

INTERFERENCJA AERODYNAMICZNA WALCÓW W USTAWIENIU BOCZNYM DO KIERUNKU WIATRU

BŁAZIK-BOROWA Ewa ¹

SZULEJ Jacek ²

^{1,2} *Katedra Mechaniki Budowli, Politechnika Lubelska*

INTERFERENCE LOADS OF TWO CYLINDERS IN A SIDE-BY-SIDE ARRANGEMENT

This paper presents a quasi-steady model of vibrations of two cylinders in a side-by-side arrangement. The cylinders have flexible support and equal diameters. The model assumes that both cylinders participate in the process of vibration, each of them having two degrees of freedom. The movement of cylinders is described by a set of four non-linear differential equations. On the basis of a numerical simulation features of cylinder vibrations are found and described in this paper.

STRESZCZENIE

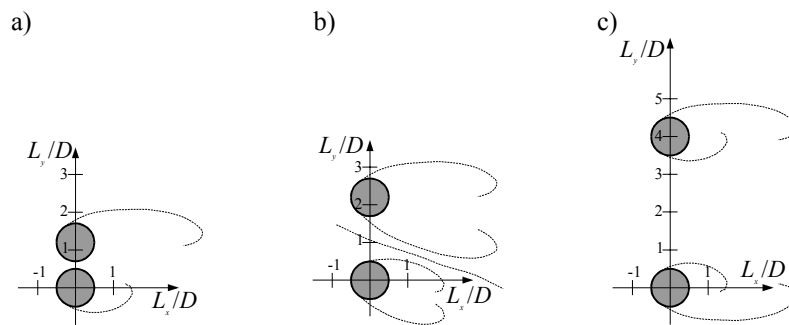
Referat przedstawia model quasi-ustalony drgań dwóch walców w ustawieniu bocznym, nazywanym „side-by-side”. Omawiany model zakłada, że walce mają taką samą średnicę, są podparte sprężysto, każdy z walców ma dwa stopnie swobody i oba walce uczestniczą w procesie drgań. Ruch walców opisany jest za pomocą czterech nieliniowych wzajemnie sprzężonych równań różniczkowych. Na podstawie analizy numerycznej zjawiska w pracy podjęto próbę opisanie podstawowych cech drgań walców.

1. WSTĘP

Konstrukcje, które mogą zostać zamodelowane dwoma walcami o takiej samej średnicy, występują zarówno w budownictwie (kominy, chłodnie kominowe, rurociągi) jak i wielu gałęziach przemysłu (układ rur). Na obciążenie takiego układu bardzo duży wpływ ma interferencja aerodynamiczna, która powoduje nie tylko wzrost obciążenia statycznego, ale także drgania konstrukcji. W związku z tym już od lat siedemdziesiątych przeprowadzane są badania w tunelach aerodynamicznych ([1], [2], [4], [5]). W latach dziewięćdziesiątych powstało kilka modeli matematycznych drgań walców ustawionych wzdłuż średniego kierunku wiatru lub ustawionych skośnie do wiatru (np.: [2], [3], [5]). Natomiast do tej pory nie zaproponowano modelu matematycznego dla drgań walców ustawionych prostopadle do kierunku wiatru (w literaturze anglojęzycznej nazywanego „side-by-side”) tak jak jest to pokazane na Rys.1. W tej pracy zostanie zaproponowany model matematyczny drgań walców właśnie w takim ustawieniu. Ponieważ model jest oparty głównie na założeniach teorii quasi-ustalonych (por. [6]), dlatego będzie nazywany modelem quasi-ustalonym.

W pracy [7] wyróżniono trzy ustawienia boczne walców w zależności od kształtu śladów aerodynamicznych jakie powstają po stronie zawietrznej. Jeżeli walce ustawione są

tak, że $L_y < 1.2D$, wtedy za walcami powstaje jedna ścieżka wirowa (Rys.1a). Za walcami ustawionymi tak, że środki walców znajdują się w odległości od $1.2D$ do $3D$, formują się dwa ślady wąski i szeroki (Rys. 1b). Układ śladów zmienia się nieregularnie w czasie, powodując zmiany rozkładu ciśnienia na powierzchni walców. Zmiany rozkładu ciśnienia wywołują ruch walców. Zjawisko to zanika, jeżeli odległość pomiędzy środkami walców wrośnie powyżej $3D$. Dla takiego układu walców powstają dwie symetryczne ścieżki wirowe (Rys.1c). Model matematyczny oraz obliczenia przedstawione w pracy będą dotyczyły głównie ustawienia pokazanego na Rys.1b oraz ustawień sąsiednich w zakresie $-0.3 < L_x/D < 0.3$.



