

Przemysław KATEUSZ, Zbigniew POPIOŁEK, Jerzy SZULIKOWSKI
Politechnika Śląska

GENEROWANIE STRUG POWIETRZA NA WYPŁYWIE Z TUNELU AERODYNAMICZNEGO O KONTROLOWANYM STANIE TURBULENCJI

Streszczenie. Zrelacjonowano prace nad zaprojektowaniem i zastosowaniem układów turbulizatorów, w jakie wyposażona została część wylotowa tunelu aerodynamicznego.

Przedstawiono konstrukcję układów i wyniki pomiarów identyfikujących generowane strugi w ustalonym przekroju roboczym w zakresie prędkości średniej gazu oraz turbulencji opisanej intensywnością i parametrami struktury (np. mikro- i makroskale, widmo mocy).

Uzyskano zadowalająco jednorodne przepływy powietrza w otwartej przestrzeni w zakresie prędkości $3 \div 30$ m/s i intensywności turbulencji $1 \div 20\%$.

Strugi takie znajdują zastosowanie – jako zróżnicowane i kontrolowane pod względem turbulencji tła gazowe – m.in. w aerodynamicznych badaniach anemometrów ciśnieniowych.

GENERATION OF WIND TUNNEL DISCHARGING AIR STREAMS WITH TURBULENCE CONTROL

Summary. Works were reported on the design and application of sets of turbulizers with which an outlet part of a wind tunnel was equipped.

The construction of the sets was presented together with the results of measurements through which the generated streams were identified in the test section in the scope of mean velocity and turbulence as described by its intensity and structure parameters (micro and macro length scales and frequency spectra).

Homogeneous, in a satisfying degree, air flows were obtained in the open space at the range of velocity $3 \div 30$ m/s and turbulence intensity $1 \div 20\%$.

Such streams, as gaseous flowing background of variable and controlled turbulence, are used, among others, in the aerodynamic testing of pressure anemometers.

1. Wstęp

Jeden z etapów realizowania w Katedrze Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania Politechniki Śląskiej w Gliwicach projektu badawczego finansowanego przez Komitet Badań Naukowych pt. "Badania wpływu turbulencji strugi gazu na dokładność pomiaru prędkości

różnicowymi sondami ciśnieniowymi” (Nr 8 T10C 005 11) obejmował stworzenie stanowiska laboratoryjnego do generowania turbulentnego przepływowego tła gazowego.

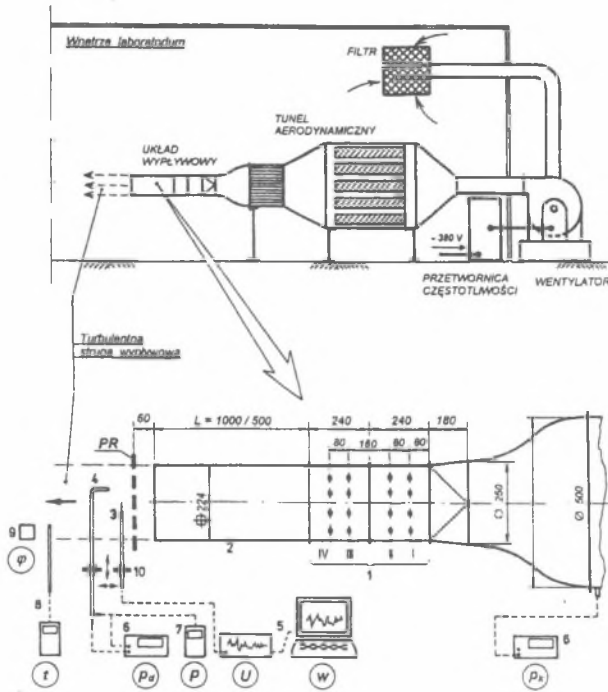
Potrzebą było dysponowanie strugami powietrza o zróżnicowanej turbulencji, w których lokowane dla celów badawczych miały być (wymienione w przytoczonym tytule projektu) pewne ciśnieniowe czujniki prędkości gazu.

Wypracowanie sposobu generowania strug spełniających wymagania jednorodności i wyraźnej odmienności pod względem turbulencji oparte było na adaptacji posiadanego otwartego tunelu aerodynamicznego. Jego dobudowaną część wylotową stanowią wymienne układy wypływowe o działaniu turbulizującym. Badano pomiarowo efekt ich działania, tj. postać wypływającej do otwartej przestrzeni strugi powietrza w jej określonym przekroju roboczym (prędkości średnie, parametry turbulencji). Te z układów, które dały zadowalające rezultaty, przyjęto jako ostateczne wyposażenie stanowiska badawczego.

Przedstawione w referacie wyniki są pierwszym zrelacjonowaniem efektów zakończonych prac nad generowaniem referencyjnych przepływowych strug turbulentnych.

2. Stanowisko do generowania strug turbulentnych

Stanowisko laboratoryjne pokazane na rys. 1 ma w przeważającej części charakter stałego wyposażenia laboratorium badawczego. W otwartym układzie z tunelem aerodynamicznym przepływa powietrze – czerpane z przestrzeni wewnętrznej – którego strumień objętości regulowany jest poprzez płynną zmianę obrotów wentylatora, realizowaną przy użyciu przetwornicy częstotliwości. W czepni i wewnątrz tunelu znajdują się filtry włókninowe zapewniające wysoki poziom czystości powietrza opuszczającego całą instalację. Zasadniczy element aerodynamiczny tunelu stanowi okrągła dysza o kontrakcji 500/250 mm i profilu wg koncepcji Morela [1]. Dysza przechodzi w układ wypływowy o przekroju kwadratowym o boku 224 mm, który to układ jest zestawiany wariantowo z różnych układów turbulizatorów i odcinka prostego o długości 500 lub 1000 mm. Koniec tego odcinka jest płaszczyzną poziomego wylotu do otoczenia dla strugi powietrza, która charakteryzuje się określonym stanem turbulencji. Jest on zmienny i zależy od konfiguracji układu wypływowego, a zasadniczo od włączonego weń układu turbulizatorów. Maksymalna prędkość w strudze na wylocie, determinowana różną opornością hydrauliczną poszczególnych układów wypływowych, kształtuje się w zakresie od dwudziestu kilku do trzydziestu m/s.



