

Badania modelowe liczby Strouhala oblodzonego cięzna mostu podwieszonoego

Piotr Górski¹, Stanislav Pospíšil², Sergej Kuznetsov³, Marcin Tataro⁴,
Ante Marušić⁵

¹ Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa, Politechnika Opolska,
e-mail: p.gorski@po.opole.pl

^{2,3} Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic,
e-mail: ²pospasil@itam.cas.cz, ³kuznetsov@itam.cas.cz

⁴ Katedra Dróg i Mostów, Wydział Budownictwa, Politechnika Opolska,
e-mail: m.tataro@po.opole.pl

⁵ Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic,
e-mail: marusic@itam.cas.cz

Streszczenie: W artykule przedstawiono sposób i wyniki badań liczby *Strouhala* nieruchomego modelu oblodzonego cięzna mostu podwieszonoego. Badania wykonano w tunelu aerodynamicznym z komorą klimatyczną Laboratorium Czeskiej Akademii Nauk w Telc. W komorze klimatycznej wykonano doświadczalne oblodzenie modelu cięzna o osi nachylonej pod kątem 30° do płaszczyzny poziomej. Kształt oblodzonej powierzchni zarejestrowano metodą fotogrametrii cyfrowej. Do badań w tunelu aerodynamicznym wykonano nowy model sekcyjny oblodzonego cięzna metodą druku 3D. Liczbę *Strouhala* wyznaczono w zakresie wartości liczby *Reynoldsa* od $28 \cdot 10^3$ do $122 \cdot 10^3$ na podstawie pomiaru częstości odrywania się wirów w śladzie aerodynamicznym za modelem.

Słowa kluczowe: aerodynamika, oblodzenie, cięžno, liczba *Strouhala*, wzbudzenie wirowe.

1. Wprowadzenie

Zagadnienia aerodynamiki cięgien mostów podwieszonoego przedstawiono w pracy [1]. Analiza odpowiedzi pojedynczych cięgien o przekroju kołowym na działanie wiatru wymaga uwzględnienia trzech składników obciążenia wiatrem, tj. działania wiatru w kierunku napływającego powietrza, obciążenia wzbudzeniem wirowym i obciążenia fluktuacjami wiatru w kierunku poprzecznym. Zagadnienia te są szczególnie istotne dla cięgien o długości ponad 100 m. Podstawy teoretyczne i propozycje matematycznego opisu wymienionych zagadnień przedstawiono w pracach [2, 3].

Utrata symetrii kołowego przekroju poprzecznego cięgien w wyniku oblodzenia (np. Rys. 1) jest przyczyną niesymetrycznego opływu powietrza wokół cięzna i niesymetrycznego rozkładu ciśnienia wiatru na jego powierzchni. Wówczas należy rozpatrywać trzy składowe współczynniki aerodynamiczne, tj. współczynnik oporu aerodynamicznego, aerodynamicznej siły bocznej i momentu aerodynamicznego, które zależą od kierunku wiatru. W tej sytuacji powstaje także możliwość wystąpienia niestabilności aerodynamicznej oblodzonego cięzna w postaci drgań samowzbudnych typu galopowania jeżeli spełniony będzie warunek *den Hartoga* [1].



Rys. 1. Przykład oblodzenia cięgna mostu podwieszonoego Veteran's Glass City Skyway w Toledo w stanie Ohio, USA [4]

Ważnym parametrem na etapie analizy odpowiedzi oblodzonych cięgien na wzbudzenie wirowe jest liczba *Strouhala*, charakteryzująca częstość odrywania się wirów od konstrukcji. Jej wartość zależy od kształtu przekroju poprzecznego konstrukcji, poziomu amplitudy jej drgań, intensywności turbulencji napływającego powietrza, a także liczby *Reynoldsa*, opisującej charakter opływu powietrza wokół konstrukcji i może być wyznaczona na drodze doświadczalnej. Znając liczbę *Strouhala* konstrukcji można wyznaczyć prędkość krytyczną wiatru, przy której występują największe wartości jej drgań wywołane wzbudzeniem wirowym.

