

## ВИХРОВІ СТРУКТУРИ У НАПІВЦИЛІНДРИЧНІЙ КАНАВЦІ НА ПЛАСКІЙ ПОВЕРХНІ

А.В. ВОСКОВІЙНИК, В.А. ВОСКОВІЙНИК

*Інститут гідромеханіки НАН України  
вул. Желябова, 8/4, 03680, Київ-180, МСП, Україна  
тел. (044) 456-65-83; e-mail: andrey\_vsk@ukr.net*

Запропонована експериментальна робота присвячена вивченню особливостей формування та розвитку когерентних вихрових структур усередині напівциліндричної канавки на пласкій поверхні. Заглиблення на поверхні, яка обтікається, є джерелами звукових та псевдозвукових коливань. У канавці формуються квазістійкий великомасштабний вихор та ряд дрібномасштабних вихорів. Періодично вихрові системи викидаються назовні із заглиблення. У спектральних характеристиках пульсації швидкості усередині канавки та в пограничному шарі над та позаду неї з'являються характерні особливості у вигляді дискретних піків. Піки відповідають частотам обертання великомасштабних вихорів, частотам їх викидів та частотам коливань, які самозберігаються у канавці, та відповідають першій моді Розіт'єра. У результаті експериментальних досліджень зареєстровано квазістійкі вихрові системи, встановлено їх місцезнаходження, масштаб, лінійна та обертова швидкості, частота обертання та циркуляція.

### ВСТУП

Заглиблення на поверхні, яка обтікається рідиною, є джерелами звукових та псевдозвукових коливань. Генерація коливальних тонів течією над видовженою канавкою - це відоме явище, яке діє на колісні сховища і бомбові люки в літаках та щілини на дверцятах автомобілів. Рівні звукового і псевдозвукового тиску бувають такими високими, що спричиняють до шумових проблем в середині літаків і автомобілів та руйнують делікатні інструменти та устаткування в самих канавках. Основна особливість течій в таких канавках чи кавернах є формування зсувного шару, який підсилює збурення потоку і наступне трансформування цих збурень в акустичні хвилі на кормовій ударній стінці канавки. Акустичні хвилі переносяться проти течії до передньої стінки канавки. В зоні відриву граничного шару і зародження зсувного шару ці хвилі призводять до формування хвиль нестійкості, які викликають подальші збурення в зсувному шарі. Таким чином, замикається петля зворотнього зв'язку, яка породжує коливання на дискретних резонансних частотах, що самозберігаються [1]. На кормовій стінці виникає дипольне джерело звукових коливань у зоні удару вихрових структур шару змішування, які виникають у результаті відриву пограничного шару з передньої кромки заглиблення.

Вивченню структури вихрової течії в напівциліндричній видовженій канавці присвячена дана робота. Мета цієї роботи - зареєструвати кінематичні характеристики вихрової течії в канавці і в граничному шарі обтічної поверхні поблизу канавки, а також знайти характерні частоти коливального процесу як в самій канавці, так і на поверхні біля неї.

## 1 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА

Експериментальні роботи проводились на аеродинамічному стенді в Інституті гідромеханіки НАН України. Стенд був створений на базі аеродинамічної труби відкритого типу. Робоча ділянка труби мала циліндричну форму з внутрішнім діаметром 0.1 м і була зроблена з прозорої труби для проведення візуальних дослідів. Повітря з лабораторного приміщення поступало до труби через конфузторний вхід в вигляді лемніскати Бернуллі. В діаметральній площині аеродинамічної труби в напрямку її повздовжньої вісі встановлювалась пласка пластина з локальним заглибленням у вигляді напівциліндричної канавки, яка обтікалась поперечним потоком. Пластина виготовлена з листа товщиною  $4 \cdot 10^{-3}$  м, який був підсилений ребрами жорсткості з нижньої неробочої сторони пластини. Ширина пластини складала 0.1 м, а довжина - 0.6 м. Передній і кормовий краї пластини були загострені для того, щоб усунути зони відриву пограничного шару. На відстані 0.5 м від початку пластини був отвір, в який встановлювалась напівциліндрична канавка діаметром  $20 \cdot 10^{-3}$  м та довжиною  $80 \cdot 10^{-3}$  м. Швидкість потоку в досліді змінювалась від 1 м/с до 20 м/с.

