

## POMIARY PARAMETRÓW PRZEPLYWU WOKÓŁ UKŁADU DWÓCH PROSTOKĄTÓW

Ewa BŁAZIK-BOROWA<sup>\*</sup>, Jarosław BĘC<sup>\*\*</sup>, Tomasz LIPECKI<sup>\*\*\*</sup>,  
Tomasz NOWICKI<sup>\*\*\*\*</sup>, Jacek SZULEJ<sup>\*\*\*\*\*</sup>

Politechnika Lubelska, Katedra Mechaniki Budowli  
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin,

<sup>\*</sup>e-mail: e.blazik@pollub.pl, <sup>\*\*</sup>e-mail: j.bec@pollub.pl, <sup>\*\*\*</sup>e-mail: t.lipecki@pollub.pl,  
<sup>\*\*\*\*</sup>e-mail: t.nowicki@pollub.pl, <sup>\*\*\*\*\*</sup>e-mail: j.szulej@pollub.pl

**Streszczenie:** Praca dotyczy badań opływu wokół układu dwóch prostokątów, ustawionych w tunelu aerodynamicznym w taki sposób, aby przepływ w środku ich przekroju mógł być traktowany jako płaski. Wynikiem pomiarów są rozkłady ciśnienia na modelach oraz pola prędkości średnich i ich fluktuacji.

**Słowa kluczowe:** tunel aerodynamiczny, przepływ płaski, ciśnienie, pole prędkości.

### 1. WSTĘP

Obecnie wyznaczanie parametrów przepływu wokół budynków odbywa się głównie w tunelach aerodynamicznych. Jednak coraz częściej badania w tunelu są zastępowane obliczeniami komputerowymi, w których wykorzystuje się metody komputerowe mechaniki płynów (CFD). Opis takich badań można znaleźć w wielu pracach, np. [1], [2] i [3]. W większości przytoczonych prac, ze względu na znaczne uproszczenia modeli turbulencji, analizy numeryczne są weryfikowane wynikami badań w tunelach lub na podobnych obiektach w skali naturalnej. Niestety często w literaturze wynikami badań w tunelach są tylko rozkłady ciśnień (por. [4], [5], [6]), a do weryfikacji obliczeń potrzebne są także pola prędkości. Jeżeli podczas pomiarów mierzone są także fluktuacje składowych prędkości, to także możliwa jest weryfikacja innych parametrów przepływu, np. energii kinetycznej turbulencji.

Celem tej pracy jest przedstawienie takich wyników badań pomiarów parametrów przepływu wokół układu modeli, które są niezbędne do weryfikacji obliczeń komputerowych różnych układów budynków.

Tematem pracy są pomiary parametrów przepływu wokół układu dwóch prostokątów, z pośród których sto-

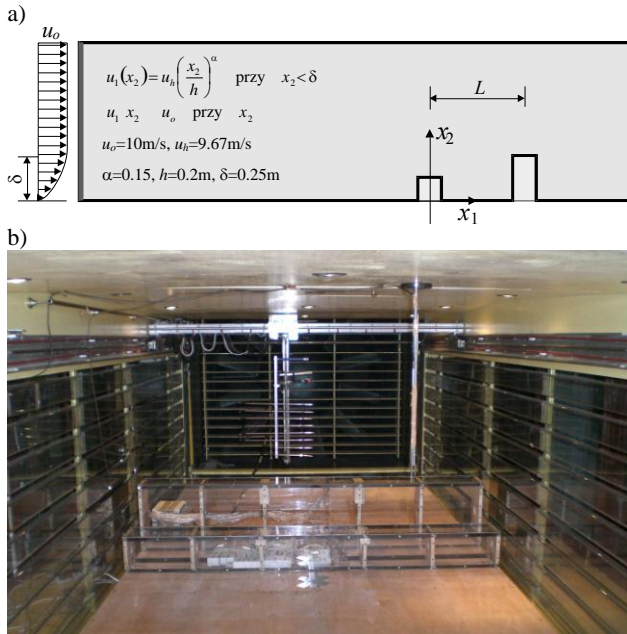
sunek boków pierwszego wynosi 1:1 (kwadrat), a drugiego 1:2. Podczas badań zmierzono rozkład średniego ciśnienia i jego odchylenie standardowe na powierzchni modeli, pole średniej prędkości oraz jego fluktuacje w przestrzeni pomiarowej tunelu. Badania zostały przeprowadzone w tunelu aerodynamicznym Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej.

### 2. OPIS BADAŃ

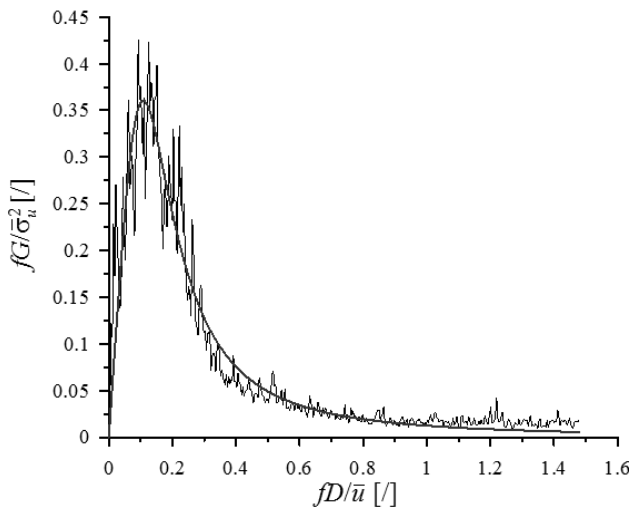
Pomiary wykonano w odniesieniu do pojedynczych modeli oraz sześciu układów modeli ustawionych przy podłożu (Tab.1). Na rys.1 pokazano przykładowy układ z kwadratem jako modelem nawietrznym oraz podano informacje o napływie w odległości 0.8m przed modelem nawietrznym. Na rys.2 przedstawiono zredukowaną gęstość widmową mocy na wysokości 0.5m.

