

# Вихровий рух усередині поперечно обтічної траншеї

В.М. Турик<sup>1</sup> • В.А. Воскобійник<sup>2</sup> • А.В. Воскобійник<sup>2</sup>

1 - КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна;

2 – Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна

Received: 02 July 2018 / Accepted: 04 September 2018

**Анотація.** Експериментально досліджено особливості генерації та еволюції вихрових структур, що утворюються усередині поперечно обтічної траншеї різного заглиблення та видовження, яку розташовано на пласкій поверхні. Дослідження проведені в аеродинамічній трубі та гідродинамічному лотку за допомогою візуалізації потоку в умовах різних режимів течії. В експериментах використані димова візуалізація, контрастні фарбники та водорозчинні покриття з фіксацією траєкторій руху рідких частинок фото - та відеоапаратурою. Виявлено місця та закономірності формування вихрових утворень, зроблено оцінки їх масштабів, зафіксовано частоти та локалізація викидів дрібномасштабних і великомасштабних вихрових структур назовні із траншеєю в залежності від режимів обтікання пластини з геометричною неоднорідністю. Отримані дані є важливим для урахування особливостей обтікання поверхонь літальних та підводних апаратів, а також для розробки прогресивних енергозберігаючих технологій, в основу яких можуть бути закладені методи пасивного керування примежовим шаром за допомогою зазначених вище генераторів вихорів.

**Ключові слова:** поперечно обтічна траншея; аеродинамічна труба; гідродинамічний лоток; візуалізація потоку; вихрова структура

## Вступ

Вивчення особливостей вихороутворення усередині заглиблень на обтічної поверхні обумовлено широким застосуванням поверхонь з різноманітним лунковим рельєфом в аерогідродинаміці і теплоенергетиці. Відомо [1-3], що в залежності від режимів обтікання та геометричних параметрів заглиблень усередині них формуються різноманітні за формою та інтенсивністю вихрові структури та струменеві течії. Генерація квазістійких когерентних вихрових структур за допомогою траншей та лунок дає можливість керувати примежовими шарами, що використовується при створенні пасивних засобів керування, які знижують гідродинамічний опір, шум обтікання та вібрації обтічних поверхонь [4-6]. Такі вихрові структури, поряд з хаотичним і нестійким дрібномасштабним вихороутворенням усередині заглиблень та їх викидом у зовнішній потік, успішно застосовуються в енергозберігаючих технологіях, де за допомогою так званої "гри вихорів" [1, 2, 7, 8] вдається значно збільшити теплоперенос і процеси змішування робочої рідини. Теоретичне або чисельне розв'язання задач оптимізації зазначених процесів далеко не завжди дають адекватні результати. У зв'язку з цим виявляється найбільш надійним експериментальне вивчення особливостей вихороутворення усередині заглиблень, а також кінематичних і динамічних характеристик вихрової та струминної течій, що генеруються складними обтічними поверхнями.

Результати експериментальних та чисельних досліджень обтікання поверхонь з розташованими рядами заглиблень [2, 8, 9] показують, що вихрова течія в них визначається, головним чином, структурою вихрового потоку в перших рядах заглиблень на поверхні. Вони обумовлюють просторово-часові характеристики вихрових структур, які характерні для заданих умов течії, форми та розмірів заглиблень [1, 2, 8]. Проте, основні механізми вихороутворення, які притаманні одиночному заглибленню, зберігаються і в інших, розташованих в ансамблях, а саме: формування та розвиток зсувного шару, де генеруються однойменні вихрові структури, які конвектують униз за потоком та взаємодіють з кормовою стінкою; наявність циркуляційної та струминної течій, з яких формуються великомасштабні вихрові системи, що нелінійно взаємодіють з вихровими структурами зсувного шару; тривимірні осциляції вихрового руху усередині заглиблення з генерацією резонансних мод; викиди вихрових систем назовні із заглиблення, їх взаємодія із зовнішнім потоком та інші гідродинамічні явища [1, 2, 10-12]. Тому вивчення особливостей вихрової течії в одиночних лунках і траншеях залишається актуальним, а визначення їх оптимальної форми та розмірів для заданих умов течії.

### Мета роботи

Мета експериментальних досліджень — визначити особливості формування й розвитку когерентних вихрових систем усередині поперечно розташованої до незбуреного потоку, що набігає, траншеї, яку зроблено на плоскій поверхні. Передбачено дослідження обтікання за умов різних режимів течії двох видів обтічних заглиблень: напівциліндричної та глибокої овальної траншеї. Для візуалізації потоку використовуються димова візуалізація, контрастні фарбники та водорозчинні покриття, траєкторії руху яких фіксуються відео та фотоапаратурою з подальшою обробкою відеоматеріалів на графічній комп'ютерній станції.