Rys. 1. Kształty ścieżek wirowych odrywających się od walców w ustawieniu bocznym.
 Fig. 1. Vortex paths separated from two circular cylinder in side-by-side arrangements.

2. OPIS MODELU QUASI-USTALONEGO

Szczegółowy opis modelu został przedstawiony w pracy [8], natomiast poniżej przedstawiamy tylko ważniejsze założenia. Model quasi-ustalony opisuje drgania dwóch nieodkształcalnych walców podpartych sprężystości. W tunelu aerodynamicznym odpowiada to sytuacji drgań modeli sekcyjnych o przekroju kołowym. Różnicą między teorią a badaniami jest zaniechanie w opisywanym modelu zaburzeń brzegowych. Składowe prędkości przepływu zgodnie z uśrednieniem Reynoldsa mogą być wyrażone w następującej formie (Rys.2):

- składowa wzdłuż średniego kierunku wiatru:

$$u_s(t) = \bar{u} + u'_s(t),$$

- składowa w kierunku prostopadłym do wiatru:

$$v_s(t) = \bar{v} + v'_s(t) = v'_s(t).$$

Obciążenie wiatrem walców zostało przyjęte jako średnie z obszaru o wysokości równej długości walców H oraz szerokości co najmniej $5D$. Składowe obciążenia walców opisane są wzorami:

- w odniesieniu do pierwszego walca (Rys. 2a)

$$\begin{aligned} \tilde{W}_x(t) &= 0.5\rho D \times \\ & [C_{x_1}(\mu(t))(u_s(t) - \xi_1(t)) - C_{y_1}(\mu(t))(v'_s(t) - \eta_1(t))] \sqrt{(u_s(t) - \xi_1(t))^2 + (v'_s(t) - \eta_1(t))^2} \\ \tilde{W}_y(t) &= 0.5\rho D \times \\ & [C_{x_1}(\mu(t))(v'_s(t) - \eta_1(t)) + C_{y_1}(\mu(t))(u_s(t) - \xi_1(t))] \sqrt{(u_s(t) - \xi_1(t))^2 + (v'_s(t) - \eta_1(t))^2} \end{aligned}$$

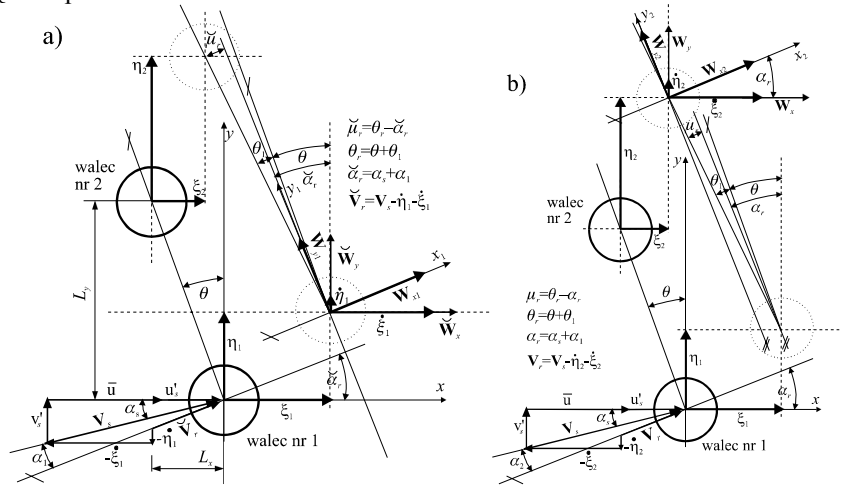
- w odniesieniu do drugiego walca (Rys. 2b)

$$\begin{aligned} W_x(t) &= 0.5\rho D \times \\ & [C_{x_2}(\mu(t))(u_s(t) - \xi_2(t)) - C_{y_2}(\mu(t))(v'_s(t) - \eta_2(t))] \sqrt{(u_s(t) - \xi_2(t))^2 + (v'_s(t) - \eta_2(t))^2} \\ W_y(t) &= 0.5\rho D \times \\ & [C_{x_2}(\mu(t))(v'_s(t) - \eta_2(t)) + C_{y_2}(\mu(t))(u_s(t) - \xi_2(t))] \sqrt{(u_s(t) - \xi_2(t))^2 + (v'_s(t) - \eta_2(t))^2} \end{aligned}$$

gdzie:

μ_r , μ_r – względne kąty natarcia wiatru uwzględniające zmiany kierunku wiatru w czasie, zmianę położenia walców oraz ich prędkości;

$C_{x_1}(\mu_r) = \tilde{C}_x(\beta)$, $C_{y_1}(\mu_r) = \tilde{C}_y(\beta)$, $C_{x_2}(\mu_r) = C_x(\beta)$, $C_{y_2}(\mu_r) = C_y(\beta)$ – współczynniki aerodynamiczne otrzymane dla układu nieruchomych walców przy kącie natarcia wiatru β ;
 $\xi_1, \eta_1, \xi_2, \eta_2$ – składowe przemieszczenia pierwszego i drugiego walca wzdłuż osi x i y ;
 $\xi = \xi_2 - \xi_1$; $\eta = \eta_2 - \eta_1$;
 ρ – gęstość powietrza.



Rys.2. Ustawienia walców i podstawowe oznaczenia.
 Fig.2. The arrangements of the cylinders and basic notations.

Kąty względne, pokazane na Rys.2, można zapisać w następującej formie:

$$\mu_r(t) = \arctan \frac{(L_y \tan \theta - \xi(t))(u_s(t) - \xi_1(t)) - (v'_s(t) - \eta_1(t))(L_y + \eta(t))}{(u_s(t) - \xi_1(t))(L_y + \eta(t)) + (L_y \tan \theta - \xi(t))(v'_s(t) - \eta_1(t))},$$

$$\mu_r(t) = \arctan \frac{(L_y \tan \theta - \xi(t))(u_s(t) - \xi_2(t)) - (v'_s(t) - \eta_2(t))(L_y + \eta(t))}{(u_s(t) - \xi_2(t))(L_y + \eta(t)) + (L_y \tan \theta - \xi(t))(v'_s(t) - \eta_2(t))}.$$

Ostatecznie ruch walców opisany jest nieliniowymi równaniami różniczkowymi:

$$m \ddot{\xi}_1(t) + C_{\xi_1} \dot{\xi}_1(t) + K_{\xi_1} \xi_1(t) = \bar{W}_x(t); \quad m \ddot{\eta}_1(t) + C_{\eta_1} \dot{\eta}_1(t) + K_{\eta_1} \eta_1(t) = \bar{W}_y(t);$$

$$m \ddot{\xi}_2(t) + C_{\xi_2} \dot{\xi}_2(t) + K_{\xi_2} \xi_2(t) = \bar{W}_x(t); \quad m \ddot{\eta}_2(t) + C_{\eta_2} \dot{\eta}_2(t) + K_{\eta_2} \eta_2(t) = \bar{W}_y(t).$$

gdzie:

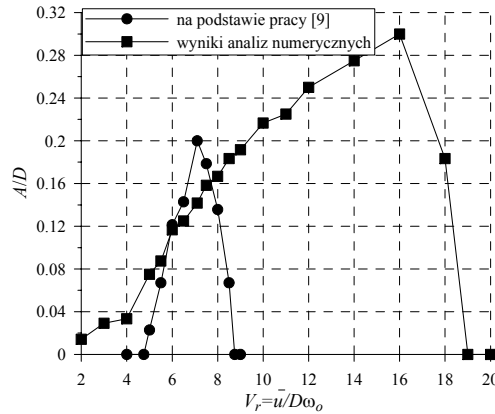
m – masa walca;

$K_{\xi_1}, K_{\eta_1}, K_{\xi_2}, K_{\eta_2}$ – sztywności;

$C_{\xi_1}, C_{\eta_1}, C_{\xi_2}, C_{\eta_2}$ – współczynniki tłumienia.

