

УДК 624.014

Р.І. Кінаш, О.Є. Копилов

Національний університет “Львівська політехніка”, РНДЛ-98

АЕРОДИНАМІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТАНДЕМУ З ДВОХ КОЛОВИХ ЦИЛІНДРІВ

© Кінаш Р.І., Копилов О.Є., 2002

Наведено результати вимірювань величин чисел Рейнольдса, коефіцієнта аеродинамічного опору C_x та частоти пульсації швидкості припливу повітряних мас. Одержано залежності чисел Струхалія від відстані між гладкими коловими циліндрами та їхнього діаметра, а також напрямку атаки повітряних мас відносно осі тандему.

Вступ

У практиці інженера-будівельника досить часто зустрічаються конструкційні елементи у формі колового циліндра. Насамперед це сталеві димарі або їх групи, розміщені у спільній зовнішній оболонці, відтяжки підвісних мостів та різні опорні конструкції, поперечні перерізи яких являють собою колові циліндри.

На такі конструкції, що розташовані в поперечному напливі повітряних мас, діє гідродинамічне або, як його ще називають, аеродинамічне навантаження. При цьому настає явище відривання вихорів, яке в певних межах числа Рейнольдса може мати регулярний або циклічний характер і призводити до появи коливань в площині, перпендикулярній до середнього напрямку напливу повітряних мас [1–10].

Величиною, що характеризує частоту відривання вихорів від конструкції, яку розташовано в межах напливу повітряних мас, є число Струхалія (St)

$$St = \frac{U}{Df}, \quad (1)$$

де D – діаметр циліндра, м; U – швидкість напливу повітряних мас, м/с; f – частота відривання вихорів, Гц.

Число Струхалія є величиною, яка характеризує форму поперечного перерізу гнучкої конструкції. Число Струхалія, як і характер напливу в пристінному шарі конструкції, що опливаєється, залежить від числа Рейнольдса. Так, наприклад, у випадку тіл з гострими гранями процес їхнього опливання можна трактувати незалежним як від числа Рейнольда, так і від числа Струхалія, остання величина визначається лише формою поперечного перерізу та гнучкістю елемента.

Знаючи число Струхалія розглядуваної конструкції, її зовнішні розміри та частоту власних коливань n_i ($i = 1, 2, \dots$) (переважно найважливішим є перший вид коливань, хоча в деяких випадках і другий), підставляючи в (1) $f = n_i$, можна обчислити критичну швидкість

резонансу V_{cr} . Визначення величин аеродинамічних сил, що виникають під час явища резонансу та амплітуди коливань, є складним завданням і вимагає спеціальних досліджень. Однак, знаючи число Струхаля, можна оцінити ймовірність появи вихрового збурення коливань і за потреби вжити запобіжних заходів: запроектувати гасники коливань, змінити конструкцію тощо.

Взаємодію між моделлю та повітряними масами під час силових вимірювань можна охарактеризувати за допомогою коефіцієнта аеродинамічного опору C_x :

$$C_x = \frac{P_x}{q \cdot D \cdot l \cdot n}, \quad (2)$$

де P_x – динамічний тиск у площині вимірювання; діаметр циліндрів; довжина циліндра; n – кількість циліндрів у системі.

Мета експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень було визначення та порівняння величин коефіцієнтів аеродинамічного опору C_x , чисел Струхаля для металевих колових циліндрів різної шорсткості залежно від способу розміщення циліндрів відносно один одного у просторі.

Методика проведення експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проведено в аеродинамічній трубі низьких швидкостей Варшавської політехніки. Форма поперечного перерізу труби – квадрат, із розміром ребра 1 м. Довжина робочої камери труби – 8 м. Швидкість нагнітання повітряних мас за допомогою реостата можна плавно змінювати в межах від 1 до 18 м/с.

Як модель димової труби було використано латунні труби діаметром 60 мм із товщиною стінки 1,5 мм. Зовнішня поверхня труб була відполірована. Шорсткість поверхні моделювалася за допомогою рівномірно наклеєних на поверхню труб пластинок з фанери розміром $3 \times 1,5$ мм (16 пластинок) і прикріплених сталевих та мідних дротиків (32 дротики) діаметром 0,9 та 1,2 мм, відповідно. (Тандем) Моделі було жорстко закріплено між підлогою та стелею робочої камери аеродинамічної труби, через це було прийнято, що модель знаходиться у плоскому припливі ($\lambda = \infty$). Площа поверхні моделі, що піддавалася безпосередньо дії вітру, не перевищувала 6 % при допустимій величині 7 % для аеродинамічних труб із закритою поверхнею.