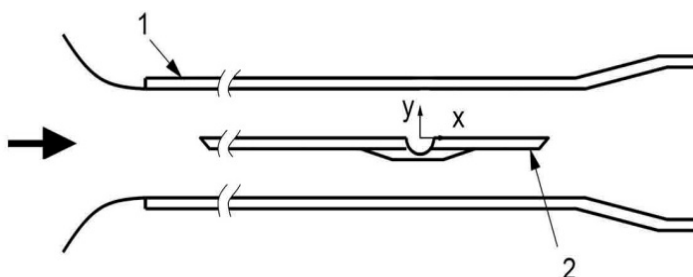


Рис. 1. Схема аеродинамічної труби та система координат: 1 — вимірювальна ділянка; 2 — пластина з напівциліндричною траншеєю

### Експериментальний стенд та методика досліджень

Експериментальні дослідження структури течії усередині поперечно обтічних заглиблень на плоскій пластині проводились в аеродинамічній трубі та гідродинамічному лотку. В аеродинамічній частині експериментів використовувалася розроблена та виготовлена під керівництвом В.М. Турика (професора кафедри прикладної гідроаеромеханіки та механотроніки “КПІ ім. Ігоря Сікорського”) аеродинамічна труба відкритого типу (рис. 1). Атмосферний тиск, температура і вологість повітря, що утворювали потік у трубі, контролювалися у ході експериментів. Робоча частина аеродинамічної труби колового перерізу

діаметром 0,1 м була виготовлена з прозорого органічного скла і мала вимірювальну ділянку довжиною 0,7 м. На вході вимірювальної ділянки труби встановлювався забірник повітря довжиною близько 0,4 м, який було спрофільовано за законом лемніскати для забезпечення безвідриного входу повітряного потоку з досить рівномірним профілем швидкості. Детальніша інформація про експериментальний стенд надана, наприклад, у роботах [13, 14].

У поздовжньому перерізі вимірювальної ділянки аеродинамічної труби (рис. 1), в її горизонтальній площині, вздовж осі монтувалася пластина. Пластину було виготовлено з листового органічного скла довжиною 0,6 м, шириною 0,1 м і товщиною 0,004 м. Верхня робоча поверхня пластини була гідравлічно гладкою, а на нижній (неробочій поверхні) розташовувалися ребра жорсткості та обтічник з траншеєю. Через несиметричність обтікання верхньої і нижньої поверхонь пластини було виготовлено несиметричну форму крайових (носової та кормової) меж пластини у вигляді спряжених напівеліпсоїдів з відношенням півосей 0,001 м до 0,025 м з робочої сторони пластини та 0,003 м до 0,04 м з протилежної. Розвиток примежового шару вздовж пластини був натуральним (без використання штучних турбулізаторів потоку). На відстані  $x=0,5$  м від переднього краю вимірювальної пластини була зроблена одиночна напівциліндрична траншея завдовжки  $L=0,081$  м, діаметром  $D=0,01$  м і глибиною  $H=0,005$  м, або пара траншей діаметром  $D=0,019$  м і глибиною  $H=0,0095$  м (відповідно, заглиблення  $H/D=0,5$  та видовження  $L/D\approx 8$  і  $L/D\approx 4$ ). Поздовжня вісь заглиблення розташовувалась перпендикулярно напрямку швидкості потоку, що набігає. Експериментальні дослідження в аеродинамічній трубі проводилися з швидкостями потоку ( $U$ ) від 1,0 м/с до 20 м/с, яким відповідали числа Рейнольдса, що розраховані за довжиною пластини до переднього краю заглиблення,  $Re_x=Ux/\nu$  від  $3,2\cdot 10^4$  до  $6,4\cdot 10^5$ , та розраховані за діаметром заглиблення  $Re_D=UD/\nu$  від 1200 до 24000, де  $\nu$  — кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря. Згідно з даними термоанемометрування течії, в досліді товщина примежового шару перед заглибленням ( $\delta$ ) змінювалася від  $2,6\cdot 10^{-3}$  м до  $11,3\cdot 10^{-3}$  м, а товщина втрати імпульсу ( $\theta$ ) — від  $0,25\cdot 10^{-3}$  м до  $1,5\cdot 10^{-3}$  м.

Експериментальні дослідження обтікання водою овальної траншеї на плоскій пластині проводилися у гідродинамічному лотку (рис. 2) довжиною 16 м, шириною 1 м і глибиною 0,8 м. З метою проведення візуальних досліджень бокові стінки гідродинамічного лотку зроблені скляними. Вимірювальна ділянка розташовувалася на відстані 8,0 м від вхідної частини лотка. Більш детально інформацію про експериментальний стенд наведено у роботах [4, 11].

