

## **Wpływ struktury wiatru na rozkład ciśnienia na powierzchni prostopadłościanu o wymiarach przekroju poprzecznego 10 cm x 20 cm**

**Tomasz Lipecki, Ewa Błazik-Borowa, Jarosław Bęc**

*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 badania modelowe w tunelu aerodynamicznym, przeprowadzone w odniesieniu do pionowo zamocowanego prostopadłościanu o wymiarach przekroju poprzecznego 10 cm x 20 cm. Wyniki przedstawione zostały w formie rozkładów współczynnika średniego ciśnienia wiatru na powierzchni ścian modelu. W trakcie badań analizowano wpływ struktury wiatru opisaną za pomocą funkcji pionowego profilu prędkości średniej, profilu intensywności turbulencji oraz funkcji gęstości widmowej mocy na wartości współczynnika ciśnienia. W pomiarach uwzględniono także zmienny kąt natarcia wiatru na model.

**Słowa kluczowe:** tunel aerodynamiczny, współczynnik ciśnienia, przekrój prostokątny, struktura wiatru.

### **1. Wprowadzenie**

Oddziaływanie wiatru na konstrukcje o prostokątnym przekroju poprzecznym jest badane od lat, zarówno w skali modelowej w tunelach aerodynamicznych i wodnych, jak i w skali rzeczywistej. Dodatkowo, jako alternatywa dla kosztownych badań, stosowane są coraz powszechniej obliczenia oparte na komputerowej mechanice płynów. Jedną z technik wykorzystywanych w badaniach modelowych są pomiary powierzchniowe ciśnienia. Eksperymenty są prowadzone przeważnie dla modeli 2D i coraz częściej, wraz z rozwojem techniki pomiarowej, również dla modeli 3D. Badania w tunelach aerodynamicznych częściej dotychczas wykonywano na makietach o przekroju poprzecznym kwadratowym niż prostokątnym.

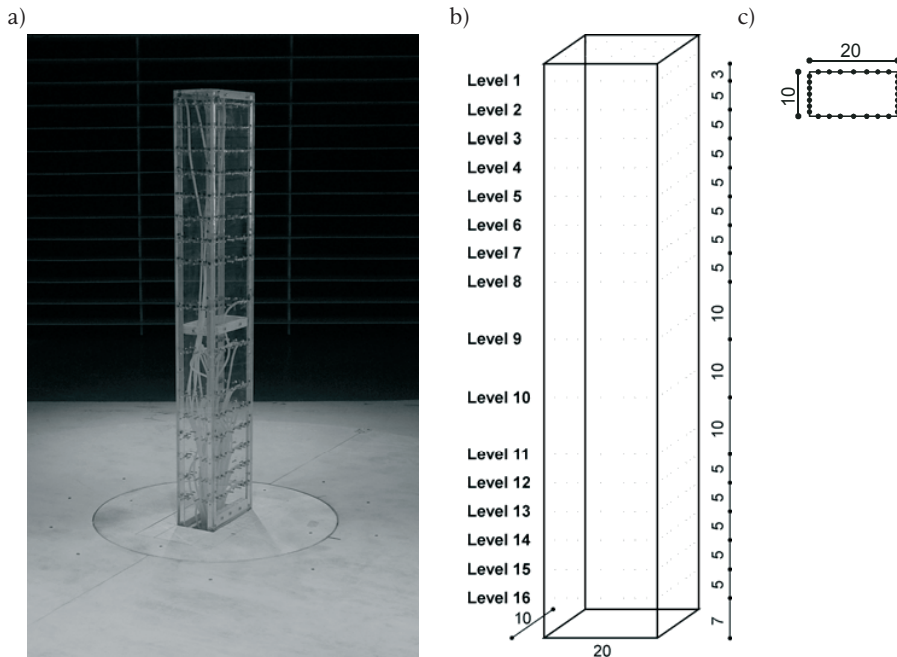
Różne aspekty opływu trójwymiarowego wokół prostopadłościanów o stosunku wymiarów boków przekroju poprzecznego 3, 2, 1,5, 1, 0,67, 0,5, 0,33 badań Wacker [1]. Wyniki prezentowane w pracach Liang i in. [2,3] również dotyczyły prostopadłościanów o stosunku wymiarów 1, 2, 3, 4. Wpływ smukłości modelu dla różnych przekrojów (0,34, 0,5, 0,63, 1, 1,59, 2, 2,98) na oddziaływanie wiatru był tematem pracy Lin i in. [4]. Autorzy w pracy Tamura i in. [5] opisali wyniki pomiarów dla prostokątów o stosunku boków 0,34, 0,4, 0,5, 1, przy różnym kącie natarcia wiatru. Badania o szerokim zakresie prowadzili również Cheng i Tsai [6]. Badali oni prostokąty o stosunku boków 0,2, 0,25, 0,33, 0,5, 1, 2, 3, 4, 5 i różnej smukłości całego modelu 3, 4, 5, 6 i 7, w kilku przypadkach napływu powietrza. Wyniki pomiarów o równie rozległym zakresie przedstawili Zhang i Gu [7] dla przekrojów 1, 0,67, 0,5, 0,33, 1,5, 2 i 3 i dwóch wariantów napływającego powietrza.

