BUDOWNICTWO		1-B/2009
CZASOPISMO TECHNICZNE	WYDAWNICTWO	ZESZYT 5
TECHNICAL TRANSACTIONS	POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ	ROK 106 ISSUE 5
CIVIL ENGINEERING		YEAR 106

## KATARZYNA KLEMM\*

# **OBSERWACJA TURBULENTNEGO PRZEPŁYWU** STRUGI POWIETRZA PRZEZ PRZESZKODE O OKREŚLONEJ PERFORACJI

# **OBSERVATION OF TURBULENT AIR FLOW** THROUGH OBSTACLE WITH DEFINITE PERFORATION

### Streszczenie

W artykule podjęto próbę zastosowania wiązki światła laserowego do oceny struktury optycznej turbulentnego przepływu powietrza przez ekran wiatrowy usytuowany w tunelu aerodynamicznym. Badaniom poddany był ekran o stopniu perforacji 42% i wielkości pojedynczego otworu  $\phi = 8$  mm. Pomiar prowadzony był w odległości 5 cm i 50 cm od ekranu, zarówno po stronie dowietrznej, jak i zawietrznej. Analizy prowadzono dla różnych prędkości

napływającego strumienia powietrza:  $\overline{V} = 0.5$  m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s, 2,0 m/s i 2,5 m/s.

Wyznaczenie współczynnika struktury optycznej dla wspomnianych wyżej wariantów dało obraz kształtowania się przepływu turbulentnego za ekranem o określonej perforacji. Możliwość obserwowania i opisania przepływu turbulentnego ma szczególne znaczenie przy kształtowaniu korzystnych warunków wietrznych w zwartych strukturach zabudowy. Słowa kluczowe: przepływ turbulentny, wiązka laserowa, ekran wiatrowy

Abstract

The paper presents the possibility of laser beam application in turbulence structure assessment of the flow through wind screen located in wind tunnel. The perforation of the screen was 40% and the diameter of the single hole 8 mm. The measurements were carried out in the distance of 5 cm and 50 cm from the screen in inflow and outflow zone. Analysis have been done for different air velocity: 0.5 m/s; 1 m/s; 1.5 m/s; 2 m/s and 2.5 m/s. Determination of refractive index structure coefficient allows more accurate description of turbulent flow behind the screen of certain perforation. Possibilities of observation and description of turbulent flow is especially important in creation of comfortable wind environment in built up areas.

Keywords: turbulent flow, laser beam, wind screen

<sup>\*</sup> Dr Katarzyna Klemm, Instytut Architektury i Urbanistyki, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka.

1. Wstęp

Strumień powietrza napływający na szczelną przeszkodę ulega znacznym deformacjom, widocznym w odległości równej kilku wysokościom przeszkody. Przykładem takiej sytuacji może być obiekt budowlany wywołujący pewne efekty aerodynamiczne w jego bezpośrednim otoczeniu, znane i opisywane w literaturze. Obecnie coraz częściej podejmowane są próby analizy przepływu powietrza w pobliżu ekranów akustycznych czy wiatrowych. W celu uzyskania korzystnych warunków komfortu wietrznego w pobliżu tych obiektów istotne stają się informacje o powstawaniu stref dyskomfortu, a w szczególności o możliwościach ich eliminowania. Badania nad wpływem struktury geometrycznej ekranów wiatrowych prowadzone były przez wielu autorów [1, 2].

W artykule ograniczono się do analizy turbulencji optycznej powstającej po obu stronach ekranu o określonej przepuszczalności. Obserwacje prowadzone były w tunelu umożliwiającym wywołanie strumienia powietrza o różnej prędkości. Badania struktury optycznej turbulencji wykonano z wykorzystaniem elektrooptycznego systemu pomiarowego. Uzyskane wyniki pozwoliły na wyznaczenie współczynnika struktury optycznej turbulencji  $C_n$  w płaszczyźnie poziomej, znajdującej się w połowie wysokości przekroju poprzecznego tunelu. Wartości współczynnika  $C_n$  wyznaczono dla różnych prędkości napływającego strumienia powietrza, tj. od 0,5 m/s do 2,5 m/s i w różnych odległościach od ekranu perforowanego.

## 2. Turbulencja optyczna

Zależność współczynnika załamania światła n od koncentracji molekuł opisuje prawo Lorenza–Lorenta [3]. W wypadku powietrza współczynnik ten jest liniowo zależny od koncentracji cząstek gazu c (liczba molekuł w jednostce objętości)

$$n \approx \frac{3}{2}c \cdot \operatorname{const}(f) + 1$$

gdzie const (f) to stała zależna od częstości światła.

