / В.М. Турик, В.В. Бабенко, В.А. Воскобійник, А.В. Воскобійник // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2008. – № 4. – С. 46-54.
16. Турик В. М. Кінематичні особливості примежового шару поблизу напівциліндричної каверни на пластині / В.М. Турик, В.В. Бабенко, В.А. Воскобійник, А.В. Воскобійник // Вісник НТУУ „КПІ”. – Машинобудування. – 2010. – Вип. 59. – С. 110-117.



17. Турик В.Н. Вихревое движение в полужидкостной канавке на пластине / В.Н. Турик, В.В. Бабенко, В.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник // Промислова гідраліка і пневматика. – 2011. – №3 (33). – С. 23-27.
18. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г.Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
19. Тарасов А. И. Определение граничных условий на торцевых поверхностях межлопастных каналов газовых турбин / А.И. Тарасов, В.Б. Титов, А.А. Гуринов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2008. – № 6. – С. 88-92.
20. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.

## REFERENCES

1. Khalatov A. A. Teploobmen i gidrodinamika okolo poverhnostnyh uglubenij (lunok) [Heat transfer and fluid mechanics over surface indentations (dimples)]. Kiev, ITTF NAN Ukrainy, 2005. 76 p.
2. Rowley C. W., Colonus T., Basu A. Journal of Fluid Mech., 2002, no. 455, pp. 315–346.
3. Babenko V. V., Musienko V. P., Turick V. N., Miljukov D. E. Prikladna gidromehanika, 2010, 12, no. 4, pp. 3–25.
4. Ermishin A. V. Upravlenie obtekaniiem tel s vihrevymi jachejkami v prilozhenii k letatel'nyh apparatam integral'noj komponovki. Pod red. A. V. Ermishina, S. A. Isaeva [Control of surface current with vortical cells applied to flying apparatuses of integral configuration]. Moscow, Saint Petersburg, 2001. 360 p.
5. Gortyshev Ju. F., Popov I. A., Olimp'ev V. V., Shchelchikov A. V., Kas'kov S. I. Teplogidravlicheskaja jeffektivnost' perspektivnyh sposobov intensivifikacii teplotodachi v kanalah teploobmennogo oborudovanija [Heat- and hydraulic efficiency of perspective methods of heat transfer intensity in channels of heat exchangers]. Kazan', Centr innovacionnyh tehnologij, 2009. 531 p.
6. Kiknadze G. I. Trudy XVI Shkoly- seminar molodyh ucheny i specialistov pod rukov. akademika RAN A. I. Leont'eva, Sankt-Peterburg, t. 2. [Proc. XVI School-seminar of young scientists and specialists under RAS academician leadership A. I. Leont'ev, Saint Petersburg, Vol. 2]. Moscow: Izd-skiy dom MEI, 2007, pp. 341–345.
7. Pereira J. C. F., Sousa J. M. M. Journal of Fluids Eng., 1995, no. 117, pp. 68–74.
8. Savel'ev A. D. Izv. RAN. MZhG, 2001, no. 3, pp. 79–89.
9. Khalatov A. A. VI Minskij Mezhdunar. Forum po Teplomassoobmenu, MMF 2008 [Proc. VI Minsk International Heat and Mass Transfer Forum, MMF 2008]. Minsk, Belarus', 2008, pp. 1–20.
10. Rockwell D. Annu. Rev. Fluid Mech., 1998, no. 30, pp. 199–229.
11. Voskobijnik V. A., Voskobijnik A. V. Visnyk Donec'kogo Universitetu, Ser. A: Prirodnihi nauki, 2010, no. 2, pp. 64–70.
12. Rozumnjuk N. V. Prikladna gidromehanika, 2007, 9, no. 4, pp. 49–58.
13. Lin J.-C., Rockwell D. AIAA Journal, 2001, 39, no. 6, pp. 1139–1151.
14. Kovalenko G. V., Khalatov A. A. Prikladna gidromehanika, 2008, 10, no. 1, pp. 23–32.
15. Turick V. M., Babenko V. V., Voskobijnik V. A., Voskobijnik A. V. Naukovi visti NTUU „KPI”, 2008, no. 4, pp. 46–54.
16. Turick V. M., Babenko V. V., Voskobijnik V. A., Voskobijnik A. V. Visnyk NTUU „KPI”, Mashinobuduvannja, 2010, no. 59, pp. 110–117.
17. Turick V. N., Babenko V. V., Voskobijnik V. A., Voskobijnik A. V. Promyslova gidravlika i pnevmatyka, 2011, no. 3 (33), pp. 23–27.
18. Shlihting G. Teorija pogrannichnogo sloja [Theory of Boundary Layer]. Moscow, Nauka, 1974. 712 p.
19. Tarasov A. I., Titov V. B., Gurinov A. A. Visnyk Nacional'nogo tehnicnogo universitetu «KhPI», Energetychni ta teplotehnicni procesy j ustatkuvannja, 2008, no. 6, pp. 88–92.
20. Lojckanskij L. G. Mehanika zhidkosti i gaza [Mechanics of Fluid and Gas]. Moscow, Nauka, 1987. 840 p.