

УДК 532.5.517

**ГРУПОВЕ ОБТІКАННЯ ПОГАНО ОБТІЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ****О. А. Воскобойник**Інститут гідромеханіки НАН України  
alexandr.vsk@gmail.com

*Експериментально досліджено особливості генерації великомасштабних вихрових структур, формуючих підковоподібну вихрову систему, під час слідного обтікання погано обтічних конструкцій. Визначено масштаби та місце розташування вихрових структур, а також кінематичні та динамічні характеристики поля швидкостей поблизу трирядного циліндричного ростверку, розміщеного за призматичним тілом, коли вони обтікаються під кутом та вісесиметрично. Показано, що при кутовому обтіканні, значення швидкостей поблизу трирядного циліндричного ростверку збільшились, порівняно з випадком, коли вони обтікаються вісесиметрично.*

**Ключові слова:** група погано обтічних конструкцій, кутове обтікання, поле швидкостей, когерентна вихрова структура

*The features of generation of large-scale vortical structures, forming the horseshoe vortical system, in the wake flow around bluff bodies are experimentally investigated. Scales and place of location of vortical structures, and also kinematic and dynamic characteristics of the velocity field near three-row cylinder a grillage located after a prismatic body, when they are streamlined under a corner and axial symmetric, are defined. It is shown that velocities near three-row cylinder a grillage at the angular flow around are increased, as compared to a case, when they are axial symmetric streamlined.*

**Keywords:** Bluff body group, corner flow, velocity field, coherent vortex structure

**Постановка проблеми**

Під час обтікання аеродинамічних профілів, фюзеляжів літаків, корпусів кораблів чи автомобілів на їх поверхні нерідко з'являються виступи технологічного або випадкового походження. Такі виступи у більшості випадків мають погано обтічну форму та є перешкодами потоку, що спричиняє підвищення опору обтічної конструкції, її вібрації та шуму, що випромінюється в навколишнє середовище [1].

Причиною таких явищ є генерація вихрових структур, відривних зон та струменевих потоків, що виникають на обтічній поверхні погано обтічної конструкції та на тій поверхні, яка спрягається з погано обтічною конструкцією.

Коли на поверхні розташовано групу погано обтічних тіл, які знаходяться одне від одного на невеликій відстані, то утворюється аерогідродинамічна взаємодія між ними. Ця взаємодія суттєво впливає на вихороутворення та струменеві течії, що генеруються навколо і всередині групи погано обтічних тіл [2; 3].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Відрив набігаючого примежового шару і формування відривної (застійної) зони в області спряження поверхні з погано обтічним тілом є наслідком несприятливого градієнта тиску, зумовленого наявністю цього тіла.

Встановлено [2; 4; 5], що поздовжні несприятливі градієнти тиску є основними причинами формування підковоподібних вихорів навколо фронтальної частини підмурка цього тіла.

Підковоподібні вихори є наслідком реорганізації завихреності примежового шару вниз за потоком від відривної лінії. Первинна підковоподібна вихрова структура має той же напрямок обертання, що і завихреність у набігаючому примежовому шарі.

Підковоподібний вихор витягується навколо погано обтічної конструкції та згинається навколо її передньої частини поблизу області спряження, частково через поперечні градієнти тиску.

Отже, бічні вихрові лінії стають орієнтованими в поздовжньому напрямку, огинаючи конструкцію, та мають завихреність, протилежно напрямлену по обох бічних сторонах погано обтічного тіла. Великомасштабні підковоподібні вихори переносять більш високошвидкісну рідину вздовж фронтальної частини тіла в напрямку до її підмурка, формуючи спадаючу течію.

Як результат взаємодії між спадаючою течією, обтічною поверхнею, на якій встановлено конструкцію, та підковоподібним вихором, опір обтічної поверхні із виступом збільшується.

У разі набігаючої турбулентної течії місцезростаювання, масштаб та інтенсивність підковоподібних вихорів сильно змінюється в часі. Вони генерують високу турбулентність і пульсації тиску та утворюють значні дотичні напруги на обтічних поверхнях [2; 6].

Еволюція підковоподібної вихрової системи навколо підмурка обтічного тіла та нестійкий слід позаду нього є загальними явищами, які мають місце у більшості вимірювань динаміки подібних течій, хоча ряд відмінностей вихрових та

струменевих течій істотно змінюються залежно від параметрів потоку і форми погано обтічних тіл [1; 4; 7]. Експериментальні дослідження [2; 8] показують, що структура підковоподібної вихрової системи залежить від числа Рейнольдса та характеристик примежового шару, який формується перед обтічною перешкодою.

Структура підковоподібної вихрової системи для режиму ламінарного обтікання складається з трьох основних вихорів, які обертаються в одному напрямку.