Силові дослідження здійснювались в аеродинамічній трубі замкнутого типу з відкритою робочою частиною довжиною 2,01 м та діаметром вихідного сопла 1,5 м. Для нагнітання повітряних мас в аеродинамічній трубі використовувався вентилятор з чотирма лопатями, який живився від двигуна змінного струму потужністю 55 кВт. У цій аеродинамічній трубі можна досягнути напливу повітряних мас із швидкістю від 15 до 40 м/с. Інтенсивність турбуленції не перевищувала при цьому 1,5 %. Ця аеродинамічна труба обладнана тензометричною вагою з верхнім розміщенням (рис. 1).

Для проведення силових досліджень моделі вертикально підвішувалися за допомогою сталевих відтяжок до вимірювальної станини тензометричної ваги (рис. 2–6).



Рис. 1. Загальний вигляд тензометричної ваги з верхнім розміщенням

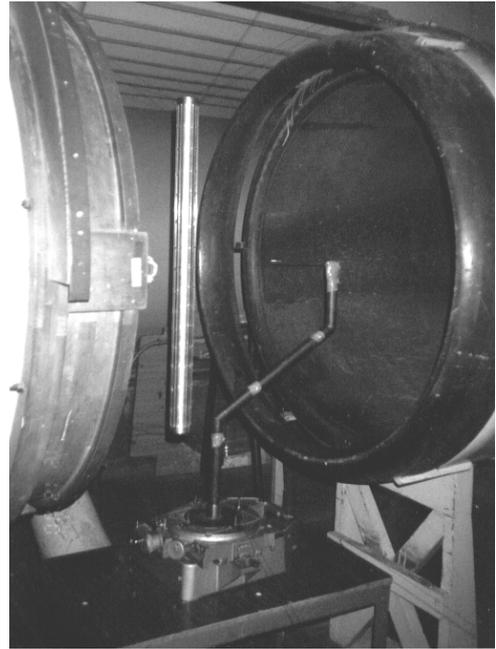


Рис. 2. Силіві дослідження моделі циліндра з шорсткою поверхнею

Частоту відривання вихорів визначали за допомогою термоанемометричної насадки та комплексу електронних приладів (перетворювачі, ПЕОМ). Для визначення швидкості повітряного потоку застосовувався гідравлічний мікроманометр (рис. 7). Експеримент проводився за нормальних умов (температура навколишнього повітря – +18 °С, барометричний тиск – 120 мм рт. ст., відносна вологість повітря – 60 %) з метою можливості порівняння результатів експерименту для труб з різними шорсткостями поверхонь.