Гідравлічно гладка пластина з полірованого органічного скла товщиною 0,01 м, шириною 0,5 м і довжиною 2,2 м використовувалась в якості обтічної поверхні, в якій на відстані  $x=0,8$  м від носка пластини було зроблено локальну неоднорідність у вигляді овальної траншеї. Передній та кормовий край пластини були заокруглені. На бічних сторонах пластини розташовувалися кінцеві шайби (органічне скло товщиною 0,005 м і шириною 0,2 м). Овальна траншея складалася з двох напівсферичних сегментів діаметром  $D=0,04$  м, з'єднаних циліндричною вставкою довжиною та шириною  $D$ , глибиною  $H=0,009$  м (заглиблення траншеї  $H/D\approx 0,22$  та її видовження  $L/D=2$ ). Пластина з овальною траншеєю встановлювалася у вимірювальній ділянці гідродинамічного лотка на висоті 0,1 м від дна лотка, паралельно його поверхні. Глибина потоку та його швидкість регулювалися за допомогою спеціального обладнання, яке дозволяло змінювати ці параметри. Під

час проведення досліджень глибина потоку складала 0,4 м, а швидкість течії змінювалася від 0,02 м/с до 0,5 м/с, якій відповідали числа Рейнольдса  $Re_x$  від  $2 \cdot 10^4$  до  $4 \cdot 10^5$  та  $Re_D$  від 800 до 20000. В дослідях товщина прилежого шару перед заглибленням ( $\delta$ ) змінювалася від 0,01 м до 0,03 м, а товщина втрати імпульсу ( $\theta$ ) – від 0,001 м до 0,002 м (дані отримані за допомогою плівкового термоанемометру).

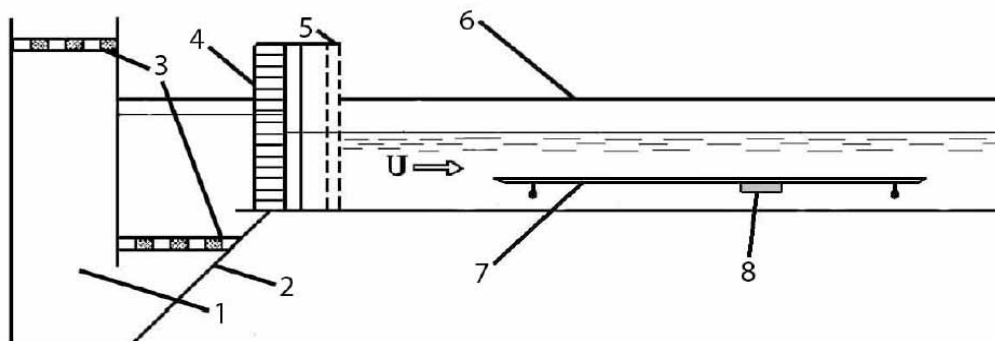


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 – заспокійлива камера; 2 – конфузтор; 3 – решітки; 4 – хонейкомб; 5 – сітки однорідної турбулізації потоку; 6 – гідродинамічний лоток; 7 – пластина; 8 – траншея

Картини візуалізації течії реєструвались за допомогою швидкісних кінокамер, відеокамер та цифрових фотоапаратів. Відео - та фотоматеріал фіксувався на відповідному обладнанні. На спеціально зробленій графічній комп'ютерній станції відеоматеріали оброблялися за допомогою відповідного програмного забезпечення та аналізувалися з визначенням якісних і кількісних характеристик вихрової течії. Похибка досліджень інтегральних та усереднених даних складала не більше, ніж 10 % (з надійністю 0,95 або  $2\sigma$ ).

### Результати досліджень

Дослідження в аеродинамічній трубі за допомогою димової візуалізації процесу формування та розвитку вихрової течії всередині і поблизу поперечно обтічної напівциліндричної траншеї, розташованої на обтічній плоскій пластині, проводилася для двох видів одиночних напівциліндричних траншей діаметром  $D=0,01$  м та  $D=0,019$  м і видовженням  $L/D=8$  та  $L/D=4$  з гострими краями для різних швидкостей потоку, що набігає. Дим утворювався в результаті згоряння масла на ніхромовому дроті, який розташовувався на фторопластовій шайбі врівень з поверхнею пластини вздовж її осі перед траншеєю. На рис. 3 наведено найбільш характерні кадри відеозйомки формування та розвитку вихрової течії у напівциліндричній траншеї діаметром  $D=0,01$  м і видовженням  $L/D=8$  та поблизу неї при швидкості потоку  $U=3,6$  м/с та  $Re_x=1,23 \cdot 10^5$  і  $Re_D=2300$ . На рис. 3а



Рис. 3. Візуалізація повітряного потоку поблизу напівциліндричної траншеї при  $Re_x=1,3 \cdot 10^5$ :  
а – формування великомасштабного вихору в порожнині траншеї; б – викид вихору із заглиблення назвні;  
в – стадія зародження великомасштабного вихору

показана стадія формування квазістійкого великомасштабного вихору в серединній частині заглиблення. На рис. 3б наведено момент викиду цього вихору із заглиблення назвні, про що свідчить роздвоєння димового сліду в кормовій частині траншеї та позаду неї. Струмінь диму, що йде паралельно пластині, розділився на дві частини, верхній його край істотно піднявся над пластинною майже на  $0,25D$ . На рис. 3в показано стадію зародження нового великомасштабного вихору, який в цей час ще притиснутий до кормової стінки заглиблення. Провівши статистичну обробку відеоматеріалів для даного режиму обтікання напівциліндричної

траншеї, вдалося оцінити частоту викидів великомасштабних вихрових систем назовні з неї. Вона дорівнювала  $f=(10\dots 20)$  Гц, викид відбувався ближче до кормової частини траншеї. Цим частотам викиду відповідають числа Струхала  $St=fD/U=0,03\dots 0,06$ . Викиди спостерігалися і для меншої швидкості обтікання, проте отримати чіткий ряд знімків не вдалося.

