

Tunelu aerodynamicznego o obiegu zamkniętym, ze stabilizacją temperatury i wilgotności powietrza, przystosowany do pomiarów metodami optycznymi

MACIEJ BUJAŁSKI, MAREK GAWOR, JACEK SOB CZYK

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

W artykule opisano konstrukcję i parametry metrologiczne nowo wybudowanego tunelu aerodynamicznego o obiegu zamkniętym. Szczegółowo opisano segmenty tunelu stanowiące o właściwościach jego pracy. Opisano również system sterowania i kontroli pracą tunelu oraz systemy pomiarowo-kontrolne. Przedstawiono zestaw do pomiarów metodą stereoskopowej cyfrowej anemometrii obrazowej (SPIV). Opisano wyposażenie pomieszczenia, w którym jest umieszczony tunel, a stanowiące o warunkach prowadzenia pomiarów.

Słowa kluczowe: tunel aerodynamiczny, stereoskopowa cyfrowa anemometria obrazowa (SPIV), pomiar prędkości przepływu

1. Wstęp

W Instytucie Mechaniki Górotworu PAN (IMG PAN) od wielu lat prowadzi się badania szerokiej klasy zjawisk zachodzących w przepływach gazów i cieczy. Istotnym osiągnięciem Instytutu jest opracowanie wielu własnych czujników anemometrycznych, przystosowanych do spełniania często niestandardowych wymogów metrologicznych, z jakimi spotykamy się przy prowadzeniu badań naukowych. IMG PAN jest jedyną w kraju i jedną z niewielu na świecie placówek naukowych, w których została opanowana technologia wykonywania zarówno czujników dla potrzeb anemometrii termicznej jak i skrzydełkowej. W prowadzonych badaniach od lat wykorzystuje się również układy anemometrii laserowej i obrazowej. Realizacja tych badań wymaga opracowywania i wdrażania coraz doskonalszych technik pomiarowych i budowy bądź zakupu aparatury.

Dlatego koniecznym stało się przygotowanie zupełnie nowego stanowiska pomiarowego. Opracowano koncepcję nowoczesnego tunelu aerodynamicznego pracującego w obiegu zamkniętym, przeznaczonego do badań z wykorzystaniem optycznych metod pomiarowych. Tunel ten w zamierzeniu miał umożliwić prowadzenie badań różnorodnych zjawisk przepływowych (Barlow i in., 1999). Budowa tunelu wraz z zakupem aparatury dodatkowej stała się możliwa dzięki wsparciu finansowemu z FNiTP (Nr umowy: 682/FNiTP/34/2011).

Opisywany tunel aerodynamiczny (Rys. 1) umożliwia zastosowanie bardzo efektywnego narzędzia do analizy pól prędkości jakim jest cyfrowa anemometria obrazowa (ang. *Particle Image Velocimetry* – PIV) (Raffel i in., 2007). Pozwala ona nie tylko na dwu- lub trójwymiarową wizualizację przepływu, ale również na ilościowe określanie pól prędkości. Możliwa więc jest nie tylko obserwacja lecz, co ważniejsze, ilościowy i jakościowy opis zaburzeń przepływu indukowanych przez badane obiekty, względnie ich modele. Wśród nich można wymienić obiekty o szerokim zakresie rozmiarów – od elementów konstrukcyjnych różnego rodzaju urządzeń takich, jak głowice czujników anemometrycznych, łopatki wentylatorów poprzez rozmaite konfiguracje modeli wyrobisk górniczych, szczególnie w rejonie ściany po hałdy, zwałowiska i wysypiska. Zakres badań jest ściśle związany z dotychczasową tematyką realizowaną w Instytucie, a uzyskane wyniki dostarczają informacji brakujących do pełnego obrazu badanych zjawisk. W przypadku dotychczasowych metod pomiarowych uzyskiwano informację o prędkości i temperaturach w ograniczonej liczbie punktów pomiarowych, w których można było umieścić czujniki. Co więcej ich obecność mogła mieć wpływ na

mierzone wielkości. Stąd pierwszym zastosowaniem będzie badanie opływu wokół czujników. Pozwoli to na nową interpretację historycznych danych i zmniejszy niepewność pomiarów w sytuacjach, gdy zastosowanie metody PIV nie będzie możliwe.



Rys. 1. Fotografia tunelu aerodynamicznego

2. Parametry metrologiczne tunelu

Tunel aerodynamiczny zapewnia uzyskanie następujących parametrów strumienia powietrza w przestrzeni pomiarowej:

- prędkość strumienia powietrza: od 0.1 m/s do 60 m/s,
- równomierny rozkład prędkości (z tolerancją 1%) w obu płaszczyznach (pionowej i poziomej przechodzących przez oś tunelu) w obszarze stanowiącym co najmniej 80% przekroju przestrzeni pomiarowej,
- intensywność turbulencji $< 0,5\%$,
- kąt odchylenia strumienia od osi tunelu w obu płaszczyznach (pionowej i poziomej przechodzących przez oś tunelu) $< 0,3^\circ$,
- stabilna temperatura strumienia, regulowana w zakresie do -1°C (lub więcej) względem temperatury otoczenia,
- ciśnienie statyczne w przestrzeni pomiarowej zbliżone do ciśnienia atmosferycznego.