Tabela 1. Opis ustawień modeli w tunelu aerodynamicznym.  
Table 1. The description of sets of models in the wind tunnel.

Nazwa układu	L [m]	Opis ustawienia
<i>b</i>		pojedynczy kwadrat
<i>c</i>		pojedynczy prostokąt
<i>d</i>	0.4	nawietrzny model – kwadrat
<i>e</i>	0.6	nawietrzny model – kwadrat
<i>f</i>	0.8	nawietrzny model – kwadrat
<i>g</i>	0.4	nawietrzny model – prostokąt
<i>h</i>	0.6	nawietrzny model – prostokąt
<i>i</i>	0.8	nawietrzny model – prostokąt



Rys. 1. Układ modeli: a) szkic modeli i dane o profilu prędkości, b) ustawienie modeli w tunelu aerodynamicznym  
 Fig. 1. The arrangements of models: a) the set of models and the information about the velocity profile, b) the set of models in the wind tunnel.



Rys. 2. Zredukowana gęstość widmowa mocy napływu na wysokości 0.5m i w odległości 0.8m przed modelem nawietrznym  
 Fig. 2. The reduced power spectral density for the inflow at the height 0.5 m and at the distance from the wall equals 0.8m.

Pomiary ciśnienia zostały wykonane za pomocą skanera ciśnień, opartego na dwukierunkowych piezorezystywnych czujnikach ciśnienia MPX2010. Pomiary pola prędkości wykonywano za pomocą termooanemometrów: dwóch jednoskładnikowych i czterech dwuskładnikowych. Termooanemometry jednoskładnikowe były

ustawione przed modelami, natomiast dwuwłóknowe służyły do pomiaru pola prędkości wokół modeli. Badania pola prędkości zostały zrealizowane w dziewięciu przekrojach pionowych. Włókna termooanemometrów dwuwłóknowych były ustawione pod kątem ok.  $\pi/4$  względem średniego napływu. Wyniki, uzyskane za pomocą termooanemometrów, były podczas całych badań kontrolowane przez pomiary skanerem ciśnień. Badania były wykonane z częstotliwością próbkowania 500Hz.

### 3. WYNIKI POMIARÓW

#### 3.1. Analiza błędów

W pracy [7] przedstawiono pełną analizę błędów pomiarów skanerem ciśnienia oraz termooanemometrami. Te urządzenia różnią się nie tylko metodą działania, ale również złożonością procedury badania i analizy wyników. Wyniki ze skanera ciśnień są obciążone jedynie błędem pomiaru urządzenia i tła, a przy prędkości napływu 10m/s błąd ten wynosi ok. 0.1Pa. Natomiast za pomocą termooanemometrów uzyskuje się składowe prędkości względem kierunków prostopadłych do włókien, które są obciążone błędami związanymi z dokładnością urządzenia oraz błędem wynikającym z przepływu wzdłuż włókien. Błąd doświadczenia jest powiększany przez błąd pomiaru kąta nachylenia włókien i transformację składowych prędkości z układu współrzędnych włókien do układu z osią  $x$  wzdłuż średniego kierunku napływu. Z analizy błędów wynika, że maksymalne błędy systematyczne wynoszą:

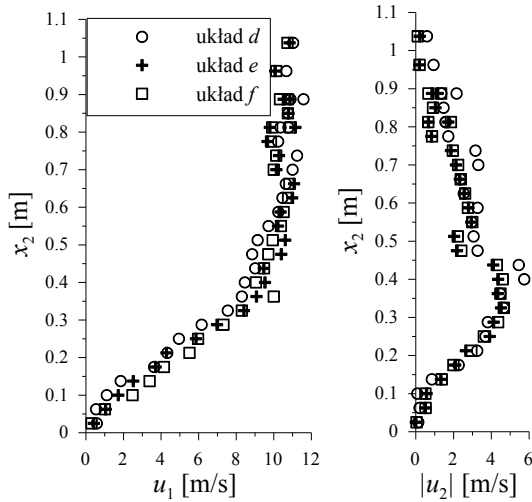
- w odniesieniu do składowej  $u_1$  -  $du_1/u = 0.166$ ,
- w odniesieniu do składowej  $u_2$  -  $du_2/u = 0.105$ .

Oba urządzenia, używane podczas badań, mogą zostać wykorzystane do pomiaru wypadkowych prędkości, natomiast tylko termooanemometry mierzą składowe prędkości. Dlatego mimo, że wyniki, otrzymane za pomocą termooanemometrów, są obciążone większym błędem, to nie można ich zastąpić pomiarami skanerem ciśnień.

