

## O MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA WIĄZKI ŚWIATŁA LASEROWEGO DO OCENY PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW TURBULENCJI OPTYCZNEJ ZA POMOCĄ DWÓCH RÓŻNYCH PODEJŚĆ

Katarzyna KLEMM\*

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

**Streszczenie:** W pracy przedstawione zostały dwa podejścia związane z wyznaczeniem podstawowych parametrów turbulencji optycznej, tj. współczynnika załamania struktury  $C_n^2$  i skali wewnętrznej  $l_0$ . Omówione podejścia związane są z wykorzystaniem wąskiej wiązki światła laserowego. Obydwa rozwiązania mogą być stosowane dla krótkich ścieżek światła laserowego. Pierwsza metoda, zaproponowana przez Consortini oparta jest na pomiarach różniczkowego kąta nadejścia. Druga zaś, będąca propozycją Autorki wykorzystuje kąt wychylenia wiązki laserowej. W celu porównania obydwóch podejść przeprowadzona została weryfikacja, w której wykorzystano wyniki eksperymentalnych badań z tunelu.

**Słowa kluczowe:** turbulencja, światło laserowe, tunel aerodynamiczny, kąt nadejścia, kąt wychylenia wiązki.

### 1. WPROWADZENIE

Turbulencja atmosferyczna odgrywa ważną rolę w kształtowaniu przebiegu różnych procesów fizycznych, w warstwach brzegowych. Szczególnego znaczenia nabiera ona w przestrzeniach zurbanizowanych, gdzie ma istotny wpływ na kształtowanie klimatu lokalnego. Zmniejszenie niekorzystnego wpływu turbulencji atmosferycznej ma istotne znaczenie dla człowieka. Podejmowane były w przeszłości i aktualnie prowadzone są badania z wykorzystaniem wiązki światła laserowego. Turbulencja atmosferyczna powoduje fluktuacje lub scyntyłację intensywności wiązki światła laserowego, wędrówkę wiązek, odkształcenie i przypadkowe przemieszczenia obrazów. Wpływ optyczny turbulencji atmosferycznej zależy głównie od parametrów współczynnika załamania struktury  $C_n^2$ , który jest amplitudą fluktuacji współczynnika załamania  $\eta$  i skali wewnętrznej  $l_0$ , będącą skalą w której energia ulega dyssypacji.

### 2. PODSTAWOWE RÓWNANIA

Metody pomiaru wewnętrznej skali turbulencji można podzielić w zależności od wielkości związanych z amplitudą i fazą. Standardowe metody bazują na scyntyłacji laserowej [1], która jest wielkością związaną z amplitudą. Metody te są stosowane w przypadku ścieżek o długości powyżej 100m. W przypadku krótszych ścieżek stosowane są metody oparte na wielkościach związanych z fazą. Przydatność ich została wskazana w pracy [2], gdzie podkreślono wykorzystanie fluktuacji bocznych (rozproszonych) wąskiej ścieżki laserowej, wykazując dużą wrażliwość w przypadku krótkiej ścieżki, gdzie rozproszenie zależy od długości ścieżki  $L$  oraz  $L^3$ .

Zastosowanie wąskiej wiązki jest jednakże ograniczone do przypadków w których aproksymacja optyki geometrycznej jest wystarczająca. Aby pokonać te ograniczenia przy pomiarach skali wewnętrznej turbulencji, tj. dla pośrednich długości ścieżki opracowana została przez Consortini metoda oparta na pomiarach różniczkowego kąta nadejścia por. [3].

W metodzie tej wykorzystano zarówno wielkości zależne od amplitudy (intensywności) jak również wielkości zależne od fazy (kąta nadejścia).