3. Geometria tunelu

Tunel charakteryzuje się obiegiem zamkniętym, zorientowanym w płaszczyźnie poziomej. Jest wyposażony w zamkniętą oraz półotwartą przestrzeń pomiarową. Obieg tunelu zawiera cztery kolana, w których umieszczono palisady kierownic przepływu, służące do zmiany kierunku przepływu powietrza o 90° . Moduł napędowy składa się z jednego wentylatora średnio-ciśnieniowego o średnicy $D = 900$ mm. Silnik umieszczony został w osi tunelu w osłonie opływowej z odprowadzeniem ciepła na zewnątrz tunelu.

Celem redukcji podłużnej składowej gradientu ciśnienia w komorze pomiarowej, powstającej na skutek wzrostu grubości warstwy przyściennej ściany boczne komory pomiarowej są rozchylane. Kąt odchylenia od płaszczyzny symetrii każdej ze ścian wynosi około 0.5° , górna i dolna ściana pozostają równoległe.

Przed pierwszym kolaniem wysokiej prędkości umieszczony jest ekran bezpieczeństwa w postaci stalowej siatki. Pomiędzy kolanami niskiej prędkości umieszczono chłodnicę powietrza. Pomiędzy drugim kolaniem niskiej prędkości a kontrakcją znajduje się sekcja ustalania pola prędkości o stałym przekroju zawierająca następujące elementy:

- prostownica ulowa o poprzecznym przekroju sześciokąta o przekątnej 12 mm i o głębokości 200 mm,
- dwa ekrany (siatki druciane) o oczkach kwadratowych: pierwszy – średnica drutu 0.5, apertura 2 mm oraz drugi – średnica drutu 0,2 mm i apertura siatki 0,8 mm (siatki wyposażone są w napinacze umieszczone na zewnątrz obiegu tunelu).

Całkowite wymiary tunelu wynoszą: $9,79 \times 4,08 \times 2,34$ m (długość \times szerokość \times wysokość). Gabaryty tunelu zostały dobrane tak, aby zapewnić funkcjonalność oraz łatwą i wygodną obsługę urządzeń i oprzyrządowania tunelu pomimo ograniczeń wynikających z rozmiarów pomieszczenia goszczącego tunel.

Rozmiary wewnętrzne komór pomiarowych wynoszą:

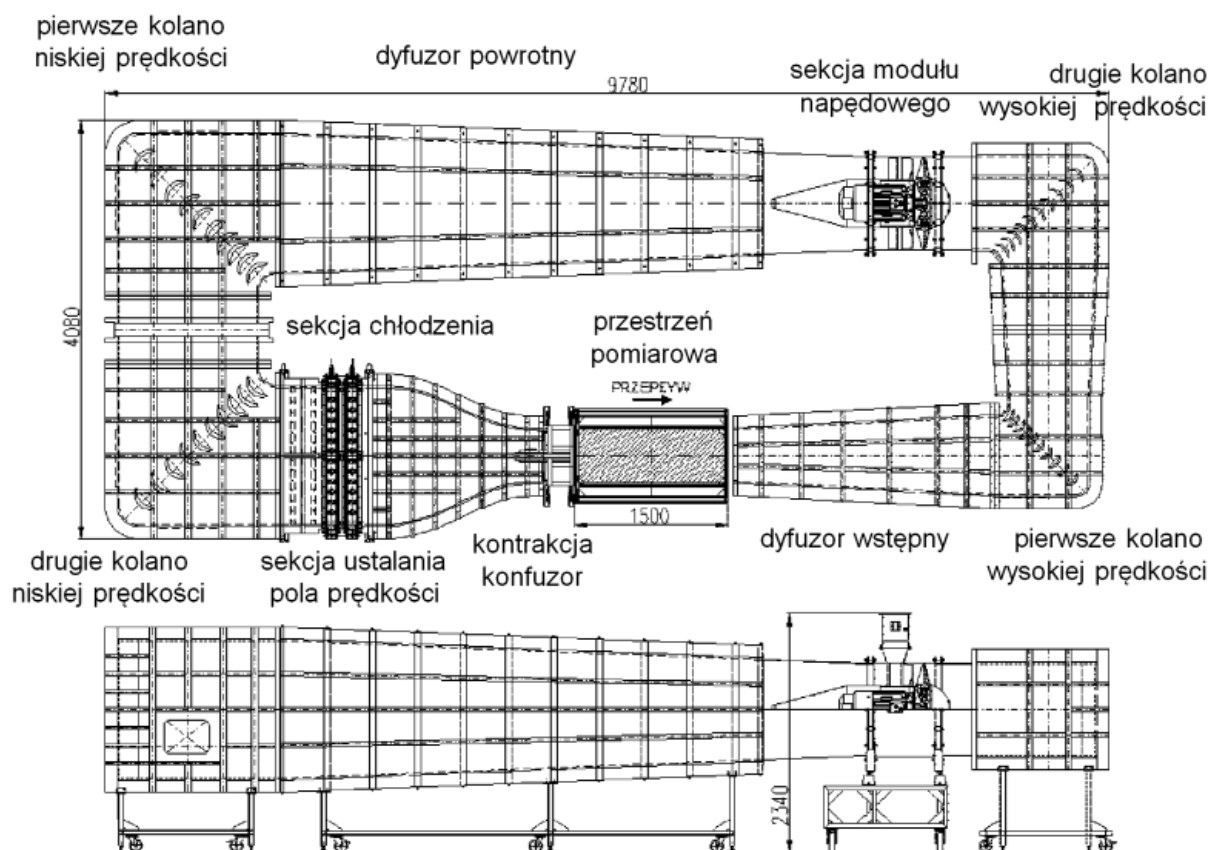
- komora pomiarowa zamknięta – $150 \times 50 \times 50$ cm,
- komora pomiarowa półotwarta z komorą Eiffla – $90 \times 50 \times 50$ cm.