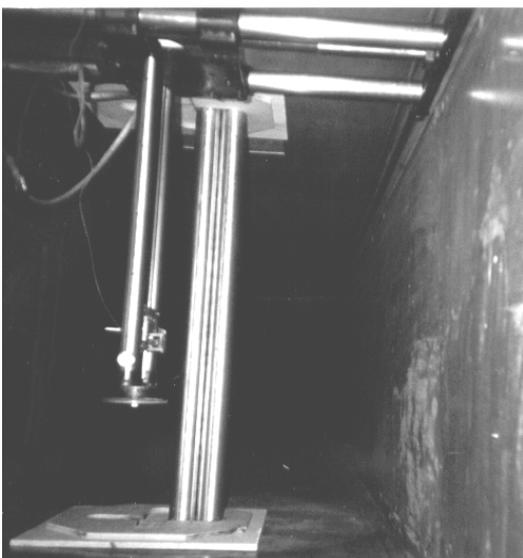


Рис. 3. Аеродинамічні дослідження тандему двох колових циліндрів при $L = 0$

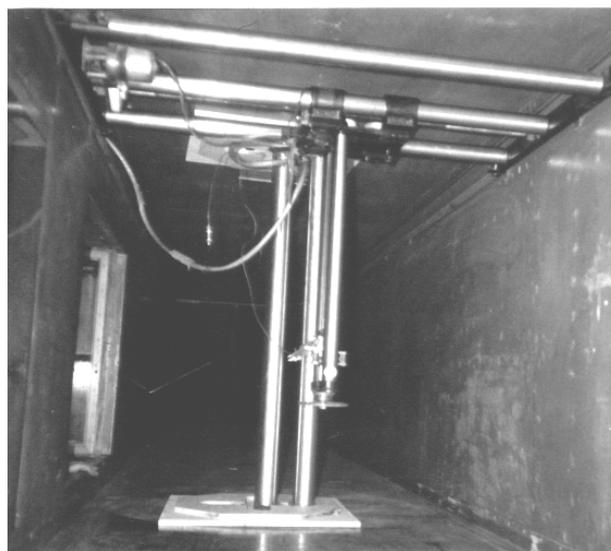


Рис. 4. Аеродинамічні дослідження тандему двох колових циліндрів при $L = 0,8$

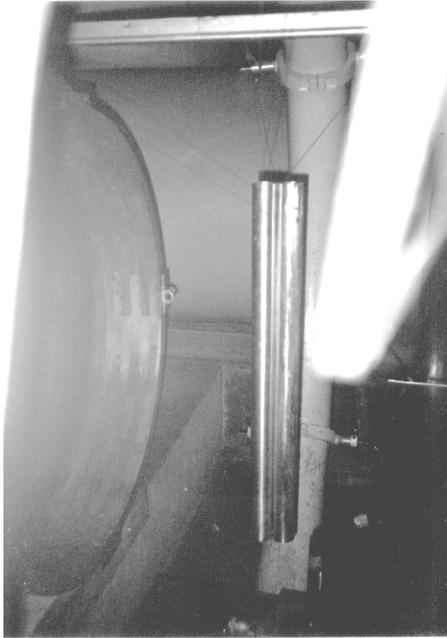


Рис. 5. Силові дослідження тандему двох колових циліндрів при $L = 0$



Рис. 6. Силові дослідження тандему двох колових циліндрів при $L = 0,8$

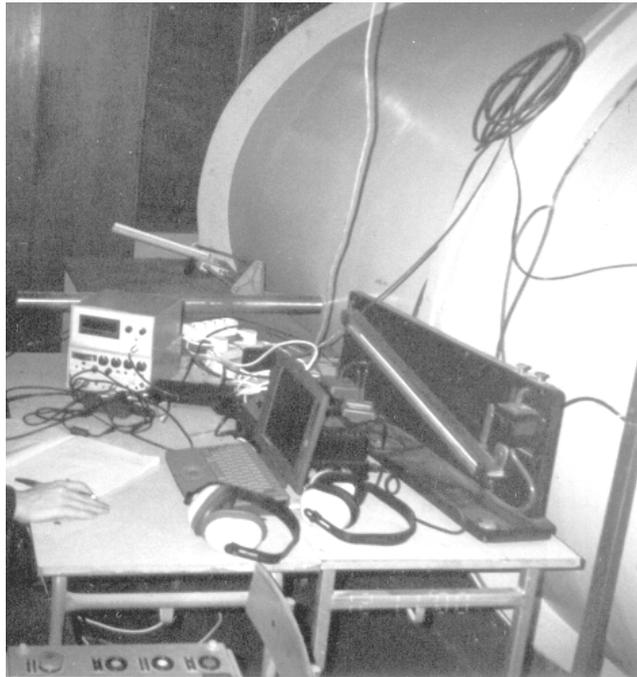


Рис. 7. Робочий процес вимірювання під час проведення аеродинамічних досліджень

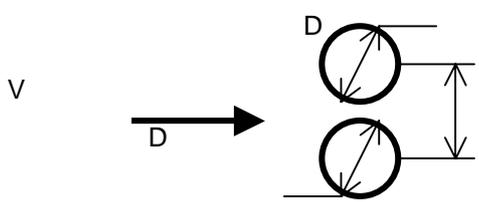
Вимірювання проводили у докритичній області числа Рейнольдса, тобто $Re < 2 \times 10^5$.

Результати експериментальних досліджень та їх аналіз

У табл. 1 і 2 наведено і порівняно результати вимірювань величин чисел Рейнольдса, коефіцієнта аеродинамічного опору C_x та частоти пульсації швидкості припливу повітряних мас у сліді за тандемом циліндрів колового перерізу для різних умов розміщення у просторі.

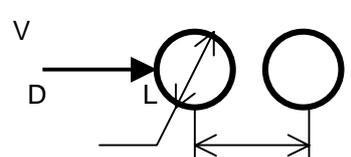
Таблиця 1

Результати вимірювань величин чисел Рейнольдса, коефіцієнта аеродинамічного опору C_x та частоти пульсації швидкості припливу повітряних мас

Розміщення циліндрів у просторі відносно кута атаки (комбінація 1)							
							