W literaturze znane są liczne prace dotyczące badań liczby *Strouhala* oblodzonych linii elektroenergetycznych, np. [5], ale ze względu na ich małe średnice zewnętrzne, rzędu do kilku centymetrów i inny kształt oblodzenia, otrzymane wyniki są nieadekwatne dla cięgien mostów o średnicach rzędu od kilkunastu do kilkudziesięciu centymetrów. Wyniki badań kształtu oblodzenia i jego wpływu na aerodynamikę walców o średnicach do 9 cm przedstawiono w pracach [6, 7], jednak liczba *Strouhala* nie była badana.

W niniejszym artykule przedstawiono sposób i wyniki badań liczby *Strouhala* modelu oblodzonego cięgna mostu podwieszonoego w zakresie wartości liczby *Reynoldsa* w przedziale od $28 \cdot 10^3$ do $122 \cdot 10^3$. Badania wykonano w tunelu aerodynamicznym z komorą klimatyczną Laboratorium Czeskiej Akademii Nauk w Telc. W komorze klimatycznej wykonano doświadczalne oblodzenie modelu cięgna o osi nachylonej pod kątem 30° do płaszczyzny poziomej. Kształt oblodzonej powierzchni zarejestrowano metodą fotogrametrii cyfrowej. Do badań w tunelu aerodynamicznym wykonano nowy model sekcyjny oblodzonego cięgna metodą druku 3D. Liczbę *Strouhala* wyznaczono na podstawie pomiaru częstości odrywania się wirów w śladzie aerodynamicznym za modelem. Badania wykonano dla nieruchomego modelu cięgna, tj. z pominięciem wpływu jego drgań na częstość odrywania się wirów.

2. Sposób oblodzenia modelu cięgna w komorze klimatycznej

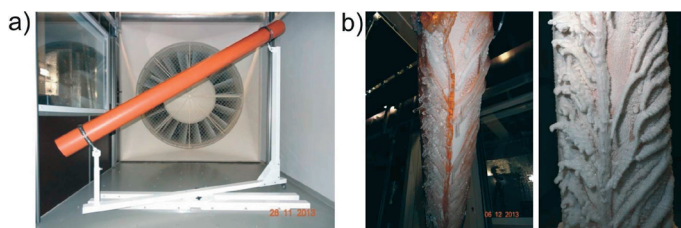
Komora klimatyczna połączona jest obiegiem zamkniętym z przestrzenią pomiarową tunelu aerodynamicznego. Wymiary przestrzeni komory są następujące: szerokość 2,5 m, wysokość 3,9 m i długość 9,0 m. Temperatura powietrza w jej wnętrzu może być regulowana w zakresie od -5 do 30°C , zaś prędkość przepływu powietrza w zakresie od 0,8 do 18 m/s. W górnej części komory znajduje się system spryskiwaczy pozwalający na symulację opadu deszczu, którego intensywność zależy od doboru średnicy dysz spryskiwaczy.

Doświadczalne oblodzenie wykonano na modelu sekcyjnym osłony cięgna o przekroju kołowym o średnicy zewnętrznej równej 0,160 m i długości modelu 2,5 m. Model został wykonany z polichloroku winylu (PVC), którego struktura powierzchni zewnętrznej jest zbliżona do powierzchni osłony rzeczywistego cięgna wykonanej z polietylenu (HDPE).

Model zamocowano pod kątem 30° do płaszczyzny poziomej na przygotowanej konstrukcji ramowej z możliwością jej obrotu względem napływającego powietrza (Rys. 2 a).

Proces oblodzenia modelu wykonano w czasie 40 minut w temperaturze -2°C , przy średniej prędkości napływającego powietrza $2,8\text{ m/s}$ w kierunku nachylonym pod kątem około 60° względem rzutu osi modelu na płaszczyznę poziomą i przy jednoczesnym opadzie deszczu z użyciem spryskiwaczy o średnicy $2,8\text{ mm}$. Wstępne schłodzenie modelu uzyskano za pomocą suchego lodu, który umieszczono w jego wnętrzu. Końcowy efekt oblodzenia widoczny w dolnej części modelu przedstawiono na Rys. 2 b.

