ROZPRAWA
DOKTORSKA

Uniwersytet Technologiczno – Przyrodniczy w Bydgoszczy
Wydział Mechaniczny

Praca doktorska pt.:

Kształtowanie parametrów roboczych monostabilnego elementu strumieniowego dużej mocy w aspekcie jakości procesu wymiany ciepła

Biblioteka Główna UTP w Bydgoszczy
000000134131

mgr inż. Sylwester **Wawrzyniak**

Promotor: prof. dr hab. inż. Franciszek **Siemieniako**

Bydgoszcz 2008

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
BIBLIOTEKA
GŁÓWNA
Bydgoszcz

D 324

Składam serdeczne podziękowania promotorowi
prof. dr hab. inż. Franciszkowi Siemieniace za okazaną cierpliwość
i cenne wskazówki merytoryczne podczas pisania pracy,
prof. dr hab. inż. Januszowi Sempruchowi za opiekę naukową,
dr inż. Kazimierzowi Peszyńskiemu za wprowadzenie w tematykę i wsparcie naukowe,
mgr inż. Zbigniewowi Kuszyńskiemu za pomoc techniczną przy budowie stanowiska,
oraz żonie Marzenie i dzieciom za cierpliwość podczas długich nieobecności w domu
i wspieranie w chwilach zwątpienia

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń ... 4
1 Wstęp ... 6
1.1 Wprowadzenie ... 6
1.2 Cel pracy ... 8
1.3 Teza pracy ... 9
1.4 Zakres pracy ... 9
2 Technika strumieniowa ... 12
2.1 Rodzaje elementów strumieniowych ... 12
2.2 Przykłady elementów strumieniowych kształtujących intensywność procesu wymiany ciepła ... 18
3 Analiza procesów przenoszenia ciepła przez strumień powietrza ... 24
3.1 Zjawisko fizyczne przenoszenia ciepła przez strumień powietrza ... 24
3.2 Metody oceny jakościowego i ilościowego przenoszenia ciepła ... 26
4 Konstrukcja dyszy osiowosymetrycznej ... 28
4.1 Model dyszy osiowosymetrycznej badanej w Katedrze Sterowania i Konstrukcji Wydziału Mechanicznego UTP w Bydgoszczy ... 28
4.2 Założenia ... 34
4.3 Model dyszy osiowosymetrycznej ... 36
5 Metodyka badania dyszy osiowosymetrycznej ... 38
5.1 Zasady planowania doświadczenia ... 38
5.2 Kryteria wyboru planu doświadczenia ... 41
5.3 Etapy badań dyszy osiowosymetrycznej ... 42
6 Badanie numeryczne przepływu strumienia głównego ... 45
6.1 Model fizyczny opływu płaskiej ściany ... 45
6.2 Model numeryczny ... 46
6.3 Wyniki obliczeń numerycznych ... 50
6.4 Podsumowanie i wnioski ... 57
6.5 Model rzeczywisty dyszy osiowosymetrycznej do badań doświadczalnych ... 59
7 Badanie doświadczalne jakości procesu wymiany ciepła ... 60
7.1 Stanowisko badawcze ... 60
7.2 Program badań ... 66

7.2.1 Badanie jakościowe i ilościowe opływu ściany ... 67
7.2.2 Badanie termograficzne temperatury ściany oporowej ... 69
7.3 Wyniki badań doświadczalnych ... 70
7.3.1 Wyniki badań wizualizacyjnych ... 70
7.3.2 Rozkład prędkości powietrza za dyszą ... 77
7.3.3 Wyniki badań termograficznych ... 80
7.4 Podsumowanie i wnioski z badań doświadczalnych ... 82
8 Określenie wpływu parametrów przepływu na proces wymiany ciepła ... 86
8.1 Określenie wpływu zmian parametrów na ilość przenoszonego ciepła ... 86
8.2 Określenie rozkładu temperatury na ogrzewanej ścianie ... 94
9 Podsumowanie i wnioski końcowe ... 97
9.1 Wyniki badań ... 97
9.2 Zagadnienia do dalszych badań ... 98
Literatura ... 100
ZAŁĄCZNIKI ... 108
Załącznik nr 1 – Rysunki wykonawcze elementów dyszy osiowosymetrycznej oraz rysunek złożeniowy ... 108
Załącznik nr 2 - Oprogramowanie wykorzystywane i stworzone na potrzeby badań ... 120
Załącznik nr 3 - Badania numeryczne ... 125
Załącznik nr 4 - Badania wizualizacyjne i pomiary prędkości ... 127
Załącznik nr 5 - Badania termograficzne ... 129
Załącznik nr 6 - Obróbka danych w aplikacji MS Excel. ... 131

Wykaz ważniejszych oznaczeń 4

Wykaz ważniejszych oznaczeń

c_p - ciepło właściwe $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

D_{wd} - średnica wewnętrzna badanej dyszy $[m]$

f - częstotliwość pulsacji strumienia $\left[\frac{1}{s}\right]$

g - grubość ściany $[m]$

F - powierzchnia $[m^2]$

k - współczynnik wyrównywania temperatury $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

l - odległość ściany od dyszy $[m]$

Nu - liczba Nusselta

p - ciśnienie $[Pa]$

Pr - liczba Prandtla

$\dot{q}$ - lokalny strumień ciepła $\left[\frac{J}{m^2 s}\right]$

Q - ilość ciepła $[J]$

Q_m , Q_c - objętościowe natężenie przepływu $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

r - promień ściany oporowej $[m]$

Re - liczba Reynoldsa

t - czas $[s]$

T - temperatura $[K]$

v - prędkość powietrza $\left[\frac{m}{s}\right]$

w_Q - wskaźnik jakości procesu wymiany ciepła

α - współczynnik wnikania ciepła $\left[\frac{J}{m^2 s K}\right]$

δ - grubość warstwy granicznej $[m]$

δ_T - współczynnik nierównomierności rozkładu temperatury

λ - przewodność cieplna $\left[\frac{J}{m\,s\,K}\right]$

ν - lepkość kinematyczna powietrza $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

ρ - gęstość $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

Indeksy

i - współrzędna pozioma punktu na ścianie oporowej

j - współrzędna pionowa punktu na ścianie oporowej

$śr$ - średnia

m - (main) strumień główny

c - (control) strumień sterujący

w - oznaczenie ściany

sp - oznaczenie spojlera

1 Wstęp

1.1 Wprowadzenie

W procesach wymiany ciepła (ogrzewanie, chłodzenie) istotna jest wydajność cieplna urządzeń oraz wymagany rozkład temperatury na elemencie ogrzewanym lub chłodzonym. Niniejsza praca dotyczy badania elementów uczestniczących w procesach wymiany ciepła, gdy nośnikiem energii cieplnej jest ogrzane powietrze. W tego typu przypadkach proces wymiany ciepła przebiega w dwojaki sposób; pierwszy polega na przenoszeniu ciepła poprzez konwekcję swobodną, drugi zaś na konwekcji wymuszonej.

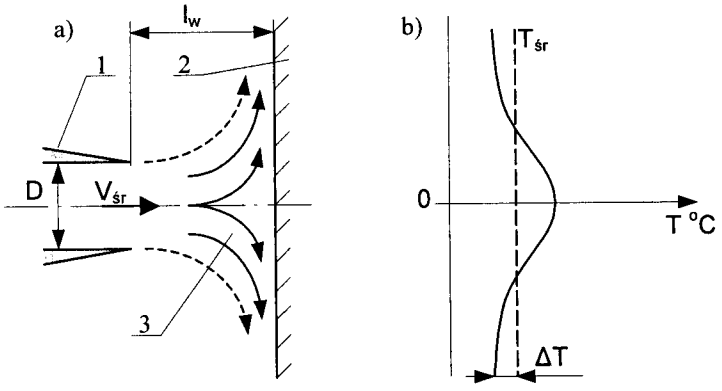
Istotny wpływ na intensywność wymiany ciepła pomiędzy ciałem stałym a omywającym go płynem ma warstwa przyścienna, tworząca się na powierzchni tego ciała [2,52,54,61]. W procesie przenoszenia ciepła główny opór cieplny utrudniający przepływ ciepła stawia warstwa przyścienna. Tak więc poprawę sprawności wymiany ciepła w takich obiektach można uzyskać poprzez wyeliminowanie warstwy przyściennej lub przynajmniej zmniejszenie jej grubości. Grubość warstwy przyściennej tworzącej się na opływanej powierzchni zależy od warunków przepływu i zmienia się (wzrasta) w kierunku przepływu [54, 62, 86].

Według Stokesa graniczna grubość niestacjonarnej warstwy przyściennej δ wynosi:

$$\delta = 2 \cdot \sqrt{\nu \cdot t} \tag{1.1}$$

Wzór ten dotyczy przepływu ustalonego w czasie. A więc grubość warstwy zależy od czasu trwania opływu. Zakłada się przy tym, że lepkość płynu jest stała. Wynika z tego, że ograniczenie czasu trwania przepływu ustalonego pozwoli zmniejszyć wartości δ. Poza czasem, w którym dostarczane jest ciepło ze strumienia powietrza do ogrzewanego elementu, istotny jest kierunek oddziaływania tego strumienia.

Jednym ze sposobów ogrzewania gorącym powietrzem jest podawanie strumienia prostopadle do ogrzewanego ciała. Strumień gorącego powietrza uderzając w ścianę (przegroda sztywna) ogrzewa ją (rys. 1.1).



Rys. 1.1. Opływ płaskiej ściany; a) schemat przepływu strumienia uderzającego w ścianę, b) rozkład temperatury na ścianie; 1-dysza o przekroju kołowym, 2-ściana, 3-linie prądu strumienia.

Wartość średnia temperatury $T_{śr}$ oraz stopień jej nierównomierności $\delta_T = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{śr}}$ zależą od warunków napływu powietrza, tzn. od średnicy wewnętrznej dyszy D_{wd}, średnicy zewnętrznej dyszy D_{zd}, prędkości wypływu powietrza $v_{śr}$, częstotliwości zmiany warunków przepływu f_c oraz od odległości dyszy od ściany l_w.

Tak więc zadanie sprowadza się do odpowiedniego kształtowania warunków napływu powietrza. Jest to możliwe poprzez zastosowanie sterowanego elementu strumieniowego z pulsującym strumieniem wyjściowym. Zmniejszy to czas trwania przepływu ustalonego, a tym samym grubość powstającej warstwy granicznej. Charakterystyczną cechą wytwarzanego strumienia powinna być zmiana kierunku wektora prędkości powietrza opływającego badaną płaską powierzchnię.

Ogólnie można powiedzieć, że przedstawiony problem wymaga działań w dwu obszarach:

- opracowanie elementu strumieniowego, umożliwiającego kształtowanie parametrów (kierunku i wartości prędkości) grzewczego strumienia powietrza,
- wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła α od powietrza do ogrzewanego ciała w warunkach zmiennych parametrów przepływu.

Współczynnik ten wynika z prawa Newtona [57]:

$$Q = \alpha F t (T_1 - T_2) \tag{1.2}$$

gdzie: Q – ilość przejętego ciepła,

α - współczynnik przejmowania ciepła,

F – pole powierzchni opływanego ciała,

T_1 , T_2 – temperatura powietrza i temperatura powierzchni elementu,

t – czas trwania procesu ogrzewania.

Zwiększenie efektywności procesu przenoszenia ciepła pozwoli osiągnąć wyższą wartość temperatury elementu ogrzewanego w tym samym czasie. Rozpatrując ilość energii cieplnej przejętej przez element od opływającego go powietrza można będzie osiągnąć tą samą wartość w krótszym czasie. Skrócenie czasu trwania procesu ogrzewania związane jest ze zmniejszeniem ilości energii zużytej w tym procesie. Dążenie do zmniejszenia ilości zużywanej energii przedstawiono między innymi w pracy dotyczącej mikropneumatyki, w której to dziedzinie wykorzystuje się mikrozawory strumieniowe [6] oraz w pracy [5]. Zmniejszone zużycie energii związane jest z ekologią. Aspekty ekologiczne na etapie konstruowania, użytkowania i recyklingu szczególnie podkreślone są w pracach [10, 12, 13].

1.2 Cel pracy

Celem pracy jest przeprowadzenie badania procesu wymiany ciepła powietrze – przegroda z zastosowaniem odpowiednio skonstruowanego elementu strumieniowego oscylacyjnie zasilającego miejsce ogrzewane (lub chłodzone). Działanie elementu strumieniowego powinno podlegać kontroli, tzn. konstrukcja winna umożliwiać sterowanie parametrami przepływu roboczego strumienia powietrza. Zmiany wartości wybranych parametrów przepływu pozwolą na kształtowanie intensywności procesu wymiany ciepła. W praktyce, w wielu procesach technologicznych chodzi o uzyskanie wyższej wartości temperatury na ogrzewanej ścianie oraz mniejszego stopnia nierównomierności rozkładu temperatury na powierzchni tej ściany.