Zastosowanie kąta nadejścia nie jest ograniczone warunkami geometrii optycznej a wykorzystanie aproksymacji Rytova pozwala zwiększyć zakres stosowania metody do średniej długości ścieżek por. [3]. Różniczkowy kąt nadejścia w danym punkcie, zakłóconego turbulencją czoła fali definiowany jest jako kąt zawarty pomiędzy prostopadłą do czoła, w rozpatrywanym punkcie a niezakłóconym kierunkiem propagacji. Wariacje poziomej i pionowej składowej kąta nadejścia mogą być uzyskane

jako pochodne fazowej funkcji strukturalnej. W przypadku fali płaskiej, rozprzestrzeniającej się przez jednorodną i izotropową turbulencję i w obrębie aproksymacji geometrii optycznej tj. gdy  $L \leq l_o^2/\lambda$ , gdzie L – długość ścieżki,  $\lambda$  - długość fali światła laserowego,  $l_o$  – skala wewnętrzna, średnia kwadratowa fluktuacji kąta nadejścia wyrażona jest przez

$$\langle \alpha^2 \rangle = \langle \beta^2 \rangle = 3,28 C_n^2 L l_o^{-7/3} \quad (1)$$

gdzie:  $C_n^2$  - stała strukturalna

Przytaczając w dalszym ciągu za Autorami pracy [3] wyrażenie na znormalizowaną średnią kwadratową intensywności fluktuacji wiązki światła laserowego, przedstawioną przez Tatarskiego [4] mamy

$$\sigma_I^2 = 12,8 C_n^2 L^3 l_o^{-7/3} \quad (2)$$

gdzie:  $\sigma_I^2 = (\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2) / \langle I \rangle^2$

a I – natężenie światła laserowego

Wykorzystując równanie (1) i (2) możemy uzyskać wyrażenie na skalę wewnętrzną (turbulencji)  $l_o$  w postaci por. [3]

$$l_o = 1,97 L \sqrt{\frac{\langle \alpha^2 \rangle}{\sigma_I^2}} \quad (3)$$

które obowiązuje w obrębie geometrii optycznej ( $l_o^2 \geq \lambda L$ )

Przy założeniu, że długość ścieżki wynosi  $L = 10\text{m}$  i długość fali światła laserowego  $\lambda = 0,633 \times 10^{-6}\text{m}$ , graniczna wartość skali wewnętrznej turbulencji będzie kształtowała się na poziomie  $l_o = 0,796 \times 10^{-3}\text{m}$ , zaś stosunek średniej kwadratowej intensywności fluktuacji wiązki laserowej winien spełniać warunek  $\langle \alpha^2 \rangle / \sigma_I^2 \geq 0,163 \times 10^{-6}$

Przechodząc do pewnej własnej propozycji rozpatrzmy rozprzestrzeniającą się falę płaską, jednorodną i izotropową turbulencję, spełniając warunek  $l_o^2 \geq \lambda L$ , podamy wyrażenie na średnią kwadratową fluktuacji kąta wychylenia wiązki  $\langle \theta^2 \rangle$

Składowe pozioma i pionowa kąta wychylenia  $\theta_x$  i  $\theta_y$  mogą być uzyskane jako pochodne fazowej funkcji strukturalnej, stąd średnia kwadratowa kąta wychylenia może być zapisana

$$\langle \theta_x^2 \rangle = \langle \theta_y^2 \rangle = 1,10 C_n^2 L l_o^{-1/3} \quad (4)$$

Drugim ważnym wyrażeniem, nas interesującym będzie średnia kwadratowa intensywności fluktuacji składowej poziomej i pionowej wiązki laserowej  $\sigma_x^2$  i  $\sigma_y^2$ , która możemy zapisać w postaci

$$\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = 8,2 \times 10^{-2} C_n^2 L^3 l_o^{-7/3} \quad (5)$$

Dzieląc równanie (4) przez (5) uzyskamy wyrażenie na skalę wewnętrzną  $l_o$  w obrębie geometrii optycznej ( $l_o^2 \geq \lambda L$ )

$$l_o = 0,273 \times 10^{-3} L \sqrt{\frac{\langle \theta_x^2 \rangle}{\sigma_x^2}} \quad (6)$$