Rys. 1. Stanowisko do generowania wypływowych turbulentnych strug powietrza (z aparaturą pomiarową użytą do identyfikacji strug)

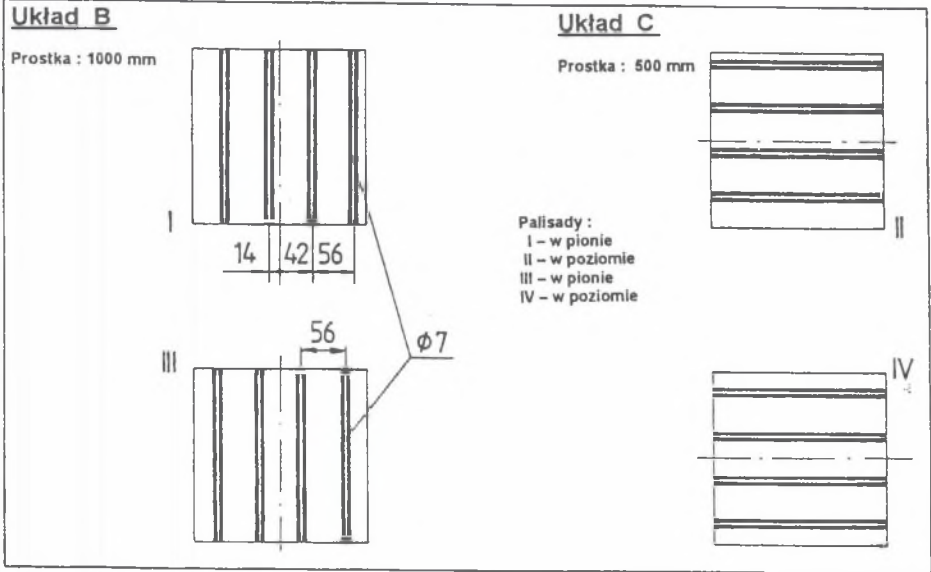
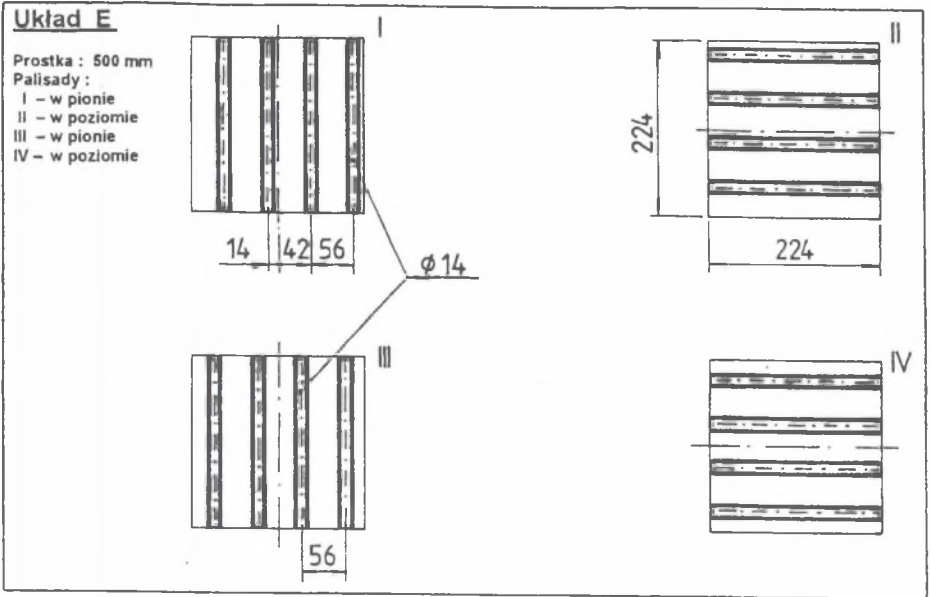
1 – układ turbulizatorów (palisady I÷IV), 2 – prostka, 3 – czujnik anemometryczny, 4 – rurka spiętrzająca, 5 – układ termooanemometru, 6 – mikromanometr różnicowy, 7 – miernika ciśnienia bezwzględego, 8 – termometr, 9 – higrometr, 10 – układ przesuwu, *PR* – przekrój roboczy

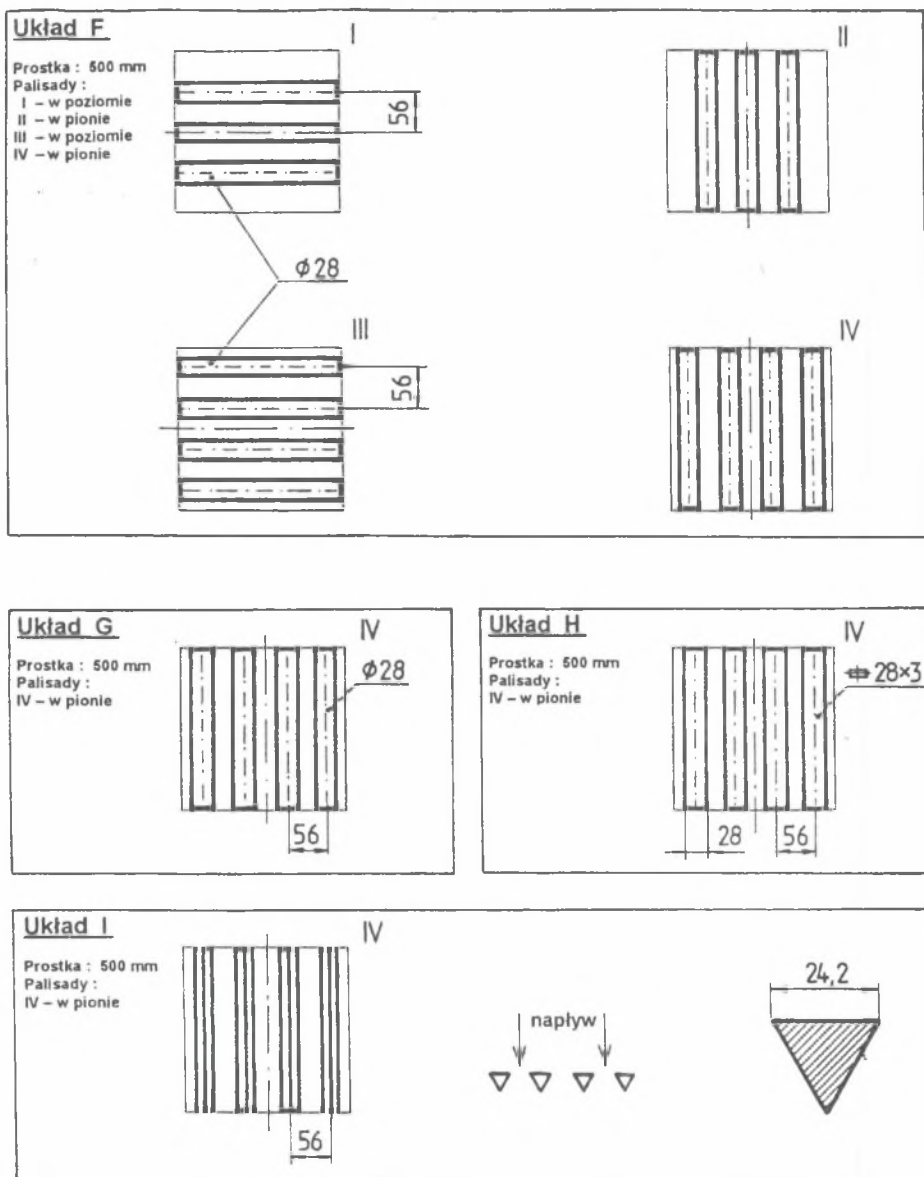
Fig. 1. Stand for generation of turbulent discharging air streams (including measuring apparatus used for identification of the streams)