№ п/п	L	D, мм	Q, мм H ₂ O	V, м/с	C_x	P_x , кН	Re
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,8D	60	25,00	20,00	0,73	0,0218	$8,00 \cdot 10^4$
2	0,8D	60	56,00	29,93	0,86	0,0579	$1,20 \cdot 10^5$
3	0,8D	60	100,00	40,00	0,70	0,0839	$1,60 \cdot 10^5$
4	0,5D	60	25,00	20,00	0,73	0,0218	$8,00 \cdot 10^4$
5	0,5D	60	56,00	29,93	0,86	0,0579	$1,20 \cdot 10^5$
6	0,5D	60	100,00	40,00	0,70	0,0839	$1,60 \cdot 10^5$
7	0,3D	60	25,00	20,00	0,76	0,0229	$8,00 \cdot 10^4$
8	0,3D	60	56,00	29,93	0,89	0,0598	$1,20 \cdot 10^5$
9	0,3D	60	100,00	40,00	0,73	0,0872	$1,60 \cdot 10^5$
10	0,1D	60	25,00	20,00	0,87	0,0262	$8,00 \cdot 10^4$
11	0,1D	60	56,00	29,93	0,98	0,0660	$1,20 \cdot 10^5$
12	0,1D	60	100,00	40,00	0,80	0,0961	$1,60 \cdot 10^5$
13	0	60	25,00	20,00	0,73	0,0218	$8,00 \cdot 10^4$
14	0	60	56,00	29,93	0,85	0,0569	$1,20 \cdot 10^5$
15	0	60	80,00	35,78	1,02	0,0981	$1,43 \cdot 10^5$

Таблиця 2

Результати вимірювань величин чисел Рейнольдса, коефіцієнта аеродинамічного опору C_x та частоти пульсації швидкості припливу повітряних мас

Розміщення циліндрів у просторі відносно кута атаки (комбінація 2)							
							
№ п/п	L	D, мм	Q, мм H ₂ O	V, м/с	C_x	P_x , кН	Re
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,8D	60	25,00	20,00	0,36	0,0107	$8,00 \cdot 10^4$
2	0,8D	60	56,00	29,93	0,37	0,0251	$1,20 \cdot 10^5$
3	0,8D	60	100,00	40,00	0,38	0,0461	$1,60 \cdot 10^5$
4	0,5D	60	25,00	20,00	0,36	0,0107	$8,00 \cdot 10^4$
5	0,5D	60	56,00	29,93	0,36	0,0240	$1,20 \cdot 10^5$
6	0,5D	60	100,00	40,00	0,37	0,0441	$1,60 \cdot 10^5$
7	0,3D	60	25,00	20,00	0,33	0,0098	$8,00 \cdot 10^4$
8	0,3D	60	56,00	29,93	0,32	0,0218	$1,20 \cdot 10^5$

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
9	0,3D	60	100,00	40,00	0,34	0,0412	$1,60 \cdot 10^5$
10	0,1D	60	25,00	20,00	0,29	0,0086	$8,00 \cdot 10^4$
11	0,1D	60	56,00	29,93	0,29	0,0196	$1,20 \cdot 10^5$
12	0,1D	60	100,00	40,00	0,32	0,0383	$1,60 \cdot 10^5$
13	0	60	25,00	20,00	0,25	0,0074	$8,00 \cdot 10^4$
14	0	60	56,00	29,93	0,28	0,0187	$1,20 \cdot 10^5$
15	0	60	80,00	35,78	0,34	0,0324	$1,43 \cdot 10^5$

Для більш наочної ілюстрації залежності коефіцієнта аеродинамічного опору C_x від розміщення системи циліндрів у просторі побудовано відповідні діаграми (рис. 8).

