

BADANIA STRUKTURY PRZEPLYWU W TUNELU AERODYNAMICZNYM LABORATORIUM INŻYNIERII WIATROWEJ POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Jarosław BĘC^{*}, Tomasz LIPECKI^{**}, Ewa BŁAZIK-BOROWA^{***}, Jacek SZULEJ^{****}

** 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: t.lipecki@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 badania struktury wiatru w tunelu aerodynamicznym, które w pierwszym etapie polegały na pomiarze prędkości przepływu termooanemometrami dwuwłóknowymi przy różnym układzie elementów turbulizujących, a w drugim - na analizie statystycznej sygnałów pomiarowych. Na tej podstawie otrzymano gęstości widmowe mocy w odniesieniu do 45 ustawień elementów turbulizujących umieszczonych na wlocie tunelu i na powierzchni jego podłogi, a następnie wybrano 6 ustawień, które można było opisać, za pomocą funkcji najbardziej zbliżonych do widma mocy rzeczywistego wiatru.

Profil wiatru, gęstość widmowa mocy, termooanemometry dwuwłókowe, analiza statystyczna..

1. WSTĘP

Pomiary w tunelu aerodynamicznym są podstawową metodą badań obciążenia wiatrem. Ponieważ struktura wiatru ma znaczny wpływ na rozkład ciśnienia na budowli (por.[9]) i pole prędkości wokół niej, to wykonując badania należy określić, jaką strukturę przepływu wytwarzają elementy turbulizujące w tunelu, a zwłaszcza jaki jest ich wpływ na takie parametry struktury przepływu jak profil pionowy prędkości przepływu, profil intensywności turbulencji i gęstość widmową mocy. Wymienione charakterystyki wpływają zarówno na rozkład ciśnienia na modelach sztywnych, jak i na odpowiedź modeli aeroelastycznych. Ponadto, aby wyniki badań mogły być przeniesione na obiekty rzeczywiste, musi być zachowana odpowiednia

skala geometrycznej modeli oraz skali w zakresie częstości, wynikająca z zależności charakterystyk opływu wokół modeli i wiatru rzeczywistego. W pracy przedstawiono metodę badania struktury wiatru oraz jej wyniki dla tunelu aerodynamicznego Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej.

2. OPIS POMIARÓW PRĘDKOŚCI PRZEPLYWU

2.1. Opis tunelu aerodynamicznego

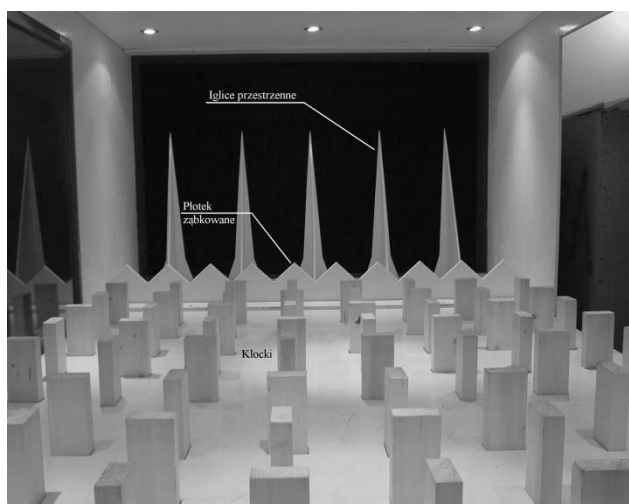
Tunel, w którym wykonywano pomiary jest tunelem o obiegu mieszanym: zamkniętym, gdy powietrze wylatujące z rury tunelu przez wylot powraca do tunelu kanałem powrotnym nad rurą tunelu lub otwartym, gdy powietrze wlatujące do wlotu czerpane jest z zewnątrz budynku i odprowadzane także na zewnątrz. Badania, których wyniki są prezentowane poniżej, zostały wykonane przy obiegu zamkniętym. Podstawowe wymiary geometryczne przestrzeni pomiarowej to: szerokość – 2.20 m, wysokość – od 1.40 m na początku do 1.60 m na końcu przestrzeni pomiarowej i długość – 10 m. Formowanie struktury przepływu odbywa się w pierwszej części przestrzeni pomiarowej na długości ponad 6 m, przy pomocy odpowiednich siatek turbulizacyjnych, barier, iglic i klocków o odpowiedniej geometrii i rozstawie oraz regulowanej mechanicznie wysokości. Maksymalna średnia prędkość przepływu w przestrzeni pomiarowej wynosi 40 m/s. Na rys.1 pokazano tunel z elementami, kształtującymi strukturę przepływu. Dokładniej-

szy opis budowy tunelu można znaleźć w takich pracach jak [2, 3].