Поле швидкостей над обтічною поверхнею та усередині канавки вимірювалось за допомогою однопиткового дротяного датчика, який підключався до мостової електричної схеми термоанемометра постійної температури фірми Діза. Координатний пристрій дозволяв переміщувати датчик з точністю  $10 \cdot 10^{-6}$  м в трьох взаємно перпендикулярних площинах. Контроль положення датчика відносно обтічної поверхні проводився за допомогою лазерної установки. Дротяні термоанемометри калібрувались і тестувались перед проведенням дослідів, під час дослідів, а також після закінчення робіт. Це давало можливість отримувати калібровочні залежності, що було використано при обробці та аналізу експериментальних результатів.

Похибка при вимірюванні інтегральних та осереднених значень кінематичних характеристик вихрової течії в заглибленні і над пластиною не перевищувала 10% з достовірністю 0.95 або  $2\sigma$ . Спектральні характеристики поля пульсацій швидкості вимірювались з похибкою не більше 2 дБ відносно  $10^{-6}$  В в частотному діапазоні від 0.2 Гц до 1250 Гц.

Окрім інструментальних дослідів проводились візуалізаційні дослідження за допомогою димової візуалізації. Джерело диму знаходилося на поверхні пластини перед заглибленням. Картини візуалізації реєструвались швидкісними кінокамерами, відеокамерами та цифровими фотоапаратами. Візуалізаційний матеріал при застосуванні відповідних програм і методик фіксувався на персональних комп'ютерах, де оброблявся і аналізувався. Похибка заміру геометричних і кінематичних характеристик вихрового потоку та структури течії в заглибленні і над пласкою пластиною, отриманих з картин візуалізації, не перевищувала (15...20)%.

## 2 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДІВ

При проведенні експериментальних досліджень отримано осереднені і пульсаційні характеристики поля швидкостей над обтічною поверхнею пластини і в середині напівциліндричного заглиблення в його серединному перетині. На рис. 1а наведені профілі осередненої повздовжньої швидкості в канавці і над пластиною, які отримані завдяки статистичній обробці результатів вимірювання швидкостей на протязі однієї хвилини

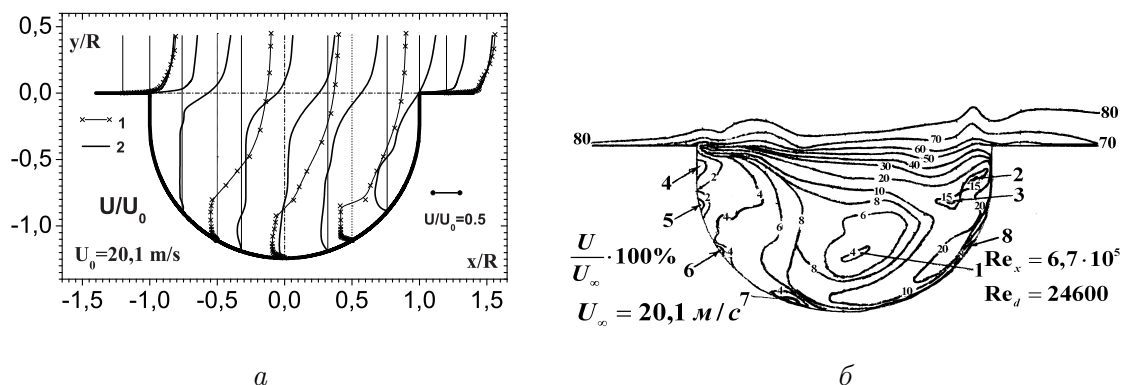


Рис. 1. Поле осереднених складових швидкості:  
 а – профілі повздовжньої швидкості, б – лінії рівних швидкостей

реєстрації даних. Ці результати одержані при  $U_\infty = 20.1$  м/с;  $Re_x = xU_\infty/\nu = 6.7 \cdot 10^5$ , де  $x$  - повздовжня координата від початку пластини до переднього краю канавки,  $\nu$  - коефіцієнт кінематичної в'язкості та  $Re_d = dU_\infty/\nu = 2.5 \cdot 10^4$ , де  $d = 2R$  - діаметр заглиблення. На цьому рисунку крива 1 відповідає даним Афанасьєва і др. [2], які отримані для мілкої напівциліндричної канавки, а крива 2 відповідає нашим результатам.

