

УДК 532.517

## Спектри пульсацій швидкості всередині сферичної лунки

Турик<sup>1</sup> В.М., Воскобійник<sup>2</sup> В.А., Воскобойник<sup>2</sup> О.А., Воскобійник<sup>2</sup> А.В.

1 – КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

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

**Анотація.** Представлені результати експериментальних досліджень особливостей формування вихрових структур всередині напівсферичної лунки на гідравлічно гладкій плоскій поверхні і поля швидкості, яке вони генерують. Експерименти проводилися в гідродинамічному лотку за допомогою візуалізації течії і вимірювання швидкості термоанемометрами. Візуалізація контрастними барвниками і водорозчинними покриттями показала, що всередині лунки генеруються квазістійка великомасштабна вихрова структура і дрібномасштабні вихори, які викидаються назовні з лунки. Вихрові структури зароджуються з циркуляційної течії всередині лунки і зсувного шару, який утворюється під час відриву примежового шару з її передньої стінки. Вихрова течія всередині лунки зумовлює появу дискретних підйомів в частотних і хвильових спектрах швидкості на частотах і хвильових числах, яким відповідають низькочастотні коливання вихрових структур, частоти обертання та викиду великомасштабних вихрових структур і частоти автоколивань вихрових структур зсувного шару.

**Ключові слова:** напівсферична лунка, вихрова структура, частотний спектр, хвильовий спектр, пульсації швидкості

Лункові генератори вихорів знайшли широке застосування в гідродинаміці, автомобілебудуванні, в ядерній та тепловій енергетиці як один із засобів керування примежовим шаром. Це обумовлює необхідність вивчення особливостей формування та еволюції вихорів всередині заглиблень на обтічній поверхні, а також полів швидкості й тиску, які вони генерують. Відомо [1, 2], що в залежності від режимів обтікання і геометричних параметрів заглиблень усередині них формуються різноманітні за формою і інтенсивністю вихрові структури. Генерація квазістійких когерентних вихрових структур канавками і лунками дає можливість управляти примежовими шарами, що використовується при створенні засобів, які підвищують тепло- і масоперенос, знижують гідродинамічний опір, шум обтікання і вібрації обтічних поверхонь.

Мета дослідження — визначити особливості формування та розвитку когерентних вихрових структур, а також їх вплив на просторово-часові характеристики поля швидкості всередині напівсферичної лунки, яку зроблено на гідравлічно гладкій плоскій поверхні.

Експериментальні дослідження проводилися в гідродинамічному лотку довжиною 16 м, шириною 1 м і глибиною 0,8 м. Для проведення візуальних досліджень бічні стінки гідродинамічного лотка зроблені скляними. Вода в лоток подавалася із заспокійливої камери насосами через конфузорної відсік, решітки, хонейкомби і турбулізуючі сітки. Більш детальний опис експериментального стенду представлено в роботах [2, 3].

Гідравлічно гладка пластина з полірованого органічного скла товщиною 0,01 м, шириною 0,5 м і довжиною 2,2 м використовувалася в якості обтічної поверхні та знаходилася на відстані 0,1 м від дна лотка. На відстані  $X=0,8$  м від носка пластини була зроблена напівсферична лунка діаметром  $d=0,1$  м. Глибина потоку над пластиною з лункою становила 0,4 м, а швидкість течії ( $U$ ) змінювалися від 0,03 м/с до 0,5 м/с, яким відповідали числа Рейнольдса  $Re_x=UX/\nu$  від  $2 \cdot 10^4$  до  $4 \cdot 10^5$  і  $Re_d=Ud/\nu$  від  $3 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^4$ .

Відповідно до розробленої програми і методики проведення робіт спочатку проводилася візуалізація течії за допомогою контрастних барвників і водорозчинних покриттів, які давали можливість визначити характерні особливості вихрового руху як всередині лунки, так і в примежовому шарі пластини.

Відомо, що поле пульсацій швидкості в примежових шарах і відривних течіях, утворених під час обтікання тіл різної конфігурації, являє собою випадковий процес, як в просторі, так і

в часі. Отримання інформації про фізичні явища, які формують такі процеси, може бути здійснено завдяки застосуванню методів математичної статистики і теорії ймовірності. Для визначення властивостей випадкових процесів в загальному випадку використовуються одномірні і багатовимірні статистичні функції. Ці функції дозволяють судити як про інтенсивність випадкового процесу, так і про його просторово-часові та частотно-хвильові характеристики.

