

Одним із ефективних способів підвищення ефективності ультразвукової кавітації є збільшення статичного тиску. Для визначення впливу підвищеного і зниженого тиску на перебіг ультразвукової кавітації були проведені досліді, результати яких представлені на рис. 1. На рисунку показана зміна площі ерозійного руйнування тонкої алюмінієвої фольги при зміні статичного тиску за умови однакового часу опромінювання.

Експериментальним шляхом доведено вплив статичного тиску на розміри та інтенсивність кавітаційної області.

Враховуючи, що інтенсивність кавітаційної ерозії пов'язана з числом кавітації, яке враховує співвідношення статичного та звукового тисків в кавітаційній камері і виражається відомою залежністю [1]

$$k = \frac{p_0 - p_n}{p_a} \quad [1]$$

при проектуванні ультразвукових кавітаційних фільтрів необхідно враховувати як конструктивні та резонансні параметри кавітаційної камери, так і число кавітації.

УДК 532.517 : 533.011

Турик1 В.М., к.т.н., доц.

Воскобійник2 В.А., д.т.н., с.н.с., **Воскобійник2 А.В.**, к.т.н., с.н.с., **Степанович2 В.М.**, асп.

1 – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

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

ГЕНЕРАЦІЯ ВИХОРИВ ПОПЕРЕЧНО ОБТІЧНОЮ ТРАНШЕЄЮ

Основою одного з пасивних методів керування примежовим шаром над обтічними поверхнями є генерація когерентних вихрових структур (КВС) з наперед заданими аеро- чи гідродинамічними характеристиками. Генераторами вихорів можуть слугувати лункові поверхні, які отримали широке застосування у зв'язку з їх здатністю значно збільшувати інтенсивність турбулентності течії, отже, і тепло- та масоперенос в потоках. Утворившись усередині обтічних заглиблень, великомасштабні КВС разом з нестійкими дрібномасштабними та хаотичними вихорами турбулентної природи викидаються назовні у примежовий шар спутного потоку, змінюючи його структуру. Форма та інтенсивність взаємоузгоджених вихрових утворень залежить від режимів обтікання, етапів можливого ламінарно-турбулентного переходу та геометричних параметрів заглиблень. Певні співвідношення цих факторів забезпечують максимальне підсилення теплообміну та процесів змішування середовищ при відносно незначному збільшенні аерогідродинамічного опору [1, 2]. Це обумовлює перспективність зазначеного методу керування примежовими шарами в машинах і апаратах енергетичної, машинобудівної, нафтохімічної та інш. галузей. Тому вивчення механізму вихороутворення усередині заглиблень, який визначає кінематичні та динамічні характеристики вихрової течії на обтічних поверхнях, слід вважати актуальним. Результати експериментальних та чисельних досліджень [1–3] щодо лункових генераторів, розташованих у вигляді рядів заглиблень на обтічній поверхні, показують, що загальна картина вихрової течії в них визначається, головним чином, структурою вихрового потоку в перших лунках. Основні механізми та просторово-часові характеристики вихороутворення, що притаманні одиночній лунці, зберігаються і в лунках, розташованих в ансамблях. Тому з'ясування особливостей вихрової течії в одиночних лунках, визначення їх оптимальних форм та розмірів для заданих умов течії залишається важливою проблемою з точки зору розробки нових прогресивних енергозберігаючих технологій, в основу яких закладені методи пасивного керування примежовим шаром. Цим обумовлена мета досліджень, а саме, експериментальне визначення характерних особливостей великомасштабних КВС, які

