

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТУРБУЛЕНТНИХ ТЕЧІЙ У ТРИВИМІРНОМУ НАПІВЦИЛІНДРИЧНОМУ ЗАГЛИБЛЕННІ

Є. Ю. Бойко<sup>1</sup>, Є. О. Биков<sup>1</sup>, Н. Ф. Димитрієва<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
Фізико-технічний інститут

<sup>2</sup>Інститут гідромеханіки Національної академії наук України

### Анотація

У даній роботі наведено результати фізичного експерименту та комп'ютерного моделювання формування тривимірних вихрових систем в напівциліндричному заглибленні на плоскій пластині, що виконує функцію генератора вихорів в турбулентній течії. Діапазон чисел Рейнольдса, для яких проводився розрахунок –  $Re = 10^3 \div 10^4$ . Проведено аналіз просторового розподілу та еволюції системи вихорів різних масштабів та порівняння результатів фізичного та чисельного експерименту.

**Ключові слова:** напівциліндричне заглиблення, комп'ютерне моделювання, турбулентна течія, вихрова структура

### Вступ

У представленій роботі експериментальними та чисельними методами досліджуються закономірності формування тривимірних вихрових систем в напівциліндричному заглибленні, що виконує функцію генератора вихорів в турбулентній течії.

Визначення ефективності руху тіл при заданій швидкості з мінімумом енергетичних втрат, що пов'язане з мінімізацією опору тертя при заданій швидкості та заданого об'єму тіл – це одне з актуальних питань у сучасній аеро та гідромеханіці. Гідродинамічний опір тіл, які рухаються в суцільному середовищі, або гідравлічний опір у внутрішніх течіях визначаються режимом течії. 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]. Основним недоліком таких вихорогенераторів є їх високий опір форми.

Разом з питаннями зниження гідродинамічного опору у величезній кількості технічних пристроїв, проблема теплообміну з навколишнім середовищем є не менш важливою. Тому ефективність методів керування пристінними течіями оцінюється комплексним параметром, в якому враховується як ефект зміни теплообміну, так і гідродинамічного опору [3, 4]. І якщо раніше збільшення теплообміну завжди зв'язувалося із збільшенням опору, то дослідження останніх десятиліть показали, що вихрові системи, що генеруються заглибленнями на поверхні, можуть істотно

підвищити теплообмін, при цьому гідродинамічний опір зростає неістотно. Більш того, на резонансних режимах опір практично відповідає опору плоскої гладкої поверхні.

Слід зазначити широкий діапазон практичних застосувань енергозберігаючих технологій поверхневих вихрових генераторів, штучно нанесених на обтічну поверхню, в авіації, суднобудуванні, атомній та тепловій енергетиці, машинобудуванні, автомобільній промисловості, на залізниці, в космічній і ракетній техніці. Спортивні снаряди (зокрема, м'яч для гольфу), що мають на своїй поверхні елементи шорсткості у вигляді канавок, траншей, лунків різної форми мають тенденцію пролітати більшу відстань [5]. Подібний механізм зниження гідродинамічного опору був досліджений на моделі корабля та швидкісного експреса з нанесенням лункового рельєфу. В автомобілебудуванні проводились дослідження з нанесенням на спортивні автомобілі в зоні відриву потоку системи турбулізаторів різної форми, у тому числі й лункових поверхонь [6]. Ефект зниженого забруднення поверхонь з лунковим рельєфом використано на автомобілях Mitsubishi, Lexus, Audi, Volkswagen. Для інтенсифікації теплообміну в теплоенергетичних апаратах широко використовують заглиблення різної форми і розмірів [7]. Дослідження показали, що специфічні якості вихрового потоку всередині заглиблень і їхній викид назовні можна ефективно використовувати в процесах горіння палива.

Зрештою, керування течією за допомогою генераторів вихорів викликає зменшення опору, збільшення підйомної сили аеродинамічних конструкцій, зниження гідродинамічного шуму і вібрацій обтічних поверхонь, збільшення тепло- і масопереносу, а також процесів змішування. Когерентні вихрові системи всередині заглиблень мають визначальну роль при

створенні пристроїв, які дозволяють контролювати і керувати вихровою течією в прилежовому шарі і збільшують тепловіддачу в теплоенергетиці. Різноманітність їхніх форм і розмірів дає можливість визначити оптимальну конфігурацію технічних конструкцій і технологічних процесів, що забезпечують створення ефективних і енергозберігаючих гідродинамічних і теплофізичних систем.