Для напівциліндричної траншеї з гострими краями діаметром  $D=0,019$  м і видовженням  $L/D=4$  для усіх досліджуваних швидкостей картини візуалізації більш розмиті, ніж для траншеї діаметром  $D=0,01$  м і видовженням  $L/D=8$ . Фіксувались викиди великомасштабної вихрової структури, але помітити їх можна було тільки у динаміці, контрастних знімків отримати не вдалось. Викиди фіксувались не чітко та не завжди регулярно, тому не вдалось встановити їх частоту [13, 14]. Окрім того, було перевірено наявність взаємного впливу двох напівциліндричних траншеї діаметром  $D=0,019$  м і видовженням  $L/D=4$ , розташованих на відстані приблизно  $2D$  одна від одною за потоком. На рис. 4 наведено фотознімок тандему траншеї. Генератор диму у вигляді шайби з ніхромовим дротом розташовувався перед першою напівциліндричною траншеєю, тому досягти достатньої концентрації диму для чітких картин візуалізації процесів, які відбувалися у другій за потоком траншеї, не вдалося. У першій траншеї візуально спостерігалися такі ж картини течії, як і для одиночної траншеї. З отриманого відеоматеріалу вдалося зафіксувати викиди з другої траншеї, але визначити зв'язок викидів з першою та другою траншеєю не вдалося.

Під час проведення візуалізації потоку у гідродинамічному лотку в якості контрастної речовини використовувались кольорові чорнила та барвники, а також контрастні покриття, котрі змивалися водою. Кольорові чорнила або барвники вводилися у потік за допомогою мініатюрних трубок, закріплених в державках координатних пристроїв. Поряд з цим, на обтічній поверхні пластини та траншеї були виконані отвори, через які подавалися фарбники. Використання різнокольорових барвників дозволило визначити характерні області формування та розвитку вихрових систем, які виникали під час обтікання пластини як із заглибленням, так і без нього. Також у ході візуальних досліджень в якості розчинної у воді контрастної речовини використовувалося згущене молоко, яке тонким рівномірним шаром наносилося на обтічну поверхню. При цьому в згущене молоко додавалася біла або чорна сажа для додання водорозчинному покриттю плавучості, близької до нейтральної, і кращої контрастності з метою спостереження траєкторій руху частинок сажі у вихровому потоці. Рух частинок дозволив визначити швидкість вихрової течії в досліджуваних областях потоку, напрям її руху, а також оцінити масштаби вихрових структур. Області з розмитим контрастним покриттям на обтічній поверхні дозволили судити про інтенсивність дотичних напружень прилежого шару та вихрового руху. Таким чином, покриття, змиваючись та розчиняючись у воді, дали можливість реєструвати об'ємні картини вихрового течії усередині та поблизу овальної траншеї, а також виявити області викидів вихрових систем назовні з траншеї, що

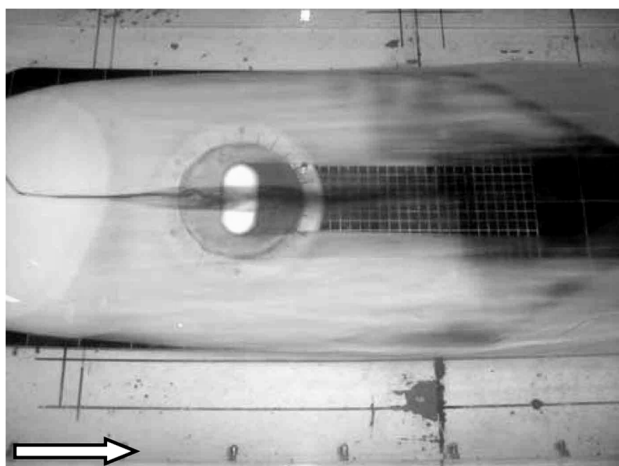


Рис. 5. Візуалізація структури прилежого шару над обтічною пластинною та течії всередині овальної траншеї



Рис. 4. Візуалізація обтікання двох напівциліндричних траншеї

формувалися усередині неї. Спільне використання водорозчинних контрастних покриттів, а також подача барвників в прилежовий шар (рис. 5) дозволили оцінити механізм взаємодії когерентних вихрових структур, що генеруються усередині заглиблення, та вихрових систем, що формуються в прилежовому шарі.

