

Wpływ struktury wiatru na rozkład współczynnika ciśnienia na powierzchni modelu o przekroju kołowym o średnicy 20 cm

Tomasz Lipecki, Jarosław Bęc, Ewa Błazik-Borowa

*Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: t.lipecki@pollub.pl, j.bec@pollub.pl, e.blazik@pollub.pl*

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki i analizę badań modelowych przeprowadzonych w tunelu aerodynamicznym w odniesieniu do opływu pojedynczego walca kołowego. Wyniki dotyczą zmian wartości zredukowanego współczynnika średniego ciśnienia na powierzchni modelu oraz jego odchylenia standardowego. W badaniach analizowano 6 przypadków struktury napływającego wiatru opisanej za pomocą funkcji pionowego profilu średniej prędkości wiatru, pionowego profilu intensywności turbulencji oraz funkcji gęstości widmowej mocy. Wysokość badanego modelu oraz jego średnica wynosiły odpowiednio $H = 100$ cm i $D = 20$ cm.

Słowa kluczowe: tunel aerodynamiczny, współczynnik ciśnienia, walec kołowy, struktura wiatru.

1. Wprowadzenie

Opływ walca o przekroju kołowym jest badany w tunelach aerodynamicznych i w skali rzeczywistej, a również za pomocą technik CFD od wielu lat. Eksperymenty prowadzone są, między innymi w celu określenia rozkładu ciśnienia na powierzchni, jak w niniejszej pracy, ale również w celu określenia współczynników aerodynamicznych siły oporu i siły bocznej, liczby Strouhala, korelacji obciążenia wzdłuż obwodu przekroju, jak i wzdłuż wysokości cylindra, określenia parametrów wzbudzenia wirowego i wielu innych. Większość testów modelowych prowadzona była w subkrytycznym zakresie liczby Reynoldsa (Re), w przypadku modeli o gładkiej powierzchni i w warunkach przepływu 2D. Ostatnio jednak badania modelowe koncentrują się na wpływie zmiennej chropowatości powierzchni modelu oraz wpływie turbulencji napływu na odpowiedź walca, jak również na opływie 3D wokół modelu, ze szczególną uwagą położoną na opływ wokół swobodnego końca.

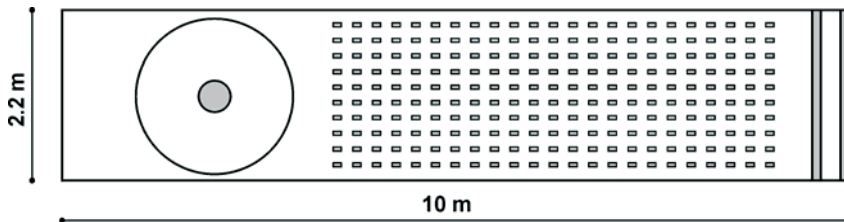
Opływ wokół modelu 3D walca zamontowanego wspornikowo analizowali liczni badacze: Uematsu i Yamada [1, 2] oraz Garg i Niemann [3] i Garg i in. [4]. Wpływ smukłości walca na jego odpowiedź przy wzbudzeniu wirowym opisali Lee i Park [5] oraz Park i Lee [6]. Ci sami autorzy opływ swobodnego końca analizowali w pracy Park i Lee [7] oraz w następnej Park i Lee [8], w której uwzględnili również modyfikacje kształtu swobodnego końca. Opływ walca ze swobodnym końcem i zmienną smukłością badany był również przez Luo i in. [9]. Charakter wirów wokół wierzchołka walca, z wykorzystaniem techniki PIV, badali Sumner and Heseltine [10, 11], Sumner i in. [12] przy różnych smukłościach modeli.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań modelowych w tunelu aerodynamicznym w odniesieniu do rozkładu współczynnika średniego ciśnienia dynamicznego wywieranego przez wiatr na powierzchnię walca kołowego o średnicy zewnętrznej $D = 20$ cm. Badania zostały przeprowadzone w różnych przypadkach struktury napływającego powietrza opisaną za pomocą profilu średniej prędkości wiatru, profilu turbulencji oraz funkcji gęstości widmowej mocy. Cylinder był zamontowany pionowo na stole obrotowym w sekcji pomiarowej tunelu aerodynamicznego, a więc badany opływ miał charakter trójwymiarowy.

2. Opis badań

2.1. Tunel aerodynamiczny

Wszystkie badania eksperymentalne opisane w niniejszej pracy przeprowadzone zostały w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej z tunelem aerodynamicznym z warstwą przyścienną funkcjonującym w Instytucie Mechaniki Budowli na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej. Badania zostały wykonane przy zamkniętym obiegu powietrza wewnątrz przestrzeni pomiarowej. Podstawowe wymiary sekcji pomiarowej tunelu wynoszą: 2,2 m – szerokość, 1,4 m do 1,6 m – wysokość, 10 m – długość. Symulacja warstwy przyziemnej, a więc profilu średniej prędkości wiatru i profilu turbulencji, odbywa się w początkowej części przestrzeni pomiarowej na długości 6 m z wykorzystaniem odpowiednich układów barier, iglic i klocków. W celu redukcji efektu blokady przepływu w konstrukcji tunelu zastosowano podwójną ścianę boczną – wewnętrzną szczelinową i zewnętrzną pełną (Flaga i in. [13], Flaga i Lipecki [14], Flaga [15]). Model badawczy mocowany był w części centralnej sekcji pomiarowej na stole obrotowym. Rzut z góry przestrzeni pomiarowej pokazano na Rys. 1.



