

## BADANIA ROZKŁADU CIŚNIENIA NA POWIERZCHNI WALCA W ZALEŻNOŚCI OD STRUKTURY WIATRU

Tomasz LIPECKI\*, Jarosław BĘC\*\*, Ewa BŁAZIK-BOROWA\*\*\*, Jacek SZULEJ\*\*\*\*

\* Politechnika Lubelska, Katedra Mechaniki Budowli  
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, e-mail: t.lipecki@pollub.pl  
\*\* Politechnika Lubelska, Katedra Mechaniki Budowli  
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, e-mail: j.bec@pollub.pl  
\*\*\* Politechnika Lubelska, Katedra Mechaniki Budowli  
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, e-mail: e.blazik@pollub.pl  
\*\*\*\* Politechnika Lubelska, Katedra Mechaniki Budowli  
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, e-mail: j.szulej@pollub.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki pomiarów rozkładu ciśnienia na powierzchni walca przy sześciu rodzajach napływów. W pracy wykazano m.in. znaczny wpływ kształtu wykresu gęstości widmowej mocy na obciążenie wiatrem budowli, które mogą być modelowane jako taka bryła.

**Słowa kluczowe:** tunel aerodynamiczny, rozkład ciśnienia, skaner ciśnienia, gęstość widmowa mocy, profil wiatru.

### 1. WSTĘP

Smukłe walce mogą być modelami kominów stalowych, dla których obciążenie statyczne i dynamiczne wiatrem jest jednym z ważniejszych. W celu zbadania parametrów obciążenia wiatrem, które są potrzebne w obliczeniach odpowiedzi dynamicznej kominów (por. [1, 4]), wykonano badania rozkładów ciśnień dla różnych modeli walców przy różnej strukturze wiatru opisaną szczegółowo za pomocą profili średniej prędkości wiatru, intensywności turbulencji oraz gęstości widmowej mocy na różnych poziomach pomiarowych. Pomiary wykonano za pomocą skanerów ciśnień w tunelu aerodynamicznym Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej.

Badania modelowe opływu powietrza wokół walca kołowego są szeroko opisywane w literaturze przedmiotu. Różnymi aspektami opływu zajmowano się m.in. w pracach [2, 3, 5, 6, 7]. W niniejszej pracy zwrócono szczególną uwagę na zależność pomiędzy strukturą wiatru (głównie gęstością widmową mocy), a rozkładem współczynnika średniego ciśnienia wyznaczonego na podstawie pomiaru średniego ciśnienia na powierzchni modelu.

### 2. OPIS EKSPERYMENTU

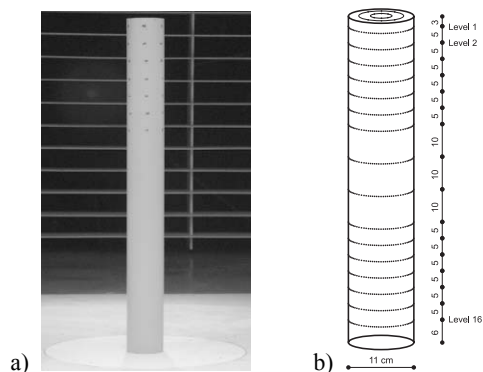
Badania wykonano dla trzech walców kołowych o wymiarach zestawionych w tab. 1, gdzie:  $H$  – wysokość,  $D$  – średnica,  $\lambda$  – smukłość. Modele umieszczano pionowo w środku stołu obrotowego (rys. 1a). Na powierzchni każdego z walców wykonano otwory do pomiaru ciśnienia, rozmieszczone w sześciu przekrojach pionowych i szesnastu przekrojach poziomych (rys. 1b). W trakcie pomiarów walec był obracany wokół osi pionowej. Dzięki temu w każdym przekroju poziomym otrzymano odczyty zmian ciśnienia w czasie w punktach rozmieszczonych co  $5^\circ$ .