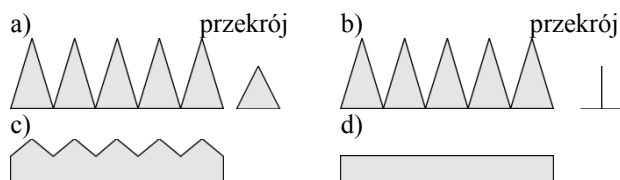
Badania struktury wiatru polegały na pomiarze prędkości przepływu termooanemometrami dwuwłóknowymi w 28 punktach przekroju poprzecznego tunelu przy 45 różnych ustawieniach elementów turbulizujących. Przepływ w tunelu kształtowały:

- iglice o zmiennej wysokości: 80, 100, 120 cm i o przekroju przestrzennym, ustawiane na wlocie (rys. 1 i rys. 2a),
- iglice o zmiennej wysokości: 80, 100, 120 cm i o przekroju płaskim, ustawiane na wlocie (rys. 2b),
- barierki ząbkowane o zmiennej wysokości: 20, 30, 40 cm ustawiane na wlocie (rys. 1 i rys. 2c),
- barierki proste o zmiennej wysokości: 20, 30, 40 cm ustawiane na wlocie (rys. 2d),
- klocki o zmiennej wysokości 5, 10, 20 cm, wychodzące z podłogi w przestrzeni pomiędzy wlotem i przestrzenią pomiarową (rys. 1).

Podczas pomiarów średnia prędkość napływu oscylowała wokół 10 m/s.



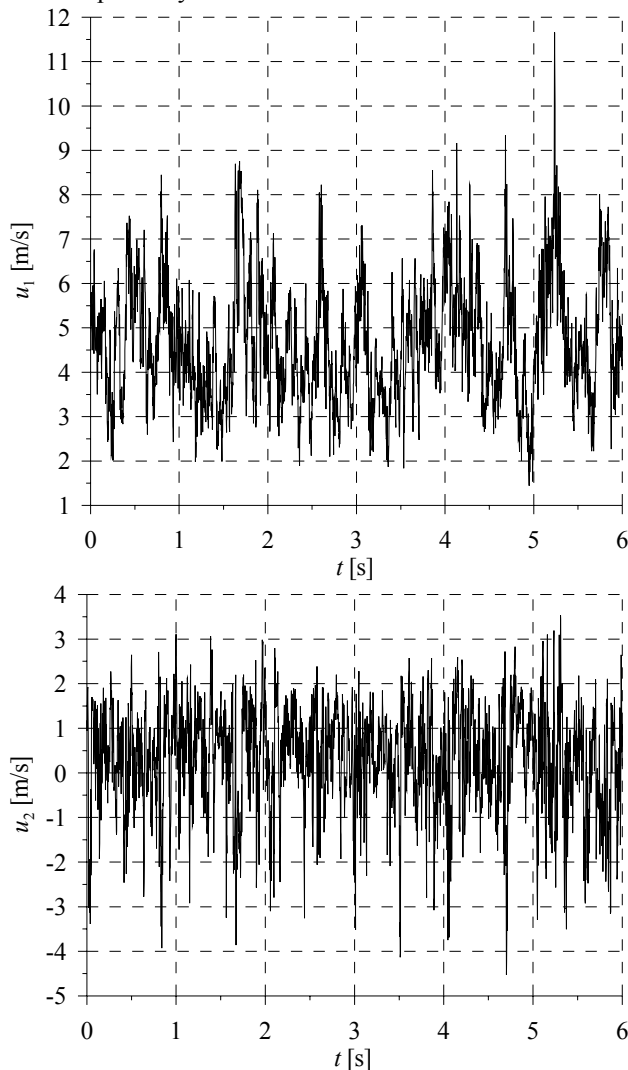
Rys. 1. Widok tunelu z elementami turbulizującymi.
Fig. 1. The view of the wind tunnel with the applied turbulizers.



Rys. 2. Zastosowane elementy turbulizujące: a) iglice o przekroju trójkątnym, b) iglice płaskie, c) barierka zębata, d) barierka prosta.
Fig. 2. The applied turbulizers: a) triangular cross-section spires, b) T-shape cross-section spires, c) zigzag barrier, d) even barrier.