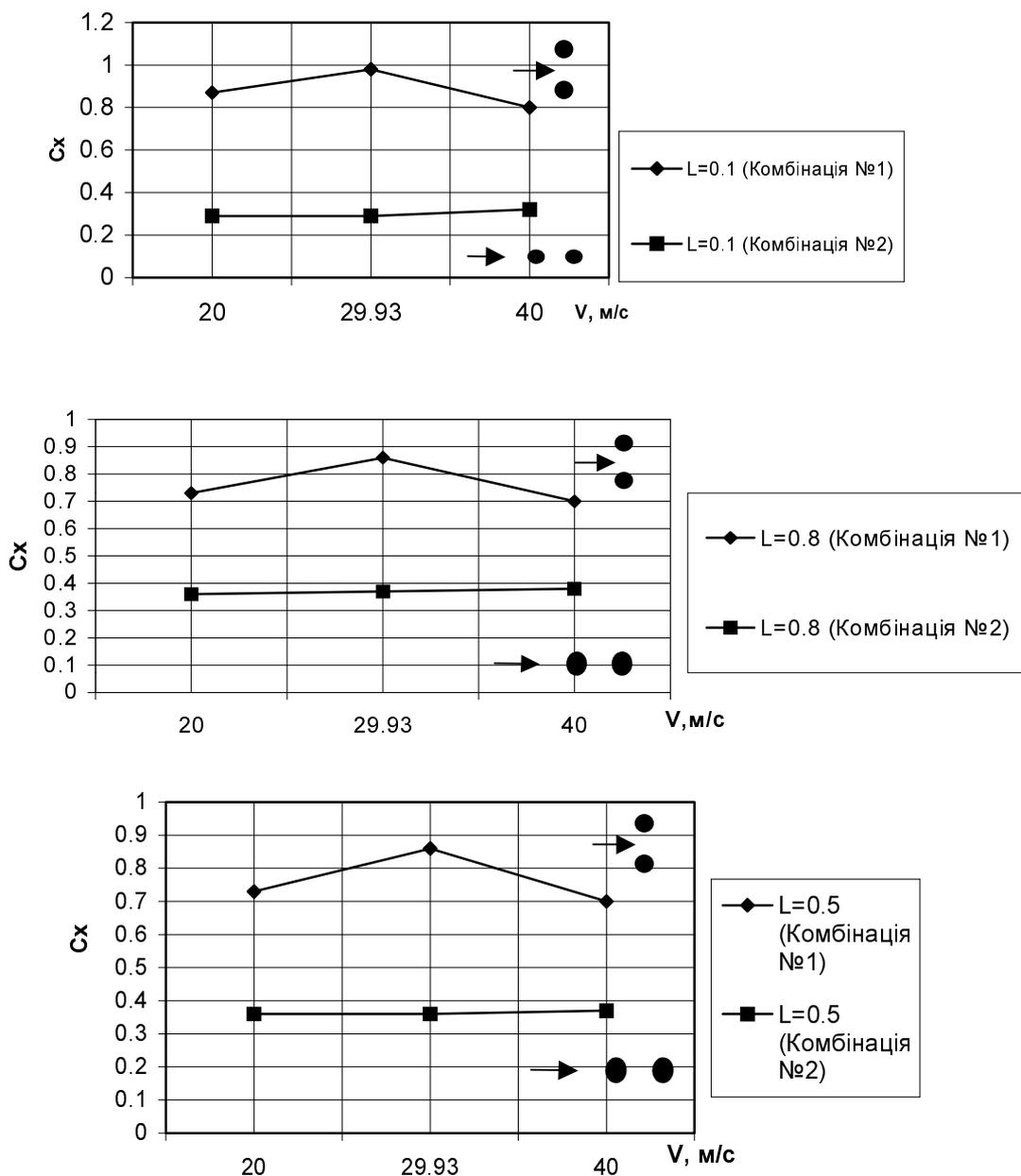


Рис. 8. Порівняння значень C_x для різних комбінацій напливу повітря на циліндри

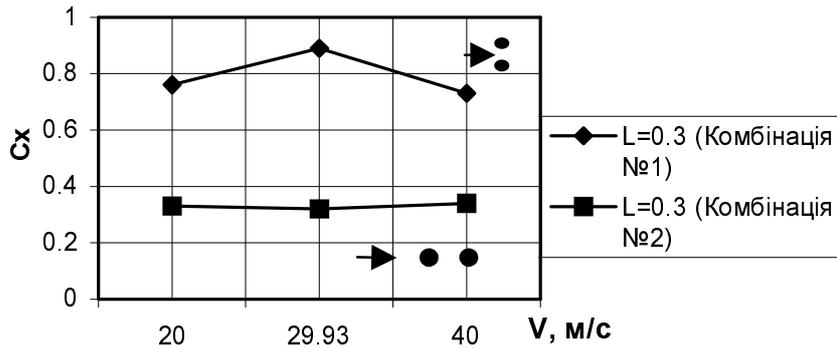


Рис. 8. Порівняння значень C_x для різних комбінацій напливу повітря на циліндри (продовження)

Вплив віддалі L між осями тандему циліндрів на величину аеродинамічного опору P_x при набіганні повітряних мас перпендикулярно до осі тандему показано на рис. 9, а при паралельному набіганні повітряних мас – на рис. 10.

