

УДК 532.5.517

В.А. Воскобійник, к.т.н., с.н.с.

ВИХРОВА ТЕЧІЯ ВСЕРЕДИНИ ГЛИБОКОЇ СФЕРИЧНОЇ ЛУНКИ

Інститут гідромеханіки НАН України
E-mail: vlad.vsk@gmail.com

Наведено результати експериментальних досліджень особливостей формування вихрової течії, яка генерується при турбулентному обтіканні глибокої сферичної лунки. Візуалізація течії показала, що всередині лунки формуються і розвиваються похилі асиметричні великомасштабні вихори. Ці вихрові структури перемикаються із одного похилого розташування в лунці в інше, що призводить до збурювання низькочастотних коливань. У ході еволюції асиметричні вихори викидаються над кормовою стінкою лунки. Кут їх нахилу та викиду збільшується з ростом числа Рейнольдса.

Ключові слова: вузький гідродинамічний канал, глибока сферична лунка, когерентна вихрова структура, симетричний та асиметричний вихор

Постановка проблеми

Використання заглиблень на обтічній поверхні різноманітної форми та геометричних розмірів широко застосовується при підвищенні тепло- та масопереносу в енергозберігаючих технологіях, для зменшення опору при обтіканні поганообтічних тіл.

За відповідних умов обтікання заглиблень усередині них утворюються великомасштабні когерентні вихрові системи, які генерують інтенсивні пульсації швидкості, тиску, температури, завихореності та інших параметрів турбулентності, що використовується у засобах керування примежовим шаром.

Утворення штучного вихрового шару над обтічною поверхнею призводить до зміни структури течії, її аерогідродинамічного шуму, вібрації та опору обтічної поверхні.

Залежно від режиму обтікання геометричних параметрів і форми заглиблення всередині останніх генеруються вихрові структури різних масштабів, напрямків руху, частот обертання та осциляцій як у просторі, так і в часі. Ці вихрові структури, взаємодіючи між собою та обтічною поверхнею, за певних умов викидаються назовні з заглиблення, змінюючи структуру примежового шару та інтегральні характеристики тіл обтікання, процесів теплообміну та змішування, якості аеродинамічних профілів та ін. [1–3].

Аналіз досліджень і публікацій

Вихрові структури різних масштабів, що генеруються всередині заглиблення на обтічній поверхні, являють собою не хаотичну групу вихорів, а самоорганізовані вихрові структури, які взаємно координують свою поведінку.

Низькочастотні великомасштабні когерентні вихрові структури, що формуються всередині лунки з циркуляційної течії, та дрібномасштабні вихори, які утворюються у зсувному шарі та місці його взаємодії з кормовою стінкою лунки, викидаються з заглиблення, генеруючи широкий спектр пульсацій та аерогідродинамічного шуму з інтенсивними тональними компонентами [4–6].

У глибоких лунках при взаємодії вихрових структур зсувного шару з кормовою стінкою виникають автоколивання в моді зсувного шару, а також у слідовій моді [7].

В останній моді процес коливань визначається відривом великомасштабного вихора з переднього краю заглиблення подібно тому, що спостерігається позаду погано обтічного тіла.

У процесі формування вихора зовнішня течія проникає в заглиблення періодично і досягає його дна. У деякій точці вихор відривається від передньої стінки, а потім викидається назовні з заглиблення. Цей режим характеризується значним збільшенням опору.

Автори роботи [8] встановили, що перехід від зсувної до слідової моди відноситься до механізму абсолютної нестійкості.

Область інтенсивної оберненої течії всередині лунки є більшою в режимі слідової моди відносно моди зсувного шару, що показує можливість абсолютно нестійких профілів швидкості.

На підставі проведених експериментів і чисельного моделювання вихрової течії у глибоких сферичних лунках ($h/d=0,5...1,0$), які обтікає течія з числами Рейнольдса, що розраховані за діаметром лунки і швидкості потоку:

$$Re_d = Ud/\nu = 1800...11000$$

запропоновано [9] таку картину формування великомасштабних вихорів усередині лунки.

В отворі заглиблення генерується пара протилежно обертових вихорів.

Незалежно від заглиблення лунки в потік із лунки викидається три вихрові пари, а також вертикальний вихор. Найінтенсивнішим є центральний вихор, а дві вихрові пари, що розташовуються поблизу протилежних бокових країв, мають найменшу енергію. Викид вихрових структур назовні з глибокої сферичної лунки відбувається нестійко і періодично з формуванням вторинних течій як усередині лунки, так і в її ближньому сліді.