Вихор, який розвивається, зароджується на позиції, яка знаходиться на найбільшій відстані від поверхні обтічної конструкції. Первинний вихор розташовується в середній позиції, тоді як кутовий вихор знаходиться щонайближче до погано обтічного тіла. Вихор, що розвивається, породжується примежовим шаром, який відривається від обтічної поверхні, на якій встановлено конструкцію, через інтенсивний несприятливий градієнт тиску, що генерується наявністю погано обтічного тіла на обтічній поверхні. Цей вихор поступово переноситься вниз за потоком та, врешті-решт, стає новим первинним вихором. У цей час первинний вихор конвектує в напрямку до кутового вихору і поступово зливається з ним. Як показують дослідження [2], процес цей є періодичним.

Через складність групових конструкцій, що включають обтікання групи перешкод, встановлених на обтічній поверхні, їх дослідження не багаточисельні.

Так, наприклад, у працях [3; 7] виконані експериментальні вимірювання течії навколо системи кубів, які були встановлені на плоску поверхню. Визначено, що для малих відстаней між кубами зсувний шар, що відірвався від першого куба, приєднується до другої перешкоди і реєструється періодичний схід вихорів тільки у сліді нижнього за потоком куба. Таким чином, два куби діють як одне погано обтічне тіло.

У праці [3] спостерігали осциляції вихрового потоку в проміжку між кубами і явище синхронізації сліду для тривимірної тандемної геометрії.

У праці [7] автори показали характерні особливості поля осередненої швидкості в діапазоні синхронізації та механізм сходу сліду на різних фазах циклу сходу.

Для великих розділень з'являється другий підковоподібний вихор перед фронтальною частиною другого куба і кожен з кубів обтікається, як незалежна перешкода.

#### Мета досліджень

Враховуючи вище наведене, актуальним залишається дослідження взаємодії вихрових струк-

тур та струменевих течій при слідному обтіканні багаточисельної конструкції.

Цій проблематиці присвячені експериментальні дослідження обтікання групової конструкції у вигляді призматичного тіла та трирядного циліндричного ростверку, розташованих у сліді один за одним під кутом  $5^\circ$  до набігаючого потоку, та вивчення особливостей формування і динаміки підковоподібних вихрових структур, що утворюються при обтіканні тандемної конструкції.

#### Експериментальна установка та методика проведення досліджень

Проведення експериментальних досліджень було здійснене в гідродинамічному лотку завдовжки 14 м, шириною 0,8 м і завглибшки до 0,8 м з вільною поверхнею води.

Детальний опис експериментальної установки, програми та методики досліджень вихрової течії при зв'язаному обтіканні трирядного циліндричного ростверку на плоскій поверхні наведено в праці [8]. Тому в даному дослідженні наведено лише короткий опис основних елементів експериментального стенду і методики дослідів, які належать до інструментальних вимірювань полів швидкості вихрової течії поблизу обтічних тіл.

Отже, вода в гідродинамічний лоток подавалася за допомогою насосів через відстійну камеру, дифузор, хонейкомби і ґрати, що випрямляють потік. На дні вимірювальної ділянки, розташованої посередині лотка, була встановлена групова конструкція у вигляді призматичного тіла та трирядного циліндричного ростверку, змонтованих по осі плоскої пластини завдовжки 2 м (рис. 1).

Призма розташовувалась вище за потоком, ніж трирядний циліндричний ростверк. Відстань між тілами була близько 0,4 м. Довжина призматичного тіла становила 0,3 м, ширина — 0,1 м, а висота — 0,24 м. Довжина ростверку була майже 0,6 м, ширина — 0,1 м, а висота — 0,2 м, він складався з 31 циліндра діаметром  $d = 0,027$  м, які розташовувались у три ряди в шаховому порядку.

Глибина потоку в дослідах була постійною та дорівнювала 0,2 м, а його швидкість ( $U_\infty$ ) і дорівнювали 0,1 м/с.

Числа Рейнольдса і Фруда  $Re_x = xU_\infty/\nu = 10^5$ ;  $Re_d = dU_\infty/\nu = 2,7 \cdot 10^3$  та  $Fr = U_\infty/\sqrt{gH} = 0,067$  відповідно, де  $x$  — поздовжня відстань у напрямку потоку від початку плоскої пластини до першого центрального циліндра ростверку;  $\nu$  — коефіцієнт кінематичної в'язкості води;  $g$  — прискорення вільного падіння та  $H$  — глибина потоку.