Rys. 1. Widok z góry przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego.

Fig. 1. The top view of the boundary layer wind tunnel working section.

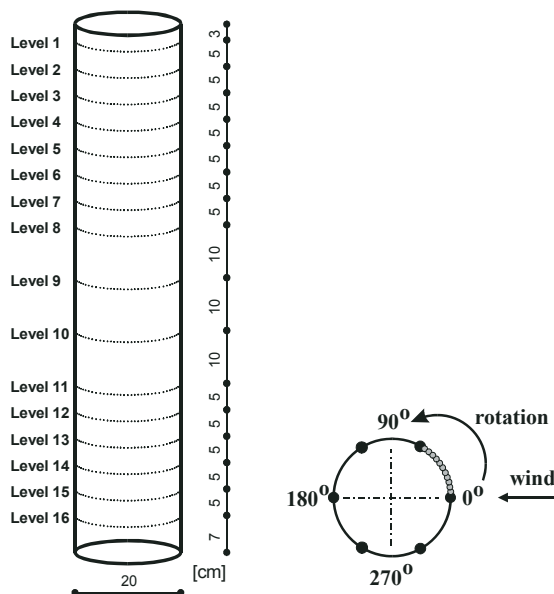
2.2. Analizowany model

Model przedstawiony w niniejszej pracy ma następujące wymiary: wysokość $H = 100$ cm, średnica $D = 20$ cm, zatem smukłość H/D wynosi 5. Model został wykonany z rury PCV o grubości 5 mm i zainstalowany na stole obrotowym w sekcji pomiarowej tunelu aerodynamicznego. Wyniki badań zostały przedstawione podczas 13th International Conference on Wind Engineering (Bęc i in. [16]).

Wyniki prezentowane w niniejszej pracy zostały opracowane na podstawie pomiarów ciśnień dynamicznych na powierzchni walca, które po uśrednieniu i podzieleniu przez wartości ciśnienia referencyjnego doprowadziły do wartości współczynników ciśnienia. W badaniach wykorzystano 8 skanerów ciśnień, z których każdy umożliwiał jednoczesny pomiar ciśnienia w 8 punktach. Skanery

te służą do pomiaru ciśnień różnicowych typu równoległego i bazują na piezorezystywnych, dwukierunkowych sensorach ciśnienia Motorola MPX2010. Analogowe sygnały napięciowe ze skanera ciśnień zostały przetworzone na sygnały cyfrowe i archiwizowane z wykorzystaniem systemu Iotech DaqBook 2005 obsługiwanego przez oprogramowanie IotechDaqView.

Punkty pomiarowe rozmieszczono wzdłuż obwodu walca na 16 poziomach wzdłuż wysokości. Kąt pomiędzy promieniami związanymi z dwoma sąsiednimi punktami pomiarowymi wynosił 60° , a więc w jednoczesnym pomiarze na danym poziomie występowało 6 punktów. W celu zwiększenia dokładności model obracany był 12 razy co 5° , zatem zakres obrotu to 0° do 60° . Pokrywa modelu została również wyposażona w punkty pomiarowe w celu określenia opływu 3D wokół swobodnego końca. Rozkład punktów pomiarowych pokazano schematycznie na Rys. 2



Rys 2. Rozkład punktów pomiarowych na powierzchni walca (wymiary w [cm]).

Fig. 2. The distribution of pressure taps on the surface of the model (dimensions in [cm]).

2.3. Struktura wiatru

W niniejszej pracy przedstawiono wpływ charakterystyk opisujących pole wiatru na rozkład współczynnika średniego ciśnienia wiatru. Prędkość przepływu zmierzono w 28 punktach rozmieszczonych co 5 cm na wysokości tunelu, w odległości 1 m przed środkiem mocowania modeli na stole obrotowym, przy 45 różnych ustawieniach elementów turbulizujących. Do pomiarów prędkości wykorzystano termomanometry jedno- i dwuwłókowe oraz układ pomiarowy ATU2001. W pojedynczym pomiarze, z częstotliwością próbkowania 500 Hz, w czasie 6 sekund zapisywano przebiegi czasowe zmian dwóch składowych prędkości wiatru: wzdłuż tunelu i w kierunku pionowym. Każdy taki pomiar został powtórzony 3 razy.

Do generowania pola wiatru zastosowano metodę Counihana, która jest metodą bierną i polega na użyciu klocków wysuwanych z podłogi na odpowiednią wysokość nadających chropowatość powierzchni oraz barierek i iglic generujących

wiry w przepływie. Elementy turbulizujące wykorzystane w badaniach pokazano na Rys. 3.