При заглибленні в канавку має місце зниження середньої повздовжньої швидкості. В перерізі, яке знаходиться нижче середини заглиблення, виокремлюється зона нульових значень повздовжньої осередненої швидкості. При наближенні до дна канавки з'являється область зворотної течії, напрямок якої протилежний набігаючому потоку. Таким чином, в середині канавки зареєстровано великомасштабну циркуляційну течію, центр якої знаходиться між геометричною серединою канавки і її дном. Такий циркуляційний рух рідини в заглибленні напівциліндричної форми спостерігається як в наших дослідях, так і в роботі [3]. Причому розташування центру циркуляційної течії в цих двох дослідях загалом з достатньою точністю співпадає. Значення швидкостей на периферії циркуляційної течії, які показано на рис. 1а мають розходження тому, що геометричні параметри канавки і режими обтікання в цих дослідях не співпадають.

Окрім осереднених і пульсаційних швидкостей в повздовжньому напрямку були отримані і поперечні швидкості, що дало можливість побудувати векторні поля швидкостей в заглибленні і поза ним. Побудовані ізотахи осереднених швидкостей, які визначають кінематичні характеристики вихрової течії в заглибленні і біля нього показано на рис. 1б. Ці ізотахи або лінії рівних швидкостей отримано для швидкості 20 м/с і чисел Рейнольдса таких самих, як і для даних наведених на рис. 1а. Цифри на ізолініях позначають середню швидкість відносно швидкості набігаючого потоку в відсотках. Цифрами зі стрілками позначено характерні зони в канавці, які трактуються як місця існування квазістійких вихрових систем.

В пограничному шарі, який утворюється над гідравлічно гладкою поверхнею пластини, з'являються зони гальмування і прискорення, що обумовлено дією на нього заглиблення, а точніше вихровою течією, що має місце в середині заглиблення. Перед переднім краєм канавки спостерігається гальмування потоку, а потім його прискорення за передньою стінкою каверни. При відриві пограничного шару зароджується зсувний

шар, який має хвилеподібну форму, що обумовлено прискоренням і гальмуванням потоку в середині і назовні канавки. Цей зсувний шар розширяється при просуванні вздовж отвору канавки і при підході його до кормової стінки він ударяється об останню. При ударі одна частина зсувного шару переміщується на вихід із заглиблення, гальмуючи рідину, яка рухається над поверхнею заглиблення, що проілюстровано на рис. 1б над кормовою стінкою заглиблення. Інша частина зсувного шару, який ударився об кормову стінку, прямує вздовж дна заглиблення до його переднього краю. Цей струменеподібний придонний потік, перетинаючи середину канавки підіймається до зсувного шару, подібно результатам, які спостерігав Роквелл [4] для прямокутного заглиблення. Струменеподібний потік і нижня частина зсувного шару в отворі заглиблення формують циркуляційну течію в вигляді великомасштабного квазістійкого вихору в середині канавки, який позначений цифрою 1 на рис. 1б. Великомасштабна когерентна вихрова структура розташовується (подібно спостереженням Роквелла) в нижній прикормовій частині заглиблення і займає майже третину його об'єму. В місці удару зсувного шару з кормовою стінкою формується пара дрібномасштабних, але високоенергійних вихорів, що позначені цифрами 2 та 3. Нижче зони відриву пограничного шару і формування зсувного шару біля передньої стінки і місця підйому струменеподібного потоку зароджується система дрібномасштабних когерентних вихрових структур малої енергії, які позначені цифрами 4, 5, 6 та 7. В місці зародження струменеподібного потоку знайдено дрібномасштабний квазістійкий вихор, який позначено цифрою 8. При зменшенні швидкості набігаючого потоку число, місцезнаходження і масштаб квазістійких вихрових структур змінюється. Їх число зменшується, а розмір великомасштабного когерентного вихору збільшується і він переміщується ближче до центру заглиблення і до його передньої стінки. В області ядер вихрових систем пульсації швидкості зменшуються, а на їх периферії - збільшуються. Особливо великі рівні пульсацій швидкості спостерігаються в місцях зародження зсувного шару і в області його удару з кормовою стінкою. Подібні тенденції формування поля пульсацій швидкості спостерігались як для ламінарного, так і турбулентного режимів обтікання пластини з локальним заглибленням.

Спектральні характеристики поля пульсацій повздовжньої швидкості на рівні поверхні отвору напівциліндричної канавки в її серединному перетині показано на рис. 2а. Тут зображено залежності спектральних густин потужностей пульсацій швидкості, які обезрозмірені зовнішніми змінними  $\delta$  та  $U_\infty$  ( $P^*(\omega) = P(\omega)\delta/[(u')^2U_\infty]$ ) від частоти ( $\omega^* = \omega\delta/U_\infty$ ) для швидкості  $U_\infty = 20.1$  м/с і  $Re_x = 6.7 \cdot 10^5$ . На цьому рисунку цифрами позначено криві, які відповідають різним координатам заміру швидкостей вздовж отвору заглиблення ( $x/R$ ).

