

Воропаєв Геннадій Олександрович (Voropaiev Gennadii Aleksandrovich) – доктор фізико-математичних наук, професор Інститут гідромеханіки НАН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: +38(044)371–65–17; e-mail: voropaiev.gena@gmail.com.

Баскова Олександра Олександрівна (Baskova Aleksandra Aleksandrovna) – магістр, провідний інженер, Інститут гідромеханіки НАН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (068) 198-93-75; e-mail: BaskAleksandra@gmail.com.

УДК 532.526.517

Г. О. ВОРОПАЄВ, Н. Ф. ДИМИТРИЄВА

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИХОРОВИХ ТЕЧІЙ В НАПІВЦИЛІНДРИЧНОМУ ЗАГЛИБЛЕННІ ЗА ДОПОМОГОЮ ВІДКРИТИХ ПАКЕТІВ SALOME, OPENFOAM, PARAVIEW

Чисельними методами з використанням високопродуктивних обчислювальних технологій досліджено нестационарну тривимірну структуру течії в напівциліндричному заглибленні. Обговорюються закономірності формування і розподілу системи вихорів, що виникають в заглибленні залежно від числа Рейнольдса, розмірів і повороту до потоку. Показано, що велику роль грають бічні стінки, що формують складну систему, що руйнує головний трансверсальний вихор та сприяє його викидам.

Ключові слова: напівциліндричне заглиблення, генератор вихорів, керування примежовим шаром, чисельне моделювання.

Г. А. ВОРОПАЕВ, Н. Ф. ДИМИТРИЕВА

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПОЛУЦИЛИНДРИЧЕСКОМ УГЛУБЛЕНИИ С ПОМОЩЬЮ ОТКРЫТЫХ ПАКЕТОВ SALOME, OPENFOAM, PARAVIEW

Численными методами с использованием высокопроизводительных вычислительных технологий исследована нестационарная трехмерная структура течения в полуцилиндрическом углублении. Обсуждаются закономерности формирования и распределения системы вихрей, возникающих в углублении в зависимости от числа Рейнольдса, размеров и поворота к потоку. Показано, что важную роль играют боковые стенки, формирующие сложную систему, которая разрушает главный трансверсальный вихрь и способствует его выбросам.

Ключевые слова: полуцилиндрическое углубление, генератор вихрей, управление пограничным слоем, численное моделирование.

G. A. VOROPAIEV, N. F. DIMITRIEVA

NUMERICAL SIMULATION OF VORTEX FLOWS IN A SEMI-CYLINDRICAL DIMPLE USING SALOME, OPENFOAM, PARAVIEW OPEN SOURCE PACKAGES

Transient 3D flow structure in a semi-cylindrical dimple is investigated by numerical methods using high-performance computing technologies. Patterns of formation and distribution of the system of vortices that occur in the dimples depending on the Reynolds number, size and rotation to the flow are discussed. It is shown that the side walls forming a complex system of vortices play an important role. The wall destroys the main transversal vortex and contributes to its emissions into the external flow. The proposed method of numerical simulation has shown its effectiveness in a wide range of parameters of the problem and is consistent with experimental data.

Key words: semi-cylindrical dimple, vortex generator, flow control, numerical simulation.

Вступ. Керування примежовим шаром генерацією вихорів нав'язує турбулентній течії детерміновану вихрову структуру заданого масштабу та інтенсивності, яка може призводити до зменшення швидкості наростання товщини примежового шару вниз за течією та підтримувати енергетичний баланс між *пульсаційним полем* і *осередненою течією*. Під час відриву вихорів з гострих кромek *вихорогенераторів*, в примежовий шар обтічного тіла або в відривну течію генеруються досить стійкі поздовжні вихори [1, 2]. Характерні масштаби цих вихрових структур, їх інтенсивність визначають кількісні значення величин аерогідродинамічного опору рухомих тіл.

Аналіз попередніх досліджень. Проблема вивчення вихрових структур у турбулентному примежовому шарі на поверхні з геометричними неоднорідностями, умов їх виникнення і розвитку залишається актуальною і на сьогодні, не дивлячись на те, що цій проблемі вже присвячено величезну кількість експериментальних і теоретичних досліджень. За допомогою використання заглиблень, що нанесені на обтічну поверхню, є можливість значно підвищити ефективність багатьох інженерно-технічних систем. При цьому використовується багато чинників складного механізму утворення вихорів всередині заглиблень, їх масштабна різноманітність і особливості викиду назовні із обтічних лунок. Використання груп ідентичних заглиблень часто дають суттєвий вииграш у збереженні питомої енергії, а також для досягнення кращих якостей обтічних поверхонь [3].

Підвищена зацікавленість до використання сферичних заглиблень в якості інтенсифікаторів теплообміну та елементів керування примежовим шаром пов'язана головним чином з тим, що спортивне знаряддя, наприклад, м'яч для гри у гольф, яке має на своїй поверхні лунки, мають тенденцію пролітати більшу відстань [4]. Також елементи організованої шорсткості мають: м'ячі для гри в баскетбол, волейбол, футбол, які називають швидкісними м'ячами.

Нанесення заглиблень на обтічну поверхню дає можливість зменшити акустичний шум, що утворюють пропелери двигунів літаків. Досліди показали [5], що рівень шуму пропелера з лунками майже у два рази нижче за традиційний за рахунок зменшення зони відриву на кормовій стороні профілю.