Візуалізація процесу формування та розвитку вихрової течії усередині і поблизу поперечно обтічного овального заглиблення, розташованого на обтічній плоскій пластині, проводилася для кількох швидкісних режимів потоку в гідродинамічному лотку. Найменша швидкість потоку, під час якої проводилася візуалізація, була  $U=0,1$  м/с. Для цього режиму течії параметрами є  $Re_d=4000$  та  $Re_x=8\cdot 10^4$ , що відповідало ламінарному потоку. Надходження водорозчинного контрастного покриття усередину поперечно обтічної траншеї відбувалося вздовж всієї її передньої кромки. Контрастна речовина, що потрапила усередину траншеї, не оберталася, а здійснювала низькочастотні і мало інтенсивні

коливання в двох взаємно перпендикулярних площинах (головним чином, в напрямку потоку) [4, 11, 15]. Верхня частина рідини, що заповнювала овальну траншею, під час взаємодії з потоком, що набігав, періодично зносилася за межі траншеї у вигляді хвилеподібних викидів, які часто відбувалися над серединною частиною траншеї або синхронно над її сферичними частинами. Такі мало інтенсивні викиди відбувалися з частотою  $f=(0,06\dots 0,08)$  Гц ( $St=0,024\dots 0,032$ ). У результаті для досліджуваного ламінарного режиму обтікання овальної траншеї, розташованої поперек потоку, по суті, не спостерігалось взаємодії між рідиною, що знаходилася усередині заглиблення та потоком, що набігав, або ця взаємодія була слабка та мало помітна. Як показано на рис. 5, підфарбована рідина, яка конвектувала на мінімальній відстані від обтічної поверхні пластини, не надходила усередину овальної траншеї.

При збільшенні швидкості потоку, наприклад, при  $U=0,25$  м/с ( $Re_x=2\cdot 10^5$ ,  $Re_d=1\cdot 10^4$ ), що відповідає перехідному режиму течії, усередині овальної траншеї спостерігалось формування когерентних великомасштабних вихрових систем. Надходження контрастної водорозчинної речовини усередину траншеї відбувалося уздовж передньої за потоком половини заглиблення, подібно до ламінарного обтікання. У придонній області овальної траншеї рідина згорталася у сферичних її частинах до великомасштабних вихрових структур, центри яких, або «джерела», розташовувалися поблизу геометричних центрів сферичних частин траншеї, але дещо ближче до передньої її стінки. У придонній області циліндричної частини заглиблення генерувалася ще одна пара великомасштабних протилежно обертових вихорів, розділена серединним перерізом овальної траншеї. Таким чином, для перехідного режиму течії усередині овальної траншеї формувалися комірчасті вихрові системи у вигляді двох пар великомасштабних протилежно обертових вихорів, орієнтованих майже вертикально відносно дна заглиблення. Результати досліджень показали, що масштаб цих вихорів в придонній області траншеї становив близько третини діаметру заглиблення і вони розташовувалися майже симетрично відносно поперечної осі траншеї. Комірчасті вихрові структури здійснювали коливальний рух у порожнині траншеї та з досягненням «стоків» верхньої межі заглиблення (зона шару змішування), вертикальні вихори згиналися та виносилися назовні з овального заглиблення у вигляді викидів. Нерідко протилежно обертові вихрові структури об'єднувалися своїми верхніми частинами, формуючи пару аркоподібних вихрових систем. Ці вихрові системи розташовувалися по краях циліндричної частини овальної траншеї. Коли головки аркоподібних вертикальних систем досягали шару змішування, то вони змивалися потоком, утворюючи шпилькоподібний вихор, який є характерною когерентною вихровою структурою турбулентних примежових шарів. Ніжки шпилькоподібного вихору розташовувалися усередині траншеї. Під час витягування головка шпилькоподібного вихору виносилася вниз за потоком за межі траншеї, а ніжки його, в більшості випадків, обривалися несиметрично [11, 16]. В результаті спостерігався викид вихрових структур над кормовими областями сполучення циліндричної та сферичних поверхонь заглиблення. Під час руйнування аркоподібних вихрових систем, які генерувалися набігаючим потоком усередині овальної траншеї, асиметричні ніжки, що залишалися та були розташовані поблизу серединного перерізу, іноді об'єднувалися одна з іншою, формуючи новий аркоподібний вихор. Цей вихор із плином часу збільшувався за масштабом, витягуючись у вертикальному напрямку і згинався у поздовжньому напрямку течії. Під час взаємодії з зсувними шаром він викидався з центральної частини траншеї, що показано на рис. 6. У цей же час у сферичних частинах траншеї збільшувалися і приймали вертикальне положення кінцеві вихрові системи. Вони, під час руйнування центрального аркоподібного вихору, об'єднувалися з сусідніми протилежно обертовими вихорами, які раніше були ніжками центрального аркоподібного вихору. Таким чином, усередині траншеї знову утворювалися дві пари аркоподібних вихорів, які повторювали еволюцію, описану вище. Іноді спостерігалися викиди вихрових систем одночасно в трьох місцях по довжині поперечно обтічного овального заглиблення (рис. 7). Очевидно, таке явище обумовлене викидом окремо вертикальних вихорів із сферичних частин траншеї та аркоподібного вихору, який генерувався у серединній частині траншеї.