4. Konstrukcja tunelu

Tunel został wykonany w sekcjach (segmentach) (Rys. 2) pozwalających na montaż, demontaż, naprawy i konserwację. Technologia wykonania konstrukcji i łączenia poszczególnych sekcji tunelu zapewnia ich szczelność oraz szczelność połączeń pomiędzy nimi. Powierzchnie wewnętrzne tunelu są gładkie (przez zastosowanie specjalnie przygotowanej sklejki szalunkowej), co minimalizuje straty energii.

Główne sekcje tunelu to:

- zamknięta przestrzeń pomiarowa/półotwarta przestrzeń pomiarowa z komorą Eiffla,
- dyfuzor wstępny,
- kolano wysokiej prędkości 1 z siatką bezpieczeństwa,
- kolano wysokiej prędkości 2,
- sekcja modułu napędowego,
- dyfuzor powrotny,
- kolano niskiej prędkości 1,
- sekcja chłodzenia,
- kolano niskiej prędkości 2,
- sekcja ustalania pola prędkości z prostownicą ulową i siatkami,
- kontrakcja,
- sekcja generowania przepływów zmiennych w czasie/zaślepka sekcji generowania przepływów.



Rys. 2. Główne sekcje tunelu

Tunel został wyposażony w elementy wewnętrzne kształtujące rozkład prędkości przepływu strugi powietrza, jak również wazy inspekcyjne pozwalające na wykonywanie inspekcji i czyszczenie wnętrza tunelu.

W najniższym punkcie tunelu – w okolicy sekcji chłodzenia przewidziany został korek spustowy, z zaworem odcinającym, do odprowadzenia kondensatu powstałego podczas badań.

5. Korpus

Poszycie korpusu zostało wykonane z wodoodpornej sklejki szalunkowej o grubości 18 mm. Widoczna na rys. 1 konstrukcja w postaci żeber i wzdłużników została wykonana z drewna sosnowego klasy I o grubości 40 mm (drewno dwuwarstwowe) oraz o grubości 60 mm (drewno trójwarstwowe). Kołnierze drewniane pomiędzy sekcjami wykonano z drewna o grubości 40 mm. Korpus składa się z odrębnych, połączonych szczelnie – na drewniane kołnierze rozdzielone gumową uszczelką – łatwo demontowanych elementów (sekcji tunelu), posadowionych na konstrukcji nośnej umożliwiającej poruszanie się na kółkach po podłodze pomieszczenia tunelu. Elementy poszycia wykonane ze sklejki, w celu uzyskania szczelności na połączeniach, łączone są ze sobą klejem uszczelniającym SikaFlex oraz dodatkowo za pomocą konfirmatów. Belki żeber nakładane są na wzdłużniki i łączone w narożach za pomocą złącza meblowego wałeczkowego ze szpilką M8×200. Belki żeber łączone są miejscowo z belkami wzdłużników za pomocą konfirmatów. Pomiędzy kołnierzami zastosowano uszczelnienie z gumy o grubości 3 mm klejone do jednego z kołnierzy. Ustawienie sekcji pomiędzy sobą stabilizowane jest za pomocą kołków centrujących. Korpus tunelu aerodynamicznego został zaprojektowany w sposób zapewniający dostęp do wewnętrznych elementów tunelu i możliwość ich czyszczenia poprzez wazy inspekcyjne.

6. Konstrukcja wsporcza

Konstrukcja wsporcza została wykonana z profili zamkniętych o przekroju kwadratowym 50×50×4 oraz 40×40×3. Sposób łączenia profili – spawanie. Każdy z elementów tunelu posiada indywidualną konstrukcję wsporczą. Konstrukcja wsporcza umożliwia pionową regulację każdej sekcji tunelu oraz jej przesuwanie na kołach jezdnych po uprzednim rozłączeniu kołnierzy łączących sekcje oraz podniesieniu stópek i ustawieniu konstrukcji na kółkach. Konstrukcja wsporcza posiada możliwość mocowania do żeber korpusu tunelu za pomocą wkrętów. W celu tłumienia drgań zastosowana została podkładka gumowa.

7. Sekcja modułu napędowego

Moduł napędowy (Rys. 3) usytuowany jest pomiędzy kolanem wysokiej prędkości 2, a dyfuzorem powrotnym.