3. ANALIZA NUMERYCZNA

Równania ruchu walców są różniczkowymi wzajemnie sprzężonymi równaniami nieliniowymi. Do ich rozwiązania użyto numerycznej metody Rungego-Kutty.

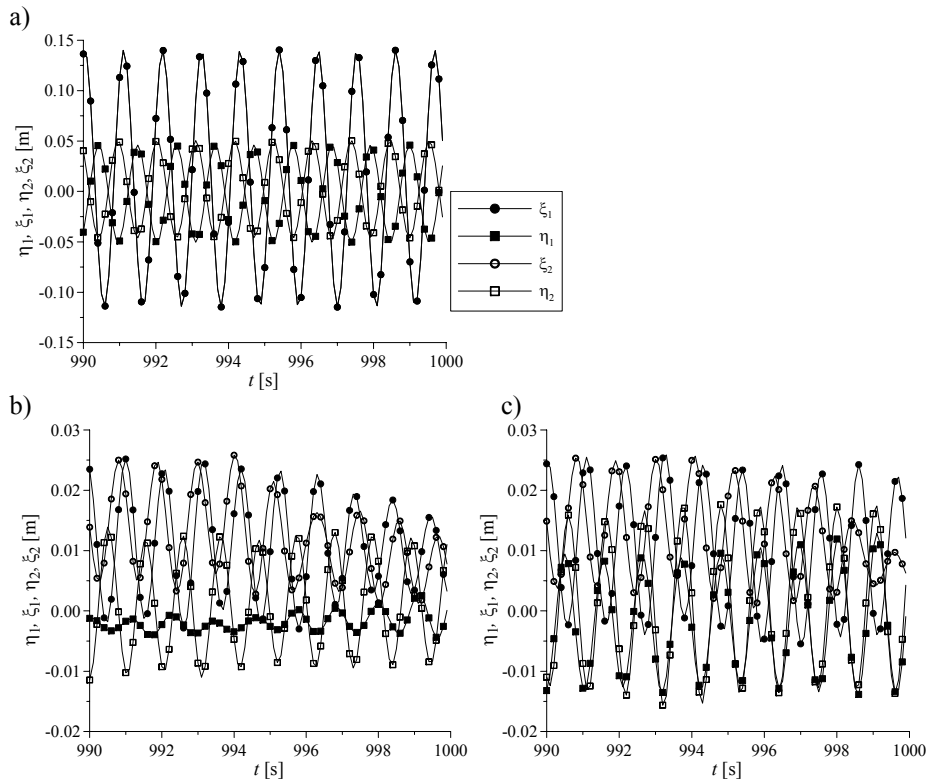


Rys.3. Porównanie wyników obliczeń z wynikami badań (por. [9]) przy $L_y/D=1.3$ i $\theta=0^\circ$.
Fig.3. The comparison of numerical results and research (comp. [9])
at $L_y/D=1.3$ and $\theta=0^\circ$.

Pierwsze wyniki obliczeń są weryfikacją prezentowanego modelu quasi-ustalonego drgań walców. Na Rys. 3 przedstawiono porównanie wyników badań w tunelu

aerodynamicznym i obliczeń komputerowych w odniesieniu do następujących danych:
 $D=0.012$ m, $m=11.6$ g, $\omega_o= 345.6$ rad/s, $K_{\xi_1}=K_{\eta_1}=4.1 \cdot 10^6$ N/m, $K_{\xi_2}=400$ N/m,
 $K_{\eta_2} = \omega_o^2 m = 1385$ N/m, $\delta=0.003$, $Sc = 3$, $I_u = 100\% \frac{\sigma}{u} = 1\%$, $\rho=1.25$ kg/m³.

Rys. 3 przedstawia wykres amplitudy drgań A jako funkcji prędkości zredukowanej V_r . Wartości amplitud z badań i obliczeń są tego samego rzędu. Ponadto z obu badań otrzymano zanik drgań dla większych prędkości, przy czym prędkości zanikania drgań, otrzymane z obliczeń komputerowych, są większe od wyników badań w tunelu. Prawdopodobnie jest to efektem zaburzeń brzegowych oszacowanych w pracy [9] na około 30 % długości walców. Te wyniki, jak również weryfikacja modelu przedstawiona w pracy [8], wykazują jego poprawność. W związku z tym na podstawie analizy numerycznej można wyciągać także wnioski co do charakteru badanego zjawiska.