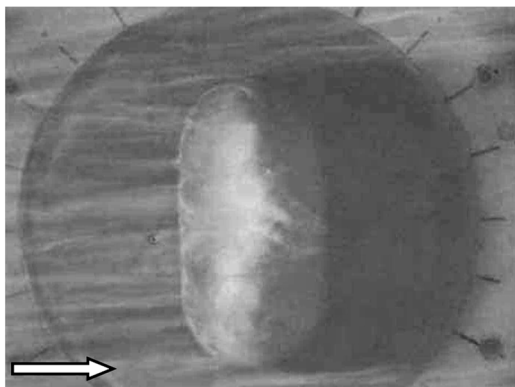


Рис. 6. Викид вихрових структур з овальної траншеї над її серединним перетином

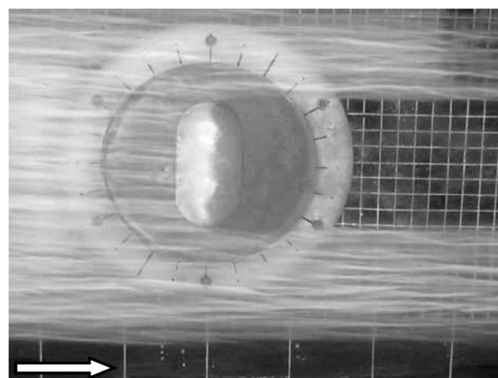
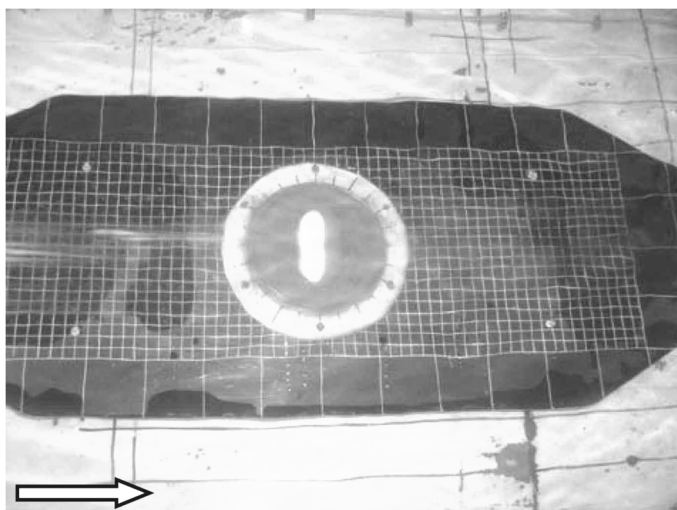


Рис. 7. Генерація та викид комірчастих вихрових структур з овальної траншеї

Викид вихрових систем спостерігався на частотах  $f=(0,1...0,4)$  Гц, яким відповідали числа Струхаля  $St=0,02...0,06$ . Під час формування когерентних великомасштабних вихрових структур усередині траншеї та у процесі їх викиду назовні у супутній потік, усередині траншеї спостерігалися інтенсивні низькочастотні осциляції потоку, а також генерація дрібномасштабних вихорів і їх хаотичний викид назовні з траншеї. Окрім того, з частотою  $f=(2...3)$  Гц, якій відповідає число Струхаля  $St=0,3...0,5$ , спостерігався викид вихрових структур зсувного шару. Викиди вихрових систем позаду овальної траншеї на відстані близько трьох її діаметрів досягали майже двох величин товщини примежового шару. Визначено [17, 18], що відстань між двома викинутими вихровими системами становила біля двох діаметрів траншеї. Швидкість перенесення викинутих з овальної траншеї великомасштабних вихрових систем, які конвектували униз за потоком, дорівнювала  $0,8U$ .



**Рис. 8. Формування веретеноподібного вихору всередині овальної траншеї**

При максимальній швидкості візуальних досліджень ( $U=0,5$  м/с,  $Re_x=4 \cdot 10^5$ ,  $Re_d=2 \cdot 10^4$ ), яка відповідала турбулентному режиму течії, виявлено, що усередині овальної траншеї, практично повторюючи її форму, утворювався квазістійкий веретеноподібний вихор, притиснутий до передньої відривної стінки заглиблення (рис. 8). Рідина, що заповнювала відривну область над передньою стінкою овальної траншеї, піднімалася до відривної кромки циліндричної вставки траншеї та, зустрівшись з потоком, що набігає, формувала зсувний шар. Вихрові структури зсувного шару, прямуючи до кормової стінки, частково викидалися назовні з траншеї, а частково, взаємодіючи з кормовою стінкою, переносилися у її придонну область та формували веретеноподібний вихор. Для цього режиму течії викидів великомасштабних вихрових структур з будь-якої окремої області овального заглиблення не виявлено. Уздовж кормової циліндричної частини траншеї спостерігалось

хаотичне викидання дрібномасштабних вихрових структур за її межі у вигляді вихрової пелени. Ця пелена здійснювала відносно високочастотні коливання у трьох взаємно перпендикулярних напрямках (тривимірні осциляції вихрової пелени). Виявлено, що частота викидів вихрових систем із траншеї (в основному позаду кормової стінки її циліндричної частини) становила  $f=(5...6)$  Гц, якій відповідає число Струхаля  $St=0,4...0,5$ .