## 1. Фізичний експеримент

З метою дослідження вихрової структури в одиночній лунці в Інституті гідромеханіки НАН України було створено експериментальний стенд з комплектом контрольно-вимірювальної апаратури [8]. На обтічній поверхні пластини у спеціально зроблений ніші було встановлено відкритий напівциліндр з незначним заглибленням поздовжньої осі відносно площини пластини (рис. 1). Він закріплювався в зануреному положенні всередині прямокутного короба. У свою чергу, короб приклеювався до нижньої (неробочої) сторони пластини. Поздовжня вісь напівциліндричного заглиблення розміщувалася на відстані 0.514 м від переднього краю пластини перпендикулярно середній швидкості  $U_0$  потоку, що набігає. Діаметр заглиблення  $d$  становив 0.0185 м, а глибина і довжина – 0.0115 м і 0.081 м, відповідно. Вимірювання вздовж поздовжньої осі заглиблення показали, що збурення, які вносяться боковими стінками канавки, є незначними, тому їхній вплив на профілі швидкості в центральній частині лунки можна не враховувати.

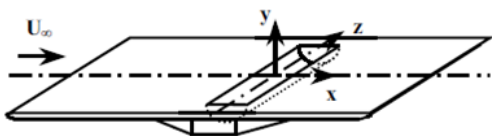


Рис. 1. Схема розташування напівциліндричного заглиблення на поверхні плоскої пластини і система координат, що використовується.

Попереду заглиблення генерувався візуалізаційний струмінь, який заходив у заглиблення і рух його відображав переміщення вихрових систем усередині заглиблення, а також під час їх викидів назовні у пограничний шар над пластиною (рис. 2). Визначено, що в таких заглибленнях візуалізаційний струмінь обертається у вигляді великомасштабної вихрової системи і періодично викидається із заглиблення.

Візуалізація напівциліндричних заглиблень показала суттєву тривимірність когерентних вихрових структур, що формуються у заглибленні. На рис. 3 показано схему руху просторових струменевих 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.

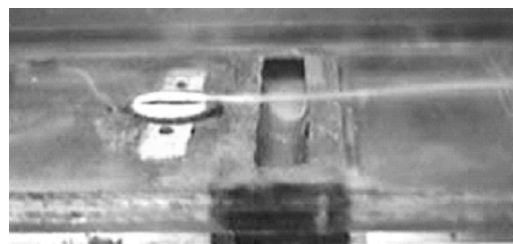


Рис. 2. Візуалізація великомасштабної вихрової структури.

Тому потік, який циркулює в траншеї, можна поділити на квазі двовимірний зворотно-циркуляційний потік в серединній частині і складний за своїм характером рух рідини в периферійних, прилеглих до бічних стінок зонах.

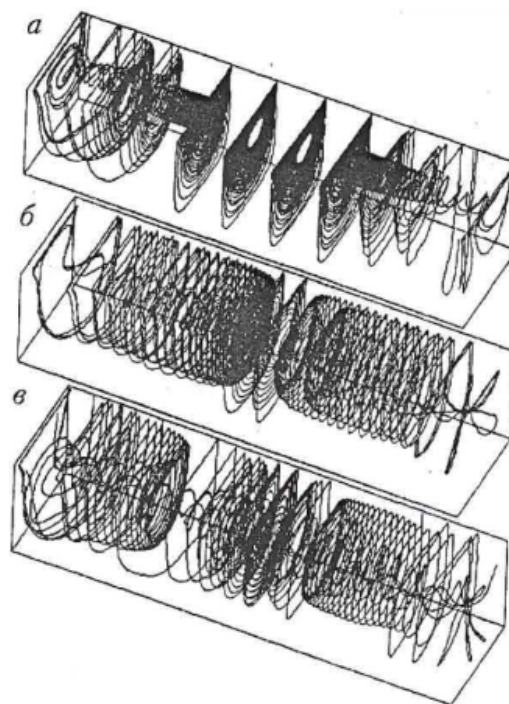


Рис. 3. Вихрові структури в прямокутному заглибленні: а)  $Re = 10^2$ ; б)  $Re = 4 \cdot 10^2$ ; в)  $Re = 10^3$

Аналіз результатів візуалізації 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.

