

Maria HURNIK, Monika BLASZCZOK
Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania
Politechnika Śląska
ul Konarskiego 20, 44-100 Gliwice
kowito@kowito.ise.polsl.gliwice.pl

WPLYW OGRANICZENIA PRZESTRZENI NA POLE PRĘDKOŚCI I PARAMETRY TURBULENTNE W STRUDZE NAWIEWANEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań pól prędkości w strugach wentylacyjnych rozwijających się w pomieszczeniach o różnej wielkości oraz w sąsiedztwie innych strug. Badania wykazały, że ograniczenie przestrzeni oraz zmiana tła przepływowego zmienia wartość współczynnika rozkładu prędkości – m , a nieznacznie wpływa na położenie bieguna strugi – x_0 . Zmiany wartości współczynnika m wiążą się ze zmianami parametrów turbulentnych.

THE EFFECT OF ENCLOSURE SIZE ON THE AIR VELOCITY DISTRIBUTION AND ON TURBULENCE IN AXISYMMETRIC JETS

Summary. Air velocity distribution in round jets generated by various types of diffusers is calculated on the basis of the model of free isothermal, axisymmetric jet. In that case, the momentum flux value and two characteristic parameters of the jet, i.e.: velocity distribution coefficient – m and the origin distance – x_0 are sufficient for the velocity field calculation. The values of m and x_0 depend on diffuser type and discharge pattern. In practice jets develop in rooms of various sizes and are affected by walls and entrainment effects. The paper presents the results of experimental tests of jets generated by the same circular nozzle, supplied to enclosures of various sizes and with other surrounding jets. The jet characteristic parameters are determined on the basis of thermoanemometric measurements of the air velocity. Measurement has shown that coefficient – m describing velocity distribution in a jet, depends on the enclosure size as well as on the flow background. This changeability is caused by changes in turbulence intensity – Tu and longitudinal, length, integral scale – Λ_f .

1. Pole prędkości w wentylacyjnych, swobodnych strugach nawiewanych

Strugi nawiewane są głównym czynnikiem kształtującym ruch powietrza w pomieszczeniach wentylowanych, decydują one w dużej mierze o prędkości ruchu powietrza w strefie przebywania ludzi w pomieszczeniu. Jeśli na drodze strug nawiewanych nie znajdują się przegrody pomieszczenia (ściany, sufit, podłoga) lub inne przeszkody, to strugi takie mogą być traktowane do pewnego stopnia jak strugi swobodne.

We wstępnej fazie procesu projektowania rozdziału powietrza wentylacyjnego na podstawie modelu swobodnej strugi nawiewanej, jako jednego z modeli elementów przepływu, wstępnie projektuje się rozmieszczenie nawiewników oraz dobiera ich rozmiary, kształt, uzbrojenie i prędkość wylotową [1]. Modele matematyczne strug nawiewanych powinny umożliwiać jak najdokładniejsze przewidywanie pola prędkości w rzeczywistych strugach wypływających z różnego typu nawiewników. Bardzo dobrze opisanym i zbadanym elementem przepływu jest osiowosymetryczna, izotermiczna struga swobodna. Taka struga jest często wykorzystywana do weryfikacji różnych metod modelowania przepływów turbulentnych. Model osiowosymetrycznej izotermicznej strugi swobodnej obowiązuje dla strugi płynu wypływającego z kołowej dyszy do nieograniczonej przestrzeni wypełnionej nieruchomym płynem o takiej samej, jednorodnej temperaturze. Wentylacyjną strugę nawiewaną przyjęło się traktować jako swobodną tylko obszarze, w którym tzw. praktyczna granica strugi jest dostatecznie odległa od przegród pomieszczenia i od granic innych strug wentylacyjnych. Praktyczną granicę strugi wyznacza izolinia prędkości dla przyjętej wartości granicznej prędkości (np. 0,25 lub 0,5 m/s). Odległość od otworu nawiewnego, do której struga może być jeszcze traktowana jako swobodna, może być oszacowana według [2] ze wzoru $x \leq 1,5 \sqrt{A_g}$ (gdzie A_g pole przekroju przestrzeni ograniczającej poprzecznie strugę). Badania eksperymentalne tak rozumianych swobodnych izotermicznych strug nawiewanych wykazały, że w strugach tych jest spełniona zasada zachowania strumienia pędu i że pole prędkości może być opisane matematycznym modelem osiowosymetrycznej, izotermicznej strugi swobodnej, generowanej przez punktowe źródło pędu. W tym przypadku do obliczenia pola prędkości potrzebna jest znajomość strumienia pędu – \dot{I}_m i współczynnika charakteryzującego turbulentne mieszanie – m oraz znajomość położenia pozornego punktowego źródła pędu – x_o (tzw. bieguna strugi):