Характерною особливістю профілів швидкості всередині напівсферичної лунки є наявність вигинів і поява зворотних течій в придонній області, зокрема, для перехідного і турбулентного режимів течії. Такі зміни в профілях свідчать про наявність нестійкостей в зсувних шарах і формуванні циркуляційної течії всередині лунки. У передній частині лунки, де потік спрямовується всередину лунки, має місце прискорення течії, а перед кормовою її стінкою гальмування потоку. Усередині лунки ближче до її придонної області відзначається спадання значень середньої поздовжньої швидкості, а також зміна напрямку вектору швидкості на протилежне. Поблизу дна напівсферичної лунки формується ще одна течія, яка зароджується під час взаємодії шару змішування з кормовою стінкою лунки і проходить вздовж її дна, утворюючи циркуляційний потік у вигляді квазістійкого великомасштабного вихору. Ядро цього квазістійкого вихору розташовується над поверхнею лунки на відстані  $y/d = -0,33$ . Максимальні рівні пульсацій швидкості всередині лунки мають місце поблизу кормової стінки, де відбувається взаємодія вихрових структур зсувного шару з поверхнею лунки. Мінімальні значення пульсацій швидкості спостерігаються в зоні, прилеглої до ядра великомасштабного вихору.

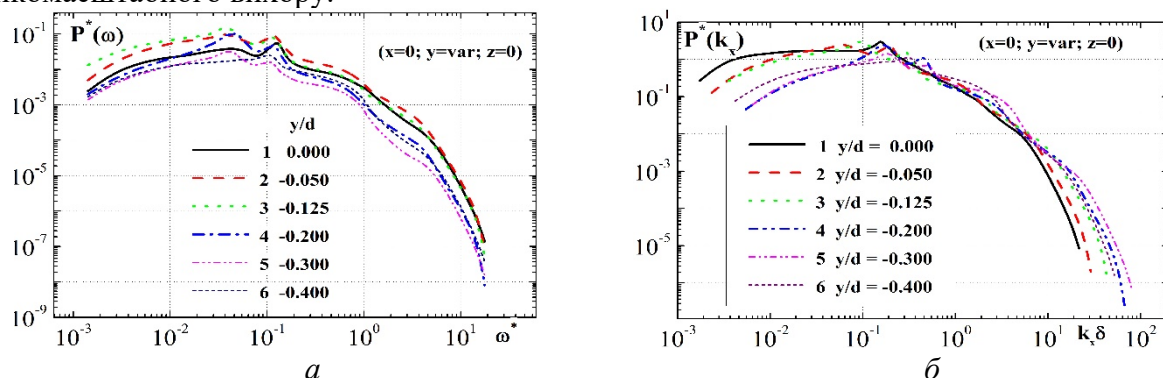


Рис 1. Частотний (а) та хвильовий (б) спектри пульсацій швидкості усередині лунки

Найбільш характерні зміни поля швидкості всередині лунки, які обумовлені вихровою течією, спостерігаються поблизу серединного перерізу лунки ( $x=0, y=var, z=0$ ). Спектральні особливості поля швидкості в частотному виді досліджувалися в формі безрозмірних спектральних густин потужності пульсацій швидкості у вигляді  $P^*(\omega) = P(\omega)/(U\delta)$ , які представлені в залежності від безрозмірної частоти  $\omega^* = 2\pi f\delta/U$ , де  $f$  – частота;  $\delta$  – товщина примежового шару. На рис. 1а частотні спектри пульсацій швидкості отримані при  $Re_x = 4 \cdot 10^5$  та  $Re_d = 5 \cdot 10^4$ . Крива 1 відповідає вимірюванням в точці  $y/d = 0$ ; крива 2 –  $y/d = -0,05$ ; крива 3 –  $y/d = -0,13$ ; крива 4 –  $y/d = -0,20$ ; крива 5 –  $y/d = -0,30$  і крива 6 –  $y/d = -0,40$ . На рівні поверхні пластини ( $y=0$ ) спектральна щільність потужності має два підйоми на частоті близько 42 Гц ( $\omega^* \approx 0,06$ ) і 82 Гц ( $\omega^* \approx 0,11$ ), але переважним є другий. З заглибленням усередину лунки відбувається перерозподіл енергії з високочастотної області в низькочастотну і максимальний рівень спектральної щільності потужності досягається на низьких частотах на глибині  $y = -0,13d$ . З наближенням до місця розташування ядра квазістійкого великомасштабного вихору всередині лунки відбувається зменшення