Надзвичайно добре вивчені заглиблення у вигляді сферичних сегментів – як одиночних, так і їх ансамблів. У роботі [6] зібрано інформацію про режими обтікання одиночних заглиблень у вигляді сферичних сегментів різної конфігурації. Взаємодія вихорів, що генеруються системою заглиблень на плоскій поверхні, представляє собою не хаотичну групу вихорів, а самоорганізовані вихрові структури, які взаємно координують свою поведінку. Специфічна вихрова структура, тривимірна і нестационарна завихреність, мала висота вихорів над поверхнею із заглибленнями дає високий рівень теплообміну та відносно низькі втрати тиску.

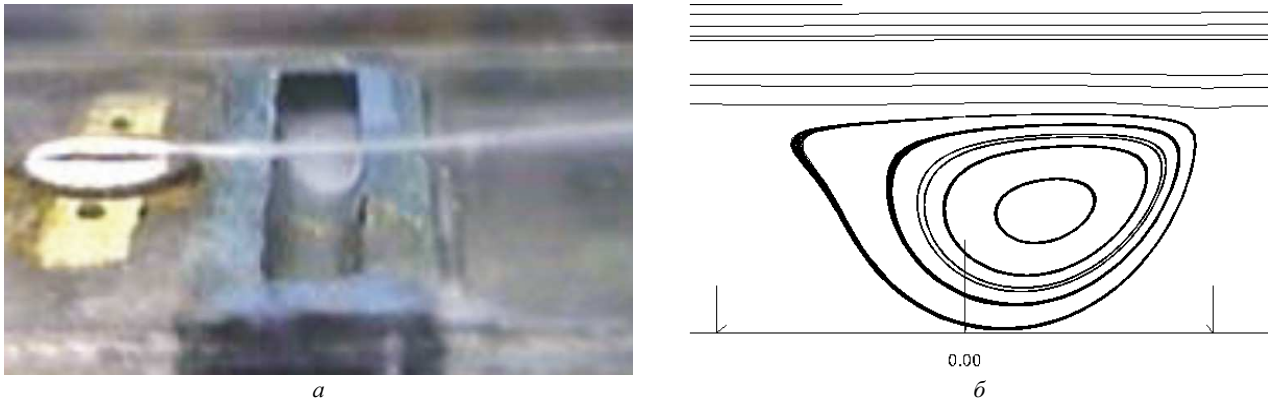


Рис. 1 – Візуалізація вихрової структури в напівциліндричному заглибленні ($Re = 10^3$):
 а – експериментальні дані; б – результати розрахунків.

В останні роки зроблено багато дослідів з метою визначення оптимальної конфігурації лункової поверхні. Так, у роботах [7, 8] було проведено чисельне моделювання з визначення особливостей теплопереносу на лункових поверхнях семи різних форм лунок. Знайдено, що найбільша теплофізична ефективність і найбільша вихрова інтенсивність спостерігаються на нахилених циліндричних лунках. У роботі [9] експериментально досліджувався переніс тепла у прямокутному каналі, в якому зроблено *V*-подібні лунки. Результати показали, що запропонована форма більш ефективна за визначених умов, ніж традиційні виступи або сферичні лунки.

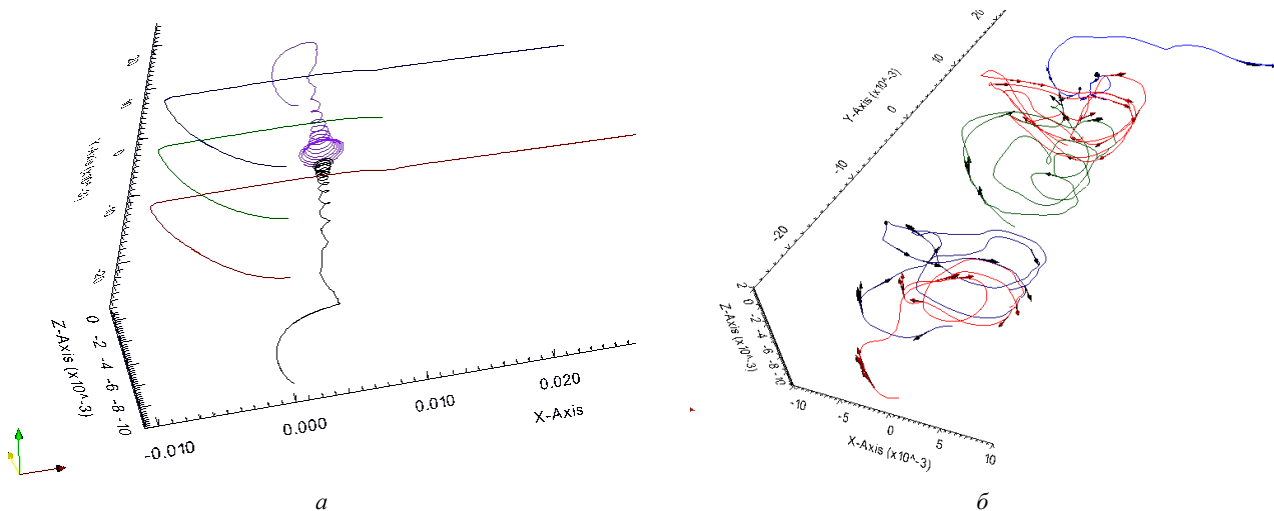


Рис. 2 – Лінії току при швидкості обтікання: а – $Re = 2 \cdot 10^3$; б – $Re = 1,6 \cdot 10^4$.

Основне призначення методу керування потоком генераторами вихорів в примежовому шарі полягає у мінімізації енергії на подолання опору форми, яку необхідно трансформувати в енергію вихрових структур, що змінюють структуру турбулентності в примежовому шарі. Тому більш глибоке вивчення формування та розподілу вихрових структур, а також пошук найефективніших форм лункових поверхонь є актуальною науково-технічною проблемою.