W wyniku analiz, spośród 45 przypadków wybrano do dalszych badań 6 wariantów przepływu. Charakterystyki pionowych profili średniej prędkości wiatru zostały zestawione w Tabeli 1 i pokazane na Rys. 4a wraz z profilami turbulencji (Rys. 4b). Szczególną uwagę przy opisie pola wiatru zwrócono na funkcje gęstości widmowej mocy i ich wpływ na rezultaty pomiarów. Wykresy funkcji gęstości widmowej mocy zestawiono na Rys. 4c. Jako opis struktury wiatru przyjęto:

1. Profil wiatru – wzór potęgowy:

$$\bar{v}(z) = k \cdot z^\alpha \quad \text{dla } z > z_{min}, \quad (1)$$

gdzie k i α są współczynnikami wyznaczonymi metodą najmniejszych kwadratów, z_{min} jest minimalną wysokością, wyprowadzoną z zależności, że wartości prędkości wiatru na wysokości 70 cm są sobie równe w różnych wariantach napływu, z jest wysokością.

2. Profil intensywności turbulencji:

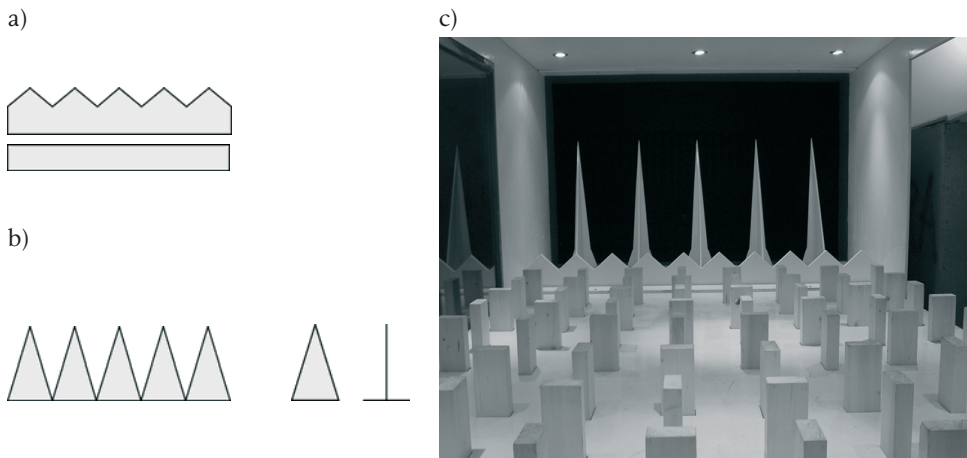
$$I_v(z) = \frac{\sigma(z)}{\bar{v}(z)} \quad (2)$$

gdzie $\sigma(z)$ jest odchyleniem standardowym.

3. Gęstość widmowa mocy – spektrum zbliżone do spektrum Davenporta:

$$G(f) = \frac{bf^2}{(1+cf^2)^d} \quad (3)$$

gdzie b , c , d są współczynnikami dobranymi metodą najmniejszych kwadratów, f jest częstotliwością. Szczegółowy opis badania struktury wiatru przedstawiono w pracach: Bęc i in. [17, 18].

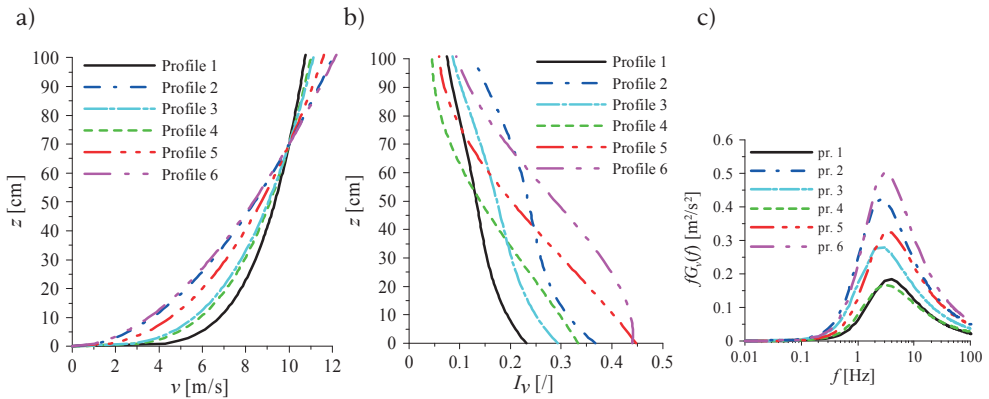


Rys. 3. Elementy turbulizujące w tunelu aerodynamicznym: a) barierki, b) iglice, c) widok tunelu aerodynamicznego w przypadku profilu 5.

Fig. 3. Turbulizing elements in the wind tunnel: a) barriers, b) spires, c) the view of the wind tunnel in case of the profile 5.

Tabela 1. Parametry profilu wiatru.
Table 1. The wind speed profiles parameters.

	k	α
Profile 1	4,2590	0,1952
Profile 2	2,5202	0,3187
Profile 3	2,9948	0,2781
Profile 4	1,6319	0,4210
Profile 5	1,0531	0,5241
Profile 6	0,9251	0,5546



Rys. 4. Struktura wiatru: a) profil średniej prędkości wiatru, b) profil intensywności turbulencji, c) przykładowa funkcja gęstości widmowej mocy.

Fig. 4. Wind structure: a) profile of the mean wind speed, b) profile of the turbulence intensity, c) exemplary power spectral density.