$$\bar{W}_x = \left(\frac{2m \dot{I}_m}{\pi \rho} \right)^{0,5} \frac{1}{x + x_o} e^{-m \left(\frac{r}{x+x_o} \right)^2} \quad (1)$$

Metody obliczania pól prędkości w swobodnych strugach nawiewanych zalecane przez dwa najważniejsze poradniki z zakresu wentylacji i klimatyzacji [2 i 3] są bardzo zbliżone i wykorzystują zależności obowiązujące dla modelu osiowosymetrycznej, izotermicznej strugi swobodnej generowanej przez punktowe źródło pędu.

1.1. Współczynnik mieszania i odległość biegunowa

Dla praktycznego obliczania pola prędkości w swobodnej strudze nawiewanej zgodnie z równaniem 1 potrzebna jest oprócz znajomości strumienia pędu znajomość współczynnika mieszania m i odległości biegunowej x_o . Współczynnik m charakteryzuje turbulentne mieszanie powietrza w strudze z powietrzem otaczającym, a jego wartość według [2 i 3] zależy od uzbrojenia otworu nawiewnego i przykładowo wynosi:

- 69÷102 dla dysz,
- 50÷69 dla prostokątnych wylotów swobodnych,
- 32÷62 dla krtek z łopatkami kierującymi prostymi.

W kilku najnowszych pracach zwraca się uwagę, że wartość współczynnika m zależy zarówno średniej prędkości w otworze nawiewnym [4], jak i od stopnia ograniczenia strugi w przestrzeni [5,6].

Badania pól prędkości w strugach formowanych przez dyszę i kratkę nawiewną przedstawione w pracy [7] wykazały, że uzbrojenie otworu nawiewnego zmienia położenie bieguna strugi (pozornego punktowego źródła pędu), a praktycznie nie wpływa na zmianę współczynnika mieszania - m . Zależność położenia bieguna strugi od turbulencji początkowej stwierdzono również w pracy [8].

W celu potwierdzenia bądź zaprzeczenia zależności współczynnika mieszania m od prędkości w otworze nawiewnym wykonano badania w podobnym zakresie prędkości i dla takich samych średnic otworów nawiewnych jak w badaniach prezentowanych w pracy [4]. Zależność współczynnika mieszania m od wielkości przestrzeni ograniczającej strugę nawiewaną sugerują wyniki prac [5 i 6]. Brak jest jednak w literaturze szerszego ujęcia tego problemu. Problem ten stał się przedmiotem prezentowanych badań eksperymentalnych.

1.2. Struktura turbulencji w strugach nawiewanych

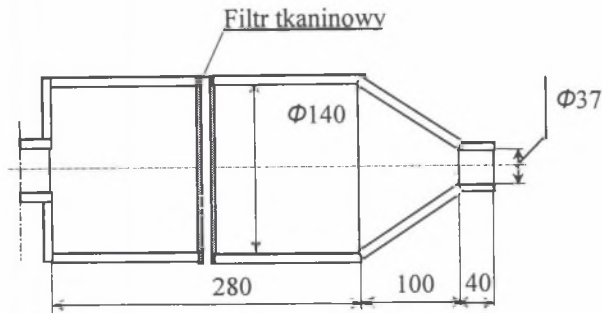
Turbulencja w osiowosymetrycznej strudze swobodnej jest dokładnie zbadana i opisana w literaturze [9]. Zaprezentowane w pracy [9] pomiary wzdłużnych fluktuacji prędkości w osi strugi swobodnej wykazały wzrost intensywności turbulencji od 18 do 22% w odległości od 10 do 25d. Badania Wygnanskiego i Fiedlera [10] wykazały, że makroskala turbulencji w osi strugi swobodnej może być opisana równaniem:

$$A_f = 0.0385 (x + x_0) \quad (2)$$

Jednak poza pracami prowadzonymi w Katedrze OWiTO Politechniki Śląskiej [7] brak jest informacji na temat struktury turbulencji w strugach nawiewanych do ograniczonej przestrzeni.