### Висновки

Зафіксовано, що під час обтікання повітрям або водою поперечно обтічної напівциліндричної чи овальної траншеї різних заглиблення та видовження, розташованих на гідравлічно гладкій пласкій пластині як в аеродинамічній трубі, так і в гідродинамічному лотку, усередині заглиблень генеруються дрібно - та великомасштабні вихрові структури. Масштаб, місцезнаходження та еволюція цих когерентних вихрових структур залежать від режиму обтікання, форми і розмірів траншеї. Періодично або квазіперіодично ці вихрові структури викидаються назовні з обтічної траншеї, взаємодіючи з вихровими структурами примежового шару над пластиною.

Установлено, що в умовах ламінарної течії над пластиною з локальним заглибленням усередині останнього формувалася хвилеподібний рух рідини. Верхня частина цього руху на рівні поверхні пластини періодично викидається над кормовою стінкою траншеї з частотою, якій відповідають числа Струхаля  $St=0,02...0,03$ .

При перехідному режимі течії спостерігається генерація дрібномасштабних та великомасштабних вихрових структур у зсувному шарі та у придонній частині поперечно обтічної траншеї. Усередині овальної траншеї подвійного видовження формуються комірчасті вихрові системи у вигляді двох пар великомасштабних протилежно обертових вихорів, орієнтованих майже вертикально відносно дна заглиблення. Масштаб цих вихорів в придонній області траншеї становить близько третини діаметру заглиблення і вони розташовуються майже симетрично відносно поперечної осі траншеї. Комірчасті вихрові структури здійснюють коливальний рух у порожнині траншеї та з досягненням «стоками» верхньої межі заглиблення (зона шару змішування), вертикальні вихори згинаються у напрямку потоку та виносяться назовні із овального заглиблення у вигляді викидів назовні у супутній потік з частотою  $St=0,02...0,06$ , а викиди вихрових структур зсувного шару — з частотою  $St=0,3...0,5$ . Швидкість перенесення викинутих з овальної траншеї когерентних вихрових систем, які конвектують униз за потоком, дорівнює  $0,8U$ .

Виявлено, що при турбулентному режимі течії усередині поперечно обтічної овальної траншеї генерується квазістійкий веретенноподібний вихор, притиснутий до передньої відривної стінки заглиблення. Вихрові структури зсувного шару, прямуючи до кормової стінки, частково викидаються назовні з траншеї, а частково, взаємодіючи з кормовою стіною, переносяться до її придонної області та формують веретенноподібний вихор. Уздовж кормової циліндричної частини траншеї спостерігається хаотичне викидання (при числах Струхаля  $St=0,4\dots 0,5$ ) дрібномасштабних вихрових структур за її межі у вигляді вихрової пелени, яка здійснює високочастотні коливання у трьох взаємно перпендикулярних напрямках.

Отримані дані дозволяють використовувати їх для керування процесами масо- й теплообміну на обтічних поверхнях із заглибленнями в апаратах авіаційно-космічної, підводної техніки та енергетики.

## Вихровое движение внутри поперечно обтекаемой траншеи

В.Н. Турик, В.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник

**Аннотация.** Исследованы особенности формирования и развития вихревых структур, которые генерируются внутри и вблизи поперечно обтекаемой траншеи различного углубления и удлинения, расположенной на плоской поверхности. Исследования были проведены в аэродинамической трубе и гидродинамическом лотке с помощью визуализации потока в условиях различных режимов течения над пластиной с траншеей. В экспериментах были использованы дымовая визуализация, контрастные красители и водорастворимые покрытия с фиксацией траекторий движения жидких частиц фото и видеоаппаратурой. Установлены места и закономерности формирования вихревых образований, сделаны оценки их масштабов, зафиксированы частоты и локализация выбросов мелкомасштабных и крупномасштабных вихревых структур наружу из траншеи в зависимости от режимов обтекания пластины с геометрической неоднородностью. Полученные данные важны для учёта особенностей обтекания поверхностей летательных и подводных аппаратов, а также для разработки прогрессивных энергосберегающих технологий, в основу которых могут быть положены методы пассивного управления пограничным слоем при помощи исследованных генераторов вихрей.

**Ключевые слова:** поперечно обтекаемая траншея, аэродинамическая труба, гидродинамический лоток, визуализация потока, вихревая структура

## Vortex motion inside of the cross-streamlined trench

V.N. Turick, V.A. Voskoboynick, A.V. Voskoboynick

**Abstract.** The background is experimental study of the forming and evolution features of the vortex structures which are generated inside of the cross-streamlined trenches of different depth and length.

**Purpose.** The objective is by means of visualization with photo and video shooting of gas or fluid current pictures in the interior of semi-cylindrical and oval trenches situated on a flat plate to discover the liquid particles trajectories and the objective laws of vortices nucleation and ejections to cocurrent flow.

**Design/methodology/approach.** The investigation was carried out in a wind tunnel and hydrodynamic flume using flow visualization in different current regimes above plate with cavities. In experiments smoke visualization, contrasting dyes and water-soluble coating were used for determination of integral pictures of the vortex systems disposition and interaction, taking into account distinction between its scales.