2.2. Pomiary składowych prędkości przepływu

Pomiary prędkości wykonywano termooanemometrami dwuwłóknowymi, dzięki czemu uzyskano przebiegi czasowe zmian dwóch składowych prędkości: wzdłuż tunelu i w kierunku pionowym.

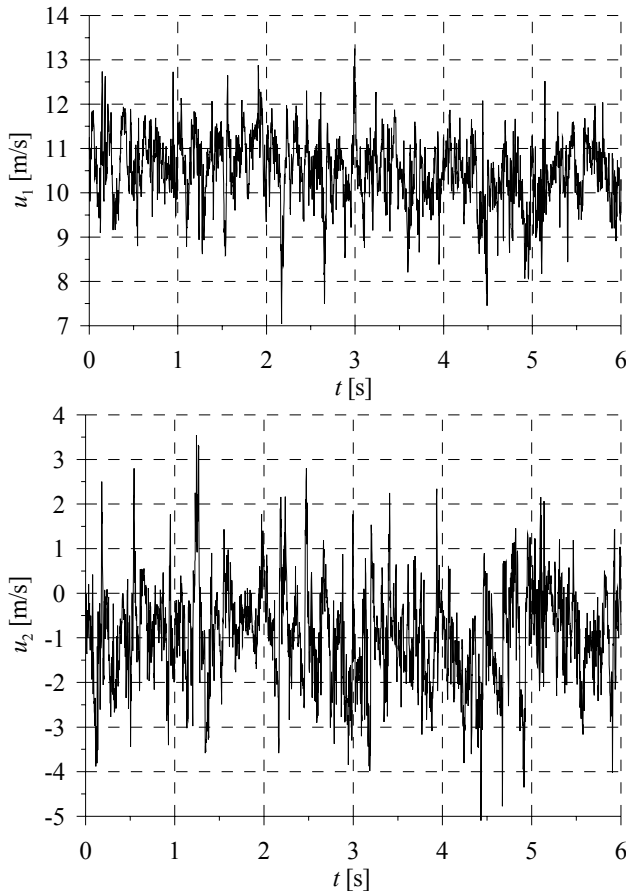


Rys. 3. Przykładowe przebiegi czasowe, zmierzone na wysokości 5 cm, gdzie u_1 – składowa wzdłuż tunelu, u_2 – składowa pionowa prędkości.

Fig. 3. Exemplary wind speed time series measured at 5 cm height, where u_1 – along tunnel axis wind speed component, u_2 – vertical component of wind speed.

Pomiary prędkości były wykonywane za pomocą trzech zestawów termooanemometrów. Sondy termooanemometrów, układy pomiarowe ATU2001 oraz oprogramowanie do zbierania danych zostały wykonane w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie (por. [7, 8]). Pomiary wykonywano za pomocą dwóch sond jednowłóknowych i siedmiu dwuwłóknowych. Pomiary z sond jednowłóknowych służyły do wyznaczania prędkości średniej napływu i dlate-

go ich czujniki były umieszczone przed modelem. Pomiar średniej prędkości termooanemometrami był weryfikowany za pomocą skanera ciśnien, do którego podłączona była rurka umieszczona w przepływie swobodnym przez modelem. Niepewność wzorcowania termooanemometrów wynosiła 3% i nie mniej niż 0,1 m/s. Analiza błędu dla tego tych urządzeń została przedstawiona w pracy [8].