У разі збільшення швидкості течії та заглиблення лунки частота викидів центрального вихора зростає. Генерація і викид вторинних вихрових систем із бокових частин сферичної лунки спостерігається на менших час-тотах.

У роботі [9] вказано, що розташування первинного і вторинного вихорів збігається з максимумами нормальних напруг Рейнольдса.

Отже, існує тісний зв'язок між просторовим розташуванням вихорів і турбулентними напругами Рейнольдса.

Усередині відкритих заглиблень, особливо які характеризуються значною тривимірністю, відбувається складний вихровий рух, який залежить від багатьох параметрів.

За відповідних умов когерентні вихрові структури, що мають досить широкий масштаб, викидаються періодично, а нерідко і аперіодично назовні з обтічного заглиблення.

Широке застосування поверхонь із заглибленнями спеціальної форми і розташуванням їх як поодинокі на поверхні, так і в лункових ансамблях потребує вивчення особливостей формування таких великомасштабних вихорів, а також визначення механізмів їх генерації для використання штучно створених вихрових систем у засобах керування примежовим шаром і відривними течіями.

Мета роботи – експериментально дослідити особливості формування та розвитку великомасштабних вихрових структур усередині глибокої сферичної лунки на пласкій поверхні у вузькому гідродинамічному каналі для різних режимів її обтікання та визначити механізм їх викиду назовні з обтічного заглиблення в його ближній слід.

Експериментальна установка

Експериментальні дослідження проводилися у вузькому гідродинамічному каналі (рис. 1) університету м. Росток (Німеччина).

Вода у канал, що мав довжину робочої частини близько 1,3 м, ширину 0,2 м і висоту 0,015 м, подавалася за допомогою насоса

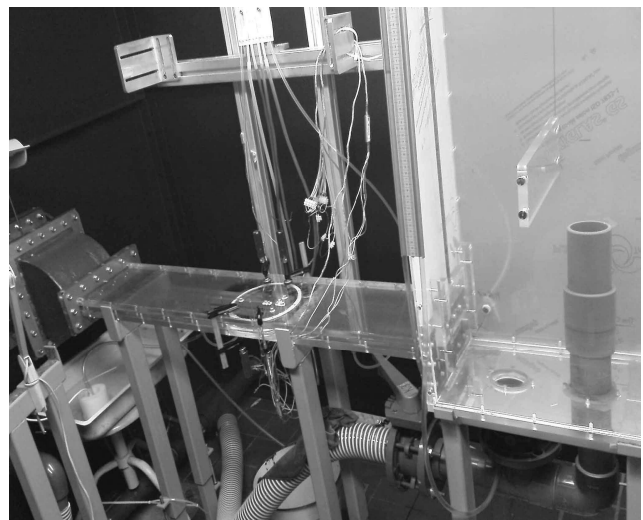


Рис. 1. Експериментальна установка з вузьким гідродинамічним каналом

через заспокійливу камеру та дифузор у резервуар, утворюючи установку замкненого типу.

Середньо витратна швидкість у каналі змінювалася від 0,2 до 1,3 м/с за допомогою заслінок, які встановлено на трубопроводах оборотного зв'язку.

Канал зроблено з товстого полірованого органічного скла, поверхня якого гідравлічно гладка, для проведення візуальних і лазерних доплеровських вимірювань швидкості.

Усередині нижньої стінки каналу зроблено отвір діаметром 0,18 м, в який встановлювалася дискова вставка, що має у своєму центрі сферичну лунку діаметром 0,046 м і глибиною 0,012 м.

Таким чином, лунка мала заглиблення 0,26, а її поверхня, як і поверхня дискової вставки полірувалися, щоб придати обтічній поверхні гідравлічну гладкість.

Кріплення вставки на стінці каналу дозволяло повертати її на довільний кут, що значно розширило можливість проведення візуальних й інструментальних досліджень.

Візуальні дослідження проводилися із застосуванням водорозчинних фарб і чорнил, що подавалися через мініатюрні отвори діаметром 0,0006 м на обтічній поверхні (рис. 2), а також за допомогою контрастного водорозчинного покриття, яке змивалося потоком.