Przyjmując podobne założenia jak wyżej, tj.  $\lambda = 0,633 \times 10^{-6}\text{m}$  i  $L = 1,0\text{m}$  otrzymamy wartość  $l_o$  graniczne =  $0,796 \times 10^{-3}\text{m}$ . Stosunek  $\langle \theta_x^2 \rangle / \sigma_x^2$  winien spełniać warunek

$$\langle \theta_x^2 \rangle / \sigma_x^2 \geq 8,5$$

Korzystając z zależności (1), (2) i (3), przytoczonych z pracy [3] oraz zaproponowanych przez Autorkę wyrażen (4), (5) i (6) możemy wyznaczyć główne parametry, opisujące wpływ optyczny turbulencji atmosferycznej, tj.  $C_n^2$  i  $l_o$ . Znajomość tych parametrów pozwoli oszacować średnią wartość energii kinetycznej turbulencji i jej dysypację, wzdłuż ścieżki propagacji światła laserowego, jak również możliwa stanie się ocena turbulencji termicznej poprzez współczynnik struktury termicznej  $C_T^2$

Drugim ważnym przypadkiem jest sytuacja, kiedy długość ścieżki L jest większa niż  $l_o^2/\lambda$  i zawiera się w przedziale  $l_o^2/\lambda < L \leq l_o^4/\lambda^3$

Poniżej przytaczamy zależności przedstawione w pracy [3] dla kąta nadejścia i intensywności fluktuacji fali płaskiej, które uzyskano w obrębie granic aproksymacji Rytova i przy słabych intensywnościach fluktuacji  $\sigma_I^2 \leq 1$

$$\langle \alpha^2 \rangle = \langle \beta^2 \rangle = 1,64 C_n^2 L l_o^{-1/3} \quad (7)$$

$$\sigma_I^2 = 1,23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (8)$$

gdzie  $k = 2\pi/\lambda$  - współczynnik fali

Wyrażenie na skalę wewnętrzną ma postać

$$l_o = 2,37 k^{-7/2} L^{-5/2} \left( \frac{\sigma_I^2}{\langle \alpha^2 \rangle} \right)^3 \quad (9)$$

Poniżej przedstawiamy propozycję wyrażenia na średnią kwadratową kąta wychylenia i intensywności fluktuacji składowej poziomej i pionowej, w przypadku słabej intensywności fluktuacji  $\sigma_x^2 \leq 1$  i gdy długość ścieżki L zawiera się w przedziale

$$\langle \theta_x^2 \rangle = \langle \theta_y^2 \rangle = 0,64 C_n^2 L l_o^{-1/3} \quad (10)$$

$$\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = 8,7 \times 10^{-3} C_n^2 L^{11/6} k^{7/6} \quad (11)$$

W tym przypadku wyrażenie na skalę wewnętrzną przyjmuje postać

$$l_o = 32,7 \times 10^4 k^{-7/2} L^{-5/2} \left( \frac{\sigma_x^2}{\theta_x^2} \right)^3 \quad (12)$$

W dalszej części pracy dla celów porównawczych i pewnej weryfikacji wyznaczone zostaną podstawowe parametry turbulencji optycznej tj.  $C_n^2$  i  $l_o$ , przy wykorzystaniu przedstawionych wcześniej zależności

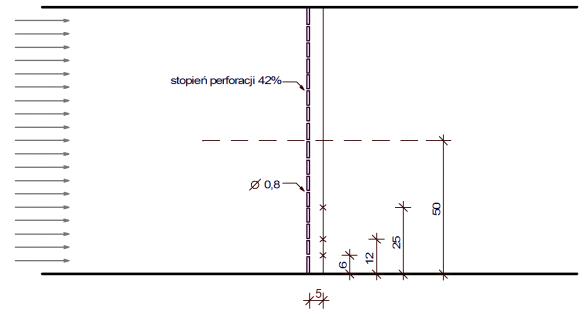
### 3. EKSPERYMENT

Analizę porównawczą dwóch podejść przeprowadzono wykorzystując wyniki badań z przeprowadzonego eksperymentu w tunelu aerodynamicznym. Elementem wywołującym dodatkowe efekty turbulentnego przepływu strumienia powietrza był ekran o gęstej perforacji, 42%, wzbudzający w miarę jednorodną i izotropową turbulencję po stronie odpływu. Wielkość otworów wynosiła  $\phi = 8\text{mm}$ .

