

ZASTOSOWANIE WĄSKIEJ WIĄZKI ŚWIATŁA LASEROWEGO DO ANALIZY WIRÓW DROBNOskalOWYCH

Katarzyna KLEMM^{*}, Marek JABŁOŃSKI^{**}, Kazimierz ROŻNIAKOWSKI^{***},
Krzysztof PIESZYŃSKI^{****}, Piotr KLEMM^{*****}

^{*}Politechnika Łódzka, Instytut Architektury I Urbanistyki

Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: katarzyna.klemm@p.lodz.pl

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

^{***}Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki

Ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, e-mail: rozniak@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: piotr.klemm@p.lodz.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono możliwości zastosowania światła laserowego do obserwacji kinetyki wirów drobnoskalowych. Prace eksperymentalne realizowano w tunelu aerodynamicznym, dzięki czemu możliwa była kontrola prędkości przepływu powietrza. Badania turbulentnego przepływu strugi powietrza opływającej przeszkodę prowadzono wykorzystując do tego celu wiązkę światła laserowego, przechodzącą przez badany obszar.

Słowa kluczowe: Turbulencja, metoda optyczna, wiry drobnoskalowe

1. WPROWADZENIE

Wykorzystanie wiązki światła laserowego w badaniach ruchu turbulentnego powietrza prezentowano w wielu publikacjach naukowych. Na przykład w pracach [1] [2] skoncentrowano się na charakterystyce przepływu turbulentnego określając podstawowy parametr struktury optycznej C_n^2 .

Ukazało się również szereg interesujących prac poświęconych wyznaczeniu wielkości skali wewnętrznej l_0 [3] [4]. Otrzymywano dzięki temu informacje o wielkości granicznej mikrowirów, poniżej której następuje dyssypacja energii kinetycznej turbulencji. Dysponowanie metodami pozwalającymi na wyznaczanie podstawowych parametrów ruchu turbulentnego jest istotne przy analizie złożonych przepływów turbulentnych. Badania takie prowadzono w skali naturalnej oraz w tunelach aerodynamicznych [5].

Autorzy opracowania podjęli próbę obserwacji kinetyki wirów drobnoskalowych. Możliwość realizacji powyższych obserwacji mogła być podstawą do szerszych analiz przepływów turbulentnych. Jednym z praktycznych przykładów zastosowań takich analiz mogą być ekrany wiatrowe stosowane w różnych strukturach urbanistycznych. Badania laboratoryjne oraz symulacja numeryczna były prowadzone w strefach napływu i odpływu [6] [7], gdzie szczególną uwagę zwrócono na efekty tłumienia energii kinetycznej turbulencji. Pomiary prowadzono przy wykorzystaniu techniki laserowej.

Stosowane metody *koherentne* umożliwiały obserwację turbulentnego przepływu o różnym stopniu złożoności, przy praktycznie zerowej ingerencji w przepływ.

Pozytywne wyniki badań wstępnych zadecydowały o podjęciu dalszych działań, których głównym celem była analiza wirów drobnoskalowych. W przeprowadzonym eksperymencie wykorzystano wiry Karmana. Liczba Reynoldsa charakteryzująca przepływ kształtowała się w granicach 7000-20000.

2. PRZEPIY WOKÓŁ WALCA KOŁOWEGO

Opływ strumienia powietrza wokół walca jest zagadnieniem w miarę dobrze rozpoznany. Cechy tego przepływu w dużym stopniu zależą od liczby Reynoldsa. Rozpatrując przypadek gładkiego walca można wyróżnić trzy charakterystyczne zakresy: podkrytyczny, krytyczny i nadkrytyczny. W pracy głównym punktem zainteresowa-

nia był zakres podkrytyczny, dla którego możemy wyróżnić następujące przypadki por.[8]:

- ustalony, laminarny, bezwirowy i symetryczny gdy liczba Reynoldsa $R_e \approx 1$

- ustalony, laminarny, wirowy i symetryczny gdy liczba Reynoldsa $R_e \in (5, 40)$