Moduł napędowy obejmuje:

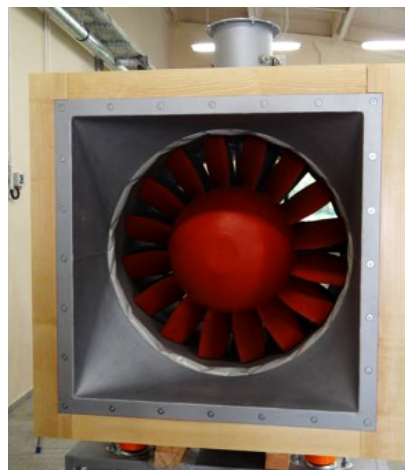
- jeden wentylator typu osiowego o średnicy DN 900, mocy 30 KW i wydajności maksymalnej 15.75 m³/s (56700 m³/h),
- wentylator chłodzący jednostkę napędową,
- dyszę wlotową z kontrakcją po stronie ssącej z przejściem z przekroju kwadratowego na kołowy,
- palisadę kierownic prostujących przepływ po stronie tłocznej wentylatora,
- kształtkę z blachy stalowej z przejściem z przekroju kołowego na kwadratowy z łagodnym zakończeniem profili po stronie tłocznej wentylatora,
- opływową gondolę po stronie tłocznej wentylatora,
- gumowe amortyzatory drgań wentylatora mocowane do konstrukcji stalowej ramy,
- króćce elastyczne po stronie ssącej i tłocznej wentylatora,
- konstrukcję stalową ramową (z kształtowników zamkniętych), stanowiącą posadowienie dla wentylatora,
- pomiar prędkości przepływu (strumień objętości powietrza), temperatury, drgań.

Wentylator (Rys. 4) napędzany jest bezpośrednio silnikiem elektrycznym prądu zmiennego 3×400 V, 50 Hz, przystosowany do współpracy z falownikiem częstotliwości. Wentylator modułu napędowego zamocowany jest elastycznie do konstrukcji stalowej ramowej, co zapobiega przenoszeniu drgań z wentylatora na

konstrukcję nośną tunelu. Sekcja modułu napędowego posiada system centralnego chłodzenia silnika składający się z wentylatora wraz z napędem. Zapewnia to prawidłowe warunki działania silnika elektrycznego wentylatora modułu napędowego. Konstrukcja wsporcza modułu napędowego wyposażona jest w cztery kółka (dwa z hamulcami), co pozwala na przemieszczanie całego modułu.



Rys. 3. Moduł napędowy



Rys. 4. Wentylator

8. Sekcja chłodzenia

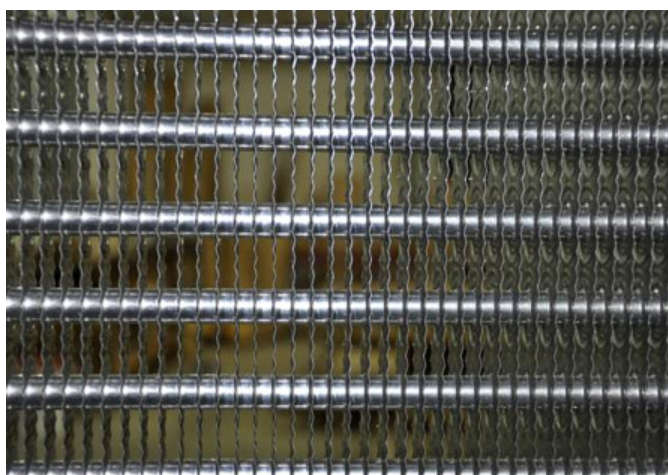
Sekcja chłodzenia (Rys. 5) jest usytuowana pomiędzy kolanem niskiej prędkości 1 a kolanem niskiej prędkości 2. Wymiary sekcji 1340×1340 mm, szerokość 664 mm. Budowa sekcji umożliwia demontaż całej sekcji w celu czyszczenia lub naprawy, a następnie powtórny montaż w tunelu.

Wymiennik ciepła (Rys. 6) zbudowany jest z rzędów miedzianych rurek w układzie poziomym z aluminiowymi lamelami (grubość lameli 2 mm, rozstaw 7 mm). Chłodnica została wykonana w obudowie kanałowej i zabudowana w konstrukcji nośnej tunelu tworząc zakończoną kołnierzami sekcję chłodzenia. Konstrukcja poszycia sekcji wykonana została ze sklejki szalunkowej o grubości 18 mm, kołnierze wykonano z drewna klejonego sosnowego klasy I. Króćce chłodnicy, brązowe gwintowane, pozwalają na podłączenie instalacji systemu chłodzenia.

Chłodnica została zaprojektowana tak, aby eliminować ciepło wydzielane przez wentylator modułu napędowego i tarcie przepływającego przez tunel powietrza. Budowa chłodnicy uniemożliwia porywanie kropli kondensatu przez powietrze krążące w tunelu. W sekcji chłodnicy zamontowano zawór spustowy stanowiący odlot skroplin na zewnątrz tunelu. Temperatura na chłodnicy regulowana jest za pomocą zawo-



Rys. 5. Sekcja chłodzenia



Rys. 6. Rurki i lamele chłodnicy

ru trójdrogowego przelotowego z siłownikiem, który sterowany jest z panelu sterującego zamontowanego w pomieszczeniu tunelu.