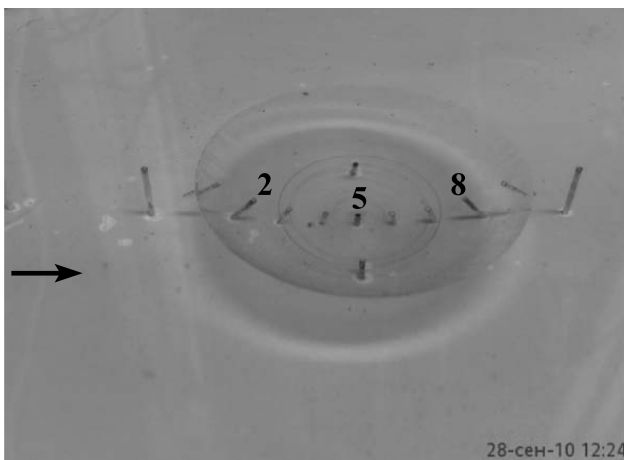


Рис. 2. Розташування отворів для подачі контрастних речовин у сферичній лунці

Змив цього покриття в першу чергу відбувався там, де спостерігалися найбільші зсувні напруги на обтічній поверхні.

Відеоматеріал реєструвався цифровими відеокамерами та фотоапаратами, а потім оброблявся і аналізувався за допомогою спеціальних комп'ютерних графічних станцій на базі персональних комп'ютерів із використанням стандартного програмного продукту та спеціально створених алгоритмів обробки відеокадрів.

Візуальні дослідження визначають особливості генерації великомасштабних вихрових структур усередині сферичної лунки, а також оцінюють їх динамічні та кінематичні характеристики.

Результати досліджень

Як показали результати візуальних досліджень при подачі контрастних речовин через отвори на обтічній поверхні сферичної лунки і в її околі для різних швидкостей течії, переміщення фарби всередині лунки та за нею суттєво залежить від режиму течії.

Наприклад, для швидкості потоку $U = 0,43$ м/с, якій відповідає число Рейнольдса $Re_d = Ud/\nu = 20000$ переміщення контрастної речовини, яка подавалася через отвори 2, 5, 8 (рис. 2) показано на рис. 3.

Для цього режиму течії чорнила переносяться вздовж лунки та в її ближньому сліді симетрично напрямку руху рідини в гідродинамічному каналі.

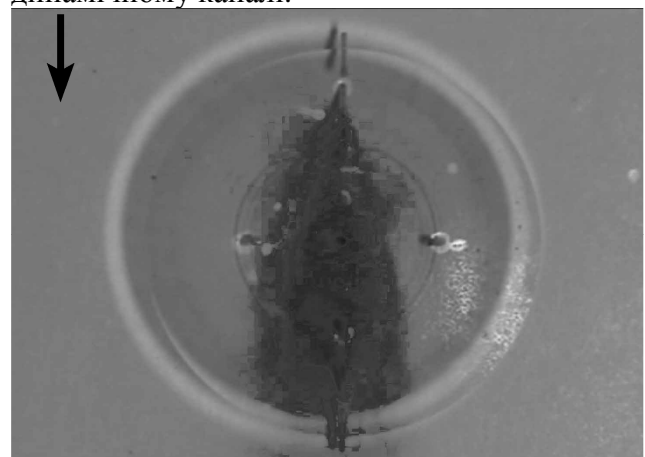


Рис. 3. Візуалізація симетричної вихрової течії всередині лунки та її ближньому сліді

Коли швидкість течії в каналі збільшилась до 0,86 м/с ($Re_d=40\ 000$), то характер переміщення контрастної речовини всередині глибокої сферичної лунки і позаду неї змінився (рис. 4).

По-перше, порушилася симетричність переносу чорнил щодо напрямку потоку як усередині лунки, так і в її ближньому сліді.

По-друге, відеозапис руху барвників в околі лунки показав, що викид чорнил назовні з лунки та їх обертання всередині лунки стало періодично, а точніше, квазіперіодично, перемикається чи перекидається з одної частини лунки в іншу відносно її серединного перетину, що показано на рис. 4. При перемиканні, чорнила, які подаються через отвори 5 і 8 на дні лунки та на її кормовій стінці (рис. 2), переміщуються в бік лунки, над якою спостерігаються й викиди чорнил назовні (зліва на рис. 4, *a* і справа на рис. 4, *б*).