W niniejszej pracy podjęto się analizy rozkładów współczynnika średniego ciśnienia na powierzchni prostopadłościanu o wymiarach boków 10 cm x 20 cm, a więc stosunku wymiarów 1:2 (0,5) lub 2:1 (2). W pomiarach i analizach uwzględniono kąt natarcia wiatru zmieniający się od  $0^\circ$  (2:1) do  $90^\circ$  (1:2). Ponadto badano wpływ struktury wiatru w sześciu przypadkach znacząco różniącego się napływu. Wyniki badań przedstawiono między innymi w trakcie 13<sup>th</sup> International Conference on Wind Engineering i opublikowano w pracy Lipecki i in. [8].

## 2. Opis badań

Eksperyment opisany w niniejszej pracy przeprowadzony został w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej z tunelem aerodynamicznym z warstwą przyścienną funkcjonującym w Instytucie Mechaniki Budowli na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej. Dokładny opis konstrukcji tunelu przedstawiono w wielu pracach między innymi: Flaga i in. [9], Flaga i Lipecki [10], Flaga [11].

Pionowy model prostopadłościanu o wysokości 100 cm i o wymiarach przekroju poprzecznego 10 cm x 20 cm został zamocowany sztywno na stole obrotowym umieszczonym w sekcji pomiarowej tunelu (Rys. 1a). Badania prowadzono przy obrocie stołu wraz z modelem co  $15^\circ$ , w zakresie od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ . Punkty pomiarowe zostały rozmieszczone na 16 poziomach (Rys. 1b). Na każdym poziomie umieszczono 28 punktów pomiarowych, według schematu przedstawionego na Rys 1c. Punkty pomiarowe ulokowano również na płaskiej pokrywie modelu.



Rys. 1. Analizowany model: a) widok modelu w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego, b) rozmieszczeni punktów pomiarowych wzdłuż wysokości modelu, wymiary w [cm], c) rozmieszczenie punktów pomiarowych na obwodzie modelu.

Fig. 1. The analyzed model: a) the view of the model in the wind tunnel test section, b) the location of pressure taps along the height, dimensions in [cm], c) the location of pressure taps around model circumference.

W trakcie badań przeprowadzono analizę wpływu struktury wiatru opisanej za pomocą pionowego profilu średniej prędkości wiatru, pionowego profilu turbulencji oraz funkcji gęstości widmowej mocy na wartości i rozkład współczynnika średniego ciśnienia na powierzchni modelu. W analizach zastosowano sześć znacząco różniących się wymienionymi parametrami wariantów napływu powietrza. Dokładny opis badań prowadzących do zdefiniowania struktury napływającego wiatru został opisany w pracach Bęc i in. [12, 13].

### 3. Wyniki pomiarów

W trakcie pomiarów rejestrowano ciśnienia dynamiczne w punktach pomiarowych na powierzchni modelu. W badaniach wykorzystano 8 skanerów ciśnień umożliwiających jednoczesny pomiar na 8 kanałach każdy. W związku z ograniczoną do 64 ilością punktów jednoczesnego pomiaru, konieczne było wykonywanie serii badań z rejestracją danych z punktów pomiarowych ułożonych w kolejnych sekcjach modelu. Sygnały docierające ze skanerów rejestrowane były z wykorzystaniem systemu Iotech DaqBook 2005 obsługiwanego przez oprogramowanie IotechDaqView.

Ciśnienie dynamiczne w każdym z punktów pomiarowych zostało uśrednione w czasie 30 sekund. Jako wyniki końcowe pomiarów przyjęto współczynniki średniego ciśnienia, czyli uśrednione ciśnienie w punkcie pomiarowym podzielone przez średnie ciśnienie dynamiczne zmierzone na wysokości referencyjnej  $z_{ref} = 70$  cm przed modelem w obszarze niezaburzonego przepływu. Współczynnik średniego ciśnienia został wyrażony za pomocą wzoru:

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

w którym:  $p$  – średnie ciśnienie w danym punkcie pomiarowym na powierzchni modelu,  $\rho$  – gęstość powietrza,  $v_0$  – prędkość wiatru w przepływie niezaburzonym przed modelem, na wysokości referencyjnej  $z_{ref} = 70$  cm, czyli  $\frac{1}{2} \rho v_0^2$  to ciśnienie referencyjne.