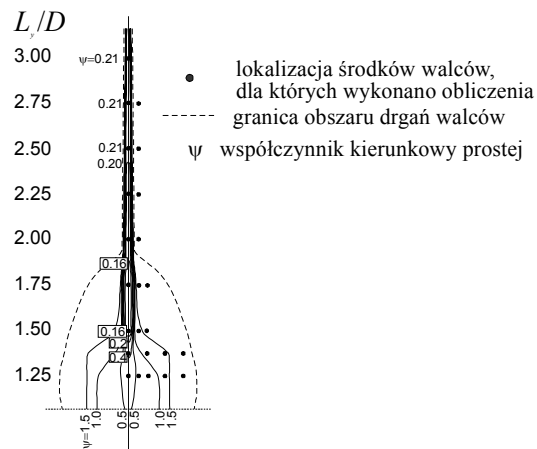
Rys.4. Drgania walców przy przepływie ustalonym i z uwzględnieniem turbulencji przy $\bar{u} = 18$ m/s, $Sc=50$, $L_y/D=1.75$ a) $\theta=0^\circ$, $I_u=0\%$; b) $\theta=0^\circ$, $I_u=12.8\%$; c) $\theta=5^\circ$, $I_u=12.8\%$.
 Fig.4. The vibrations of cylinders at steady and unsteady flows with above data .

Stwierdzonymi podstawowymi cechami drgań walców ustawionych bocznie do kierunku wiatru są:

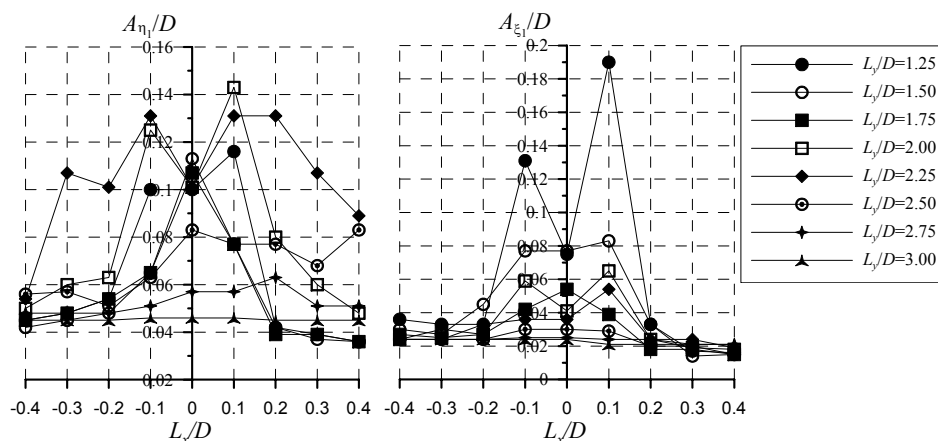
- prędkość krytyczna przepływu, przy której walce zaczynają drgać (Rys.3);
- drgania walców zanikające po przekroczeniu górnej granicy prędkości (Rys.3);
- regularne drgania tworzące symetryczne elipsy przy $I_u=0$ i $\theta=0^\circ$ (Rys.4a);
- mniej regularne drgania walców o znacznie mniejszej amplitudzie przy $\theta \neq 0^\circ$ (Rys.4b);
- brak regularności drgań walców oraz znacznie mniejsze amplitudy przy $I_u \neq 0$ (Rys.4c);
- drgania walców przy $\theta \neq 0^\circ$ dla wielu ustawień nie występują przy stałej prędkości wiatru ($I_u=0$), natomiast mogą zostać wzbudzone w warunkach rzeczywistych czyli przy $I_u \neq 0$ (Rys.6).