**Findings.** Regularity of the vortex movement evolution, identification of the local places of vortex structures formation allowed to estimate their sizes, to fix frequencies and location of ejections of small- and large-scale vortex structures out of the trenches depending on flow regimes of the plate with cavity. Received data are useful in the quest for new methods of energy and mass exchange control on streamlined surfaces of thermal, nuclear power plants, flying machines and marine vessels.

**Keywords:** cross-streamlined trench, wind tunnel, hydrodynamic flume, flow visualization, vortex structure

### References

1. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок) / А.А. Халатов. – К.: ИТТФ НАНУ, 2005. – 76 с.
2. Гортышов Ю.Ф. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования / Ю.Ф. Гортышов, И.А. Попов, В.В. Олимпиев [и др.]. – Казань : Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.
3. Kovalenko G.V. Flow regimes in a single dimple on the channel surface / G.V. Kovalenko, V.I. Terekhov, A.A. Khalatov // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2010. – Vol. 51, № 6. – P. 839–848.

4. Воропаев Г.А. Визуализация ламинарного обтекания овального углубления / Г.А. Воропаев, А.В. Воскобойник, В.А. Воскобойник, С.А. Исаев // Прикладна гідромеханіка. – 2009. – 11, № 4. – С. 31–46.
5. Isaev S. Drag reduction of lifting surfaces at the use of oval dimples as vortex generators / S. Isaev, G. Voropaiev, V. Grinchenko [et al] // Abstract of the European Drag Reduction and Flow Control Meeting “EDRFCM 2010” 2–4 September, 2010. – Kyiv, Ukraine. - 2010. – P. 7–8.
6. Voskoboinick V. Noise and separation reduction by the dimpled surfaces / V. Voskoboinick, A. Voskoboinick // Proc. Intern. Conf. and Exhibition on Automobile Engineering, September 01-02, 2015. – Valencia, Spain. - 2015. – Vol. 4, № 1. – P. 51.
7. Кикнадзе Г.И. Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках сплошной среды и технологии, сопровождающие это явление / Г.И. Кикнадзе, И.А. Гачециладзе, В.Г. Олейников, А.Ю. Горюшков // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Третья междунар. конф. Москва, Россия. - 2008. – С. 1–3.
8. Tay C.M. Development of flow structures over dimples / C.M. Tay, Y.T. Chew, B.C. Khoo, J.B. Zhao // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2014. – Vol. 52. – P. 278–287.
9. Van Oudheusden B.W. Drag reduction by means of dimpled surfaces in turbulent boundary layers / M. van Nesselrooij, L.L.M. Veldhuis, B.W. van Oudheusden, F.F.J. Schrijer // Exp Fluids. – 2016. – Vol. 57. – P. 142–144.
10. Basley J. Space-time aspects of a three-dimensional multi-modulated open cavity flow / J. Basley, L.R. Pastur, N. Delprat, F. Lusseyran // Physics of Fluids. – 2013. – Vol. 25, № 6. – P. 064105-1–25.
11. Воскобойник В.А. Вихроутворення усередині поперечно обтічної овальної лунки / В.А. Воскобойник // Прикладна гідромеханіка. – 2012. – Том 14, № 4. – С. 37–46.
12. Воскобойник В.А. Когерентні вихрові структури в поперечно обтічній овальній лунці / В.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник // Науковий вісник. – 2014. – Том 23, № 3. – С. 352–358.
13. Турик В.Н. Управление структурой течения внутри полуцилиндрического углубления / В.Н. Турик, В.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник // Вісник НТУУ „КПІ”. Серія машинобудування. – 2016. – Вип. 78. – С. 112–123. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2305-9001.2016.78.85329>.
14. Турик В.М. Вихрові структури усередині обтічної напівциліндричної траншеї та керування ними / В.М. Турик, В.В. Бабенко, В.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник // Матеріали XXI Міжнародної науково-технічної конференції “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці” 24-27 травня 2016. – Київ, Україна, 2016. – С. 17–18.
15. Воскобойник В.А. Поле швидкості та вихровий рух усередині напівциліндричної траншеї / В.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник // Промышленная теплотехника. – 2016. – Том 38, № 4. – С. 11–20.
16. Воскобойник В.А. Просторово-часові характеристики когерентних структур, полів швидкості та тиску у лункових генераторах вихорів: Автореф. дис. д. т. н.: 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми. / В.А. Воскобойник // Інститут гідромеханіки НАН України. – Київ, 2013. – 40 с.
17. Воскобойник В.А. Пульсация пристеночного давления в низкоскоростном потоке вблизи овального углубления / В.А. Воскобойник // Акустичний вісник. – 2009. – Том 12, № 2. – С. 3–15.
18. Турик В.М. Вплив локальних поперечно обтічних перешкод на пульсації швидкості та пристінного тиску / В.М. Турик, В.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2017. – № 1. – С. 106–114. DOI: [10.20535/1810-0546.2017.1.91517](https://doi.org/10.20535/1810-0546.2017.1.91517).