Wyniki badań pozwolą opracować wytyczne co do geometrii, kształtu i konstrukcji, ważnych w procesie projektowania urządzeń strumieniowych ze sterowanym wypływem strumienia głównego

Tak postawiony cel pracy wymaga realizacji następujących zadań:

- opis zjawisk towarzyszących sterowanemu przepływowi strumienia powietrza,

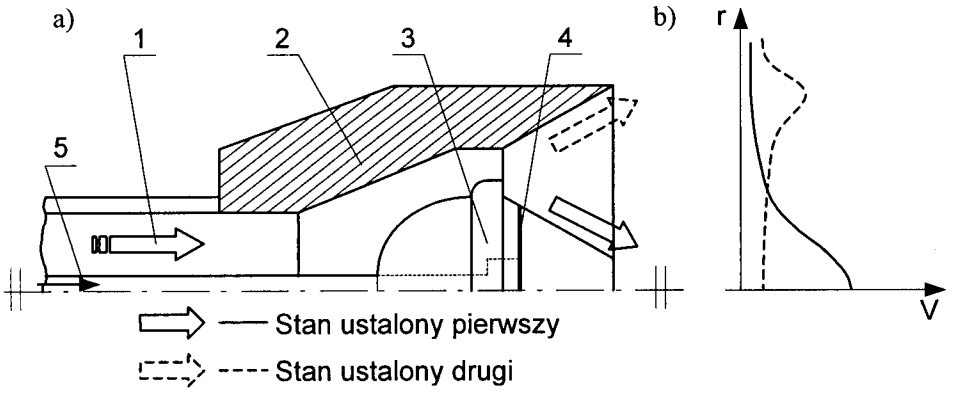
- opracowanie geometrii dyszy dużej mocy spełniającej wymagane parametry przepływu strumienia głównego
- opracowanie układu sterowania umożliwiającego zmianę wartości parametrów wejściowych w określonym zakresie,
- określenie własności (parametrów eksploatacyjnych) badanej dyszy strumieniowej,
- określenie optymalnych parametrów pracy urządzenia w celu poprawienia jakości procesu wymiany ciepła,
- opracowanie konstrukcji urządzenia (dysza + układ sterowania),
- wykonanie prototypu elementu strumieniowego dużej mocy,
- przeprowadzenie badań stanowiskowych nad procesem wymiany ciepła powietrze – przegroda,
- opracowanie i uogólnienie wytycznych pomocnych przy konstruowaniu elementów strumieniowych dużej mocy ze sterowanym strumieniem głównym.

1.3 Teza pracy

Możliwy jest określony dobór parametrów (częstotliwość, moc – ciśnienie i wydajność) strumienia głównego dyszy strumieniowej dużej mocy, zwiększających intensywność procesu wymiany ciepła między strumieniem powietrza wypływającym z dyszy a elementem opływanym przez ten strumień, a także umożliwiających kształtowanie rozkładu temperatury na powierzchni ogrzewanego elementu.

1.4 Zakres pracy

Analiza danych literaturowych [28, 32, 51, 64, 86] i wstępne badania własne [68, 74, 76] wykazały, że odpowiedni przepływ strumienia ogrzanego powietrza może zapewnić osiowosymetryczna dysza dużej mocy. A więc elementem roboczym w badanym procesie przenoszenia ciepła będzie element strumieniowy dużej mocy. Elementem tym jest dysza osiowosymetryczna z rdzeniem wewnętrznym, charakteryzująca się dwoma ustalonymi stanami wypływu powietrza.



Rys. 1.2. Schemat stosowanego elementu strumieniowego; a) schemat dyszy i kierunek wypływu powietrza, b) przewidywany rozkład prędkości powietrza za dyszą; 1-strumień zasilający, 2-obudowa dyszy, 3-rdzeń wewnętrzny, 4-miejsce wypływu strumienia sterującego, 5-kanał doprowadzający strumień sterujący.

Przedstawiona na rysunku 1.2. dysza z rdzeniem wewnętrznym (3) pozwala uzyskać dwa ustalone stany wypływu powietrza. Pierwszy stan ustalony jest to stan, w którym strumień wypływa wzdłuż rdzenia dyszy (linia ciągła strzałki). Drugi stan ustalony jest to stan, w którym strumień wypływa wzdłuż obudowy dyszy (linia kreskowa strzałki). Na rysunku 1.2.b przedstawiono charakter (w sensie jakościowym) rozkładu prędkości powietrza za dyszą. Pierwszy stan wypływu powinien charakteryzować się koncentracją strumienia w okolicy osi symetrii dyszy. Drugi stan ustalony powinien charakteryzować się odsuniętym od osi dyszy punktem wystąpienia wartości maksymalnej prędkości. Uzyskanie odpowiednich parametrów strumienia głównego wymagać będzie modyfikacji wcześniej badanego elementu strumieniowego, schematycznie przedstawionego na rysunku 1.2. Sprawą otwartą jest oczywiście dobór parametrów strumienia zapewniających odpowiedni przebieg procesu wymiany ciepła.

Z powyższego wynika, że potwierdzenie lub zaprzeczenie tezy wymaga studiów, analizy i badań w dwu obszarach:

- w obszarze konstrukcji i badania właściwości elementów strumieniowych dużej mocy ze zmiennym (oscylacyjnym) położeniem strumienia głównego (roboczego),
- w obszarze analizy procesu wymiany ciepła pomiędzy gorącym powietrzem a ciałem stałym.

Możliwy i konieczny do realizacji zakres działań jest następujący:

- numeryczne modelowanie zjawiska opływu płaskiej ściany oporowej oraz modelowanie zjawiska przepływu powietrza przez dyszę, badania te przeprowadzone będą głównie z powodu utrudnionego dokonywania wiarygodnych pomiarów wewnątrz dyszy, zwłaszcza w otoczeniu stosowanego spojlera. Numeryczne symulacje przepływu przeprowadzone będą z wykorzystaniem środowiska obliczeniowego FLUENT.
- badanie doświadczalne opływu płaskiej ściany oporowej przez strumień główny dyszy, pozwalające na jakościową ocenę efektów procesu cieplnego. Badania te, polegające na wizualizacji przepływu powietrza są badaniami wstępnymi. Pozwolą one określić zakres zmian parametrów wejściowych, przy których zachodzi zakładana pulsacja strumienia powietrza.
- badanie doświadczalne rozkładu prędkości powietrza za dyszą, zarówno w stanie wypływu swobodnego bez ściany oporowej jak i z zastosowaniem ściany oporowej pozwoli modelować geometrę dyszy. Wyniki tych badań posłużą do oceny między innym wpływu oscylacji przepływu na proces wymiany ciepła.
- badanie termograficzne temperatury ściany oporowej dla ustalonych zakresów zmiennych wejściowych – pozwoli na określenie parametrów eksploatacyjnych (parametrów procesu), a tym samym na weryfikację tezy mówiącej o możliwości intensyfikacji wymiany ciepła pomiędzy pulsującym strumieniem a płaską ścianą oporową.

Reasumując powyższe pragnę podkreślić, że wizualizacja wypływu strumienia głównego z dyszy oraz badanie termograficzne rozkładu temperatury ogrzewanej przegrody będą stanowić miarę (kryterium oceny) doboru, optymalnego z punktu widzenia jakości procesu przenoszenia ciepła, wymiarów dyszy i parametrów strumienia głównego dla danego elementu strumieniowego.

2 Technika strumieniowa

2.1 Rodzaje elementów strumieniowych

Elementy strumieniowe sklasyfikować można według podstawowych cech [89]:

- sposobu pracy,
- realizowanych funkcji,
- wykorzystywanych efektów aerodynamicznych.

Biorąc pod uwagę postać sygnału, elementy strumieniowe dzieli się na elementy dyskretne i ciągłe. W urządzeniach dyskretnych sygnałem wejściowym jest najczęściej ciśnienie powietrza lub ciśnienie i natężenie przepływu przyjmujące dwie wartości. Jedna z nich uważana jest za sygnał sterujący wysoki i oznaczany przez 1, druga za sygnał sterujący niski, i oznaczany przez 0. W przypadku elementów strumieniowych o działaniu ciągłym zmiany wartości ciśnienia lub ciśnienia i natężenia przepływu w kanałach sterujących są ciągłe [33].

Biorąc pod uwagę realizację funkcji, elementy strumieniowe dzieli się na :

- podstawowe elementy o działaniu dyskretnym:
  - przekaźniki,
  - elementy pamięci,
  - generatory drgań;
- podstawowe elementy o działaniu ciągłym:
  - wzmacniacze ciśnienia,
  - wzmacniacze przepływu,
  - sumatory ciśnienia i/lub przepływu.

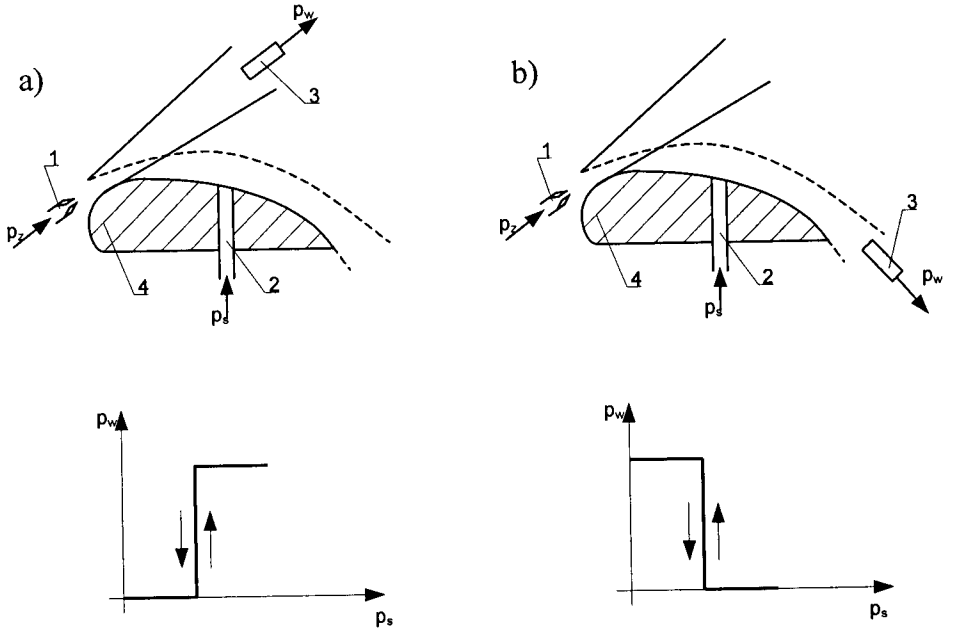
Biorąc pod uwagę wykorzystywane efekty aerodynamiczne, elementy strumieniowe można podzielić na elementy wykorzystujące:

- cechy pojedynczych strumieni powietrza,
- oddziaływanie swobodnych strumieni powietrza,
- właściwości przepływów przyściennych,
- turbulizację przepływu strumienia głównego,
- zawirowania strumieni,
- efekt ogniskowania strumienia,

- właściwości przepływów naddźwiękowych.

Oprócz takich podziałów można jeszcze wyróżnić podział elementów strumieniowych z uwagi na ich budowę. Wyróżniamy w takim przypadku elementy płaskie i przestrzenne. W zależności od sposobu zasilania wyróżnić można elementy czynne i bierne. W elementach czynnych występuje kanał sterujący i realizacja funkcji elementu strumieniowego następuje z wykorzystaniem sygnału sterującego. W elementach typu biernego nie ma sygnału sterującego i realizacja funkcji następuje tylko przy wykorzystaniu energii strumieni przyłączonych do kanałów zasilających (wejściowych).

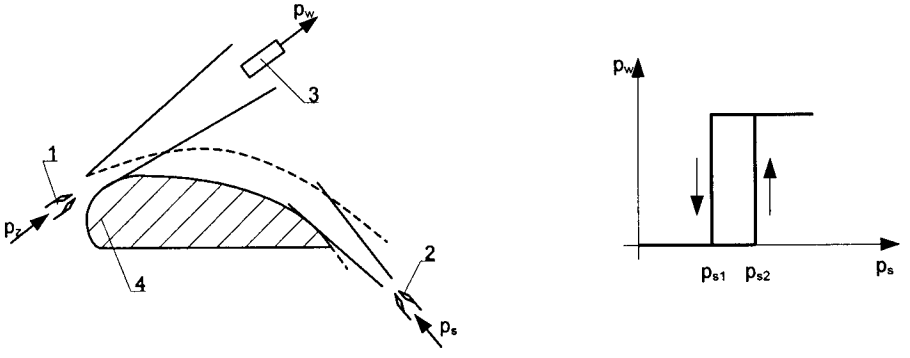
Zasadę działania przekaźników strumieniowych czynnych oraz ich charakterystyki przedstawiono na rysunku 2.1 i 2.2.