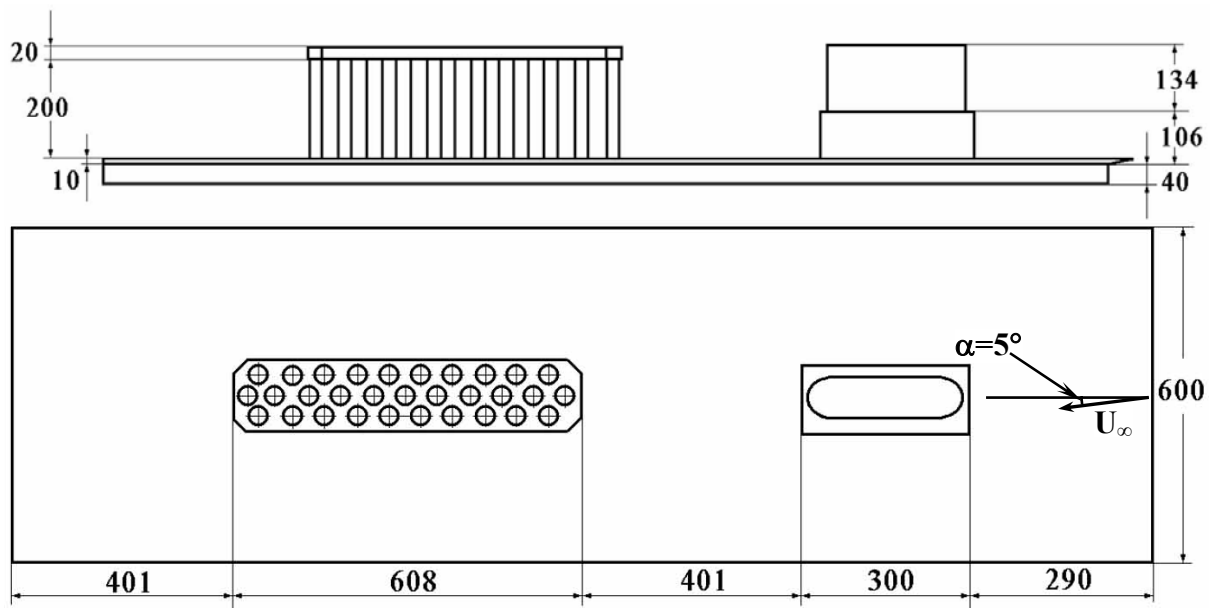


Рис. 1. Схема розташування групи погано обтічних конструкцій при обтіканні їх потоком під кутом  $5^\circ$

Якісне оцінювання просторових і тимчасових характеристик вихрового руху поблизу трирядного ростверку і ступеня його взаємодії з обтічною поверхнею, згідно з розробленою програмою і методикою дослідів [8], проводилися під час візуальних досліджень. У місцях, де спостерігаються характерні когерентні вихрові структури у вигляді підковоподібних вихорів і слідних вихрових структур, виконувалися інструментальні вимірювання поля швидкості.

Кінематичні характеристики зв'язаної течії вимірювалися за допомогою спеціальних розроблених і виготовлених мініатюрних термісторних датчиків швидкості і п'єзорезистивних датчиків швидкісного натиску.

Термісторні датчики швидкості (діаметр чутливої поверхні 0,008 м) вмонтовувалися за допомогою спеціальних державок у кореляційний блок (з фіксованою відстанню між двома датчиками). Контроль швидкості потоку здійснювався за допомогою манометричного датчика типу трубки Піто подвійного тиску, де як чутливий елемент застосовувався п'єзорезистивний датчик повного тиску.

Електричні сигнали, що генеруються датчиками під дією відповідних навантажень, надходили на підсилюючу та контролюючу вимірювальну апаратуру, а згодом на засоби реєстрації інформації і персональні комп'ютери через відповідні аналогово-цифрові перетворювачі. На персональних комп'ютерах та на спеціалізованих двоканальних аналізаторах спектрів фірми Брюль і К'ер експериментальні дані оброблялись та аналізувались за допомогою стандартних і спеціаль-

но розроблених програм з використанням теорії вірогідності та математичної статистики.

Усі засоби вимірювання, контролю та реєстрації інформації перед застосуванням, під час проведення дослідів і після виконання їх тестувались і калібрувались згідно з паспортними даними і методикою проведення дослідів. Датчики атестувались та перевірялись за допомогою абсолютних і відносних методів на спеціальних стендах і на відповідному устаткуванні. Похибка вимірювань інтегральних і осереднених значень швидкості не перевищувала 4 % (з надійністю  $P = 0,95$ ), пульсаційних її складових – до 6 %.