Ekran wypełniał w całości pole przekroju tunelu o wymiarach 1,0 x 1,0m. Długość wiązki światła laserowego wynosiła 1,0m. W badaniu jako źródło światła użyto laser półprzewodnikowy o mocy 14mW, emitujący falę świetlną o długości  $\lambda = 0,640\text{nm}$ , ze specjalnym układem optycznym dającym quasi równoległą wiązkę światła. Do detekcji natężenia światła użyto fotodiody BPYP17. Laser i fotodiody były umieszczone na wspólnej sztywnej ramie, która nie miała bezpośredniego kontaktu z konstrukcją tunelu. Wiązka światła laserowego przebiegała prostopadłe do osi tunelu przez wydrążone w ścianach bocznych otwory o średnicy  $\phi = 8\text{mm}$ . Wymuszony przepływ powietrza o określonej gęstości strumienia uzyskiwano przy zastosowaniu czterech wentylatorów. Wiązka światła laserowego przebiegała w odległości 5cm od ekranu po stronie zawiętrznej.

Pomiary prowadzone były dla pięciu różnych średnich prędkości strumienia powietrza, ustalonych w połowie wysokości kanału. Badania prowadzone były wzdłuż

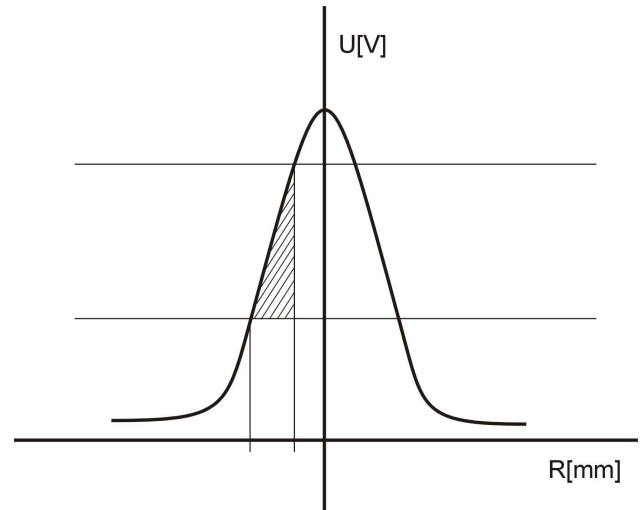
trzech ścieżek światła laserowego tj. na wysokości 6, 12 i 25cm od dolnej powierzchni kanału por. rys. 1



Rys. 1. Usytuowanie ścieżki wiązki światła laserowego za ekranem.

Fig. 1. Position of the laser beam paths behind the screen

Sygnal elektryczny wychodzący z fotodiody, wywołany oświetleniem wiązką laserową kierowano do przetwornika analog – cyfra (PAC), z pamięcią sterowaną przez komputer. W końcowym efekcie istniała możliwość rejestracji natężenia światła w funkcji czasu, w odstępach 50ms, a czas pomiaru był stały i wynosił 5 $\mu$ s. Wykorzystując specjalny program możliwe było zarejestrowanie i zapamiętanie około 35 tys. punktów pomiarowych. Widmo natężenia światła laserowego spolaryzowanego zastosowanego lasera półprzewodnikowego przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Widmo natężenia światła laserowego.

Fig. 2. Spectrum of the laser beam

W celu zastosowania obydwu propozycji wyznaczenia  $C_n^2$  i  $l_o$ , przedstawionych w p.2 pomiary przeprowadzono w dwu etapach. W pierwszym określone zostały wartości

fluktuacji natężenia światła laserowego, zarejestrowanego przez fotodiode, w odległości 1,0m od lasera. W drugim przypadku, poza wielkością fluktuacji natężenia światła w odległości 1,0m prowadzony był również pomiar natężenia wiązki światła laserowego po przejściu przez ciemną rurę, o długości  $d = 0,60\text{m}$ , osłaniającą przed wpływem zewnętrznym. W drugim etapie pomiarów uzyskano dane dla określenia wielkości przyjętych jako wielkości wyjściowe (bazowe), tj. odchyżeń standardowych fluktuacji wiązki światła laserowego  $\sigma_I$  oraz kąta nadejścia  $\alpha$ . Z pierwszego etapu pomiarów możliwe było ustalenie odchylenia standardowego składowej poziomej fluktuacji wiązki światła laserowego  $\sigma_x$  i kąta wychylenia  $\theta_x$ .