W warunkach równowagi termodynamicznej, bez wymuszonego przepływu, lokalne fluktuacje koncentracji molekuł gazu są niewielkie. Sytuacja wygląda inaczej, gdy gaz jest w ruchu, w szczególności gdy warunki lokalne, wywołane zmianami ciśnienia i temperatury, powodują zmiany przepływu strumienia gazu. Korzystając z równania Clapeyrona, zależność koncentracji cząstek od obu czynników można przedstawić w prostej postaci

$$c = \frac{1}{K} P T^{-1}$$

gdzie:

P-ciśnienie gazu,

T – temperatura bezwzględna gazu,

*K* – stała Boltzmana.

Po zróżniczkowaniu powyższego równania względem ciśnienia i temperatury okazuje się, że wpływ zmian ciśnienia i temperatury wywołuje koncentrację cząstek gazu *c*, a tym samym współczynnika załamania światła *n*.

96

W każdym gazie w stanie równowagi termodynamicznej występują niewielkie fluktuacje gęstości, wywołane naturalnym, bezwładnym ruchem każdej cząstki. W wypadku lokalnego zaburzenia w postaci różnicy ciśnień czy temperatur pojawiają się dodatkowe bodźce, które generują obszary o zmienionej w stosunku do otoczenia gęstości, a tym samym wpływają na zmiany współczynnika załamania światła *n*.

Wiązka światła laserowego przechodząca przez ośrodek, w którym występują gradienty współczynnika załamania, doznaje zniekształcenia, powodującego zmiany rozkładu amplitudy i fazy wektora natężenia pola elektromagnetycznego. W efekcie dochodzi do zmiany rozkładu natężenia światła w przekroju poprzecznym wiązki. Następują poszerzenie przekroju poprzecznego wiązki i zmiana kierunku propagacji światła laserowego.

Turbulencja optyczna opisywana jest głównie przez tzw. współczynnik załamania struktury  $C_n^2$ , będący amplitudą fluktuacji współczynnika załamania światła, oraz przez skalę wewnętrzną  $l_o$ , związaną z przerwaniem widma przy wysokich częstościach. Znajomość  $C_n^2$  i  $l_o$  może być wykorzystana do przewidywania zachowania się systemu elektro-optycznego, wrażliwego na wpływ turbulencji optycznej.

W dalszej części artykułu zostanie zastosowana analiza dotycząca zmian kątowych i "tańczenia" wiązki światła laserowego, przedstawiona w pracy [4]. Opisu zmian kątowych współczynnika załamania za pomocą funkcji korelacji typu gausowskiego i optyki geometrycznej dokonali wcześniej Chernor i Beckam [4]. Ostatnio stwierdzono, że współczynnik załamania może być reprezentowany przez funkcję strukturalną typu Kolmogorowa z wystarczającym przybliżeniem. Chib [4] wykorzystał równanie promienia do analizy wahań kątowych wiązki światła laserowego i przedstawił średnie odchylenie kwadratowe  $\overline{\Delta\theta^2}$  promienia od kierunku początkowego, po przejściu przez ścieżkę o długości  $\Delta l$ .

Zakładając, że wpływ wielkości turbulencji na wahania kątowe i tzw. tańczenie całej wiązki laserowej jest większy niż rozmiar wiązki  $\omega_o$  oraz że stała strukturalna  $C_n^2$  i rozmiar wiązki  $\omega_o$  są stałe wzdłuż całej ścieżki, wtedy średnie odchylenie kwadratowe wahań kątowych w obrębie ścieżki *L* może być przedstawione w postaci

$$\sigma\overline{\theta^2} = 5.7C_n^2 L \left( \omega_o^{-\frac{1}{3}} - L_o^{-\frac{1}{3}} \right)$$

gdzie  $L_o$  oznacza zewnętrzną skalę turbulencji, a  $\omega_o \ll L_o$ .

Błąd spowodowany przybliżonym podejściem szacowany jest jako  $C_n^2 L L_o^{-\frac{1}{2}}$ . Natomiast "tańczenie" wiazki światła laserowego może być przedstawione za pomoca równania

$$\sigma_p^2 = 1,90C_n^2 L^3 \omega_o^{-\frac{1}{3}}$$

gdzie  $\omega_o^2 = \frac{4\lambda L}{\pi}$ , a  $\lambda$  to długość fali świetlnej.

