

Применение СППР РВ на базе экспертных систем является помощником для оперативного и правильного принятия решения в критических ситуациях на атомных электростанциях. Так как снятие событий с датчиков блоков происходит только через каждые 4с и отображаются в одном кадре, оператору сложно сконцентрировать свое внимание на изменяющийся процесс, и он будет замечен только тогда, когда сработает предварительная сигнализация и время на решение этой проблемы сократится. Поэтому необходимо интенсивное применение СППР в технологических процессах на таких сложных объектах как АЭС для построения и моделирования систем своевременных подсказок оператору и тем самым увеличения времени выхода из критических ситуаций.

Список литературы

1. Горелик А.Х., Дуэль М.А., Иванисов И.И., Ткач А.И. и др. Разработка и эксплуатация АСУ ТП энергоблоками Запорожской АЭС. – Харьков, 2000. 208с. 32 ил.
2. Трахтенгеру Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. – М.: Наука. 1998.
3. Черноуцкий И.Г. Методы принятия решений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.: ил.
4. Башлыков А.А., Бремеев А.П. Экспертные системы поддержки принятия решений в энергетике / Под ред. А.Ф. Дьякова.- М.: Изд-во МЭИ, 1994.- 216с.
5. Искусственный интеллект: Справочник. В 3 кн. / Под ред. Э.В. Попова, Д.А. Поспелова, В.Н. Захарова, В.Ф. Хорошевского.-М.: Радио и связь. -1990.

УДК 533.6.08:532.574

В. М. Турик¹, канд.техн.наук, доц., В. В. Бабенко², д-р техн. наук, проф., В. А. Воскобійник², канд.техн. наук, ст. навч. спів., А. В. Воскобійник², канд.техн.наук, ст. навч. спів.
1-НТУ України "Київський політехнічний інститут" м. Київ, Україна; 2-Інститут гідромеханіки НАН України

КІНЕМАТИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРИМЕЖОВОГО ШАРУ ПОБЛИЗУ НАПІВЦИЛІНДРИЧНОЇ КАВЕРНИ НА ПЛАСТИНІ

Представлены результаты экспериментальных исследований воздействия поперечно обтекаемого полуцилиндрического углубления на пластине на осредненные и пульсационные составляющие продольной скорости вдоль пластины и над углублением. Исследования выполнены для ламинарного и турбулентного режимов обтекания. Показано, что полуцилиндрическое углубление на плоской поверхности, обтекаемое поперечным потоком, вызывает изменение в структуре пограничного слоя, создавая зоны ускорения и торможения потока над пластиной. При увеличении скорости обтекания значения пульсационных составляющих продольной скорости увеличиваются в пристеночной и логарифмической областях пограничного слоя, а осредненные продольные скорости уменьшаются как над углублением, так и вблизи него по всей толщине пограничного слоя

The results of experimental researches of the influence of cross streamlined semi-cylindrical cavity on the mean and fluctuation longitudinal velocity components along the plate and above the cavity are presented. Investigations are carried out for laminar and turbulent conditions of airflow. It is shown that the cross streamlined semi-cylindrical cavity on the flat surface changes the boundary layer structure, forming the acceleration and stagnation zones of the current above the plate. The longitudinal fluctuation velocity are increased into near-wall and logarithmic regions of the boundary layer with the increase of air-flow velocity but mean longitudinal velocities are decreased both above the cavity and in the vicinity of cavity throughout the boundary layer thickness

1. Вступ

На багатьох тілах, які обтікаються потоком рідини, зустрічаються локальні заглиблення (каверни) різних форм та розмірів. Ці заглиблення можуть бути конструктивного характеру, наприклад: ніші вихлопних труб, дверних ручок, люки або відкриті вікна в автомобілях, збройові ліхтарі та колодязі шасі на літаках, торпедні люки у підводних човнах та западини на корпусах кораблів, вихрогенератори теплообмінних апаратів тощо. Заглиблення можуть бути також випадкового походження – на поверхнях космічних апаратів, що входять в атмосферу та піддаються дії метеоритів, на корпусах надводних та підводних суден у разі стикання з дном або з іншим плаваючим засобом і т. ін. При обтіканні заглиблень з їх передньої кромки, за відповідних умов (числа Рейнольдса, глибини і форми западини), відбувається відрив примежового шару, утвореного на поверхні тіла перед заглибленням. За точкою відриву утворюється шар змішування між рухомою рідиною над заглибленням та рідиною, що була всередині нього у початковий момент часу. Складаючись із вихрових систем, шар змішування ударяється об

кормову частину заглиблення і частково виноситься за межі його вниз за течією над обтічною поверхнею. Інша його частина, іноді відносно велика, рухається усередину заглиблення, утворюючи циркуляційну зону, що складається з одного або декількох великомасштабних вихорів, залежно від співвідношення висоти заглиблення до його ширини та режиму обтікання [1-3]. При наближенні до передньої стінки заглиблення потік рідини циркуляційної зони частково пересувається у вигляді пристінного струменя до відривної області заглиблення, взаємодіючи з початковою ділянкою шару змішування. Решта частини циркуляційної рідини, обмінюючись енергією з нижньою поверхнею шару змішування, спрямовується до кормової стінки заглиблення, замикаючи, таким чином, циркуляційну зону у вигляді великомасштабної циркуляційної вихрової системи [4-6].

В області удару шару змішування та вихрових систем, які утворюються у ньому, об кормову стінку заглиблення виникають значні за рівнем пульсації швидкості, завихреності, тиску та температури, що мають як лінійний, так і нелінійний характер (у переважній більшості випадків) [7-9]. Такі пульсаційні поля створюють аерогідродинамічний шум (в деяких випадках до 160 дБ акустичного рівня) у вигляді акустичного випромінювання, що розповсюджується в навколишнє середовище із швидкістю звуку, та псевдозвукового аерогідродинамічного випромінювання, що переноситься зі швидкістю потоку, який набігає [10, 11]. Геометрія задньої кромки формує відповідні умови приєднання потоку до поверхні та значною мірою визначає інтенсивність пульсацій течії.

Проте наведена інформація багато у чому має якісний характер, є далеко не повною і потребує подальших ретельних досліджень на шляху формування одного з актуальних напрямів сучасної аерогідродинаміки, пов'язаних з керуванням потоками та процесами переносу в них за допомогою геометричних неоднорідностей різноманітної геометрії та масштабів [12, 13].