W następnym punkcie zamieszczone zostaną wyniki uzyskane dla dwu przedstawionych propozycji określania podstawowych parametrów turbulencji optycznej  $C_n^2$  i  $l_0$ , informujących o efektach występujących po stronie odpływu.

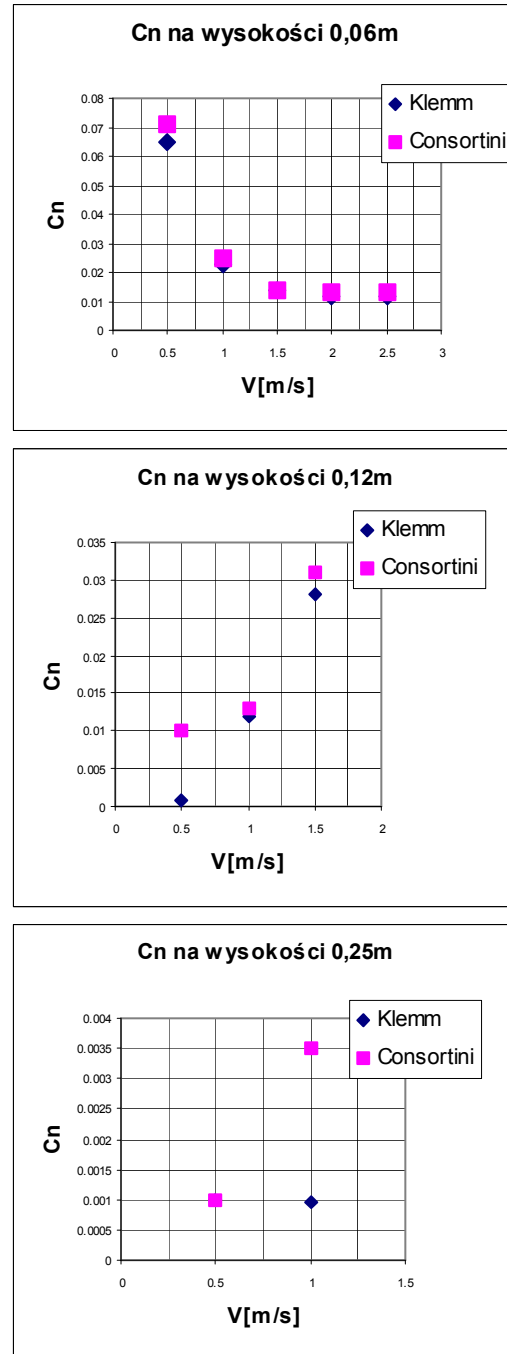
#### 4. WYNIKI BADAŃ

W kolejnych tabelach przedstawione zostaną wyniki uzyskane z badań turbulentnego przepływu strumienia powietrza, z wykorzystaniem wiązki światła laserowego, uwzględniając dwa omówione wcześniej podejścia.

W tabeli 1 zamieszczone zostały wyniki uzyskane dla wąskiej wiązki światła laserowego, przebiegającej na wysokości 0,06m od powierzchni dolnej kanału por.rys.1.

Przedstawione wyniki dotyczą obydwu podejść przy określaniu współczynnika struktury optycznej  $C_n^2$  i średniej skali wewnętrznej  $l_0$ . Wielkości wyznaczone, takie jak średnia kwadratowa intensywność fluktuacji wiązki światła laserowego  $\sigma_I^2$ , średnia kwadratowa fluktuacji kąta nadejścia  $\langle \alpha^2 \rangle$  oraz średnia kwadratowa intensywność fluktuacji składowej poziomej  $\sigma_x^2$  i średnia kwadratowa fluktuacji składowej poziomej kąta wychylenia wiązki  $\langle \theta_x^2 \rangle$  podane zostały dla średnich prędkości głównych w tunelu 0,5m/s; 1,0m/s; 2,0m/s i 2,5m/s.