2. Zakres i metodyka badań

Celem prezentowanych badań było określenie wpływu ograniczenia przestrzeni na wartość współczynnika turbulentnego mieszania - m i położenie bieguna strugi - x_0 , oraz poszukiwanie przyczyn tych zmian w zmianach parametrów turbulentnych strugi. W tym celu wyznaczono: odległość biegunową - x_0 , współczynnik rozkładu prędkości - m , strumień pędu - I oraz parametry turbulentne przepływu, tj. intensywność turbulencji - Tu , mikroskalę - λ oraz makroskalę turbulencji - A . Przedmiotem badań była izotermiczna, osiowosymetryczna struga swobodna generowana przez dyszę o średnicy $d=0,0375m$ (rys.1). Konstrukcja zastosowanej w badaniach dyszy nawiewnej pozwalała na generowanie strugi o niskim poziomie turbulencji.



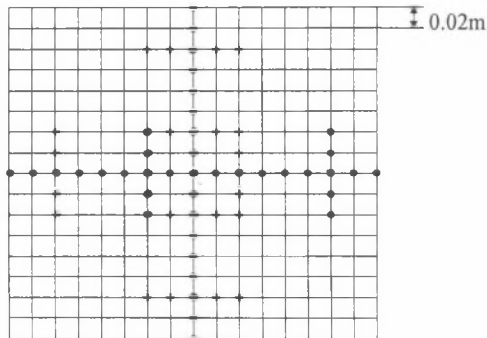
Rys. 1. Budowa dyszy nawiewnej

Fig. 1. The air supply terminal construction

Prędkość początkowa strugi wynosiła $W_0=8\text{m/s}$. Przeprowadzono pięć serii pomiarowych różniących się stopniem ograniczenia przestrzeni rozwoju strugi oraz tłem przeplywowym, tzn.:

- A - struga nawiewana do przestrzeni nieograniczonej z dyszy przymocowanej do specjalnego stelaża,
- B - struga nawiewana do przestrzeni nieograniczonej z dyszy umiejscowionej w ścianie,
- C - struga nawiewana do modelu o wymiarach $3 \times 1,8 \times 1,1\text{m}$, z dyszy zamontowanej w jednej ze ścian modelu,
- D - struga nawiewana do modelu przy jednoczesnym nawiewie strug sąsiadujących,
- E - struga nawiewana do modelu o zredukowanym wymiarze poprzecznym – $3 \times 0,9 \times 1,1\text{m}$.

Na każdą serię pomiarową składały się pomiary prędkości średniej w 64 punktach pomiarowych (rys.2) i 20 pomiarów prędkości chwilowej w osi strugi w każdym z czterech przekrojów pomiarowych. Przekroje pomiarowe znajdowały się w odległościach będących krotnościami średnicy otworu nawiewnego, tj. $10d, 15d, 20d, 25d$.



Rys. 2. Schemat siatki pomiarowej przyjętej w badaniach prędkości średniej

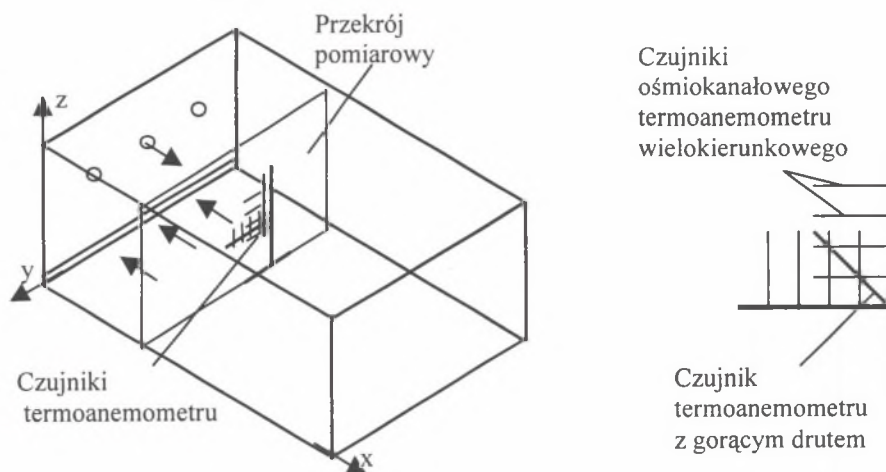
Fig. 2. The measurement grid used in the tests of the mean velocity