#### Результати досліджень та аналіз даних

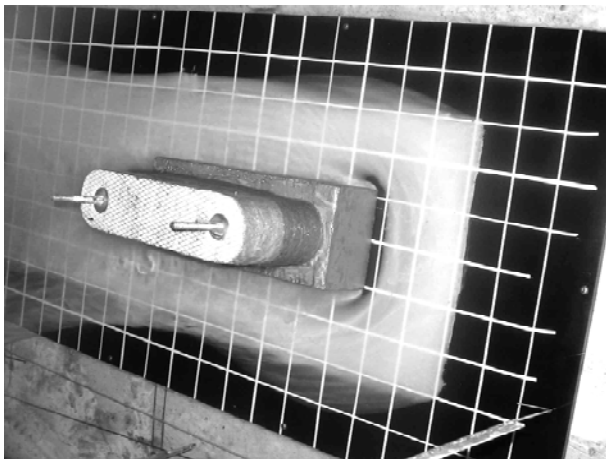
Візуальні спостереження кутового (під кутом  $5^\circ$ ) обтікання двох погано обтічних конструкцій, розташованих у сліді одна за одною, проводилися при швидкості набігаючого потоку, що дорівнювала  $U_\infty = 0,1$  м/с. Час спостереження становив близько 15–20 хв. Еволюцію розмиву водорозчинного покриття у вигляді плівок висохлого згущеного молока, що якісно характеризує дотичну напругу на обтічній поверхні, обумовлену дією вихрових структур і спадаючою течією, можна описати таким чином:

$t = (0 - 1)$  хвилина: починається змивання водорозчинного покриття в передній частині призматичної конструкції, утворюючи за нею відривні вихори. Значна кількість змитого згущеного молока змивається потоком до трирядного циліндричного ростверку, що стоїть у сліді. Розмивання водорозчинного покриття в околі ростверку поки не спостерігається, тобто плівка згущеного молока ще зберігається.

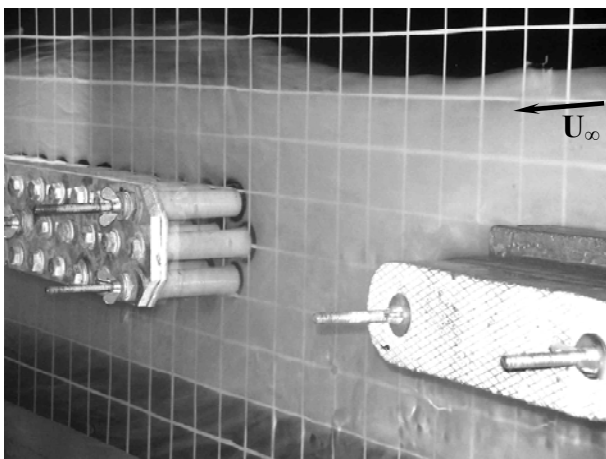
$t = 1-3$  хв: перед циліндричним ростверком починається розмивання водорозчинного покриття поблизу першого та другого бічних циліндрів (з навітряного боку конструкції). Біля решти циліндрів ростверку розмиву немає, оскільки відбувається значне нанесення змитого згущеного молока від призматичного тіла, розташованого вище за потоком.

$t = 3-4$  хв: продовжується розмивання водорозчинного покриття перед призмою та поблизу передніх, а також біля бічних циліндрів у кормовій частині ростверку, з навітряного боку, рис. 2, а.

$t = 4-6$  хв: за призматичним тілом формуються слідні вихори, створюючи симетричну вихрову доріжку Кармана. Змите згущене молоко, об'єднане у вихрові структури, стікає униз за потоком до циліндричного ростверку. Продовжуються розмиви водорозчинного покриття біля передніх циліндрів та в кормовій частині, з навітряного боку ростверку рис. 2, б.



а



б

Рис. 2. Розмивання контрастного покриття під час кутового обтікання двох погано обтічних тіл:

а —  $t = 3-4$  хв, б —  $t = 4-6$  хв

$t = 6-9$  хв: перед трирядним циліндричним ростверком найбільші розмиви водорозчинного покриття (до  $0,5d$ ) спостерігаються біля передніх циліндрів, а також у кормовій частині поблизу останніх бічних циліндрів (з навітряного боку ростверку). З підвітряної частини ростверку розмиви згущеного молока незначні.

$t = 9-12$  хв: у передній частині призматичної конструкції спостерігаються великі розмиви водорозчинного покриття у вигляді слідів системи підковоподібних вихорів. Слід першого вихору розташовується біля самої призми, його ширина близько  $(3-4) \cdot 10^{-2}$  м або  $(0,26-0,35)b$ . Слід другої вихрової системи знаходиться на відстані  $(5-6) \cdot 10^{-2}$  м або  $(0,44-0,53)b$  від призми, його ширина біля  $(1-2) \cdot 10^{-2}$  м або  $(0,09-0,18)b$ . Відстань між цими розмивами  $(0,5-1) \cdot 10^{-2}$  м або  $(0,04-0,09)b$ . Обидва підковоподібних вихори огинають призматичне тіло під кутом  $20-50^\circ$  з підвітряного боку та, під кутом  $10-40^\circ$  з навітряного боку ростверку (рис. 3, а).