#### 3.2. Prezentacja wyników

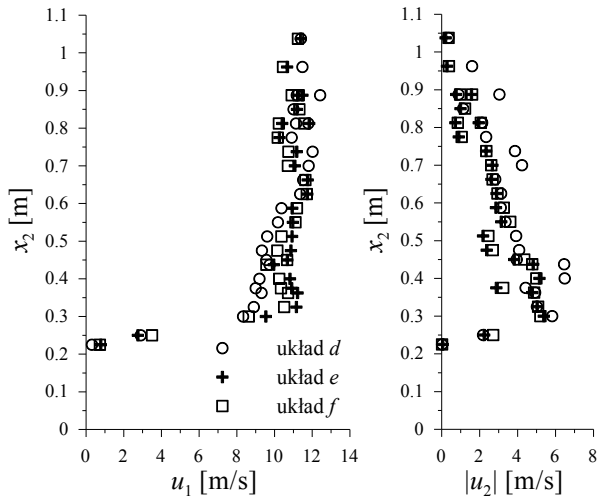
Efektem doświadczeń były przebiegi czasowe zmian ciśnienia i prędkości. W przypadku ciśnienia wyznaczono wartości średnie ciśnienia oraz ich odchylenia standardowe bezpośrednio na podstawie pomiarów. Natomiast analiza statystyczna wyników pomiarów termooanemometrami dwuwłóknowymi musiała być poprzedzona usunięciem błędów, związanych z przepływem wzdłuż włókien, oraz transformacją składowych prędkości z układu lokalnego włókien do układu globalnego  $x_1, x_2$ . Analiza ta została przeprowadzona zgodnie z zaleceniami, zamieszczonymi w m.in. pracach [8], [9] i [10]. Na podstawie zmian składowych prędkości w czasie wyznaczono ich wartości średnie  $u_1$  (składowa wzdłuż osi  $x_1$ ) i  $u_2$  (składowa wzdłuż

osi  $x_2$ ) oraz odchylenia standardowe składowych prędkości  $\sigma_{u_1}$  i  $\sigma_{u_2}$ . W pracy [7] zaprezentowano rozkłady ciśnienia na modelach oraz pola prędkości wypadkowej, w pracy [11] przedstawiono wyniki pomiarów prędkości i ich fluktuacji w odniesieniu do pojedynczych modeli, natomiast na rysunkach 3÷16 pokazane są wykresy składowych prędkości  $u_1$  i  $u_2$  wokół zestawu dwóch modeli, a na rysunkach 17÷20 odchylenia standardowe tych składowych.



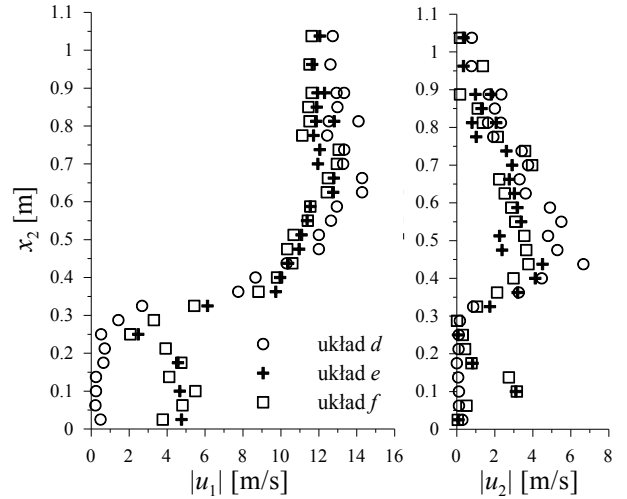
Rys. 3. Wykresy składowych prędkości przed kwadratem nawietrznym  $x_1=-0.2\text{m}$ .

Fig. 3. The graphs of velocity components in front of the upstream square at  $x_1=-0.2\text{m}$ .



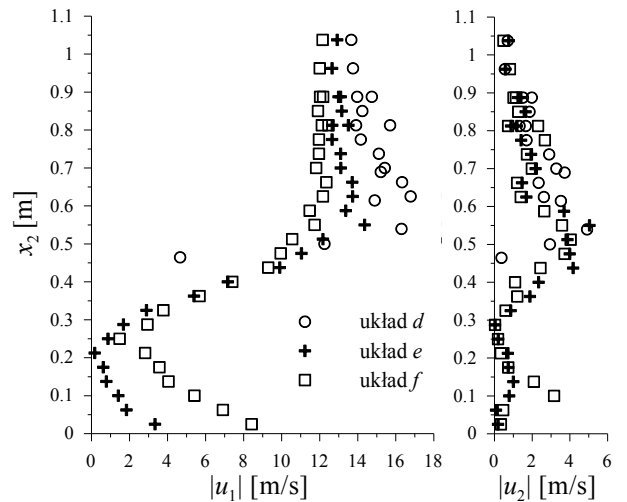
Rys. 4. Wykresy składowych prędkości nad kwadratem nawietrznym  $x_1=0.0\text{m}$ .

Fig. 4. The graphs of velocity components over the upstream square at  $x_1=0.0\text{m}$ .



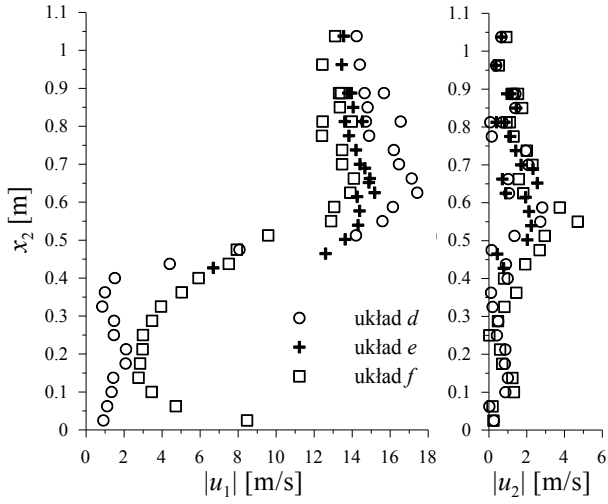
Rys. 5. Wykresy składowych prędkości za kwadratem nawietrznym  $x_1=0.2\text{m}$ .