Rys. 2.1. Schemat działania przekaźnika strumieniowego i jego charakterystyka; a) element strumieniowy o działaniu „wprost" i jego charakterystyka, b) element strumieniowy o działaniu „odwrotnym" i jego charakterystyka; 1-kanał zasilający, 2-kanał sterujący, 3-kanał wyjściowy, 4-ścianka przylegania strumienia [89].

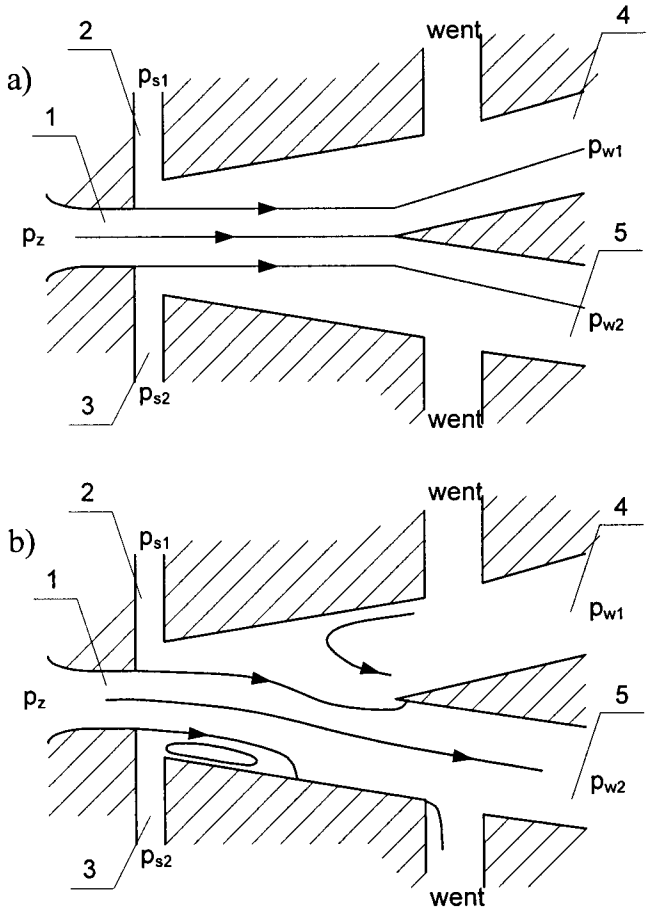
Przedstawiony na rysunku 2.1.a. strumieniowy przekaźnik o działaniu „wprost" działa wykorzystując oderwanie się strumienia płynu od ścianki pod wpływem strumienia podawanego do kanału sterującego. Przy wyłączonym strumieniu sterującym strumień główny wypływa wzdłuż ścianki (oznaczony przerywaną linią), po załączeniu strumienia sterującego p_s następuje oderwanie się strumienia głównego p_z i wypływ do kanału wyjściowego p_w. W takim

rozwiązaniu działanie „wprost", polegające na pojawieniu się sygnału wyjściowego po załączeniu sygnału sterującego i zanik sygnału wyjściowego po wyłączeniu strumienia sterującego, różni się od działania „odwrotnego" umiejscowieniem kanału wyjściowego. W elementach o działaniu „odwrotnym" sygnał wyjściowy pojawia się przy wyłączonym sygnale sterującym. Element taki działa jak bramka logiczna NOT (negacja).



Rys. 2.2. Schemat działania przekaźnika strumieniowego z zewnętrznym strumieniem sterującym i jego charakterystyka przełączeniowa; 1-kanał zasilający, 2-kanał sterujący, 3-kanał wyjściowy, 4-ścianka przylegania strumienia [89].

Przedstawione na rysunku 2.2. rozwiązanie z zewnętrznie umieszczonym kanałem sterującym pozwala uzyskać charakterystykę przekaźnikową z histerezą. Uzyskanie takiej charakterystyki możliwe jest przy doborze odpowiedniego profilu ścianki i odpowiednich parametrach strumienia sterującego. Przełączanie strumienia głównego zachodzi przy różnych wartościach natężenia przepływu. Oderwanie się strumienia od ścianki (przełączenie strumienia do kanału 3) następuje z chwilą pojawienia się natężenia przepływu strumienia sterującego o ciśnieniu równym p_{s2}. Powrót do kanału 2 (przylgnięcie do ścianki) strumienia głównego następuje przy zaniku wartości ciśnienia sterującego p_{s2} (gdy strumień sterujący osiągnie wartość p_{s1}). Wartości te są różne, a w tym przypadku wartość p_{s2} jest większa od wartości p_{s1}.



Rys. 2.3. Schemat symetrycznego elementu strumieniowego z liniami prądu; a) przy przepływie laminarnym, b) przy przepływie turbulentnym; 1-kanał zasilający, 2,3-kanały strumienia sterującego, 4,5-kanały wylotowe [4].

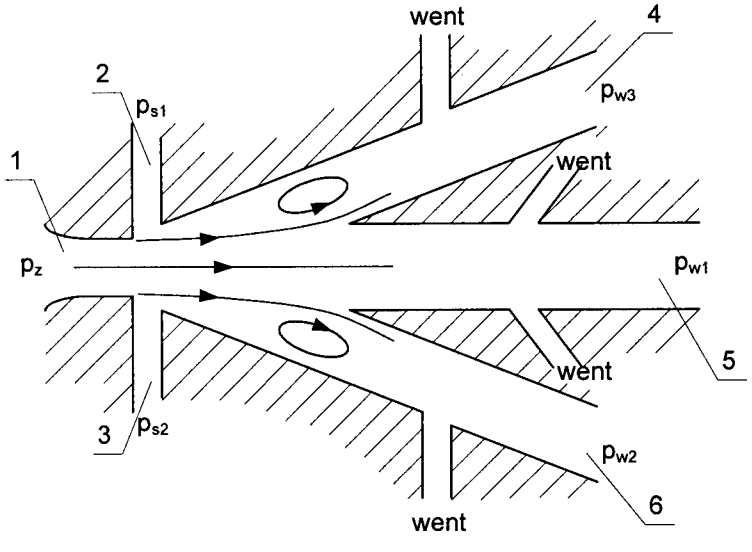
Działanie elementu strumieniowego zależy od charakteru przepływu. Na rysunku 2.3 przedstawiono istotę tego problemu. Jeżeli strumień wypływający z kanału zasilającego 1 o ciśnieniu p_z ma charakter przepływu laminarnego, to będzie on wypływał równolegle do osi symetrii elementu, i po dotarciu do krawędzi rozdzielającej kanały wylotowe rozdzieli się na dwa strumienie. Jeżeli wzrośnie prędkość przepływu i liczba Reynoldsa Re osiągnie wartość wyższą od minimalnej Re_{min}, przepływ zmieni charakter na turbulentny i strumień przyklei się do jednej lub drugiej ściany (na rysunku do dolnej ściany). Przy zmniejszaniu wartości prędkości przepływu strumień pozostanie przyklejony do danej ściany aż do osiągnięcia wartości liczby Reynoldsa niższej od minimalnej ($Re < Re_{min}$). Poniżej tej wartości charakter przepływu zmieni się ponownie na laminarny i strumień

popłynie jak na rysunku 2.3.a. Normalna praca takiego elementu, tzn. przełączanie strumienia wyjściowego między wylotem 1 a 2 odbywa przy zakresie $Re > Re_{min}$.

I tak:

- strumień główny przyklejony jest do dolnej krawędzi i wypływa kanałem 5 (ciśnienie wyjściowe p_{w2}). Po załączeniu strumienia sterującego p_{s2}, strumień główny przełączy się do kanału wyjściowego 4 (ciśnienie p_{w1}) i pozostanie w takim położeniu nawet po wyłączeniu sygnału sterującego (ciśnienie p_{s2}).
- przełączenie strumienia ponownie do kanału wyjściowego 5 (ciśnienie p_{w1}) nastąpi po załączeniu strumienia sterującego (ciśnienie p_{s1}).

Przedstawiony element jest elementem strumieniowym dwupołożeniowym. Ze względu na pozostawanie strumienia wyjściowego w określonym położeniu, nawet po wyłączeniu strumienia sterującego, elementy strumieniowe o takim działaniu nazywane są elementami bistabilnymi.



Rys. 2.4. Schemat trójstabilnego elementu strumieniowego z trzema kanałami wyjściowymi 1-kanał zasilający, 2,3-kanały strumienia sterującego, 4,5,6-kanały wylotowe [4].

Przedstawione na rysunku 2.4 rozwiązanie pozwala uzyskać element strumieniowy dwojakiego rodzaju. W zależności od zastosowanego zakresu wartości prędkości przepływu strumienia głównego (ciśnienie p_z) element może być elementem trójpołożeniowym trójstabilnym, dwustabilnym lub monostabilnym.

W układzie trójstabilnym strumień może być odchylony od położenia centralnego (wypływ kanałem 5 o ciśnieniu p_{w1}) do położenia bocznego (ciśnienie p_{w2} lub p_{w3}) odpowiednio przez strumień sterujący o ciśnieniu p_{s1} lub p_{s2}. Od położenia brzegowego strumień będzie odchylony do drugiego położenia brzegowego przez jeden strumień sterujący. Aby ustalić strumień w położeniu centralnym (ciśnienie p_{w1}), muszą być załączone oba strumienie sterujące (ciśnienie p_{s1} i p_{s2}). Po wyłączeniu obu strumieni sterujących strumień główny pozostaje w stanie ustalonym centralnym i wypływa przez kanał wyjściowy 4.

Dla układu pracującego w trybie trójpołożeniowym dwustabilnym, położeniem stabilnym będzie położenie boczne. Ustabilizowanie strumienia w położeniu centralnym wymaga zastosowania obu strumieni sterujących (ciśnienie p_{s1} i p_{s2}). Po odjęciu sygnałów sterujących strumień przylgnie do jednej z dwóch ścian bocznych.

Dla zakresu prędkości przepływu, umożliwiających pracę w układzie monostabilnym, położenie stabilne strumienia to położenie centralne (wypływ kanałem 5 o ciśnieniu p_{w1}). Załączenie strumienia sterującego - ciśnienie p_{s1} lub p_{s2}, spowoduje przełączenie się strumienia wyjściowego odpowiednio do kanału wyjściowego 6 lub 4 (ciśnienie p_{w2} lub p_{w3}). Wyłączenie strumienia sterującego spowoduje samoczynny (automatyczny) powrót strumienia do położenia centralnego i wypływ kanałem wyjściowym 5 o ciśnieniu p_{w1}.

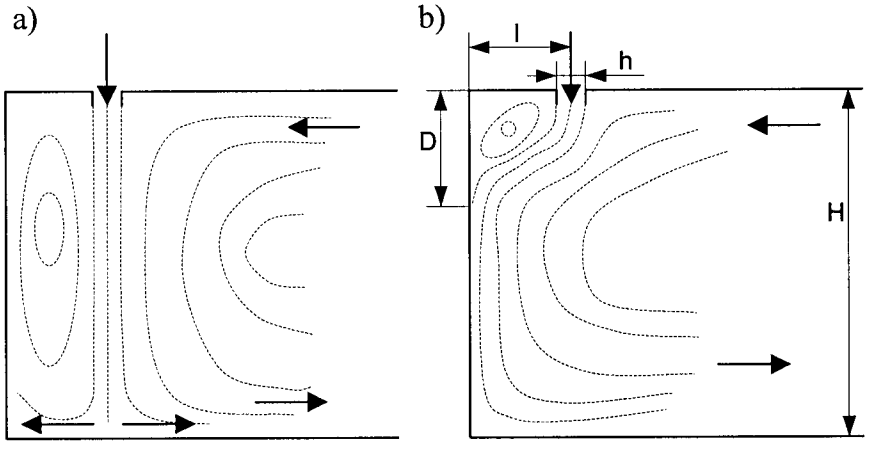
Pierwszą historycznie uznaną osobą, która zwróciła uwagę na zachowanie się powietrza podczas przepływu przy ścianie był rumuński inżynier Henri Coanda. Zjawisko przylegania strumienia płynu do najbliższej ścianki nazwano od jego nazwiska „efektem Coanda".

Elementy strumieniowe, ze względu na realizowane funkcje, znalazły szerokie zastosowanie w pneumatycznych układach sterujących. Fakt ten spowodował rozwój produkcji tych elementów, szczególnie w latach pięćdziesiątych i siedemdziesiątych Z uwagi na nieskomplikowaną budowę tych elementów i brak w nich części ruchomych charakteryzują się one wysoką niezawodnością i trwałością. Gwałtowny rozwój elektroniki oraz coraz doskonalsze

elektroniczne układy sterujące wyparły elementy strumieniowe z układów sterowania.