3. Wyniki pomiarów

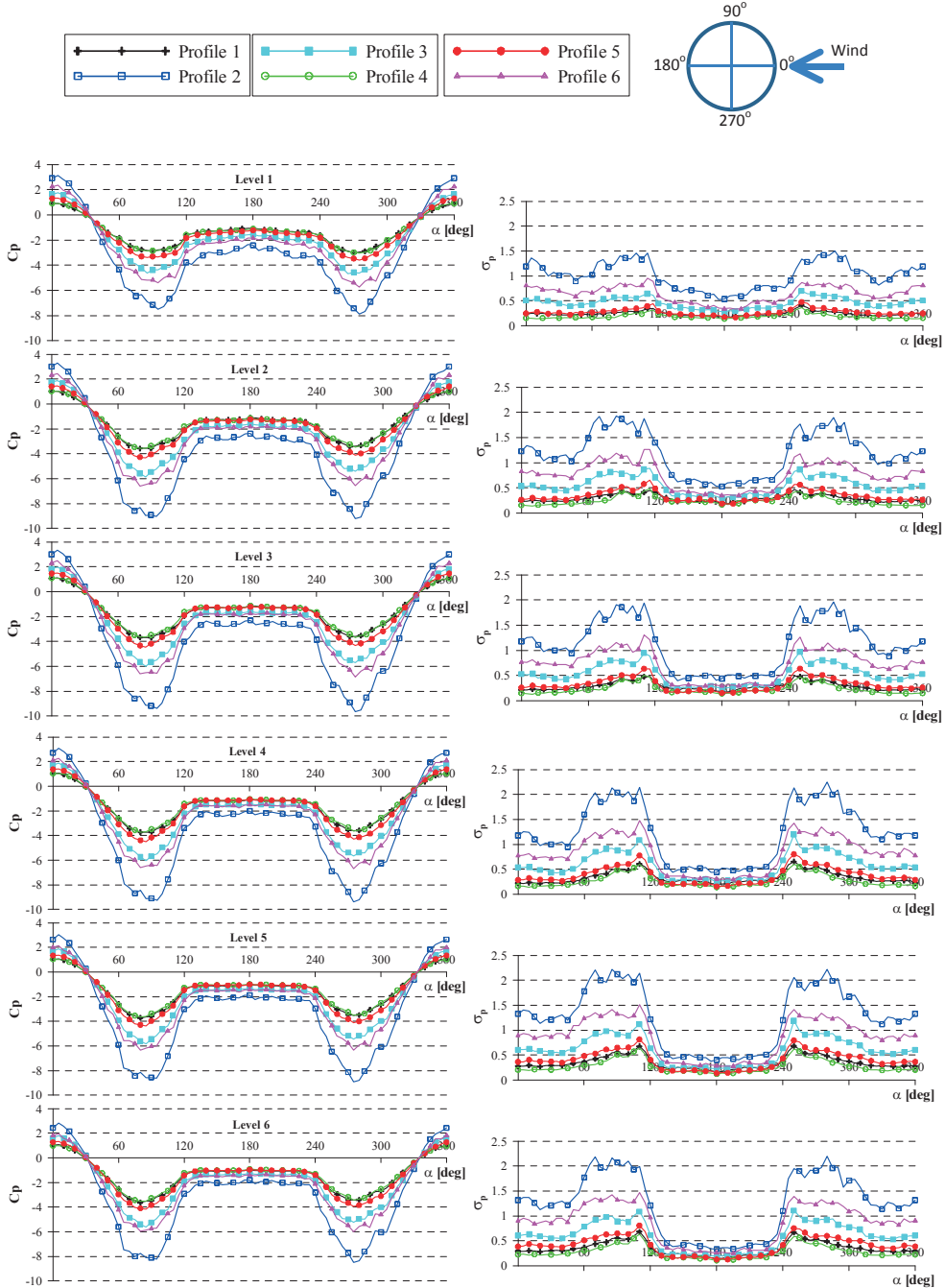
Ciśnienie dynamiczne zostało zarejestrowane w każdym z punktów pomiarowych umiejscowionych na powierzchni modelu. Średnie ciśnienie na powierzchni zostało wyznaczone poprzez uśrednienie czasowe zapisanych przebiegów czasowych ciśnień dynamicznych. Następnie zostały obliczone współczynniki średniego ciśnienia otrzymane przez podzielenie ciśnienia średniego w punkcie pomiarowym przez średnie ciśnienie referencyjne zmierzone przed modelem w przepływie niezaburzonym. Obliczono także ich odchylenia standardowe. Unormowane wartości ciśnienia (współczynnik ciśnienia) i odchylenia standardowego zostały wyznaczone ze wzorów:

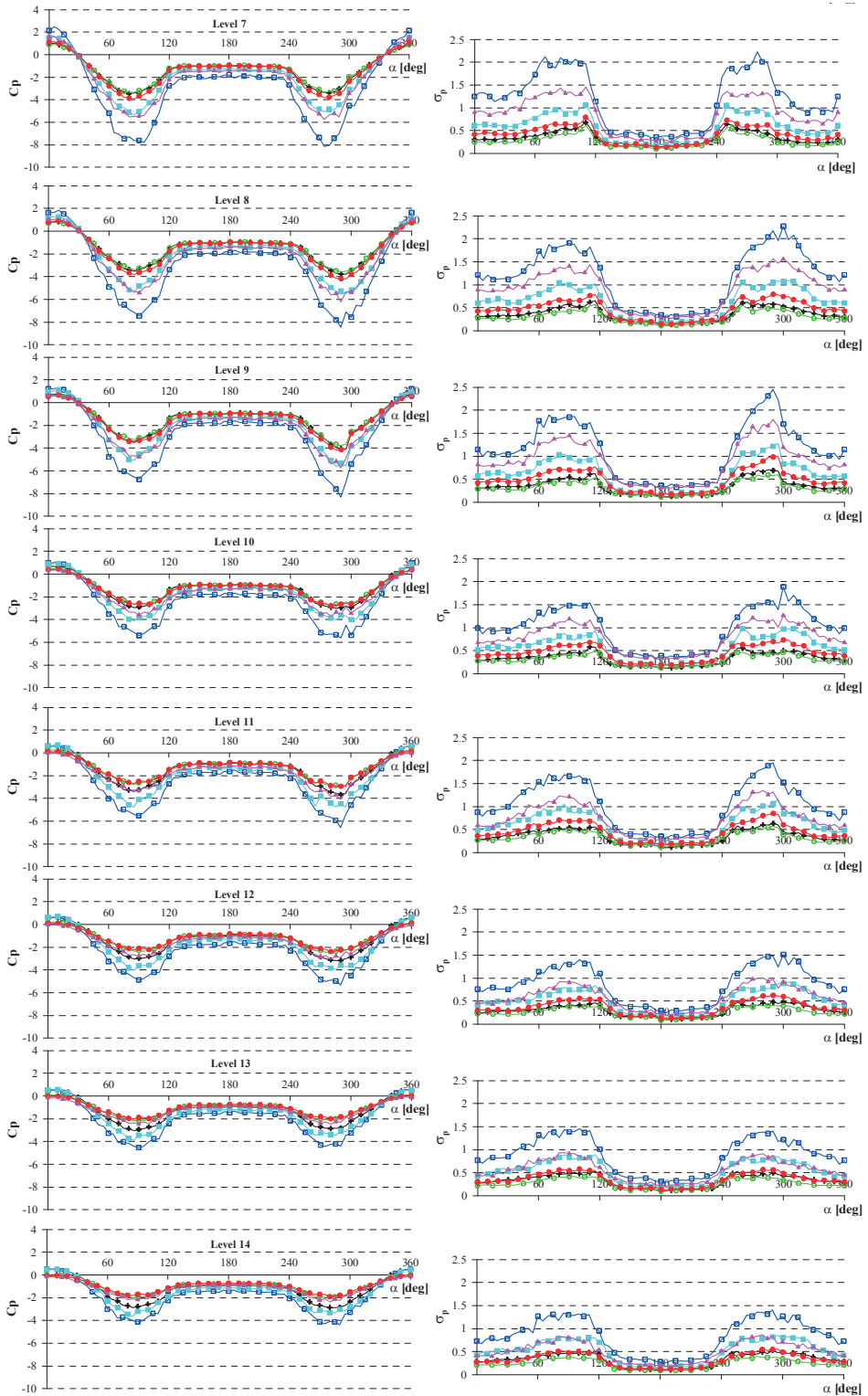
$$C_p = \frac{p}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} \tag{4}$$

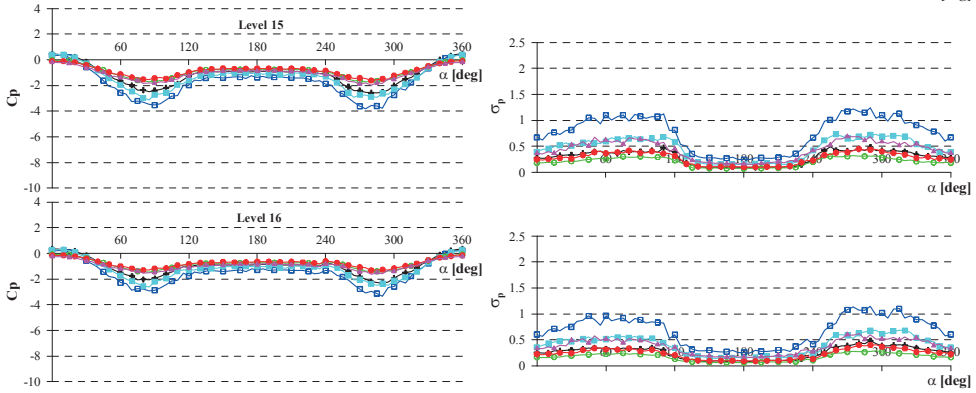
$$\sigma_p = \frac{\sigma}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} \tag{5}$$

w których: p , σ – średnie ciśnienie oraz odchylenie standardowe w danym punkcie pomiarowym na powierzchni modelu, ρ – gęstość powietrza, v_0 – prędkość wiatru w przepływie niezaburzonym przed modelem.

Poniżej na Rys. 5 zestawiono przykładowe wartości C_p i σ_p w formie rozkładów wzdłuż obwodu walca. Kolejne wykresy odpowiadają poszczególnym poziomom pomiarowym, a linie na wykresach sześciu analizowanym wariantom napływu powietrza. Ponadto, na rys. 6. przedstawiono współczynnik C_p w rozwinięciu powierzchniowym.