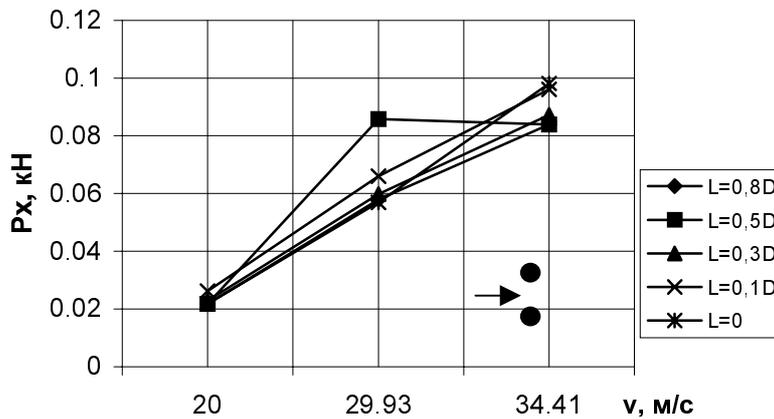


Рис. 9. Вплив віддалі L між осями тандему циліндрів на величину аеродинамічного опору P_x (комбінація № 1)

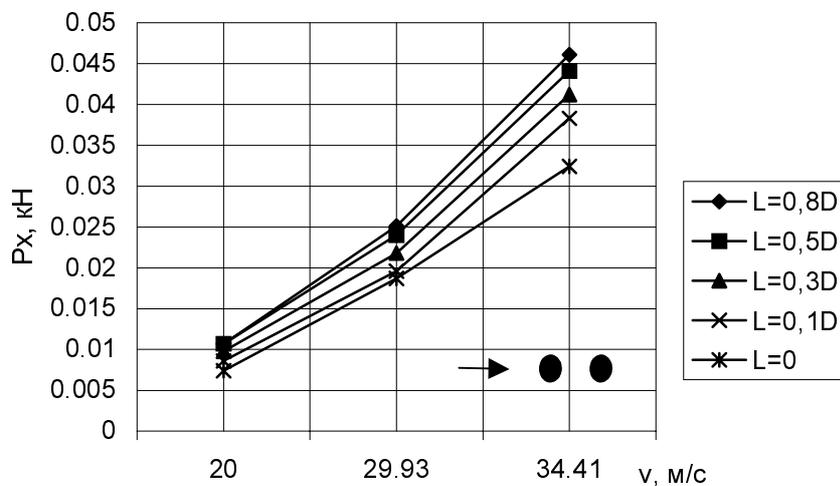


Рис. 10. Залежність величини аеродинамічного опору від відстані між тандемом моделей (комбінація № 2)

Експериментально виявлене спадання на рис. 11 та 12 значення числа Струхаля St при зростанні швидкості набігання повітряних мас може бути викликане проведенням аеродинамічних досліджень в різних аеродинамічних трубах.

Залежність числа Струхаля St від відстані L між гладкими коловими циліндрами при набіганні повітряних мас паралельно осі тандему показано на рис. 12.

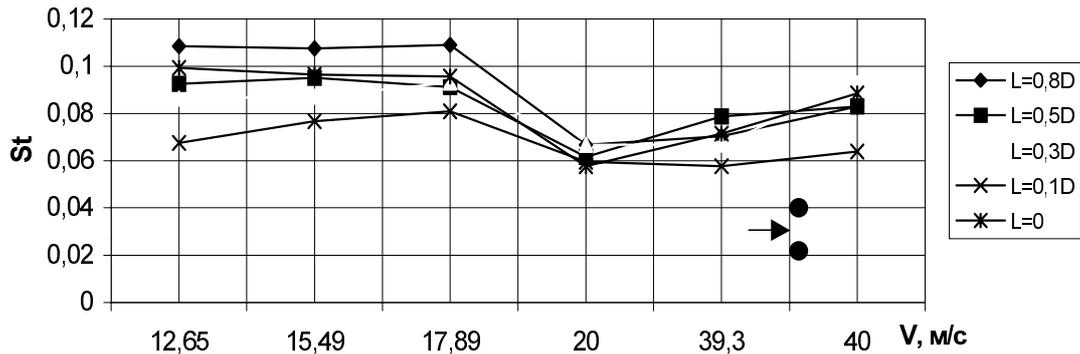


Рис. 11. Вплив віддалі L між гладкими коловими циліндрами на величину числа Струхаля St (напрямок набігання повітряних мас перпендикулярний осі тандему)