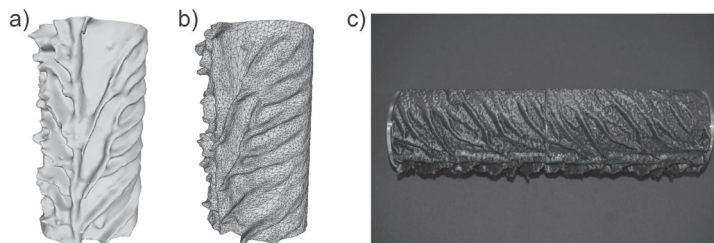
W wyniku oblodzenia otrzymano niesymetryczny przekrój poprzeczny modelu o zaokrąglonych krawędziach. W dolnej części występuje charakterystyczny kształt oblodzenia w postaci żeber (Rys. 2 b), powstały w wyniku zamarzania spływających strug wody opadowej, zaś w górnej części kształt oblodzenia zbliżony jest do kołowego. Całkowita wysokość oblodzonego przekroju poprzecznego wyniosła $0,192\text{ m}$, zaś szerokość $0,181\text{ m}$.



Rys. 2. a) Sposób zamocowania modelu cieżna w konstrukcji ramowej w komorze klimatycznej, b) końcowy efekt oblodzenia modelu cieżna widoczny w dolnej jego części

3. Przygotowanie nowego modelu oblodzonego cieżna do badań w tunelu aerodynamicznym

W celu wykonania nowego modelu oblodzonego cieżna do badań w tunelu aerodynamicznym zarejestrowano kształt powierzchni oblodzenia uzyskanego w komorze klimatycznej metodą fotogrametrii cyfrowej. Metoda ta polega na wykonaniu serii zdjęć fotograficznych, wysokiej klasy aparatem cyfrowym, całej powierzchni oblodzenia, a następnie ich obróbki przeznaczonym do tego oprogramowaniem. W końcowym efekcie uzyskano przestrzenny model MES powierzchni oblodzenia przedstawiony na Rys. 3 a i b. Model numeryczny był podstawą wydruku nowego modelu w pomniejszonej skali $1:1,6$, który wykonano za pomocą drukarki 3D z biodegradowalnego plastiku kukurydzianego (PLA). Końcowy efekt wydruku nowego modelu sekcyjnego oblodzonego cieżna widoczny jest na Rys. 3 c. Całkowita wysokość przekroju poprzecznego modelu wyniosła $0,120\text{ m}$, szerokość $0,113\text{ m}$, zaś jego długość $0,43\text{ m}$.

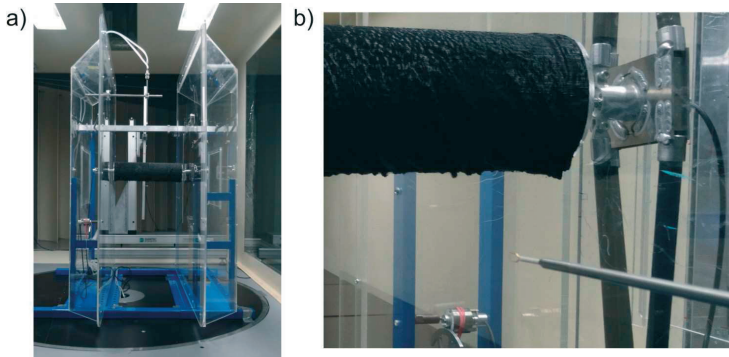


Rys. 3. a) Przestrzenny model fragmentu powierzchni oblodzenia i b) jego podział na elementy skończone, c) końcowy efekt wydruku 3D nowego modelu sekcyjnego oblodzonego cieżna

4. Warunki i sposób badań w tunelu aerodynamicznym

W przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego istnieje możliwość modelowania warstwy przyziemnej i regulacji średniej prędkości wiatru w zakresie od 1,5 do 33 m/s. Przestrzeń pomiarowa ma przekrój poprzeczny o szerokości 1,9 m i wysokości 1,8 m, zaś jej długość wynosi 11,0 m.

W czasie badań nie modelowano warstwy przyziemnej przepływu, tj. na podłodze przestrzeni pomiarowej nie ustawiono żadnych przeszkód. Intensywność turbulencji wyniosła 1 %, zaś temperatura powietrza 23°C. Model sekcyjny oblodzonego cięgna zamocowano nieruchomo w pozycji poziomej, poprzecznie do kierunku napływającego powietrza do specjalnie przygotowanej ramy, której boki zostały odpowiednio zabudowane w celu zapewnienia przepływu płaskiego wokół modelu (Rys. 4). Model umieszczono na wysokości 76 cm, licząc od płaszczyzny podłogi przestrzeni pomiarowej do osi modelu, żebrami oblodzenia do dołu, tj. zgodnie z układem oblodzenia otrzymanym w komorze klimatycznej. W takim położeniu zewnętrzna średnica odniesienia modelu, mierzona w kierunku poprzecznym (pionowym) do kierunku przepływu była równa $d = 0,120$ m.