## 2. Чисельне моделювання

Для чисельного розв'язку задачі обтікання пластини з лункою запропоновано використовувати стандартну чисельну модель **rimpleFOAM** відкритого пакету **OpenFOAM**, що реалізує нестационарні рівняння Нав'є-Стокса для нестисливої рідини:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\nabla \mathbf{v}) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{v},$$

$$\nabla \mathbf{v} = 0.$$

де  $\mathbf{v} = \{v_x, v_y, v_z\}$  – вектор швидкості,  $p$  – тиск,  $\rho$  – густина рідини.

Чисельне моделювання системи рівнянь руху в пакеті **OpenFOAM** проводиться методом кінцевих об'ємів в декартовій системі координат. Інтеграли 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++**, в термінах якого більшість математичних диференціальних і тензорних операторів в програмному коді рівнянь може бути представлена в зрозумілій формі, а метод дискретизації та розв'язку для кожного оператора може бути обраний вже користувачем в процесі розрахунку. Розрахункова область являє собою

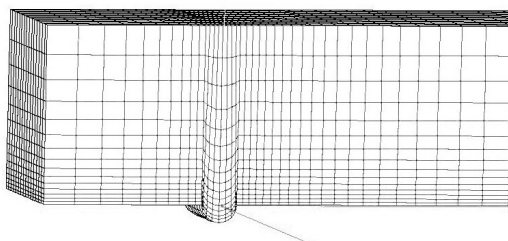


Рис. 4. Схема побудови блочно-структурованої сітки у центральному перерізі площини  $xy$

паралелепіпед, на дні якого на відстані 0.15 м від початкового перерізу впоперек зовнішній течії розташована лунка напівциліндричної форми діаметром  $d = 0.02$  м і довжиною  $l = 0.05$  м. На вході в розрахункову область була задана постійна швидкість  $U_0$ , на дні – умова прилипання, на верхній границі – просковзування. У відкритому пакеті **SALOME** було створено блочно-структуровану розрахункову сітку, схему якої показано на рис. 4. Умови адекватного врахування мікомасштабних елементів вихрової течії накладає суттєві обмеження на мінімальний просторовий крок поблизу обтічної поверхні та всередині заглиблення. 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 ви-

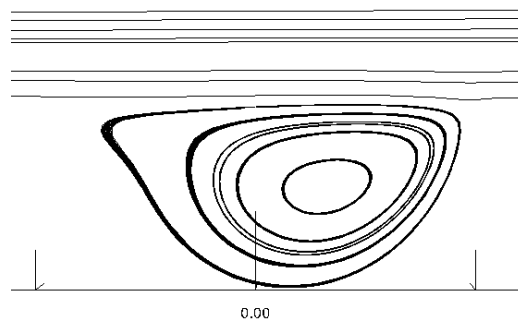
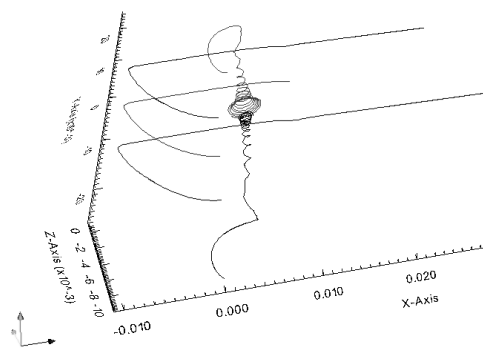


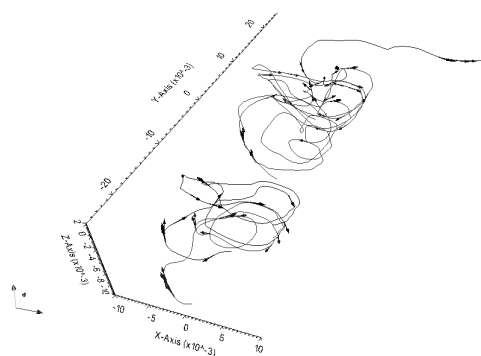
Рис. 5. Лінії току в поздовжньому перерізі при  $z = 0$  при швидкості обтікання  $Re = 2 \cdot 10^3$

сокоточних обчислювальних систем. Для економного використання розрахункових ресурсів запропоновано згущення сітки в напрямку до лунки. В двовимірній постановці було використано розрахункову сітку із загальною кількістю  $5 \cdot 10^6$  комірок. Візуалізація результатів розрахунків виконувалася з використанням відкритого графічного пакету **ParaView**.