Fig. 5. The graphs of velocity components behind the upstream square at  $x_1=0.2\text{m}$ .



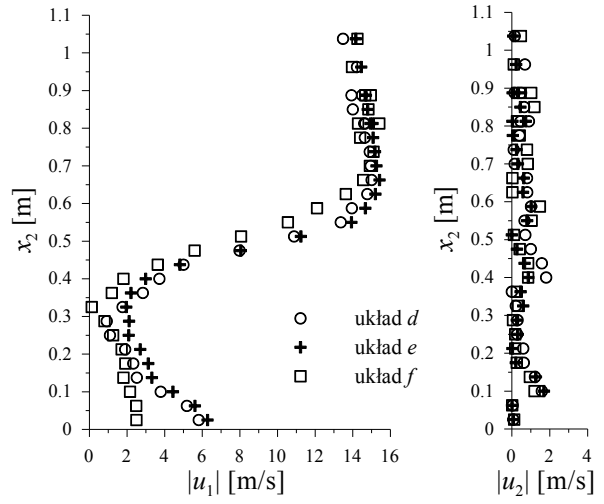
Rys. 6. Wykresy składowych prędkości za kwadratem nawietrznym  $x_1=0.4\text{m}$ .

Fig. 6. The graphs of velocity components behind the upstream square at  $x_1=0.4\text{m}$ .



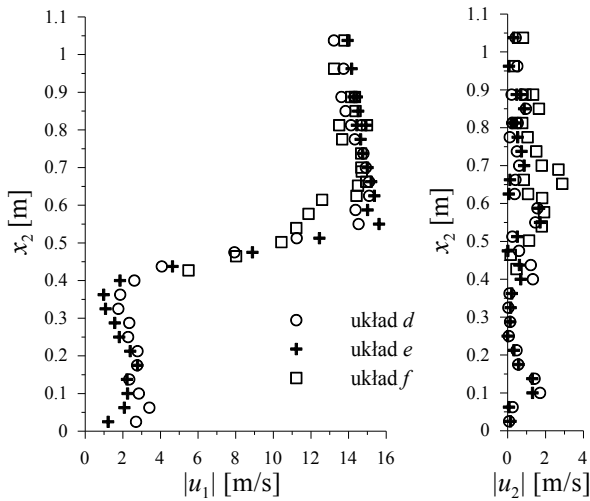
Rys. 7. Wykresy składowych prędkości dla układu z kwadratem jako modelem nawietrznym  $x_1=0.6\text{m}$ .

Fig. 7. The graphs of velocity components for the set with the square as the upstream model at  $x_1=0.6\text{m}$ .



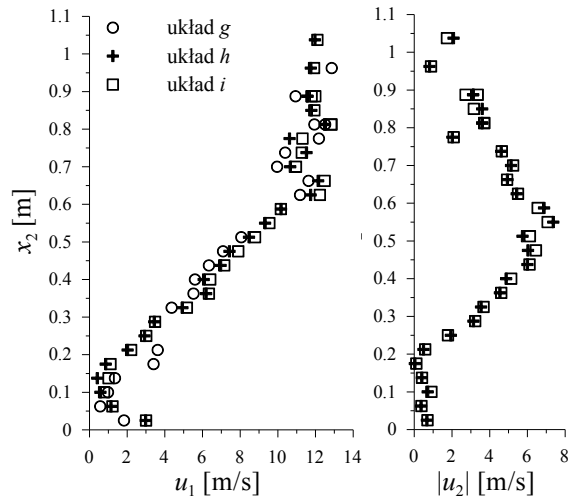
Rys. 9. Wykresy składowych prędkości dla układu z kwadratem jako modelem nawietrznym  $x_1=1.0\text{m}$ .

Fig. 9. The graphs of velocity components for the set with the square as the upstream model at  $x_1=1.0\text{m}$ .



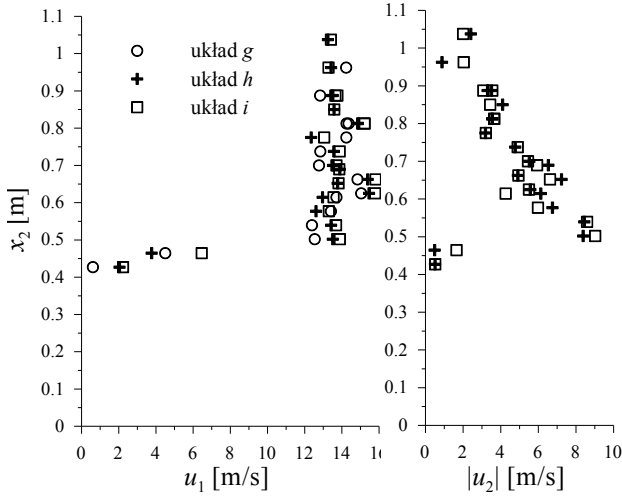
Rys. 8. Wykresy składowych prędkości dla układu z kwadratem jako modelem nawietrznym  $x_1=0.8\text{m}$ .