- nieustalony, turbulentny, wirowy i niesymetryczny gdy liczba Reynoldsa $R_e \in (40, 100000)$, w tym przypadku wiry powstające po oderwaniu się strugi powietrza od brzegu walca generują się na przemian, formując tzw. ścieżkę Karmana. Częstotliwość odrywania się wirów dla jednego szeregu f może być określona poprzez bezwymiarową liczbę Strouhala

$$S_r = \frac{f \cdot D}{v} \quad (1)$$

gdzie: $f = \frac{1}{T}$ (Hz)

T – okres odrywania się wirów (jednego szeregu) (s)

D – średnica walca (m)

v – prędkość napływu (m/s)

Stosunek odległości pomiędzy dwoma szeregami wirów do odległości między dwoma sąsiednimi wirami zawarty jest w przedziale od 0,23 do 0,53. Zwykle przyjmuje się wartość 0,28. Odległość między wirami można w przybliżeniu oszacować jako $L=4,3 \cdot D$, a przybliżoną prędkość przemieszczania się wirów v_w można wyrazić poprzez prędkość przepływu strumienia, wykorzystując związek $v_w=0,86 \cdot v$.

3. EKSPERYMENT

Badania zostały przeprowadzone w tunelu aerodynamicznym o długości kanału 5m i wymiarach poprzecznych 1x1m. Prędkość średnią strumienia powietrza napływającego na walec ustalono na poziomie 1m/s i 3,0m/s.

Wiry Karmana wygenerowane były w wyniku opływu gładkiego walca kołowego o średnicy $D=0,10m$ umieszczonego poziomo na wysokości $H=0,50m$. Wariant pierwszy (a) - oś obrotu walca była prostopadła do wektora prędkości napływającego powietrza. Wariant drugi (b) - walec był ustawiony pionowo w środku tunelu.

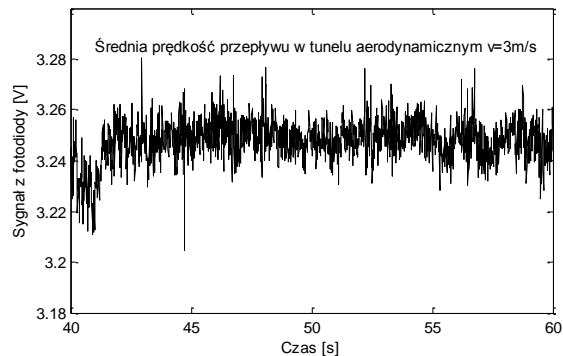
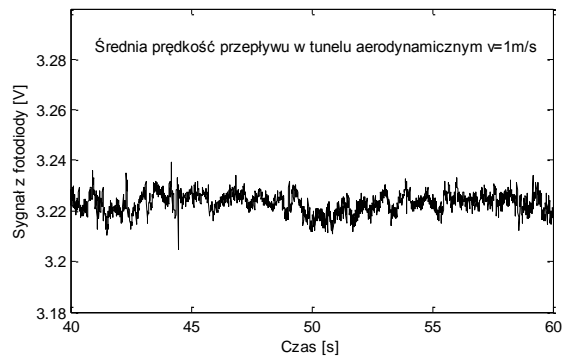
Pomiary prowadzono za pomocą dwu różnych metod. W pierwszej wykorzystano czujniki termooanemometryczne, w drugiej zaś zastosowano lasery półprzewodnikowe, emitujące wąskie wiązki światła o długości fali $\lambda=635nm$. Odbiornikami były fotodiody o średnicy 0,1mm. W trakcie badań wiązki światła laserowego biegły równoległe do osi walca na wysokości przebiegu wirów Karmana. Szkic wzajemnego rozmieszczenia walca, wiązek laserowych i czujników termooanemometrycznych przedstawiono na Rys.1. Korzystając z zależności przytoczonych wcześniej wyznaczono przewidywane wielkości, charakteryzujące generowane w eksperymencie wiry Karmana. Przyjęto na-

stępujące parametry fizyczne powietrza: temperaturę $T_p=20^\circ C$, wilgotność względną $\phi=50\%$, ciśnienie atmosferyczne 1000hPa oraz lepkość, $\mu=0,145 \cdot 10^{-4} Nm^2/s$.