Результати розрахунку в тривимірній постановці показали, що лінії току всередині лунки замкнуті так само, як і у двовимірній стаціонарній задачі (рис. 5). Всередині лунки формується циркуляційна зона, яка утворюється взаємодією рідини в лунці та шару зсуву, що сходиться з гострої кромки. При невеликих числах Рейнольдса формується трансверсальна завихореність практично по всьому об'єму лунки, крім невеличких зон поблизу бокових стінок. На рис. 6а



(а)  $Re = 2 \cdot 10^3$



(б)  $Re = 1.6 \cdot 10^4$

Рис. 6. Лінії току

наведено миттєві лінії току при швидкості обтікання  $U_0 = 0.1$  та  $0.8$  м/с. Контрольні точки, з яких беруть початок лінії току, розташовано на дні лунки по всій довжині. Видно, що при невеликих числах Рейнольдса  $Re = \frac{U_0 d}{\nu} = 2 \cdot 10^3$  тривимірність проявляється тільки безпосередньо біля бокових стінок лунки (рис. 6а). Абсолютні значення поздовжньої та вертикальної завихореності на порядок менше трансверсальної.

З ростом швидкості зовнішнього потоку завихореність стає суттєво тривимірною та нестаціонарною. З ростом числа 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. 6б). Спостерігається складна нестаціонарна картина, що супроводжується періодичними викидами із лунки.

## Висновки

Проведено фізичне та чисельне моделювання тривимірної вихрової течії в напівциліндричному заглибленні. Результати проведених розрахунків показали задовільну роботу запропонованої методики чисельного моделювання. Еволюція та просторовий розподіл структурних елементів течії відповідає експериментальним даним. Виявлено квазістійкі великомасштабні та дрібномасштабні системи вихорів, число яких росте зі збільшенням швидкості обтікання. Перед заглибленням потік, який набігає, гальмується. Із заглиблення вихрові системи періодично викидаються у прилеглий шар.

## Подяка

Автори висловлюють вдячність д.т.н. В.А. Воскобійнику та к.т.н. А.В. Воскобійнику за надання консультацій та можливість проведення експерименту в лабораторії ІГМ НАНУ.

## Перелік використаних джерел

1. Турик В.Н., Воскобойник В.А., Воскобойник А.В. Управление структурой течения внутри полуглинистого углубления // Вісник НТУУ «КПІ». — 2016. — Т. 78, № 3. — С. 112–123.
2. Халатов А.А. Поверхневий генератори вихорів: фундаментальні досягнення і нові застосування // Вісник НАН України. — 2005. — № 11. — С. 14–18.
3. Liu J., Xie G., Simon T. W. Turbulent flow and heat transfer enhancement in rectangular channels with novel cylindrical grooves // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2015. — Vol. 81. — P. 563–577.
4. Experimental investigation of heat transfer and drag on surfaces coated with dimples of different shape / A.I. Leontiev, N.A. Kiselev, Yu.A. Vinogradov et al. // International Journal of Thermal Sciences. — 2017. — Vol. 118. — P. 152–167.
5. Lee J. H., Lee C.-S., Cho K. Y. Enhanced Cell Adhesion to the Dimpled Surfaces of Golf-Ball-Shaped Microparticles // ACS Applied Materials & Interfaces. — 2014. — Vol. 6, no. 19. — P. 16493–16497.
6. Makal K. Demonstrates Lexus-Pursuit of Perfection in Dimples. — 2004. — Access mode: [www.uemedia.net](http://www.uemedia.net).
7. Халатов А. А., Коваленко Г. В., Мейрис А. Ж. О применении трубчатых теплообменных поверхностей с углублениями в регенераторах ГТУ // Промышленная теплотехника. — 2017. — Т. 39, № 5. — С. 47–54.
8. Воскобойник А.В. Пассивное управление формированием вихревых структур внутри полуглинистого углубления // Вісник Донецького національного університету. Сер. А: Природничі науки. — 2009. — Т. 1. — С. 173–182.