W tym miejscu pragnę poinformować, że w Katedrze Sterowania i Konstrukcji Wydziału Mechanicznego UTP w Bydgoszczy nadal wykorzystywany jest element strumieniowy realizujący funkcję logiczną NOR. Doskonale sprawdza się na stanowisku dydaktycznym, które służy do doświadczalnego wyznaczania transmitancji obiektu. Podejmowane były także działania mające na celu wykorzystanie elementów strumieniowych w przetwornikach cyfrowo-analogowych [37, 47].

Efekt Coanda może wystąpić przy każdej wartości natężenia przepływu. W pracy [18] autorka zwróciła uwagę na występowanie efektu Coanda w układach wentylacji pomieszczeń. W pracy [58] przedstawiono schemat przepływu powietrza w projektowanej instalacji wentylacyjnej. Według autorów występowanie efektu Coanda jest szkodliwe, ponieważ powoduje, że rzeczywisty przepływ powietrza w pomieszczeniu różni się od przepływu założonego w projekcie. W większości przypadków efekt ten powoduje pogorszenie parametrów pracy układu wentylacyjnego (rys. 2.5).



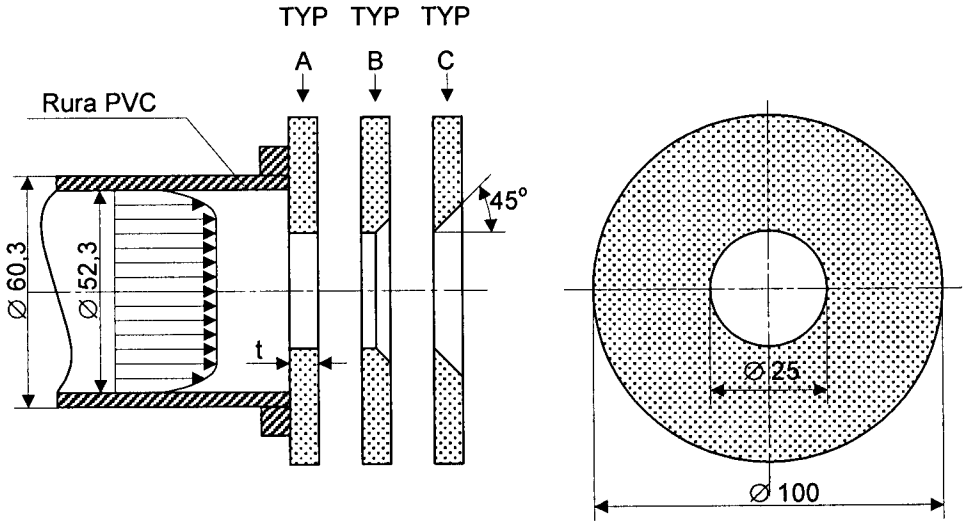
Rys. 2.5. Pionowy strumień powietrza w pomieszczeniu: a) przepływ projektowany, b) przepływ rzeczywisty (występowanie efektu Coanda).

2.2 Przykłady elementów strumieniowych kształtujących intensywność procesu wymiany ciepła

Prowadzone przez wielu badaczy prace związane z przepływem powietrza obejmują wiele różnorodnych rozwiązań konstrukcyjnych elementów

strumieniowych. Głównym podziałem z uwagi na konstrukcję danych elementów jest podział na płaskie elementy strumieniowe i osiowosymetryczne elementy strumieniowe.

Większość elementów strumieniowych prezentowanych w literaturze, charakteryzuje się prostą konstrukcją osiowosymetryczną i nie ma rdzenia umieszczonego w osi dyszy. Parametry wylotowe strumieni powietrza z dysz czy kanałów zależą od rodzaju i kształtu zastosowanych na wylocie elementów.



Rys. 2.6. Rozwiązania konstrukcyjne kształtujące strumień wylotowy [28].

Na rysunku 2.6 pokazano przykładowo trzy różne konstrukcje kształtujące strumień wylotowy. Zastosowane w tych rozwiązaniach sfazowania krawędzi otworu wylotowego decydują o rozproszeniu bądź o koncentracji strumienia.

Autorzy pracy [28] prowadzili badanie elementu z rys. 2.6 dla przepływu turbulentnego w zakresie liczb Reynoldsa od wartości $\mathrm{Re} = 5000$ do wartości $\mathrm{Re} = 30000$. A więc prowadzono badania dla różnych typów wylotów i w szerokim zakresie zmian prędkości wypływającego strumienia powietrza.

Lokalny współczynnik przenoszenia ciepła α_L oraz liczba Nusselta Nu_L wyznaczane były ze wzorów:

$$\alpha_L = \frac{q_v}{T_w - T_j} \tag{2.1}$$

$$Nu_L = \frac{\alpha_L D}{\lambda} \tag{2.2}$$

gdzie: q_v - lokalny strumień ciepła,

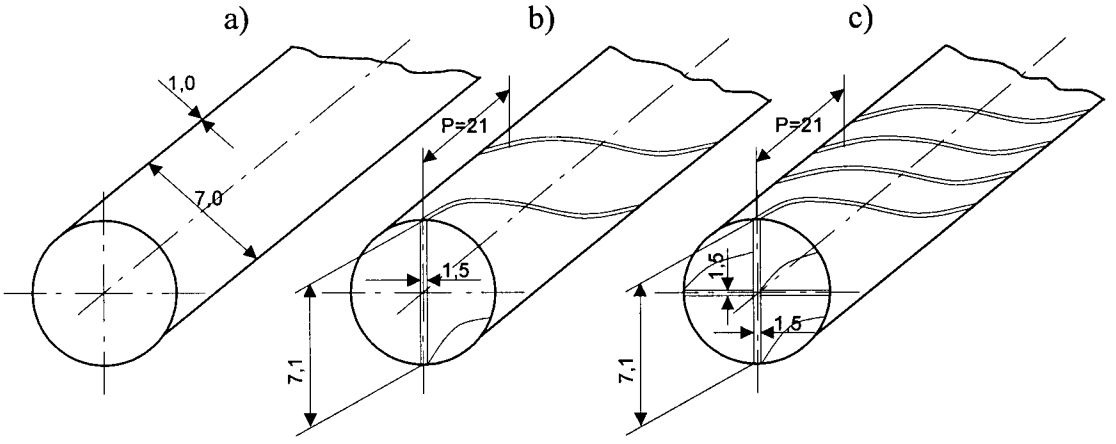
T_w, T_j - temperatura ściany i temperatura strumienia,

D - wymiar charakterystyczny,

λ - przewodność cieplna powietrza.

Uzyskane przez nich wyniki wykazały, że spośród badanych trzech typów dysz, najwyższe wartości liczby Nusselta (największą wartość współczynnika przenoszenia ciepła α_L) osiągnięto dla dyszy typu C.

Inne rozwiązanie konstrukcyjne elementu strumieniowego przedstawiono na rysunku 2.7 [86].



Rys. 2.7. Geometria dysz wytwarzających wirujące strumienie powietrza; a) typ 1 – dysza smukła, b) typ 2 – wydłużone skręcenie strumienia, c) typ 3 – krzyżowe skręcenie strumienia.

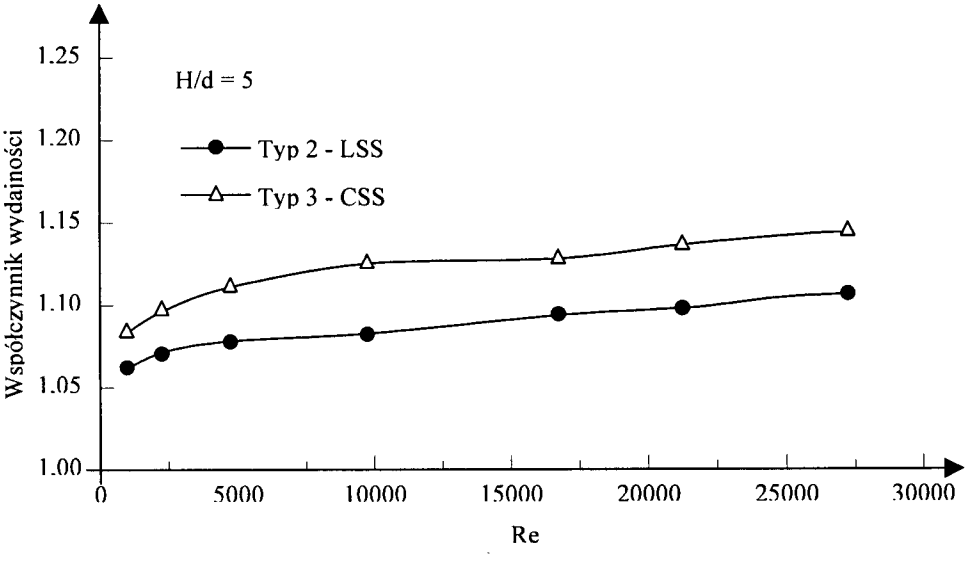
W odniesieniu do przedstawionych na rysunku 2.7 rozwiązań konstrukcyjnych dyszy prowadzone były badania nad intensywnością chłodzenia płaskiej powierzchni oporowej, umieszczonej prostopadle do strumienia [86]. Rozważano trzy warianty dyszy, i tak na rysunku 2.7 a przedstawiono dyszę bez wkładek powodujących skręcenie strumienia, na rysunku 2.7 b przedstawiono dyszę z jedną wkładką nazwaną przez autorów LSS – Longitudinal Swirling-Strip, na rysunku 2.7 c przedstawiono dyszę z dwoma wkładkami CSS – Crossed Swirling-Strip. Zakres badań obejmował przepływ w szerokim zakresie liczb Reynoldsa od $\mathrm{Re} = 250$ do $\mathrm{Re} = 27000$. Badania obejmowały także wizualizację przepływu powietrza z wykorzystaniem metody zadymionego powietrza.

Uzyskane przez nich wyniki pokazują, że:

- strumień wyjściowy z dyszy CSS ma kształt piramidalny,

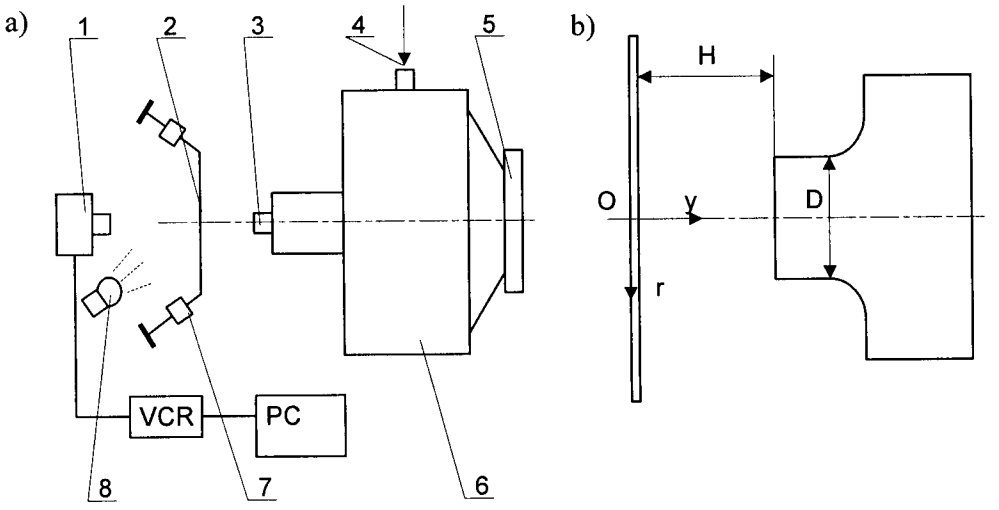
- strumień wyjściowy z dyszy CSS charakteryzuje się większym stopniem turbulencji,
- wraz z zwiększaniem wartości H/d (H - odległość dyszy od ściany, d - średnica dyszy) zmniejsza się stopień turbulencji,
- strumień wypływający z dyszy typu smukłego, uderzając w ścianę, obejmuje mniejszy jej obszar niż strumień wypływający z dyszy CSS,
- dla obu rozwiązań LSS i CSS wraz ze wzrostem wartości Re rośnie współczynnik przejmowania ciepła α.

Na rysunku 2.8 pokazano skuteczność dysz LSS i CSS w odniesieniu do dyszy smukłej. Dla poszczególnych wartości punktem odniesienia była wydajność dyszy smukłej przyjęta do porównania jako wartość 1.



Rys. 2.8. Wykres współczynnika wydajności dysz typu LSS i CSS w stosunku do smukłej dyszy dla różnych wartości Re [86].

Innym rozwiązaniem elementu strumieniowego, stosowanego w badaniach nad przekazywaniem ciepła, jest propozycja zawarta w pracy [64], której schemat przedstawiono na rysunku 2.9.