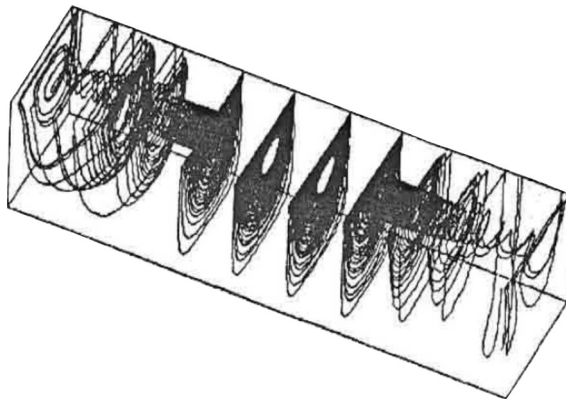
В даній роботі чисельними методами досліджуються закономірності формування тривимірних вихрових систем в напівциліндричному заглибленні, що виконує функцію генератора вихорів в турбулентній течії.

Постановка задачі та метод розв'язку. В якості математичної моделі обрано стандартну систему рівнянь руху нестисливої рідини, що вміщує рівняння Нав'є – Стокса та нерозривності:

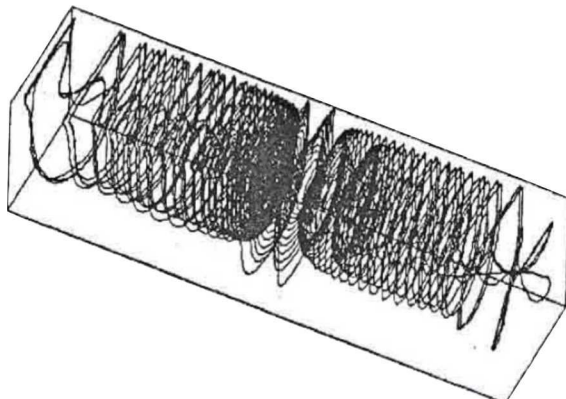
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}, \quad \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

де u_i – компонента швидкості, індекс $i = x, y, z$; p – тиск; ρ – щільність; ν – в'язкість. На стінках задавалася умова прилипання, на вході – швидкість зовнішнього потоку U_0 .

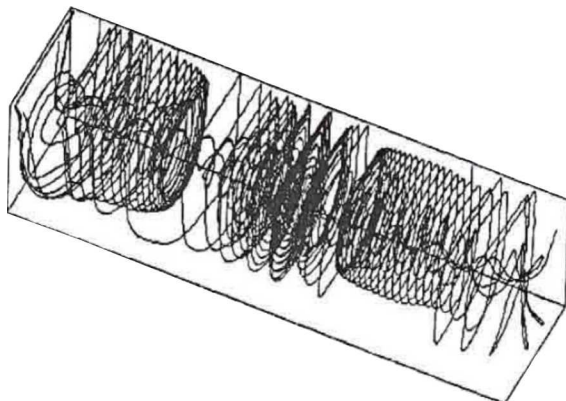
В якості методу дослідження запропоновано метод комп'ютерного моделювання з використанням відкритих програмних пакетів *OpenFOAM*, *SALOME*, *ParaView* [10]. Чисельне моделювання системи рівнянь руху в пакеті *OpenFOAM* проводиться методом кінцевих об'ємів в декартовій системі координат [11]. Інтеграл по контрольному об'єму зводяться до поверхневого методом Гаусса, а значення функції на поверхні комірки інтерполюється із значень функції в центроїдах сусідніх комірок. Робочою мовою коду є об'єктно-орієнтована мова програмування C++.



a



б



в

Рис. 3 – Вихрові структури: а – $Re = 10^2$; б – $Re = 4 \cdot 10^2$; в – $Re = 10^3$.

При невеликих числах Рейнольдса формується *трансверсальна завихореність* практично по всьому об'єму лунки, крім невеличких зон поблизу бокових стінок. Абсолютні значення поздовжньої та вертикальної на порядок менше трансверсальної. В діапазоні чисел Рейнольдса $Re = U_0 d / \nu = 10^2 \div 10^3$ течія зберігає *стійкий лами-*

Для чисельного розв'язку задачі обтікання пластини з лункою запропоновано використовувати стандартну чисельну модель *rimpleFOAM*, що реалізує нестационарні рівняння Нав'є – Стокса для нестисливої рідини (1). В якості об'єкту дослідження була використана геометрія робочої області експериментального стенду роботи [12]. Розрахункова область являє собою паралелепіпед, на дні якого впоперек зовнішній течії розташована лунка напівциліндричної форми діаметром 2 см і довжиною 8 см.

У відкритому графічному пакеті *SALOME* було побудовано блочно-структуровану розрахункову сітку, що узгоджена з границями. Умови адекватного врахування дрібномасштабних елементів вихрової течії накладає суттєві обмеження на мінімальний шаг у просторі поблизу обтічної поверхні та всередині каверни. В той самий час розрахункова область повинна бути достатньо великою, щоб врахувати крупномасштабні структурні елементи течії, що виходять за межі турбулентного примежового шару. Це призводить до збільшення кількості вузлів розрахункової сітки, що суттєво вповільнює швидкість чисельних розрахунків і спонукає дослідника до використання високоточних обчислювальних систем. Для економного використання розрахункових ресурсів запропоновано згущення сітки в напрямку до лунки. В двовимірній постановці було використано розрахункову сітку із загальною кількістю комірок $2,2 \cdot 10^5$, а для тривимірної задачі – $4,5 \cdot 10^5$.