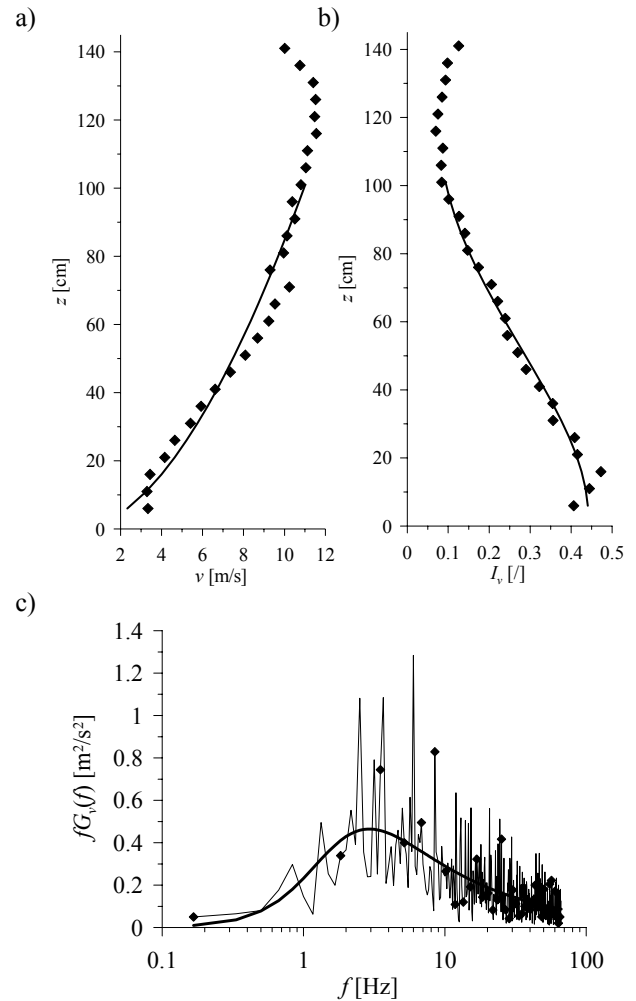


Rys. 4. Przykładowe przebiegi czasowe, zmierzone na wysokości 75 cm, gdzie u_1 – składowa wzdłuż tunelu, u_2 – składowa pionowa prędkości.

Fig. 4. Exemplary wind speed time series measured at 75 cm height, where u_1 – along tunnel axis wind speed component, u_2 – vertical component of wind speed.

Pomiary wykonano w osi pionowej poprzecznego przekroju tunelu w odległości 1,0 m przed miejscem, gdzie planowano ustawienie modeli. Pomiary były wykonywane w 28 punktach, rozmieszczonych co 5cm. Punkt, znajdujący się najniżej, był oddalony od podłogi także o 5 cm. Wynikiem pomiarów są przebiegi czasowe składowych prędkości napływu w kierunkach prostopadłych do włókien. W każdym położeniu wykonywano po trzy pomiary z częstotliwością 500 Hz i liczbą próbek 3000 czyli czas pojedynczego zapisanego przebiegu wynosi 6 s. Na podstawie tych pomiarów wyznaczono zmiany w czasie składowych prędkości wzdłuż średniego kierunku napływu (wzdłuż tunelu) i w

kierunku prostopadłym, wypadkowe prędkości przepływu, ich składowe w układzie globalnym oraz odchylenia standardowe, wynikające z turbulentnego charakteru przepływu. Przykładowe przebiegi czasowe, opisujące zmiany składowych prędkości wzdłuż tunelu i w prostopadłym kierunku pionowym pokazano na rys. 3 i rys. 4. Analiza danych została wykonana na podstawie zaleceń znajdujących się w takich pracach jak: [4], [5], [6] i [10].



Rys. 5. Wyniki analizy statystycznej pomiarów dla profilu 6 (Iv10bz4okl20): a) prędkość, b) intensywność turbulencji, c) gęstość widmowa mocy; \blacklozenge obliczenia w punkcie, — krzywa dobrana metodą najmniejszych kwadratów.

Fig. 5. Results of statistical analysis of measurements for the wind profile No. 6 (Iv10bz4okl20): a) wind speed, b) turbulence intensity, c) power spectral density function; \blacklozenge measured value, — approximation obtained with least square method.

3. ANALIZA STRUKTURY PRZEPŁYWU

W odniesieniu do przebiegów czasowych, reprezentujących składowe prędkości, wyznaczono średnie wartości (rys.5a), odchylenia standardowe, intensywności turbulencji (rys.5b) oraz transformaty Fouriera (rys.5c) w poszczególnych punktach pomiarowych. Następnie dla każdego z przepływów, metodą najmniejszych kwadratów dokonano doboru krzywych, opisujących zmienność parametrów wiatru, które na rys. 5 zaznaczone zostały liniami ciągłymi. Profile prędkości zostały opisane funkcjami potęgowymi:

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

gdzie: k i α są wielkościami dobieranymi za pomocą metody najmniejszych kwadratów (tab. 1), z_{min} [cm] – jest dobrany w taki sposób, aby wszystkie profile przyjmowały tą samą wartość na wysokości referencyjnej 70cm (tab.1), z [cm] – wysokość. Prędkość, otrzymana z tego wzoru, wyrażona jest w m/s.