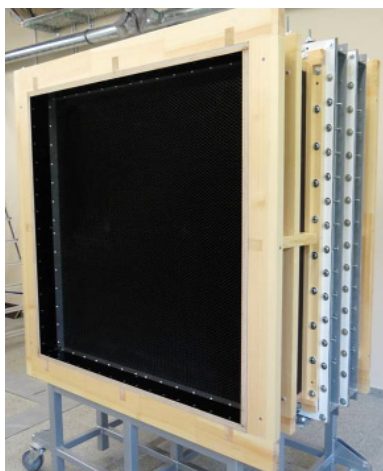
W skład układu chłodzenia, poza wymiennikiem ciepła, wchodzi: agregat wody lodowej z modułem hydraulicznym, instalacja wody lodowej, układ sterowania, skrzynka elektryczna zasilająca agregat wody lodowej.

9. Sekcja ustalania pola prędkości

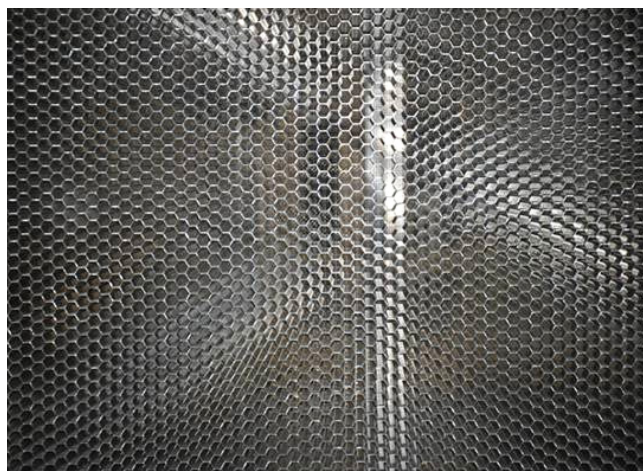
Sekcja ustalania pola prędkości (rys. 7) jest usytuowana pomiędzy kolanem niskich prędkości 2 a kontrakcją. Składa się z następujących modułów: wstawka pierwsza z prostownicą ulową (Rys. 8) o parametrach: szerokość i wysokość w świetle: 1340×1340 mm, głębokość – 200 mm, oczko heksagonalne o wymiarze wewnętrznym – 12 mm, grubość ścianki oczka – 0,15 mm, grubość ścianki okalającej prostownicę: 3 mm, materiał prostownicy i obudowy – stal nierdzewna, sposób łączenia oczek – spawanie laserowe. Prostownica ulowa została zabudowana konstrukcją wykonaną ze sklejki szalunkowej o grubości 18 mm i drewna sosnowego klejonego klasy I w sposób umożliwiający zdemontowanie całego modułu w celu oczyszczenia go z zanieczyszczeń, które się na niej będą osadzały podczas wykonywania badań.

Moduł ekranu siatkowego z mechanizmem napinającym stanowi ekran redukujący poziom turbulencji o parametrach: rozmiar siatki: apertura siatki – 2,0 mm, średnica drutu 0,5 mm, szerokość i wysokość w świetle – 1340×1340 mm, mechanizm napinający siatkę o parametrach – naciąg z dwóch stron w pionie i poziomie – parametry sprężyn naciskowych – sztywność sprężyny 32,243 N/mm, dopuszczalna siła 1115,2 N, ugięcie 34,6 mm.

Konstrukcja i zabudowa ekranu w sekcji ustalania pola prędkości pozwala na demontowanie ekranu w celu kontroli i korekty naciągu siatki oraz usunięcia zanieczyszczeń, osadzających się podczas prowadzenia badań.



Rys. 7. Sekcja ustalania prędkości



Rys. 8. Prostownica ulowa

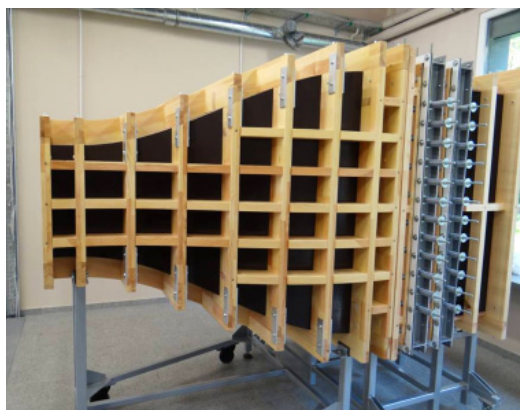
Wstawka druga łączy oba ekrany i składa się z: modułu ekranu siatkowego II z mechanizmem napinającym, ekranu 2 redukujący poziom turbulencji o parametrach: rozmiar siatki – apertura siatki 0,8 mm, średnica drutu 0,2 mm, szerokość i wysokość w świetle – 1340×1340 mm, mechanizmu napinającego siatkę o parametrach: naciąg z dwóch stron w pionie i poziomie: parametry sprężyn naciskowych sztywność sprężyny 23,832 N/mm, dopuszczalna siła – 1115,2 N ugięcie 46,8 mm.

Konstrukcja i zabudowa ekranu drugiego w sekcji ustalania pola prędkości pozwala na demontowanie ekranu w celu kontroli i korekty naciągu siatki oraz usunięcia zanieczyszczeń, osadzających się podczas prowadzenia badań.