Візуалізація результатів розрахунків, проведених із застосуванням відкритого пакету *OpenFOAM*, виконувалася з використанням відкритого графічного інтерфейсу *ParaView*. Пакет був розроблений з метою аналізу дуже великих об'ємів інформації з використанням розподілених обчислювальних ресурсів пам'яті і може працювати як на кластерах для аналізу даних терапорядку, так і на персональних комп'ютерах для порівняно менших об'ємів.

Результати розрахунків. Результати розрахунку в тривимірній постановці показали, що лінії току всередині лунки замкнуті так само, як і у двовимірній стаціонарній задачі (рис. 1). Всередині лунки формується циркуляційна зона, яка утворюється взаємодією рідини в лунці та шару зсуву, що якісно узгоджується з експериментальними даними [12].

нарний стаціонарний режим. Центр головного вихору зміщується від центру заглиблення до задньої стінки. При цьому збільшується інтенсивність викидів рідини в зовнішню частину потоку.

На рис. 2 наведені миттєві лінії току при значеннях чисел Рейнольдса $Re = 2 \cdot 10^3$ та $Re = 1,6 \cdot 10^4$. Контрольні точки, з яких беруть початок лінії току, розташовано на дні лунки по всій довжині. Видно, що при невеликих числах Рейнольдса та відношенні геометричних розмірів лунки $l/d = 2,5$ тривимірність проявляється тільки безпосередньо біля бокових стінок лунки (рис. 2, а). З ростом швидкості зовнішнього потоку завихореність стає суттєво тривимірною та нестаціонарною (рис. 2, б).

Візуалізація в лабораторних умовах течій в канаві, що розташована впоперек основному потоку, показала суттєву тривимірність когерентних вихрових структур, які формуються у напівциліндричному заглибленні [1].

На рис. 3 показано схему руху просторових *струменево-вихрових структур*. Виявлено, що викид вихрових систем має місце у середній частині заглиблення і поблизу його бокових стінок. Вихровий рух у цьому заглибленні складається з двох симетричних частин або комірок, об'єднаних у серединному перерізі заглиблення у вигляді спіралей, котрі розкручуються. Тому потік, який циркулює в траншеї, можна поділити на квазидвовимірний зворотно-циркуляційний потік в серединній частині і складний за своїм характером рух рідини в периферійних, прилеглих до бічних стінок зонах.

Аналіз результатів візуалізації [1] дозволив знайти характерні області формування і розвитку вихрових систем усередині заглиблення і над пластиною. Поблизу дна заглиблення зареєстровано появу поздовжньої швидкості зворотного напрямку, що обумовлено циркуляцією течії у заглибленні. Розмір великомасштабної вихрової структури зменшується під час зростання швидкості потоку, у цьому разі він зміщується ближче до дна і до кормової стінки заглиблення. Крім великомасштабного вихору усередині заглиблення формуються дрібномасштабні вихори, головним чином біля переднього відривного краю заглиблення та у місці ударної взаємодії вихрових систем шару змішування з кормовою стінкою заглиблення.

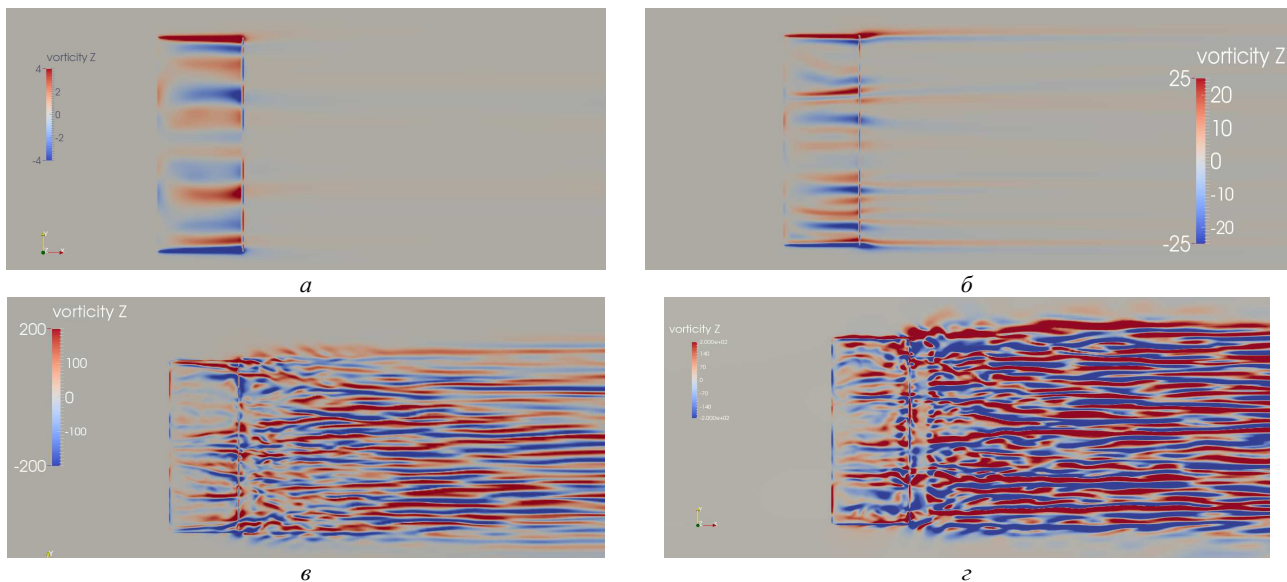


Рис. 4 – Вертикальна компонента завихореності в горизонтальній площині $z = 0$:

$$a - U_0 = 0,1 \text{ м/с}; \text{ б} - U_0 = 0,5 \text{ м/с}; \text{ в} - U_0 = 1,2 \text{ м/с}; \text{ г} - U_0 = 2,0 \text{ м/с}.$$