Tabela 1. Charakterystyka geometryczna modeli.  
Table 1. Geometric characteristics of models

| Model | $H$ [cm] | $D$ [cm] | $\lambda$ [-] |
|-------|----------|----------|---------------|
| C1    | 100      | 20       | 5             |
| C2    | 99       | 11       | 9             |
| C3    | 100      | 5        | 20            |

Parametry przyjętych profili wiatru zestawiono w tab. 2 i pokazano na rys. 2 wraz z profilami intensywności turbulencji, zaś na rys. 3 pokazano gęstości widmowe mocy na dwóch przykładowych wysokościach. Prędkość napływu w tab. 2 i na rys. 2 opisano wzorem potęgowym  $u(z) = k \cdot z^\alpha$ ,

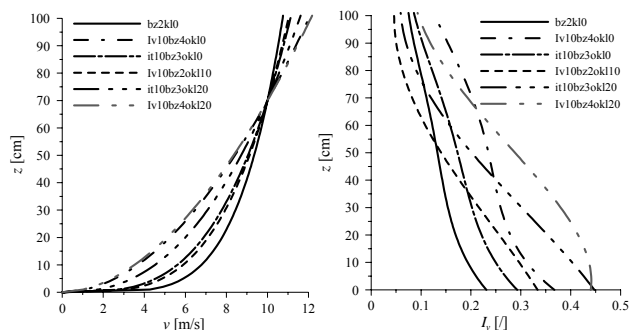
gdzie:  $k$ ,  $\alpha$  – współczynniki otrzymane metodą najmniejszych kwadratów,  $z$  – wysokość.



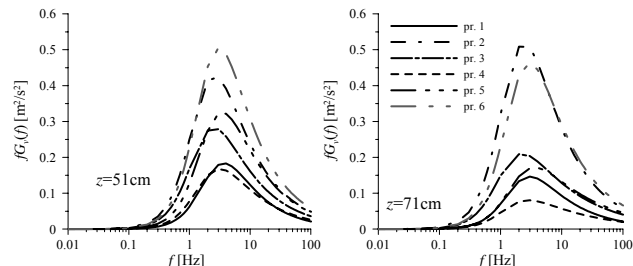
Rys. 1. Model walca: a) widok w tunelu aerodynamicznym, b) rozmieszczenie punktów pomiarowych na powierzchni.  
Fig. 1. The circular cylinder model: a) the view of the model in the wind tunnel, b) pressure taps location on the model surface.

Tabela 2. Zestawienie profili wiatru.  
Table 2. The wind speed profiles parameters.

| Profil | Oznaczenie   | $k$  | $\alpha$ |
|--------|--------------|------|----------|
| 1      | Bz2k10       | 4.26 | 0.20     |
| 2      | Iv10bz4ok10  | 2.42 | 0.32     |
| 3      | It10bz3ok10  | 3.06 | 0.28     |
| 4      | Iv10bz2ok110 | 1.77 | 0.42     |
| 5      | It10bz3ok120 | 1.13 | 0.52     |
| 6      | Iv10bz4ok120 | 0.87 | 0.55     |



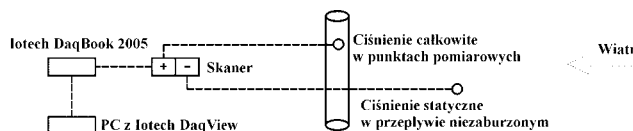
Rys. 2. Profile średniej prędkości i intensywności turbulencji.  
Fig. 2. Mean wind speed and intensity of turbulence profiles.



Rys. 3. Gęstość widmowa mocy napływającego powietrza.  
Rys. 3. Power spectral density function of inflow.