Wstawka numer trzy służy do podłączenia generatora posiewu. We wstawce wykonano 8 otworów do podłączenia dysz Laskina do generatora posiewu. Otwory zostały rozmieszczone po dwa na każdej ze ścian tunelu co pozwala na równomierne rozprowadzenie posiewu. Otwory zostały uzbrojone w szybkozłączki pozwalające na podłączenie ich do przewodów systemu posiewu.

10. Kontrakcja

Kontrakcja (Rys. 9) jest usytuowana pomiędzy sekcją ustalania pola prędkości a komorą pomiarową (Rys. 10). Współczynnik kontrakcji wynosi 1:7,18. Konstrukcja została wykonana z 3 warstw sklejk jednokierunkowej o grubościach 5 mm, 8 mm, 5 mm. Wygięte ściany zostały sklejone ze sobą w celu uzyskania grubości poszycia tunelu (18 mm). Wygięte wewnętrzne ściany kontrakcji zostały zaszpachlowane, zeszlifowane i pomalowane farbą poliuretanową w celu uzyskania gładkości zbliżonej do gładkości sklejk wodoodpornej szalunkowej.



Rys. 9. Kontrakcja (dyfuzor)



Rys. 10. Komora pomiarowa

11. Sekcja generowania przepływów zmiennych w czasie

Sekcja generowania przepływów zmiennych w czasie (Rys. 11) jest usytuowana pomiędzy kontrakcją a przestrzenią pomiarową. Sekcja generowania przepływów zmiennych w czasie i zaślepka sekcji przepływów są używane alternatywnie. Lokalizacja i konstrukcja sekcji generowania przepływów zapewnia niezmiennie warunki przepływu w komorze pomiarowej w zakresie zaburzeń poprzecznych. Jej zadaniem jest generowanie zaburzenia podłużnego o sinusoidalnym przebiegu. Stopień tłumienia zależy od prędkości powietrza w tunelu. Dla prędkości poniżej 10 m/s minimalny wymagany stopień tłumienia wynosi około 90%. Sekcja przepływów zmiennych w czasie będzie używana do prędkości nie większej niż 40 m/s. Praca systemu polega na zadawaniu regulowanego, chwilowego tłumienia przepływu prowadzącego do spadku prędkości w przestrzeni pomiarowej. Maksymalna częstotliwość zmian stopnia tłumienia jest nie mniejsza niż 1 Hz.

12. System sterowania i kontroli

Kontrola i sterowanie pracą tunelu możliwe jest za pomocą układu sterowania poprzez program komputerowy i równolegle za pomocą systemu kontrolno-pomiarowego (Rys. 12). Obydwa systemy są połączone ze sobą za pomocą sieci LAN. System sterowania oparty jest na następujących elementach funkcjonalnych:

- Sterownik PLC jako jednostka centralna.
- Panel graficzny HMI z kolorowym ekranem dotykowym wbudowany w pulpit sterujący. Panel służy do sterowania wentylatorem, zadawania parametrów sterowania, trybów pracy.
- Pakiet oprogramowania zainstalowany w sterowniku PLC, który realizuje następujące funkcje: sterowanie wentylatorem, wizualizacja, wyświetlanie parametrów, obserwacja parametrów w formie wykresów oraz ich archiwizacja, stany alarmowe.
- Komputery kontrolno-pomiarowe do sterowania tunelem i prowadzenia pomiarów.
- Sterowanie z panelu HMI i komputera typu desktop z systemem kontrolno-pomiarowym może odbywać się zamiennie.

W skład systemu sterowania, kontroli i pomiarów wchodzi oprogramowanie, które umożliwia wizualizację procesów odpowiedzialnych za sterowanie pracą tunelu. Wyświetlane są takie informacje jak: stan pracy napędu (Start, Stop, Awaria), prędkość obrotowa silnika wentylatora, temperatura powietrza w prze-



Rys. 11. Sekcja generowania przepływów zmiennych w czasie



Rys. 12. Pulpit sterujący pracą tunelu

strzeni pomiarowej, prędkość powietrza w przestrzeni pomiarowej, ciśnienie w przestrzeni pomiarowej, wilgotność powietrza w przestrzeni pomiarowej, punkt rosy, temperatura sekcji chłodzącej.

System kontrolno-pomiarowy wyposażony jest w następujące czujniki: dwa czujniki do pomiaru temperatury umieszczone przed i za komorą pomiarową, o zakresie pomiarowym od -50°C do $+50^{\circ}\text{C}$; dwa czujniki do pomiaru temperatury modułu chłodzącego umieszczone przed i za chłodnicą, o zakresie pomiarowym od -50 do $+50^{\circ}\text{C}$; jeden czujnik wilgotności względnej umieszczony na wejściu kolana wysokich prędkości 1, za siatką bezpieczeństwa, o zakresie pomiarowym od 0 do 100% wilgotności względnej i dokładności $\pm 2\%$ dla zakresu 10-90% przy temperaturze 25°C ; jeden czujnik do pomiaru ciśnienia barometrycznego, umieszczony w otoczeniu tunelu, o zakresie pomiarowym podstawowym 0-2500 Pa i błędzie podstawowym $\leq \pm 0,075\%$; jeden czujnik do pomiaru ciśnienia statycznego umieszczony w sekcji kontrakcji, o zakresie pomiarowym podstawowym 0-2500 Pa i błędzie podstawowym $\leq \pm 0,075\%$. Czujnik ten może być wykorzystany do pomiaru ciśnienia statycznego/całkowitego przed komorą pomiarową; jeden czujnik do pomiaru ciśnienia statycznego/całkowitego umieszczony za komorą pomiarową, o zakresie pomiarowym podstawowym 0-2500 Pa i błędzie podstawowym $\leq \pm 0,075\%$; dwa czujniki do pomiaru ciśnienia w rejonie sekcji chłodzenia – jeden czujnik umieszczony przed, drugi za chłodnicą o zakresie pomiarowym podstawowym 0-2500 Pa i błędzie podstawowym $\leq \pm 0,075\%$.

