

BADANIE TURBULENTNEGO PRZEPIYU POWIETRZA W STREFIE ELEMENTU ARCHITEKTONICZNEGO PRZY ZASTOSOWANIU METODY OPTYKI – KOHERENTNEJ

Katarzyna KLEMM*

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

Streszczenie: W pracy podjęta została próba oszacowania podstawowych parametrów związanych z opisem turbulentnego przepływu w strefach napływu i odpływu powietrza, w sąsiedztwie elementu architektonicznego. Badania zostały przeprowadzone w tunelu aerodynamicznym. Do rejestracji zastosowany został układ elektro – optyczny z wykorzystaniem wąskiej wiązki światła laserowego. W celu wyznaczenia podstawowych wielkości, charakteryzujących przepływ turbulentny wykorzystano równania, zaproponowane w pracy [1] przez Consortini.

Słowa kluczowe: Turbulencja, element architektoniczny, optyka koherentna.

1. WPROWADZENIE

Badania eksperymentalne pozwalające oszacować i określić obszary o podwyższonym ryzyku przyspieszonego procesu destrukcji, wywołanej oddziaływaniem fizyko – mechanicznym środowiska zewnętrznego prowadzone są w wielu zespołach badawczych. Jednym z takich zadań jest badanie turbulentnego przepływu powietrza przy rozwiniętych powierzchniach elewacji budynku. Ma to szczególne znaczenie w obiektach podlegających ochronie konserwatorskiej. Ruch powietrza w tych strefach ma złożony charakter i wymaga niestandardowych rozwiązań pomiarowych. Uzyskanie danych o procesach zachodzących w warstwie przypowierzchniowej wymaga obserwacji zmian dokonujących się w makroobszarach. Możliwości takie stwarza technika laserowa. Wiązka światła laserowego pozwala zarejestrować turbulencję optyczną wzdłuż linii załamania elementów architektonicznych elewacji budynku. W dalszym działaniu możliwe jest określenie warunków powstawania mikrowirów mających znaczenie przy ocenie zagrożeń destrukcyjnych, wywołanych ruchem powietrza w warstwach przypowierzchnio-

wych. Jednym z możliwych wariantów przeprowadzenia eksperymentu są badania z wykorzystaniem tunelu aerodynamicznego. Strumień powietrza o określonej prędkości średniej i intensywności turbulencji kierowany jest na model fragmentu elewacji z rozwiniętą geometrią powierzchni a prowadzona rejestracja natężenia wiązki światła laserowego i dalsza jego analiza pozwala określić proces przebiegu ruchu turbulentnego oraz powstawanie mikrowirów.

2. PODSTAWOWE RÓWNANIA

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

Wiązka światła laserowego przechodząc przez ośrodek w którym występują gradienty współczynnika n doznaje zniekształcenia, powodującego zmiany rozkładu amplitudy i fazy wektora natężenia pola elektromagnetycznego. Prowadzi to do zmiany natężenia światła w przekroju poprzecznym wiązki. Następuje poszerzenie przekroju poprzecznego wiązki i zmiana kierunku propagacji światła laserowego. Turbulencja optyczna opisywana jest głównie poprzez współczynnik załamania struktury C_n^2 i skalę wewnętrzną l_0 [2].

Poniżej przedstawione zostaną podstawowe zależności pozwalające wyznaczyć C_n^2 i l_0 . W przypadku krótkich ścieżek światła laserowego stosowane są metody oparte

na wielkościach związanych z fazą. Przydatność ich została wskazana w pracy [1], gdzie podkreślono wykorzystanie fluktuacji bocznych wąskiej ścieżki laserowej. Zastosowanie wąskiej wiązki jest jednak ograniczone do przypadków, w których aproksymacja optyki geometrycznej jest wystarczająca. Ograniczenie to jest możliwe do pokonania przy zastosowaniu metody opracowanej przez Consortini, w której wykorzystano wielkości zależne od amplitudy, jak również wielkości zależne od fazy, tj. kąta nadejścia. Kąt nadejścia nie jest ograniczony warunkami geometrii optycznej. Różniczkowy kąt nadejścia definiowany jest jako kąt zawarty pomiędzy prostopadłą do czoła fali zakłóconej turbulencją w danym punkcie a niezakłóconym kierunkiem propagacji. Wariancje poziomej i pionowej składowej kąta nadejścia uzyskujemy jako pochodne fazowej funkcji strukturalnej.