1 – set of turbulizers (palisades I÷IV), 2 – straight conduit, 3 – anemometer sensor, 4 – Pitot-static tube, 5 – thermoanemometer system, 6 – differential micromanometer, 7 – absolute pressure gauge, 8 – thermometer, 9 – hygrometer, 10 – travelling system, *PR* – test section

Funkcjonowanie osiem układów wypływowych, a w nich różne układy turbulizatorów – każdy utworzony szeregowo przez palisady (w ilości do czterech sztuk) wzdłużnych elementów lokowanych w pionie lub w poziomie. W przekroju elementy te są okrągłe, prostokątne bądź trójkątne. Konfigurację układów wypływowych (oznaczonych literami O, C, B, E, F, G, I, H), w tym budowę zastosowanych układów turbulizatorów, przedstawia rys. 2.

Układ O
 Prostka : 500 mm Palisady : brak





Rys. 2. Konstrukcja układów wypływowych
 Fig. 2. Construction of discharge sections

Rozwiązanie finalne, tj. zestaw powyższych ośmiu układów wypływowych, jest wynikiem szeregu prób projektowania i sprawdzania efektów działania różnych elementów turbulizujących i ich układów, z których część została odrzucona. Te prace złożyły się na etap

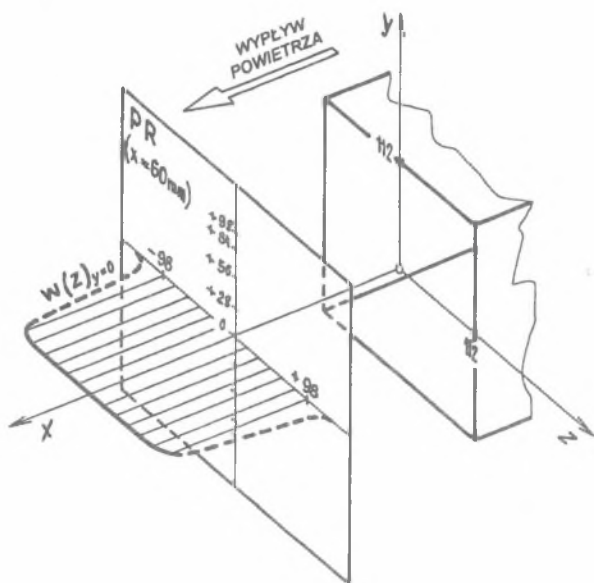
badania, których samą procedurę pomiarowo-obliczeniową jak i wyniki w odniesieniu już tylko do zaakceptowanych generatorów strug omawia rozdział następny.

3. Charakterystyki strug turbulentnych

Mając na uwadze ściśle określony cel wykorzystania turbulentnych strug wypływowych (patrz "Wstęp") wybrano jako przekrój roboczy **PR** pionową płaszczyznę położoną w odległości 60 mm od wylotu i zidentyfikowano w niej postać strugi. Badania te obejmowały pomiary prędkości w **PR** praktycznie w całej strudze, pomiary zmienności prędkości na długości strugi oraz pomiary intensywności i parametrów struktury turbulencji w wybranych punktach przekroju, m.in. w jego środku. Rys. 1 dostarcza ogólnej informacji o użytej aparaturze. Przyjęty układ współrzędnych, orientujący rejon wylotu i rozchodzenia się strugi powietrza (w tym przekrój **PR** oraz punkty pomiarowe), pokazany jest na rys. 3. Przez pojęcie prędkość rozumiana jest tu prędkość wzdłużna (po osi x) jako praktycznie identyczna z prędkością wypadkową w strudze. Za dolny próg – będącego przedmiotem zainteresowania – zakresu prędkości strugi na wypływie przyjęto nominalny, średni poziom 3 m/s, a za górny wartość maksymalną możliwą dla danego układu wypływowego.

Na potrzeby identyfikacji przestrzennego obrazu prędkości w strudze mierzono w określonych punktach przepływu turbulentnego wartość średnią tej wielkości (w przeciwieństwie do wartości chwilowych wynikających z fluktuacji czasowych). Do bezpośredniego pomiaru zastosowano L-kształtną mikrorurkę spiętrzącą odbierającą ciśnienie dynamiczne p_d , sprzężoną z cyfrowym mikromanometrem różnicowym. Jeden pomiar uśrednionego sygnału ciśnieniowego rurką trwał od 20 do 30 s. Rurka zamocowana była w układzie przesuwu w trzech kierunkach x , y , z . Tor przesuwu ciśnienia statycznego gazu w strudze (p) z rurki miał oddzielne wyprowadzenie do cyfrowego miernika ciśnienia bezwzględного. W strudze ulokowane także były: rezystancyjny czujnik termometru cyfrowego (pomiar temperatury t) i higrometr włosowy (pomiar wilgotności względnej φ). Pomiar p , t i φ służył dokładnemu kontrolowaniu na bieżąco gęstości powietrza.