Do sterowania i monitorowania pracy tunelu służy komputer typu desktop. Komputer typu laptop służy do prowadzenia pomiarów, analizy i zapisu ich wyników.

13. Rozdzielnica zasilająca i rozdzielnica napięcia

Rozdzielnica zasilająca – odpowiedzialna jest za rozdział energii elektrycznej i zasilanie poszczególnych elementów niezbędnych w pracy tunelu.

Rozdzielnica napędu – z zabudowaną w niej przetwornicą częstotliwości odpowiedzialna jest za sterowanie pracą wentylatora. Na rozdzielnicę napędu jak i na pulpicie sterującym znajdują się zabudowane przyciski, przełączniki i lampki sygnalizacyjne, pozwalające na ręczne wystawienie falownika, a przez to prędkości wentylatora tunelu aerodynamicznego. Do komunikacji pomiędzy kluczowymi elementami przewidziano dwie separowane logicznie sieci. Jedna wewnętrzna do połączenia sterownika PLC i prze-

twornicy częstotliwości. Druga Ethernet do połączenia sterownika PLC z panelem graficznym HMI, oraz komputerem typu desktop. Taka konfiguracja pozwala na łatwą rozbudowę i przyłączenie sterowania do lokalnej sieci ethernetowej.

14. Zestaw urządzeń do pomiarów metodą PIV

W skład zestawu wchodzi: dwie kamery z matrycą typu sCMOS, dedykowane do pomiarów prędkości płynów metodami optycznymi firmy Dantec Dynamics (Rys. 13). Wyposażenie kamer stanowią: obiektywy firmy Nikon Nikkor AF-50 mm, f/1.8D; głowica mocująca – Manfrotto 400; frame grabber; filtr pasmowoprzepustowy 532 nm; para modułów Scheimfluga, zestaw mocowań i dystansów; zestaw do precyzyjnej kalibracji systemu stereoskopowego – specjalistyczne oprogramowanie do generowania wzorców kalibracyjnych; statyw Manfrotto 161 MK2B.

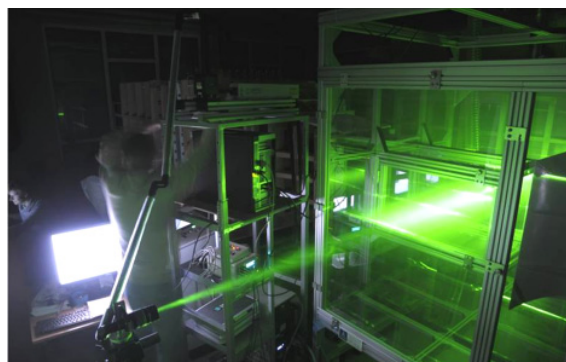
Do generowania noża świetlnego (Rys. 14) służy laser impulsowy Nd:YAG (o harmonicznej 532 nm – kolor zielony), dedykowany do pracy w systemach PIV. Wiązka lasera może być prowadzona za pośrednictwem ramienia optycznego w wybrane miejsce układu pomiarowego. Optyka noża świetlnego zamocowana jest na końcu ramienia optycznego lub bezpośrednio na głowicy lasera. Do synchronizacji pracy lasera i kamer służy dedykowany moduł synchronizacji urządzeń pracujących w systemie pomiarowym.

W skład zestawu pomiarowego wchodzi również generator posiewu wytwarzający olejowe (Di-Ethyl-Hexyl-Sebacate) cząstki znacznikowe.

Integralną częścią całego systemu jest oprogramowanie do sterowania urządzeniami (laser, kamera, synchronizator), akwizycji danych (cyfrowych zdjęć badanego przepływu), i analizy obrazu prowadzącej do wyznaczenia pól prędkości w dwóch lub trzech wymiarach.



Rys. 13. Kamera



Rys. 14. Nóż świetlny

15. Wyposażenie pomieszczenia

Pomieszczenie tunelu zostało wyposażone w systemy utrzymujące odpowiednie warunki klimatyczne.