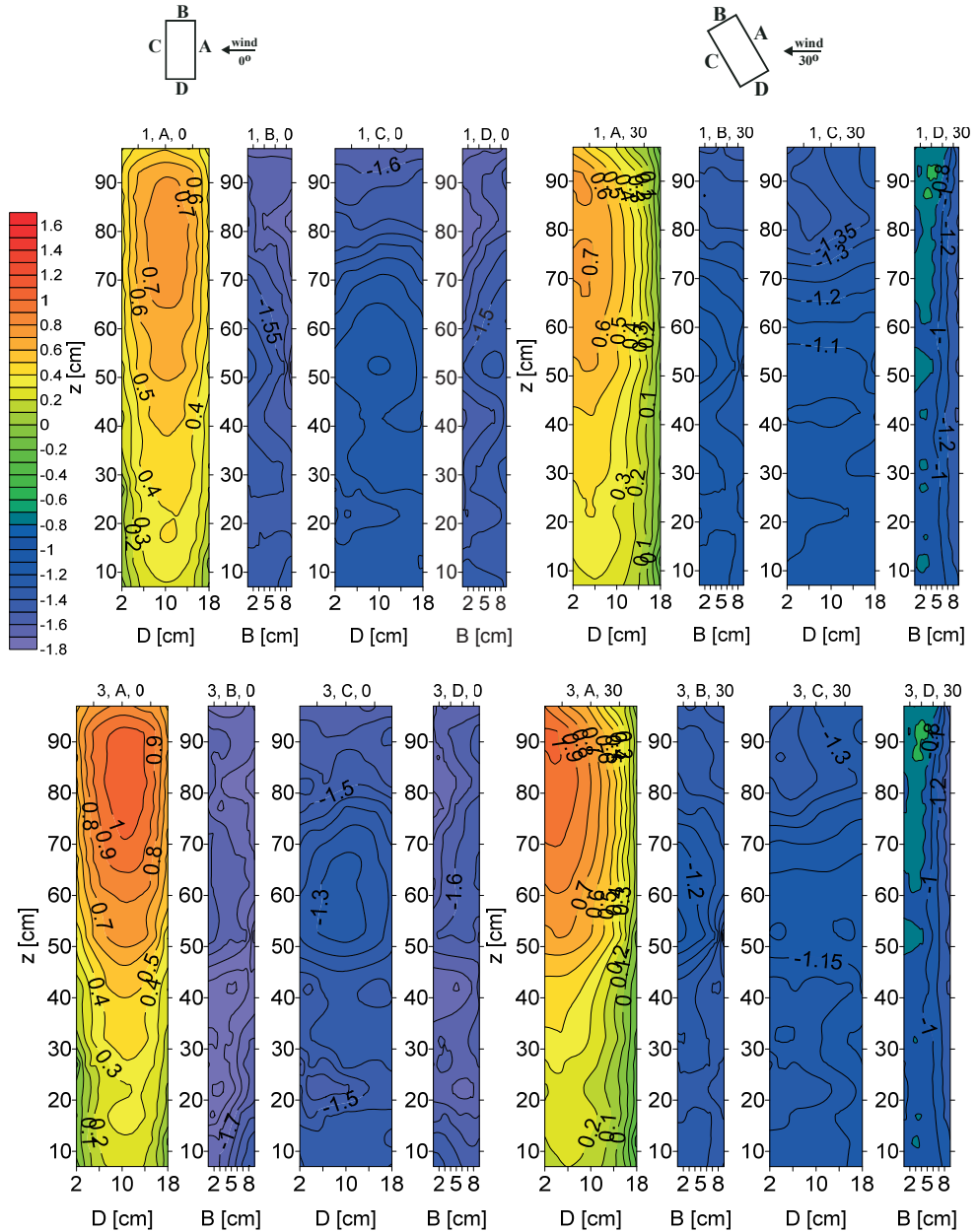
W niniejszej pracy przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów dotyczące:

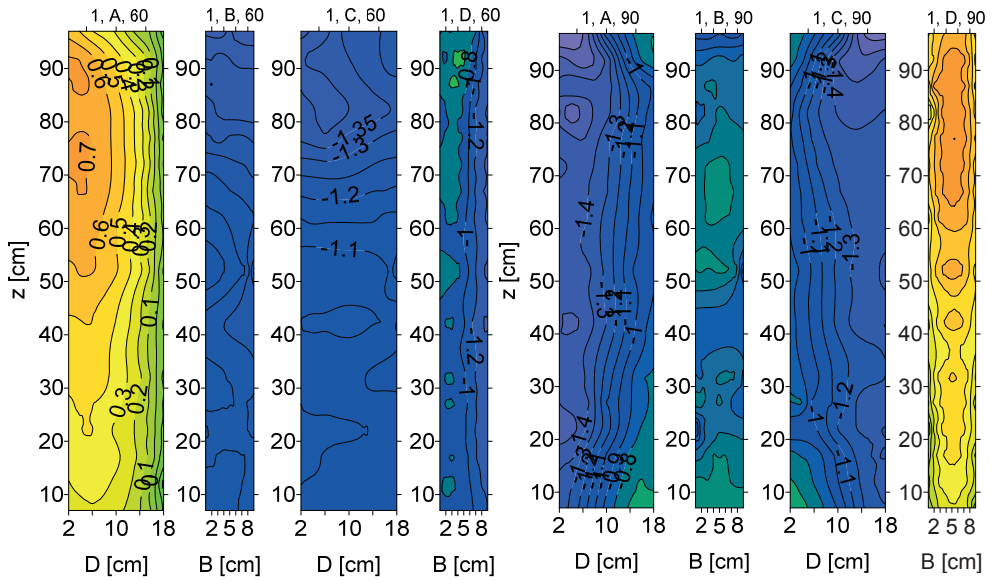
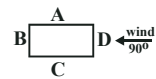
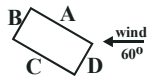
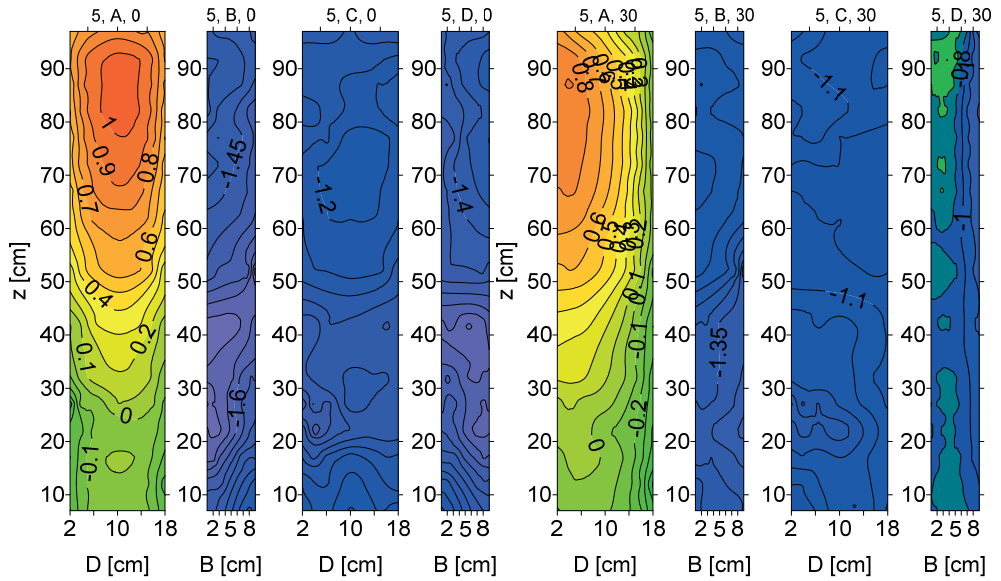
- rozkładów powierzchniowych współczynnika średniego ciśnienia na wszystkich ścianach modelu w funkcji kąta natarcia wiatru – Rys. 2;
- rozkładów obwodowych współczynnika średniego ciśnienia, w funkcji kąta natarcia wiatru, w zależności od wariantu napływu powietrza – Rys. 3;
- rozkładów pionowych współczynnika średniego ciśnienia, w funkcji kąta natarcia wiatru, w zależności od wariantu napływu powietrza – Rys. 4.