97

98

Przyjmując dalej, że  $\sigma_p^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 = 2\sigma_x^2$ , wtedy składową  $\sigma_x$  zapisać można w postaci

$$\sigma_x^2 = \frac{1.83}{2} C_n^2 \lambda^{-\frac{1}{6}} \cdot L^{\frac{17}{6}} \text{ [m]}$$

Równanie powyższe podane przez Chiba [4] będzie podstawą dalszych rozważań, pozwoli wyznaczyć współczynnik struktury optycznej  $C_n^2$  dla turbulentnego przepływu powietrza w tunelu aerodynamicznym.

#### 3. Eksperyment

Eksperyment z propagacją wiązki światła lasera prowadzony był na długości 1,0 m w przekroju poprzecznym tunelu aerodynamicznego, na 1/2 wysokości tunelu. W badaniach jako źródła światła użyto lasera półprzewodnikowego o mocy 14 mW, emitującego falę świetlną o długości  $\lambda = 640$  nm, ze specjalnym układem optycznym dającym quasi-równoległą wiązkę światła. Do detekcji natężenia światła zastosowano fotodiodę BPYP17. Laser i fotodioda były umieszczone na wspólnej, sztywnej ramie, która nie miała bezpośredniego kontaktu z konstrukcją tunelu. Wiązka światła laserowego biegła prostopadle do osi tunelu aerodynamicznego przez wydrążone w jego ścianach bocznych otwory o średnicy 5 mm.

Strumień powietrza o różnej prędkości wymuszonego przepływu uzyskiwano z zastosowaniem czterech wentylatorów z możliwością regulacji gęstości strumienia. Ścieżka wiązki światła laserowego znajdowała się w odległości 2,5 m od kraty wlotowej powietrza do kanału. Pomiary prowadzono dla średniej prędkości strumienia powietrza  $\overline{V} = 0.5$ m/s, 1,0m/s, 1,5m/s, 2,0m/s i 2,5m/s.

Badania ukierunkowane były głównie na oszacowanie zmian wartości stałej strukturalnej  $C_n^2$  w strefach dowietrznej i zawietrznej ekranu o stopniu perforacji 42% i wielkości pojedynczego otworu  $\phi = 8$  mm (por. rys. 1).



Rys. 1. Usytuowanie ścieżki wiązki światła laserowego po stronach dowietrznej i zawietrznej ekranu Fig. 1. Position of the laser beam path on the leeward and windward side of the screen

Pomiar prowadzono z wykorzystaniem elektrooptycznego systemu, przyjmując przebieg wiązki światła laserowego w odległościach 5 cm i 50 cm od ekranu.

Sygnał elektryczny wychodzący z fotodiody, wywołany oświetleniem wiązką laserową, kierowano do przetwornika analog-cyfra (PAC) z pamięcią sterowaną przez komputer. Powyższy układ umożliwiał rejestrację natężenia światła w funkcji czasu w odstępach 50 ms. Czas pomiaru był stały i wynosił 5 mikrosekund. Dzięki zastosowaniu specjalnego programu możliwe było zarejestrowanie i zapamiętanie ok. 30–35 tys. punktów pomiarowych.

W pierwszym etapie przeprowadzono pomiar natężenia wiązki światła laserowego spolaryzowanego w przekroju wiązki. Widmo natężenia światła laserowego zastosowanego lasera półprzewodnikowego przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Widmo wiązki światła laserowego Fig. 2. Spectrum of the laser beam

Interesującą nas część widma, dotyczącą głównie płaszczyzny sygnałów odbieranych, wykorzystaną w układzie pomiarowym, zaznaczono na rys. 2. Zastosowany układ optyczno-elektryczny pozwolił na rejestrację natężenia światła laserowego padającego na fotodiodę.

#### 4. Wyniki badań i dyskusja

Wraz z dokonaniem pomiaru wielkości natężenia światła laserowego *I* dla różnych stanów wymuszonego ruchu powietrza w tunelu, jak również stanu zerowego  $I_o$ (tj. swobodnego ruchu powietrza), wyznaczone zostały średnie wartości natężenia światła laserowego *I* oraz średnie odchylenia standardowe fluktuacji wiązki lasera  $\sigma_I$  w obrębie ścieżki *L*.

