

## BADANIE MODELOWE PRZEPŁYWU NIESTACJONARNEGO METODĄ OPTYCZNA

Katarzyna KLEMM\*, Kazimierz ROŻNIAKOWSKI\*\*, Krzysztof PIESZYŃSKI\*\*\*,  
Marek JABŁOŃSKI\*\*\*\*

\* Politechnika Łódzka, Instytut Architektury i Urbanistyki  
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: katarzyna.klemm@p.lodz.pl

\*\* Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki  
ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, e-mail: rozniakz@p.lodz.pl

\*\*\* Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki  
ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, e-mail: kristoff@p.lodz.pl

\*\*\*\* Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych  
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: marek.jablonski@p.lodz.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawione zostały wyniki badań w tunelu aerodynamicznym, związane z opływem trójwymiarowego modelu, przy zastosowaniu wąskiej wiązki światła laserowego i zestawu czujników termooanemometrycznych. Pomiarzy prowadzone były dla dwóch prędkości głównych w tunelu tj. 1,0m/s i 3,3m/s i średniej intensywności turbulencji 5 i 2%. Turbulentny przepływ obserwowano po stronie odpływu.

**Słowa kluczowe:** Model trójwymiarowy, turbulencja, metoda optyczna.

### 1. WPROWADZENIE

Potrzeba kształtowania korzystnych warunków wiatrowych wokół różnych struktur zabudowy coraz częściej staje się zauważalna przez architektów i urbanistów. W celu określenia klimatu wietrznego stosowanych jest wiele metod badawczych, między innymi symulacje numeryczne, badania w skali naturalnej i badania w tunelu aerodynamicznym. W przypadku tych ostatnich wykorzystywane są różne techniki pomiarowe, mające na celu określenie rozkładu prędkości wokół budynków. Najczęściej stosowanymi są czujniki termooanemometryczne. W ostatnim okresie zwrócona została uwaga na pewne możliwości zastosowania w badaniach tunelowych wąskiej wiązki światła laserowego [1] [2] [3].

Badania takie rozpoczęto w Politechnice Łódzkiej, a wyniki uzyskane dla różnych przypadków, mających znaczenie praktyczne przedstawiono w pracach [4] [5] [6].

### 2. KRYTERIA PODOBIEŃSTWA PRZEPŁYWU NIEUSTALONEGO

W praktycznych rozwiązaniach inżynierskich mamy zwykle do czynienia ze złożonymi przypadkami przepływów. Przyczyną tego stanu jest skomplikowana geometria obiektów oraz turbulentny charakter przepływów o dużej intensywności. W związku z powyższym bardzo często stosowanym rozwiązaniem są badania modelowe. Stosując tą drogę rozwiązań muszą być spełnione odpowiednie warunki. Jest rzeczą oczywistą, że muszą być spełnione tu odpowiednie warunki podobieństwa pomiędzy modelem a obiektem rzeczywistym. Uzyskane wyniki w przepływie modelowym mogą być podstawą do ilościowej oceny analogicznego zjawiska w przepływie rzeczywistym.

Warunkiem musi być zagwarantowanie podobieństwa przepływów. Całkowite podobieństwo przepływów jest rzadko osiągalnym zjawiskiem a wynika to z niemożności zrealizowania wszystkich warunków. Istnieje wówczas konieczność spełnienia częściowego podobieństwa istotnego dla analizowanego przypadku.

W pracy główna uwaga będzie zwrócona na przepływ niestacjonarny w otoczeniu badanego modelu trójwymiarowego, stąd przyjęte będzie geometryczne podobieństwo powierzchni granicznych i równość liczby Strouhala (lub jednoczesności).

Kryterium podobieństwa zjawisk okresowych ma znaną postać

$$\frac{k_l}{k_v k_t} = 1 \quad (1)$$

gdzie:  $k_l = L_2 / L_1$  ( $L$  – charakterystyczny rozmiar opływającego ciała)

$$k_v = v_2 / v_1 \quad (v - \text{charakterystyczna prędkość})$$

$$k_t = t_2 / t_1 \quad (t - \text{okres modelowanego zjawiska})$$

W przeprowadzonym eksperymencie przyjęto:  $k_L = 100$ ,  $k_v = 1$  oraz  $k_t = 100$

### 3. PROCEDURA EKSPERYMENTU

Badania przepływu turbulentnego powietrza wokół modelu o kształcie sześcianu o wymiarach 0,10m przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym o wymiarach w przekroju poprzecznym 1 x 1m i długości 5m.