зароджуються усередині поперечно обтічних траншей різного видовження, та їх викиду назовні у примежовий шар над плоскою поверхнею. Методами дослідження є візуалізація течії усередині та поблизу траншей контрастними барвниками і водорозчинними покриттями, реєстрація картин вихрового руху, визначення топології та характерних кінематичних особливостей вихрових структур. Експерименти проводилися в аеродинамічній трубі та гідродинамічному лотку з поперечно обтічними траншеями напівциліндричної та овальної форм заглибленням при відносних значеннях глибини $H/B=0,22\div0,5$ і видовження $L/B=2\div8$, де B – ширина, H – глибина і L – довжина траншеї. Детальний опис експериментальних установок наведено у роботах [4–6]. В осьовому перерізі вимірювальної ділянки аеродинамічної труби, в її горизонтальній площині вздовж поздовжньої осі, монтувалася гідравлічно гладка пластина. На відстані $x=0,5$ м від переднього краю пластини була зроблена одиночна напівциліндрична траншея або пара траншей шириною $B=0,01$ м та $B=0,019$ м, завдовжки $L=0,081$ м, глибиною $H=0,005$ м та $H=0,0095$ м (заглиблення $H/B=0,5$ та видовження $L/B\approx 8$ і $L/B\approx 4$). Поздовжня вісь траншеї розташовувалась перпендикулярно швидкості U потоку, що набігає. Експериментальні дослідження в аеродинамічній трубі проводилися при швидкостях потоку повітря від $1,0$ м/с до 20 м/с, яким відповідали числа Рейнольдса $Re_x=Ux/\nu$ від $3,2\cdot 10^4$ до $6,4\cdot 10^5$, розраховані за довжиною x пластини до переднього краю траншеї, та $Re_B=UB/\nu$ від 1200 до 24000 , що розраховані за шириною траншеї (ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини). Вимірювання характеристик течії термоанемометром показали, що в досліді товщина примежового шару перед траншеєю (δ) змінювалася від $2,6\cdot 10^{-3}$ м до $11,3\cdot 10^{-3}$ м, а товщина втрати імпульсу (θ) – 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. Гідравлічно гладка пластина використовувалась в якості обтічної поверхні, на відстані $x=0,8$ м від передньої крайки якої була зроблена локальна неоднорідність у вигляді овальної траншеї, яка складалася з двох сферичних 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 паралельно його поверхні. Під час проведення досліджень глибина потоку складала $0,4$ м, а швидкість течії змінювалася від $0,02$ м/с до $0,5$ м/с, що відповідало числам Рейнольдса Re_x від $2\cdot 10^4$ до $4\cdot 10^5$ та Re_D від 800 до 20000 . В досліді товщина примежового шару перед заглибленням (δ) змінювалася від $0,01$ м до $0,03$ м, а товщина втрати імпульсу (θ) – від $0,001$ м до $0,002$ м. Візуалізація течії здійснювалась: для повітряного потоку димовими струминками (рис. 1а), для водяного потоку контрастними фарбниками та водорозчинними покриттями (рис. 1б), траєкторії руху частинок яких відповідали особливостям течії усередині та поблизу поперечно обтічних траншей. Картини візуалізації реєструвались за допомогою швидкісних кінокамер, відеокamer та цифрових фотоапаратів. Відео та фотоматеріал за допомогою відповідного обладнання, програм та методик фіксувався, оброблявся та аналізувався на графічній комп'ютерній станції. Результати експериментальних досліджень показують, що під час обтікання повітрям або водою гідравлічно гладких плоских поверхонь з поперечно розташованими напівциліндричною та овальною траншеями різного заглиблення та видовження у їх порожнинах генерувалися КВС, масштаб, місцезнаходження та еволюція яких залежить від режиму обтікання, форми і розмірів траншеї. Періодично або квазіперіодично ці вихрові структури викидалися назовні з обтічної траншеї, взаємодіючи з вихровими структурами примежового шару над пластинною.

На рис. 1а показана початкова стадія викиду сформованого в серединній частині напівциліндричного заглиблення шириною $B=0,01$ м квазістійкого великомасштабного вихору, що проілюстровано роздвоєнням димового сліду в кормовій частині траншеї та позаду неї при швидкості потоку $U=3,6$ м/с ($Re_x=1,23\cdot 10^5$). Верхній край струмінки диму, що рухалась паралельно пластині, істотно піднявся над пластинною майже на $0,25D$. Статистична обробка відеоматеріалів для даного режиму повітряного обтікання траншеї визначила