Dysponując powyższymi wielkościami, wyznaczono intensywność fluktuacji natężenia światła laserowego  $\sigma_l/I$  oraz stosunek  $I/I_o$ .

Dzięki wykorzystaniu danych dotyczących widma przedstawionego na rys. 2 oraz wynikom prowadzonego eksperymentu, tj. wartościom średnim natężenia światła *I* oraz odchyleniom standardowym  $\sigma_I$  różnych stanów wymuszonego i swobodnego ruchu powietrza, możliwe stało się określenie średniego wychylenia wiązki światła laserowego  $\Delta x$  na długości *L* oraz kwadratu odchylenia standardowego  $\sigma_x^2$  (por. rozdz. 2).

W tabeli 1 zamieszczono wyniki badań przeprowadzonych w tunelu aerodynamicznym dla wymuszonego ruchu powietrza, przy średnich prędkościach strumienia napływającego  $\overline{V} = 0.5$ m/s, 1.0m/s, 1.5m/s, 2.0m/s i 2.5m/s.

Tabela 1

Odległość wiązki lasera od ekranu <i>d</i> [cm]	Prędkość średnia strumienia napływającego $\overline{V}~[m/s]$	Wskaźnik przyrostu natężenia światła laserowego $\langle I \rangle / \langle I_o \rangle$	Intensywność fluktuacji wiązki laserowej $\sigma_I / I0^3$
Strefa napływu	0,5	0,995	0,525
	1,0	0,996	0,985
<i>d</i> = 50	1,5	1,000	1,005
	2,0	1,001	1,545
	2,5	1,001	2,880
Strefa napływu d = 5	0,5	1,028	1,479
	1,0	1.029	1,002
	1,5	1,032	1,909
	2,0	1,039	3,048
	2,5	1,042	3,789
	0,5	1,002	1,644
Strefa odpływu $d = 5$	1,0	0,95	1,510
	1,5	0,995	3,352
	2,0	0,996	4,823
	2,5	0,995	5,759
Strefa odpływu d = 5	0,5	1,020	0,746
	1,0	1,021	0,920
	1,5	1,022	1,138
	2,0	1,021	1,526
	2,5	1,019	2,650

Intensywność fluktuacji natężenia światła laserowego i wskaźnika przyrostu natężenia światła

Średnie wychylenie wiązki światła laserowego  $\Delta x$  można oszacować, korzystając z poniższej zależności

$$\Delta x = 0,35 \begin{bmatrix} \langle I \rangle \\ / \langle I_o \rangle \\ -1 \end{bmatrix} \text{[mm]}$$

Natomiast średnią wartość odchylenia standardowego <br/>  $\sigma x$ wyznaczymy, korzystając z wzoru

$$\sigma_{x} = 0.35 \left( \frac{\sigma_{I}}{\langle I_{o} \rangle} \right) \left( \frac{\langle I \rangle}{\langle I_{o} \rangle} \right) \text{ [mm]}$$

Wykorzystując przybliżoną zależność na  $\sigma_x^2$  podaną przez Chiba i wyznaczone z eksperymentu wartości  $\sigma_x$ , można było wyznaczyć współczynnik struktury optycznej  $C_n^2$  dla wspomnianych wcześniej ścieżek pomiarowych zlokalizowanych przed ekranem i za nim. W tabeli 2 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych.

Tabela 2

101

Miejsce pomiaru Odległość wiązki od ekranu [cm]	Prędkość średnia V [m/s]	Wychylenie wiązki światła laserowego $\Delta x \text{ [mm]} \cdot 10^{-3}$	Średnia wartość odchylenia standardowego $\sigma_x [mm] \cdot 10^3$	Współczynnik struktury optycznej $C_n  [\mathrm{m}^{-1/3}] \cdot 10^8$		
Strefa napływu	0,5	0,183	-0,0017	5,8		
	1,0	0,343	-0,0015	10,9		
	1,5	0,352	0,0000	11,2		
d = 50  cm	2,0	0,541	+0,0005	17,2		
	2,5	1,010	+0,0004	32,1		
d = 5  cm	0,5	0,532	+0,0098	16,9		
	1,0	0,361	0,0104	11,5		
	1,5	0,689	0,0113	21,9		
	2,0	1,1085	0,0137	35,5		
	2,5	1,3815	0,0145	43,9		
ekran						
	0,5	0,5768	0,0008	18,4		
Strefa	1,0	0,5257	-0,0018	16,7		
odpływu	1,5	1,1669	-0,0018	37,2		
d = 5  cm	2,0	1,6811	-0,0014	53,5		
	2,5	2,0058	-0,0017	63,9		
d = 50  cm	0,5	0,2660	+0,0070	8,5		
	1,0	0,3290	+0,0074	10,5		
	1,5	0,4067	+0,0075	12,9		
	2,0	0,5454	+0,0074	17,4		
	2,5	0,9460	+0,0067	30,1		