$t = 12-15$  хв: значні розмиви водорозчинного покриття спостерігаються в передній частині призматичного тіла. У кормовій частині призми згущеного молока ще зберігається. Поблизу циліндричного ростверку понад усе розмито покриття біля передніх циліндрів, а також з навітряного боку в бічних циліндрів у кормовій частині ростверку. Нерозмитим покриття залишається за самим ростверком та з підвітряного боку в бічних циліндрів у середній частині ростверку (рис. 3, б).

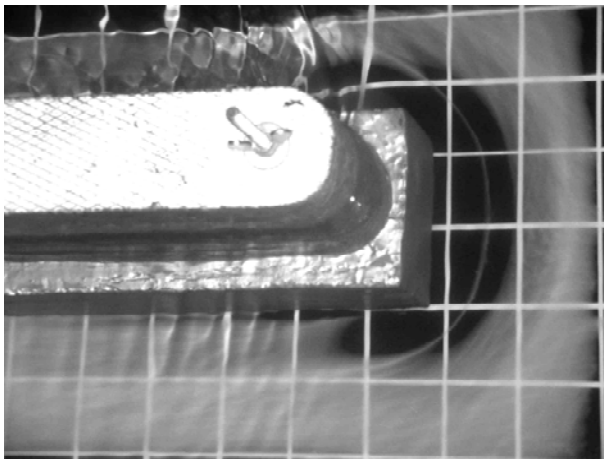
$t = 15-20$  хв: процес розмивання водорозчинного покриття в околі двох погано обтічних конструкцій набув сталого характеру — нові зони розмиву покриття не спостерігаються.

Візуальні дослідження показали, що при кутовому обтіканні двох погано обтічних тіл, найбільші розмиви водорозчинного покриття зафіксовані для призматичного тіла, в передній частині тіла та в передній бічній частині призми.

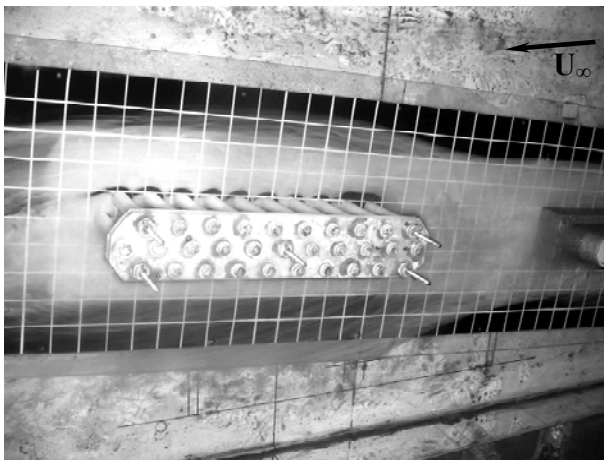
У кормовій частині призматичного тіла розмиви незначні. Для трирядного циліндричного ростверку зафіксовані розмиви в передній частині циліндрів та у кормовій частині циліндрів з навітряного боку.

### Інструментальні вимірювання

Усі інструментальні вимірювання проводилися тільки поблизу трирядного циліндричного ростверку. Вимірювання були проведені перед першим та другим центральними циліндрами, а також перед другим бічним циліндром ростверку.



а



б

Рис. 3. Розмивання контрастного покриття при кутовому обтіканні двох погано обтічних тіл:  
а) —  $t = 9 - 12$  хв, б) —  $t = 12 - 15$  хв

Експериментальні вимірювання проводилися при швидкості набігаючого потоку  $U_{\infty} = 0,1$  м/с, глибині потоку  $h = 0,2$  м, куті атаки  $\alpha = 5^{\circ}$ .

При кутовому обтіканні перед першим центральним циліндром швидкості збільшилися, порівняно з вісесиметричним обтіканням групової конструкції у вигляді призматичного тіла та трирядного циліндричного ростверку, розташованих у сліди один за одним.

Результати досліджень показали, що перед самим циліндром у місцеположенні ( $x = -0,08d$ ;  $y = 0,08d$ ;  $z = 0$ ) середня швидкість збільшилася на 7 – 12 %, а на видаленні від неї в напрямку до призматичного тіла — більш ніж у два рази.