System klimatyzacji, który pozwala na utrzymanie stałej temperatury w pomieszczeniu. System klimatyzacji obejmuje dwa klimatyzatory typu mono split z inwerterem firmy LG. Parametry jednostki wewnętrznej: wydatek chłodniczy – 10,00 kW; wydatek grzewczy – 11,20 kW; przepływ powietrza – 19,8 m³/min; osuszanie – 3,5 l/h. Parametry jednostki zewnętrznej: wydatek chłodniczy – 10,00 kW; wydatek grzewczy – 11,20 kW; przepływ powietrza – 90 m³/min; limity pracy – chłodzenie -15/+48°C; grzanie -18/+18°C

Pomieszczenie tunelu zostało wyposażone w system wentylacyjny. Pod sufitem został zamocowany system wyciągowy pozwalający na usunięcie zanieczyszczonego pyłami i gazami powietrza z tunelu poprzez końcówkę ssawną umieszczoną na elastycznym przewodzie o długości około 8-10 m. System służy również do eliminacji powietrza zanieczyszczonego gazami i pyłami z pomieszczenia tunelu aerodynamicznego. System składa się z wentylatora wyciągowego promieniowego z możliwością regulacji wydajności, ramienia obrotowego, kanałów wentylacyjnych po stronie ssawnej wentylatora, elastycznej rury zakończonej ssawką z magnetycznym łącznikiem, kratki wyciągu ogólnego oraz filtra, tłumików i przepustnic regulacyjnych.

W celu uzupełnienia świeżego powietrza i wyrównania ciśnienia w pomieszczeniu została zamocowana zamykana czerpnia. Ilość wymian w pomieszczeniu 2 razy/godz. Wentylator został zamocowany na zewnątrz pomieszczenia na elewacji bocznej. Do regulacji przepływu powietrza, uruchomienia procesu wyciągu oraz nawiewu, do wyboru typu odciągu służą przepustnice szczelne sterowane elektrycznie wyposażone w siłownik ze sprężyną powrotną lub ze wskaźnikiem otwarcia. Siłownik otwiera przepustnicę w momencie włączenia wentylatora, ustawia jej przepustowość, w przypadku zaniku napięcia samoczynnie zamyka przepustnicę. Siłowniki są montowane bezpośrednio na trzpieniu przepustnicy. Parametry techniczne systemu odciągu: wentylator kołnierzowy dachowy; wydatek – 200 [m³/h] przy sprężu 800 Pa – dla wyciągu z pomieszczenia; wydatek – 600 [m³/h] przy sprężu 1200 Pa – dla wyciągu z wnętrza tunelu

Instalację sprężonego powietrza zasila sprężarka powietrza chłodzona powietrzem, z napędem elektrycznym o ciśnieniu roboczym 0.8 MPa i wydatku 50 Nm³/h o mocy 5,5 kW, z układem rurociągów oraz armaturą redukcyjną, odcinającą i węzami elastycznymi. Sprężarka przeznaczona jest do zasilania generatora posiewu i przedmuchu przestrzeni tunelu. Sprężarka umieszczona jest w pomieszczeniu technicznym tunelu i osadzona na amortyzatorach.

W celu utrzymania wilgotności powietrza na poziomie wymaganym dla prawidłowej pracy układu chłodzenia w pomieszczeniu tunelu został zainstalowany system osuszania powietrza. System osuszania powietrza ma za zadanie obniżyć wilgotność powietrza dla poniższych parametrów: temperatura powietrza początkowa +25°C; wilgotność powietrza początkowa 60-55% RH; temperatura powietrza końcowa +25°C; wilgotność powietrza końcowa 25-30% RH. System osuszania powietrza składa się z osuszacza adsorpcyjnego z rotorem SSRC, półautomatycznym elementem grzejnym i obudową ze stali nierdzewnej oraz magistral poboru powietrza procesowego oraz powietrza regeneracji oraz wylotu powietrza wilgotnego oraz suchego. Magistrale poboru i nawiewu powietrza wykonane z blachy stalowej ocynkowanej. Nawiew realizowany poprzez kratki wentylacyjne oraz przepustnice. Powietrze regeneracji pobierane bezpośrednio z zewnątrz, powietrze wilgotne usuwane bezpośrednio na zewnątrz systemem kanałów z blachy ocynkowanej izolowanej wełną mineralną oraz folią aluminiową. Osuszacz został zamocowany bezpośrednio na ścianie pomieszczenia tunelu, magistrala powietrza suchego umieszczona pod sufitem rozprowadza powietrze równomiernie po całym pomieszczeniu. Do sterowania pracą instalacji osuszania służy elektroniczny regulator wilgotności EH4 zamontowany wewnątrz pomieszczenia. Przy utrzymanej na stałym poziomie temperaturze w pomieszczeniu osuszacz obniża wilgotność względną w pomieszczeniu do zadanej w ciągu około 2 godzin.

Praca została wykonana w roku 2013 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Barlow J.B., Rae W.H., Pope A., 1999. *Low-speed wind tunnel testing*, Wiley.
- Raffel M., Willert C.E., Wereley S.T., Kompenhans J., 2007. *Particle Image Velocimetry a practical guide*, Springer.
- Tropea C., Yarin A.L., Foss J.F., 2007. *Handbook of Experimental Fluid Mechanics*, Springer.

The wind-tunnel with a closed loop with an additional equipment

Abstract

This paper provides description of construction and metrological parameters of a newly built wind tunnel with a closed loop. Subsequent separable units constituting the working parameters of the tunnel as well as control-measurement systems are described in detail.

Apparatus dedicated to non-invasive velocity field measurement technique – Stereo Particle Image Velocimetry (SPIV) is presented. The equipment of the wind tunnel room is described as it constitutes the measuring conditions.

Keywords: wind tunnel, flow velocity measurement, Particle Image Velocimetry