Rys. 4. a) Widok ogólny ramy i modelu oblodzonego cięgna w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego, b) sposób zamocowania modelu do ramy i widok termooanemometru CTA za modelem

Sposób badania liczby *Strouhala* był następujący. W czasie badań mierzono prędkość wiatru w odległości 40 cm przed modelem za pomocą rurki *Prandtla* i jednocześnie prędkość przepływu w śladzie aerodynamicznym za modelem za pomocą termooanemometru CTA, który znajdował się w odległości $3d$, tj. 36 cm od osi modelu i 3 cm poniżej dolnej jego krawędzi (Rys 4 b). Pomiaru wykonano przy siedmiu różnych średnich prędkościach przepływu powietrza przed modelem \bar{u} , których wartości mieściły się w przedziale od 3,4 do 14,8 m/s, co odpowiadało wartościom liczby *Reynoldsa* od $28 \cdot 10^3$ do $122 \cdot 10^3$. Pomiaru termooanemometrem wykonywano w czasie 30 sekund z częstością próbkowania 2000 Hz. Na podstawie wyników pomiarów prędkości przepływu w śladzie aerodynamicznym modelu określono, za pomocą szybkiej transformacji *Fouriera*, częstość odrywania się wirów f_s , która na osi odciętych odpowiada wartości dominującej w uzyskanym spektrum. Liczbę *Strouhala* obliczono ze wzoru:

$$St = \frac{f_s \cdot d}{\bar{u}}, \quad (1)$$

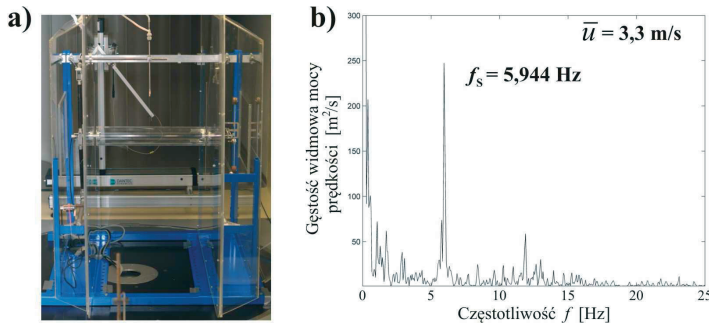
gdzie: f_s jest częstością odrywania się wirów, $d = 0,120$ m jest wymiarem odniesienia modelu w kierunku poprzecznym do kierunku napływającego powietrza, zaś \bar{u} jest średnią prędkością wiatru przed modelem.

Liczbę *Reynoldsa* obliczono zgodnie z następującą zależnością:

$$Re = \frac{d \cdot \bar{u}}{\nu}, \quad (2)$$

gdzie $\nu = 0,145 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ jest lepkością kinematyczną powietrza.

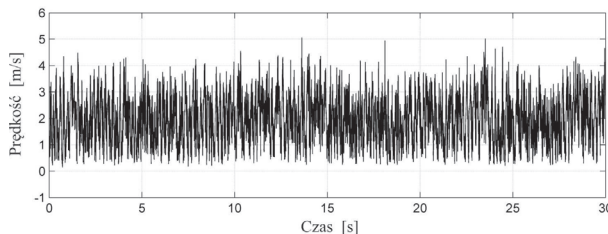
W badaniach prowadzonych w tunelach aerodynamicznych należy brać pod uwagę możliwość wystąpienia zjawiska blokowania przepływu powietrza w przestrzeni pomiarowej tunelu, które może mieć pewien wpływ na wyniki badań. W celu określenia wpływu tego zjawiska na wyniki pomiarów wykonano badanie liczby *Strouhala* gładkiego walca kołowego o średnicy $d = 0,10 \text{ m}$, przy średniej prędkości wiatru przed modelem $\bar{u} = 3,3 \text{ m/s}$. Na Rys. 5 przedstawiono sposób zamocowania walca do konstrukcji ramy i wykres funkcji gęstości widmowej mocy prędkości przepływu wiatru w ścieżce wirowej za walcem. Obliczona wartość liczby *Strouhala* wyniosła $St = 0,180$ i jest zgodna wartością podaną w przepisach normowych [8] dla przekroju kołowego. Doświadczenie potwierdza brak wpływu zjawiska blokowania przepływu powietrza na wynik badania liczby *Strouhala*.