W warunkach, gdy fala płaska rozprzestrzenia się przez jednorodną i izotropową turbulencję, i w obrębie aproksymacji geometrii optycznej, tj. gdy $L \leq \frac{l_o^2}{\lambda}$ średnia kwadratowa fluktuacji kąta nadejścia może być zapisana w postaci por. [1]

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

Wyrażenie na znormalizowaną średnią kwadratową intensywności fluktuacji wiązki światła laserowego przyjmujemy również za Autorami pracy [2]

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

Wyrażenie na skalę wewnętrzną (l_o) uzyskamy z równań (1) i (2), które obowiązują w obrębie geometrii optycznej $l_o^2 \geq \lambda L$

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

Korzystając z zależności (1) (2) (3) możemy wyznaczyć główne parametry C_n^2 i l_o , opisujące turbulencję optyczną. Znajomość tych parametrów pozwoli ocenić średnią wartość energii kinetycznej turbulencji i jej dyssypację, wzdłuż ścieżki propagacji światła laserowego. Ważnym przypadkiem jest sytuacja kiedy długość ścieżki L zawiera się w przedziale $\frac{l_o^2}{\lambda} < L \leq \frac{l_o^4}{\lambda^3}$ a $\sigma_I^2 \leq 1$.

Poniżej przytoczone zostaną zależności podane w pracy [3] dla kąta nadejścia i intensywności fluktuacji

$$\langle \alpha^2 \rangle = \langle \beta^2 \rangle = 1,64 C_n^2 L l_o^{-1/3} \quad (4)$$

$$\sigma_I^2 = 1,23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad k = 2\pi/\lambda \quad (5)$$

oraz wyrażenie na skalę wewnętrzną

$$l_o = 2,37 k^{-7/2} L^{-5/2} \left(\frac{\sigma_I^2}{\langle \alpha^2 \rangle} \right)^3 \quad (6)$$

Wykorzystując przedstawione wyżej równania, obowiązujące w obrębie geometrii optycznej i granic aproksymacji Rytova wyznaczone zostaną podstawowe parametry C_n^2 i l_o , w strefie napływu i odpływu powietrza wokół badanego elementu architektonicznego (por. rys.1).

Kolejnym krokiem będzie określenie średniej energii kinetycznej turbulencji i jej dyssypacji dla czterech ścieżek wiązki laserowej. Równanie wiążące skalę wewnętrzną l_o i wielkości dyssypacji energii kinetycznej ε oraz lepkości kinematycznej ν przyjęto w postaci

$$l_o = 7,4 \nu^{3/4} \varepsilon^{-1/4} \quad (7)$$

Również wartość energii kinetycznej turbulencji wyznaczona zostanie z przybliżonej zależności w postaci

$$K \cong \left(\frac{\varepsilon \nu_t}{C_\mu} \right)^{1/2} \quad (8)$$

gdzie: $C_\mu = 0,09$

Przytoczone powyżej równania mają pewne ograniczone możliwości zastosowań, jednak pozwalają na jakościową ocenę podstawowych parametrów przepływu turbulencyjnego.

3. PROCEDURA EKSPERYMENTU

Badania ruchu turbulentnego powietrza w charakterystycznych strefach warstwy przy powierzchni elementu architektonicznego, o rozwiniętej geometrii prowadzone były przy wykorzystaniu wiązki światła laserowego. Jako źródła światła użyto laser półprzewodnikowy o mocy 14mW, emitujący falę o długości $\lambda = 0,633 \times 10^{-6}$ m i wyposażony w specjalny układ optyczny, dający quasi równoległą wiązkę światła. Do detekcji natężenia światła zastosowano fotodiodę BPYP17. Wiązki światła przebiegały prostopadle do osi tunelu, przez wydrążone w ścianach bocznych otwory o średnicy $\phi 5$ mm. Długość wiązki światła laserowego wynosiła $L=1,0$ m. W celu określenia wielkości kąta nadejścia wprowadzony został dodatkowy element osłonowy, o długości $d=0,6$ m i średnicy $\phi 0,05$ m, zapewniający niezakłócony turbulencją kie-