### 3. WYNIKI BADAŃ

Wartości współczynnika średniego ciśnienia oraz odchylenia standardowego określone zostały w każdym z punktów pomiarowych na podstawie wartości pomierzonych w 6000 krokach czasowych o długości 0,005 s, a więc w czasie 30 s. W badaniach wykorzystano 8 skanerów ciśnień, z których każdy umożliwiał jednoczesny pomiar ciśnienia w 8 punktach. Punkty pomiarowe zlokalizowane na powierzchni modelu podłączono do skanerów za pomocą rurek silikonowych. Wykorzystane skanery służą do pomiaru ciśnień różnicowych typu równoległego i bazują na piezorezystywnych sensorach ciśnienia Motorola MPX2010. Analogowe sygnały napięciowe ze skanera ciśnień archiwizowano z wykorzystaniem systemu Iotech DaqBook 2005 obsługiwanego przez oprogramowanie IotechDaqView. Tor pomiarowy przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Tor pomiarowy przy pomiarach ciśnienia.  
Fig. 4. Measurement set-up for pressure measurements.

Współczynniki średniego ciśnienia oraz odchylenie standardowe wyznaczone zostały za pomocą wzorów:

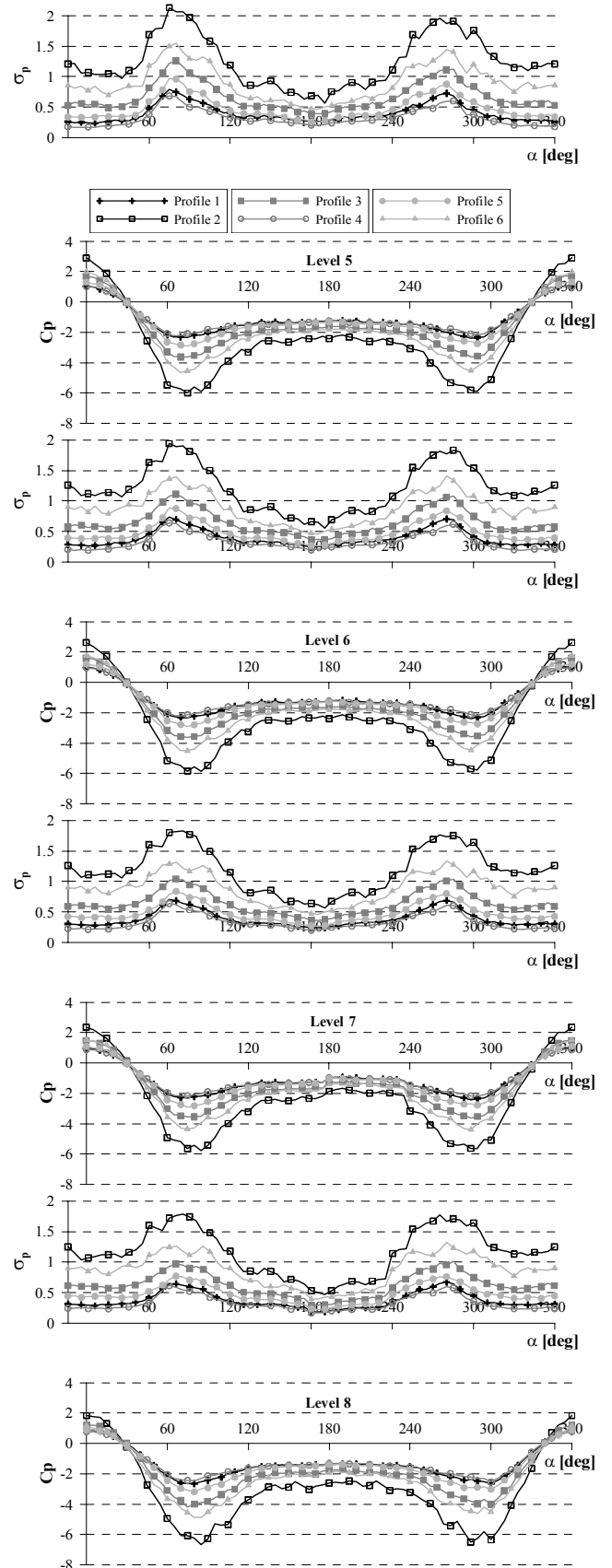
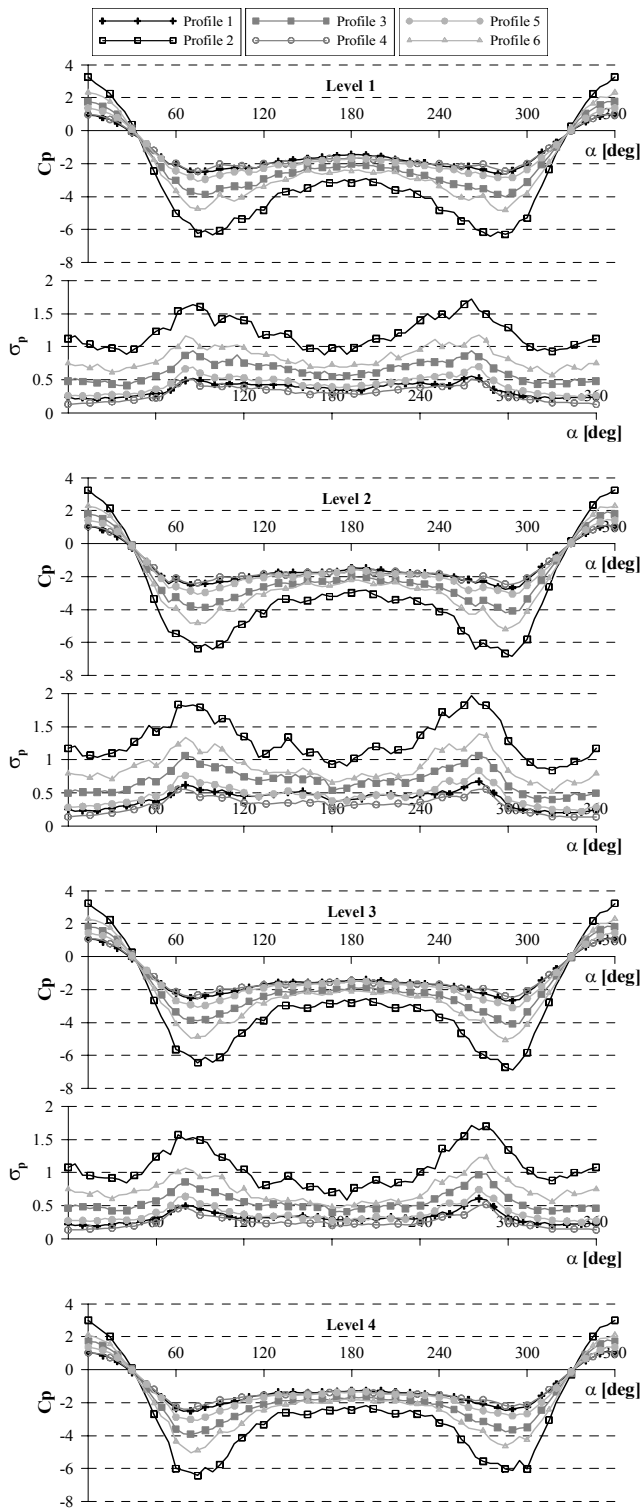
$$C_p = \frac{p}{\frac{1}{2} \rho v_0^2}, \quad (2)$$