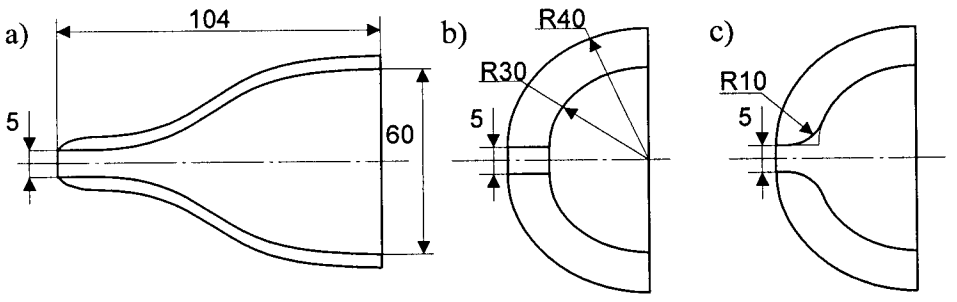


Rys. 2.9. Schemat stanowiska badawczego: a) elementy składowe stanowiska, b) układ współrzędnych; 1-kamera, 2-ogrzewana ściana oporowa, 3-dysza, 4-wlot strumienia zasilającego, 5-głośnik, 6-komora, 7-sprężyna, 8-lampa ultrafioletowa.

Cechą charakterystyczną dla tego rozwiązania jest wprowadzenie dodatkowego wzbudzenia strumienia powietrza w komorze umieszczonej przed dyszą. Strumień zasilający 4 wpływa do komory 6, a następnie wypływa przez dyszę 3, uderzając w ścianę 2. Do strumienia wprowadzane jest dodatkowe wymuszenie, generowane z membrany głośnika 5 umieszczonego naprzeciw wylotu dyszy 3. Według autorów [64], takie usytuowanie głośnika pozwala uzyskać osiowosymetryczny wypływ powietrza z dyszy. Podczas badań stosowane były częstotliwości drgań membrany w zakresie od 600 do 2500 Hz. Pomiarów dokonywano dla przepływów, przy których wartość liczby Reynoldsa wynosiła odpowiednio $Re = 7170, 9700, 12300$.

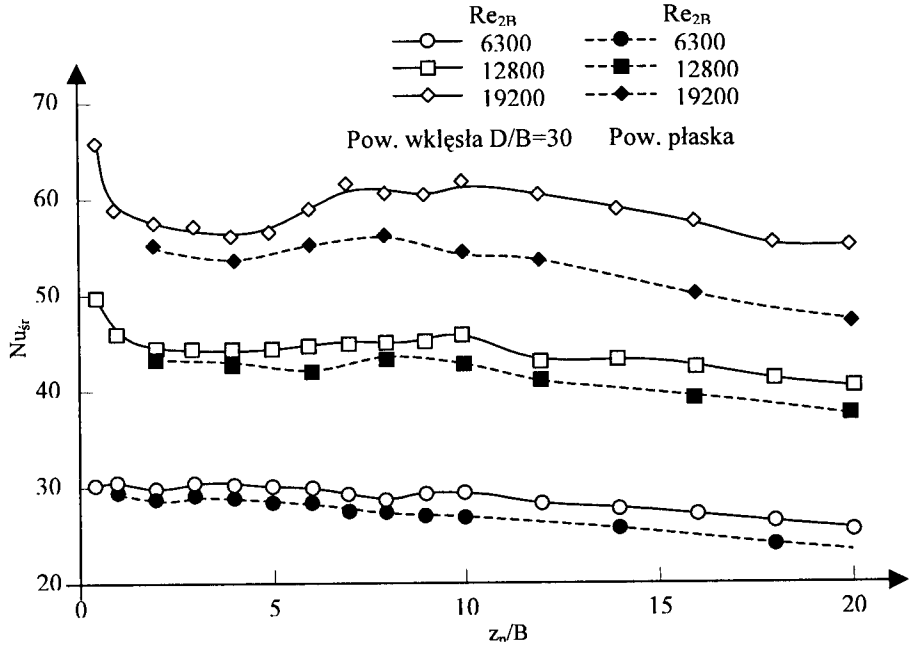
Uzyskane przez nich wyniki wskazują, że przy wymuszeniach zbliżonych do naturalnej częstotliwości wypływającego z dyszy strumienia wzrasta ilość lokalnie przenoszonego ciepła. Wynika to z stąd, że przy takiej wartości częstotliwości wymuszającej tworzą się małe chaotyczne wiry, posiadające zmienne wartości turbulencji.

Innym przykładem konstrukcji elementu strumieniowego są płaskie dysze przedstawione na rysunku 2.10. Rozwiązanie to stosowane było w badaniach przepływu ciepła między płaską i wklęsłą powierzchnią oporową [3, 88].



Rys. 2.10. Przykład rozwiązania płaskiego elementu strumieniowego: a) dysza profilowana, b) dysza bez zaokrąglenia krawędzi, c) dysza z zaokrągloną krawędzią [88].

Przeprowadzone badania wykazały, że dla dyszy zaokrąglonej (rys 2.10 c) osiągnięto wyższe wartości liczby Nusselta dla odległości dyszy od ściany $z_n/B=12$, gdzie $B=5mm$, i jest to szerokość szczeliny dyszy (rys. 2.10). Otrzymane wyniki są jakościowo porównywalne z wynikami uzyskanymi przez innych badaczy cytowanych w tej pracy [88]. Porównanie wyników reprezentowanych przez wartość liczby Nusselta, dla zaokrąglonej dyszy przy płaskiej i sferycznej powierzchni ściany oporowej przedstawiono na rysunku 2.11. Przy tym z_n jest odległością dyszy od ściany, a B jest szerokością szczeliny dyszy.



Rys. 2.11. Porównanie średnich wartości liczby Nusselta uzyskanych podczas badań strumienia uderzającego w powierzchnię wklęsłą i płaską w funkcji z_n/B dla dyszy z zaokrągloną krawędzią (rys. 2.10c) [88].

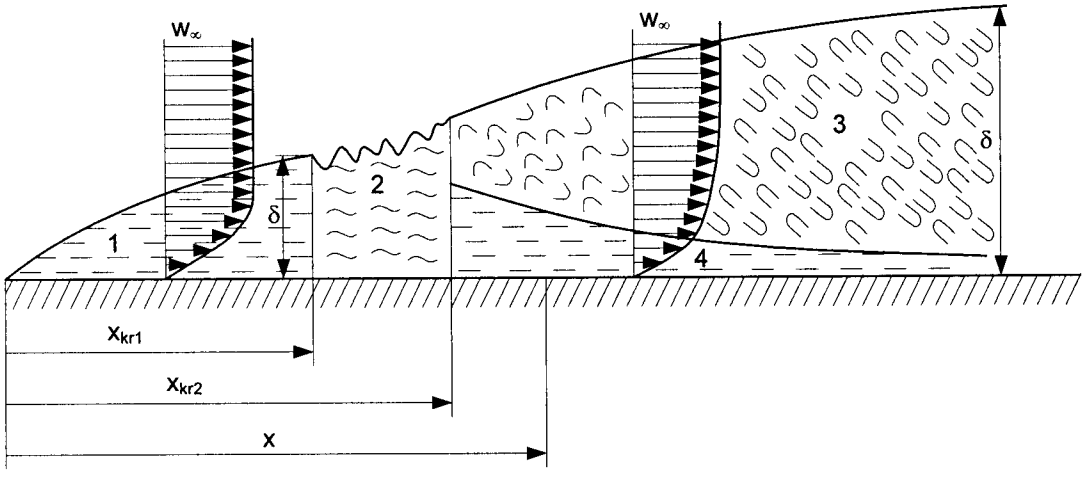
3 Analiza procesów przenoszenia ciepła przez strumień powietrza

3.1 Zjawisko fizyczne przenoszenia ciepła przez strumień powietrza

Przepływem lub wymianą ciepła nazywamy zjawisko przekazywania energii cieplnej z układu o wyższej temperaturze do układu o niższej temperaturze. Biorąc pod uwagę fizyczny mechanizm zjawiska wyróżnić możemy trzy rodzaje przepływu ciepła:

- przewodzenie,
- konwekcja,
- promieniowanie.

W niniejszej pracy wykorzystywane jest przenoszenie ciepła przez konwekcję. Proces konwekcyjnego unoszenia ciepła podzielić można na dwa typy, zależne od warunków napływu. Pierwszym z nich jest konwekcja swobodna, w której ruch ciepła spowodowany jest różnicą gęstości płynu, wynikającą z różnicy temperatury. Drugim jest konwekcja wymuszona, w której ruch płynu wymuszony jest przez pompę, wentylator lub inne urządzenie [35, 49].
Ponieważ wymiana ciepła zachodzi między płynem a opływanym przez ten płyn ciałem stałym należy rozpatrzyć zjawiska zachodzące na styku tych dwóch ośrodków.



Rys. 3.1. Hydrauliczna warstwa przyścienna przy opływie płaskiej powierzchni, 1-warstwa laminarna, 2-obszar przejściowy, 3-warstwa turbulentna, 4-podwarstwa laminarna [86].

Uważa się, że powstająca na powierzchni opływanego elementu termiczna warstwa przyścienna jest na ogół różna od hydraulicznej warstwy przyściennej [52,

86, 90]. Powstawanie warstwy przyściennej zależy od warunków napływu powietrza.

Zgodnie z prawem Newtona, gęstość strumienia przejmowanego ciepła określa się:

$$\dot{q} = \alpha(T_w - T_p) \tag{3.1}$$

gdzie: α – współczynnik przejmowania ciepła,

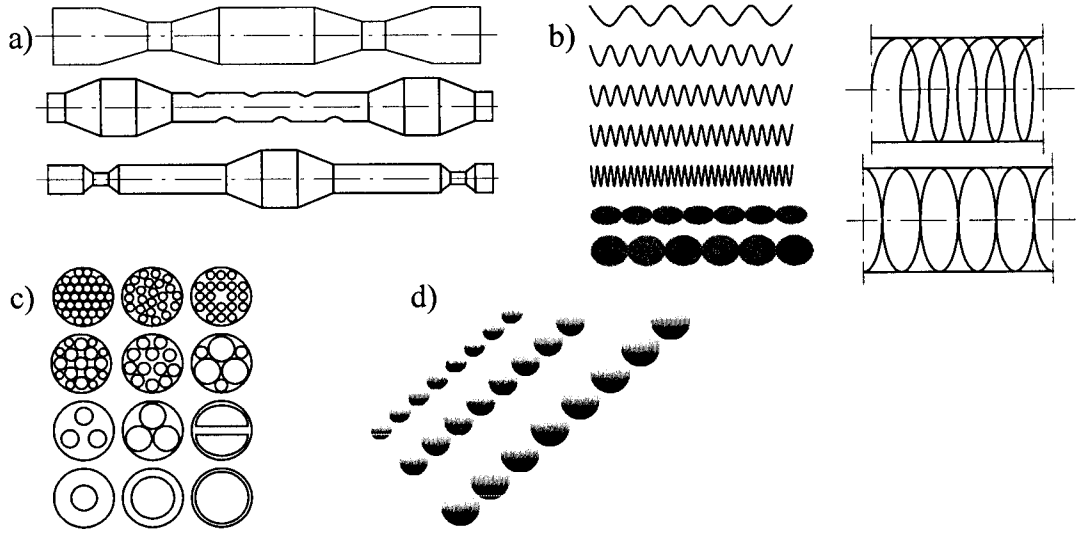
T_w – temperatura powierzchni ścianki,

T_p – temperatura płynu.

Wyznaczenie strumienia ciepła $\dot{q}$ jest trudne i wymaga zwykle przyjęcia wielu założeń upraszczających. Wynika to stąd, że współczynnik wnikania (przejmowania) ciepła jest nieliniową funkcją wielu zmiennych. Są to min. właściwości termofizyczne płynu - gęstość, ciepło właściwe, współczynnik przewodzenia ciepła, a te są zależne od temperatury i ciśnienia płynu [35, 86].

W literaturze spotkać można różne sposoby intensyfikacji przepływu ciepła [15]. Do najczęściej wymienianych sposobów należą:

- turbulizacja przepływu,
- zrywanie warstwy przyściennej,



Rys. 3.2. Wybrane przykłady najczęściej stosowanych turbulizatorów (wkładów turbulizacyjnych), a) rury turbulizacyjne, b) wkładki spiralne i śrubowe, c) wkładki tarczowe, d) wkładki kulkowe [2].

Jedną z metod intensyfikacji ciepła jest turbulizacja przepływu. Metoda ta jest jednak stosowana głównie w wymiennikach ciepła. W takich bowiem urządzeniach mamy bezpośrednią możliwość ingerencji (przy konstruowaniu) w kształt i budowę kanałów, w których popłynie ogrzewany lub chłodzony płyn. Jak już wspomniałem, moja propozycja w tym zakresie (turbulizacji przepływu) zmierza do zastosowania sterowanego urządzenia strumieniowego. Wprowadzanie dodatkowych elementów do opływanej powierzchni elementu już wykonanego jest często niemożliwe. Skupić się więc należy na metodach intensyfikacji przepływu ciepła niewymagających ingerencji w opływany element. Dlatego w dalszych rozważaniach skoncentruję się głównie na intensyfikacji ciepła poprzez zrywanie warstwy przyściennej poprzez zmienny charakter napływu powietrza. Wyniki, uzyskane przez autora pracy [20] wskazują, że dla niskich wartości częstotliwości oscylacji przepływu powietrza w kanale o przekroju prostokątnym ruch oscylacyjny nie przyczynia się do intensyfikacji wymiany ciepła.