Badania przeprowadzone zostały dla dwóch różnych prędkości napływu  $V_o = 1,0\text{m/s}$  i  $3,3\text{m/s}$  dla  $z_o = 0,10\text{m}$ . Model umieszczony był po środku tunelu w odległości 2m od wylotu.

Pomiary prędkości chwilowych rejestrowano przy zastosowaniu czujników termooanemometrycznych, umieszczonych w płaszczyznach pionowych, w trzech odległościach od modelu 0,01; 0,04 i 0,10m i 9 punktach rejestracji por. Rys.1. Pomiar prowadzono z dokładnością do 0,1m/s, w czasie 1s.

Równocześnie rejestrowano zmiany struktury optycznej przepływu turbulentnego powietrza po stronie odpływu, na długości ścieżki wiązki laserowej. Przebieg wąskiej wiązki światła laserowego pokrywał się z płaszczyznami pomiarowymi termooanemometrów.

Rejestracja zmian prędkości chwilowych i struktury optycznej opływającego strumienia powietrza prowadzona była na trzech wysokościach  $z = 0,03$ ;  $0,06$  i  $0,12\text{m}$ , a płaszczyzny pomiarowe znajdowały się w odległości  $d = 0,01$ ;  $0,04$  i  $0,10\text{m}$  od modelu.

W badaniu jako źródło światła użyto lasery półprzewodnikowe o mocy 14mW, emitujące światło o długości  $\lambda = 635\text{nm}$ , ze specjalnym układem optycznym. Do detekcji natężenia światła laserowego użyto fotodiody BPYP17. Lasery i fotodiody umieszczone były na wspólnej ramie. Wiązki światła przebiegały prostopadle do osi tunelu poprzez wydrążone w ścianach bocznych otwory o średnicy  $\phi = 0,5\text{mm}$ . Częstość rejestracji natężenia 1000Hz, czas pomiaru 60 sek.

### 4. WYNIKI BADAŃ

W tabeli 1 przedstawione zostały wyniki z badań, uzyskane przy zastosowaniu czujników termooanemometrycznych.

W tabeli 2 zamieszczone zostały wyniki uzyskane przy zastosowaniu wąskiej wiązki światła laserowego.

Korzystając z danych uzyskanych z badań laserowych i związków podanych w pracy [2] określono podstawowe

parametry struktury optycznej nieustalonego przepływu tj.  $C_n^2$ ,  $l_o$  i  $\theta$  por. tab.3 i tab.4.

Współczynnik  $C_n^2$  opisuje amplitudę wahań wiązki laserowej;  $l_o$  – średnią skalę wewnętrzną wirów, poniżej których występuje dyssypacja energii kinetycznej turbulencji, a  $\theta$  określa średni kąt wychylenia wiązki laserowej.

### 5. DYSKUSJA I WNIOSKI

Korzystając z danych uzyskanych z badań metodą klasyczną (czujniki termooanemometryczne) można zaobserwować, że w płaszczyźnie przebiegającej wzdłuż tunelu tj. na osi modelu prędkości średnie w odległościach od 0,01 do 0,10m od modelu są niższe i stanowią 20 do 50% prędkości napływu. Intensywność turbulencji również maleje od 20% do 15%, oddalając się od modelu. Obserwując zmiany prędkości w płaszczyźnie oddalonej od osi modelu w granicach 0,20m notujemy wyraźny wzrost prędkości, która osiąga wielkość 80% prędkości napływu a intensywność turbulencji spada do wielkości rejestrowanej w strefie napływu 2 do 5%. Ekstremalne wartości uzyskano w odległości 0,01m od modelu dlatego też obserwacje przy zastosowaniu wiązki światła laserowego były głównie prowadzone w tej płaszczyźnie. Intensywność fluktuacji światła laserowego również podlegała spadkowi ze wzrostem odległości od płaszczyzny poziomej 25% do 40%. Zmiana położenia wiązki laserowej z poziomu 0,03 do 0,12m powoduje średni spadek współczynnika struktury optycznej  $C_n^2$  do około 80%. Natomiast średnia wartość skali wewnętrznej  $l_o$  maleje do wielkości 23% ze wzrostem wysokości, przy średniej prędkości napływu 1m/s i 33%, gdy prędkość napływu jest na poziomie 3,3m/s.