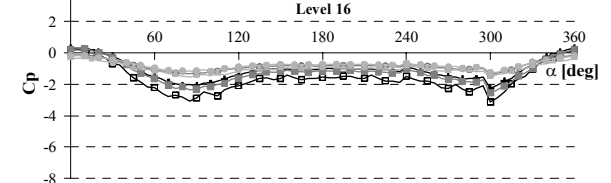
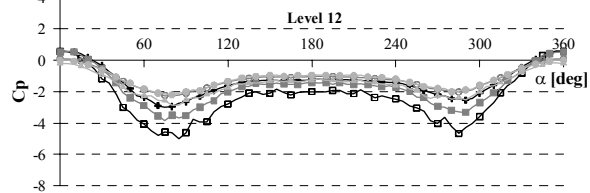
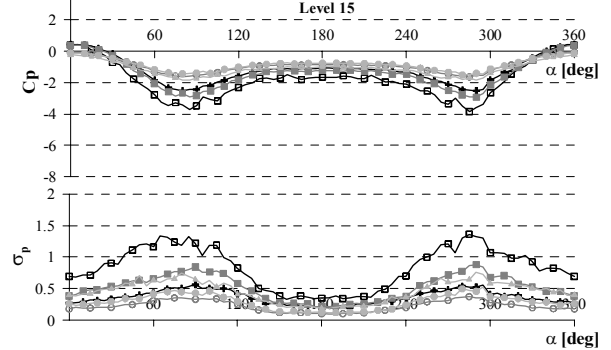
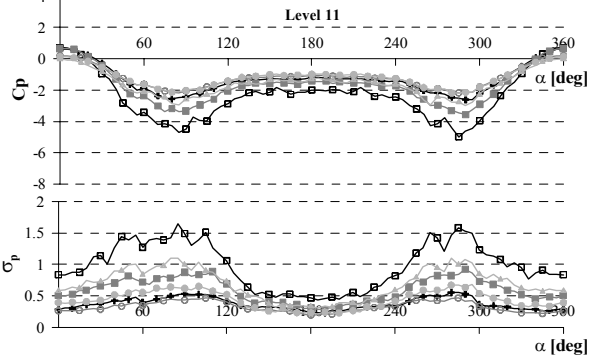
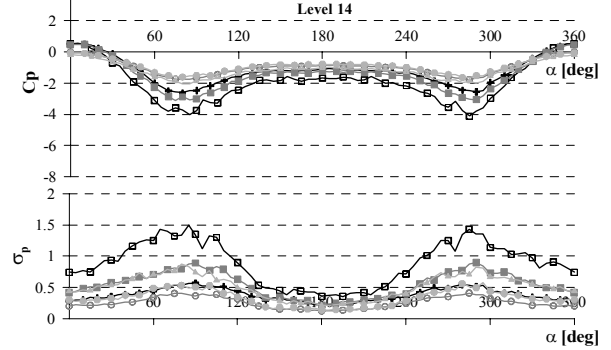
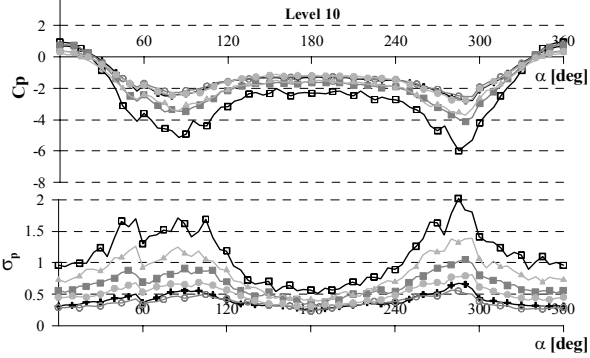
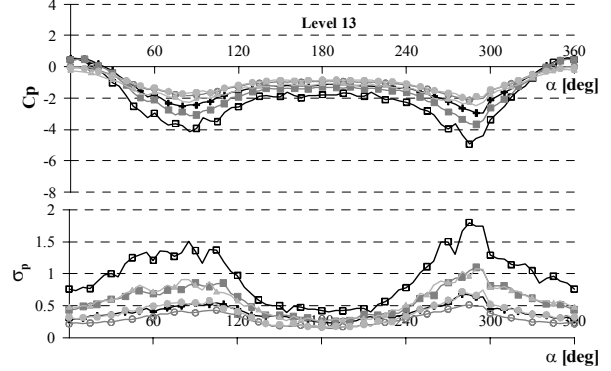
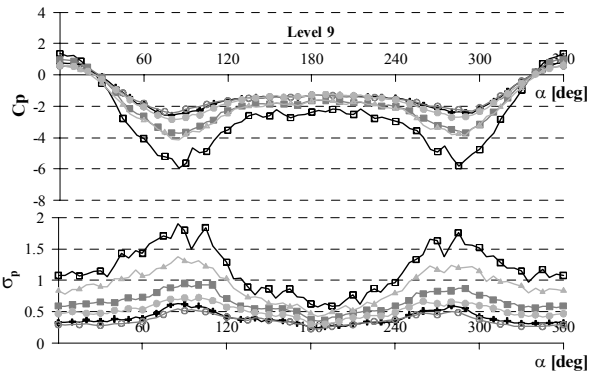
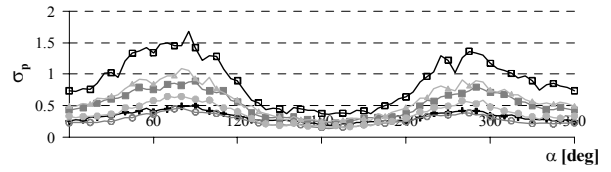
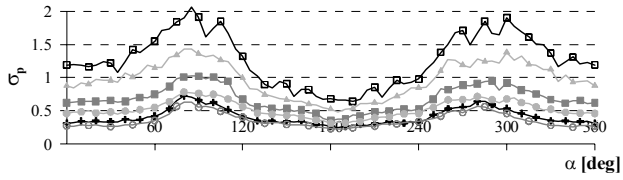
$$\sigma_p = \frac{\sigma}{\frac{1}{2} \rho v_0^2}, \quad (3)$$