2. Постановка задачі

Наявність геометричної неоднорідності обтічної поверхні у вигляді угнутості (заглиблення) або опуклості призводить до змін структури і характеристик потоку, а також його взаємодії з поверхнею. Це призводить до зміни опору при обтіканні таких поверхонь, тепло- і масопереносу, аерогідродинамічних і акустичних шумів та вібрацій обтічних конструкцій, а також до зміни ряду інших характеристик, зокрема, літальних апаратів, плаваючих об'єктів тощо [3, 12, 13].

Не дивлячись на інтенсивний розвиток чисельних методів, ключову роль у дослідженні складних турбулентних вихрових течій відіграє експеримент. Найчастіше нові теоретичні положення та гіпотези будуються саме на основі отриманої в експериментах інформації. У зв'язку з цим, у представленій роботі ставиться задача експериментальних досліджень впливу локального напівциліндричного заглиблення, яке обтікається потоком поперек, на інтегральні характеристики примежового шару (усереднені в часі та пульсаційні складові швидкості) за його товщиною та вздовж плоскої пластини при різних режимах обтікання.

3. Експериментальна установка та методика досліджень

Експерименти із вивчення особливостей формування вихрових структур у кавернах для можливості керування когерентними утвореннями у зсувних потоках виконано на спеціально створеній аеродинамічній установці у вигляді аеродинамічної труби відкритого типу (рис. 1) [15]. Аеродинамічна установка була розроблена Туриком В.М. у НТУУ „КПІ” та розміщена у лабораторії ІГМ НАНУ. Деякі види обладнання та пристроїв були виготовлені в ІГМ. Термоанемометрична, лазерна та віброакустична апаратура була також надана ІГМ. У ході дослідження проведені термоанемометричні вимірювання полів швидкості над обтічною плоскою пластиною з напівциліндричним заглибленням, яке розташоване поперек до напрямку набігаючого потоку (рис. 2).

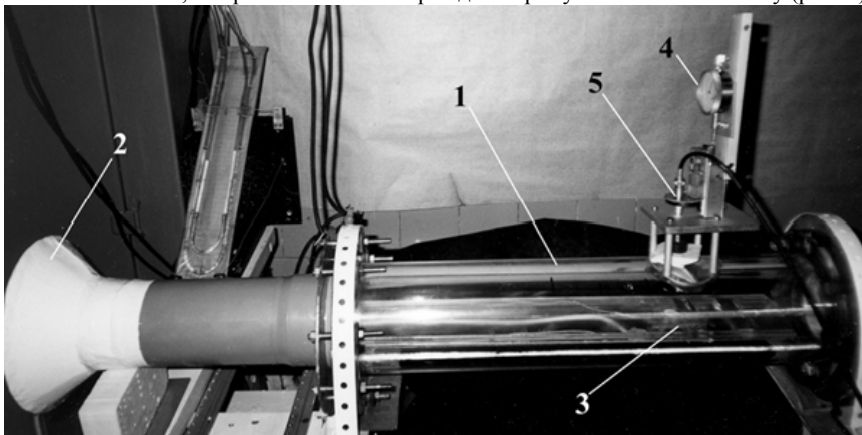


Рис. 1. Робоча ділянка аеродинамічного ствену: 1 – робоча ділянка; 2 – лемнісатне сопло; 3 – пластина із канавкою; 4 – координатний пристрій з мікрометричною голівкою; 5 – державка з термоанемометричним датчиком

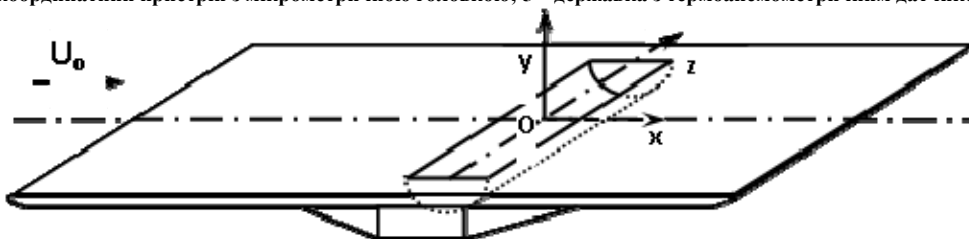


Рис. 2. Схема розташування напівциліндричного заглиблення на поверхні плоскої пластини та система координат, яка використовується

Робоча ділянка труби мала циліндричну форму з внутрішнім діаметром 0,102 м та була зроблена з прозорої труби для проведення візуальних дослідів. Повітря з лабораторного приміщення поступало до труби через конфузорний вхід у вигляді лемніскати Бернуллі для зменшення збурення потоку, створення прийняттого ступеня турбулентності його та прямокутного профілю швидкості на вході до робочої ділянки аеродинамічної труби (див. рис. 1). На виході з робочої ділянки труби за перехідним трубопроводом розміщено відцентровий електровентилятор, який всмоктував повітря через аеродинамічну трубу. Між робочою ділянкою і всмоктувальним трубопроводом вентилятора знаходиться проміжна гумова циліндрична манжета для зменшення вібраційних впливів від електровентилятора. Під час монтажу аеродинамічного стенду усі вузли та системи встановлювалися на вібродемпфуючих та віброізолюючих кріпленнях, амортизаторах, прокладках, у тому числі і багат шарових. При цьому використовувалися як активні (динамічні), так і пасивні методи зменшення акустичних та вібраційних завад. При створенні стенду віброакустичні шуми вимірювалися та була прийнята низка заходів по їх зменшенню та усуненню. Рівні звукового тиску та вібрацій в робочій ділянці труби контролювалися також під час проведення дослідів.

В осьовому перерізі вимірювальної ділянки аеродинамічної труби в її горизонтальній площині, уздовж поздовжньої осі, вмонтовувалася плоска гідравлічно гладка пластина (висота шорсткості її поверхні набагато менша за товщину витіснення примежового шару). Пластина була зроблена з листового органічного скла завтовшки $4 \cdot 10^{-3}$ м. Вона мала ширину, рівну внутрішньому діаметру труби та довжину 0,635 м. Носова та кормова частини пластини, для забезпечення їх безвідривного обтікання, були загострені.