W tablicach nr 2 i 3 podane zostały podstawowe wielkości wyjściowe dla wiązki światła laserowego przebiegającej na wysokości 0,12 i 0,25m nad powierzchnią dolną tunelu. Wykorzystując zależności przedstawione w punkcie 2 oraz dane, zamieszczone w tablicach 1,2,3 wyznaczono podstawowe parametry, takie jak: współczynnik załamania struktury  $C_n^2$  oraz średnia wielkość skali wewnętrznej  $l_0$ .



Rys.3. Wartości współczynnika załamania struktury  $C_n^2$  dla głównych prędkości napływającego strumienia w tunelu i trzech poziomów przebiegu ścieżki światła laserowego  $h = 0,06; 0,12$  i  $0,25\text{m}$ , ■ - wartości uzyskane wg Consortini, ◆ - wartości uzyskane wg Klemm

Fig. 3. Values of structure parameter of refractive index  $C_n^2$  for main air velocities and three locations of laser beam  $h = 0,06; 0,12$  and  $0,25\text{m}$ , ■ - values obtained by Consortini, ◆ - values obtained by Klemm

W tabeli 4 podane zostały wartości wspomnianych wyżej parametrów przepływu turbulentnego, wyznaczone na podstawie propozycji Consortini. W tabeli 5 zamieszczone zostały wielkości współczynnika struktury wewnętrznej  $C_n^2$  i średniej skali wewnętrznej  $l_0$  uzyskane w wyniku wykorzystania zależności przedstawionych przez Autora pracy.

## 5. DYSKUSJA I WNIOSKI

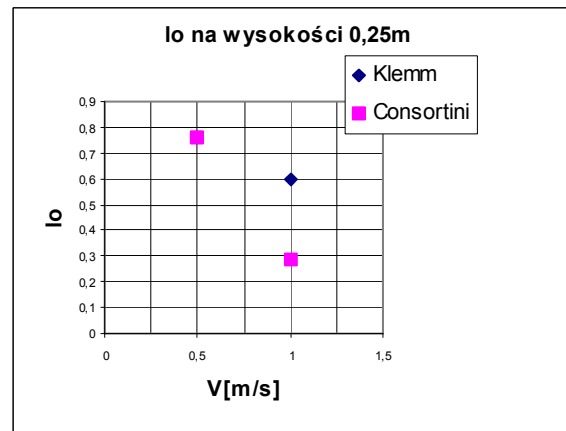
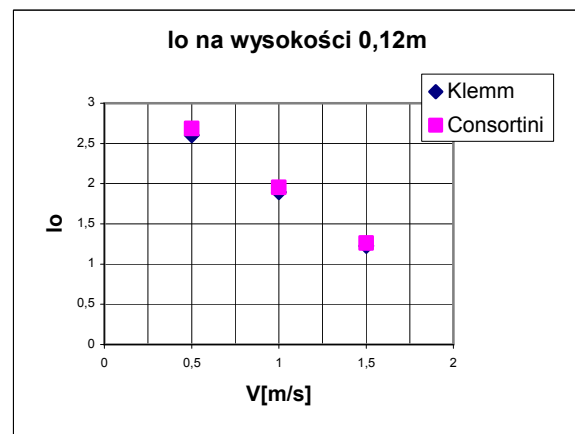
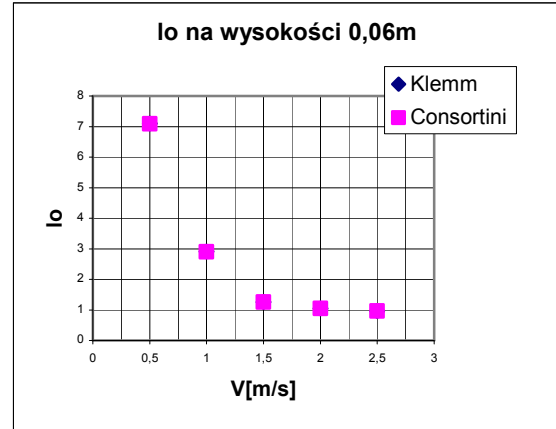
Dokonując porównania wielkości współczynnika załamania struktury optycznej turbulentnego przepływu powietrza po stronie zawietrznej ekranu, uzyskanych na drodze dwóch podejść należy stwierdzić dużą zgodność. Na rys. 3 przedstawiono wykres zmian współczynnika  $C_n^2$  w funkcji średniej prędkości głównej strumienia powietrza, uzyskane dla podejścia Autorskiego i Consortini