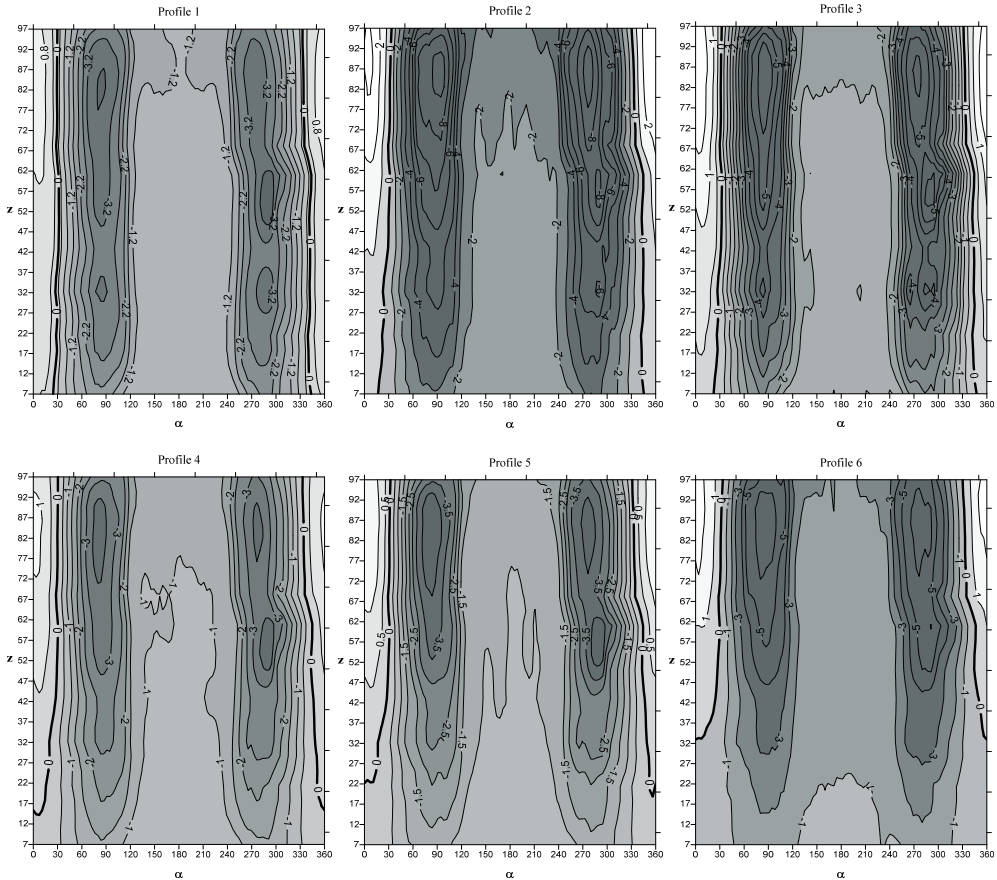






Rys. 5. Rozkład obwodowy współczynnika średniego ciśnienia C_p (z lewej) oraz zredukowanego odchylenia standardowego σ_p (z prawej), na kolejnych poziomach pomiarowych, w analizowanych przypadkach napływu powietrza.

Fig. 5. Circumferential distribution of the mean pressure coefficient C_p (left) and reduced standard deviation σ_p (right), at consecutive measuring levels, in different cases of air flow.



Rys. 6. Rozkład współczynnika średniego ciśnienia C_p na powierzchni walca.

Fig. 6. Distribution of the mean pressure coefficient C_p on the cylinder surface.

4. Analiza wyników

Jak wynika z zamieszczonych wykresów (Rys. 5 i Rys. 6) współczynnik średniego ciśnienia dla strony nawietrznej (dla kąta $\alpha = 0^\circ$, przy czym α jest kątem opisującym położenie punktu na obwodzie) rośnie wraz z wysokością poziomu pomiarowego. Jest to oczywiście skutkiem rosnącej wraz z wysokością średniej prędkości wiatru. Z drugiej strony zredukowane odchylenie standardowe maleje w kierunku zbliżania się poziomu pomiarowego do posadowienia, a różnice w wartościach są znacznie większe niż w przypadku współczynników ciśnienia. Na poziomach najniższych wartość współczynnika ciśnienia zmienia po stronie nawietrznej znak na ujemny, a więc wzdłuż całego obwodu występuje ssanie.

Po stronie zawietrznej występuje tylko ssanie. Wartości C_p i σ_p po stronie zawietrznej (dla kąta $\alpha \approx 180^\circ$) nieznacznie wzrastają wraz z wysokością. Maksymalne wartości ssania pojawiają się dla kąta $\alpha \approx 75^\circ$ i maleją w kierunku podłoża.

Kąt, przy którym następuje zmiana znaku współczynnika ciśnienia, a więc zmiana parcia na ssanie wynosi dla górnych poziomów pomiarowych około $\alpha \approx 30^\circ$. Ponadto, kąt ten zmniejsza się w kierunku podstawy i, jak już wspomniano, przy podłożu występuje tylko ssanie, w przypadku wariantów napływu charakteryzujących się znacznymi wartościami intensywności turbulencji (profile 4, 5, 6).

Różnice w wartościach C_p i σ_p powyżej poziomu referencyjnego, gdzie prędkości wiatru mają tę samą prędkość we wszystkich przypadkach napływu (70 cm) są powodowane głównie faktem, że prędkości wiatru powyżej tego poziomu różnią się znacznie między sobą.