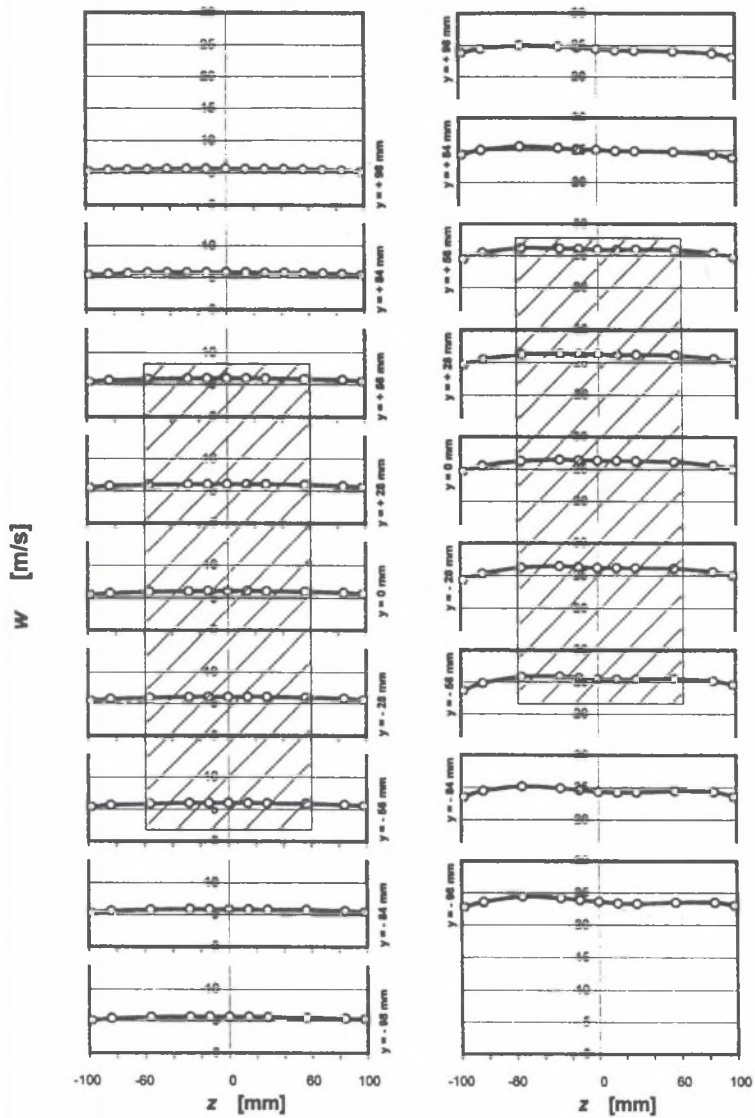
W płaszczyźnie przekroju roboczego **PR** zdejmowane były profile prędkości wzdłuż osi poziomej z na odcinku od -98 do $+98$ mm na różnych wysokościach y : $+98$, $+84$, $+56$, $+28$, 0 , -28 , -56 , -84 , -98 mm. Układały się one w dwuwymiarowy obraz pola prędkości $w(y, z)$ w przekroju roboczym.



Rys. 3. Przyjęte zorientowanie strugi, przekroju roboczego *PR* i profili prędkości
 Fig. 3. Assumed orientation of a stream, test section *PR* and velocity profiles

Na rys. 4 zamieszczono przykładowy zestaw wszystkich profili prędkości w przekroju roboczym dla średnio turbulentnego przepływu, jaki generowany jest przez układ *F*. Zestaw ten daje obraz pola prędkości typowy dla przepływów we wszystkich pozostałych układach wypływowych. W obrębie centralnego, w przybliżeniu kwadratowego obszaru ok. 120×120 mm (pole zakreskowane na rysunku) można mówić o praktycznym *plateau* prędkości. Prędkość względna, tj. odnoszona do wartości zmierzonej w punkcie (0; 0), czyli tzw. prędkości centralnej w_0 , występuje w tym przypadku w ww. *plateau* z rozrzutem: $0,967 \div 1,002$ dla $w_0 = 6,1$ m/s oraz $0,968 \div 1,005$ dla $w_0 = 26,3$ m/s.

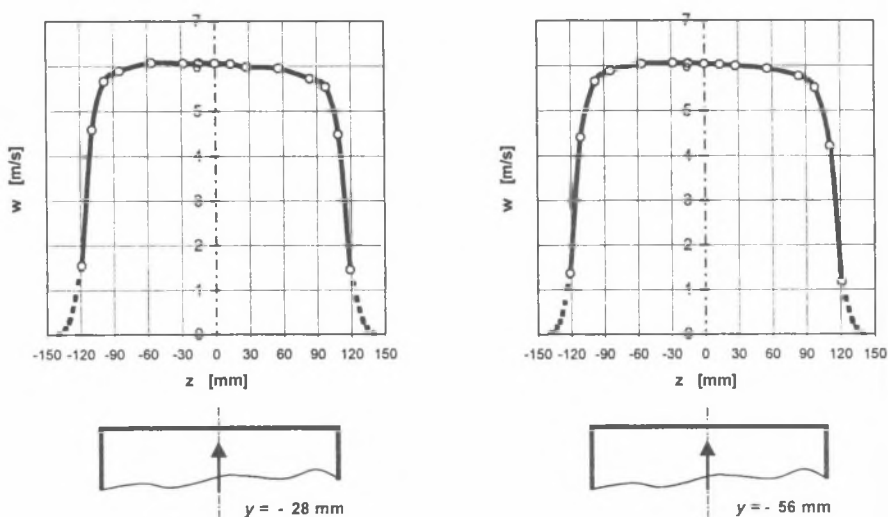
Poprzeczne zanikanie prędkości gazu w *PR* poza *plateau* aż do umownej granicy strugi widoczne jest na przykładzie zamieszczonych na rys. 5 wyników rozpoznania przepływu z prędkością centralną 6,0 m/s dla układu *E*. Te "rozszerzone" profile pokazują, iż wystarczającą do oceny jakości danej strugi jest identyfikacja jej poprzecznego profilu prędkości w *PR* na odcinku od -100 do $+100$ mm.



Rys. 4. Zestaw profili prędkości powietrza $w(z)$ na wszystkich poziomach y dla układu F przy $w_0 = 6,1$ i $26,3$ m/s

Fig. 4. Set of air velocity profiles $w(z)$ on all levels of y for the section F at $w_0 = 6,1$ and $26,3$ m/s

Ponieważ strugi jako referencyjne tła gazowe muszą odznaczać się jednorodnością pod względem prędkości zarówno w płaszczyźnie poprzecznej (przekrój PR), jak i wzdłuż osi z , zbadano rozwój strugi na tym kierunku. Zmierzono poprzeczne profile prędkości w analogicznej do PR płaszczyźnie położonej w oddaleniu $x = 300$ mm od wylotu. Wyniki dla układu F przy dwóch nominalnych prędkościach centralnych: 6 i 26 m/s przedstawiono na rys. 6. Obszar *plateau* utrzymuje się daleko, na wystarczającej odległości poza współrzędną $x = 60$ mm.