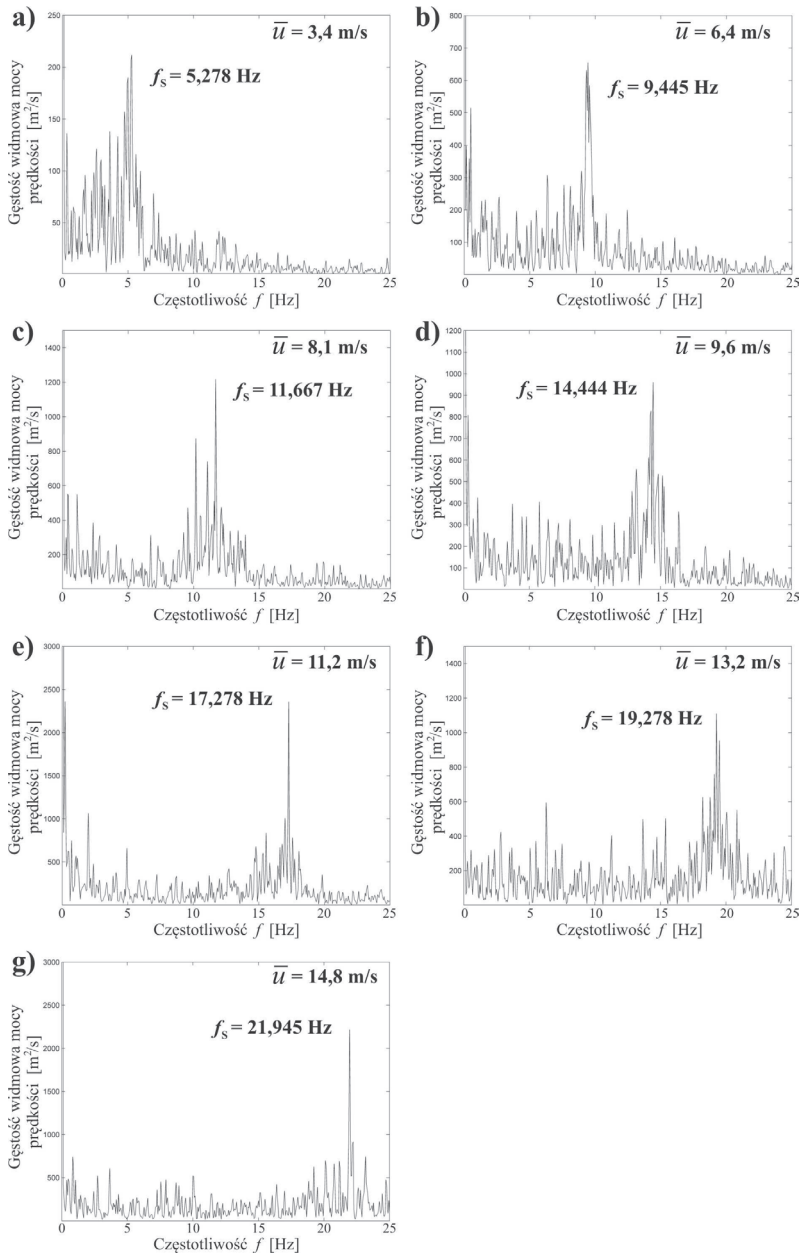
Rys. 5. a) Sposób zamocowania walca do konstrukcji ramy, b) wykres funkcji gęstości widmowej mocy prędkości przepływu w ścieżce wirowej za walcem przy średniej prędkości napływającego powietrza $\bar{u} = 3,3 \text{ m/s}$

5. Wyniki badań liczby *Strouhala* modelu oblodzonego cięgna

Na Rys. 6 przedstawiono przykładowy wynik pomiaru prędkości przepływu powietrza w ścieżce wirowej za modelem oblodzonego cięgna w czasie 30 sekund z częstością próbkowania 2000 Hz, przy średniej prędkości wiatru przed modelem $\bar{u} = 3,4 \text{ m/s}$. Na Rys. 8 przedstawiono wykresy funkcji gęstości widmowej mocy prędkości przepływu w ścieżce wirowej za modelem oblodzonego cięgna, z podaniem częstości odrywania się wirów f_s przy różnych średnich prędkościach wiatru przed modelem $\bar{u} \in \langle 3,4 \div 14,8 \rangle \text{ m/s}$.