На поверхні пластини, у спеціально зробленій ніші, встановлювався поліуретановий напівциліндр. Він закріплювався у втопленому положенні усередині прямокутного паралелепіпеда (короба), виготовленого з органічного скла. У свою чергу, короб приклеювався до нижньої (неробочої) сторони пластини (див. рис. 2). Поздовжня вісь напівциліндричного заглиблення розташовувалася на відстані 0,5 м від переднього краю пластини перпендикулярно швидкості набігаючого потоку U_0 . Радіус заглиблення складав $R=9,25 \cdot 10^{-3}$ м, а глибина та довжина – $11,5 \cdot 10^{-3}$ м та $81 \cdot 10^{-3}$ м відповідно. Торцеві стінки заглиблення були плоскими і перпендикулярними до поздовжньої осі заглиблення, а поверхня – гідравлічно гладкою.

У верхній частині прозорої вимірювальної ділянки аеродинамічної труби (див., рис. 1) встановлювався координатний пристрій, в якому, за допомогою відповідних державок та вузлів кріплення, фіксувалися термоанемометричні дротяні датчики фірми “DISA Elektronik” (Данія). Координатний пристрій, обладнаний мікрометричними головками, забезпечував лінійні переміщення термоанемометричних датчиків з похибкою $1 \cdot 10^{-5}$ м. Установка датчиків над досліджуваною поверхнею, а також розташування вимірювальної пластини контролювалися за допомогою лазерного променя, який через систему дзеркал та розщиплювачів світлового променя спрямовувався у місця установки пластини або датчика. Це дозволило забезпечити похибку установки вказаних пристроїв, що не перевищує $1 \cdot 10^{-5}$ м. Для зменшення похибки вимірювань термоанемометричною апаратурою в робочій ділянці аеродинамічної труби здійснювалася ізотермічна продувка повітря з наступними параметрами на вході: $t=18^\circ\text{C}$, тиск – атмосферний.

У дослідженнях використовувалися одноститкові дротяні термоанемометричні датчики двох довжин – $1 \cdot 10^{-3}$ і $1,1 \cdot 10^{-3}$ м, та діаметру $5 \cdot 10^{-6}$ м. Співвідношення довжини чутливого елемента до товщини перевершувало 200. Таке співвідношення рекомендується для забезпечення рівномірної тепловіддачі від дроту, що обтікається поперечним потоком, та зменшення впливу струмопровідних ніжок датчика [16]. У вимірюваннях використовувався дріт з двох матеріалів – воластонівського сплаву (90 % вольфраму та 10 % платини) та тугоплавкого чистого вольфраму. Дріт наварювався до торців ніжок термоанемометричного датчику за допомогою точкового зварювання.

Електричні сигнали від дротяних датчиків поступали на комплект термоанемометричної апаратури фірми “DISA Elektronik”, що працює у режимі постійної температури, а з термоанемометричної апаратури — на контрольно-вимірювальну апаратуру (вольтметри, осцилографи, частотоміри) та реєструючу апаратуру (чотирьохканальний вимірювальний магнітофон фірми Брюль і К’ер (Данія)). Зареєстровані електричні сигнали оброблялися на спеціалізованих спектроаналізуючих комплексах та через аналого-цифрові перетворювачі подавалися на персональні комп’ютери. На комп’ютерах за допомогою розроблених програм та методик дані остаточно оброблялися та аналізувалися. За допомогою спеціалізованих графічних редакторів результати досліджень перетворювалися у відповідні залежності, графіки яких будувалися на принтерах та плотерах.

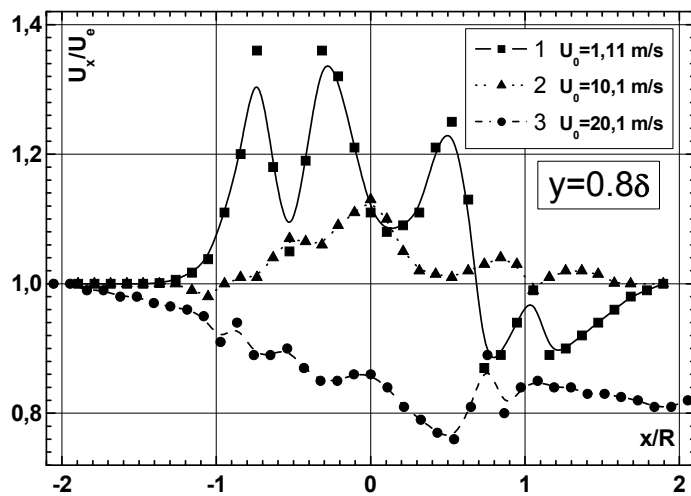
Дротяні датчики термоанемометра калібрувалися та тестувалися перед проведенням дослідів, під час дослідів, а також після закінчення робіт. Це давало можливість контролювати та корегувати калібрувальні залежності щодо параметрів, які реєструються датчиками, під час обробки та аналізу експериментальних даних.

У результаті цих заходів вдалося забезпечити коректні умови проведення експериментальних досліджень та достатньо високу точність і повторюваність результатів. Це дозволило проводити статистичний аналіз отриманих даних, які реєструвалися не менше хвилини протягом одного вимірювання. Ступінь турбулентності набігаючого потоку в місці проведення досліджень на пластині не перевищувала $(3 \div 4) \%$. Рівні акустичного випромінювання у районі заглиблення складали не більше 90 дБ відносно $2 \cdot 10^{-5}$ Па у діапазоні частот $(20 \div 20000)$ Гц. Рівні вібрацій досліджуваної пластини щодо прискорення вільного падіння g були -60 дБ у напрямку x, -55 дБ у напрямку у та -57 дБ у напрямку z. Рівні вібрацій самої вимірювальної ділянки аеродинамічної труби та координатного пристрою не перевищували -55 дБ, відносно g. Усі рівні вібрацій вимірювалися у частотному діапазоні від 2 Гц до 12,5 кГц. Похибка вимірювань осереднених та інтегральних значень кінематичних характеристик не перевищувала 10 % (для довірчого інтервалу 95 % або 2σ).