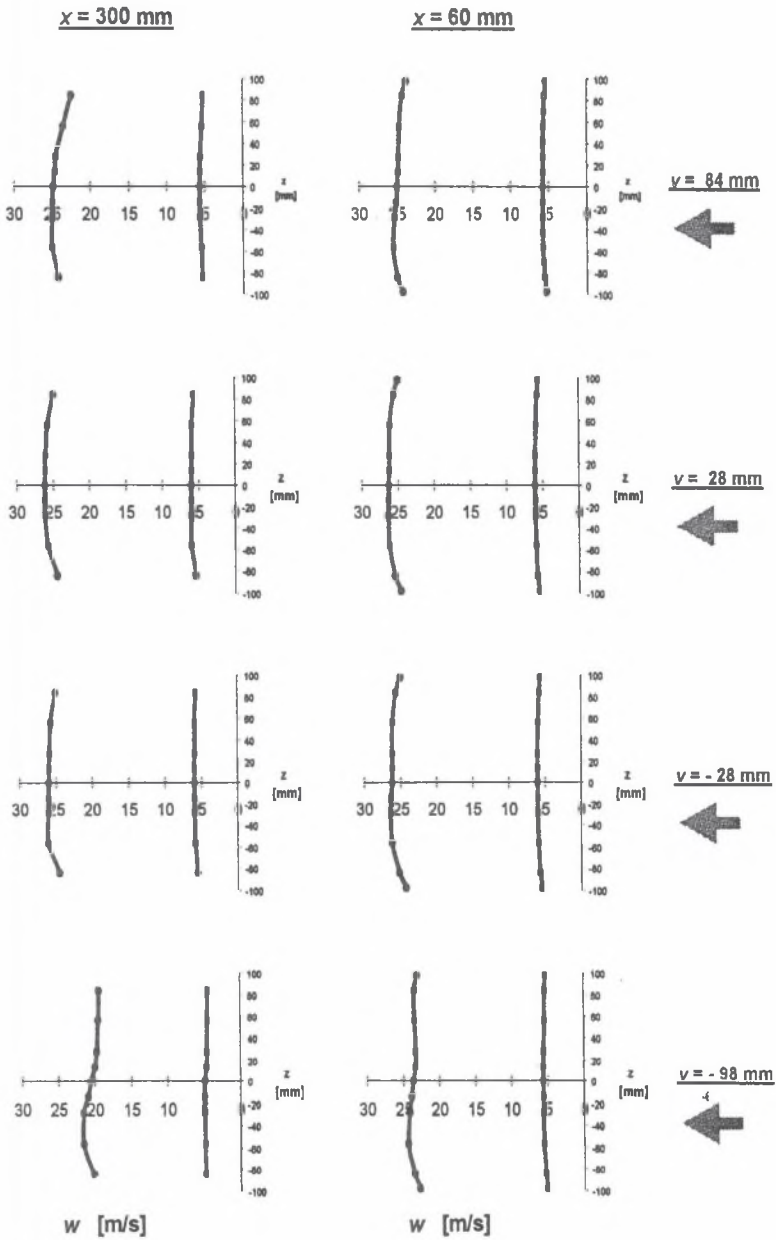


Rys. 5. Przykładowe "rozszerzone" profile prędkości $w(z)$: dla układu E, na poziomach $y = -28$ i -56 mm, przy $w_0 = 6,0$ m/s

Fig. 5. Examples of 'extended' velocity profiles $w(z)$: for the section E, on the levels of $y = -28$ and -56 mm, at $w_0 = 6,0$ m/s

Obraz globalny kształtowania się prędkości w PR w przepływach generowanych przez wszystkie 8 układów daje – rozpatrywany łącznie z charakterystycznymi rozkładami $w(y, z)$ z rys. 4 i 5 – rys. 7. Przedstawiono na nim profile prędkości $w(z)_{y=0}$ dla wybranych poziomów prędkości. Strugi wytwarzane we wszystkich układach dla prędkości od minimalnej do maksymalnej dla każdego układu uznano za wystarczająco jednorodne pod względem prędkości.

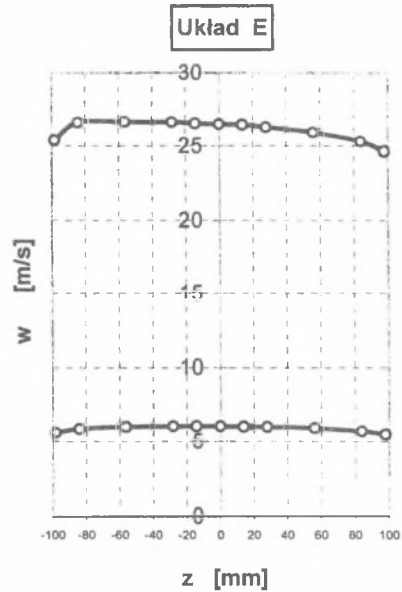
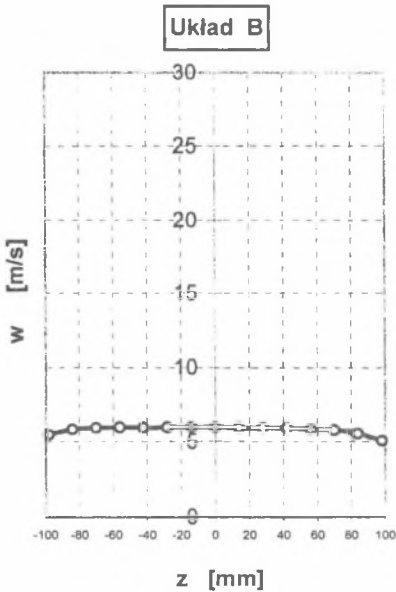
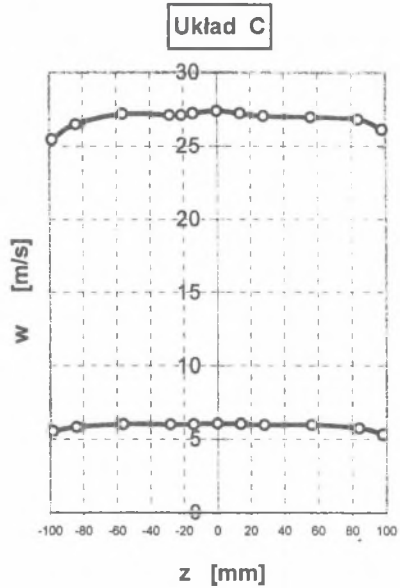
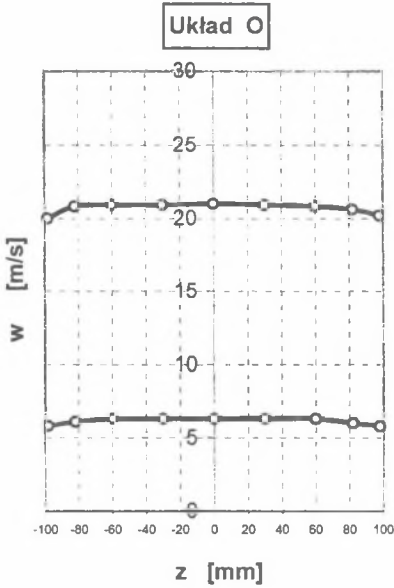
Na potrzeby przyszłego wykorzystywania turbulentnych strug wypływowych w określonych badaniach, kiedy to w strudze nie powinny być lokowane żadne elementy pomiarowe mogące zaburzać przepływ, ustalona została dla każdego układu charakterystyka przepływowa, tj. zależność pomiędzy prędkością centralną a pewnym kontrolnym,