частоту викиду великомасштабних вихрових систем назовні з неї: $f=(10...20) \text{ Гц}$, причому викиди відбувалися ближче до кормової частини напівциліндричної траншеї. Цим частотам викидів відповідають числа Струхала $Sh=fD/U=(0,03...0,06)$. Викиди спостерігалися і для меншої швидкості обтікання, проте отримати чіткий ряд знімків не вдалося. Для напівциліндричної траншеї шириною $B=0,019\text{м}$ з гострими краями для усіх досліджуваних швидкостей візуалізаційна картина більш розмита. Викиди фіксувалися не чітко та не завжди регулярно, тому не вдалось встановити їх частоту. В умовах ламінарного потоку над пластиною з поперечно обтічною овальною траншеєю (див. рис. 1б) усередині останньої вихрової течії не виявлено, натомість спостерігався хвилеподібний рух рідини, інтенсивність якого зростала у напрямку потоку. Верхня частина цього руху на рівні поверхні пластини періодично викидалася над кормою стінкою траншеї з частотою, якій відповідали числа Струхала $Sh=fB/U=(0,024...0,032)$. При перехідному режимі течії ($Re_x=(2\div4)\cdot10^5$) спостерігалася генерація великомасштабних та дрібномасштабних вихрових структур у зсувному шарі та у придонній частині поперечно обтічної траншеї. Усередині овальної траншеї подвійного видовження формувалися комірчасті вихрові системи у вигляді двох пар великомасштабних протилежно обертових вихорів, орієнтованих майже вертикально відносно дна заглиблення. Масштаб цих вихорів в придонній області траншеї становив близько третини діаметру заглиблення і вони розташовувалися майже симетрично поперечній осі траншеї. Комірчасті вихрові структури здійснювали коливальний рух у просторі траншеї, та з досягненням стоками верхньої межі заглиблення (зона шару змішування) вертикальні вихори згиналися у напрямку потоку та виносилися назовні з овального заглиблення у вигляді викидів. Викиди великомасштабних структур назовні з траншеї спостерігалися з частотою $Sh=(0,02...0,06)$, а викиди вихрових структур зсувного шару спостерігалися з частотою $Sh=(0,3...0,5)$. Викиди вихрових систем позаду овальної траншеї на відстані близько трьох її діаметрів сягали майже двох товщин примежового шару. Швидкість перенесення викинутих з овальної траншеї КВС, які конвектували униз за потоком, дорівнювала $0,8U$. При турбулентному режимі течії усередині овальної траншеї вихрові структури зсувного шару, прямуючи до кормової стінки, частково викидалися назовні з траншеї, а частково, взаємодіючи з кормовою стіною, переносилися у її придонну область та формували квазістійкий веретеноподібний вихор. Візуалізація вихрової течії показала, що викидів великомасштабних вихрових структур з будь-якої окремої області траншеї не спостерігалось. Уздовж кормової циліндричної частини траншеї спостерігалось хаотичне викидання з частотою $Sh=(0,4...0,5)$ дрібномасштабних вихрових структур у вигляді вихрової пелени з високочастотними коливаннями у трьох взаємно перпендикулярних напрямках.