Fig. 8. The graphs of velocity components for the set with the square as the upstream model at  $x_1=0.8\text{m}$ .



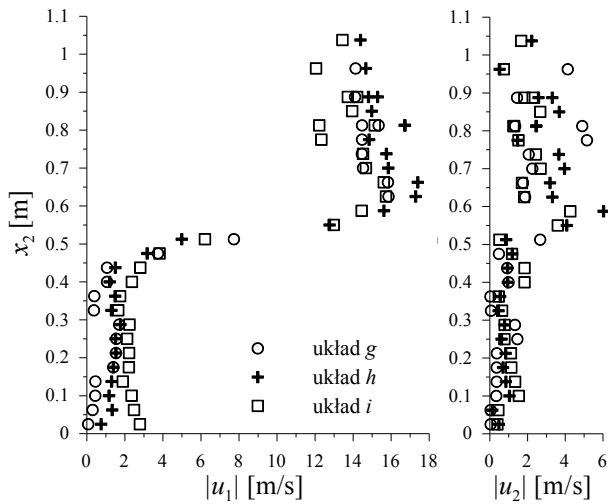
Rys. 10. Wykresy składowych prędkości przed prostokątem jako modelem nawietrznym  $x_1=-0.2\text{m}$ .

Fig. 10. The graphs of velocity components in front of the rectangular as the upstream model at  $x_1=-0.2\text{m}$ .



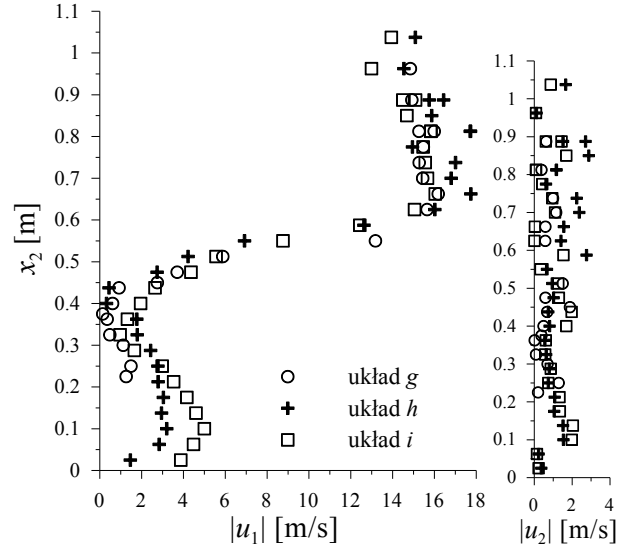
Rys. 11. Wykresy składowych prędkości nad prostokątem jako modelem nawietrznym  $x_1=0.0\text{m}$ .

Fig.11. The graphs of velocity components over the rectangular as the upstream model at  $x_1=0.0\text{m}$ .



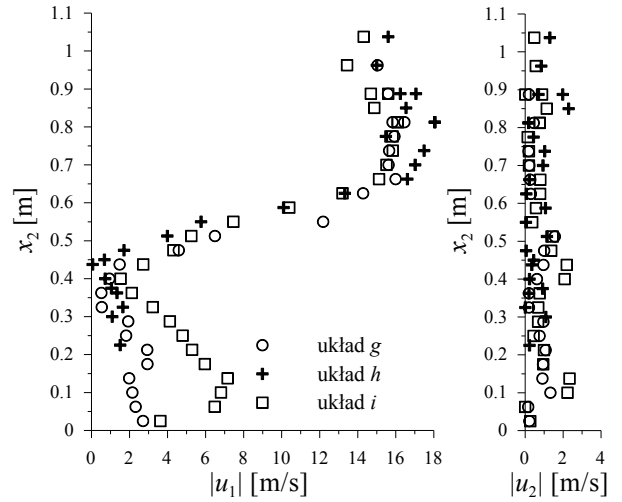
Rys. 12. Wykresy składowych prędkości dla układu z prostokątem jako modelem nawietrznym  $x_1=0.2\text{m}$ .

Fig. 12. The graphs of velocity components for the set with the rectangular as the upstream model at  $x_1=0.2\text{m}$ .



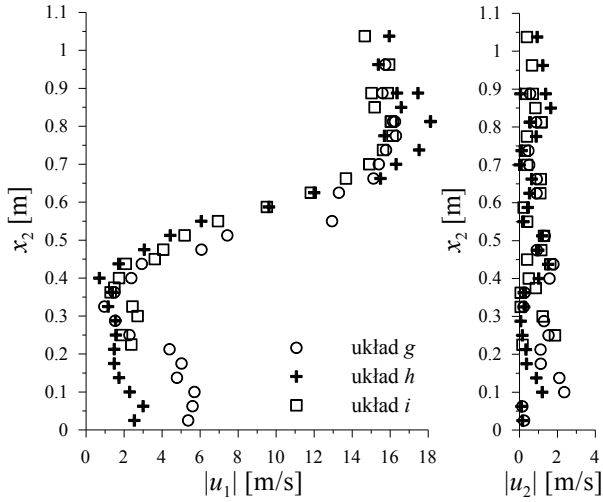
Rys. 13. Wykresy składowych prędkości dla układu z prostokątem jako modelem nawietrznym  $x_1=0.4\text{m}$ .

Fig. 13. The graphs of velocity components for the set with the rectangular as the upstream model at  $x_1=0.4\text{m}$ .