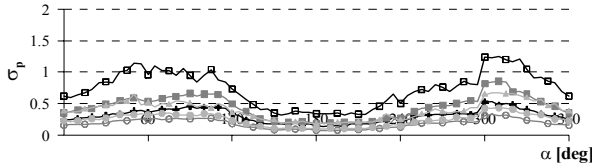
w których:  $p$  – średnie ciśnienie w punkcie pomiarowym,  $\sigma$  – odchylenie standardowe średniego ciśnienia,  $\rho$  – gęstość powietrza,  $v_0$  – prędkość wiatru w obszarze przepływu niezaburzonego, mierzona przed modelem na wysokości 70 cm (tzw. prędkość referencyjna).

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki pomiarów dla walca kołowego o symbolu C2 ( $D = 11$  cm). Rozkłady współczynnika średniego ciśnienia oraz odchylenia standardowego wzdłuż obwodu modelu na 16 poziomach dla wszystkich wybranych

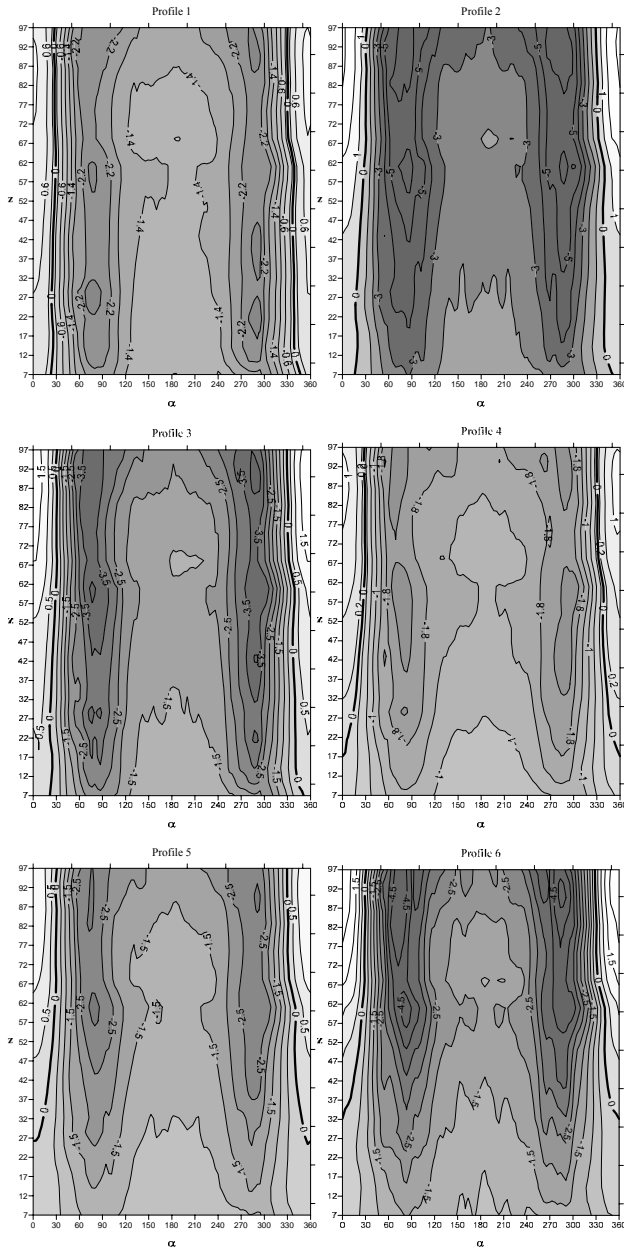
przypadków napływu zestawiono na rys. 5. Dodatkowo, na rys. 6 pokazano rozkłady współczynnika średniego ciśnienia w rozwinięciu powierzchniowym modelu walca.







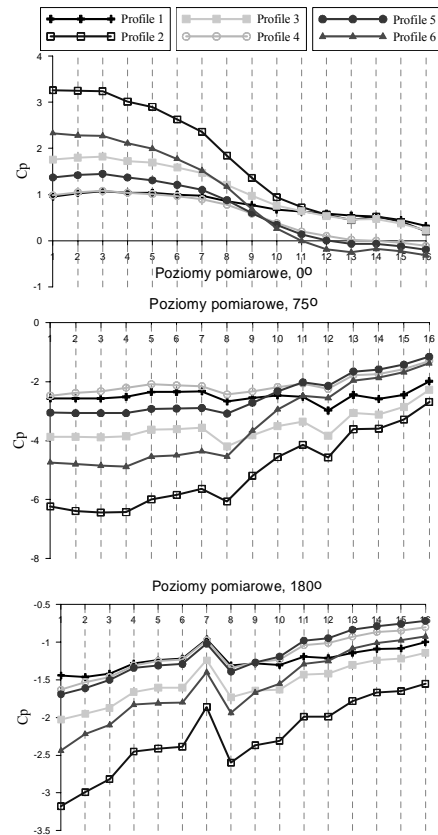
Rys. 5. Rozkłady obwodowe współczynnika średniego ciśnienia oraz zredukowanego odchylenia standardowego na kolejnych poziomach pomiarowych.  
Fig. 5. Circumferential distribution of mean pressure coefficient and reduced standard deviation at measurements levels.



Rys. 6. Rozkład średniego współczynnika ciśnienia na powierzchni rozwinięcia walca.  
Fig. 6. Distribution of mean pressure coefficient on cylinder surface development.