Na rysunku 3 pokazano schemat stanowiska pomiarowego. Pomiaru prędkości średniej dokonywano za pomocą ośmiokanałowego termooanemometru wielokierunkowego, czas uśredniania jednego pomiaru wynosił 5 minut. Zestaw wielokanałowy służył również do wyznaczania rzeczywistego położenia osi strugi. Pomiar prędkości chwilowej był realizowany za pomocą anemometru z gorącym drutem, który przed każdą serią pomiarową wzorcowano w tunelu aerodynamicznym. Czujnik anemometryczny z gorącym drutem rejestrował każdorazowo 30000 próbek z częstotliwością zależną od przekroju pomiarowego. W każdym przekroju pomiarowym rejestracji dokonywano dziesięciokrotnie z mniejszą częstotliwością w celu dokładniejszego wyznaczenia makroskali turbulencji oraz dziesięciokrotnie z większą częstotliwością dla wyznaczenia mikroskali. Zastosowane częstotliwości zestawiono w tablicy.

Tablica 1

Zestawienie częstotliwości rejestracji sygnału za pomocą termooanemometru

Przekrój pomiarowy	Częstotliwość (kHz)
10d	10 i 50
15d	10 i 50
20d	5 i 20
25d	5 i 20

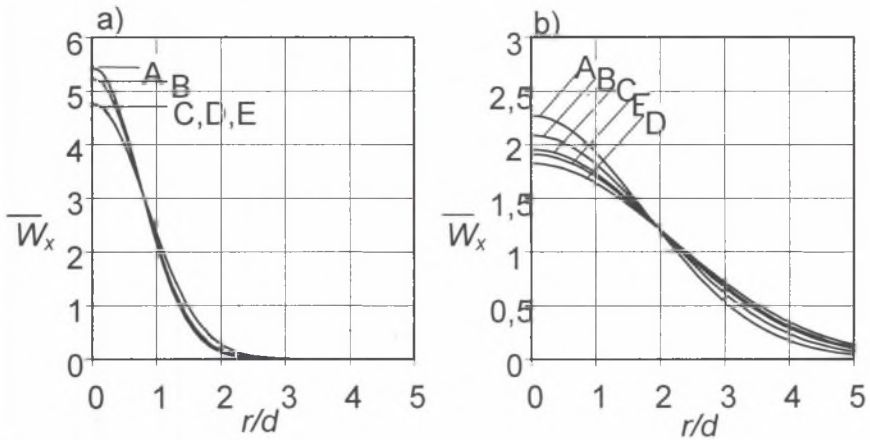


Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego

Fig. 3. The measurement stand

3. Wyniki badań

Metodyka opracowania wyników badań pól średniej prędkości w strugach nawiewanych została przedstawiona w pracy [7]. Według przyjętej metodyki zmierzone wartości średniej prędkości aproksymowane są modelem strugi swobodnej generowanej przez punktowe źródło pędu (1). Stworzony na podstawie wyników badań rozkład prędkości w strudze wykazuje zmienność uwarunkowaną stopniem ograniczenia strugi oraz zmianą tła przepływowego (rys.4). Dla przekroju pomiarowego $10d$ profile prędkości dla przypadków C,D,E są niemal identyczne. Dla przypadków A i B rozkład prędkości odznacza się wyższymi wartościami prędkości średniej w osi strugi i węższym profilem.