На рис. 2б показано перші моменти спектральної густини потужності пульсацій повздовжньої швидкості у вигляді  $\omega P^*(\omega)$  в залежності від  $\omega^*$  для тих же умов обтікання і координат розташування термоанемометричних датчиків, що і на рис. 2а. Рис. 2б дає можливість оцінити вклад кожної частотної компоненти в загальну енергію поля пульсацій швидкості. Таке представлення спектральних характеристик більш наглядне, згідно з рекомендаціями Бредшоу, порівняно з логарифмічним масштабом спектрів.

Спектральні залежності поблизу передньої стінки заглиблення мають монотонно змінний характер (криві 1, 2 та 3). При підході до серединної частини заглиблення, де струменеподібна течія підіймається до зсувного шару і взаємодіє з ним (рис. 1б), в спектрах з'являються характерні особливості у вигляді дискретних піків. Ці піки спостерігаються від середини заглиблення і до його кормової стінки, що проілюстро-

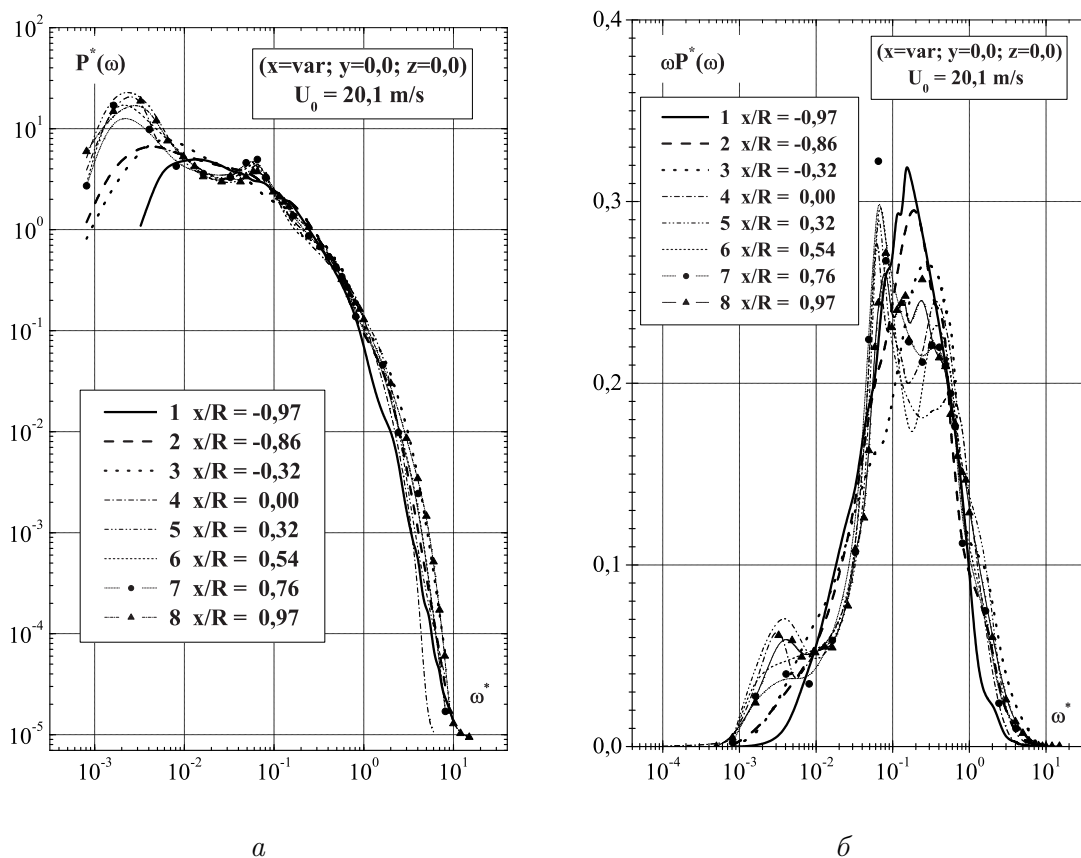


Рис. 2. Спектральна густина потужності пульсацій провздовжньої швидкості:

*a* – логаріфмічне представлення спектру, *б* – перший момент спектру

вано як на рис. 2а, та і на рис. 2б. Піки зосереджено в низькочастотному діапазоні  $0.002 < \omega^* < 0.003$ , якому відповідають частоти  $f = (2 \dots 4)$  Гц і  $0.05 < \omega^* < 0.08$  або  $f = (60 \dots 90)$  Гц. При віддалені від передньої відривної стінки заглиблення спектри наповнюються високочастотними компонентами, які обумовлено дією дрібномасштабних вихорів на поле пульсацій швидкості. Поблизу кормової стінки напівциліндричної канавки з'являється ще один дискретний пік, який добре видно на рис. 2б, що відповідає частотам  $0.5 < \omega^* < 0.7$  або  $f = (600 \dots 800)$  Гц. Ці дискретні піки в відповідних частотних діапазонах спостерігались в середині напівциліндричної канавки, де зароджувались великомасштабні когерентні вихрові системи і дрібномасштабні вихори.

Таким чином, над серединною і кормовою частинами заглиблення на рівні поверхні обтічної пластини спостерігаються характерні особливості в спектральних залежностях пульсацій швидкості, які притаманні вихровому руху в середині заглиблення. Ці характерні особливості проявляються, зокрема, в появі дискретних піків в трьох частотних діапазонах. Перший діапазон  $\omega^* = (0.002 \dots 0.003)$  обумовлений викидом великомасштабної вихрової системи або її частини назовні із заглиблення, що спостерігалося при візуалізації вихрової течії. Другий діапазон частот  $\omega^* = (0.05 \dots 0.08)$  відповідає частоті обертання великомасштабного квазістійкого вихору, який має розмір біля  $0.3d$ . Циркуляція цієї вихрової структури, нормована зовнішніми змінними

(швидкістю потоку та радіусом заглиблення) складає 0.18. Дискретний пік у третьому частотному діапазоні зумовлений ударною взаємодією вихрових структур зсувного шару з кормовою стінкою канавки. У цьому разі в заглибленні формуються коливання, підпорядковані принципу самозбереження, і вони відповідають основній гармоніці або першій моді Розіт'єра кавітаційних коливань. Цим коливанням відповідає число Струхаля  $Sh = fd/U_\infty = 0.64$ . Отже, для швидкості потоку 20 м/с на рівні поверхні обтічної пластини в районі  $-0.32 < x/R < 0$  починається викид вихрових систем або їх частин із заглиблення в пограничний шар з частотою біля (3...4) Гц.

## ВИСНОВКИ

1. В заглибленні формуються квазістійкий великомасштабний вихор і система дрібномасштабних вихорів, число та розмір яких змінюється в залежності від швидкості обтікання. Визначено масштаби, місцезнаходження когерентних вихрових структур в середині заглиблення. Показано вплив вихрового руху в заглибленні на пограничний шар над пласкою поверхнею з локальною напівциліндричною канавкою.
2. Виявлено характерні особливості спектральних залежностей пульсацій швидкості в заглибленні в вигляді дискретних піків, які відповідають частотам викиду вихрових систем або їх частин назовні із заглиблення, частотам обертання квазістійкого великомасштабного вихору і частотам коливання, підпорядкованим принципу самозбереження, які зумовлено ударною взаємодією зсувного шару з кормовою стінкою заглиблення. Коливання, що самозберігаються відповідають першій моді Розіт'єра кавітаційних коливань, для яких число Струхаля складає 0.64.
3. Встановлено, що в районі  $x/R = (-0.32 \dots 0)$  на рівні обтічної поверхні пластини починається викид вихрових систем або їх частин із заглиблення в пограничний шар з частотою близько (3...4) Гц для швидкості потоку 20 м/с. Частота викиду, що знайдена із спектральних залежностей співпадає з тією, яку було отримано при візуальних дослідях.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Cabell R. H., Kegerise M. A., Cox D. E., Gibbs G. P. Experimental feedback control of flow induced cavity tones // AIAA Pap.– 2002.– N 2497.– P. 1–10.
2. Афанасьев В. Р., Веселкин В. Ю., Леонтьев А. И. и др. Гидродинамика и теплообмен при обтекании одиночных углублений на исходно гладкой поверхности: Препр. МГТУ им. Н. Э. Баумана № 2-91. Ч. I.– М: Изд-во МГТУ, 1991.– 56 с. 156.
3. Rockwell D., Lin J.-C., Oshkai P., Reiss M., Pollack M. Shallow cavity flow tone experiments onset of locked-on states // J. Fluids and Structures.– 2003.– **17**.– P. 381–414.
4. Rockwell D. Vortex-body interactions // Annu. Rev. Fluid Mech.– 1998.– **30**.– P. 199–229.