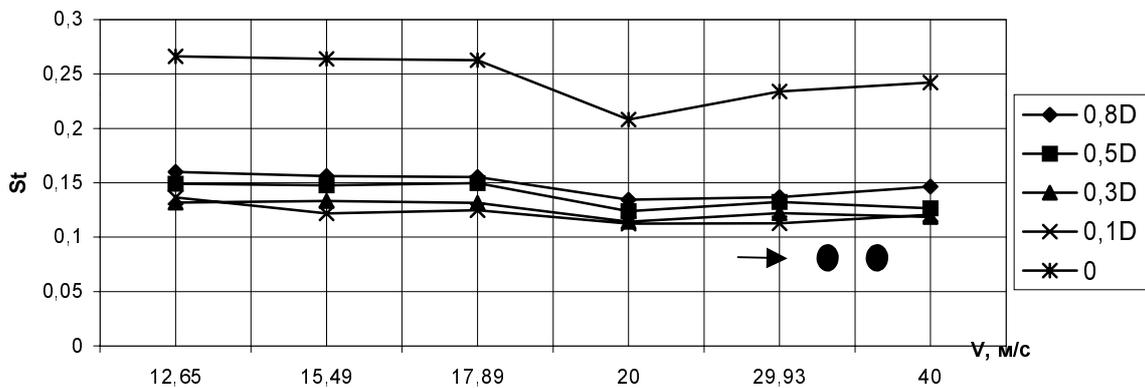


Рис. 12. Залежність числа Струхаля St від відстані L між гладкими коловими циліндрами (напрямок набігання повітряних мас паралельний осі тандему)

Вплив відстані L між тандемом циліндрів різних діаметрів на величину числа Струхаля St показано на рис. 13 та 14.

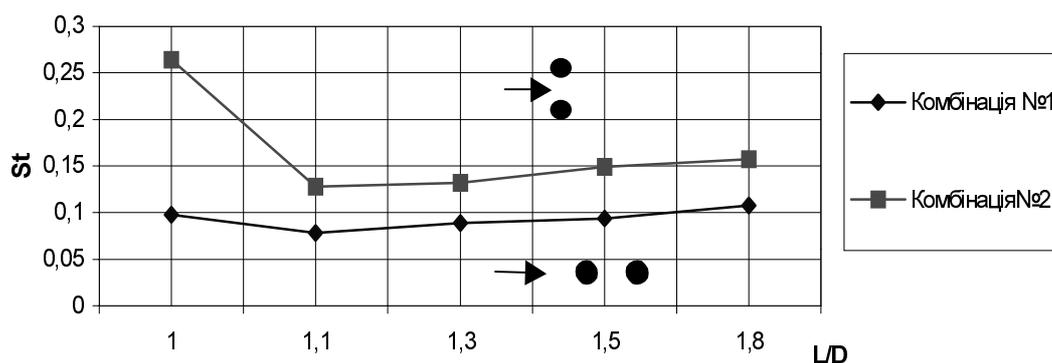


Рис. 13. Порівняння впливів відстаней L між осями циліндрів однакових діаметрів та напрямку атаки повітряних мас на величину числа Струхалія St

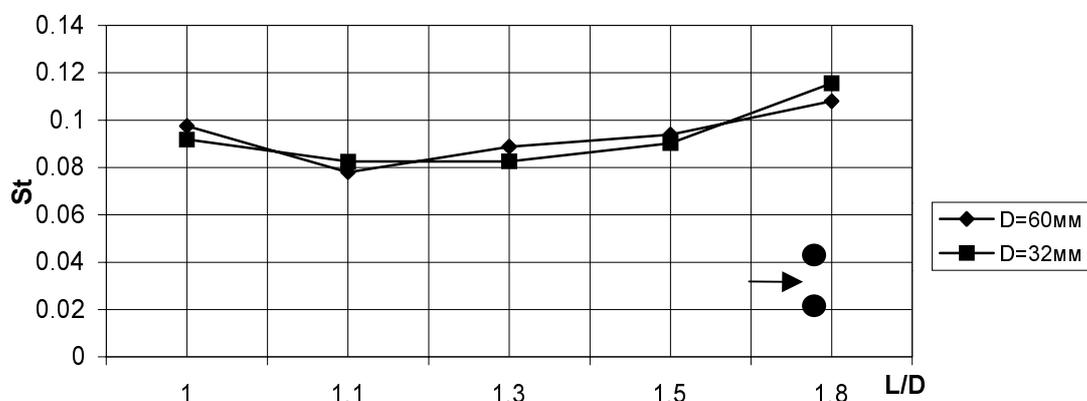


Рис. 14. Вплив відстані L між тандемом циліндрів різних діаметрів на величину числа Струхалія St (кут атаки повітряних мас перпендикулярний до осі системи)

Висновки

1. У результаті проведених досліджень одержано значення чисел Рейнольдса, коефіцієнта аеродинамічного опору C_x , P_x та частоти пульсації швидкості припливу повітряних мас для тандемів з двох колових циліндрів.