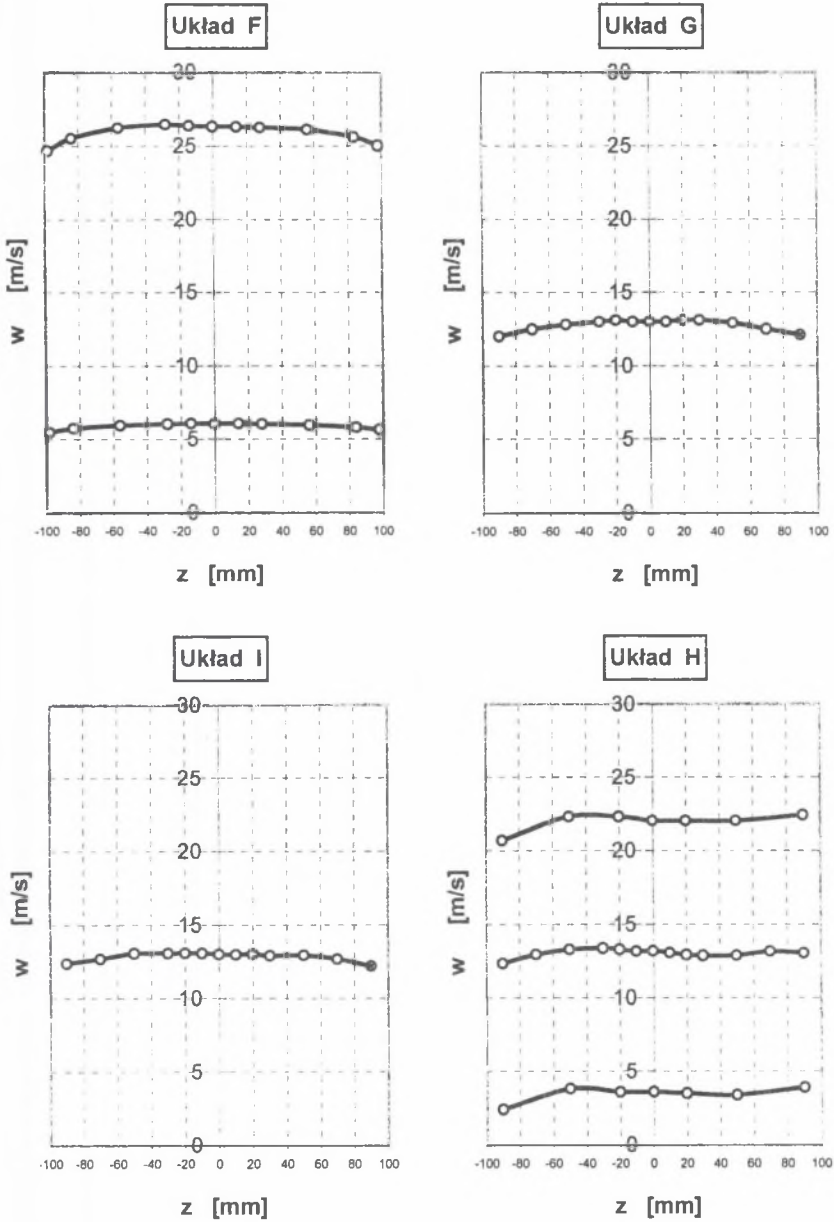


Rys. 6. Zmienność profili prędkości $w(z)$ wraz z oddalaniem się od wylotu (współrzędna x) – dla układu F, dla wybranych poziomów y i prędkości w_0

Fig. 6. Evolution of velocity profiles $w(z)$ along the distance from the outlet (coordinate x) – for the section F, for selected y levels and velocity w_0

korelacyjnym ciśnieniem (względny – w stosunku do otoczenia) p_k , które odbierane jest w sposób nie ingerujący w strugę (różnie dla różnych układów, np. z poboczniczy tunelu – patrz rys.2).