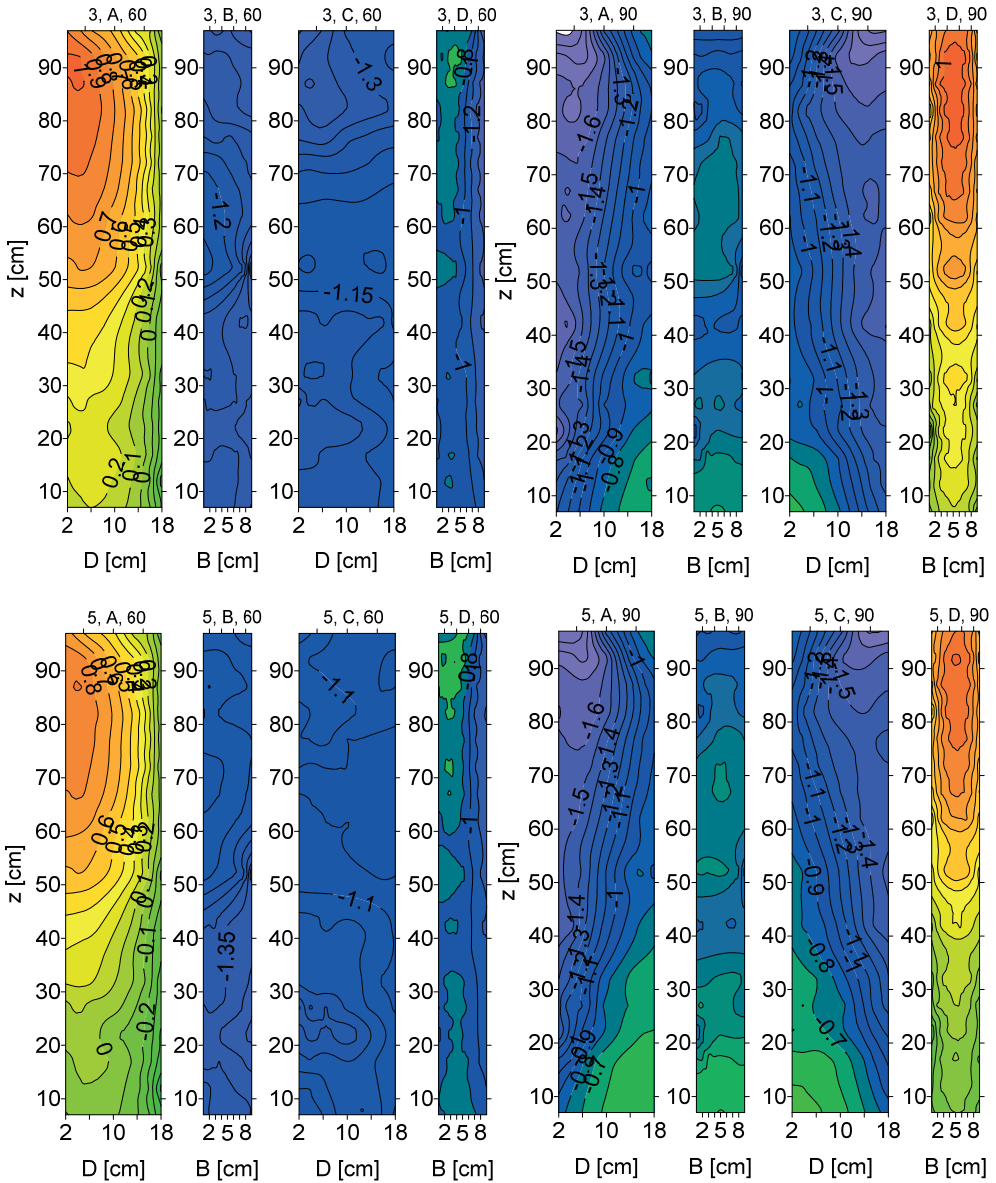
Na rysunkach wprowadzono następujące oznaczenia ścian: w ustawieniu  $0^\circ$  ściana A jest nawietrzną (prostopadła do średniego kierunku napływu wiatru), B, D są ścianami bocznymi, zaś C to ściana zawietrzna. Tak określone oznaczenia zostały wykorzystane do opisu ścian dla innych kątów natarcia wiatru i tak na przykład w przypadku, gdy kąt natarcia wiatru równy jest  $90^\circ$  (krótsza ściana jest prostopadła do napływu), wówczas ściany A i C to ściany boczne, B – zawietrzna, D – nawietrzna.