Rys. 4. Rozkład prędkości w strudze:

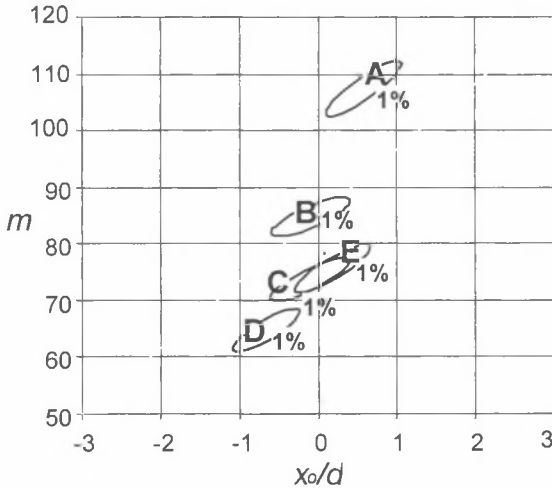
- a) w odległości $10d$ od otworu nawiewnego
- b) w odległości $25d$ od otworu nawiewnego

Fig. 4. The air velocity distributions in the jets:

- c) in the distance of $10d$ from the outlet
- d) in the distance of $25d$ from the outlet

W odległości $25d$ od otworu nawiewnego we wszystkich przypadkach odnotowano znaczne różnice w rozkładzie prędkości, jedynie nieznaczne podobieństwo wykazują przypadki C i E. Na podstawie uzyskanych wyników stworzono mapę błędów aproksymacji jako funkcję współczynnika rozkładu prędkości – m i odległości biegunowej – x_0 (rys.5). Pola błędów aproksymacji są ograniczone liniami stałego błędu $(\Delta - \Delta_{min})/\Delta_{min} = 1\%$. Uzyskana mapa dostarcza informacji o wartościach m i x_0 dla strug o różnym stopniu ograniczenia. Można zauważyć, że zmiany otoczenia, w którym rozwija się struga, wpływają przede wszystkim na wartość współczynnika m , a na odległość biegunową – x_0 tylko w pomijalnym stopniu. Wartości m i x_0 obarczone najmniejszym błędem aproksymacji Δ_{min} przedstawiono w tabl. 2. Największą wartość $m=106$ uzyskano dla strugi nawiewanej do przestrzeni nieograniczonej (seria A). Podobny wynik w swoich badaniach otrzymał Van der Hagge Zijnen [9], tj.: $m=108$, $x_0=-0,5d$. Wartość współczynnika rozkładu prędkości maleje do 84 w przypadku B. Natomiast dla przypadków C i E, w których struga rozwijała się w ograniczonej przestrzeni, wartości m

są podobne. Z kolei w przypadku obecności dwóch sąsiadujących strug (seria D) wartość współczynnika jest najniższa – $m=61$. Dla przypadków A i D sporządzono mapy rozkładu znormalizowanej prędkości średniej \overline{W}_x/W_o (rys. 6). Porównywane strugi różnią się zasięgiem poszczególnych izolinii oraz kątem rozprzestrzeniania się.



Rys. 5. Mapa błędów aproksymacji
 Fig. 5. A map of approximation errors

Tablica 2

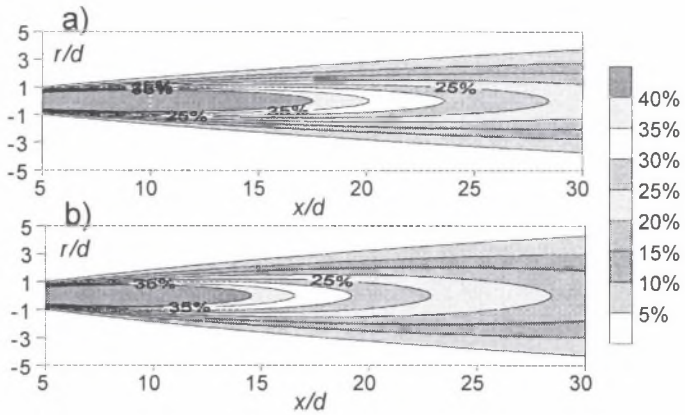
Wartości parametrów: m i x₀ dla badanych strug

Series	m	x ₀
A	106	0,7d
B	84	-0,1d
C	71	-0,1d
D	61	-0,7d
E	77	0,3d

Pomiar prędkości chwilowej w osi strugi stanowił podstawę do wyznaczenia wartości prędkości średniej, odchylenia standardowego i intensywności turbulencji oraz wyznaczenia funkcji autokorelacji. Mikroskalę czasu - τ wyznaczono na podstawie aproksymacji funkcji autokorelacji wielomianem 2 stopnia. Natomiast makroskalę czasu - T wyznaczono dwoma sposobami:

- 1 - jako czas $\tau_p = T$, po którym wartość współczynnika autokorelacji maleje do wartości $1/e$: $R = 1/e$,
- 2 - na podstawie aproksymacji funkcji autokorelacji dwoma przebiegami wykładniczymi o różnych stałych czasowych.