З ростом швидкості зовнішнього потоку завихореність стає суттєво тривимірною та нестаціонарною. На рис. 4 наведено миттєві поля вертикальної компоненти завихореності в горизонтальній площині $z = 0$ залежно від швидкості обтікання. З ростом числах Рейнольдса абсолютні значення компонент завихореності збільшуються як всередині лунки, так і в сліді, формуючи протяжні знакозмінні структури. Вплив бокових стінок стає суттєвим, порушуючи рівномірну та паралельну структуру ліній току (рис. 4, в, г). Спостерігається складна нестаціонарна картина, що супроводжується періодичними викидами із лунки.

За малих швидкостей обтікання вихори виносяться із бокових сторін заглиблення парами. Над ними формуються компенсаційні вихрові системи. Вертикальні розміри вихорів зберігаються довго вниз за потоком, хоча їхня інтенсивність падає за рахунок сил тертя. З ростом швидкості обтікання тривимірною знакозмінною системою вихорів, що формується всередині заглиблення, впливає на структуру вихрового сліду. Крім інтенсивних викидів з бокових сторін в ближньому сліді чітко виявлено знакозмінні структури по всій товщині канавки, які швидко затухають вниз за потоком. Великі градієнти швидкості, що мають місце поблизу стінки, викривлюють форму вихорів, суттєво зменшуючи їх вертикальні розміри.

На рис. 5 наведено криві еволюції тиску в контрольній точці (8;0;0) мм залежно від швидкості обтікання. При невеликих числах Рейнольдса $Re < 10^4$ спостерігаються в початковий момент затухаючі осциляції з виходом на стійкий стаціонарний режим (рис. 5, а, б).

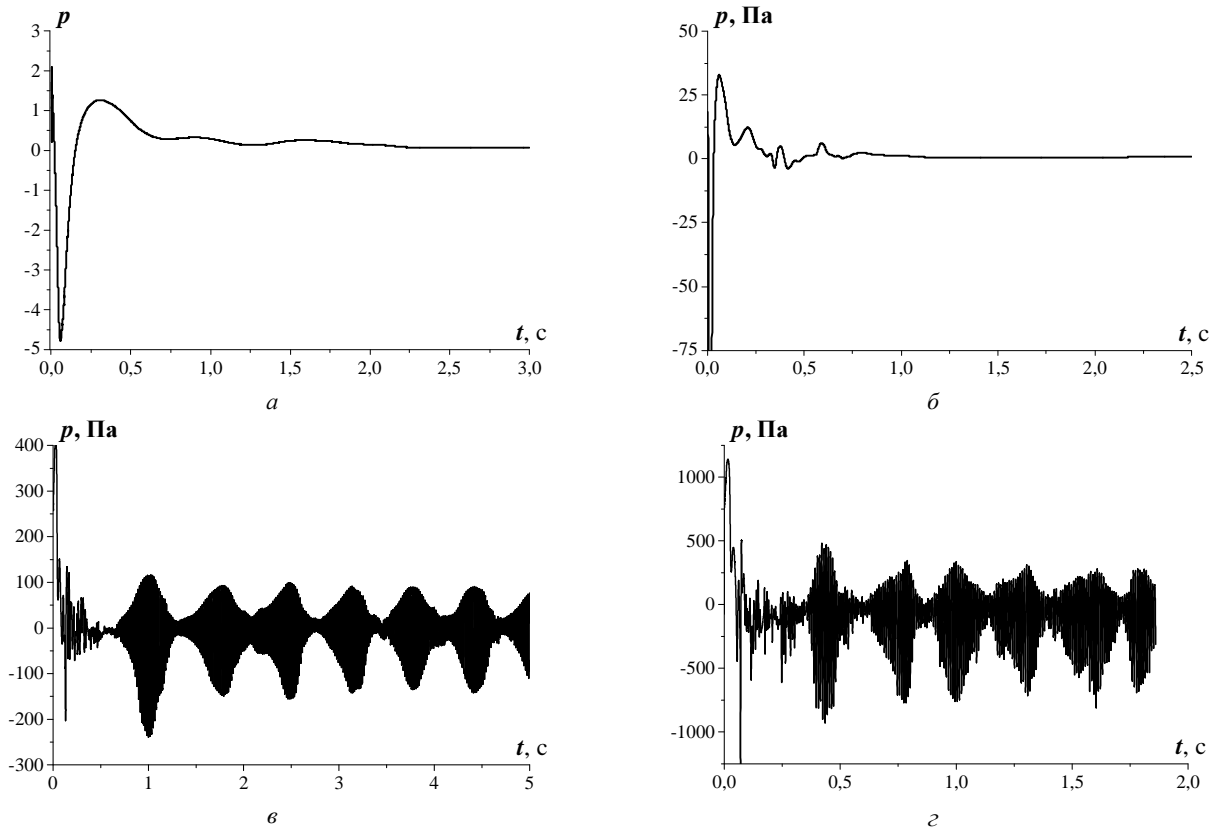


Рис. 5 – Залежність тиску від часу в контрольній точці при швидкості обтікання:
 $a - U_0 = 0,1$ м/с; $б - U_0 = 0,5$ м/с; $в - U_0 = 1,2$ м/с; $г - U_0 = 2,0$ м/с.