Analizując wyniki uzyskane dla współczynnika  $C_n^2$  przy zastosowaniu zależności podanej przez Consortini [3] i propozycji własnej wynika, że można oczekiwać pewnych rozbieżności przy wyższych wartościach  $C_n$ . Również w przypadku oddalenia wiązki światła laserowego od podstawy tunelu zanotowano zróżnicowanie wartości współczynnika załamania struktury.

Podobną ocenę można przeprowadzić dla wartości średniej skali wewnętrznej. Na rys.4 przedstawiono wyniki uzyskanej skali wewnętrznej  $l_0$  przy różnych prędkościach głównych strumienia napływającego i trzech różnych poziomach przebiegu wiązki laserowej.

Z zamieszczonego wykresu wynika, że pewne rozbieżności występują przy niższych wartościach prędkości i przy wyższych poziomach przebiegu ścieżki światła laserowego. Dokonując podsumowania (przedstawionych podejść) można przyjąć, że istnieją możliwości uzyskania zbliżonych wyników. Wskazane są jednak dalsze badania dla oceny stopnia dokładności proponowanych rozwiązań, jak również uzyskania w miarę możliwości dodatkowych informacji o charakterze i przebiegu przepływu turbulentnego powietrza, o jego wzroście i zaniku energii kinetycznej turbulencji w miarę oddalania się od ekranu

**Summary:** The paper presents two methods of determination of the basic turbulent parameters like structure constant and inner scale. Both methods are based on laser beam propagation and are suitable for short path lengths. The first one, proposed by Consortini is based on differential angle of arrival. The second one, proposed by Author uses deflection angle of laser beam. In order to compare the both approaches wind tunnel tests were carried out.



Rys.4. Wartości skali wewnętrznej  $l_0$  dla głównych prędkości napływającego strumienia w tunelu i trzech poziomów przebiegu ścieżki światła laserowego  $h = 0,06; 0,12$  i  $0,25m$ , ■ - wartości uzyskane wg Consortini, ◆ - wartości uzyskane wg Klemm  
Fig. 4. Values of inner scale  $l_0$  for main air velocities and three locations of laser beam  $h = 0,06; 0,12$  and  $0,25m$ , ■ - values obtained by Consortini, ◆ - values obtained by Klemm

## Literatura

[1] 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

[2] 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

[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] Tatarsky V.I. *Wave Propagation in a Turbulent Atmosphere*. Nauka Press, Moscow 1967

Tabela 1. Wyniki badań uzyskane dla wiązki światła laserowego przebiegającej na wysokości 0,06m od powierzchni dolnej tunelu  
Table 1. Results obtained for laser beam located on the height of 0,06m

Średnia prędkość główna w tunelu V(m/s)	Średnia kwadratowa intensywności fluktuacji światła laserowego $\sigma_I^2 \times 10^{-6}$	Średnia kwadratowa fluktuacji kąta nadejścia $\langle \alpha^2 \rangle (\text{rad}^2) \times 10^{-12}$	Średnia kwadratowa intensywności fluktuacji składowej poziomej wiązki $\sigma_x^2 \times 10^{-6}$	Średnia kwadratowa fluktuacji składowej poziomej kąta wychylenia wiązki $\langle \theta_x^2 \rangle (\text{rad}^2) \times 10^{-12}$
0,5	8,579	111,303	0,059	40,069
1,0	23,937	52,321	0,166	18,835
1,5	100,915	41,174	0,701	14,823
2,0	137,116	39,063	0,953	14,063
2,5	170,796	41,175	1,187	14,824

Tabela 2. Wyniki badań uzyskane dla wiązki światła laserowego przebiegającej na wysokości 0,12m od powierzchni dolnej tunelu  
Table 2. Results obtained for laser beam located on the height of 0,12m