Gęstości widmowe mocy zostały opisane funkcją o równaniu podobnym do równania gęstości widmowej mocy według Davenporta (por. [2]) :

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

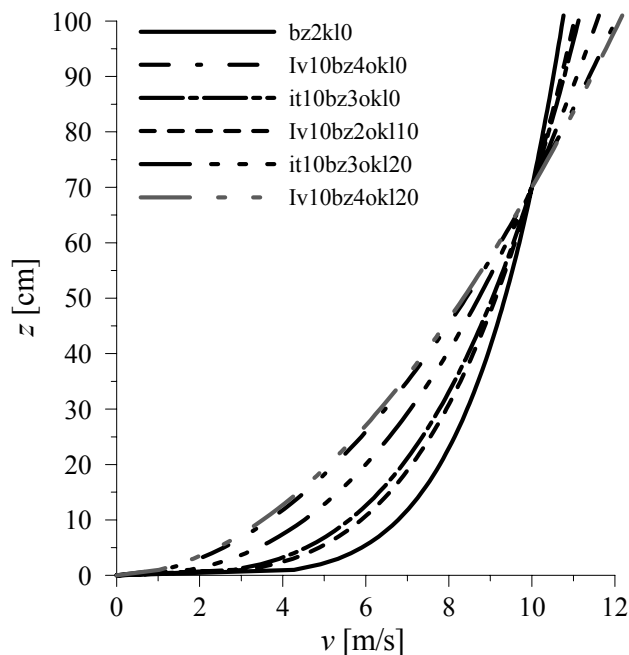
gdzie: b , c i d są współczynnikami dobieranymi za pomocą metody najmniejszych kwadratów (tab.1), f – częstość podana w Hz, a wynik czyli $fG_v(f)$ otrzymujemy w m^2/s^2 . Intensywność turbulencji została wyznaczona ze wzoru:

$$I_v(z) = \frac{\sigma(z)}{\bar{v}(z)} \quad (3)$$

gdzie: \bar{v} – średnia prędkość wiatru, σ – odchylenie standardowe, a funkcja krzywej interpolującej profil intensywności została opisana wielomianem czwartego stopnia (Tab. 2)

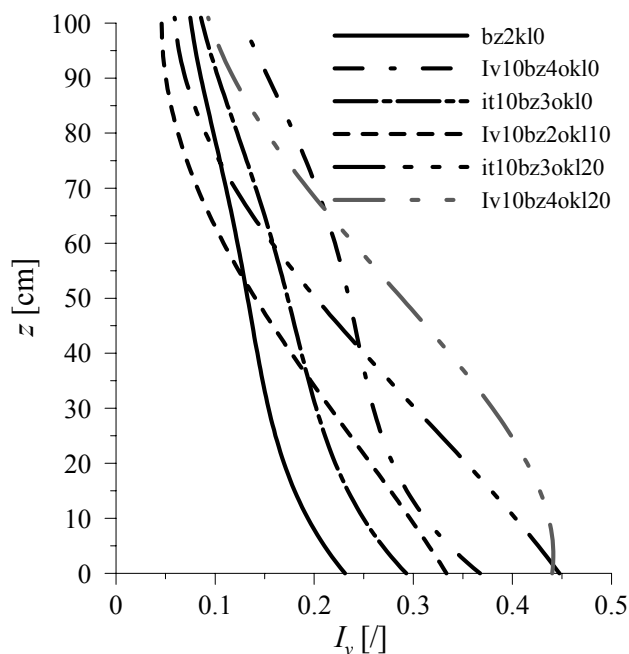
Wśród czterdziestu pięciu otrzymanych wykresów profili można znaleźć profile o wykładnikach od 0,19 do 0,69 z mnożnikami k , zmieniającymi się od 0,57 do 5,09. Jak widać w tab. 1, im większy jest wykładnik α , tym mniejszy jest współczynnik k i odległość z_{min} . Wartości wykładników α są najmniejsze dla ustawień bez klocków i wzrastają wraz ze wzrostem wysokości klocków. Wzrost wykładnika α następuje także, gdy na wlocie dostawione są inne elementy turbulizujące. Wyższe elementy, niezależnie od ich rodzaju, powodują, że wykładnik jest większy niż przy mniejszych elementach turbulizujących (rys. 6). Wśród czterech rodzajów turbulizatorów, pokazanych na rys. 2 największy wpływ na strukturę wiatru ma wysokość iglic, z tym że bardzo podobny wpływ na przepływ mają iglice o przekrojach przestrzennych (rys. 2a) jak i płaskich (rys. 2b). Na podstawie analizy wszystkich wykresów gęstości widmowych mocy można stwierdzić, że klocki nie wprowadzają zbyt

dużych zaburzeń turbulencji. Ich wysokość ma wpływ na wielkość turbulencji tylko w przypadku stosowania z barierkami o wysokości. 40cm. Wzrost wysokości barierek powoduje wyższe wartości funkcji gęstości widmowych mocy (rys. 8). Taki sam efekt daje zastosowanie barierek prostych (rys. 2c) zamiast barierek zębatych (rys. 2d).