У той же час барвник, який подавався в потік через отвір 2 (передня стінка сферичної лунки), переносився у протилежний бік.

Шлях переносу чорнил із отворів на дні лунки та на кормовій її стінці значно більший, ніж той, що проходять чорнила з отвору на передній стінці лунки. Знаходження чорнил в одному з напрямків спостерігається протягом майже 30–40 с, а потім відбувається перемикання картини течії на протилежний бік лунки. У цьому положенні контрастна речовина знаходиться менший час до 20 с і знову спостерігається перемикання.

При подачі контрастних речовин через отвори на бокових сторонах сферичної лунки їх рух, головним чином, спостерігається в одну й ту ж сторону (рис. 5).

При цьому чорнила, які подавалися з отвору на дні лунки, також переносяться паралельно струменям із бокових отворів.

Переміщення барвників відбувається перпендикулярно осі асиметричного великомасштабного вихора, що формується всередині лунки.

Згідно з рис. 5, кут нахилу струменів чорнил, які переміщуються з отворів, становить приблизно $\pm 40\text{--}45^\circ$ щодо напрямку течії.

Як показують матеріали відеозйомки, пересування чорнил усередині лунки і в її ближньому сліді має осцилюючий характер з частотою, яка значно перевищує частоту перемикання вихорового руху всередині лунки. При цьому частота перемикання модулює весь рух усередині лунки. Для цього режиму течії викид чорнил назовні зі сферичної лунки спостерігається під кутом, близьким до $\pm 45^\circ$ щодо напрямку течії.

Коли середньовитратну швидкість течії в гідродинамічному каналі збільшили до 1,3 м/с, якій відповідає число Рейнольдса $Re_d=60\ 000$, то переміщення чорнил усередині лунки і позаду неї не зазнали суттєвих якісних змін, хоча з'явилися і деякі відмінності (рис. 6, 7).

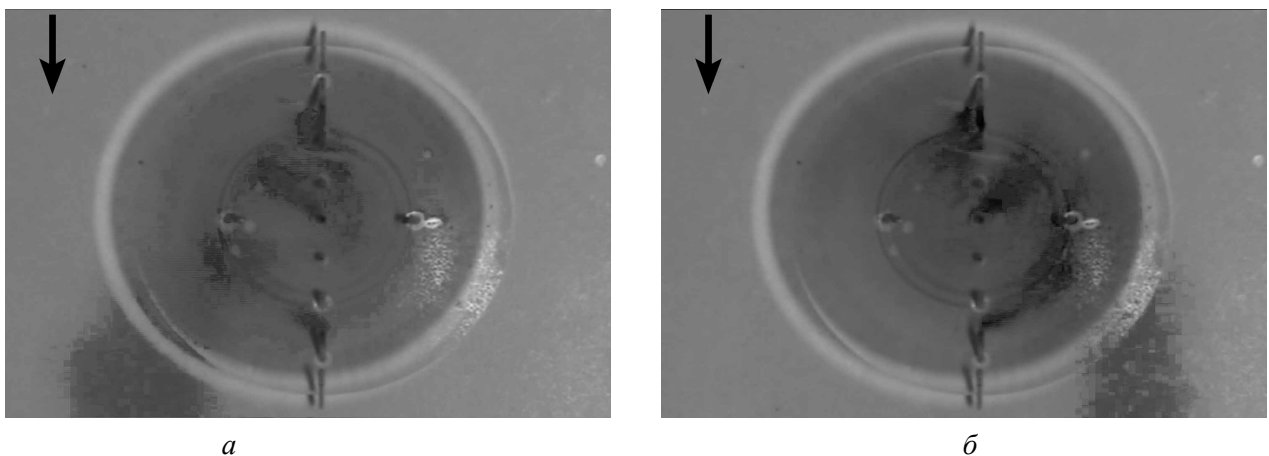


Рис. 4. Візуалізація перемикання вихрової течії всередині глибокої сферичної лунки для числа Рейнольдса $Re_d=40\ 000$:

a – викид вихора зліва від повздовжньої осі лунки;