W celu lepszego zobrazowania zmian współczynnika ciśnienia wzdłuż wysokości, na Rys. 7 pokazano pionowe zmiany wartości C_p w charakterystycznych położeniach na obwodzie walca: dla kąta $\alpha = 0^\circ$ (maksymalne parcie po stronie nawietrznej), dla kąta $\alpha \approx 30^\circ$ (zmiana znaku z parcia na ssanie z boku modelu), dla kąta $\alpha \approx 75^\circ$ (maksymalne ssanie z boku modelu), dla kąta $\alpha \approx 180^\circ$ (ssanie po stronie zawietrznej). Analizowane wartości zestawiono w zależności od struktury napływu. Dla porównania pokazano również rozkład obwodowy współczynnika ciśnienia rekomendowany przez Eurokod 1.

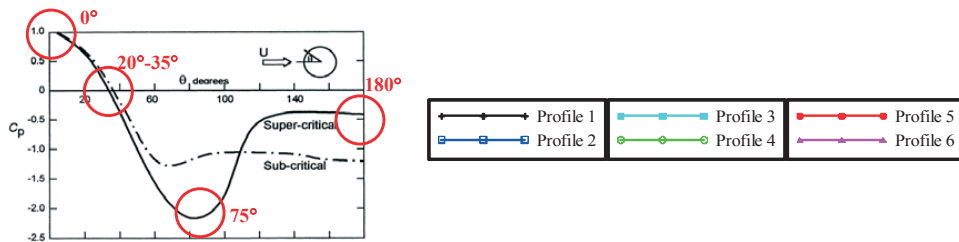
Jak wynika z Rys. 7 charakter zmian wartości współczynnika ciśnienia po stronie nawietrznej odpowiada zmianom prędkości wiatru wraz z wysokością (por. wykresy profili).

Porównując wykresy gęstości widmowej mocy w zakresie od 0 do 2 Hz (na wysokości 51 cm) z wykresami współczynnika C_p można zauważyć, że kolejność wykresów jest taka sama na tej wysokości. Wszelako jednoznaczne określenie wpływu gęstości widmowej mocy nie jest możliwe i wymaga dalszych analiz. Spowodowane jest to głównie faktem, że w przyjętych wariantach napływu nie udało się osiągnąć takiego samego rozkładu gęstości widmowych mocy wzdłuż wysokości modelu.

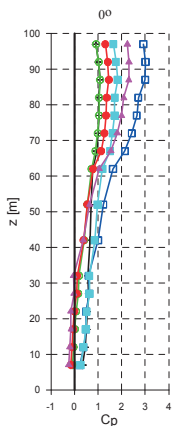
W związku z tym dalsze analizy, które pozwolą w sposób jasny określić wpływ zarówno turbulencji, jak i gęstości widmowej mocy, będą związane z określeniem współczynników sił oporu i bocznej w różnych wariantach napływu.

W trakcie badań wykonano szereg pomiarów na modelach o różnej smukłości, co również pozwoli na późniejsze rozszerzenie i uogólnienie wniosków analiz.

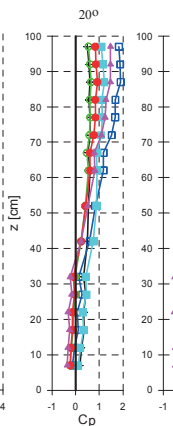
a)



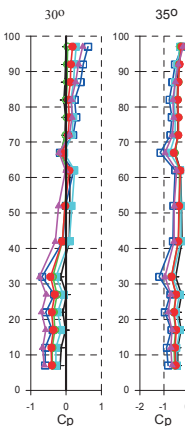
b)



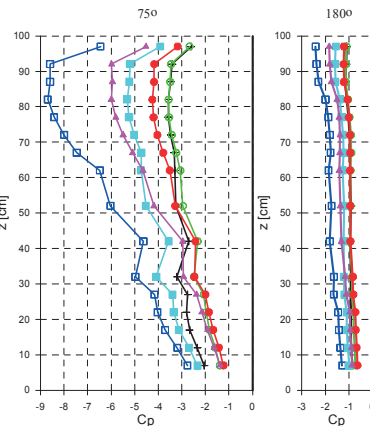
c)



d)



e)



Rys. 7. Zmiany średniego współczynnika ciśnienia wiatru wraz z wysokością, w charakterystycznych punktach wzdłuż obwodu walca. a) rozkład normowy – Eurokod 1, b) $\alpha = 0^\circ$, c) $\alpha \approx 30^\circ$, d) $\alpha = 75^\circ$, e) $\alpha = 180^\circ$.

Rys. 7. Changes in values of the mean pressure coefficient along the height, in characteristic locations on the circumference: a) standard distribution – Eurocode 1, b) $\alpha = 0^\circ$, c) $\alpha \approx 30^\circ$, d) $\alpha = 75^\circ$, e) $\alpha = 180^\circ$.