#### 4. ANALIZA WYNIKÓW

Wartości współczynników średniego ciśnienia po stronie nawietrznej (dla kąta ok  $0^\circ$ ) rosną powoli wraz z wysokością poziomu pomiarowego (parcie). Jest to wynik zwiększonego ciśnienia średniego na poziomach powyżej poziomu ciśnienia referencyjnego. Odchylenie standardowe jest wykazuje nieznaczną tendencję do malenia wraz ze zmniejszaniem wysokości. Na najniższych poziomach pomiarowych, a więc w obszarze największej turbulencji parcie przechodzi w ssanie. Wartości współczynnika średniego ciśnienia oraz odchylenia standardowego po stronie zawietrznej (dla kąta ok.  $180^\circ$ ) rosną wraz ze zmniejszaniem się wysokości. Ekstremalne wartości ssania występują dla kąta około  $75^\circ$  i maleją wraz ze zmniejszaniem się wysokości. Punkt przejścia z parcia do ssania w części wierzchołkowej jest w miarę stały i bliski kąta  $30^\circ$ . Na mniejszych wysokościach wartość tego kąta się zmniejsza, zaś dla niektórych profili przy podstawie występuje tylko ssanie (profile 4, 5, 6). Różnice w wartościach współczynników ciśnienia w charakterystycznych punktach opływu, a więc: dla  $0^\circ$  (największe parcie po stronie nawietrznej),  $75^\circ$  (największe ssanie) i  $180^\circ$  (strona zawietrzna) zestawiono na rys. 7.