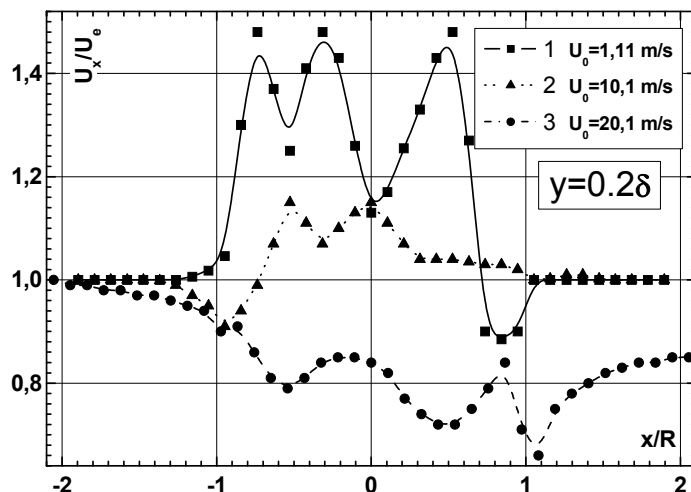
4. Результати вимірювань

Вплив локальної поперечної перешкоди у вигляді напівциліндричної канавки на зміну усереднених та пульсаційних складових швидкості примежового шару над пластиною показаний на рис. 3 та 4. На цих рисунках по осям ординат відкладено безрозмірні величини швидкостей, відповідно у вигляді: місцевих усереднених в часі

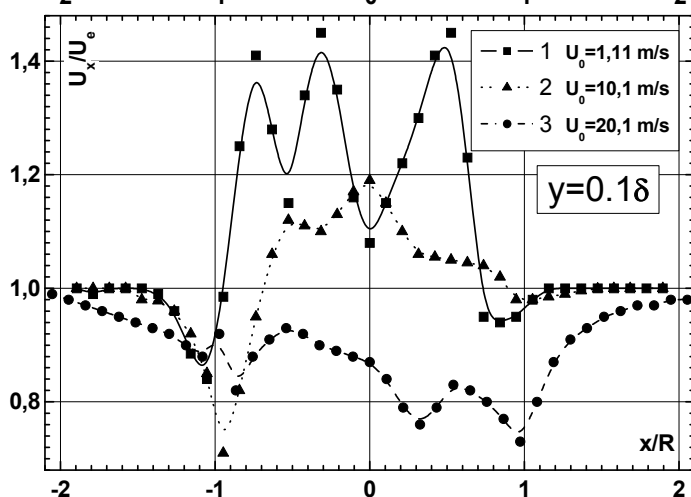
поздовжніх U_x/U_e та місцевих пульсаційних складових \bar{u}'_x/\bar{u}'_e залежно від відстані x/R уздовж пластини із заглибленням, де U_e та \bar{u}'_e - середнє значення поздовжньої швидкості та середньоквадратичне значення пульсацій поздовжньої швидкості у місці розташування $7R$ вище за потоком від заглиблення, де R – радіус канавки. Криві 1, які представлені на рис. 3 та 4, наведено для найменшої досліджуваної швидкості набігаючого потоку $U_0=1,11$ м/с, що відповідає ламінарному режимові обтікання; криві 2 – для швидкості набігаючого потоку $U_0=10,1$ м/с, а криві 3 –



а)



б)



в)

Рис. 3. Зміна осередненої поздовжньої швидкості над пластиною із заглибленням для різних відстаней від поверхні пластини: а) $y=0,8\delta$; б) $y=0,2\delta_{R}$; в) $y=0,1\delta_{R}$

для швидкості набігаючого потоку $U_0=20,1$ м/с (турбулентний режим обтікання). Графіки, позначені літерою (а), є даними для зовнішньої області прилежого шару у перерізі, паралельному площині пластини на відстані від стінки по нормалі $y=0,8\delta_{R}$, де δ_{R} — товщина прилежого шару на передньому зрізі заглиблення, тобто $x=-R$. Літерою (б) позначено графіки для інерційної області або для зовнішньої межі логарифмічної області $y=0,2\delta_{R}$; літерою (в) – для внутрішньої або пристінної області прилежого шару $y=0,1\delta_{R}$.

При малій швидкості обтікання $U_0=1,11$ м/с у зовнішній області прилежого шару (рис. 3а) спостерігається прискорення потоку над канавкою аж до кормової її частини. Практично над всією канавкою, а точніше над 85 % її площі, течія прискорюється, причому не рівномірно, а по деякому квазігармонійному закону. У носовій частині заглиблення виявлено дві зони максимуму прискорення: для $x=-0,3R$ ($U_x=1,36U_0$) та $x=-0,75R$ ($U_x=1,36U_0$), а в кормовій — одна, але менша за амплітудою ($U_x=1,25U_0$) для $x=0,5R$. Над кормовою частиною канавки та безпосередньо за нею до $x=1,08R$ у зовнішній межі прилежого шару спостерігається гальмування потоку з двома зонами гальмування: для $x=0,8R$ та $x=1,2R$ з амплітудами $U_x=0,89U_0$ та $U_x=0,9U_0$ відповідно. Із збільшенням швидкості обтікання вплив заглиблення на профіль швидкості трохи змінюється. Можна відзначити, що амплітуди фази прискорення для $U_0=10,1$ м/с (див. рис. 3а) значно зменшилися та змістилися до осевого перерізу канавки, а максимум прискорення $U_x=1,13U_0$ виявлений над віссю напівциліндричного заглиблення. Області гальмування у кормовій частині заглиблення практично немає, у межах точності вимірювань, а усереднені значення поздовжньої складової швидкості за заглибленням майже відразу виходять на рівень неперушеного прилежого шару ($x=-7R$). Безпосередньо перед заглибленням з'являється невелике гальмування потоку ($U_x=0,98U_0$). Слід також зазначити, що область прискорення займає, по суті справи, одну і ту ж площу над заглибленням

– близько 85 % як для швидкості потоку 1,11 м/с, так і для 10,1 м/с. Для випадку малої швидкості обтікання

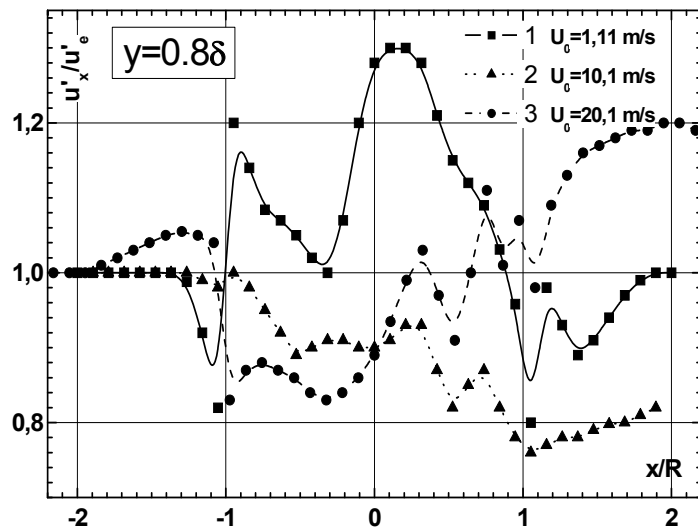
$U_0=1,11$ м/с область прискорення зміщена до носової частини канавки з наявністю зони гальмування, головним чином, у кормі заглиблення. Для швидкості $U_0=10,1$ м/с зона гальмування, навпаки, змістилася в область відриву примежового шару. Із подальшим зростанням швидкості обтікання до 20 м/с можна відзначити значне гальмування потоку, яке виявляється вже на відстані, що перевищує радіус канавки перед її передньою крайкою (див. рис. 3а). В течії над поверхнею заглиблення поздовжні усереднені швидкості поступово спадають з характерними зонами гальмування та прискорення потоку, що чергуються. Найбільше гальмування над заглибленням примежовий шар, що відірвався, отримує в перерізі $x \approx 0,5R$ ($U_x=0,76U_0$). У безпосередній близькості до ударної стінки канавки ($x=0,75R$) спостерігається прискорення потоку ($U_x=0,86U_0$) з наступним його гальмування поблизу задньої стінки. Далі, у сліді канавки спостерігається подальше гальмування потоку, причому, на відміну від режимів обтікання при менших швидкостях, усереднені значення поздовжньої складової швидкості значно менші за величини непорушеного примежового шару в перерізі $x=2,2R$: $U_x=0,83U_0$.