Rys. 6. Profile prędkości przepływu.

Fig. 6. The wind speed profiles.



Rys. 7. Profile intensywności turbulencji przepływu.

Fig. 7. The wind turbulence intensity profiles.

Kolejnym etapem analizy struktury w tunelu było wybranie kilku ustawień elementów turbulizujących, przy których uzyskane zostały przepływy najbardziej różniące się charakterystyki przepływów. Taki dobór pozwolił na zbadanie wpływu poszczególnych parametrów struktury przepływu na obciążenie statyczne i dynamiczne budowli. Na przykład profile 2 i 6 oraz 3 i 4 mają niemal taki sam profil prędkości, ale znacznie różnią się profilami intensywności turbulencji i wykresami gęstości widmowych mocy. Wśród wybranych przepływów znajdują się profile prędkości o wykładnikach ok. 0,2, 0,3, 0,4 i 0,5, gęstościach widmowych mocy o różnych wartościach maksimum, uzyskiwanych przy różnych częstotliwościach, oraz znacznie różniących się między sobą profilach intensywności turbulencji.

Tabela 1. Współczynniki funkcji prędkości.
Table 1. Coefficients for wind profiles approximation.

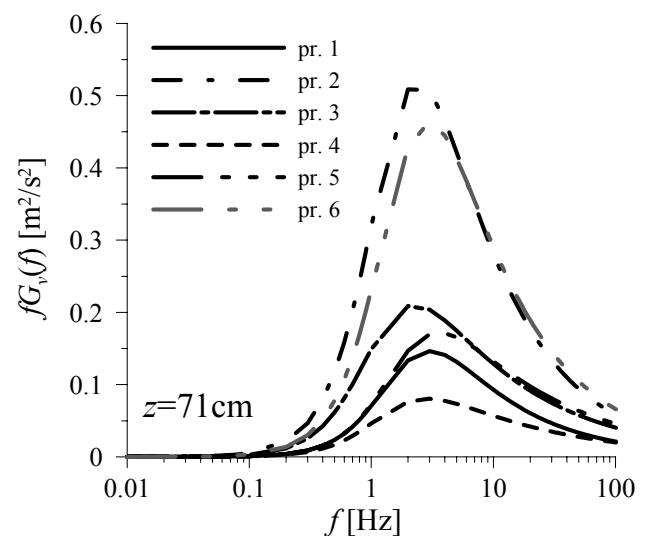
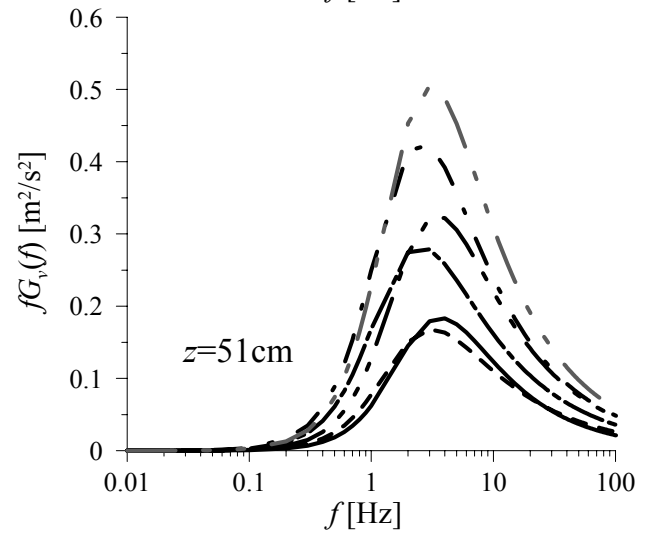
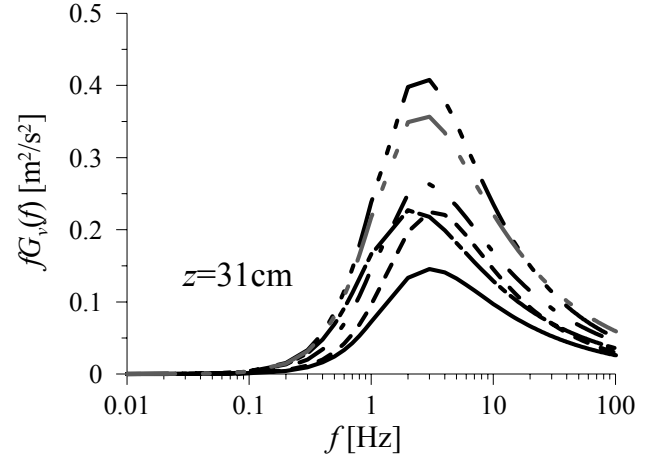
Profil	Symbol	k	α	z_{min} [cm]
1	bz2kl0	4,26	0,20	1,7
2	Iv10bz4okl0	2,42	0,32	0,55
3	It10bz3kl0	3,06	0,28	0,85
4	Iv10bz2okl10	1,77	0,42	0,25
5	It10bz3kl20	1,13	0,52	0,1
6	Iv10bz4okl20	0,87	0,55	0,07