3.2 Metody oceny jakościowego i ilościowego przenoszenia ciepła

Podczas badania procesów przenoszenia ciepła jednym z najważniejszych parametrów służących do oceny procesu przenoszenia ciepła jest temperatura. Możliwości pomiaru temperatury badanego elementu – ogrzewanego lub chłodzonego przez opływające go powietrze – są różne.

Metody spotkane przez autora w literaturze i stosowane podczas badań są następujące :

- metoda termografii podczerwieni,
- pomiary z wykorzystaniem termoelementów,
- pomiary z wykorzystaniem ciekłych kryształów,
- metoda z wykorzystaniem fluoroluminescencji.

Jedną z najczęściej stosowanych metod pomiaru temperatury jest szeroko rozpowszechniona metoda termografii podczerwieni. Z uwagi na budowę urządzenia termograficznego wyróżnić możemy:

- aparaty termograficzne,
- skanery termograficzne,
- kamery termograficzne.

Niewątpliwą zaletą tej metody jest mobilność urządzenia pomiarowego. Kamery termograficzne stosowali w swoich badaniach między innymi autorzy prac [29, 31,34].

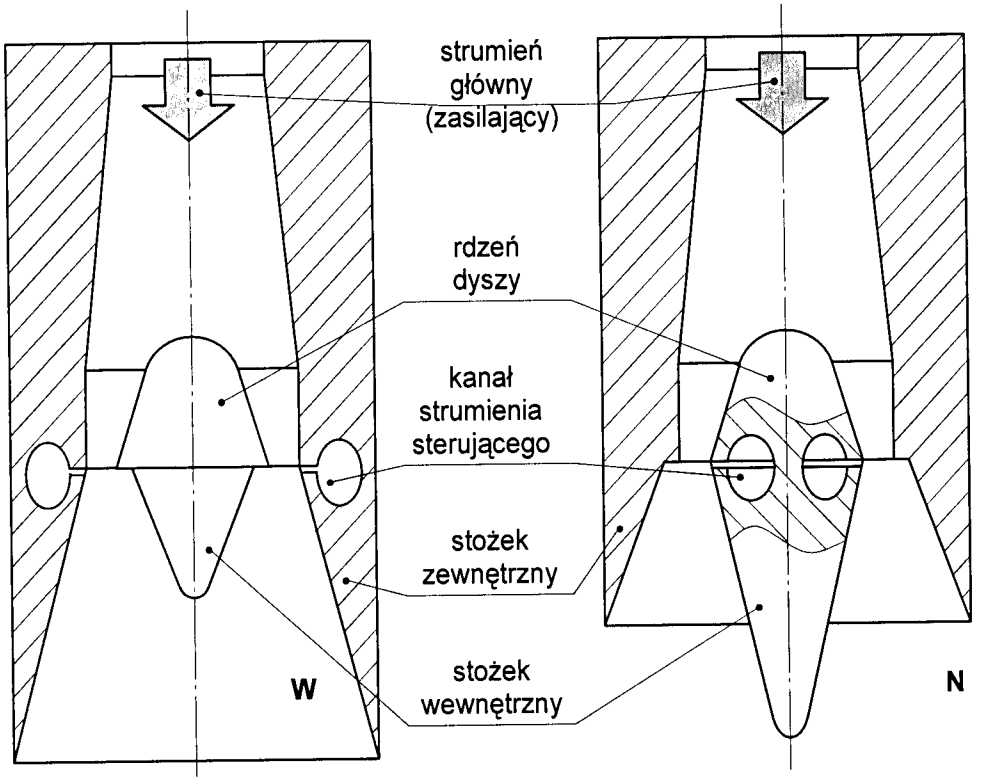
Termoelementy wykorzystywano w pracach [3, 88]. Metodę ciekłych kryształów stosowali autorzy w pracach [9, 22, 27, 87], a metoda z wykorzystaniem zjawiska fluoroluminescencji wykorzystywana była np. w pracy [64].

W niniejszej pracy autor będzie stosował skaner termograficzny, o rozdzielczości 240 x 240 pkt.

4 Konstrukcja dyszy osiowosymetrycznej

4.1 Model dyszy osiowosymetrycznej badanej w Katedrze Sterowania i Konstrukcji Wydziału Mechanicznego UTP w Bydgoszczy

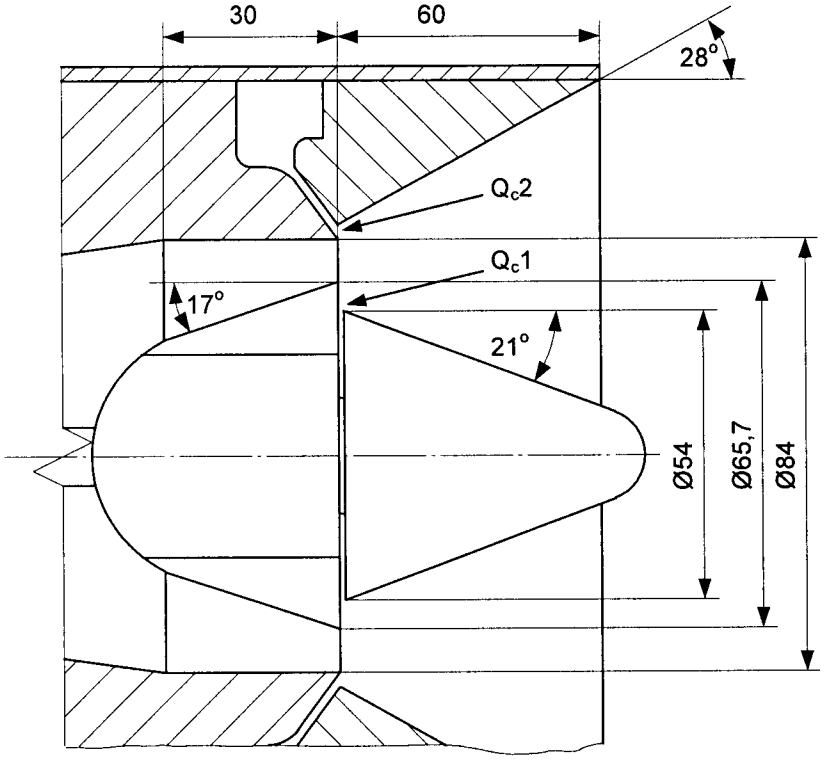
Pierwsze prace dotyczące omawianej dyszy osiowosymetrycznej prowadzone były przez V. Tesaŕa oraz K. Peszyńskiego [14, 43, 44, 45, 60, 61]. Powstały dwa modele monostabilnych dysz osiowosymetrycznych.



Rys. 4.1. Schemat dwóch monostabilnych dysz działających z wykorzystaniem efektu Coanda: W-dysza, w której w stanie stabilnym strumień przylega do stożka zewnętrznego, N-dysza, w której strumień przylega do stożka wewnętrznego [59].

Dyszę typu „W" z rysunku 4.1 badał pierwszy z autor w Republice Czeskiej, dyszę typu „N", badał drugi autor w Polsce. Charakterystyczną cechą dyszy typu „N" było przyleganie strumienia wyjściowego do stożka wewnętrznego. Strumień wyjściowy w stanie ustalonym koncentrował się na małym obszarze w pobliżu osi symetrii dyszy. Załączenie strumienia sterującego podawanego do wnętrza rdzenia powodowało zwiększenie się powierzchni pokrytej przez wypływające z dyszy powietrze, lecz jednocześnie zmniejszała się koncentracja strumienia na jednostkę powierzchni [44, 46, 60, 63]. Strumień sterujący doprowadzano do rdzenia poprzez

kanał (rurkę o przekroju kołowym) umieszczony w osi dyszy wewnątrz kanału zasilającego. Geometrię tej dyszy przedstawiono na rysunku 4.2.



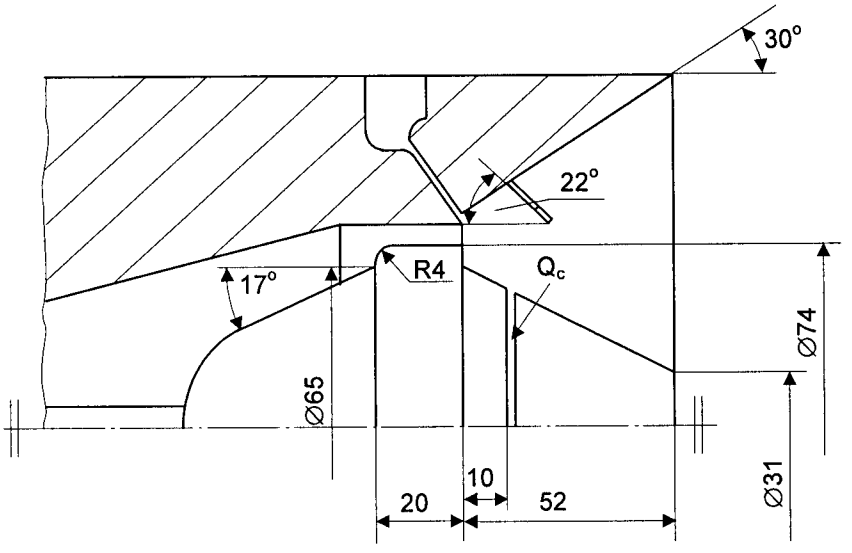
Rys. 4.2 Geometria dyszy osiowosymetrycznej [59].

Autor niniejszej pracy włączył się do badań w roku 2000. W okresie siedmiu lat prowadzone były zarówno badania doświadczalne rozkładu prędkości strumienia wyjściowego, jak również symulacje numeryczne w oparciu z zastosowaniem oprogramowania FLUENT. Badania koncentrowały się na dyszy typu „N".

W konfiguracji bistabilnej przesterowanie przepływu ze stanu ustalonego pierwszego (wypływ wzdłuż rdzenia – stożka wewnętrznego) do stanu drugiego (wypływ wzdłuż stożka zewnętrznego) wymagało zastosowania strumienia sterującego o wartości 10% natężenia przepływu strumienia głównego. W stanie ustalonym drugim strumień główny był mało stabilny. Do przesterowania strumienia ze stanu drugiego do pierwszego wystarczające było zakłócenie przepływu w obszarze wnętrza dyszy (w okolicy stożka zewnętrznego).

Prowadzono również badania z zastosowaniem strumieni syntetycznych i wymuszeń okresowych wprowadzanych do strumienia głównego [40, 41, 67, 69, 71, 72, 79]. Uzyskane sygnały pneumatyczne nie dostarczały jednak wystarczającej mocy, aby poprawnie sterować przełączaniem strumienia wyjściowego z dyszy.

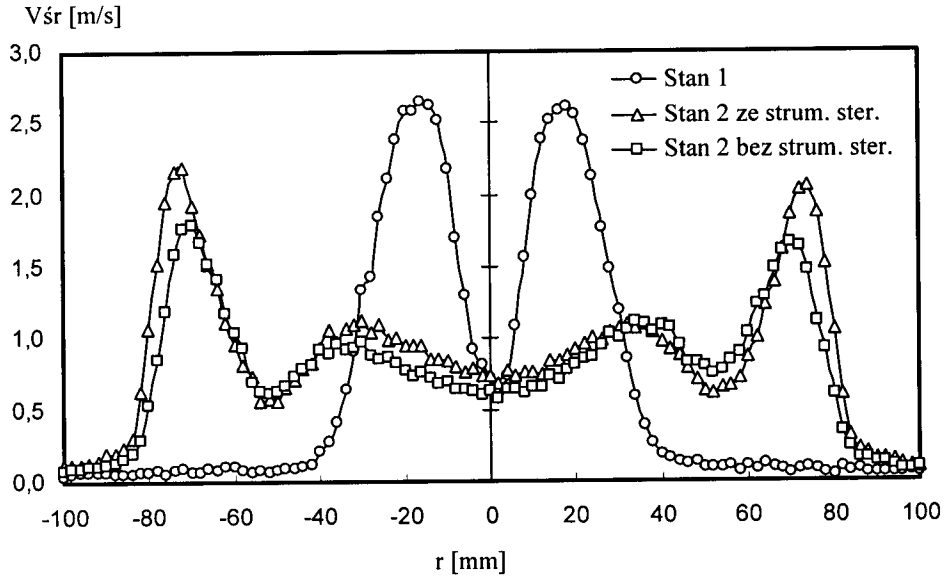
Ponieważ konfiguracja bistabilna wymagała rozbudowanego układu sterowania dwoma strumieniami sterującymi, wprowadzono zmiany konstrukcyjne w budowie rdzenia dyszy. Zastosowano dodatkowy pierścień w rdzeniu dyszy, zmniejszający pole przekroju przepływu strumienia i zwiększający współczynnik kontrakcji. W związku z tym, że w pewnych warunkach strumień wypływający z dyszy nie powracał do stanu ustalonego pierwszego (po odjęciu strumienia sterującego), wprowadzono do wnętrza dyszy spojler, mocowany do stożka zewnętrznego, którego zadaniem było zakłócanie przepływu w stanie ustalonym drugim. Takie rozwiązanie pozwoliło uzyskać monostabilny charakter pracy urządzenia [38]. Geometrię dyszy monostabilnej ze spojlerem przedstawiono na rysunku 4.3.