В інерційній області примежового шару спостерігається схожа тенденція поведінки усереднених значень поздовжньої складової швидкості (рис. 3б), але є й деякі відмінності. Для швидкості обтікання $U_0=1,11$ м/с криві на рис. 3а та рис. 3б схожі за своєю формою, але на рис. 3б усі три зони максимуму прискорення, хоч і мають ті ж самі координати, але уже однакові за амплітудами та мають більші значення: $U_x=1,49U_0$. У кормовій області заглиблення та за ним є відмінності: спостерігається тільки одна область гальмування потоку з мінімальним значенням $0,89U_0$ у місці розташування $x=0,8R$, а майже відразу за заглибленням усереднені значення швидкості виходять на рівень непорушеного примежового шару. Для швидкості $U_0=10,1$ м/с значні зміни поведінки осередненої швидкості торкнулися тільки перерізу $x/R < 0$. Так, для $x=0$ спостерігається максимум значень швидкості, але в інерційній області (див. рис. 3б) у перерізі $x=-0,5R$ є ще один максимум з тією ж амплітудою — $U_x=1,15U_0$. Перед заглибленням спостерігається падіння рівнів усередненої швидкості з мінімумом відразу за передньою кромкою канавки до значення $U_x=0,9U_0$. За серединою заглиблення аж до кормової стінки спостерігається поступовий спад швидкості, а за канавкою рівень усередненої швидкості виходить на рівень непорушеного примежового шару. При максимальній досліджуваній швидкості обтікання спостерігається гальмування потоку (див. рис. 3б), аналогічно результатам для зовнішньої області примежового шару (див. рис. 3а). Але з'явилися три яскраво виражені мінімуми: у передній за потоком частині заглиблення — $x \approx -0,5R$, у задній частині — $x=0,5R$, та за ударним краєм заглиблення — $x=1,1R$ із амплітудами, відповідно: $U_x=0,8U_0$, $U_x=0,72U_0$, $U_x=0,66U_0$. Далі, у сліді канавки спостерігається зростання значень усередненої поздовжньої швидкості, у порівнянні із зовнішньою областю примежового шару, у місці розташування $x=2,2R$, а саме: $U_x=0,86U_0$.

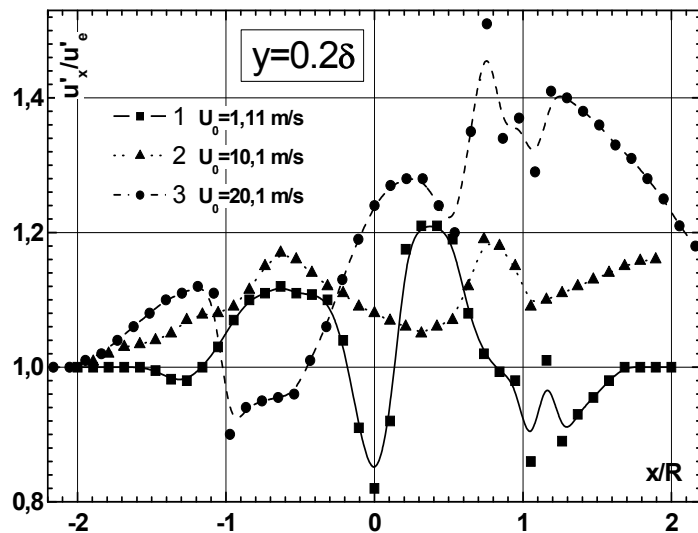
Для внутрішньої області примежового шару (рис. 3в) значення усередненої складової поздовжньої швидкості загалом схожі за своєю формою з результатами, представленими на рис. 3а та рис. 3б, але мають і свої відмінності. Так, для найменшої швидкості обтікання у пристінній області перед заглибленням до перерізу $x=-1,1R$ відбувається різке гальмування потоку до значення $0,84U_0$; це — найнижче значення осередненої швидкості по всій товщині примежового шару, що підтверджує результати роботи [17] про гальмування потоку безпосередньо перед заглибленням. Над заглибленням спостерігається прискорення потоку, з характерними для усього примежового шару трьома максимумами, та невелике гальмування потоку перед кормовою стінкою у перерізі $x=0,8R$ із амплітудою $U_x=0,95U_0$. Відразу за заглибленням, аналогічно до інерційної області примежового шару, значення усереднених швидкостей виходять на рівень непорушеного примежового шару. При збільшенні швидкості обтікання до $U_0=10,1$ м/с графік зміни усереднених значень поздовжньої швидкості (див. рис. 3в) схожий до рис. 3б, за винятком того, що відразу за точкою відриву примежового шару з'являється різке падіння швидкості та досягає свого мінімального значення $0,71U_0$ для усієї товщини примежового шару. Зона гальмування у внутрішній області примежового шару тягнеться від $x=-1,5R$ до $-0,7R$, тобто охоплює майже 15 % площі над заглибленням. Ще однією відмінністю є невелике гальмування в області взаємодії потоку з кормовою кромкою заглиблення та відразу за заглибленням. Для швидкості $U_0=20,1$ м/с, у пристінній області графік усередненої швидкості кардинально не змінився у порівнянні із зовнішньою та інерційною областями. По всій товщині примежового шару відбувається гальмування потоку як перед заглибленням, так і над ним та позаду нього. У внутрішній області перед заглибленням (див. рис. 3в) падіння усередненої швидкості має рівномірний характер, як і для інших областей, але спадає більш різко, досягаючи відразу за передньою крайкою заглиблення $x=-0,9R$ свого мінімуму $U_x=0,82U_0$. У внутрішній області над самим заглибленням спостерігаються три мінімуми осередненої швидкості: у перерізах $x=-0,9R$, $x=0,3R$ та $x=0,95R$ (див. рис. 3в), але з меншими амплітудами у порівнянні з інерційною областю (див. рис. 3б). Відразу за заглибленням має місце зростання осередненої швидкості, а на відстані $x=2,2R$ значення швидкості наближаються до значень непорушеного примежового шару. Таким чином, і для максимальної з досліджуваних швидкостей обтікання у пристінній області відбувається найбільше гальмування потоку перед заглибленням. Це явище обумовлено здебільшого тим, що у заглибленні формуються та періодично викидаються назовні вихрові структури, які гальмують потік в першу чергу у пристінній області заглиблення, а по-друге, початок заглиблення є для пластини своєрідним дифузором, а, як відомо, у дифузорі швидкість зменшується. Тому можна казати про гальмуючу дію заглиблення на профілі усереднених швидкостей у пристінній області примежового шару.