Przytoczone powyżej zmiany wskazują, że istnieje możliwość analizowania przepływów silnie turbulentnych w otoczeniu modelu przy małej długości wiązki laserowej. Interesujące są również wyniki dotyczące średniego kąta wychylenia wiązki a w szczególności jego zmiany znaku. Z uzyskanych danych wynika, że przy zmianie położenia wiązki od 0,03m do 0,06m występuje wyraźna zmiana wartości średniego kąta wychylenia wiązki wraz ze zmianą znaku. Świadczy to o wyraźnym oddziaływaniu strefy recyrkulacji na przebieg wiązki laserowej, stąd wyłania się możliwość oceny jej zasięgu. Można zatem przypuszczać, że wykorzystując wąską wiązkę światła laserowego uzyskamy interesujące informacje o przepływie turbulentnym w badaniach modelowych, a w dalszej kolejności o przepływach turbulentnych w skali rzeczywistej. Wskazane są dalsze badania i ich weryfikacja przy wykorzystaniu innych metod. Ciekawe wyniki może przynieść analiza fluktuacji wiązki laserowej, przy wyższej liczbie próbkowania np. 2000 Hz i w dalszej kolejności wykorzystanie transformaty Fourriera.

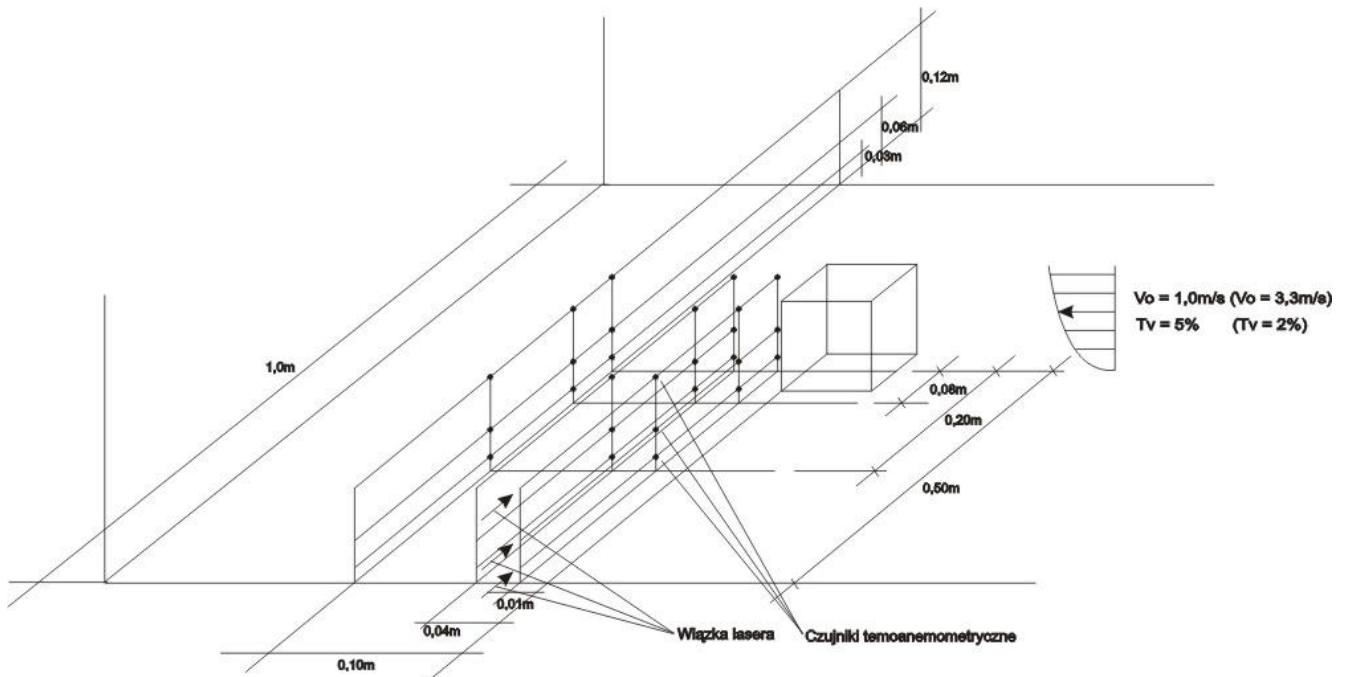
## THE MODEL STUDY OF NONSTACIONARY FLOW BY OPTICAL METHOD

**Summary:** The paper presents analyses of air flow around three dimensional model placed in wind tunnel. Results were obtained by means of thermoanemometry and laser beam. Measurements were conducted for two main velocities in wind tunnel 1,0m/s and 3,3m/s and two turbulence intensities 5% and 2%. The turbulent flow were observed behind the analysed model.

### Literatura

- [1] Consortini A., Sun Y.Y., Li Z.P. Conforti G., *A mixed method for measuring the inner scale of atmospheric turbulence*. Journal of Modern Optics, vol.37, No. 10, (1990) 1555-1560  
 [2] Klemm K. *O możliwości wykorzystania wiązki światła laserowego do oceny podstawowych parametrów turbu-*

- lencji optycznej za pomocą dwóch różnych podejść*. . Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, tom III (2008) 35-42  