Так, наприклад, при осьовому слідному обтіканні групової конструкції швидкість у районі:  $x = -(10 - 12) \cdot 10^{-3}$  м або  $x = -(0,37 - 0,44)d$ ;  $y = (6 - 8) \cdot 10^{-3}$  м або  $(0,22 - 0,30)d$ ;  $z = 0$  становить біля  $0,3U_{\infty}$ , а при кутовому обтіканні —  $0,75U_{\infty}$ .

Окрім того, розташування та масштаб першої вихрової структури з підковоподібною системою, найбільш віддаленої від конструкції циліндричного ростверку, з координатами  $x = -10 \cdot 10^{-3}$  м або  $-0,37d$ ;  $y = 4 \cdot 10^{-3}$  м або  $0,15d$ ;  $z = 0$ , практично не змінився. Водночас швидкості цього вихору як усереднені, так і пульсаційні зросли. Друга вихрова структура підковоподібною системи при кутовому обтіканні перемістилася уздовж поверхні циліндра майже у два рази вище над плоскою пластиною. Координати цього вихору становлять:  $x = 4 \cdot 10^{-3}$  м або  $0,15d$ ;  $y = 6 \cdot 10^{-3}$  м або  $0,22d$ ;  $z = 0$ , а масштаб його зменшився до  $4 \cdot 10^{-3}$  м або  $0,15d$  як у поздовжньому, так і у вертикальному напрямках.

Зміни середніх швидкостей в ядрі та на периферії вихрових структур, що формують підковоподібну систему і розташованих поблизу місця сполучення першого центрального циліндра ростверку та площини пластини, показано на рис. 4. Тут криві 1 та 2 є змінами в часі усереднених швидкостей, які були виміряні в ядрі та на периферії відповідно другої вихрової структури при кутовому обтіканні групової конструкції.

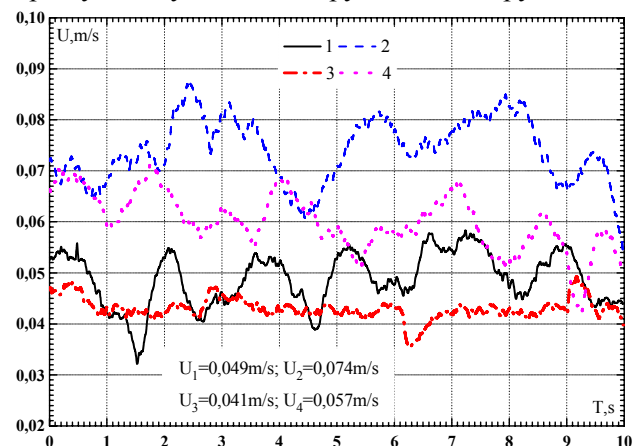


Рис. 4. Середні швидкості перед першим центральним циліндром трирядного ростверку

Крива 1 виміряна в точці з координатами ( $x = -0,15d$ ;  $y = 0,22d$ ;  $z = 0$ ), а крива 2 — в точці ( $x = -0,3d$ ;  $y = 0,28d$ ;  $z = 0$ ). Криві 3 та 4 виміряні також в ядрі та на периферії найближчої до циліндра вихрової структури підковоподібною системи, для яких координати були такими  $x = -0,15d$ ;  $y = 0,15d$ ;  $z = 0$  (ядро вихору) і  $x = -0,3d$ ;  $y = 0,22d$ ;  $z = 0$  — його периферія. Дослідження показують, що при кутовому обтіканні групової конструкції збільшуються середні швидкості як в ядрі вихору, найближчому до конструкції, так і на його периферії в середньому на 20 та 30 %, відповідно. При цьому в ядрі цю-

го вихору інтенсивно збільшуються низькочастотні коливання швидкості, зумовлені взаємодією локальних та глобальних підковоподібних систем зі слідними вихорами.

Як показали результати експериментальних досліджень, перед другим центральним циліндром значення середніх швидкостей також зросли, особливо ближче до середини між центральними циліндрами, і досягли  $(0,9 - 0,95)U_\infty$ . Лінії рівних швидкостей мають незамкнений періодично осцилюючий характер і лише біля самого дна замикаються у вихрову систему, яка має приплюснутий до дна вигляд. Центр цієї вихрової структури має координати  $x = -5 \cdot 10^{-3}$  м або  $-0,19d$ ;  $y = 3 \cdot 10^{-3}$  м або  $0,11d$ ;  $z = 0$  та швидкість в ядрі цього вихору становить біля  $0,7U_\infty$ . Масштаб цієї вихрової структури:  $\lambda_x = 8 \cdot 10^{-3}$  м або  $0,3d$  і  $\lambda_y = 5 \cdot 10^{-3}$  м або  $0,19d$ .