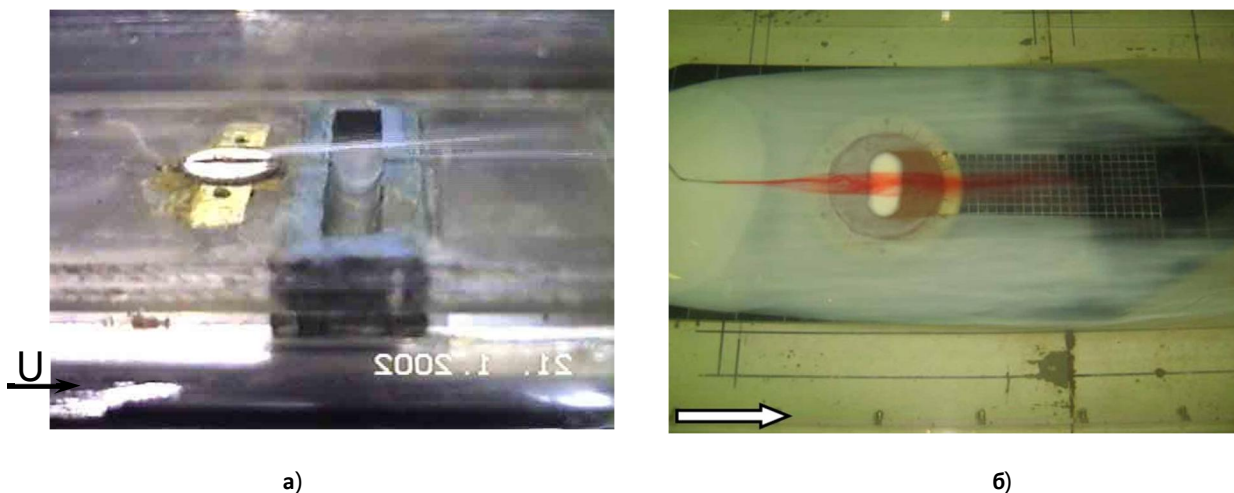


Рис. 1. Візуалізація потоку при обтіканні: а – напівциліндричної траншеї в аеродинамічній трубі; б – овальної траншеї в гідродинамічному лотку

Список літератури

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. 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. – V. 52. – P. 278–287.
4. Турик В.Н. Управление структурой течения внутри полуцилиндрического углубления / В.Н. Турик, В.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник // Вісник НТУУ „КПІ”. Машинобудування. – 2016. – Вип. 78. – С. 112–123.
5. Воскобійник В.А. Вихроутворення усередині поперечно обтічної овальної лунки / В.А. Воскобійник // Прикладна гідромеханіка. – 2012. – Т. 14, № 4. – С. 37–46.
6. Турик В.М. Вплив локальних поперечно обтічних перешкод на пульсації швидкості та пристінного тиску / В.М. Турик, В.А. Воскобійник, А.В. Воскобійник // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2017. – № 1. – С. 106–114.

УДК 533.6.011.6

Турик В.М., к.т.н., доц.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

ТЕРМОАЕРОДИНАМІКА ПРОМИСЛОВИХ ВИХРОВИХ АПАРАТІВ

В задачах про струмені або про турбулентні сліди за тілом теорія Л. Прандтля переносу кількості руху призводить до збігу відносних профілів температури T та швидкості $\vec{U}$ для потоків при подібності відповідних крайових умов [1]. Формально цей результат відповідає значенню турбулентного числа Прандтля $Pr_t = 1$. Це означає, що температура гальмування $T_0 = T + v^2 / (2c_p) = const$ за відсутності інтегрального теплообміну між потоком і оточуючим середовищем за умови локального збереження енергії у кожній точці поля течії. Тобто, будь-яке місцеве прискорення газу має супроводжуватися еквівалентним зниженням термодинамічної температури, а гальмування потоку — її зростанням. Однак, практично у жодному випадку вільного руху газових потоків не спостерігається подібність профілів T і $\vec{U}$. В реальних турбулентних газових потоках завжди $Pr_t < 1$: тепловіддача здійснюється швидше, ніж перенос кількості руху, обумовлений турбулентною в'язкістю. Наслідком цього незбігу є більш згладжене поле температури порівняно з розрахунковим при $T_0 = const$. У точках розрахункового максимуму T (мінімуму v) температура є вищою, ніж це передбачала б сталість температури гальмування. Виникає місцевий перерозподіл енергії при інтегральній умові збереження енергії для потоку в цілому: швидкі струминки газу збагачуються енергією за рахунок більш повільних струминок. За дослідями І. Гарнетта і Б. Еккерта щодо, так званих, «вихрових труб» [2] максимальна різниця температур гальмування між периферійною та осьюовою зонами течії в циліндричній частині труби з тангенціальним підведенням газу в поперечному перерізі 0-0, наближеному до соплового апарату, може досягати величин $T_{0-0} - T_0 = 75 \div 80^\circ C$ і, навіть, більших значень при швидкостях газу на вході $v_\infty \geq 250 м/с$. Таким чином, ентальпія гальмування h_0 у потоках в'язкого газу є змінною величиною, і інтеграл рівняння енергії у вигляді $h_0 = const$ не може слугувати характеристикою течії за реальних умов. Практичний інтерес мають оцінки зазначеної трансформації енергії при розрахунках та проектуванні