 [3] Consortini A., Sun Y. Y., Innocenti C., Li Z. P. *Measuring inner scale of atmospheric turbulence by angle of arrival and scintillation*. Optics Communications 216 (2003) 19-23  
 [4] Klemm K. *Badanie turbulentnego przepływu powietrza w strefie elementu architektonicznego przy zastosowaniu metody optyki – koherentnej*. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, tom III (2008) 27-33  
 [5] Klemm K. *Obserwacja turbulentnego przepływu strugi powietrza przez przeszkodę o określonej perforacji*. Budownictwo Niskoenergetyczne IX Międzynarodowe Seminarium Naukowe Techniczne ENERGODOM (2008) 221-228  
 [6] Klemm K., Pieszyński K., Roźniakowski K. *Examination of air density fluctuations with the aid of laser beam*. Optica Applicata, vol. XXXVII, No. 3 (2007) 219-228



Rys.1. Rozmieszczenie czujników termoanemometrycznych i wiązek światła laserowego  
 Fig.1. Location of the thermoanemometers and laser beams

Tabela 1. Średnie prędkości i intensywność turbulencji w trzech płaszczyznach pomiaru dla prędkości średniej  $V_o = 1,0\text{m/s}$  i  $T_v = 5\%$   
 Table 1. Mean velocities and turbulence intensities in three measurements planes for inflow velocity  $V_o = 1,0\text{m/s}$  and  $T_v = 5\%$

Odległość płaszczyzny pomiaru od modelu $\Delta x$ (m)	Wysokość położenia czujnika z (m)	Średnia prędkość V(m/s)			Intensywność fluktuacji prędkości $T_v$ (%)			Średnia prędkość napływu i intensywność turbulencji
		Odległość punktu pomiarowego od osi tunelu $\Delta y$ (m)						
		0,00	0,08	0,20	0,00	0,08	0,20	
0,01	0,03	0,29	0,55	0,69	22	11	8	$V_o = 1,0\text{m/s}$ $Z_o = 0,10\text{m}$ $T_v = 5\%$
	0,06	0,24	0,65	0,84	24	8	6	
	0,12	0,37	0,76	0,80	20	7	2	
0,04	0,03	0,31	0,54	0,69	18	11	8	
	0,06	0,26	0,66	0,81	20	7	4	
	0,12	0,44	0,76	0,80	25	6	2	
0,10	0,03	0,38	0,50	0,71	20	13	8	
	0,06	0,33	0,64	0,87	17	8	5	
	0,12	0,60	0,78	0,85	20	5	6	