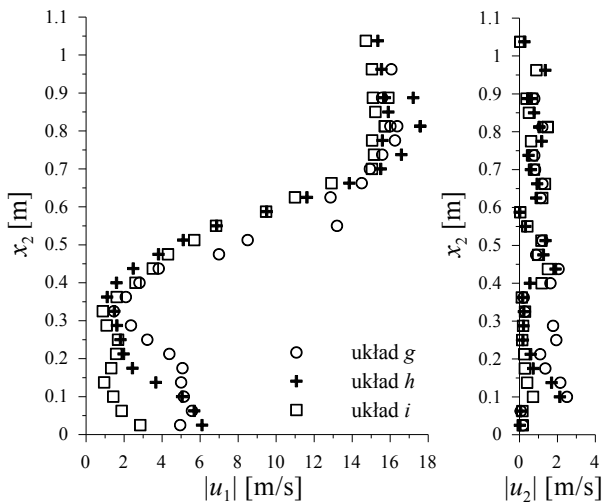
Rys. 14. Wykresy składowych prędkości dla układu z prostokątem jako modelem nawietrznym  $x_1=0.6\text{m}$ .

Fig. 14. The graphs of velocity components for the set with the rectangular as the upstream model at  $x_1=0.6\text{m}$ .



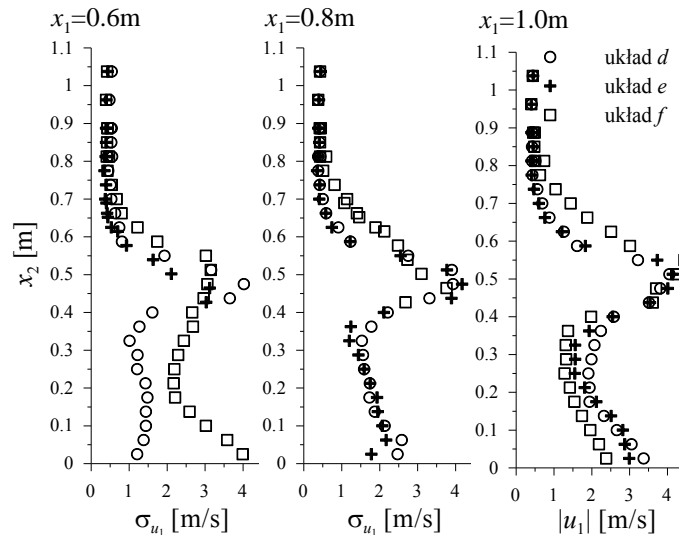
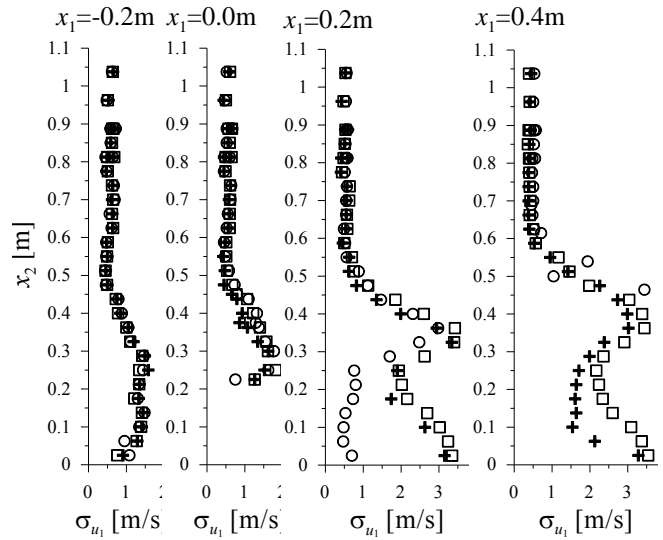
Rys. 15. Wykresy składowych prędkości dla układu z prostokątem jako modelem nawietrznym  $x_1=0.8m$

Fig. 15. The graphs of velocity components for the set with the rectangular as the upstream model at  $x_1=0.8m$ .



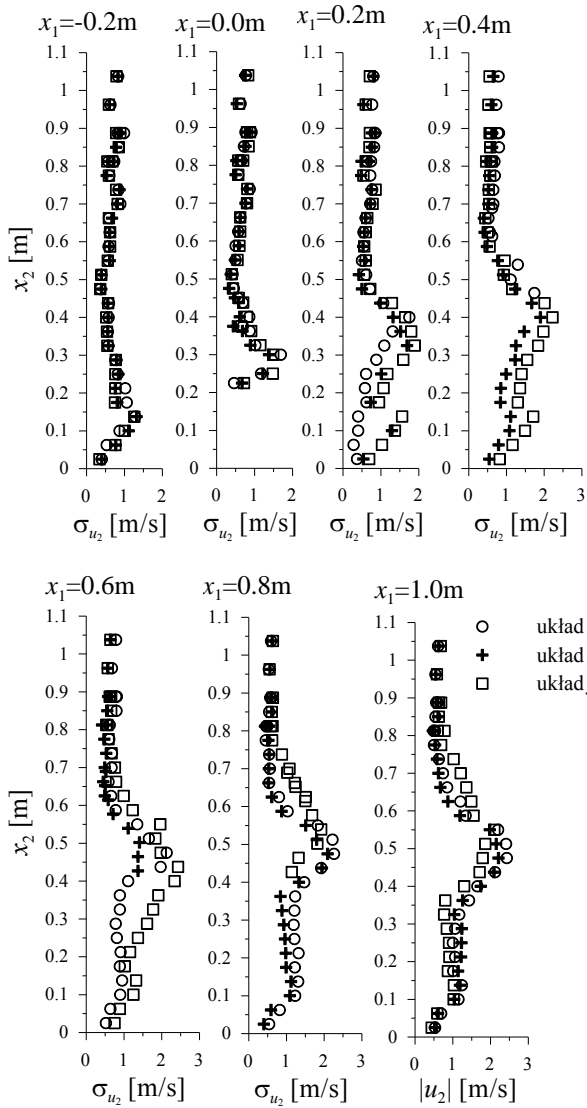
Rys. 16. Wykresy składowych prędkości dla układu z prostokątem jako modelem nawietrznym  $x_1=1.0m$