б – викид вихора справа

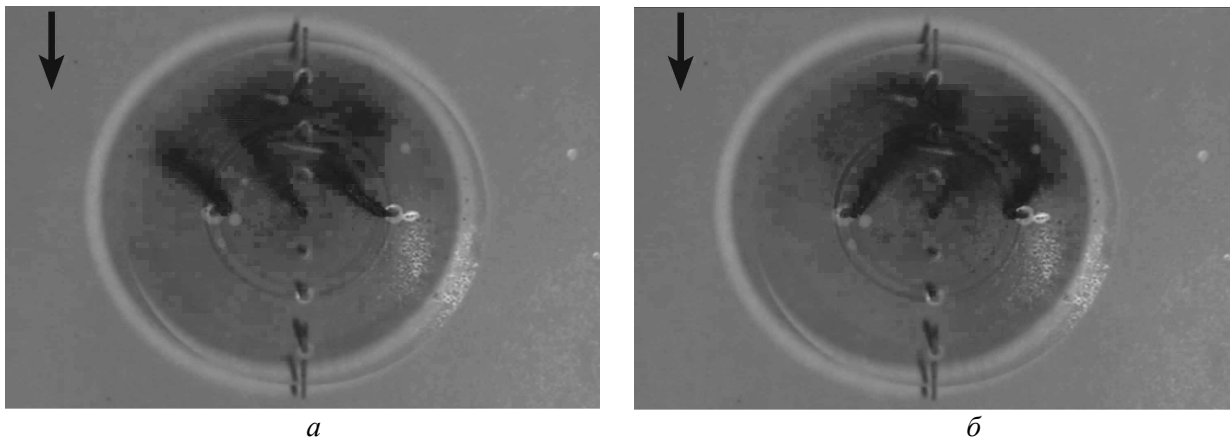


Рис. 5. Візуалізація переносу струменів чорнил із бокових отворів сферичної лунки та її дна для числа Рейнольдса $Re_d = 40\ 000$:

a – формування джерела вихору на передній стінці лунки справа;
б – формування джерела вихору зліва

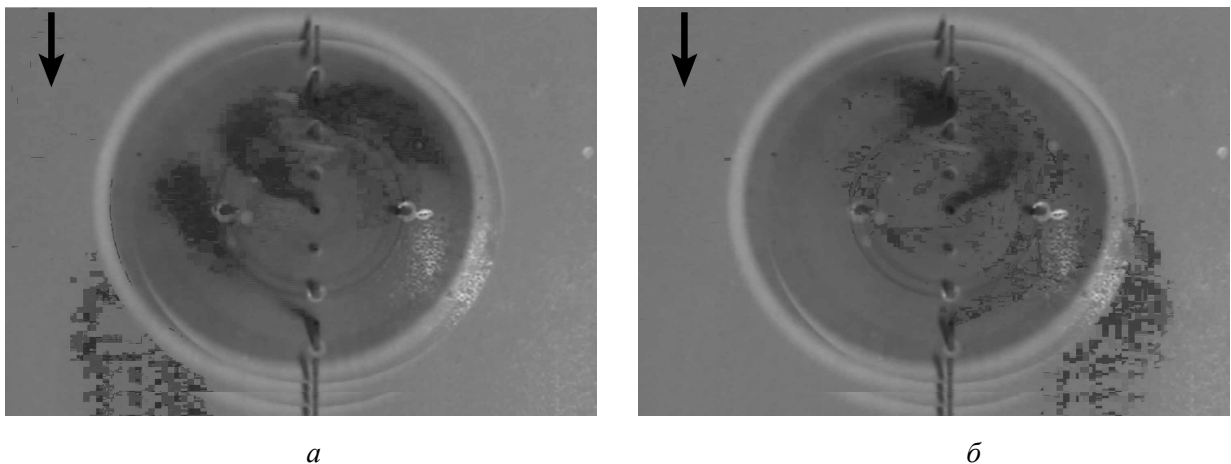


Рис. 6. Візуалізація перемикання вихрової течії всередині глибокої сферичної лунки для числа Рейнольдса $Re_d = 60\ 000$:

a – викид вихора зліва від повздовжньої осі лунки;
б – викид вихора справа

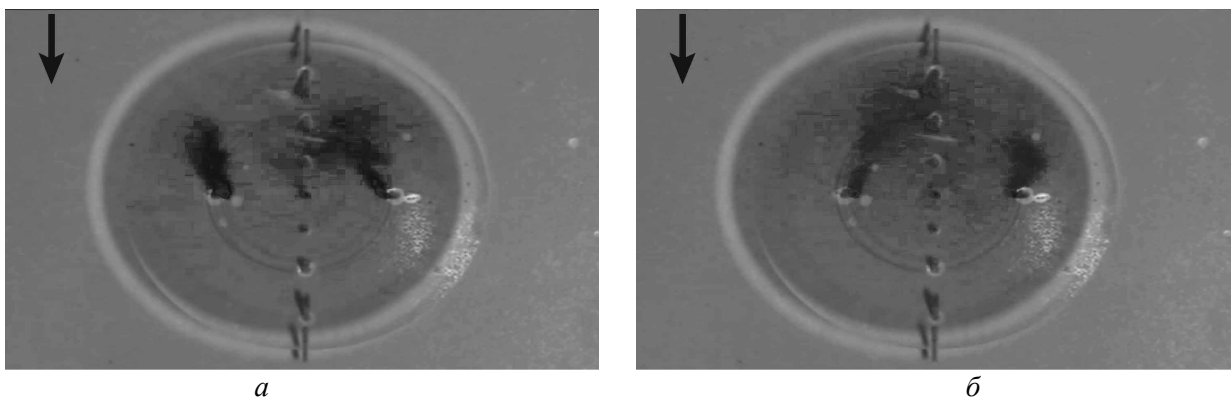


Рис. 7. Візуалізація переносу струменів чорнил із бокових отворів сферичної лунки та її дна для числа Рейнольдса $Re_d = 60\ 000$:

a – формування джерела вихору на передній стінці лунки справа;
б – формування джерела вихору зліва

Струмені чорнил пересуваються всередині лунки на більші відстані, особливо струмінці, які подавалися через отвір 2 (рис. 2).

Траєкторія руху контрастних речовин нахилється під більшими кутами відносно напрямку течії, що особливо добре видно по струменям чорнил, які витікають із бічних отворів (рис. 7). Їх кут нахилу досяг майже $\pm 60\text{--}65^\circ$. Перемикання вихрової течії відбувається з більшою частотою та чорнила в одній із частин сферичної лунки перебувають до 20–30 с. При цьому перемикання відбувається аперіодично. Викид контрастної речовини назовні з лунки спостерігається під більшим кутом (близько $\pm 60^\circ$) щодо напрямку потоку.

Аналіз результатів

Як показали результати візуальних досліджень, залежно від режиму течії, що обтікає глибоку сферичну лунку на пласкій поверхні, всередині лунки формується складний вихровий рух, генеруються і розвиваються різні за формою, масштабом, напрямком руху і частотою обертання і коливання у просторі та часі великомасштабні когерентні вихрові структури та дрібномасштабні вихори, які періодично викидаються назовні з лунки при відповідних умовах її обтікання.

Для низькошвидкісного ламінарного потоку в закритому глибокому сферичному заглибленні в умовах появи відривної течії всередині лунки формуються симетричні вихрові системи, що підтверджують результати експериментальних дослідів інших авторів [2; 4], а також результати чисельних розрахунків [1; 5; 10].

Всередині сферичної лунки формуються дві симетричні вихрові структури, джерела яких розташовуються на дні лунки ближче до її передньої стінки. Ці вихрові структури обертаються протилежно одна до одної та у своїх верхніх частинах з'єднуються (при своєму зростанні), утворюючи аркоподібну структуру, що знаходиться всередині лунки. Коли ця структура збільшується в розмірі і досягає масштабів лунки, то потік відриває її верхівку, утворюючи два вертикальні

вихори, що викидаються назовні з лунки, симетрично повздовжньої осі останньої.

У деякий момент часу пара вихорів розривається і та їх частина, що залишилася всередині лунки знову з'єднується в аркоподібний вихор, який поступово збільшується за рахунок циркуляційної рідини, що формується в передній частині лунки.

Таким чином, відбувається періодичний викид симетричних вихрових систем назовні з лунки і генеруються аркоподібні та вертикальні вихори всередині лунки, разом із формуванням циркуляційної течії та зсувного шару.

При збільшенні швидкості течії, що відповідає турбулентному режиму обтікання поверхні з сферичною лункою, симетричність формування та викиду вихрових структур усередині лунки порушується і генеруються асиметричні когерентні великомасштабні вихори, які мають нахилене розташування відносно напрямку течії. Ці вихрові структури мають джерело на передній стінці лунки в її придонній частині трохи набік від серединного перетину лунки. Викидається ця асиметрична нахилена вихрова структура назовні з сферичної лунки під кутом, близьким до $\pm 45^\circ$ для $Re_d = 40\ 000$.