W tunelu aerodynamicznym wywołano przepływ powietrza o średniej prędkości v równej 1m/s i 3m/s przy liczbie Reynoldsa R_e : 6897 i 20690 (przypadek przepływu podkrytycznego).

4. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

W tej części pracy przedstawiono wyniki badań turbulentnego przepływu powietrza wywołanego gładkim walcem o średnicy $D=0,1m$. Przepływ miał charakter nieustalony, turbulentny, wirowy i niesymetryczny. Liczba Reynoldsa wynosiła 6897 i 20690 (przypadek przepływu podkrytycznego)



Rys.2. Odebrane sygnały fotodiody rejestrującej światło lasera po przejściu przez obszar turbulentny w odległości 0,33m za walcem.

Fig.2. Signals of photodiode recording laser light after passing a turbulent area at a distance 0,33m behind cylinder.

Wykorzystując zestaw termooanometrów usytuowanych na wysokości przewidywanego przebiegu wirów Karmana uzyskano wyniki, które przedstawiono w tabeli 1 wariant a i b (por. Rys.1).

Otrzymane wyniki mogą stanowić pewną informację o charakterze przepływu, jednak pełniejsza ocena pojawiających się wirów jest niemożliwa. Kierując się powyższymi przesłankami przeprowadzono drugą część pomiarów wykorzystując do sondowania wąską wiązkę lasera. Układ pomiarowy pozwalał jednocześnie obserwować zmiany parametrów optycznych na drodze światła laserowego, przebiegającego w różnych odległościach od powierzchni walca por. Rys.1.

Wspomnianym wyżej parametrem optycznym było natężenie światła laserowego padającego na fotodiodę. Akwizycja tego sygnału dokonywana była za pomocą karty pomiarowej firmy National Instruments PCI 6123 umożliwiającej jednoczesny, a nie sekwencyjny pomiar sygnałów ze wszystkich fotodiod. Pojedynczy cykl pomiarowy odbywał się w czasie $\tau=60s$ a czas próbkowania wynosił $\Delta t=0,001s$.

Przejście wirów Karmana w miejscu przebiegu wiązki światła laserowego wywoływało wyraźną zmianę wartości chwilowej natężenia światła laserowego I.

W tabeli 2 podane zostały wyniki uzyskane z zastosowania metody laserowej dla wariantu a i b.

Na Rys.2. przedstawiono przykładowy obraz fluktuacji światła laserowego w funkcji czasu, w odległości 0,33m od walca dla wariantu b dla dwu różnych prędkości średnich przepływu powietrza w tunelu aerodynamicznym.

Wykorzystując powyższe dane dotyczące zmian wielkości natężenia światła I w funkcji czasu τ , uzyskane dla stałej prędkości głównej v umożliwiającej oszacowanie przemieszczania się wirów Karmana. W Tabeli 3 podane zostały powyższe dane.

W przepływach turbulentnych w tunelu, na drodze wiązki światła laserowego znajdują się wiry o różnych wielkościach i prędkościach przepływu. Istotne jest to, aby stało się możliwe zarejestrowanie takiego procesu, a w następnej kolejności właściwa jego interpretacja. Z pewną pomocą może przyjść transformata Fouriera co zostanie zaprezentowane w kolejnej pracy poświęconej zastosowaniu metody optyki koherentnej w badaniach przepływu turbulentnego.

5. WNIOSKI

Przeprowadzony eksperyment obserwacji wirów Karmana w przepływie podkrytycznym z wykorzystaniem wąskiej wiązki laserowej potwierdził skuteczność obserwacji wirów tą metodą. Dokładniejsza analiza procesów zachodzących w przepływach turbulentnych jest możliwa do przeprowadzenia po zwiększeniu częstości próbkowania ponad 1000Hz.