Fig. 16. The graphs of velocity components for the set with the rectangular as the upstream model at  $x_1=1.0m$ .



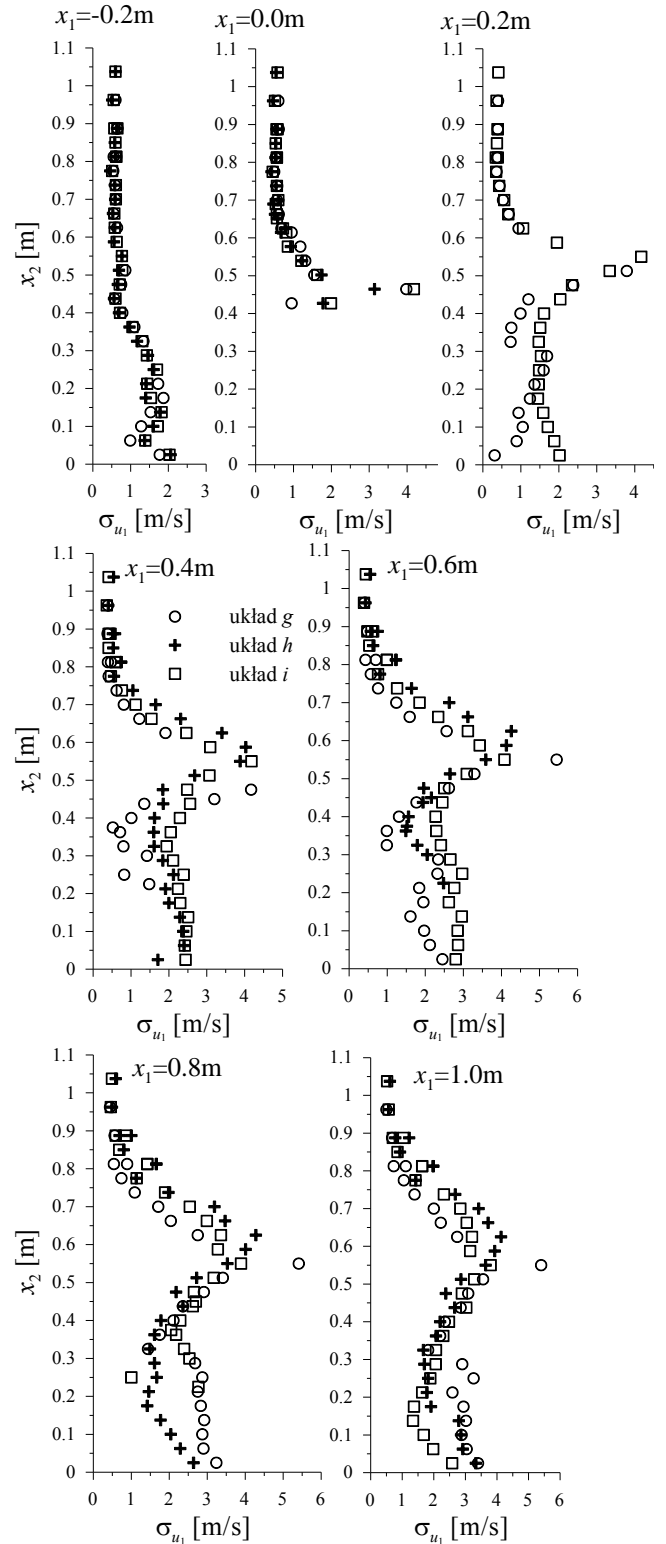
Rys. 17. Wykresy odchylenia standardowego składowej prędkości  $\sigma_{u_1}$  w układach z kwadratem jako modelem nawietrznym.

Fig. 17. The graphs of standard deviation of the velocity  $\sigma_{u_1}$  for the set with the square as the upstream model.