Do dalszych rozważań przyjęto wartości makroskali turbulencji wyznaczone drugą metodą, gdyż uznano ją za dokładniejszą.



Rys. 6. Mapy rozkładów znormalizowanej średniej prędkości, przypadki: a) - A , b) - D

Fig. 6. Maps of normalised mean velocities isolines: a) -case A , b) – case D

Następnie obliczono mikroskalę λ_f oraz makroskalę turbulencji Λ_f wykorzystując hipotezę Taylora o zamrożeniu struktur wirowych:

$$\lambda_f = \tau \cdot \overline{W} \quad (3)$$

$$\Lambda_f = T \cdot \overline{W} \quad (4)$$

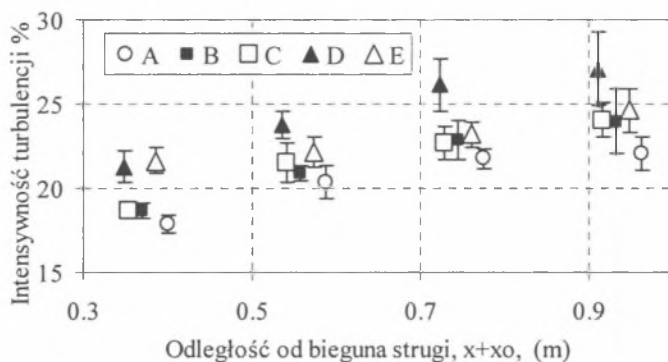
Dla każdej serii pomiarowej i każdego przekroju pomiarowego obliczono średnią arytmetyczną parametrów turbulentnych (Tu , Λ , λ) oraz prędkości średniej w osi strugi (\overline{W}_{xm}).

Wyniki pomiarów chwilowej prędkości osiowej wykazały, że dla przypadków A i B, dotyczących strugi rozwijającej się w dużej przestrzeni, którą można traktować jako nieograniczoną, następuje wzrost intensywności turbulencji od 18 do 24% w odległości $10d \div 25d$. Wynik taki jest bardzo zbliżony do wyników otrzymanych przez Hinzego [9]. Analiza zmienności parametrów turbulentnych wykazuje wzrost ich wartości w miarę oddalania się od bieguna strugi. W przypadku intensywności turbulencji Tu i makroskali turbulencji Λ_f obserwuje się ciągły wzrost ich wartości, podczas gdy w przypadku mikroskali turbulencji λ_f zmiany są raczej nieznaczne. Można by określić ją jako równą $4,5 \pm 2$ mm. Makroskalę turbulencji opisano funkcją odległości od bieguna strugi (tabl. 3).