runek propagacji wiązki. Strumień powietrza o wymuszonym przepływie w tunelu osiągał cztery różne prędkości główne, tj. 1,0m/s; 1,5m/s; 2,0m/s i 2,5m/s. Pomiar prowadzone były równocześnie dla czterech ścieżek światła laserowego, przebiegających na wysokościach 0,06m i 0,12m w odległości 0,02m od badanego elementu, zarówno po stronie napływu jak i odpływu. Sygnał elektryczny wychodzący z fotodiody, wywołany oświetleniem laserową wiązką kierowano do przetwornika analog – cyfra (PAC,) z pamięcią sterowaną przez komputer. Przyjęty układ umożliwiał rejestrację natężenia światła w funkcji czasu, w odstępach 50ms, przy stałym czasie pomiaru 5μs. Zastosowanie specjalnego programu stworzyło możliwość zarejestrowania i zapamiętania około 35 tysięcy punktów pomiarowych. Przekrój poprzeczny badanego elementu architektonicznego przedstawiono na rys.1 wraz z zaznaczonymi liniami pomiarowymi.

Powierzchnia przed elementem badanym emitowała strumień ciepła o gęstości od $\dot{q} = 8,0 \text{ W/m}^2$ do $11,0 \text{ W/m}^2$.

Wzrost prędkości strumienia powietrza w warstwie przypowierzchniowej wywołał wzrost gęstości strumienia ciepła. Podobna sytuacja występowała po stronie odpływu, gdzie gęstość strumienia ciepła wahała się od $4,5 \text{ W/m}^2$ do $7,5 \text{ W/m}^2$. Wywołanie powyższego stanu termicznego od strony napływu i odpływu miało na celu odzwierciedlenie rzeczywistych warunków.

4. WYNIKI BADAŃ

Poniżej przedstawione zostaną wyniki z badań dla dwóch ścieżek światła laserowego od strony napływu i odpływu, na wysokości 0,06m i 0,12m.

Dysponując wynikami intensywności fluktuacji natężenia światła dla wąskiej wiązki laserowej po przejściu długości $L = 1,0 \text{ m}$ i w drugim przypadku po przejściu przez wiązkę dodatkowej długości $d = 0,60 \text{ m}$, o niezakłóconym turbulencją kierunku propagacji pozwoliło wyznaczyć $\langle \alpha^2 \rangle$ i σ_I^2 . W tabeli 1 zamieszczone zostały wyliczone średnie kwadratowe fluktuacji kąta nadejścia $\langle \alpha^2 \rangle$ i średnie kwadratowe intensywności fluktuacji wiązki światła laserowego σ_I^2 . Podane wielkości dotyczą dwóch ścieżek światła laserowego, o przebiegu prostopadłym do kierunku strumienia powietrza od strony napływu i odpływu na wysokości 0,06m. Przedstawione w tabeli 1 wielkości $\langle \alpha^2 \rangle$ i σ_I^2 wyznaczone zostały dla czterech prędkości głównych 1,0m/s; 1,5m/s; 2,0m/s i 2,5m/s.

Podobnie w tabeli 2 zamieszczone zostały wyniki dla $\langle \alpha^2 \rangle$ i σ_I^2 , uzyskane na wysokości $z = 0,12 \text{ m}$.

Korzystając z równań (1) (2) (3) i (4) (5) (6) wyznaczone zostały podstawowe parametry turbulencji optycznej l_0 i C_n . W tabeli 3 zamieszczone zostały wielkości l_0 i C_n ,

uzyskane dla przypadku kiedy obowiązują aproksymacja geometrii optycznej, tj. $l_0^2/\lambda > L$ oraz Rytova, gdy

$$l_0^2/\lambda \leq L < l_0^2/\lambda^3$$

Wielkości l_0 i C_n wyznaczone, gdy obowiązuje aproksymacja Rytova zostały zaznaczone w tabeli kolorem.