Średnie wartości współczynnika struktury optycznej  $C_n$  w strefie napływu i odpływu

Z przytoczonych wartości wychylenia wiązki światła laserowego wynika, że na linii przebiegu wiązki występują różne gradienty gęstości powietrza, co powoduje różne wartości wychylenia  $\Delta x$ . Wartości ujemne  $\Delta x$  wskazują na przewagę ruchu powietrza w kierunku przeciwnym w stosunku do wymuszonego ruchu. Efekt ten jest wyraźnie zaznaczony w odległości 5 cm od ekranu.

Nieco inną sytuację rejestrujemy w odległości d = 50 cm, w strefie odpływu (za ekranem), gdzie obserwujemy pewne uspokojenie strumienia powietrza (niższe wartości  $\Delta x$ ). Również współczynnik struktury optycznej  $C_n$  turbulentnego przepływu powietrza wykazuje wyraźnie niższe wartości w stosunku do wielkości C<sub>n</sub> uzyskanych w odległości 5 cm od ekranu. Powyższy wynik wskazuje, że można uzyskać obniżenie intensywności turbulentnego przepływu powietrza w niewielkiej odległości od ekranu w zakresie prędkości 0,5-2,5 m/s.

Wysokie wartości współczynnika struktury optycznej  $C_n$  wystąpiły w odległości d = 5 cm. Notowane tu wartości są dwa, trzy razy wyższe od wartości współczynnika w odległości d = 50 cm. Należy również zwrócić uwagę na wyższe wartości średniego odchylenia standardowego  $\sigma_x$  w odległości d = 5 cm zarówno w strefie napływu, jak i odpływu (por. tab. 2).

Interesujący charakter zależności występuje pomiędzy współczynnikiem struktury optycznej  $C_n$  w funkcji średniej prędkości napływającego strumienia powietrza V, tak po stronie napływu, jak i odpływu (por. rys. 3).



Rys. 3. Zależność współczynnika  $C_n$  od średniej prędkości napływu Fig. 3. Refractive index structure coefficient  $C_n$  as a function of inflow mean velocity

Z przedstawionej współzależności można odczytać pewną wartość progową prędkości *V*, po przekroczeniu której następuje wzrost amplitudy fluktuacji wiązki światła laserowego, co odpowiada wzrostowi turbulentnego przepływu powietrza.

## 5. Wnioski

Przeprowadzony eksperyment wykazał, że istnieje możliwość zastosowania wiązki światła laserowego na niewielkiej odległości jej propagacji. Zwiększenie długości ścieżki propagacji *L* spowoduje zwiększenie wrażliwości zastosowanego układu optycznoelektrycznego na zmiany gęstości powietrza.

Ponadto przeprowadzone pomiary wskazują na możliwość oceny intensywności fluktuacji turbulentnego przepływu strumienia powietrza, jak również obserwowania jego głównych kierunków na długości wiązki laserowej *L*.

Zastosowany układ pomiarowy daje możliwość oszacowania wielkości współczynnika struktury termicznej  $C_T$  na długości wiązki oraz dyssypacji energii kinetycznej turbulencji  $\varepsilon$  przepływu powietrza w badaniach laboratoryjnych, jak również w skali naturalnej.

## Literatura

- [1] Klemm K., Jabłoński M., *Effect of windbreak on the wind flow in a small existing urban structure*, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Building Physics. Research in Building Physics, Antwerpen, Belgium 2003, 973-980.
- [2] L i W., W a n g F., Bell S., *Windbreak sheltering effects on outdoor open space*, Eight International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands 2003, 721-727.

## 102

- [3] Klemm K., Pieszyński K., Rożniakowski K., *Examination of air density fluctuations with the aid of laser beam*, Optica Applicata, Vol. XXXVII, No. 3, 2007.
- [4] Chiba T., Spot dancing of the laser beam propagated through the turbulent atmosphere, Applied Optics, Vol. 10, No. 11, 1971.