Як показали досліди, у разі підвищення швидкості течії кут викиду збільшується.

Для турбулентного режиму спостерігається перемикання вихрової течії з одного нахилоного розташування в інше. Це призводить до появи викиду асиметричної структури над протилежною боковою частиною кормової стінки лунки. Подібне явище спостерігалось при турбулентному обтіканні півсферичної лунки на пласкій поверхні, що відмічалось у роботі [3].

Висновки

1. За малої середньовитратної швидкості в каналі, якій відповідає число Рейнольдса $Re_d = 20\ 000$, усередині сферичної лунки спостерігається симетрична великомасштабна аркоподібна вихрова система, що складається з двох симетричних вихрових

структур, джерела яких знаходяться на бокових придонних сторонах лунки, ближче до її передньої стінки. Аркоподібна система при своїй еволюції, збільшуючись у розмірі, періодично викидається поблизу серединного перетину лунки. При цьому вона іноді розривається в середній частині, утворюючи пару вертикальних вихорів, які при збільшенні швидкості вироджуються в асиметричні вихрові системи.

2. При числах Рейнольдса, які перевищують 40 000, усередині лунки формуються асиметричні вихрові структури, які розташовуються похило щодо напрямку течії. Джерело асиметричного когерентного великомасштабного вихора розташовується на передній стінці лунки трошки набік від поздовжньої осі сферичної лунки, а витік на протилежній боковій частині кормової стінки лунки. При збільшенні швидкості течії інтенсивність асиметричних нахилених вихорів зростає і вони розташовуються під більшим кутом щодо напрямку потоку в каналі ($\pm 40 \dots 45^\circ$ для $Re_d = 40\,000$ і $\pm 60 \dots 65^\circ$ для $Re_d = 60\,000$).

3. Із появою перемикаючого режиму вихрової течії викид асиметричних великомасштабних вихрових структур спостерігається над кормовою стінкою глибокої сферичної лунки під кутом, до $\pm 45^\circ$ щодо напрямку течії для $Re_d = 40\,000$. Коли швидкість потоку зростає, то збільшується і кут викиду асиметричних нахилених вихорів. Для $Re_d = 60\,000$ він становить $\pm 60^\circ$.

Література

1. *Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование)* / под ред. А. В. Ермишина, С. А. Исаева. – М.: СПб., 2001. – 360 с.

2. *Халатов А.А.* Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок) / А.А. Халатов. – К.: ИТТФ НАНУ, 2005. – 140 с.

3. *Источники псевдозвуковых пульсаций давления при обтекании сферической лунки* / Г.А. Воропаев, А.В. Воскобойник, В.А. Воскобойник та ін. // Акустичний вісник. – 2008. – **11**, № 3. – С. 27–49.

4. *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.

5. *Исаев С.А.* Численное моделирование смерчевого теплообмена при обтекании поверхностей с лунками (состояние и перспективы) / С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, Н.В. Корнев // VI Минский междунар. форум по теплообмену, ММФ 2008. – Минск (Беларусь). – 2008. – С. 1–9.

6. *Воскобойник В.А.* Взаимные корреляции и спектры турбулентных пульсаций давления на обтекаемой поверхности лунки / В.А. Воскобойник // Акустичний вісник. – 2011. – **14**, № 2. – С. 23–34.

7. *Gharib M.; Roshko, A.* 1987. The effect of flow oscillations on cavity drag. – J. Fluid Mech. 177: P. 501–530.

8. *Rowley, C.W.; Colonius, T.; Basu, A.J.* 2002. On self-sustained oscillations in two-dimensional compressible flow over rectangular cavities. – J. Fluid Mech. 455: P. 315–346.

9. *Ligrani, P. M.; Harrison, J.L.; Mahmood, G.I.; Hill, M.L.* 2001. Flow Structure due to dimple depressions on a channel surface. – Phys. Fluids. **13**, N 11: P. 3442–3451.

10. *Вихревая интенсификация теплоты и импульса при обтекании рельефов с лунками* / П.А. Баранов, Г.А. Воропаев, В.А. Воскобойник и др. // Материалы X Междунар. школы-семинара «Модели и методы аэродинамики». – М.: МЦНМО, 2010. – С. 12–14.