Rys. 7. Rozkład średniego współczynnika wzdłuż wysokości walca dla trzech charakterystycznych kątów.  
Fig. 7. Distribution of mean pressure coefficient along cylinder height for three characteristic angles.

Obserwacje zmian współczynnika  $C_p$  pozostają w zgodności ze zmianami prędkości wynikającymi z profili wiatru, co najłatwiej zaobserwować dla zmian parcia wiatru. Ustawienia elementów turbulizujących dobierano w taki sposób, aby wykładniki funkcji opisujących pionowy profil wiatru  $\alpha$  miały zróżnicowane wartości ok. 0,2, 0,3, 0,4 oraz 0,5. Dodatkowo analizowano gęstości widmowe mocy tak, aby wartości ich ekstremów były zróżnicowane zaś przypadku profili 2 i 3 oraz 5 i 6, dla których wykładnik  $\alpha$  przybiera odpowiednio zbliżone wartości, były znacząco różne. Biorąc pod uwagę gęstość widmową mocy na poziomie 72 cm oraz rozkłady współczynników ciśnień w pobliżu tej wysokości można stwierdzić, że kolejność ułożenia wykresów współczynnika ciśnienia jest dokładnie taka sama jak kolejność wykresów gęstości widmowej mocy w zakresie do 2 Hz.

## 5. WNIOSKI

Wyniki badań pokazują, że zarówno pionowy profil średniej prędkości wiatru i intensywności turbulencji, jak i kształt wykresu gęstości widmowej mocy, ma znaczny wpływ na jego działanie na budowie o przekroju kołowym. Planowane są dalsze analizy dotyczące opływu wokół walców kołowych – w powiązaniu z parametrami napływającego powietrza – a w szczególności następujących zagadnień:

- wpływu smukłości walca na rozkład współczynnika ciśnienia,
- wpływu swobodnego końca walca,
- wyznaczenie współczynników aerodynamicznych oporu i siły bocznej.

### THE RESEARCH OF PRESSURE DISTRIBUTIONS ON THE CIRCULAR CYLINDER WITH REGARD TO THE WIND STRUCTURE

**Summary:** The paper deals with measurements of a pressure distribution on circular cylinder for six types of the inflow. It is shown that the shape of power spectral density function significantly influences the wind action on buildings which may be modeled as such body.

#### Literatura

- [1] Flaga A. Inżynieria wiatrowa, Podstawy i zastosowania, Arkady, Warszawa, 2008.
- [2] Garg R.K., Niemann H.J., Kasperski M., Chaundhry K.K. Aspect ratio effects on the aerodynamics of short circular cylindrical structures. Proceedings of the 10th International Conference on Wind Engineering, 1999, s. 1649-1655.
- [3] Kareem A., Cheng C.M. Pressure and force fluctuations on isolated roughened circular cylinders of finite height in

boundary layer flows. Journal of Fluids and Structures 13 (1999) 907-933.

[4] Lipecki T., Flaga A. Code approaches to vortex shedding and own model, Engineering Structures 32 (2010) 1530-1536.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Zan S.J., Matsuda K. Steady and unsteady loading on a roughened circular cylinder at Reynolds numbers up to 900,000. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90 (2002) 567-581.