Rys. 6. Wynik pomiaru prędkości przepływu powietrza w ścieżce wirowej za modelem oblodzonego cięgna w czasie 30 sekund z częstością próbkowania 2000 Hz, przy średniej prędkości przepływu przed modelem $\bar{u} = 3,4 \text{ m/s}$



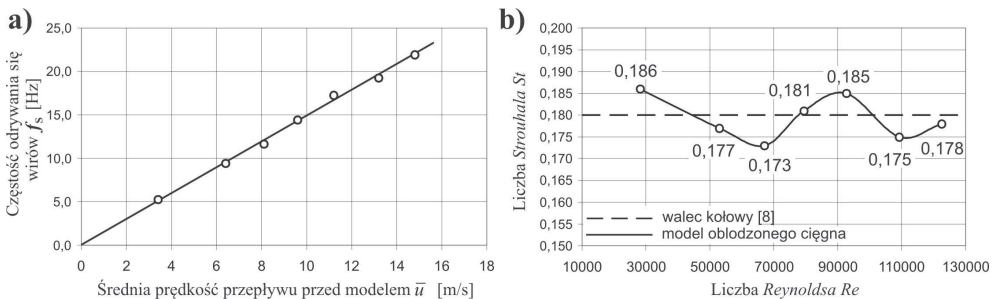
Rys. 7. Wykresy funkcji gęstości widmowej mocy prędkości przepływu wiatru w ścieżce wirównej za modelem oblodzonego cięgna i częstości odrywania się wirów f_s przy średniej prędkości wiatru przed modelem: a) $\bar{u} = 3,4$ m/s, b) $\bar{u} = 6,4$ m/s, c) $\bar{u} = 8,1$ m/s, d) $\bar{u} = 9,6$ m/s, e) $\bar{u} = 11,2$ m/s, f) $\bar{u} = 13,2$ m/s i g) $\bar{u} = 14,8$ m/s

W Tabeli 1 podano wartości średniej prędkości przepływu powietrza przed modelem \bar{u} , przy których wykonywane były pomiary, pomierzone częstości odrywania się wirów f_s , wartości liczby *Reynoldsa* Re i obliczone wartości liczby *Strouhala* St modelu oblodzonego cięgna. Na Rys. 8 a przedstawiono wpływ średniej prędkości wiatru przed modelem \bar{u} na

częstość odrywania się wirów f_s , zaś na Rys. 8 b wpływ liczby *Reynoldsa* na obliczoną wartość liczby *Strouhala*.

Tabela 1. Wartości pomierzone średniej prędkości przepływu przed modelem \bar{u} , częstości odrywania się wirów f_s , liczby *Reynoldsa* i liczby *Strouhala* modelu oblodzonego cięgna

Średnia prędkość przepływu przed modelem \bar{u} [m/s]	3,4	6,4	8,1	9,6	11,2	13,2	14,8
Częstość odrywania się wirów f_s [Hz]	5,278	9,445	11,667	14,444	17,278	19,278	21,945
Liczba <i>Reynoldsa</i> $Re \cdot 10^3$	28	53	67	79	93	109	122
Liczba <i>Strouhala</i> St	0,186	0,177	0,173	0,181	0,185	0,175	0,178



Rys. 7. a) Wpływ średniej prędkości przepływu powietrza przed modelem \bar{u} na częstość odrywania się wirów f_s i b) wpływ liczby *Reynoldsa* na wartość liczby *Strouhala*

6. Wnioski

Badania eksperymentalne liczby *Strouhala* wykonano dla nieruchomego modelu sekcyjnego oblodzonego cięgna. Rzeczywiste oblodzenie uzyskano w komorze klimatycznej tunelu aerodynamicznego dla sekcyjnego modelu cięgna o osi nachylonej pod kątem 30^0 do płaszczyzny poziomej.