Перед другим бічним циліндром з підвітряного боку трирядного циліндричного ростверку швидкості зросли до  $(0,8 - 0,85)U_\infty$  ближче до серединного перетину між першим та другим бічними циліндрами, а біля другого бічного циліндра середня швидкість дорівнює  $0,75U_\infty$ .

Лінії рівних швидкостей у місці сполучення бічного циліндра з пластиною утворюють дві замкнуті області з центрами  $x = -11 \cdot 10^{-3}$  м або  $-0,41d$  від другого бічного циліндра;  $y = 4 \cdot 10^{-3}$  м або  $0,15d$ ;  $z = 38 \cdot 10^{-3}$  м або  $1,41d$  та  $x = -5 \cdot 10^{-3}$  м або  $-0,19d$ ;  $y = 3 \cdot 10^{-3}$  м або  $0,11d$ ;  $z = 38 \cdot 10^{-3}$  м або  $1,41d$ .

Радіуси цих вихорів становлять біля  $2 \cdot 10^{-3}$  м або  $0,8d$  у горизонтальному напрямку і біля  $3 \cdot 10^{-3}$  м або  $0,11d$  — у вертикальному. Водночас для вісесиметричного обтікання групової конструкції погано обтічних тіл перед другим бічним циліндром ростверку була виявлена тільки одна великомасштабна вихрова структура підковоподібної системи, яка мала масштаб  $7 \cdot 10^{-3}$  м як в горизонтальному, так і у вертикальному напрямках. Центр цієї вихрової структури знаходиться на віддаленні порядку  $x = -(9 - 11) \cdot 10^{-3}$  м або  $x = -(0,33 - 0,41)d$  від бічного циліндра та на відстані  $y = (5 - 6) \cdot 10^{-3}$  м або  $(0,21 - 0,22)d$  від поверхні плоскої пластини.

Таким чином, при кутовому обтіканні великомасштабна вихрова структура перед другим бічним циліндром ростверку, що генерується при вісесиметричному обтіканні групової конструкції, розділилася на дві менші за масштабом вих-

рові структури, що формують локальну підковоподібну вихрову систему. Ця пара вихорів розташовується перед другим бічним циліндром майже на одній висоті від обтічної поверхні плоскої пластини.

Для вихрової структури, що знаходиться ближче до другого бічного циліндра при кутовому обтіканні групової конструкції, та для вихрової структури, що огинає другий бічний циліндр при вісесиметричному обтіканні двох погано обтічних конструкцій, зміни середніх швидкостей у часі подано на рис. 5, аналогічно до результатів вимірювань перед першим центральним циліндром. Також крива 1 та 2 отримана для кутового обтікання групової конструкції відповідно в ядрі і на периферії вихору. Криві 3 і 4 виміряні для вісесиметричного слідного обтікання групової конструкції у вигляді призматичного тіла та трирядного циліндричного ростверку.

Координати точок вимірювання: крива 1 — ( $x = 3d$ ;  $y = 0,11d$ ;  $z = 1,41d$ ), крива 3 — ( $x = 2,8d$ ;  $y = 0,21d$ ;  $z = 1,41d$ ), а криві 2 і 4 — ( $x = 2,85d$ ;  $y = 0,19d$ ;  $z = 1,41d$ ) та ( $x = 2,7d$ ;  $y = 0,24d$ ;  $z = 1,41d$ ) відповідно.

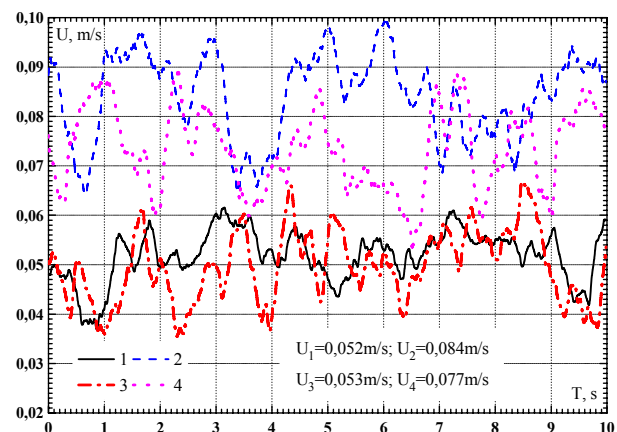


Рис. 5. Середні швидкості перед другим бічним циліндром трирядного ростверку

Як впливає з наведених результатів, середні швидкості в ядрі вихрових систем при зміні режиму обтікання практично не змінилися (нагадаємо, що при кутовому обтіканні точка вимірювань знаходилася на підвітряній стороні ростверку). На навітряній стороні значення середніх і пульсаційних швидкостей в околі бічних циліндрів збільшуються. На периферії вихрових структур локальних підковоподібних систем в околі другого бічного циліндра середня швидкість при кутовому обтіканні зросла майже на 10 % (на рис. 5 криві 2 та 4).