Rys. 4.3. Geometria dyszy po modyfikacji rdzenia.

Z uwagi na cel pracy przytoczę niektóre wyniki uzyskane we wstępnym etapie badań.

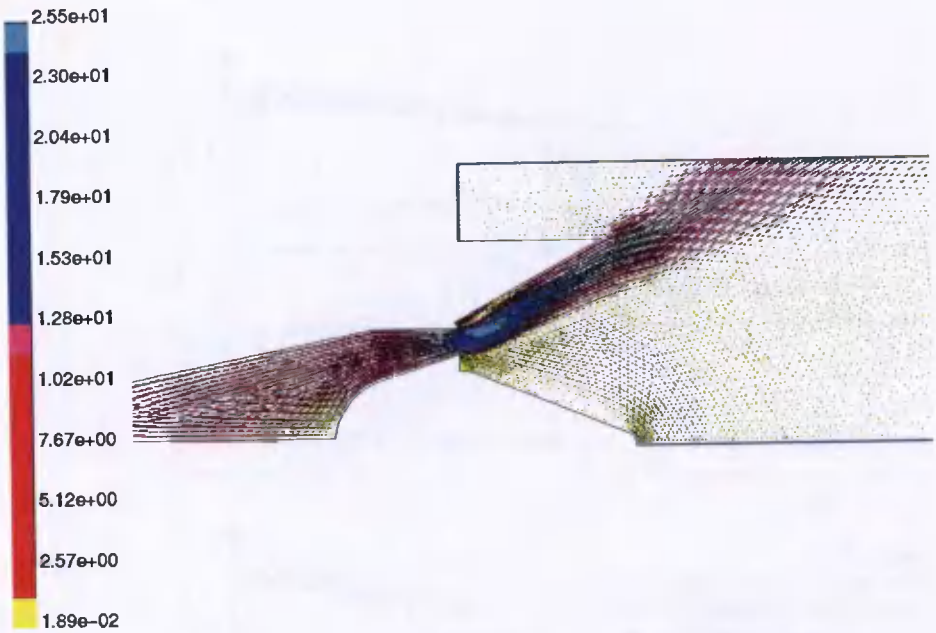
Na rysunku 4.4 przedstawiony jest rozkład prędkości powietrza wypływającego z dyszy, zmierzony w odległości 20 mm za dyszą. Widoczna jest symetria wypływu powietrza, zarówno w pierwszym jak i drugim stanie ustalonym.



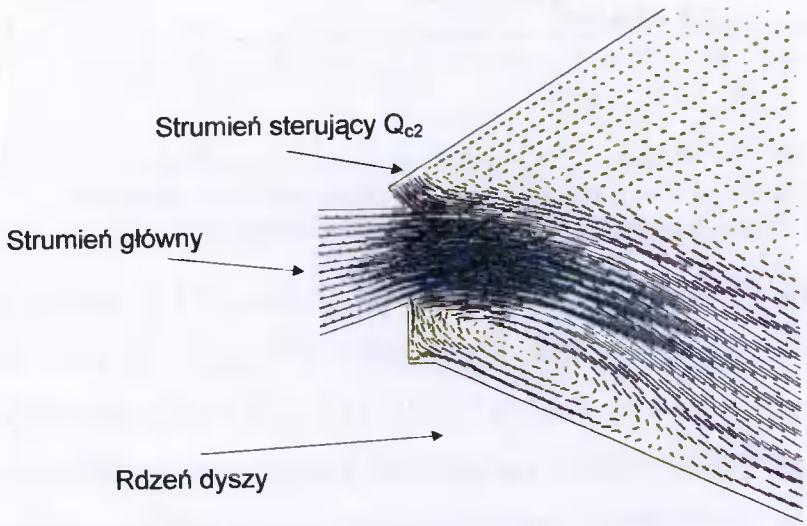
Rys. 4.4. Rozkład prędkości powietrza za dyszą w konfiguracji bistabilnej [36].

Widoczny wyraźny spadek prędkości w pobliżu osi dyszy, w stanie ustalonym pierwszym, wynika z rozdzielenia strumienia przez rdzeń dyszy. W miarę oddalania się od końca dyszy spada średnia wartość prędkości. Ponieważ w pewnej odległości za dyszą następuje ponowne złączenie się strumienia, spadek prędkości w okolicy osi symetrii nie jest już taki duży. Rozkład prędkości powietrza w stanie ustalonym drugim, zarówno dla wypływu bez strumienia sterującego jak i dla wypływu ze strumieniem sterującym jest podobny.

Doświadczalne badanie przedstawionej dyszy (rys. 4.2) uzupełnione było wizualizacją na drodze obliczeń numerycznych [90, 82]. Badania te przeprowadzono z uwagi na trudności z dokonaniem pomiarów doświadczalnych wewnątrz dyszy. Na rysunku 4.5 przedstawiona jest symulacja przepływu powietrza przez dyszę przedstawioną na rysunku 2.2. Celem symulacji była ocena charakteru przepływu powietrza w okolicy przewężenia dyszy. Dla stanu ustalonego pierwszego zaobserwowano tworzenie się wirów za uskokiem rdzenia wewnętrznego. To właśnie te zawirowania powodujące przyleganie strumienia do określonej powierzchni powodują powstanie efektu Coanda (rys. 4.6) [19, 73].



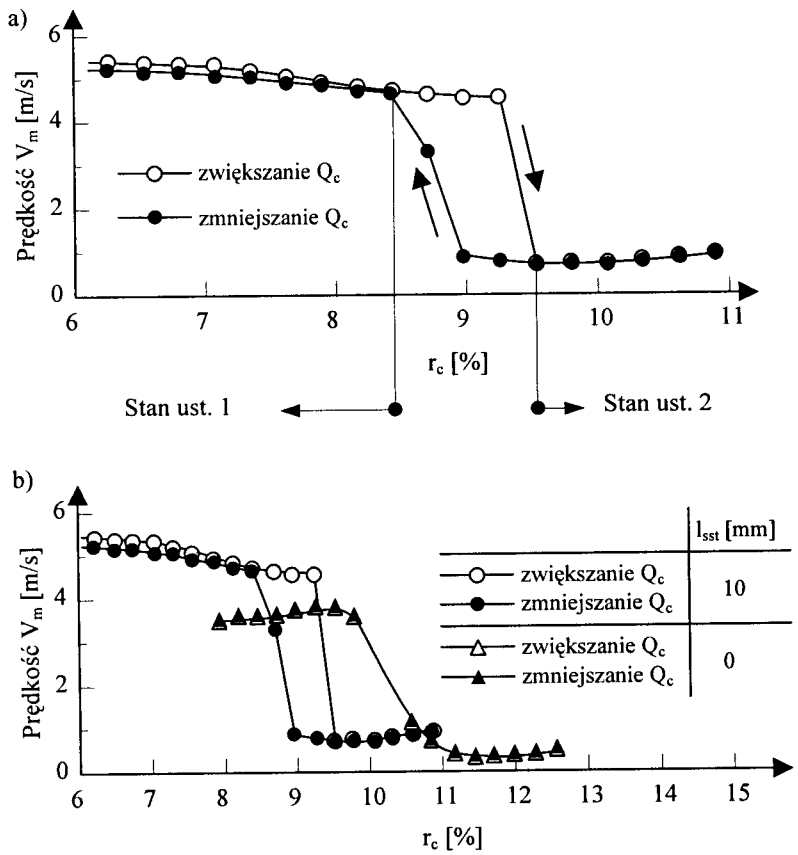
Rys. 4.5. Wizualizacja przepływu w obliczeniach numerycznych dla stanu ustalonego drugiego [36].



Rys. 4.6. Wizualizacja numeryczna przepływu w miejscu przewężenia dyszy.

Na rysunku 4.6 przedstawiono fragment dyszy w okolicy przewężenia, na którym widoczny jest przepływ powietrza z załączonym strumieniem sterującym Q_{c2}. Widoczne jest zawirowanie za uskokiem rdzenia dyszy, powodujące utrzymanie stanu ustalonego pierwszego po wyłączeniu strumienia sterującego Q_{c2}.

Przełączenie się strumienia głównego ze stanu ustalonego pierwszego do stanu drugiego wymaga podania sygnału sterującego. Na rysunku 4.7 pokazano wpływ natężenia strumienia sygnału sterującego Q_c na przełączenie położenia strumienia głównego [65].



Rys. 4.7. Przełączanie strumienia głównego w zależności od natężenia strumienia sterującego; a) charakterystyka przełączeniowa dyszy po modyfikacji rdzenia, b) porównanie charakterystyk dysz przed modyfikacją i po modyfikacji rdzenia.

Na rysunku 4.7 b) można zauważyć wyraźne różnice w wartościach prędkości strumienia głównego dla dyszy przed modyfikacją (rys. 4.2) i dla dyszy po modyfikacji rdzenia (rys. 4.3). Wyniki dla dyszy po modyfikacji rdzenia oznaczone są znacznikiem koła, wyniki dla dyszy przed modyfikacją oznaczone są trójkątami. W pomiarach tych sonda termoanemometru umieszczona była w odległości 40mm za dyszą i w odległości 15mm od osi symetrii dyszy.

Przeprowadzone badanie wpływu stosunku wartości natężenia przepływu strumienia sterującego do natężenia strumienia głównego $r_c = (Q_c / Q_m) \cdot 100\%$ na przesterowanie strumienia głównego wykazuje, że do jego przesterowania ze stanu ustalonego pierwszego do drugiego wystarcza strumień sterujący o wartościach od 7,5% do 10% wartości natężenia przepływu strumienia głównego. Wartość natężenia strumienia sterującego potrzebnego do przesterowania strumienia zależy od natężenia przepływu strumienia zasilającego. Dla dyszy po modyfikacji rdzenia

otrzymano wyższe wartości prędkości strumienia głównego w pierwszym stanie ustalonym oraz mniejszą wartość współczynnika r_c.

Zastosowanie omawianej dyszy (rys. 4.3) na stanowisku do badania intensywności wymiany ciepła wykazało konieczność jej dalszej modyfikacji [74, 76, 81]. Dysza ta nie spełniała następujących wymagań:

- uzyskiwano różny czas przełączania strumienia wyjściowego (niejednoznaczność),
- strumień wyjściowy w stanie drugim był niestabilny,
- powstawały duże zakłócenia przepływu w stanie ustalonym drugim (wewnątrz dyszy, wokół spojlera).

Ostateczne wymagania, a stąd założenia modyfikowanej dyszy, mającej zadanie elementu podającego ogrzewane powietrze, przedstawiono w p. 4.2.