Analiza porównawcza parametrów charakteryzująca powstanie wirów Karmana i ich przepływ wykazała, że rozbieżność pomiędzy uzyskanymi wielkościami osiągającą wartości od 2 do 11% (wariant b) a w przypadku wariantu

a, przy prędkości napływu $V=3m/s$ różnica jest znacznie większa i osiąga poziom 40%. Liczba Strouhala dla wariantu a i b wahała się od $0,17 \div 0,29$. Wynika to z przemieszczania się wirów o różnej wielkości przez wiązkę światła laserowego. Otrzymane dane z badań wskazują na możliwość zastosowania metody optyki koherentnej do obserwacji powstawania i zaniku wirów w nieustalonych przepływach.

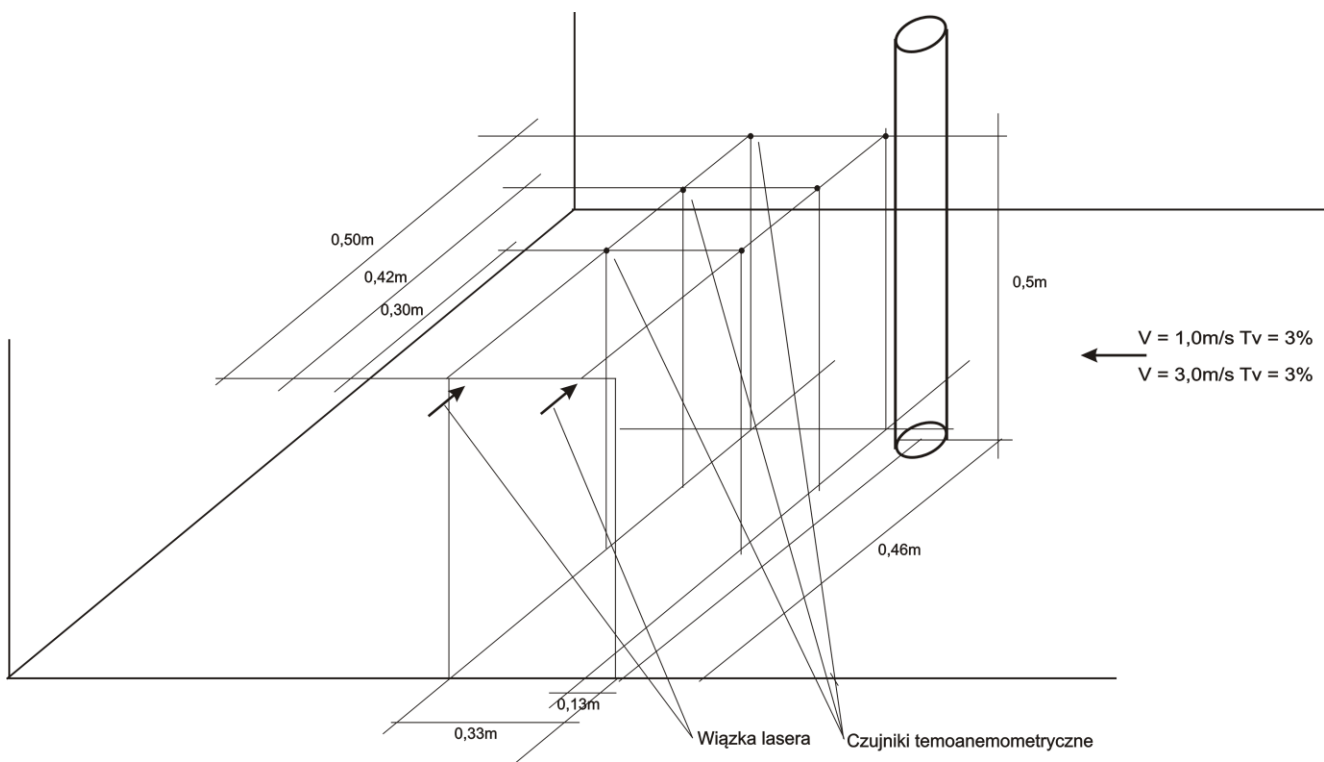
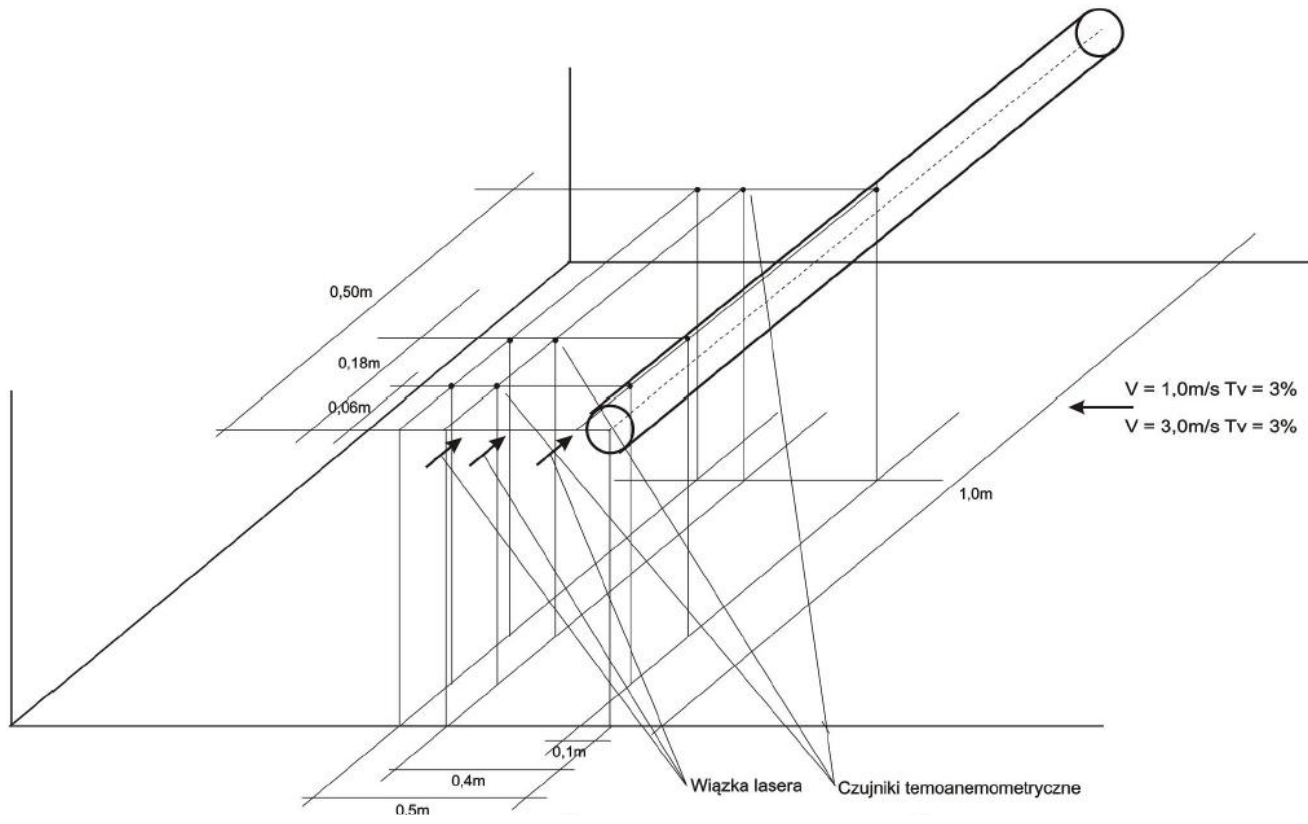
Wskazane są dalsze badania i doskonalenie układów pomiarowych dla uzyskania pełniejszych danych o przepływach turbulentnych w rzeczywistych strukturach inżynierskich.