Średnia prędkość główna w tunelu V(m/s)	Średnia kwadratowa intensywności fluktuacji światła laserowego $\sigma_I^2 \times 10^{-6}$	Średnia kwadratowa fluktuacji kąta nadejścia $\langle \alpha^2 \rangle (\text{rad}^2) \times 10^{-12}$	Średnia kwadratowa intensywności fluktuacji składowej poziomej wiązki $\sigma_x^2 \times 10^{-6}$	Średnia kwadratowa fluktuacji składowej poziomej kąta wychylenia wiązki $\langle \theta_x^2 \rangle (\text{rad}^2) \times 10^{-12}$
0,5	12,636	22,043	0,082	7,935
1,0	34,350	31,734	0,223	11,424
1,5	221,046	85,562	1,435	30,802
2,0	214,025	10,400	1,389	3,744
2,5	254,319	98,671	1,651	35,52

Tabela 3. Wyniki badań uzyskane dla wiązki światła laserowego przebiegającej na wysokości 0,25m od powierzchni dolnej tunelu  
 Table 3. Results obtained for laser beam located on the height of 0,25m

Średnia prędkość główna w tunelu V(m/s)	Średnia kwadratowa intensywności fluktuacji światła laserowego $\sigma_I^2 \times 10^{-6}$	Średnia kwadratowa fluktuacji kąta nadejścia $\langle \alpha^2 \rangle (\text{rad}^2) \times 10^{-12}$	Średnia kwadratowa intensywności fluktuacji składowej poziomej wiązki $\sigma_x^2 \times 10^{-6}$	Średnia kwadratowa fluktuacji składowej poziomej kąta wychylenia wiązki $\langle \theta_x^2 \rangle (\text{rad}^2) \times 10^{-12}$
0,5	19,253	1,928	0,134	0,694
1,0	39,662	9,303	0,276	3,356
1,5	195,418	9,304	1,362	3,349
2,0	405,581	5,523	2,826	1,988
2,5	557,273	8,507	4,023	3,062

Tabela 4. Wartości współczynnika struktury wewnętrznej  $C_n^2$  i średniej skali wewnętrznej  $l_0$  dla różnych prędkości głównych strumienia powietrza w tunelu i trzech różnych przebiegów wiązki światła laserowego (wartości wyznaczone wg. propozycji Consortini [3])  
 Table 4. Values of structure parameter of refractive index  $C_n^2$  and average inner scale  $l_0$  for different air velocities and three different locations of laser beam (determined by Consortini [3])

Średnia prędkość główna w tunelu V(m/s)	Współczynnik załamania struktury $C_n^2 \times 10^{-10}$	Średnia skala wewnętrzna $l_0 (\text{m}) \times 10^{-3}$	Odległość wiązki światła laserowego od powierzchni dolnej tunelu h (m)
0,5	0,065	7,096	0,06
1,0	0,023	2,913	
1,5	0,014	1,258	
2,0	0,012	1,051	
2,5	0,012	0,967	
0,5	0,0009	2,602	0,12
1,0	0,012	1,893	
1,5	0,028	1,225	
0,5	0,0010	0,764	0,25
1,0	0,00095	0,597	

Tabela 5. Wartości współczynnika struktury wewnętrznej  $C_n^2$  i średniej skali wewnętrznej  $l_0$  dla różnych prędkości głównych strumienia powietrza i trzech różnych przebiegów wiązki światła laserowego (wartości wyznaczone przez Autora)

Table 5. Values of structure parameter of refractive index  $C_n^2$  and average inner scale  $l_0$  for different air velocities and three different locations of laser beam (determined by Author)

Średnia prędkość główna w tunelu V(m/s)	Współczynnik załamania struktury $C_n^2 \times 10^{-10}$	Średnia skala wewnętrzna $l_0$ (m) $\times 10^{-3}$	Odległość wiązki światła laserowego od powierzchni dolnej tunelu h (m)
0,5	0,071	7,084	0,06
1,0	0,025	2,905	
1,5	0,014	1,255	
2,0	0,013	1,049	
2,5	0,013	0,964	
0,5	0,010	2,685	0,12
1,0	0,013	1,954	
1,5	0,031	1,263	
0,5	0,001	0,764	0,25
1,0	0,0035	0,286	