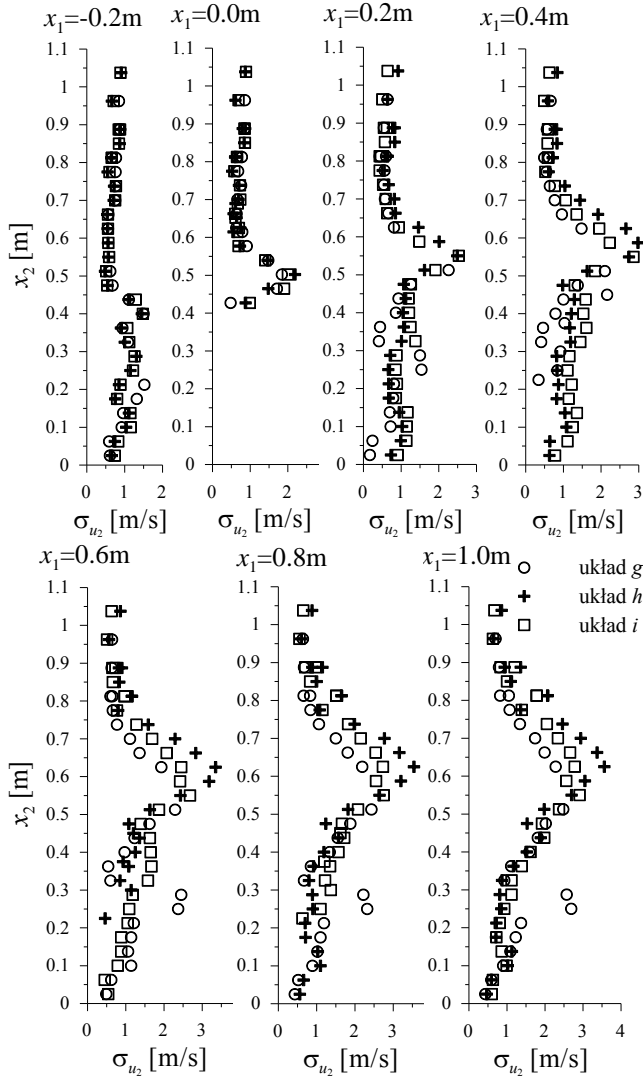
Rys. 18. Wykresy odchylenia standardowego składowej prędkości  $\sigma_{u_2}$  w układach z kwadratem jako modelem nawietrznym.

Fig. 18. The graphs of standard deviation of the velocity  $\sigma_{u_2}$  for the set with the square as the upstream model.



Rys. 19. Wykresy odchylenia standardowego składowej prędkości  $\sigma_{u_1}$  w układach z prostokątem jako modelem nawietrznym.

Fig. 19. The graphs of standard deviation of the velocity  $\sigma_{u_1}$  for the set with the rectangular as the upstream model.



Rys. 20. Wykresy odchylenia standardowego składowej prędkości  $\sigma_{u_2}$  w układach z prostokątem jako modelem nawietrznym.

Fig. 20. The graphs of standard deviation of the velocity  $\sigma_{u_2}$  for the set with the rectangular as the upstream model.

#### 4. WNIOSKI

Ustawienia prostopadłościaków, będących przedmiotem badań, mogą modelować wiele rzeczywistych ustawień budynków. W związku z pomiarem rozkładów ciśnienia na powierzchni obiektów, wyniki mogą zostać wykorzystane bezpośrednio do wyznaczenia obciążenia wiatrem budynków. Natomiast dzięki pełnemu zakresowi pomiarów, ich wyniki, przedstawione na rysunkach 3÷20 oraz w pracach [7] i [11], mogą zostać wykorzystane do weryfikacji większości obliczeń komputerowych oraz do kalibracji modeli turbulencji.

#### THE MEASUREMENT OF PROPERTIES FOR FLOW AROUND RECTANGULARS

**Summary:** The paper is devoted the measurement of flow properties in the wind tunnel. The research deals with the flow around the set of two rectangular cylinders. The flow at middle of cylinders is treated as two-dimensional one. The measurement results are pressure distributions and velocity fields around models.

#### Literatura

- [1] Noda M., Utsunomiya H., Nagao F. i Takenaka K. *Effects of the wind velocity profile on the aerostatic forces*, Proc. of the 9ICWE'95, Vol. 1, Indie, 249-260, 1995.
- [2] Hoxey R.P., Robertson A.P., Richardson G.M. i Short J.L. *Correction of wind-tunnel pressure coefficients for Reynolds number effect*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71, 547-555, 1997.
- [2] Richardson G.M., Hoxey R.P., Robertson A.P. i Short J.L. *The Silsoe structures building: comparisons of pressure measured at full scale and in two wind tunnels*, J. of Wind Eng. and Ind. Aerodynamics, 72, s. 187-197, 1997.
- [4] Błazik-Borowa E. *Problemy związane ze stosowaniem modelu turbulencji k-ε do wyznaczania parametrów przepływu*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2008.
- [5] Evans R.L. *Free stream turbulence effects on the turbulent boundary layer*, Report Nr 1282 Procurement Executive, Ministry of Defence, 1974.
- [6] Shabbir A., Beuther P.D. i George W.K. *X-wire response in turbulent flows of high-intensity turbulence and low mean velocity*, Experimental Thermal and Fluid Science, 12, 52-56, 1996.
- [7] Hinze J.O. *Turbulence*, McGraw-Hill, Nowy York, 1975.
- [8] Błazik-Borowa E., Bęc J., Nowicki T., Lipecki T. i Szulej J. *Pomiary parametrów przepływów dwuwymiarowych wokół modeli o przekrojach czworokątnych ustawionych na podłożu*, Budownictwo i Architektura, 3, 33-51, 2008.
- [9] Selvam R.P. *Computation of flow around Texas Tech building using k-ε and Kato-Launder k-ε turbulence model*, Engineering Structures, 18 (11), 856-860, 1996.
- [10] Hanna S.R., Tehraniana S., Carissimoa B., Macdonald R.W., Lohner R. *Comparisons of model simulations with observations of mean flow and turbulence within simple obstacle arrays*, Atmospheric Environment, 36, 5067-5079, 2002.
- [11] Tucker P.G., Davidson L. *Zonal k-l based large eddy simulations*, Computers & Fluids, 33, 267-287, 2004.