APPLICATION OF NARROW LASER BEAM IN SMALL VORTICES ANALYSES

Summary: The paper presents possible application of laser beam in observation of small vortices. The experimental research was conducted in wind tunnel. This allowed the air velocity to be controlled. Study of the turbulent flow of air stream around an object was performed with application of laser beam parameters.

Literatura

- [1] 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
- [2] Hill R.J., *Review of optical scintillation methods of measuring the refractive – index spectrum, inner scale and surface fluxes*. Waves in Random Media, vol. 2, No 3, (1992) 179-201
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] Klemm K. *Obserwacja turbulentnego przepływu strugi powietrza przez przeszkodę o określonej perforacji*. Budownictwo Niskoenergetyczne IX Międzynarodowe Seminarium Naukowe Techniczne ENERGOPOM (2008) 221-228
- [7] Klemm K. *O możliwości wykorzystania wiązki światła laserowego do oceny podstawowych parametrów turbulencji optycznej za pomocą dwóch różnych podejść*. . Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, tom III (2008) 35-42
- [8] Flaga A. *Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania*. Arkady, Warszawa 2008



Rys.1. Usytuowanie wiązek światła laserowego i czujników termooanemometrycznych
 Fig.1. Location of the laser beam and thermoanemometers

Tabela 1. Wartości średnie prędkości i intensywności turbulencji wariant a i b
 Table 1. Values of mean velocity and turbulence intensity for case a and b

Wariant	Numer czujnika	Odległość czujników od walca [m]	Prędkość średnia wirów v_w [m/s]	Intensywność turbulencji T_{v_w} [%]	Prędkość średnia napływu V [m/s]	Intensywność turbulencji napływu T_v [%]	
a	14	0,10	0,7	22	1,0	3	
	13		0,7	19			
	11		0,7	16			
	14	0,30	0,7	17			
	13		0,6	23			
	11		0,6	18			
	14	0,40	0,5	24			
	13		0,4	21			
	11		0,4	22			
	b	14	0,10	2,0	16	3,0	3
		13		2,1	12		
		11		1,9	14		
14		0,30	1,8	13			
13			1,6	15			
11			1,6	15			
14		0,40	1,5	15			
13			1,3	13			
11			1,3	17			
b	14	0,13	0,8	20	1,0	3	
	11		0,7	10			
	13		0,9	6			
	14	0,33	0,9	18			
	11		0,7	16			
	13		1,0	5			
	14	0,13	2,7	9	3,0	3	
	11		2,4	5			
	13		3,0	2			
	14	0,33	2,5	7			
	11		1,9	7			
	13		3,0	2			

Tabela 2. Wartości średnie natężenia wiązki laserowej, odchylenia standardowego, intensywności turbulencji i średniego kąta wychylenia dla wariantu a i b

Table 2. Values of mean intensity of laser beam, standard deviation, turbulence intensity and mean deflection angle for case a and b

Wariant	Odległość wiązki od walca [m]	Prędkość średnia napływu V [m/s]	Średnia wartość natężenia światła lasera $\langle I \rangle$ (V)	Odchylenie standardowe $\sigma_I \times 10^{-3}$ (V)	Intensywność turbulencji wiązki laserowej $T_I \times 10^{-3}$	Średnia kąta wychylenia wiązki $\theta \times 10^{-6}$ [rad]
a	0,10	1,0	1,55	10,9	7,0	+13,5
	0,30		3,27	9,1	2,7	+2,5
	0,10	3,0	1,58	19,4	12,3	+20,5
	0,30		3,31	35,0	10,6	+6,8
b	0,13	1,0	2,64	68,1	25,7	+10,2
	0,33		3,22	3,9	1,2	-0,97
	0,13	3,0	2,55	51,4	20,1	-2,05
	0,33		3,25	7,9	2,4	+2,27

Tabela 3. Średnia prędkość przemieszczania się wirów V_w , częstotliwość pojawiania się wirów f , odległość między wirami Δx

Table 3. Mean velocity of the vortices V_w , frequency of occurrence of vortices f , distance between vortices Δx

Wariant	Odległość wiązki od walca [m]	Prędkość średnia napływu V [m/s]	Prędkość średnia przemieszczania się wirów V_w [m/s]	Średnia częstotliwość powstawania wirów f (Hz)	Średnia odległość między wirami Δx [m]
a	0,10	1,0	0,7	2,0	0,35
	0,30		0,6	1,6	0,38
	0,10	3,0	2,0	3,3	0,60
	0,30		1,7	3,0	0,53
b	0,13	1,0	0,5	1,2	0,38
	0,33		0,5	1,2	0,42
	0,13	3,0	1,3	3,4	0,39
	0,33		1,4	3,4	0,42