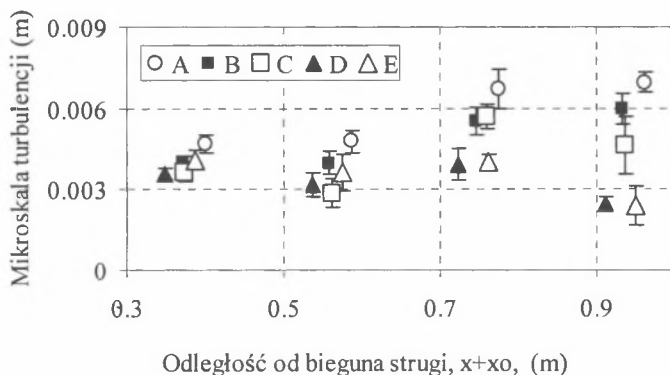
Tablica 3

Równanie regresji zmienności makroskali turbulencji

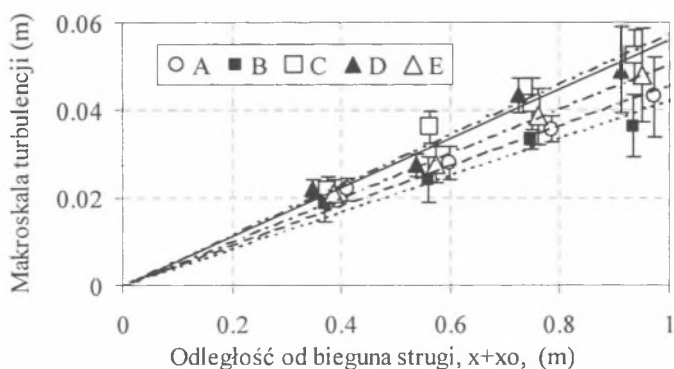
Seria	Styl linii	Makroskala turbulencji
A	————	$\Lambda_f=0.0457(x+x_0)$
B	-----	$\Lambda_f=0.0420(x+x_0)$
C	-·-·-·-·	$\Lambda_f=0.0573(x+x_0)$
D	————	$\Lambda_f=0.0559(x+x_0)$
E	-----	$\Lambda_f=0.0504(x+x_0)$



Rys. 7. Zmienność intensywności turbulencji w funkcji odległości od bieguna strugi
 Fig. 7. Variation of the turbulence intensity in the function of the distance from the jet origin



Rys. 8. Zmienność mikroskali turbulencji w funkcji odległości od bieguna strugi
 Fig. 8. Variation of the dissipation scale in the function of the distance from the jet origin



Rys. 9. Zmienność makroskali turbulencji w funkcji odległości od bieguna strugi
 Fig. 9. Variation of the integral scale in the function of the distance from the jet origin

Dla przypadków A i B, które dotyczą strug nawiewanych do dużej przestrzeni uzyskano podobny wzrost makroskali turbulencji do obserwowanego w strudze swobodnej przez Wygnanskiego i Fiedlera [10]. W pozostałych przypadkach, odnoszących się do strug nawiewnych do pomieszczeń, wzrost ten jest o wiele większy.

4. Wnioski

Pomiary wykazały, iż współczynnik m , charakteryzujący turbulentne mieszanie, zależy od ograniczenia przestrzeni, jak również od sąsiedztwa innych strug nawiewanych. Zmienność jego wartości jest spowodowana zmianami wartości intensywności turbulencji i makroskali długości. Współczynnik m maleje ze wzrostem ograniczenia przestrzeni i wprowadzaniem sąsiadujących strug, podczas gdy wartości Tu i L_f rosną. Najniższe wartości intensywności turbulencji i makroskali długości odnotowano dla przypadku A, dla którego wartość współczynnika turbulentnego mieszania jest najwyższa. Dla przypadku D, dotyczącego strugi rozwijającej się w otoczeniu dwóch sąsiadujących strug, wartość intensywności turbulencji i makroskali turbulencji są najwyższe, podczas gdy wartość współczynnika m jest najniższa.

Bibliografia

1. Heiselberg P., Murakami S., Roulet C. – edytorzy: Ventilation of Large Spaces in Buildings – Analysis and Prediction Techniques, raport końcowy Aneksu 26 IEA ECB&CS: Energy Efficient Ventilation of Large Enclosures, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 1998
2. ASHRAE Handbook, Fundamentals 2001, chapter 32 Space air diffusion
3. Recknagel H., Sprenger E., Honmann S., Schramek E., Poradnik „Ogrzewnictwo i klimatyzacja”, EWFE – Wydanie 1, Gdańsk 1994.
4. Malmstrom T.G., Kirkpatrick A. T., Christensen B., Knapmiller K. D.: Centerline velocity decay measurements in low-velocity axisymmetric jets. J. Fluid Mech., vol.246, pp. 363+377, 1997
5. Abdel-Rahman A. A., Chakroun W., Al-Fahed S.F.: LDA Measurements in the Turbulent Round Jet, Mechanics Research Communications, Vol.24. No. 3, 1997.
6. Karimipannah M.T., Sandberg M. Momentum balance of a round jet and its impingement on a flat surface - Part II: effects of enclosure size. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 1996
7. Hurnik M.: Dobór skal i kinetycznych warunków brzegowych dla fizykalnego modelowania rozdziału powietrza w pomieszczeniu, praca doktorska, Politechnika Śląska w Gliwicach, 2000
8. Malmstrom T.G., Yue Z. Influence of Outlet Characteristics on Free Axial Air Jets. Proc. Roomvent '2000, Reading, 2000
9. Hinze J.O.: Turbulence, 2-nd ed. McGraw-Hill, 1975
10. Wygnanski I., Fiedler H.: J. Fluid Mech., 38,577, 1969