5. Wnioski

Rozkłady współczynnika średniego ciśnienia, jak również jego odchylenia standardowego są silnie uzależnione od profilu napływającego wiatru. Wartości zmieniają się wzdłuż wysokości modelu przy tej samej strukturze napływu, jak również na tych samych wysokościach w przypadku różnych wariantów napływu. Na poziomach pomiarowych położonych powyżej poziomu referencyjnego współczynnik ciśnienia rośnie wraz ze wzrostem wykładnika wzoru potęgowego α , natomiast poniżej tego poziomu można zaobserwować zmniejszanie się współczynnika wraz ze wzrostem α , co wprost wynika ze wzoru opisującego pionowy profil prędkości średniej. Rozkład funkcji gęstości widmowych mocy ma również wpływ na wartości współczynnika ciśnienia i odchylenia standardowego. Wartości C_p są większe w przypadku przepływu opisanego funkcją gęstości widmowej mocy charakteryzującej się wyższymi wartościami maksymalnymi. Planuje się przeprowadzenie dalszych analiz, które pozwolą jasno sprecyzować zależności pomiędzy strukturą napływu, a obciążeniem wiatrem budynku.

Literatura

- [1] Uematsu Y., Yamada M., *Effects of aspect ratio and surface roughness on the time-averaged aerodynamic forces on cantilevered circular cylinders at high Reynolds numbers*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 54/55 (1995) 301-312.
- [2] Uematsu Y., Yamada M., *Fluctuating wind pressures on buildings and structures of circular cross-section at high Reynolds numbers*, Proceedings of the 9th International Conference on Wind Engineering, New Delhi, India, 1995, pp. 129-130.
- [3] Garg R.K., Niemann H.J., *On three dimensionality of fluctuating aerodynamic forces on circular cylindrical structures*, Proceedings of the 9th International Conference on Wind Engineering, New Delhi, India, 1995, pp. 129-140.
- [4] Garg R.K., Niemann H.J., Kasperski M., Chaundhry A., *Aspect ratio effects on the aerodynamics of short circular cylindrical structures*, Proceedings of the 10th International Conference on Wind Engineering, Copenhagen, Denmark, 1999, pp. 1649-1655.
- [5] Lee S.J., Park C.W., *Aspect ratio effect on the near wake of a free-ended circular cylinder in a cross-flow*, Proceedings of the 10th International Conference on Wind Engineering, Copenhagen, Denmark, 1999, pp. 1687-1692.
- [6] Park C.W., Lee S.J., *Free-end effects on the near wake flow structure behind a finite circular cylinder*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 88 2000 231-246.
- [7] Park C.W., Lee S.J., *Flow structure around a finite circular cylinder embedded in various atmospheric boundary layers*, Fluid Dynamic Research 30(4) (2002) 197-215.
- [8] Park C.W., Lee S.J., *Effects of free-end corner shape on flow structure around a finite cylinder*, Journal of Fluids and Structures 19 (2004) 141-158.
- [9] Luo S.C., Gan T.L., Chew Y.T., *Uniform flow past one (or two in tandem) finite length circular cylinder(s)*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 59 (1996) 69-93.
- [10] Sumner D., Heseltine J.L., *Tip vortex structure for a circular cylinder with free ends*, Proceedings of the 5th Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications, 2004, pp. 423-426.
- [11] Sumner D., Heseltine J.L., *Tip vortex structure for a circular cylinder with a free end*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96 (2008) 1185-1196.
- [12] Sumner D., Heseltine J.L., Dansereau O.J.P., *Wake structure of a finite circular cylinder of small aspect ratio*, Experiments in Fluids 37 (2004) 720-730.
- [13] Flaga A., Błazik-Borowa E., Podgórski J., *Aerodynamika smukłych budowli i konstrukcji prętowo-cięgnowych*, Monografia, Politechnika Lubelska, Lublin, 2004, 391.
- [14] Flaga A., Lipecki T. (editors), *Environmental effects on buildings, structures, materials and people*, Lublin University of Technology, 2007, 404.
- [15] Flaga A., *Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania*, Arkady, Warszawa, 2008, 719.
- [16] Bęc J., Lipecki T., Błazik-Borowa E., *The analysis of wind structure influence on the pressure distribution on the surface of a circular cylinder*, 13th International Conference on Wind Engineering, 2011, Holandia.
- [17] Bęc J., Lipecki T., Błazik-Borowa E., *Research on wind structure in the wind tunnel of Wind Engineering Laboratory of Cracow University of Technology*, Journal of Physics: Conference Series 318 (2011) 072003, doi: 10.1088/1742-6596/318/7/072003.
- [18] Bęc J., Lipecki T., Błazik-Borowa E., Szulej J., *Badania struktury przepływu w tunelu aerodynamicznym Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej*, Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce 6(2) (2011) 5-10.

Wind structure influence on pressure coefficient distribution on the surface of circular cylinder of the diameter 20 cm

Tomasz Lipecki, Ewa Błazik-Borowa, Jarosław Bęc

Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mails: t.lipecki@pollub.pl, j.bec@pollub.pl, e.blazik@pollub.pl

Abstract: The paper deals with results and analyses of the model investigations which were performed in wind tunnel and were focused on the flow around single circular cylinder. Presented results are related to variations in the distribution of the normalized mean pressure coefficient on the surface of the model as well as its standard deviation. Six cases of the approaching flow were taken into consideration. The flow was described by vertical profile of the mean wind speed, vertical profile of the intensity of turbulence, and power spectral density functions. The height and dimension of the model were respectively equal: $H = 100$ cm, $D = 20$ cm. Selected results of measurements have been shown in the paper as the effect of these experiments.

Keywords: wind tunnel, pressure coefficient, circular cylinder, wind structure.