З подальшим збільшенням швидкості потоку формується хвильовий спектр (рис. 5, г), в якому виділяються дві характерні частоти ω_1 і ω_2 . Низька частота ω_1 характеризує макромасштабний процес, а саме період викидів із лунки. Момент викиду відповідає максимальній амплітуді коливань. Висока частота ω_2 характеризує внутрішні процеси маленьких масштабів, що визначаються в'язкістю рідини та швидкістю зовнішньої течії U_0^2 / ν .

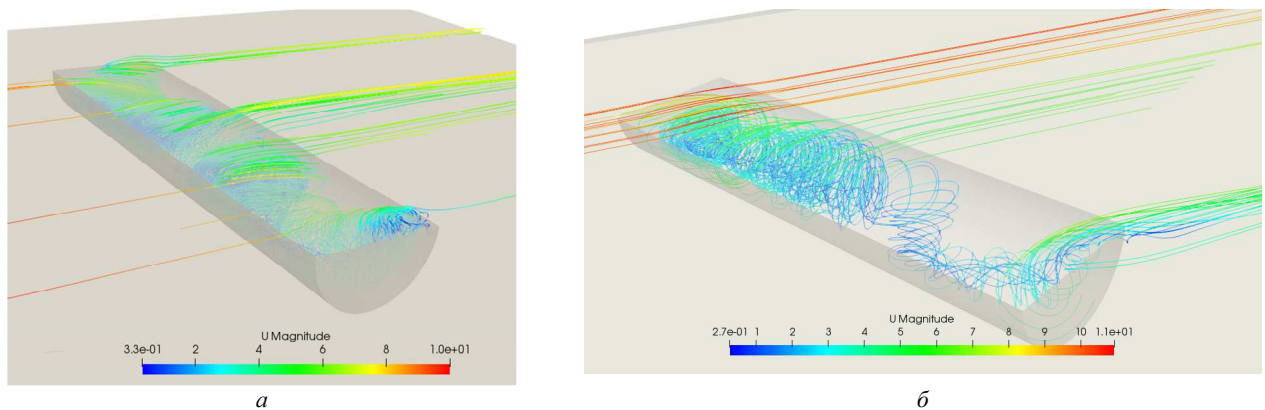


Рис. 6 – Миттєві траєкторії частинок за різних кутів повороту напівциліндричного заглиблення до основного потоку ($Re = 2 \cdot 10^5$): $a - \alpha = 0^\circ$; $б - \alpha = 60^\circ$.

На формування тривимірної вихрової структури суттєво впливає співвідношення розмірів заглиблення, зокрема, поперечного та поздовжнього l/d . При зменшенні довжини напівциліндричного заглиблення вихори стають тривимірними за менших швидкостей основного потоку. Вплив бокових стінок стає суттєвим, порушуючи рівномірну та паралельну структуру ліній току. Викиди із заглиблення спостерігаються не тільки в сліді, а і з бокових сторін. Зі збільшенням швидкості основного потоку порушується симетрія течії вже на вході в заглиблення та інтенсифікація турбулентної структури.

При повороті лунки до основного потоку порушується плоскопаралельність течії та її симетрія, з'являються вихори в кутових точках (рис. 6). При повороті на кут $\alpha = 60^\circ$ з частини заглиблення, яке знаходиться далі від вхідної площини, можна спостерігати викид рідини в основний потік; за траєкторіями мічених частинок

прослідковується збурення, яке поширюється вниз за потоком.

Поворот заглиблення відносно напрямку основного потоку практично не впливає на вертикальні розміри вихрових структур. Проте, порушення симетрії течії впливає на перерозподіл енергії всередині заглиблення та в сліді за ним. Таким чином, на відміну від симетричної канавки, поздовжній єдиний вихор акумулюється всередині та виноситься із задньої гострої кромки, довго зберігаючи свою інтенсивність.

Аналіз поля тиску показав, що всередині заглиблення формується підковоподібний вихор, який викривлюється та виноситься в слід. З ростом числа Рейнольдса частота і інтенсивність викидів зростає за залежністю, що наведена на рис. 4. При повороті заглиблення зона пониженого тиску, де формується найінтенсивніший викид вихору із лунки, спостерігається в сліді безпосередньо за задньою гострою кромкою (рис. 7).

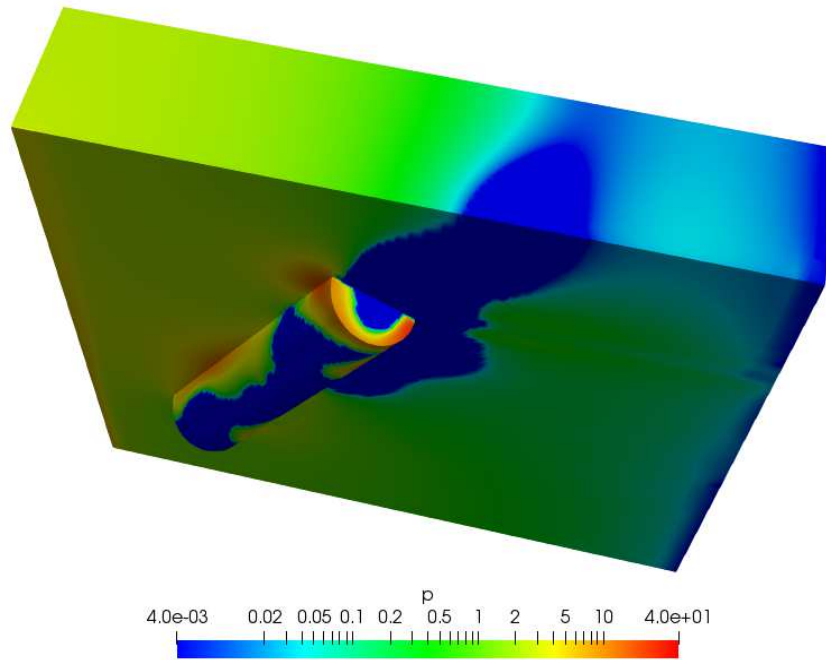


Рис. 7 – Миттєве поле тиску для $U_0 = 1$, $\alpha = 60^\circ$.