Tabela 2. Średnia prędkość i intensywność turbulencji w trzech płaszczyznach pomiarowych dla średniej prędkości napływu  $V_o = 3,3\text{m/s}$  i  $T_v = 2\%$

Table 2. Mean velocities and turbulence intensities in three measurements planes for inflow velocity  $V_o = 3,3\text{m/s}$  and  $T_v = 2\%$

Odległość płaszczyzny pomiaru od modelu $\Delta x$ (m)	Wysokość położenia czujnika $z$ (m)	Średnia prędkość $V(\text{m/s})$			Intensywność fluktuacji prędkości $T_v$ (%)			Średnia prędkość napływu i intensywność turbulencji
		Odległość punktu pomiarowego od osi tunelu $\Delta y$ (m)						
		0,00	0,08	0,20	0,00	0,08	0,20	
0,01	0,03	0,67	1,77	2,30	19	9	4	$V_o = 3,3\text{m/s}$ $Z_o = 0,10\text{m}$ $T_v = 2\%$
	0,06	0,63	2,45	2,78	17	5	2	
	0,12	0,91	2,59	2,72	23	4	2	
0,04	0,03	0,78	1,78	2,31	20	10	4	
	0,06	0,70	2,41	2,86	21	5	2	
	0,12	0,70	2,41	2,86	21	5	2	
0,10	0,03	0,92	1,70	2,37	15	13	3	
	0,06	0,91	2,40	2,85	17	7	2	
	0,12	1,61	2,56	2,79	14	4	2	

Tabela 3 Wartość średnia natężenia światła laserowego  $\langle I \rangle$ , odchylenie standardowe fluktuacji światła  $\sigma_I$ , intensywność fluktuacji  $T_I$ , średni kąt wychylenia wiązki  $\theta$

Table 3 Mean light intensity  $\langle I \rangle$ , standard deviation of the laser beam fluctuation  $\sigma_I$ , fluctuation intensity  $T_I$ , mean deflection angle of the laser beam  $\theta$

Średnia prędkość strumienia napływu i intensywności turbulencji $V_o$ (m/s) $T_v$ (%)	Wysokość położenia ścieżki laserowej z (m)	Odległość wiązki od modelu d (m)	Średnie natężenie wiązki światła laserowego $\langle I \rangle$ (mV)	Odchylenie standardowe fluktuacji wiązki laserowej $\sigma_I$ (mV)	Intensywność fluktuacji światła laserowego $T_I$	Średni kąt wychylenia wiązki $\theta_x \times 10^{-6}$ (rad)	Składowa pozioma odchylenia standardowego $\sigma_x \times 10^{-6}$ m
1,0 5	0,03	0,01	3,327	0,0253	0,0076	+16,5	2,78
	0,06	0,01	2,6713	0,0092	0,0034	-4,8	1,17
	0,12	0,01	2,8846	0,0057	0,00197	-3,6	0,66
3,3 2	0,03	0,01	3,425	0,0418	0,0122	+27,3	4,60
	0,06	0,01	2,6465	0,0179	0,0068	-8,0	2,30
	0,12	0,01	2,8671	0,0139	0,0048	-5,7	1,70

Tabela 4. Wartość średniego parametru struktury współczynnika załamania  $C_n^2$  i średniej skali wewnętrznej  $l_0$

Table 4. Values of refractive index structure coefficient  $C_n^2$  and average inner scale  $l_0$

Średnia prędkość strumienia napływu i intensywności turbulencji $V_o$ (m/s) $T_v$ (%)	Położenie ścieżki laserowej z (m)	Odległość wiązki od modelu d (m)	Współczynnik struktury optycznej $C_n^2 \times 10^{-12} \text{m}^{-2/3}$	Średnia wartość skali wewnętrznej $l_0 \times 10^{-3} \text{m}$
1,0 5	0,03	0,01	28,96	1,62
	0,06	0,01	2,18	1,12
	0,12	0,01	1,34	1,49
3,3 2	0,03	0,01	79,28	1,62
	0,06	0,01	5,70	0,95
	0,12	0,01	2,87	0,92