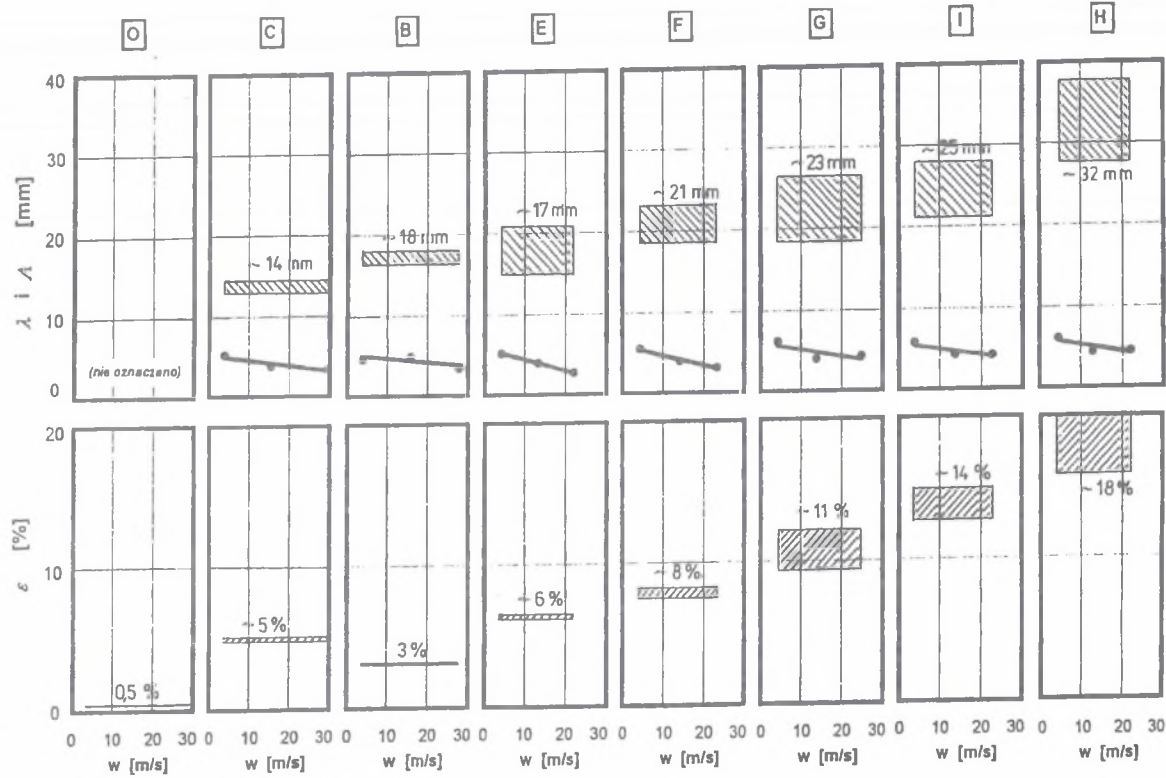


Rys. 7. Profile prędkości $w(z)_{y=0}$ przy różnych wartościach w_0 dla wszystkich układów wypływowych
 Fig. 7. Velocity profiles $w(z)_{y=0}$ at different w_0 values for all discharge sections

Identyfikacja stanu turbulencji strug wypływowych oparta jest na termometrycznym pomiarze czasowych przebiegów fluktuacji prędkości (w) w wybranych punktach *PR.* Procedura pomiarowo-obliczeniowa realizowana była za pomocą zestawu, na który składają się: mikroczujnik z grzanym drutem i anemometr stałotemperaturowy odbierające przebieg sygnału napięciowego (U), karta przetwornika A/C dokonująca akwizycji tego przebiegu w pliku w komputerze, zewnętrzny program wstępnej obróbki danych, narzędzie obliczeniowe w arkuszu Excel (utworzone na potrzeby niniejszych badań) do kalkulacji końcowych. Docelowo wyznaczano intensywność turbulencji i opis jej struktury. Czujniki były każdorazowo dla danej sesji pomiarowej wzorcowane w przepływie nieturbulentnym mikrorurką spiętrzącą z efektem w postaci charakterystyki wzorcowania aproksymowanej wielomianem 4 stopnia.

Dla jednej sytuacji przepływowej w danym punkcie w przestrzeni pomiar obejmował 30 000 próbek sygnału napięciowego. Pomiar powtarzany był dziesięciokrotnie. Częstotliwość próbkowania wynosiła: na potrzeby intensywności turbulencji $10 \div 20$ kHz, dla opisu struktury turbulencji $20 \div 200$ kHz. Program obróbki wstępnej przebiegu napięciowego transformuje go do przebiegu prędkościowego na podstawie charakterystyki wzorcowania. Wyznacza przy tym także intensywność turbulencji ε , prędkość średnią i przebieg współczynnika autokorelacji. Zgodnie z tym przebiegiem w narzędziu excelowskim obliczana jest z parabolicznego aproksymowania w krótkim dystansie początkowym mikroskala czasu, a z niej mikroskala przestrzenna λ , czyli skala dyssypacji energii oddająca przeciętny rozmiar najmniejszych form wirowych. Z funkcji współczynnika autokorelacji poprzez aproksymowanie jej (modelem podwójnie wykładniczym), a następnie analityczne całkowanie w nieograniczonym opóźnieniu czasowym wyznaczana też była makroskala czasu, a z niej makroskala długości A , czyli skala dyfuzji wirowej opisująca umownie największe formy wirowe. Krzywa zaniku współczynnika autokorelacji posłużyła także do zbudowania przebiegów częstotliwościowych opisujących widmo mocy: funkcji gęstości widmowej mocy $E(f)$, a z niej obrazu skumulowanej energii turbulencji.

Dla wszystkich układów wypływowych zmierzono w punkcie (0; 0) intensywność i parametry struktury turbulencji na trzech poziomach prędkości centralnej: minimalnym (ok. 3 m/s), średnim (kilkanaście m/s) i maksymalnym (dwadzieścia kilka m/s). Wyniki przedstawione są na rys.8. Zanotowano statystyczny rozrzut wartości ε i A w obrębie powtarzanych pomiarów i na tle zmiennego poziomu prędkości powietrza w strudze –



Rys. 8. Intensywność turbulencji (ϵ) oraz mikro- (λ) i makroskala (Λ) przestrzenna turbulencji w strugach powietrza generowanych przez wszystkie układy wypływe (O, ..., H)

Fig. 8. Turbulence intensity (ϵ) and micro (λ) and macro (Λ) length scales of turbulence in the air streams generated by all discharge sections (O, ..., H)

generalnie tym większy, im bardziej burzliwa była struga. Postać najmniejszych wirów, o wymiarze ok. 5 mm, okazuje się taka sama dla wszystkich strug. Ze względu na niski poziom fluktuacji sygnału napięciowego (w stosunku do szumów w układzie pomiarowym) dla przypadku bardzo słabo turbulentnych przepływów w układzie **O** (bez turbulizatorów) nie było tu możliwe wyznaczenie funkcji współczynnika autokorelacji i w konsekwencji skal turbulencji.