Висновки. Досліджено нестационарну тривимірну структуру вихрових систем, що генеруються напівциліндричною поперечною канавкою, залежно від швидкості течії та повороту заглиблення. Запропоновано комп'ютерну модель розв'язку турбулентної течії нестисливої рідини у відкритому пакету OpenFOAM, що показала свою ефективність.

Еволюція та просторовий розподіл різних фізичних величин відповідає експериментальним даним. Потік, який циркулює в канавці, можна поділити на квазидвовимірний зворотно-циркуляційний потік в серединній частині і складний за своїм характером рух рідини в периферійних, прилеглих до бічних стінок зонах.

За відносно низьких чисел Рейнольдса $Re < 10^3$ спостерігається глобальний трансверсальний вихор в канавці, що є стійким і стаціонарним. Зі збільшенням числа Рейнольдса система вихорів стає суттєво тривимірною та нестационарною. Велику роль в цьому процесі грають бічні стінки, що формують складну систему тривимірних вихорів, що руйнує головний трансверсальний вихор та сприяє його викидам із канавки.

З поворотом заглиблення на 60° до потоку структура течії стає більш регулярною, викиди рідини із заглиблення відбуваються переважно у «хвості», зникає їх періодичність.

Список літератури

1. Турик В. Н., Воскобойник В. А., Воскобойник А. В. Управление структурой течения внутри полуцилиндрического углубления // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. : Машинобудування. – 2016. – Т. 78. – № 3. – С. 112 – 123.
2. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). – К. : ИТГФ НАНУ, 2005. – 76 с.
3. Voskoboinick V. A., Turick V. N., Voskoboinyk O. A., Voskoboinick A. V., Tereshchenko I. A. Influence of the deep spherical dimple on the pressure field under the turbulent boundary layer // in Advances in Computer Science for Engineering and Education. Ed. Z. Hu, S. Petoukhov, I. Dychka, M. He. – 2019. – Vol. 754. – P. 23 – 32.
4. Choi J., Jeon W.-P., Choi H. Mechanism of drag reduction by dimples on a sphere // Physics of Fluids. – 2006. – Vol. 18. – no. 4. – id. 041702 (4 p.).
5. Meseguer-Garrido F., De. Vicente J., Valero E., Theofilis V. On linear instability mechanisms in incompressible open cavity flow // Journal of Fluid Mechanics. – 2014. – Vol. 752. – P. 219 – 236.
6. Коваленко Г. В., Халатов А. А. Границы режимов течения в углублениях на плоской поверхности, имеющих форму сферических сегментов // Прикладна гідромеханіка. – 2008. – Т. 10(82). – № 1. – С. 23 – 32.
7. Гортышов Ю. Ф., Попов И. А., Олимпов В. В., Щелчков А. В., Касьяков С. И. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. – Казань : Центр инновационных технологий. – 2009. – 531 с.
8. Najm H. N., Ghoniem A. F. Numerical simulation of the convective instability in a dump combustor // AIAA J. – 1991. – Vol. 29. – № 6. – P. 911

– 919.

9. Jordan C. N., Wright L. M. Heat transfer enhancement in a rectangular (AR = 3:1) channel with V-shaped dimples // *J. Turbomach.* – 2013. – Vol. 135. – № 1. – id. 011028 (10 p.).
10. Калугин В. Т., Крапошин М. В., Стрижак С. В., Юскин А. В. Возможности открытого пакета OpenFOAM для решения задач аэрогидромеханики и теплообмена // Труды РНКТ-5 (Москва 25 – 29 октября 2010 г.). – М.: Изд. дом МЭИ. – 2010. – Т. 1. – С. 85 – 88.
11. Димитрієва Н. Ф. Методика розрахунку вихрової течії біля лунки у відкритому пакеті OpenFOAM // Комп'ютерна гідромеханіка : тези п'ятої міжнар. науково-практичної конф. (Київ 29 – 30 вересня 2016 р.). – Київ : ІГМ НАНУ, 2016. – С. 29 – 30.
12. Воскобойник А. В. Пассивное управление формированием вихревых структур внутри полусилиндрического углубления // Вісник Донецького національного університету. Сер. А : Природничі науки. – 2009. – Т. 1. – С. 173 – 182.