Ponadto na podstawie analizy numerycznej stwierdzono, że występowanie drgań zależy od wzajemnego ustawienia walców oraz prawie liniowo od liczby Scrutona. W związku z tym wykonano obliczenia na podstawie, których utworzono wykresy zależności liczby Scrutona i najniższych prędkości wywołujących drgania, które nazywane są prędkościami krytycznymi. Ponieważ otrzymane punkty wykresu układają się niemal wzdłuż prostej, dlatego metodą najmniejszych kwadratów wyznaczono równania tych prostych zapisanych w następującej formie:

$$Sc = \psi V_r + A.$$



Rys.5. Obszar drgań walców oraz izolinie współczynników ψ .
 Fig.5. The region of vibration with the line joining points of the same value of coefficient ψ



Rys.6. Amplitudy drgań walców w różnych ustawieniach przy $\bar{u} = 10$ m/s, $Sc=30$, $I_u=5\%$.
 Fig.6. Vibrations amplitudes for cylinders arrangements at $\bar{u} = 10$ m/s, $Sc=30$, $I_u=5\%$.

W odniesieniu do przepływu ustalonego wartości współczynników ψ zebrano w formie mapy izolinii (Rys.5). Otrzymano w ten sposób obszary ustawienia drugiego z walców względem pierwszego, gdzie mogą wystąpić drgania. Należy również zwrócić uwagę, że czym mniejszy współczynnik ψ tym walce są bardziej podatne na drgania.

Na rys.6 pokazano wartości amplitud drgań wywołanych przepływem o intensywności turbulencji około 5%. Amplitudy drgań walców są mniejsze od drgań przy przepływie ze stałą prędkością, ale obszar ustawienia walców, dla których występują drgania znacznie się powiększył.

4. WNIOSKI

Analizy numeryczne drgań walców ustawionych bocznie, przy pomocy modelu quasi-ustalonego, dają wyniki zbliżone do wyników otrzymywanych w tunelach aerodynamicznych. Obliczenia te wymagają znajomości statycznych współczynników aerodynamicznych dla różnych wzajemnych lokalizacji walca. Informacje te znajdują się w literaturze (np. [1]). W związku z tym, należy stwierdzić, że model quasi-ustalony może być narzędziem badawczym, a wyniki badań przedstawione w poprzednim punkcie mogą być źródłem informacji o zjawisku. Ponadto Rys. 5 i Rys.6 mogą zostać wykorzystane w przy projektowaniu do wyeliminowania niebezpiecznych wzajemnych ustawień konstrukcji o przekroju kołowym.

5. LITERATURA

- [1] Zdravkovich M.M., Pridden D.L.: Interference between two identical circular cylinders; Series of unexpected discontinuities, J. of Ind. Aerodynamics, 2, 255-270, 1977.

- [2] Kazakiewicz J.: Aerodynamika mostow, Moscow "Transport", 1987.
- [3] Ruscheweyh H., Dielen, B.: Interference galloping- investigations concerning the phase lag of the flow switching, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44, 2047-2056, 1992.
- [4] Brun C., Tenchine D., Hopfinger E.J.: Role of the shear layer instability in the near wake behaviour of two side-by-side circular cylinders, Experiments in Fluids, 36, 334-343, 2004.
- [5] Błazik-Borowa E., Flaga A.: Modelling of Aerodynamic Loads on a Downstream Cylinder Caused by Bistable Flow Between Two Circular Cylinders, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 65, 361-370, 1996.
- [6] Flaga A.: Quasisteady models of wind load on slender structures. Part 1. Case of a motionless structure, Archives of Civil Engineering, XL, 1, 1994, str. 3-28.
- [7] Zdravkovich M.M.: Review of interference - induced oscillations in flow past two parallel circular cylinders in various arrangements, Proceedings of Seventh International Conference on Wind Engineering, vol. 2, Aachen , 51-66, 1987.
- [8] E Błazik-Borowa: Quasi-steady Models of Aerodynamic Loads on Two Circular Cylinders in Side-by-side Arrangement, 10th International Conference on Wind Engineering, Kopenhaga, 1605-1610, 1999.
- [9] Gowda B.H.L., Sreedharan V. and Narayanan S.: Vortex induced oscillatory response of a circular cylinder due to interference effects, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 49, 157-166, 1993.



Ewa Błazik-Borowa
Pracownik Katedry Mechaniki Budowli
Politechniki Lubelskiej,
e-mail: ebkmb@akropolis.pol.lublin.pl.



Jacek Szulej
Pracownik Katedry Mechaniki Budowli
Politechniki Lubelskiej,
e-mail: jskmb@akropolis.pol.lublin.pl.