Пульсаційні складові поздовжньої швидкості поведуться інакше, ніж усереднені складові, що проілюстровано на рис. 4. При малій швидкості обтікання у зовнішній області примежового шару (рис. 4а) перед заглибленням з перерізу $x=-1,3R$ спостерігається різке зниження пульсацій швидкості, досягаючи свого мінімального значення $0,82\bar{u}'_x$ у місці розташуванні $x=-1,1R$. Відразу за переднім краєм заглиблення, де виникає відрив примежового шару, спостерігається перший максимум швидкості ($\bar{u}'_x=1,2\bar{u}'_x$), другий максимум має місце у перерізі $x \approx 0,2R$ із значенням $\bar{u}'_x=1,3\bar{u}'_x$. За перерізом $x \approx 0,2R$ відбувається монотонне падіння швидкості до перерізу $x=1,1R$, де пульсаційна складова поздовжньої швидкості має найменше значення $\bar{u}'_x=0,8\bar{u}'_x$, з поступовим виходом у місце розташуванні $x=2R$ до значення пульсаційної складової швидкості у непорушеному примежовому шарі ($x=-7R$). Для більшої швидкості обтікання значення пульсаційної складової швидкості мають інакшу поведінку, ніж для швидкості $U_0=1,11$ м/с (див. рис. 4а). До перерізу $x=-0,9R$ значення швидкості майже не відрізняються від значення у місці

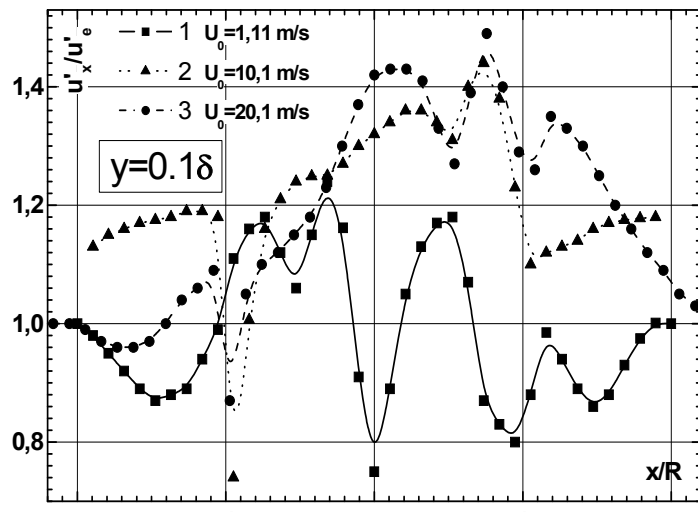
розташування $x=-7R$. У середині заглиблення відбувається падіння пульсаційної швидкості аж за заглиблення до перерізу $x=1,1R$ із значенням $\bar{u}'_x=0,76\bar{u}'_e$. У сліді заглиблення пульсації швидкості трохи зростають, досягаючи



а)



б)



в)

Рис. 4. Зміна пульсаційної поздовжньої швидкості над пластиною із заглибленням для різних відстаней від поверхні пластини:
а) $y=0,8\delta_R$; б) $y=0,2\delta_R$; в) $y=0,1\delta_R$

значення $\bar{u}'_x=0,82\bar{u}'_e$ для $x=1,9R$. При швидкості обтікання $U_0=20,1$ м/с перед заглибленням спостерігається поступове зростання пульсацій швидкості з різким падінням перед передньою крайкою канавки. Відразу за переднім краєм заглиблення має місце мінімум пульсаційної швидкості $\bar{u}'_x=0,82\bar{u}'_e$, а далі — ще один мінімум $\bar{u}'_x=0,83\bar{u}'_e$ для $x=-0,3R$. За другим мінімумом спостерігається поступове зростання швидкості з локальними максимумами $\bar{u}'_x=1,04\bar{u}'_e$ та $\bar{u}'_x=1,12\bar{u}'_e$ у перерізах $x=0,3R$ та $x=0,7R$ відповідно, але зростання продовжується, виходячи у сліді канавки до значення $\bar{u}'_x=1,2\bar{u}'_e$.

В інерційній області примежового шару (рис. 4б) значення пульсацій швидкості відрізняються від аналогічних режимів обтікання для зовнішньої області (див. рис. 4а). Для швидкості обтікання $U_0=1,11$ м/с перед заглибленням спостерігається несуттєве зниження швидкості, а з перерізу $x=-1,3R$ починається зростання швидкості до максимуму $\bar{u}'_x=1,12\bar{u}'_e$ для $x=-0,6R$. У середині заглиблення ($x=0$), як і для усередненої складової поздовжньої швидкості (див. рис. 3б), має місце мінімум пульсаційної складової швидкості із значенням $\bar{u}'_x=0,82\bar{u}'_e$ з подальшим зростанням швидкості до перерізу $x=0,3R$ ($\bar{u}'_x=1,22\bar{u}'_e$). Починаючи з перерізу $x=0,4R$, графік зміни пульсаційної швидкості за своєю формою стає схожим з графіком для зовнішньої області примежового шару (див. рис. 4а): відбувається падіння пульсацій швидкості аж за заглибленням, для $x=1,1R$: $\bar{u}'_x=1,22\bar{u}'_e$, а далі — зростання значень пульсаційної швидкості з виходом на рівень непорушеного примежового шару. Для швидкості обтікання $U_0=10,1$ м/с задовго перед заглибленням ($x=-2R$) спостерігається зростання пульсаційної складової швидкості з виходом на максимальне значення $1,17\bar{u}'_e$ у місці розташування $x=-0,6R$. У кормовій частині заглиблення ($x=0,8R$) спостерігається ще один максимум пульсаційної швидкості $\bar{u}'_x=1,19\bar{u}'_e$ з падінням до перерізу $x=1,1R$ ($\bar{u}'_x=1,12\bar{u}'_e$), за яким пульсації швидкості поступово починають зростати до перерізу $x=1,19R$. Загалом над усією досліджуваною областю $x/R \in (-2; 2)$ можна відзначити загальне збільшення пульсаційної складової швидкості відносно рівня пульсацій швидкості у непорушеному примежовому шарі. При