W tabeli 4 podane zostały wyliczone wartości l_0 i C_n dla przebiegu wiązki światła laserowego na wysokości 0,12m.

Korzystając z zależności (7) wyznaczone zostały wielkości dyssypacji energii ϵ dla różnych położań ścieżek światła laserowego i czterech prędkości głównych strumienia powietrza w tunelu por. tabela 5.

Równocześnie korzystając z zależności (8) wyznaczone zostały wartości energii kinetycznej turbulencji K . Uzyskane wartości zamieszczono w tabeli 6.

5. DYSKUSJA I WNIOSKI

Po stronie napływu powietrza na badany element architektoniczny, zmiany gęstości wywołane wymuszonym ruchem powietrza mogą wywołać stan, w którym średnia skala wewnętrzna l_0 na wysokości 0,06m kształtuje się na poziomie od $3,9 \times 10^{-3}$ do $2,7 \times 10^{-3} \text{ m}$ w przedziale prędkości od $1,0 \div 2,5 \text{ m/s}$, a współczynnik struktury optycznej wzrasta od $0,6 \times 10^{-5} \text{ (m}^{-1/3})$ do $0,92 \times 10^{-5} \text{ (m}^{-1/3})$. Natomiast w przypadku poziomu wyższego, tj. $z = 0,12 \text{ m}$ następuje spadek wartości skali wewnętrznej l_0 , która osiąga wartości od $0,87 \times 10^{-3} \text{ (m)}$ do $0,82 \times 10^{-3} \text{ (m)}$ w przedziale prędkości od $2,0 \div 2,5 \text{ m/s}$. Współczynnik struktury optycznej C_n przyjmuje wartości niższe na poziomie $0,05 \times 10^{-5} \text{ (m}^{-1/3})$ do $0,09 \times 10^{-5} \text{ (m}^{-1/3})$ dla prędkości głównych od 1,0 do 2,5m/s.

Można zatem sądzić, że badany element architektoniczny o określonych warunkach brzegowych por.rys.1. może wywołać dyssypację energii przy mikrowirach o średnicy mniejszej od l_0 . Wielkość dyssypacji energii kształtować się będzie na poziomie od 0,04 do 0,16 m^2/s^3 , przy średniej energii kinetycznej turbulencji od $0,25 \times 10^{-2} \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ do $0,51 \times 10^{-2} \text{ (m}^2/\text{s}^2)$. Natomiast już na wysokości $z = 0,12 \text{ m}$ nastąpi dyssypacja energii kinetycznej turbulencji przy mikrowirach o wymiarach mniejszych od $0,87 \times 10^{-3}$ i $0,82 \times 10^{-3} \text{ (m)}$ na poziomie $16,3 \div 19,8 \text{ (m}^2/\text{s}^3)$ dla przedziału prędkości 2,0 do 2,5m/s i energii kinetycznej turbulencji $5,12$ do $5,65 \times 10^{-2} \text{ (m}^2/\text{s}^2)$

Inną sytuację rejestrujemy po stronie odpływu, gdzie na wysokości $z=0,06 \text{ m}$ skala wewnętrzna przyjmuje wielkości $0,94 \times 10^{-3}$ do $0,77 \times 10^{-3} \text{ (m)}$, przy prędkościach od 1,0 do 1,5m/s. Stąd dyssypacja energii kinetycznej w wyniku lepkości kinematycznej osiąga poziom $11,7 \text{ (m}^2/\text{s}^3)$ do $25,99 \text{ (m}^2/\text{s}^3)$, a energia kinetyczna turbulencji $4,3 \times 10^{-2} \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ do $6,4 \times 10^{-2} \text{ (m}^2/\text{s}^2)$.