Na wszystkich wykresach powierzchniowych zastosowano taką samą skalę odniesienia, maksymalne parcie  $C_{p,max} = 1,6$ , natomiast ekstremalne ssanie

$C_{p,min} = -1,8$ . Na rys. 3 i 4, a więc na rozkładach obwodowych i pionowych zastosowano tę samą kolorową skalę wykresów, zgodnie z dołączoną legendą.



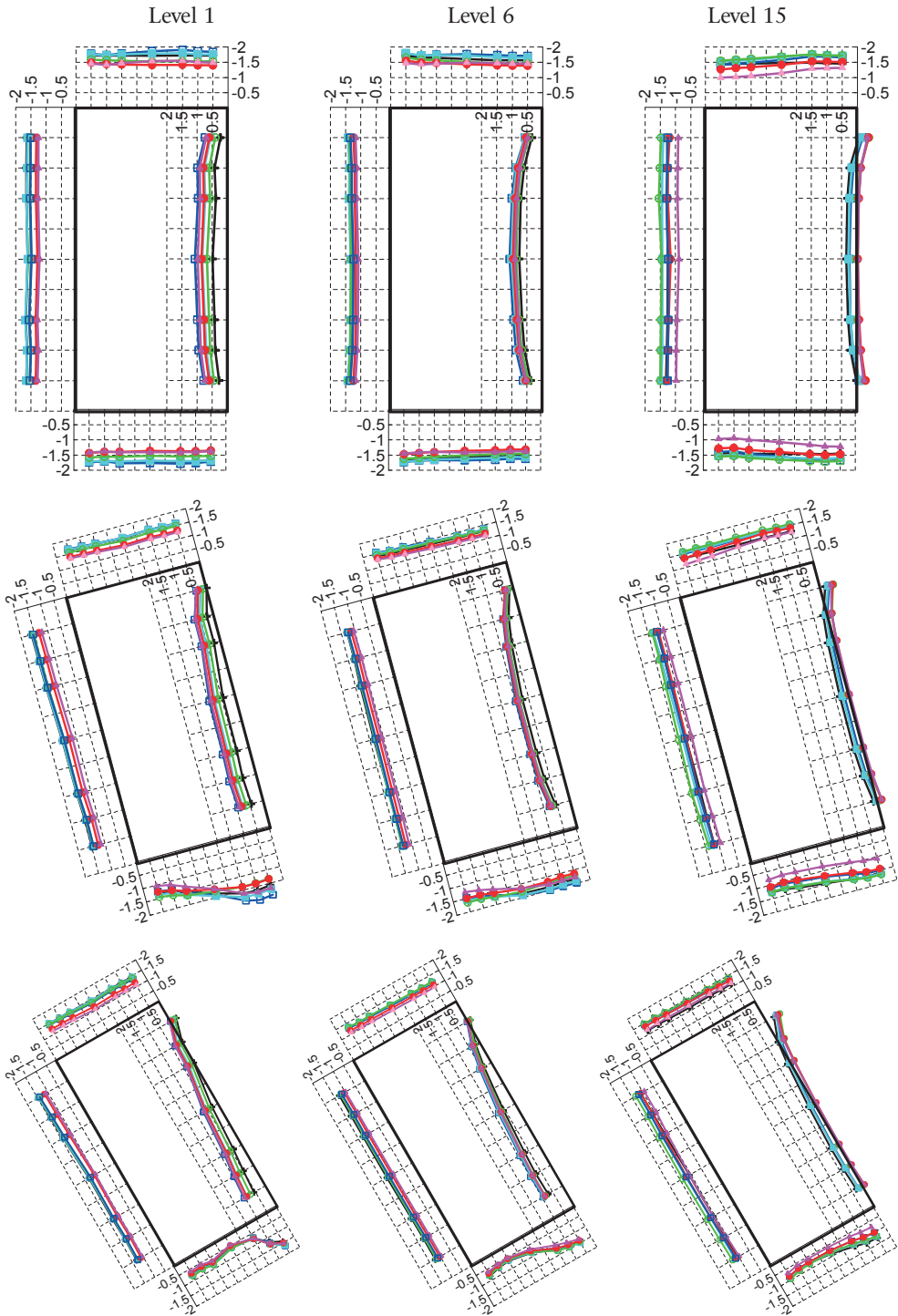


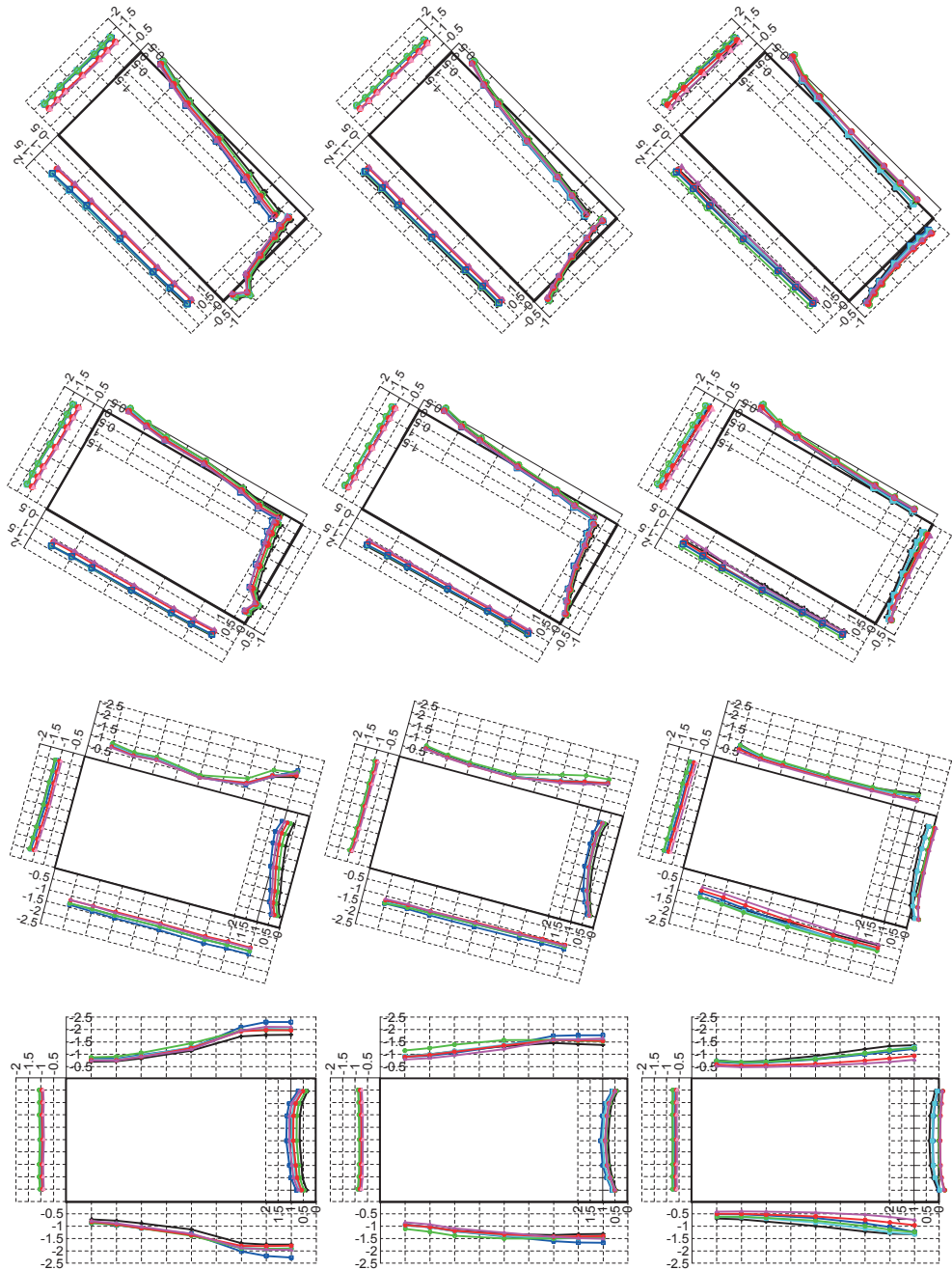


Rys. 2. Rozkłady przestrzenne współczynnika średniego ciśnienia w przypadku profili 1, 3, 5, dla wybranych kątów natarcia wiatru  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ .

Fig. 2. Spatial pressure distributions for wind profiles 1, 3, 5, for angle of wind attack equal to  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ .



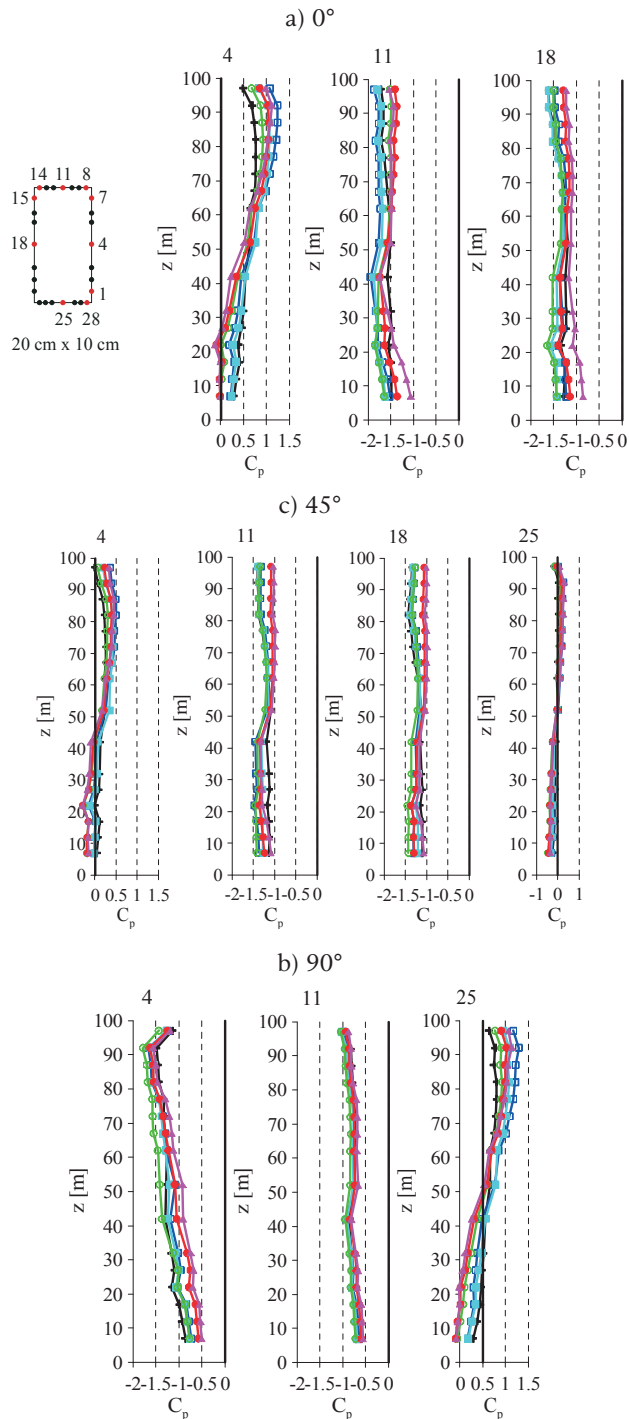




Rys. 3. Rozkład współczynnika średniego ciśnienia na poziomach 1, 6 i 15, w przypadku kąta natarcia wiatru równego  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$ , w różnych przypadkach napływu powietrza.

Fig. 3. The pressure coefficient distributions at levels 1, 6 and 15 for the angle of wind attack equal to:  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$ , for different cases of wind profile.





Rys. 4. Pionowe rozkłady współczynnika średniego ciśnienia w punktach środkowych każdej ze ścian, w przypadku kąta napływu wiatru równego a) 0°, b) 45°, c) 90°.

Fig. 4. Vertical distributions of the mean pressure coefficient in central locations on every wall, for angles of wind incidence equal to a) 0°, b) 90°, c) 45°.

## 4. Analiza wyników

Na podstawie wykresów przedstawionych na Rys. 2-4 można stwierdzić, że zmiany struktury wiatru mają bardzo duży wpływ na rozkłady i wartości współczynnika ciśnienia. Jednak to zmiany kąta natarcia wiatru na model determinują te rozkłady, co też potwierdzone zostało w badaniach. Można zauważyć, że najniekorzystniejszą sytuacją jest ustawienie prostopadłościanu jedną ze ścian prostopadle do kierunku średniej prędkości wiatru (kąty  $0^\circ$  i  $90^\circ$ ). Przy takich ustawieniach otrzymano ekstremalną wartość ssania na ścianach bocznych, szczególnie na wyższych poziomach pomiarowych, gdzie największe wartości bezwzględne uzyskano w przypadku profilu 2. Zmiany wartości współczynnika wzdłuż długości ścian bocznych są zdecydowanie mniejsze w przypadku kąta natarcia wiatru równego  $0^\circ$  w porównaniu do kąta  $90^\circ$ . W przypadku ustawienia bokiem krótszym do napływu ( $90^\circ$ ) zmiany wartości wzdłuż ściany bocznej wynoszą do 200% w obrębie jednego profilu i kilkadziesiąt procent między profilami w tym samym punkcie. Zmiany wzdłuż ściany krótszej ( $0^\circ$ ) są mniejsze, zaś różnice między profilami sięgają w tym przypadku kilkudziesięciu procent.

Znaczną zmianę współczynnika można zauważyć dla kątów  $15^\circ$  i  $30^\circ$ , przy których występuje wzrost wartości na ścianie krótszej przy krawędzi nawietrznej, szczególnie w pobliżu swobodnego końca. Dla kątów pośrednich pomiędzy  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , linie łączące te same wartości współczynników rozkładają się mniej więcej równolegle do krawędzi modelu (Rys. 2).