максимальній швидкості обтікання (див. рис. 4б), аналогічно до зовнішньої області примежового шару (див. рис. 4а), спостерігається зростання пульсаційної складової швидкості перед заглибленням з різким падінням з перерізу $x=-$

1,1R. Відразу за точкою відриву примежового шару з передньої крайки заглиблення $x=-0,95R$ зафіксовано мінімальне значення пульсацій швидкості в інерційній області для цього режиму обтікання: $\bar{u}'_x=0,9\bar{u}'_e$ (див. рис. 4б). Далі над заглибленням спостерігається зростання пульсацій швидкості з максимумами у перерізах $0,2R$ та $0,75R$, відповідно з амплітудами $1,28\bar{u}'_e$ та $1,51\bar{u}'_e$. Останній максимум ($1,51\bar{u}'_e$) — це найбільше значення пульсаційної складової поздовжньої швидкості для усіх досліджуваних швидкостей набігаючого потоку та для усіх трьох областей примежового шару, які розглянуто у представлених дослідах. За цим перерізом пульсації швидкості спадають з локальними підйомами та виходять на рівень $1,18\bar{u}'_e$ у місці розташування $x=2,2R$.

У внутрішній області примежового шару для швидкості $U_0=1,11$ м/с (рис. 4в) можна відмітити уже більш значне падіння пульсаційної складової швидкості на відміну від результатів, представлених на рис. 4б, з мінімумом у перерізі $x=-1,5R$ ($\bar{u}'_x=0,88\bar{u}'_e$). Після цього починається зростання пульсацій швидкості до $x=-0,75R$ ($\bar{u}'_x=1,18\bar{u}'_e$) та ще один максимум для $x=-0,3R$ ($\bar{u}'_x=1,24\bar{u}'_e$). У середині заглиблення ($x=0$) зафіксовано різке падіння пульсаційних складових швидкості з амплітудою $\bar{u}'_x=0,76\bar{u}'_e$; це — найменше значення пульсаційної швидкості у всьому примежовому шарі для швидкості обтікання $1,11$ м/с. За цим мінімумом маємо третє зростання пульсаційної швидкості для $x=0,5R$ з амплітудою $1,18\bar{u}'_e$. Ці три максимуми у своїх перерізах збігаються з максимумами усередненої складової швидкості в усіх трьох областях примежового шару (див. рис. 3). За останнім максимумом настає спадання пульсаційної складової швидкості з мінімальним значенням $\bar{u}'_x=0,8\bar{u}'_e$ поблизу кормової стінки заглиблення ($x=0,9R$)з та виходом на рівень значень пульсаційної складової швидкості у непорушеному примежовому шарі з невеликими за амплітудою сплесками пульсацій швидкості. Для більшої швидкості обтікання $U_0=10,1$ м/с перед заглибленням, починаючи з перерізу $x=-2R$, відмічається суттєве зростання пульсацій поздовжньої швидкості від значень $\bar{u}'_x=1,15\bar{u}'_e$, доходячи до $1,19\bar{u}'_e$ у перерізі $x=1,15R$, з наступним різким падінням пульсацій швидкості за передньою стінкою заглиблення. Так, при $x=-0,9R$ маємо $\bar{u}'_x=1,15\bar{u}'_e$, а це є мінімальне значення пульсаційної складової поздовжньої швидкості у всьому примежовому шарі для усіх досліджуваних швидкостей обтікання. Необхідно нагадати, що саме у цьому місці розташування отримано найменше значення усередненої швидкості (див. рис. 3в). За цим перерізом починається зростання пульсаційної складової швидкості до відстані $x=0,7R$ ($\bar{u}'_x=1,44\bar{u}'_e$). Поблизу кормової стінки та відразу за нею до перерізу $x=1,1R$ спостерігається різке падіння значень пульсаційної складової швидкості до значення $1,1\bar{u}'_e$. У сліді заглиблення спостерігається незначне зростання пульсацій швидкості. Так, для $x=1,9R$ маємо $\bar{u}'_x=1,18\bar{u}'_e$; приблизно такі ж значення були отримані і перед канавкою (див. рис. 4в). При швидкості обтікання $U_0=20,1$ м/с у внутрішній області примежового шару перед заглибленням відмічається невелике падіння пульсаційної складової швидкості до значень $0,96\bar{u}'_e$, а далі — її зростання до значення $1,08\bar{u}'_e$ у перерізі $x=-1,1R$ (див. рис. 4в), на відміну від зовнішньої та інерційної областей (рис. 4а та рис.4б). Далі, аналогічно до перших двох областей, спостерігається падіння пульсацій швидкості до перерізу $x=-0,95R$ з амплітудою $0,87\bar{u}'_e$ та їх зростання до місця розташування $x=0,2R$ ($\bar{u}'_x=1,43\bar{u}'_e$), за яким з'являється ще один максимум при $x=0,75R$ ($\bar{u}'_x=1,49\bar{u}'_e$). За останнім підйомом пульсацій швидкості ($x=0,75R$) починається їх падіння, дуже схоже за своєю формою до падіння в інерційній області примежового шару (див. рис. 4б), з таким же максимумом відразу за заглибленням, але спадання проходить більш різко, причому значення пульсаційної складової поздовжньої швидкості майже виходять на рівень пульсацій у непорушеному примежовому шарі.

Таким чином, аналіз отриманих результатів дав змогу оцінити характер поведінки примежового шару та зміни профілів різних складових поздовжньої швидкості як над обтічною поверхнею плоскої пластини, так і над напівциліндричним заглибленням.