високочастотного і низькочастотного рівня спектру, а також збільшення спектральної енергії в діапазоні частот, які відповідають вищезгаданим дискретним підйомам в спектрах. Вимірювання в придонній області лунки показали відсутність дискретного піку на частотах порядку (40–43) Гц, його наявність на частотах (80–85) Гц і особливо помітне збільшення спектральних рівнів в частотному діапазоні  $0.2 < \omega^* < 0.8$  або  $140 \text{ Гц} < f < 560 \text{ Гц}$ , якому відповідають числа Струхаля ( $0,18 < St = fd/U < 0,72$ ).

Застосовуючи гіпотезу замороженої турбулентності Тейлора, спектральні залежності, визначені в частотному представленні, були перебудовані в хвильовому просторі. Для цього використовувалося припущення, що в примежовому шарі вихрові структури певного масштабу ( $\lambda$ ), які мають хвильове число  $k = 2\pi/\lambda$ , переносяться зі швидкостями, рівними середнім значенням місцевої швидкості. Хвильові спектральні густини потужності пульсацій поздовжньої швидкості по глибині напівсферичної лунки показані на рис. 1б. Нормування хвильових спектрів пульсацій швидкості здійснювалося як  $P^*(k_x) = P(\omega)k_x\delta/(\overline{u'})^2$ , де  $k_x = \omega/\overline{U}$ . Позначення кривих на рис. 1б ідентичні тим, які показані на рис. 1а. Виявлено, що в хвильових спектрах в серединному перерізі напівсферичної лунки, яку обтікає турбулентна течія, спостерігаються дискретні підйоми на хвильових числах  $k_x \approx 0,05/\delta$ ,  $k_x \approx 0,015/\delta$  і  $k_x \approx 0,15/\delta$ . Встановлено, що при зануренні всередину лунки по її центру хвильові спектри наповнюються високохвильовими компонентами. При цьому низькохвильові складові спектру поля швидкості зменшуються. Найбільші рівні високохвильових і найменші рівні низькохвильових компонент спектру спостерігаються в області ядра квазістійкої великомасштабної вихрової структури.

Установлено, що в спектральних залежностях в частотному і хвильовому представленнях з'являються дискретні складові, що відповідають характерним низькочастотним коливанням вихрової течії всередині лунки з безрозмірною частотою  $St = 0,003$ . Крім того, в спектрах превалюють складові на частотах викидів вихрових структур назовні з лунок  $St = (0,04-0,06)$ , частотах обертання циркуляційної течії всередині лунки  $St = (0,08-0,18)$  і частотах, що відповідають зсувним модам автоколивань вихрових структур зсувного шару  $St = (0,4-0,5)$  (перша мода) і  $St = (0,7-1,0)$  (друга мода).

Показано, що всередині напівсферичної лунки зі збільшенням швидкості обтікання частотний діапазон енергонесучих вихрових структур розширюється як в область низьких, так і в область високих частот. З ростом швидкості обтікання найбільший внесок в повну енергію поля пульсацій швидкості вносять великомасштабні низькочастотні вихрові структури. У хвильових спектрах поля пульсацій швидкості дискретні підйоми спостерігаються на хвильових числах  $k_x \approx 0,05/\delta$ ,  $k_x \approx 0,015/\delta$  і  $k_x \approx 0,15/\delta$ .

### Список літератури

1. Voskoboinick V. Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements / V. Voskoboinick, N. Kornev, J. Turnow // Flow Turbulence Combust. – 2013. – Vol. 90, № 4. – P. 709-722.
2. Voskoboinick V.A. Influence of the Deep Spherical Dimple on the Pressure Field Under the Turbulent Boundary Layer / V.A. Voskoboinick, V.N. Turick, O.A. Voskoboinyk et al. // In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEE 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 754. Springer, Cham. – 2019. – P. 23-32.
3. Voskoboinick V.A. Space and time characteristics of the velocity and pressure fields of the fluid flow inside a hemispherical dimple generator of vortices / V.A. Voskoboinick, A.A. Voskoboinick, V.N. Turick, A.V. Voskoboinick // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2020. – Vol. 93, No. 5. – P. 1205-1220.