Analiza zamieszczonych wykresów nie pozwala jednoznacznie określić zależności rozkładu wartości współczynnika  $C_p$  od wykładnika występującego w profilu potęgowym, czy od gęstości widmowej mocy. Można jednak zauważyć, że maksymalne wartości parcia po stronie nawietrznej otrzymano w przypadku profilu 2, co jest szczególnie widoczne powyżej wysokości referencyjnej 70 cm, ponieważ prędkość wiatru jest tam wyższa. Ponadto w przypadku profilu 2 maksimum gęstości widmowej mocy jest jednym z największych na tej wysokości. Podobne charakterystyki struktury wiatru otrzymano w przypadku profilu 6. Maksymalna wartość spektrum jest nawet wyższa niż w przypadku 2, ale maksymalne parcie jest niższe. W przypadku profilu 2 większa wartość ekstremum spektrum jest uzyskiwana przy niższych częstotliwościach, co może tłumaczyć większą wartość współczynnika ciśnienia.

Różnice bezwzględne pomiędzy wartościami  $C_p$  na tym samym poziomie w różnych przypadkach napływu są większe na wyższych poziomach. Porównując rozkłady pionowe  $C_p$  z profilami można zauważyć podobną kolejność ułożenia linii określających poszczególne przypadki (Rys. 4). Ponadto, różnica wartości współczynnika między górnymi i dolnymi poziomami pomiarowymi, w obrębie jednego profilu jest bardzo znaczna. Kolejność wykresów opisujących współczynnik ciśnienia zmienia się również wzdłuż wysokości modelu. Najmniejsze zmiany pionowe zaobserwowano dla profilu 1.

## 5. Wnioski

Parametry określające strukturę wiatru w tunelu aerodynamicznym silnie wpływają na rozkład i wartości współczynnika średniego ciśnienia na powierzchni modelu prostopadłościanu o wymiarach poprzecznych 10 cm x 20 cm. Różnice

między obliczonymi wartościami współczynnika ciśnienia mogą sięgać nawet kilkaset procent w obrębie jednego profilu oraz na tym samym poziomie pomiędzy profilami. Głównymi czynnikami determinującymi wartości  $C_p$  jest pionowy profil średniej prędkości wiatru oraz pionowy profil turbulencji. Wydaje się, że również ważnym czynnikiem wpływającym na ciśnienia jest wartość maksimum gęstości widmowej mocy, a przede wszystkim kształt tej funkcji przy niskich częstotliwościach. To zagadnienie będzie przedmiotem przyszłych badań.

## Literatura

- [1] Wacker J., *Towards reliability-based local design wind pressures for simple rectangular-shaped buildings*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 53 (1994) 157-175.
- [2] Liang S., Liu S., Li Q. S., Zhang L., Gu M., *Mathematical model of acrosswind dynamic loads on rectangular tall buildings*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90 (2002) 1757-1770.
- [3] Liang S., Li Q. S., Liu S., Zhang L., Gu M., *Torsional dynamic wind loads on rectangular tall buildings*, Engineering Structures 26 (2004) 129-137.
- [4] Lin N., Letchford C., Tamura Y., Liang B., Nakamura O., *Characteristics of wind forces acting on tall buildings*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 93 (2005) 217-242.
- [5] Tamura Y., Kikuchi H., Hibi K. *Peak normal stresses and effects of wind direction on wind load combinations for medium-rise buildings*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96 (2008) 1043-1057.
- [6] Cheng C. M., Tsai M. S., *Along wind design wind load for tall buildings (I) Results of wind tunnel tests*, The 5<sup>th</sup> International Advanced School on wind Engineering, The GCOE Program at Tokyo Polytechnic University. Opole, Poland, 2009.
- [7] Zhang J., Gu M., *Distribution of background equivalent static wind load on high-rise buildings*, Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China 3(3) (2009) 241-248.
- [8] Lipecki T., Bęc J., Błazik-Borowa E., *Surface pressures on rectangular cylinders – the dependence on aspect ratio, wind structure and angle of wind attack*, The 7<sup>th</sup> International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7), Shanghai, China; September 2-6, 2012.
- [9] Flaga A., Błazik-Borowa E., Podgórski J., *Aerodynamika smukłych budowli i konstrukcji prętowo-cięgnowych*, Monografia, Politechnika Lubelska, Lublin, 2004, 391.
- [10] Flaga A., Lipecki T. (editors), *Environmental effects on buildings, structures, materials and people*, Lublin University of Technology, 2007, 404.
- [11] Flaga A., *Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania*, Arkady, Warszawa, 2008, 719.
- [12] 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.
- [13] 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 surface pressures of rectangular cylinders of cross-section dimensions 10 cm x 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-borowa@pollub.pl*

**Abstract:** The paper deals with results of measurements which have been carried out in the wind tunnel. Vertical, fixed prism of the cross-section dimensions 10 cm x 20 cm was the object of the experiment. Distributions of mean wind pressure coefficient on the surface of the prism were accepted as results presentation. The following parameters of the wind structure were analysed: vertical mean wind speed profile, turbulence intensity profile, power spectral density functions with respect to their influence on pressure coefficient values. Changes of the angle of wind attack were taken into consideration.

**Keywords:** wind tunnel, pressure coefficient, rectangular prism, wind structure.