2. Одержано залежності чисел Струхалія St від відстані L між гладкими коловими циліндрами та їхнього діаметра, а також вплив напрямку атаки повітряних мас відносно осі тандему.

3. Із зростанням відстані L між моделями зростають значення аеродинамічного опору P_x , проте необхідно встановити інтервал, на якому ця тенденція буде зберігатись.

4. Одержані результати становлять один з етапів програми виконаних аеродинамічних досліджень одного, двох, трьох і чотирьох колових циліндрів, які будуть використані в нормах проектування сталевих димарів аналогічної конструкції.

1. Błazik-Borowa E., Flaga A., Kazakiewicz M.I. Problemy interferencji aerodynamicznej dwóch walców kołowych. – Warszawa, 1997. 2. Maeda H., Kubo Y., Kato K., Fukushima S. Aerodynamic characteristics of closely and rigidly connected cables for cable-stayed bridges // Bluff Body Aerodynamics & Applications III. – Blacksburg, Virginia, USA, July 28 – August 1, 1996. 3. Novák J.

- Strouhal Number of cylinder pair // Acta Technica ČSAV. – 1974. – No 5. – S. 581–588.*
4. Okajima, A. *Flows around Two Tandem Circular Cylinders at Very High Reynolds Numbers // Bulletin of the JSME. – April 1979. – Vol. 22. – No 166.*
5. Williamson C.H.K. *Evolution of a single wake behind a pair of bluff bodies // Journal of Fluid Mechanics. – 1985. – Vol. 159. – S. 1–18.*
6. Zdravkovich M.M. *Review of flow interference between two circular cylinders in various arrangements // ASME Transactions, Journal of Fluids Engineering. – 1977. – Vol. 99. – P. 618–631.*
7. Zdravkovich M.M. *The effects of interference between circular cylinders in cross flow // Journal of Fluids and Structures 1. – 1987. – P. 239–261.*
8. Графский И.Ю., Казакевич М.И. *Аэродинамика плохообтекаемых тел: Учеб. пособие. – Днепропетровск, 1983. – 116 с.*
9. Wojciechowski J., Żurański J. A., Kinasz R. *Badania liczby Strouhala wiązki walców kołowych // Materiały III Ogólnopolskie sympozjum “Wpływy środowiskowe na budowlę i ludzi – obciążena, oddziaływania, interakcje, dyskomfort”. – Lublin, 2001. – S. 55–62.*
10. Żurański J.A. *Wpływ interferencji aerodynamicznej na obciążenie wiatrem stalowych kominów wieloprzedowych // Prace Instytutu Techniki Budowlanej. – Kwartalnik, 2000. – N 2–3. – S. 37–64.*
11. Кінаш Р.І. Коваленко В.А., Копилов О.Є. *Аеродинамічні дослідження числа Струхаля для поодинокого циліндра круглого перерізу // Вісн. ДДАБА. – Макіївка, 2001. – Вип. 2001–1(26). – С. 110–115.*
12. Кінаш Р.І. Стасюк М.І., Копилов О.Є. *Аналіз аеродинамічних досліджень колових циліндрів // Вісн. ДДАБА. – Макіївка, 2001. – Вип. 2001–1(26). – С. 113–125.*

УДК 624.016

К.Ф. Клименко

Львівський державний аграрний університет

НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ РОЗТЯГНУТИХ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ ТРУБОЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ*

© Клименко К.Ф., 2002

У розтягнутих трубозалізобетонних елементах, армованих різними за класом сталлями, в поєднанні високоміцної з м'якою сталлю труб (Ст-3) в процесі напруження за рахунок збільшення розрахункового опору сталі труби до і після границі текучості, а також при подальшому завантаженні за рахунок явища самозміцнення досягається збільшення міцності. Експериментальними випробуваннями встановлено, що при використанні такого конструктивного рішення і особливостей його роботи досягається значна економія сталі в конструкції.

Вступ

Конструктивно трубозалізобетон у поперечному перерізі являє собою сталеву оболонку труби, заповнену бетоном або цементним розчином, який, своєю чергою, армується звичайною або попередньо напруженою стрижневою чи іншою арматурою.

Бетон або високоміцний розчин в сталевій трубі має призначення сприймати значні сили попереднього напруження, забезпечувати сумісну роботу сталеві труби із звичайною

* Експериментальні дослідження виконані в 1979 році на кафедрі будівельних конструкцій Львівського політехнічного інституту