Tabela 2. Funkcje intensywności turbulencji.
Table 2. Turbulence intensity functions.

Profil	$I_u [l]$
1	$I_u(z) = 4,34131 \cdot 10^{-9} z^4 - 1,09745 \cdot 10^{-6} z^3 + 9,68518 \cdot 10^{-5} z^2 - 4,60450 \cdot 10^{-3} z + 0,230968$
2	$I_u(z) = 7,10152 \cdot 10^{-9} z^4 - 1,87895 \cdot 10^{-6} z^3 + 1,62677 \cdot 10^{-4} z^2 - 6,97139 \cdot 10^{-3} z + 0,367395$
3	$I_u(z) = 5,19012 \cdot 10^{-9} z^4 - 1,29211 \cdot 10^{-6} z^3 + 1,09643 \cdot 10^{-4} z^2 - 5,29064 \cdot 10^{-3} z + 0,292795$
4	$I_u(z) = -1,00129 \cdot 10^{-9} z^4 + 4,27063 \cdot 10^{-7} z^3 - 2,68404 \cdot 10^{-5} z^2 - 3,46029 \cdot 10^{-3} z + 0,333518$
5	$I_u(z) = -1,17906 \cdot 10^{-9} z^4 + 5,53435 \cdot 10^{-7} z^3 - 4,16258 \cdot 10^{-5} z^2 - 4,06979 \cdot 10^{-3} z + 0,447362$
6	$I_u(z) = -1,90694 \cdot 10^{-9} z^4 + 9,58339 \cdot 10^{-7} z^3 - 1,18747 \cdot 10^{-4} z^2 + 7,44817 \cdot 10^{-4} z + 0,440143$

Tabela 3. Współczynniki gęstości widmowych mocy.
Table 3. Coefficients for PSD functions approximation.

Profil	$z=31\text{cm}$			$z=51\text{cm}$			$z=71\text{cm}$		
	b	c	d	b	c	d	b	c	D
1	0,109	0,375	1,293	0,079	0,187	1,396	0,104	0,338	1,329
2	0,233	0,443	1,292	0,407	0,437	1,352	0,549	0,490	1,348
3	0,346	0,774	1,282	0,283	0,474	1,332	0,307	0,777	1,254
4	0,133	0,271	1,354	0,112	0,320	1,322	0,079	0,542	1,230
5	0,388	0,440	1,341	0,171	0,244	1,346	0,104	0,330	1,238
6	0,373	0,520	1,291	0,324	0,288	1,371	0,348	0,356	1,329



Rys. 8. Wykresy gęstości widmowej mocy.
Fig. 8. The graphs of power spectrum density functions.

Wyniki analiz statystycznych w formie profili prędkości oraz wykresów gęstości widmowych mocy przedstawiono

w tab.1 i tab.2, na rys. 6, rys. 7 i rys. 8. Zastosowane na rysunkach i w tabeli opisy profili oznaczają:

- profil 1 – bz2kl0 – na wlocie do tunelu ustawiony jest barierka zębata o wys. 20cm (rys. 2c), a klocki są schowane,
- profil 2 – iv10bz4okl0 – na wlocie ustawione są iglice przestrzenne (rys.2a) oraz barierka zębata o wys. 40cm (rys.2c), a klocki są schowane,
- profil 3 – it10bz3kl0 – na wlocie ustawione są iglice płaskie (rys.2b) oraz barierka zębata o wys. 30cm (rys.2c), a klocki są schowane,
- profil 4 – iv10bz4okl10 – na wlocie ustawione są iglice przestrzenne (rys.2a) oraz barierka zębata o wys. 40cm (rys.2c), a klocki są wysunięte do wys. 10cm,
- profil 5 – it10bz3okl20 – na wlocie ustawione są iglice płaskie (rys.2b) oraz barierka zębata o wys. 30cm (rys.2c) a klocki są wysunięte do wys. 20cm,
- profil 6 – iv10bz4okl20 – na wlocie ustawione są iglice przestrzenne (rys.2a) oraz barierka zębata o wys. 40cm (rys.2c), a klocki są wysunięte do wys. 20cm.

W ustawieniach dla profili od 2 do 6 wykorzystywano iglice, które zawsze były ustawiane ostrą krawędzią w kierunku napływu.

4. WNIOSKI

Z przedstawionych w pracy analiz wynika, że struktura przepływu w tunelu aerodynamicznym Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej przypomina strukturę wiatru rzeczywistego. Przy odpowiednich ustawieniach elementów turbulizujących można uzyskać przepływy o profilu potęgowym z wykładnikiem od 0,2 do 0,7, których wykresy gęstości widmowych mocy przypominają kształtem gęstość widmową mocy według wzoru Davenporta [2].

Ponieważ profil prędkości przyjmuje kształt profilu podłużnego rzeczywistego wiatru do wysokości 100 cm oraz ze względu na wymiary tunelu można przypuszczać, że skala turbulencji jest równa wysokości tunelu, czyli 1,45m, to w przypadku badań odpowiedzi modeli aeroelastycznych na działanie wiatru powinno się w miarę możliwości stosować skalę wymiarów około 1:100. Drugą skalą, którą należałoby zachować, jest skala częstości. Z porównania wykresów gęstości widmowych mocy, uzyskanych w tunelu, i gęstości mocy rzeczywistych przepływów wynika, że skala częstości powinna wynosić około 1:150. Oba podane parametry należałoby w przyszłości potwierdzić poprzez dokładny pomiar skali turbulencji w tunelu aerodynamicznym oraz poprzez porównanie wyników pomiarów oddziaływań wiatru na modelach w tunelu i na obiektach w skali naturalnej.

Artykuł został opracowany w ramach grantu MNiSzW N506 267337

THE RESEARCH OF FLOW STRUCTURE IN THE WIND TUNNEL OF THE WIND ENGINEERING LABORATORY

Summary: The paper is devoted to the research of the wind structure in a wind tunnel. The work consist of the measurement of flow velocities with use of the X hot-wire anemometers at different sets of turbulizers, as well as the statistical analysis of the measured signals. Six turbulizers settings have been selected from from whole of 45 analyzed settings. The selection has been made on the basis of the functions representing PSD functions with most similarity to the PSD functions of the real wind.

Literatura

- [1] Błazik-Borowa E. *Problemy związane ze stosowaniem modelu turbulencji k-ε do wyznaczania parametrów przepływu*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2008.
- [2] Flaga A., Błazik-Borowa E., Podgórski J. *Aerodynamika smukłych budowli i konstrukcji prętowo-cięgnowych*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2004.
- [3] Flaga A., *Inżynieria wiatrowa, Podstawy i zastosowania*, Arkady, Warszawa 2008.
- [4] Elsner J.W., *Turbulencja przepływów*, PWN, Warszawa 1987.
- [5] Evans R.L., *Free stream turbulence effects on the turbulent boundary layer*, Raport Nr 1282 dla Procurement Executive, Ministry of Defence USA 1974.
- [6] Hinze J.O., *Turbulence*, drugie wydanie, McGraw-Hill, Nowy York 1975.
- [7] Jamróz P. i Socha K. *ATU 2001. Program ver. 3.1. Program obsługi czterokanałowego modułu termomanometru stałotemperaturowego i termometru stałoprądowego do zastosowań w laboratoryjnych systemach pomiarowych – instrukcja obsługi programu*, Instytut Mechaniki Górotworu PAN, 2007.
- [8] Ligeza P. *ATU 2001. Czterokanałowy moduł termomanometru stałotemperaturowego i termometru stałoprądowego do zastosowań w laboratoryjnych systemach pomiarowych – instrukcja*, Instytut Mechaniki Górotworu PAN, 2007.
- [9] 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.
- [10] 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.