Rozpatrując poziom $z = 0,12\text{m}$ należy zauważyć, że dla przedziału prędkości od $1,0\text{m/s}$ do $2,5\text{m/s}$ dyssypacja energii kinetycznej turbulencji wystąpi przy mikrowirach mniejszych od $11,6 \times 10^{-3}\text{m}$ do $5,5 \times 10^{-3}\text{m}$ i będzie najniższa na poziomie $0,001(\text{m}^2/\text{s}^3)$ do $0,12(\text{m}^2/\text{s}^3)$ zaś energia kinetyczna turbulencji $0,029 \times 10^{-2} \div 0,138 \times 10^{-2}(\text{m}^2/\text{s}^2)$.

Z uzyskanych danych eksperymentalnych wynika, że po stronie napływu na poziomie $z = 0,12\text{m}$ i przy prędkościach rzędu $1,0$ do $1,5\text{m/s}$ skala wewnętrzna osiągnąć może wielkości mniejsze od dopuszczalnych stosowności metody. Podobna sytuacja ma miejsce po stronie odpływu na poziomie $z = 0,06\text{m}$, dla przedziału prędkości $2,0$ do $2,5\text{m/s}$, gdzie l_0 jest mniejsze od wartości dopuszczalnych. Dokonując pewnego podsumowania można zauważyć, że od strony napływu na poziomie $z = 0,06\text{m}$ można się spodziewać mikrowirów przy średniej skali wewnętrznej około $3,0 \times 10^{-3}\text{m}$ a poziom dyssypacji może się kształtować w granicach $0,10(\text{m}^2/\text{s}^3)$. Natomiast na poziomie $z = 0,12\text{m}$ średnia wartość skali wewnętrznej jest na poziomie $0,85 \times 10^{-3}\text{m}$ zaś wielkość dyssypacji kształtuje się w granicach $18(\text{m}^2/\text{s}^3)$, przy wyższym przedziale prędkości tj. od $2,0$ do $2,5\text{m/s}$. Wynika stąd, że przed elementem badanym tuż przy powierzchni należy oczekiwać mikrowirów o średniej większej w porównaniu z mikrowirami na wyższym poziomie. Po stronie odpływu na poziomie $z = 0,06\text{m}$ mamy sytuację odwrotną. Wielkość skali wewnętrznej jest w granicach $0,80 \times 10^{-3}\text{m}$, dla przedziału prędkości $1,0$ do $1,5\text{m/s}$ a dyssypacji energii na poziomie od 12 do $26(\text{m}^2/\text{s}^3)$.

Natomiast w strefie odpływu na wysokości $z = 0,12\text{m}$ uzyskano wyższe wartości skali wewnętrznej od $11,6$ do

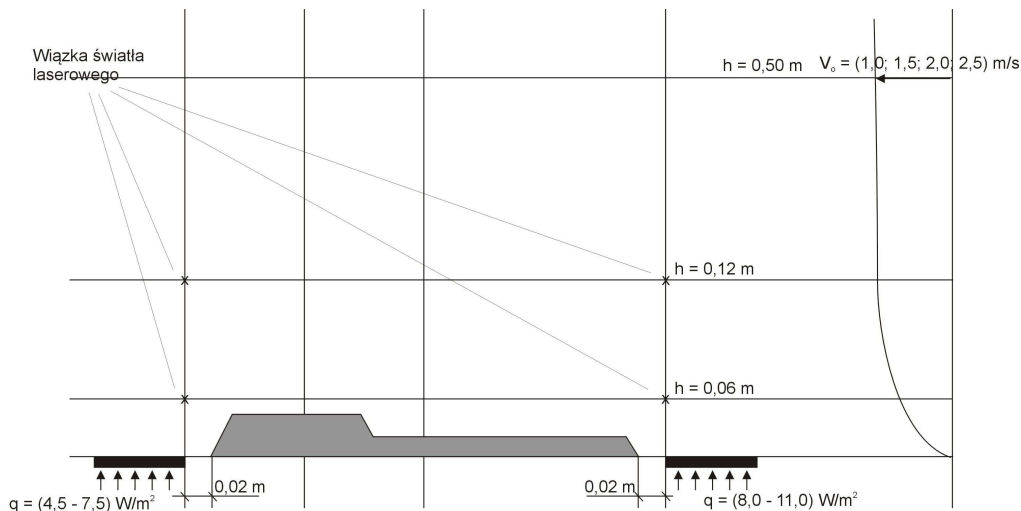
$5,5 \times 10^{-3}$ a wielkości dyssypacji energii minimalne $0,008(\text{m}^2/\text{s}^3)$.