References (transliterated)

1. Turick V. N., Voskoboinick V. A., Voskoboinick A. V. Upravlenie strukturoy techeniya vnutri polutsilindricheskogo uglubleniya [Controlling flow structure inside semi-cylindrical dimples]. *Naukovi visti NTUU "KPI". Ser. : Mashynobuduvannya* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI". Series : Mechanical engineering]. 2016, vol. 78, no. 3, pp. 112–123.
2. Khalatov A. A. *Teploobmen i gidrodinamika okolo poverkhnostnykh uglublenii (lunok)* [Heat transfer and fluid mechanics over surface indentations (dimples)]. Kyiv, ITTF NANU Publ., 2005. 76 p.
3. Voskoboinick V. A., Turick V. N., Voskoboinick O. A., Voskoboinick A. V., Tereshhenko I. A. Influence of the deep spherical dimple on the pressure field under the turbulent boundary layer. In *Advances in Computer Science for Engineering and Education*. Ed. Z. Hu, S. Petoukhov, I. Dychka, M. He. 2019, vol. 754, pp. 23–32.
4. Choi J., Jeon W.-P., Choi H. Mechanism of drag reduction by dimples on a sphere. *Phys. Fluids*. 2006, vol. 18, no. 4, id. 041702 (4 p.).
5. Meseguer-Garrido F., De. Vicente J., Valero E., Theofilis V. On linear instability mechanisms in incompressible open cavity flow. *J. Fluid Mech.* 2014, vol. 752, pp. 219–236.
6. Kovalenko G. V., Khalatov A. A. Granitsy rezhimov techeniya v uglubleniyakh na ploskoy poverkhnosti, imeyushchikh formu sfericheskikh segmentov [Boundaries of flow regimes in cavities on flat surface having the shape of spherical segments]. *Applied hydromechanics*. 2008, vol. 10(82), no. 1, pp. 23–32.
7. Gortyshov Yu. F., Popov I. A., Olimpov V. V., Shhelchkov A. V., Kaskov S. I. *Teplogidravlicheskaya effektivnost' perspektivnykh sposobov intensivatsii teploobmeha v kanalakh teploobmennogo oborudovaniya* [Thermal-hydraulic efficiency of promising ways to intensify heat transfer in heat exchange equipment channels]. Kazan, Tsentri innovatsionnykh tekhnologiy Publ., 2009. 531 p.
8. Najm H. N., Ghoniem A. F. Numerical simulation of the convective instability in a dump combustor. *AIAA J.* 1991, vol. 29, no. 6, pp. 911–919.
9. Jordan C. N., Wright L. M. Heat transfer enhancement in a rectangular (AR = 3:1) channel with V-shaped dimples. *J. Turbomach.* 2013, vol. 135, no. 1, id. 011028 (10 p.).
10. Kalugin V. T., Kraposhin M. V., Strizhak S. V., Yuskin A. V. *Vozmozhnosti otkrytogo paketa OpenFOAM dlya resheniya zadach aerogidromekhaniki i teploobmena* [Possibility of OpenFOAM open package to solve aerohydraulic and heat transfer problems]. *Trudy RPKT-5* [Proc. of the Fifth Russian National Conference on Heat Transfer, Moscow, October 25 – 29, 2010]. 2010, vol. 1, pp. 85–88.
11. Dimitrieva N. F. *Metodyka rozrakhunku vykhrovoyi techiiy bilya lunky u vidkrytomu paketi OpenFOAM* [Method of calculating the eddy flow at the dimple in the OpenFOAM open package]. *Komp'yuterna gidromekhanika : tezy p'yatoyi mizhnar. naukovo-praktychnoyi konf.* [Computer hydromechanics : Proceedings of the 5-th International Scientific and Practical Conference, Kyiv, September 29 – 30, 2016]. Kyiv, IGM NANU Publ., 2016, pp. 29–30.
12. Voskoboinick A. V. *Passivnoe upravlenie formirovaniem vikhrevykh struktur vnutri polutsilindricheskogo uglubleniya* [Passive control of the formation of vortex structures inside a semi-cylindrical cavity]. *Visnyk Donets'kogo natsional'nogo universytetu. Ser. A : Pryrodnychi nauky* [Bulletin of the Donetsk National University. Series A : Natural Sciences]. 2009, vol. 1, pp. 173–182.

Надійшла (received) 16.03.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Воропаєв Геннадій Олександрович (Voropaev Gennadii Aleksandrovich) – член-кореспондент Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, професор, Інститут гідромеханіки Національної академії наук України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-18; e-mail: voropaiev@hydromech.com.ua.

Димитрієва Наталія Федорівна (Dimitrieva Natalia Fedorovna) – кандидат фізико-математичних наук, Інститут гідромеханіки Національної академії наук України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-18; e-mail: dimitrieva@nas.gov.ua.

УДК 532.517:532.5.032

Г. А. ВОРОПАЕВ, Я. В. ЗАГУМЕННЫЙ**УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОБТЕКАЕМОГО КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ КРЫЛА**

Предложен метод численного моделирования обтекаемых колеблющихся тел на основе прямого численного решения классической системы нестационарных трехмерных уравнений Навье – Стокса и неразрывности для несжимаемой вязкой среды с использованием библиотек динамических расчетных сеток и программ собственной разработки пакета OpenFOAM. Представлены результаты расчетов обтекания колеблющихся профилей разной конструкции, включая стандартный крыловой профиль NACA0009 и две его модификации с дополнительным тонким хвостовиком с фиксированной и движущейся кромкой. Определяются их пропульсивные характеристики и структура вихревого следа в зависимости от угла отклонения и частоты колебания. Результаты численного моделирования показали возможность в рамках единой формулировки получать гидродинамические характеристики тонких подвижных и неподвижных профилей, определять локальные отрывы и величины генерируемой завихренности, а также показали зависимость структуры вихревого следа от геометрии профиля и частоты его колебания. Показано, что колеблющийся упругий профиль обладает меньшим сопротивлением по сравнению со стандартным жестким крылом.

Ключевые слова: обтекание тела, вихревой след, колеблющийся крыловой профиль, коэффициент сопротивления, пропульсивная сила, численное моделирование, OpenFOAM.

© Г. А. Воропаев, Я. В. Загуменный, 2019