### Висновки

Результати експериментальних досліджень кутового обтікання двох погано обтічних конструкцій дали можливість зробити такі висновки:

Виявлено, що розмивання водорозчинного покриття, у першу чергу, виникає перед призматичним тілом, що знаходиться вище за потоком від ростверку, згодом розмивання починається поблизу передніх циліндрів трирядного ростверку, з навітряного боку. При сталій стадії найбільші ділянки розмивів зафіксовані:

– перед призматичним тілом у вигляді двох розмитих слідів від дії двох великомасштабних вихрових структур, що огинають призму під азимутним кутом, приблизно  $35^\circ$  з підвітряного боку і під кутом близько  $25^\circ$  з навітряного боку;

– поблизу трирядного циліндричного ростверку, перед передніми циліндрами, а також у кормовій частині, особливо, з навітряного боку. У підвітряній частині ростверку спостерігаються незначні розмиви в передніх бічних циліндрів, а також у кормовій частині ростверку.

2. Встановлено, що перед першим центральним циліндром ростверку значення швидкостей (порівняно з вісесиметричним обтіканням) збільшилися перед самим циліндром майже на 10 %, а на віддаленні, ближче до призматичної конструкції більш, ніж у два рази. Перед цим циліндром зафіксовано дві вихрові структури як при вісесиметричному обтіканні, так і при кутовому обтіканні. Розміри та масштаб першої вихрової структури (найбільш віддаленої від циліндра) зі зміною кута обтікання майже не змінилися.

Друга вихрова структура при кутовому обтіканні перемістилася вгору уздовж циліндра, а масштаб цієї структури зменшився. Значення середніх швидкостей як в ядрі цієї вихрової структури, так і на його периферії збільшилися в середньому на 20 і 30 %, відповідно. При цьому в ядрі другої вихрової структури підковоподібної вихрової системи інтенсивно збільшуються низькочастотні коливання швидкості, обумовлені взаємодією локальних і глобальних підковоподібних систем із слідними вихорами.

Зафіксовано, що перед другим центральним циліндром значення середніх швидкостей також зросли, особливо ближче до середини між

центральними циліндрами, і досягли  $(0,9 - 0,95)U_\infty$ .

Зареєстрована вихрова система, яка має приплюснутий до дна вигляд. Центр цієї вихрової структури має координати  $x = -0,19d$ ;  $y = 0,11d$  і швидкість в ядрі цього вихору становить біля  $0,7U_\infty$ . Масштаб вихрової структури такий:  $\lambda_x = 8 \cdot 10^{-3}$  м і  $\lambda_y = 5 \cdot 10^{-3}$  м.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Девнин С. И. Аэрогидромеханика плохобтекаемых конструкций / С. И. Девнин. — Л. : Судостроение, 1983. — 320 с.
2. Borazjani I. Vortex-induced vibrations of two cylinders in tandem arrangement in the proximity-wake interference region / I. Borazjani, F. Sotiropoulos // J. Fluid Mech. — 2009. — Vol. 621. — P. 321–364.
3. Горбань В. О. Вивчення взаємодії квадратних циліндрів, розташованих тандемом / В. О. Горбань, І. М. Горбань // Прикладна гідромеханіка. — 2008. — Т. 10, № 1. — С. 36–47.
4. Chen G. The effects of cylinder shape on the primary horseshoe vortex of juncture flow / G. Chen, X.D. Du, Q.D. Wei // 9th Symposium on Flow Visualization. — 2000. — Pap. 54. — 9 p.
5. Roulund A. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile / A. Roulund, B. M. Sumer, J. Fredsoe, J. Michelsen // J. Fluid Mech. — 2005. — V. 534. — P. 351–401.
6. Kirkil G. Coherent structures in the flow field around a circular cylinder with scour hole / G. Kirkil, S. G. Constantinescu, R. Ettema // J. Hydr. Eng. - 2008. — V. 134, № 5. — P. 572–587.
7. Martinuzzi R. Vortex shedding from two surface-mounted cubes in tandem / R. Martinuzzi, B. Havel // Int. J. Heat Fluid Flow. — 2004. — V. 25. — P. 364–372.
8. Воскобойник А. В. Спряжене обтікання трирядного пального ростверку на пласкій поверхні. Ч. 1. Формування підковоподібних вихорів / А. В. Воскобойник, В. А. Воскобойник, О. А. Воскобойник // Прикладна гідромеханіка. — 2008. — Т. 10, № 3. — С. 28–39.

Стаття надійшла до редакції 12.12.2011.