5. Висновки

На підставі експериментального дослідження профілів швидкостей примежового шару над пластиною з каверною можна зробити наступні висновки.

1. Встановлено, що у примежовому шарі над плоскою пластиною з напівциліндричним заглибленням, яке обтікається поперек потоком, спостерігаються області збільшення та зменшення усередненої та пульсаційної складових швидкості, які чергуються.

2. Виявлено, що для ламінарного режиму обтікання течія над заглибленням прискорюється, а позаду заглиблення — гальмується. Разом з цим, гальмування потоку спостерігається тільки у пристінній області примежового шару перед напівциліндричним заглибленням.

3. Знайдено, що із зростанням швидкості обтікання течія гальмується з наростаючим темпом. Для турбулентного режиму обтікання області гальмування спостерігаються як над заглибленням, так і позаду нього уздовж всієї товщини примежового шару.

4. Зареєстровано, що значення пульсаційних складових поздовжньої швидкості зростають у пристінній та логарифмічній областях примежового шару при переході до турбулентного режиму обтікання. При цьому вони спадають у зовнішній області примежового шару (особливо з наближенням до кормової частини заглиблення).

5. Отримані результати суттєво доповнюють базу даних для розрахунків і проектування обтічних поверхонь з напівциліндричними кавернами, а також закладають основу для розробки і застосування методів оптимального керування когерентними вихровими структурами і процесами переносу в зсувних потоках за допомогою локальних вихрогенераторів досліджуваного типу.

Список літератури

1. Isaev S.A., Leont'ev A.I., Kiknadze G.I., Kudryavtsev N.A., Gachechiladze I.A. Comparative analysis of the vortex heat exchange in turbulent flows around spherical hole and a two-dimensional trench on a plane wall // J. Eng. Physics. and Thermophysics. – 2005. - 78, № 4. – P. 749-761.
2. 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.

3. Rowley C.W., Colonius T., Basu A. On self-sustained oscillations in two-dimensional compressible flow over rectangular cavities // J. Fluid Mech. – 2002. – 455. - P. 315–346.
4. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). – К.: ИТТФ НАН Украины, 2005. – 76 с.
5. Larcheveque L., Sagaut P., Labb O. Large-eddy simulation of a subsonic cavity flow including asymmetric three-dimensional effects // J. Fluid Mech. – 2007. – 577. - P. 105–126.
6. Chang K., Constantinescu G., Park S.-O. Analysis of the flow and mass transfer processes for the incompressible flow past an open cavity with a laminar and a fully turbulent incoming boundary layer // J. Fluid Mech. – 2006. – 561. - P. 113–145.
7. Bres G., Colonius T. Three-dimensional linear stability analysis of cavity flows // AIAA Pap. 2007-1126. – 2007. – 16 p.
8. Colonius T. An overview of simulation, modeling and active control of flow/acoustic resonance in open cavities // AIAA Pap. 2001-0076. – 2001. – 12 p.
9. Kegerise M. A., Spina E. F., Garg S., Cattafesta III L. N. Mode-switching and nonlinear effects in compressible flow over a cavity // Phys. Fluids. – 2004. - 16, № 3. – P. 678-687.
10. Oshkai P., Rockwell D., Pollack M. Shallow cavity flow tones: transformation from large- to small-scale modes // J. Sound Vibr. – 2005. – 280. – P. 777–813.
11. Бабенко В.В., Воскобойник А.В., Воскобойник В.А., Турик В.Н. Вихреобразование в полусферической лунке на поверхности обтекаемой пластины // Тезисы V Междун. Конф. Проблемы промышленной теплотехники. – Киев: ИТТФ НАНУ, 2007. – С. 29-30.
12. Савельев А.Д. О влиянии задней кромки каверны на интенсивность пульсаций потока // Изв. РАН. МЖГ. – 2001. – N 3. – С. 79-89.
13. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика поверхностно-вихревых систем: Украинские исследования // VI Минский Междунар. Форум по Тепломассообмену, ММФ 2008. – Минск, Беларусь, 2008. – PL-10. – С. 1-20.
14. Усачов А.Е., Гувернюк С.В., Лоханский Я.К., Стрижак С.В., Исаев С.А., Судаков А.Г., Баранов П.А. Вычислительные технологии для решения задач аэромеханики и теплофизики. Проблемы и тенденции развития // Материалы VIII Международной школы-семинара. «Модели и методы аэродинамики». – Москва: МЦНМО, 2008. – С. 139-141.
15. Турик В.Н., Бабенко В.В., Воскобойник В.А., Воскобойник А.В. Вихревое движение в полусферической лунке на поверхности обтекаемой пластины // Вестник НТУУ "КПИ": Машиностроение. – 2006. – № 48. – С. 79-85.
16. Rowley C.W., Williams D.R. Control of forced and self-sustained oscillations in the flow past a cavity // AIAA Pap. 2003-0008. – 2003. – 8 p.
17. Турик В.М., Бабенко В.В., Воскобойник В.А., Воскобойник А.В. Швидкості у примезовому шарі над пластинною з напівциліндричним заглибленням // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2008. - № 4. - С. 46-54.

УДК 629.123

А. В. Малахов¹ д-р физ-мат.наук, И. В. Ткаченко¹, В. А. Маслов¹, О. Е. Гугуев¹, М. А. Колегаев² к.т.н.,
С. А. Карьянский²

1-Одесский национальный морской университет, г.Одесса, Украина; 2-Одесская национальная морская академия, г.Одесса, Украина

ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКОВ

Показана необхідність розробки судового вузла сепарації для розділення двофазного потоку на воду та тверду фазу. Запропоновано нове технічне рішення та приведено математичний опис процесу гідродинамічного розділення.

There was shown a necessity to create ship unit for two-phase flow separation onto liquid and solid phases. New technical solution was offered and developed mathematical description of fluid-dynamics separation process.

Совершенствование технологической схемы добычи грунта при проведении дноуглубительных работ является одним из решений проблемы модернизации судов дноуглубительного флота. С технической и экономической точек зрения в этом случае достигается увеличение сроков межремонтных периодов и рост рентабельности за счет сокращения ходов судна от места добычи грунта к месту его складирования.

В ходе исследований была поставлена задача получения нового технического решения в части отделения добываемого грунта от воды. Для этого был разработан гидродинамический узел сепарации. В нем, за счет возникающих специфических особенностей гидродинамического движения многофазного потока, достигалась оптимальная концентрация воды в транспортируемом грунте. Устанавливаемый при ремонте судна узел сепарации