Z powyżej przytoczonych wielkości wybranych parametrów przepływu turbulentnego powietrza w obszarach bezpośredniego otoczenia elementu architektonicznego możemy się spodziewać odmiennego charakteru destrukcyjnego działania zanieczyszczonego powietrza. Wskazane są dalsze badania dla uzyskania pełniejszego obrazu zachodzących procesów w analizowanych strefach zagrożeń destrukcją środowiska zewnętrznego.

Summary: The paper presents the first attempt in estimation of basic parameters describing turbulent air flow in windward and leeward side of architectural element. Measurement were carried out in wind tunnel with the aid of electro – optic system based on laser beam. In order to determine basic parameters equations proposed by Consortini were used.

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. *Obserwacja turbulentnego przepływu strugi powietrza przez przeszkodę o określonej perforacji*. Budownictwo Niskoenergetyczne IX Międzynarodowe Seminarium Naukowe Techniczne ENERGODOM (2008) 221-228
- [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



Rys.1 Badany element architektoniczny oraz położenie ścieżek pomiarowych
Fig.1. The analysed architectural element and location of the laser beam paths

Tabela 1. Wyznaczone wielkości $\langle \alpha^2 \rangle$ i σ_I^2 na wysokości 0,06m

Table 1. Values of $\langle \alpha^2 \rangle$ and σ_I^2 determined on height of 0,06m

Prędkość główna (w osi tunelu) V(m/s)	Wyznaczone wielkości $\langle \alpha^2 \rangle$ i σ_I^2 na wysokości z = 0,06m			
	Po stronie napływu		Po stronie odpływu	
	$\langle \alpha^2 \rangle$ (rad) ²	σ_I^2	$\langle \alpha^2 \rangle$ (rad) ²	σ_I^2
1,0	767 x 10 ⁻¹²	0,196 x 10 ⁻³	121 x 10 ⁻¹²	0,530 x 10 ⁻³
1,5	1000 x 10 ⁻¹²	0,330 x 10 ⁻³	220 x 10 ⁻¹²	2,210 x 10 ⁻³
2,0	2000 x 10 ⁻¹²	1,050 x 10 ⁻³	148 x 10 ⁻¹²	3,371 x 10 ⁻³
2,5	2000 x 10 ⁻¹²	1,040 x 10 ⁻³	103 x 10 ⁻¹²	2,623 x 10 ⁻³

Tabela 2. Wyznaczone wielkości $\langle \alpha^2 \rangle$ i σ_I^2 na wysokości 0,12m

Table 2. Values of $\langle \alpha^2 \rangle$ and σ_I^2 determined on height of 0,12m

Prędkość główna (w osi tunelu) V(m/s)	Wyznaczone wielkości $\langle \alpha^2 \rangle$ i σ_I^2 na wysokości z = 0,12m			
	Po stronie napływu		Po stronie odpływu	
	$\langle \alpha^2 \rangle$ (rad) ²	σ_I^2	$\langle \alpha^2 \rangle$ (rad) ²	σ_I^2
1,0	14,50 x 10 ⁻¹²	1,720 x 10 ⁻³	1000 x 10 ⁻¹²	0,029 x 10 ⁻³
1,5	32,59 x 10 ⁻¹²	0,817 x 10 ⁻³	1000 x 10 ⁻¹²	0,089 x 10 ⁻³
2,0	20,86 x 10 ⁻¹²	0,108 x 10 ⁻³	1000 x 10 ⁻¹²	0,126 x 10 ⁻³
2,5	30,46 x 10 ⁻¹²	0,174 x 10 ⁻³	1000 x 10 ⁻¹²	0,139 x 10 ⁻³