W wyniku oblodzenia uzyskano niesymetryczny i nieregularny przekrój poprzeczny modelu o zaokrąglonych krawędziach. Opływ ciała w takim przypadku jest niesymetryczny względem napływającego powietrza, a położenie punktów odrywania się wirów na powierzchni modelu zależy przede wszystkim od cech geometrycznych jego przekroju poprzecznego. Na podstawie porównania wykresów funkcji gęstości widmowej mocy prędkości przepływu w ścieżce wirowej za walcem (Rys. 5) i za modelem oblodzonym (Rys. 7) można stwierdzić, że już przy małych prędkościach napływającego powietrza, tj. od 3,4 m/s, odpowiadających małym wartościom liczby *Reynoldsa* $Re \geq 28 \cdot 10^3$, charakter śladu aerodynamicznego za modelem oblodzonym ma cechy opływu walca kołowego w zakresie nadkrytycznym. Wskazuje na to większa szerokość pasma częstości wzbudzenia wirowego w śladzie aerodynamicznym za modelem oblodzonym, widoczna na Rys 7.

Obliczone wartości liczby *Strouhala* oblodzonego modelu cięgna zależą od wartości liczby *Reynoldsa*. Dla liczby *Reynoldsa* w zakresie od $28 \cdot 10^3$ do $122 \cdot 10^3$, liczba *Strouhala* zmienia się w przedziale od 0,173 do 0,186 (patrz Tabela 1 i Rys. 8 b), jednak zmiany te mogą mieć charakter przypadkowy, wynikający z nieregularności wzbudzenia wirowego.

a) Wartości liczby *Strouhala* otrzymane dla oblodzonego modelu cięgna są zbliżone do wartości podanej w przepisach normowych [8] dla przekroju kołowego $St=0,180$, a różnice nie przekraczają $\pm 4\%$.

Literatura

- 1 Flaga A., Michałowski T. Zagadnienia aerodynamiki cięgien w mostach podwieszonych. Inżynieria i Budownictwo. 6 (1997) 316-321.
- 2 Flaga A. Inżynieria wiatrowa. Arkady, Warszawa, 2008.
- 3 Flaga A. Mosty dla pieszych. WKŁ, Warszawa, 2011.
- 4 <http://www.toledoblade.com/gallery/Ice-closes-Skyway> (styczeń 2014r.).
- 5 Zdero R., Turan O. F. The effect of surface strands, angle of attack, and ice accretion on the flow field around electrical power cables. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 98 (2010) 672–678.
- 6 Koss H., Gjelstrup H., Georgakis C. T. Experimental study of ice accretion on circular cylinders at moderate low temperatures. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 104-106 (2012) 540-546.
- 7 Gjelstrup H., Georgakis Ch. T., Larsen A. An evaluation of iced bridge hanger vibrations through wind tunnel testing and quasi-steady theory. Wind and Structures. 15/5 (2012) 385-407.
- 8 Eurocode 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru. ICS 91.010.30, PN-EN 1991-1-4:2007.

Model investigations of Strouhal number of iced cable of cable-stayed bridge

Piotr Górski¹, Stanislav Pospíšil², Sergej Kuznetsov³, Marcin Tatar⁴,
Ante Marušić⁵

¹ Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering, Opole University of Technology, e-mail: p.gorski@po.opole.pl

^{2,3} Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, e-mail: ²pospisi@itam.cas.cz, ³kuznetsov@itam.cas.cz

⁴ Department of Road and Bridges, Faculty of Civil Engineering, Opole University of Technology, e-mail: m.tatar@po.opole.pl

⁵ Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, e-mail: marusic@itam.cas.cz

Abstract: The paper presents the method and results of wind tunnel investigations of *Strouhal* number of stationary iced cable model of cable-stayed bridge. The investigations were performed in a Climatic Wind Tunnel Laboratory of the Czech Academy of Sciences in Telc. The experimental icing of the inclined cable model in the climatic chamber of the laboratory was made. The shape of the iced model was registered by a numerical photogrammetry method. For the aerodynamic tunnel investigations, the new iced cable model was made by using 3D printing method. The *Strouhal* number was determined within the range of the *Reynolds* number between $28 \cdot 10^3$ and $122 \cdot 10^3$, on the basis of the dominant vortex shedding frequency measured in the flow behind the model.

Keywords: aerodynamic, icing, cable, *Strouhal* number, vortex shedding.