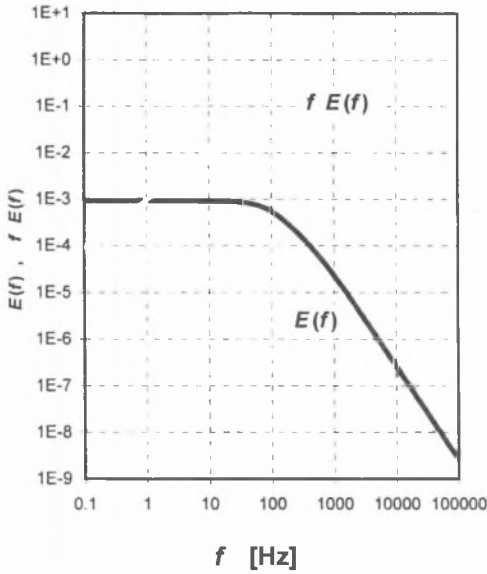
Przykładowe zidentyfikowanie struktury turbulencji poprzez funkcję gęstości widmowej mocy i rozkład skumulowanej energii turbulencji pokazuje rys. 9 dla dwóch odmiennych strug: słabo burzliwej (układ **B**) i silnie burzliwej (układ **H**) – przy średnim poziomie prędkości.

4. Uwagi końcowe

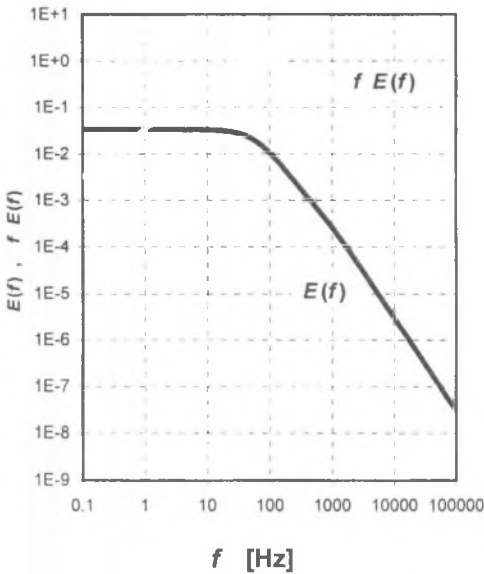
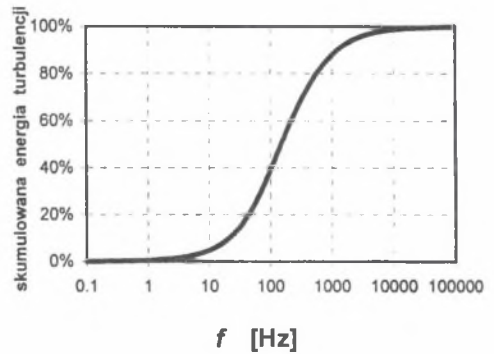
Opracowano sposób generowania strug turbulentnych wypływających poziomo do otoczenia ze specjalnie zaadaptowanego tunelu aerodynamicznego, z jego kwadratowego w przekroju odcinka wypływowego o boku 224 mm. Dzięki zastosowaniu specjalnych, przebadanych układów turbulizatorów strugi odznaczają się zróżnicowanym stanem turbulencji opisywanym np. intensywnością w zakresie od 0,5% do blisko 20%. W poprzecznym przekroju roboczym w odległości 60 mm od wylotu cechują się zadowalającą jednorodnością na obszarze ok. 120×120 mm.

Uzyskiwane turbulентne strugi mogą znaleźć zastosowanie jako referencyjne, kontrolowane przepływowe tła gazowe dla badania zachowania się (aerodynamicznego, metrologicznego itp.) małych obiektów, które byłyby umieszczane w przekroju roboczym.

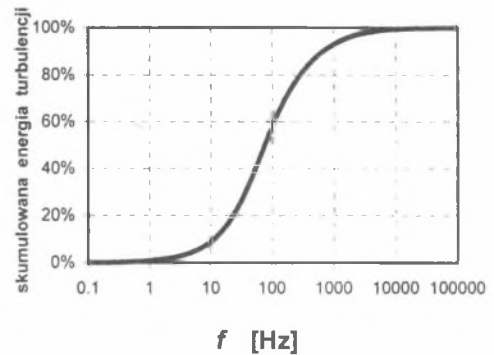
Omawiany układ znalazł swe pierwsze zastosowanie (z myślą o którym powstał) w pracach badawczych nad zachowaniem się w turbulentnych przepływach pewnych różnicowych sond ciśnieniowych do pomiaru prędkości gazu [2].



Układ B ; $w_0 = 15,1$ m/s



Układ H ; $w_0 = 12,7$ m/s



Rys. 9. Przykłady identyfikacji turbulencji poprzez widma mocy dla dwóch strug: słabo turbulენტnej w układzie B ($w_0 = 6,0$ m/s) i silnie turbulენტnej w układzie H ($w_0 = 12,7$ m/s)

Fig. 9. Examples of identification of turbulence state through frequency spectra in the cases of two streams: one of a low turbulence for the section B ($w_0 = 6,0$ m/s) and one of a high turbulence for the section H ($w_0 = 12,7$ m/s)

LITERATURA

1. Morel T.: Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions. *Journal of Fluids Engineering*, June, 1975.
2. Kateusz P., Popiołek Z., Szulikowski J.: Badania charakterystyk pomiarowych zwartych różnicowych sond ciśnieniowych. Materiały VI Ogólnopolskiego Sympozjum "Zastosowanie Mechaniki Płynów w Inżynierii Środowiska '99"; Gliwice-Wisła 10-11.06.1999 (Organizator: Kat. Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania Politechniki Śląskiej w Gliwicach), s. 153÷164.

Recenzenci: Prof. dr hab. inż. Zdzisław Kabza
Prof. dr hab. inż. Mieczysław Teisseyre

Abstract

In a laboratory at the Silesian University of Technology, Gliwice, Poland, an open wind tunnel was adapted. A new additional outlet part of a square cross-section 224×224 mm, following the exit nozzle of a profile after Morel's pattern, was built. Sets of turbulizers were designed, tested and then mounted in this part, thus forming different discharge sections. The turbulizers are longitudinal elements of circular, triangular and rectangular cross-section. As a result, discharging air streams of miscellaneous turbulence states are generated at the outlet of the system.

There is a test section chosen 60 mm away from the outlet plane. By means of, among others, a hot wire anemometry technique the following parameters of the gas flow were identified in the test section: mean velocity profiles and turbulence as defined by its intensity, micro and macro length scales and frequency spectra.

Each of the streams is characterized by its turbulence state that is constant within the range of velocity 3 ÷ 30 m/s. The turbulence is possible to be changed in the range of its intensity approx. 1 ÷ 20%. The homogeneity of the streams is achieved in the test section on the square area 120×120 mm.

The discharging streams produced serve as reference turbulent flows in aerodynamic tests of small-sized objects, e.g. in the recognition of the influence of turbulence on metrological properties of pressure anemometers.