Tabela 3. Wielkości l_0 i C_n dla przebiegu wiązki światła laserowego na wysokości 0,06m
 Table 3. Values of l_0 i C_n determined on height of 0,06m

Prędkość główna (w osi tunelu) V(m/s)	Skala wewnętrzna l_0 i współczynnik struktury optycznej C_n			
	Po stronie napływu		Po stronie odpływu	
	l_0 (m)	C_n ($m^{-1/3}$)	l_0 (m)	C_n ($m^{-1/3}$)
1,0		$0,050 \times 10^{-5}$	$11,57 \times 10^{-3}$	$0,825 \times 10^{-5}$
1,5		$0,085 \times 10^{-5}$	$5,60 \times 10^{-3}$	$0,753 \times 10^{-5}$
2,0	$0,866 \times 10^{-3}$	$0,077 \times 10^{-5}$	$5,55 \times 10^{-3}$	$0,731 \times 10^{-5}$
2,5	$0,824 \times 10^{-3}$	$0,093 \times 10^{-5}$	$5,28 \times 10^{-3}$	$0,724 \times 10^{-5}$

Tabela 4. Wartości l_0 i C_n dla przebiegu wiązki światła laserowego na wysokości 0,12m
 Table 4. Values of l_0 i C_n determined on height of 0,12m

Prędkość główna (w osi tunelu) V(m/s)	Skala wewnętrzna l_0 i współczynnik struktury optycznej C_n			
	Po stronie napływu		Po stronie odpływu	
	l_0 (m)	C_n ($m^{-1/3}$)	l_0 (m)	C_n ($m^{-1/3}$)
1,0		$0,050 \times 10^{-5}$	$11,57 \times 10^{-3}$	$0,825 \times 10^{-5}$
1,5		$0,085 \times 10^{-5}$	$5,60 \times 10^{-3}$	$0,753 \times 10^{-5}$
2,0	$0,866 \times 10^{-3}$	$0,077 \times 10^{-5}$	$5,55 \times 10^{-3}$	$0,731 \times 10^{-5}$
2,5	$0,824 \times 10^{-3}$	$0,093 \times 10^{-5}$	$5,28 \times 10^{-3}$	$0,724 \times 10^{-5}$

Tabela 5. Wielkości dyssypacji energii dla czterech położeń ścieżek światła laserowego i czterech prędkości głównych
 Table 5. Magnitude of energy dissipation for four position of laser beam and four air velocities

Prędkość główna (w osi tunelu) V(m/s)	Dyssypacja energii kinetycznej turbulencji ε (m^2/s^3)			
	Na wysokości ścieżki 0,06m		Na wysokości ścieżki 0,12m	
	Przed elementem architektonicznym	Za elementem architektonicznym	Przed elementem architektonicznym	Za elementem architektonicznym
1,0	0,0396	11,658		0,001
1,5	0,0660	25,995		0,005
2,0	0,1670		16,2530	0,010
2,5	0,1640		19,8281	0,012

Tabela 6. Średnia wartość energii kinetycznej turbulencji K dla czterech położań wiązki światła laserowego i czterech prędkości głównych
 Table 6. Average values of turbulence kinetic energy for four position of laser beam and four air velocities

Prędkość główna (w osi tunelu) V(m/s)	Średnia wartość energii kinetycznej turbulencji K (m^2/s^2)			
	Na wysokości ścieżki 0,06m		Na wysokości ścieżki 0,12m	
	Przed elementem architektonicznym	Za elementem architektonicznym	Przed elementem architektonicznym	Za elementem architektonicznym
1,0	$0,253 \times 10^{-2}$	$4,334 \times 10^{-2}$		$0,029 \times 10^{-2}$
1,5	$0,326 \times 10^{-2}$	$6,471 \times 10^{-2}$		$0,088 \times 10^{-2}$
2,0	$0,519 \times 10^{-2}$		$5,117 \times 10^{-2}$	$0,1250 \times 10^{-2}$
2,5	$0,514 \times 10^{-2}$		$5,652 \times 10^{-2}$	$0,1380 \times 10^{-2}$