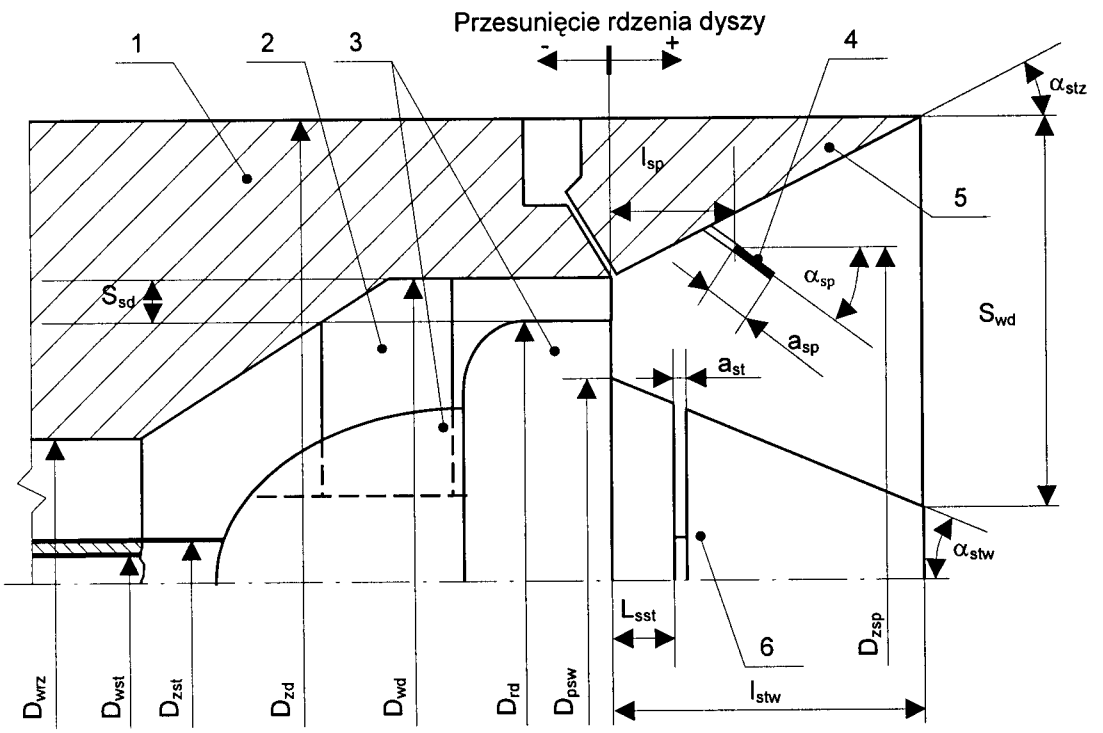
4.2 Założenia

Konstruowana dysza strumieniowa powinna z założenia charakteryzować się działaniem przekaźnikowym. Wynika z tego, że powinna charakteryzować się wyraźnie dwoma różnymi stanami wypływu strumienia głównego, z różną koncentracją strumienia wyjściowego. Oba stany wyjściowe powinny być stabilne. Z uwagi na sterowanie stanem ustalonym, najlepszym rozwiązaniem jest układ monostabilny. W takim układzie potrzebny jest tylko jeden strumień sterujący, który wymagany jest do utrzymania drugiego stanu ustalonego. Bez sygnału sterującego (przed włączeniem i po jego wyłączeniu) przepływ powinien mieć ten sam charakter. Dysza powinna charakteryzować się prostym układem sterowania, umożliwiającym szybką zmianę stanu ustalonego wypływu strumienia głównego.

Układ sterowania powinien umożliwiać zmiany i regulację następujących parametrów:

- natężenie przepływu strumienia głównego Q_m,
- natężenie przepływu strumienia sterującego Q_c,
- temperatura strumienia głównego T_m,
- częstotliwość załączania strumienia sterującego f_c,
- stopień wypełnienia sygnału sterującego PWM.

Zakres regulacji natężenia przepływu strumienia głównego powinien wahać się w zakresie $Q_m = 0 \div 0{,}0166\ m^3/s$, co przy zastosowanym rurociągu zasilającym pozwala uzyskać maksymalną średnią prędkość strumienia głównego (w rurociągu), wynoszącą $v = 10\,m/s$. Układ grzewczy winien zapewnić uzyskanie temperatury strumienia głównego w zakresie do $T_m = 30 \div 70\,°C$ z dokładnością do $0{,}1\,°C$ (ograniczenie wynika z zastosowanych materiałów). Układ sterowania częstotliwością załączenia i stopnia wypełnienia sygnału sterującego powinien umożliwiać regulację częstotliwości załączenia sygnału sterującego w zakresie $f_c = 0 \div 5\,Hz$ z dokładnością do $0{,}1\,Hz$. Regulacja stopnia wypełnienia sygnału *PWM* (Pulse Width Module) powinna umożliwiać regulację w zakresie od $PWM = 0\%$ - (brak sygnału sterującego) do $PWM = 100\%$ - (ciągły sygnał sterujący) z krokiem co 10%.



Rys. 4.8. Schemat geometrii dyszy z oznaczeniami głównych wymiarów; 1-obudowa dyszy, 2-żebro ustalające, 3-rdzeń dyszy, 4-spojler, 5-stożek zewnętrzny, 6-stożek wewnętrzny.

Na rysunku 4.8 pokazano geometrię dyszy, gdzie wyszczególnić można najbardziej istotne parametry geometryczne:

- D_{wd} – średnica wewnętrzna dyszy,

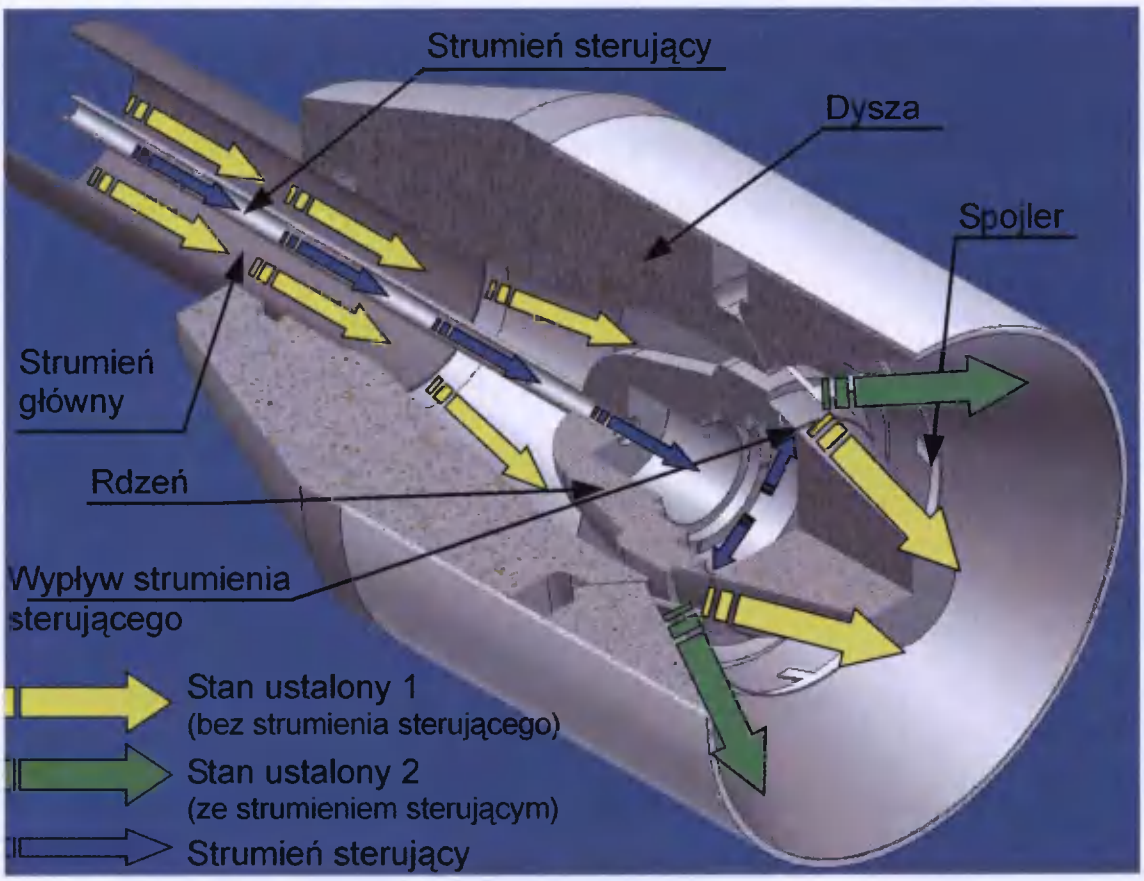
- D_{zd} – średnica zewnętrzna dyszy,
- D_{rd} – średnica rdzenia dyszy,
- l_{sst} – odległość wyjścia kanału sterującego od krawędzi rdzenia dyszy,
- a_{st} – szerokość szczeliny wylotowej strumienia sterującego,
- l_{sp} – odległość spojlera od krawędzi stożka zewnętrznego dyszy, (odległość ta zależy od długości nóżek spojlera),
- l_{stw} – długość stożka wewnętrznego,
- a_{sp} – szerokość płata spojlera,
- α_{sp} – kąt nachylenia płata spojlera do osi symetrii dyszy,
- α_{stw} – kąt nachylenia tworzącej stożka wewnętrznego,
- α_{stz} – kąt nachylenia tworzącej stożka zewnętrznego,
- przesunięcie rdzenia dyszy.

Dla takiego elementu osiowosymetrycznego sporym utrudnieniem jest modyfikacja tych parametrów geometrycznych, ponieważ wymaga ona wykonania nowych elementów dyszy. Jednym spośród wyżej wymienionych najistotniejszych parametrów geometrycznych, niewymagającym nowych elementów jest przesunięcie rdzenia dyszy. Oznaczone na rysunku przesunięcie +/- oznacza wsunięcie lub wysunięcie rdzenia względem obudowy dyszy. Przesunięcie mierzone jest od czoła rdzenia dyszy do końca obudowy dyszy (krawędź przy stożku zewnętrznym).

4.3 Model dyszy osiowosymetrycznej

Elementem generującym strumień powietrza o określonym jakościowym charakterze przepływu jest monostabilna dysza osiowosymetryczna z rdzeniem wewnętrznym, której ogólny schemat budowy i schemat przepływu powietrza przedstawiono na rysunku 4.9. Geometrię elementu strumieniowego przedstawiono wcześniej na rysunku 4.3.

Cechą charakterystyczną badanej dyszy - elementu strumieniowego - jest rdzeń wewnętrzny, do którego doprowadzany jest strumień sterujący wypływem głównego strumienia dyszy. Takie rozwiązanie konstrukcyjne pozwala sterować kierunkiem wypływu powietrza.



Rys. 4.9. Schemat działania dyszy osiowosymetrycznej.

W stanie ustalonym pierwszym (kolor żółty na rys. 4.9), bez strumienia sterującego, strumień główny wypływa z dyszy wzdłuż rdzenia wewnętrznego. Przyleganie strumienia wyjściowego do wewnętrznego stożka otrzymano wykorzystując efekt Coandy. Po załączeniu strumienia sterującego (kolor niebieski na rys 4.9), który doprowadzony jest do wnętrza rdzenia dyszy kanałem umieszczonym wewnątrz rurociągu zasilającego, strumień wyjściowy zaczyna wypływać („przełącza się") wzdłuż stożka zewnętrznego dyszy. Wypływ powietrza z dyszy w stanie ustalonym drugim oznaczony jest kolorem zielonym. Po wyłączeniu strumienia sterującego główny strumień wyjściowy powraca do stanu ustalonego pierwszego. Aby strumień główny mógł powrócić do stanu pierwszego w momencie wyłączenia strumienia sterującego, zastosowano spojler ułatwiający „oderwanie się" strumienia głównego od stożka zewnętrznego. Zastosowany spojler przyspiesza poprawną pracę układu, tzn. przełączanie się wypływu strumienia głównego ze stanu ustalonego drugiego do stanu ustalonego pierwszego [12].

5 Metodyka badania dyszy osiowosymetrycznej

5.1 Zasady planowania doświadczenia

W zakresie planowania doświadczeń niezbędne jest szczegółowe definiowanie stosowanych pojęć. Przede wszystkim należy wyróżnić i dokładnie określić niżej ogólnie podane zbiory:

- Zbiór wielkości wejściowych:

  X, {x1,x2,...,xi}, {xk : k= l, 2,..., i}, {xk}

  gdzie *i* jest liczbą wielkości wejściowych.

- Zbiór wielkości wyjściowych

  Z, {zl,z2,...,zw}, {zp : p= l,2,...,w}, {zp}

  gdzie *w* jest liczbą wielkości wyjściowych.

- Zbiór wielkości stałych

  C, {cl,c2,...,cs}

Przyjąć trzeba, że każda wielkość należąca do powyższych zbiorów to pewna wielkość fizyczna, chemiczna, techniczna itp., możliwa do określenia ilościowego (mierzalna), tzn. mogąca przybierać określone wartości wyrażone liczbą i jednostką miary.

Zakładając w dalszym ciągu, że wielkości charakteryzujące obiekt badań stanowią wielkości ilościowe, określić należy zbiory wartości wielkości wejściowych, które oznaczyć można w sposób przedstawiony poniżej:

$\{x_{1,1}, x_{1,2}, \ldots, x_{1,n1}\}$ lub $\{x_{1,m} : m=1,2,3, \ldots, n_1\}$

$\{x_{2,1}, x_{2,2}, \ldots, x_{2,n1}\}$ lub $\{x_{2,m} : m=1,2,3, \ldots, n_2\}$

$\{x_{3,1}, x_{3,2}, \ldots, x_{3,n1}\}$ lub $\{x_{3,m} : m=1,2,3, \ldots, n_3\}$

...

$\{x_{k,1}, x_{k,2}, \ldots, x_{k,n1}\}$ lub $\{x_{k,m} : m=1,2,3, \ldots, n_k\}$

$\{x_{i,1}, x_{i,2}, \ldots, x_{i,n1}\}$ lub $\{x_{i,m} : m=1,2,3, \ldots, n_i\}$

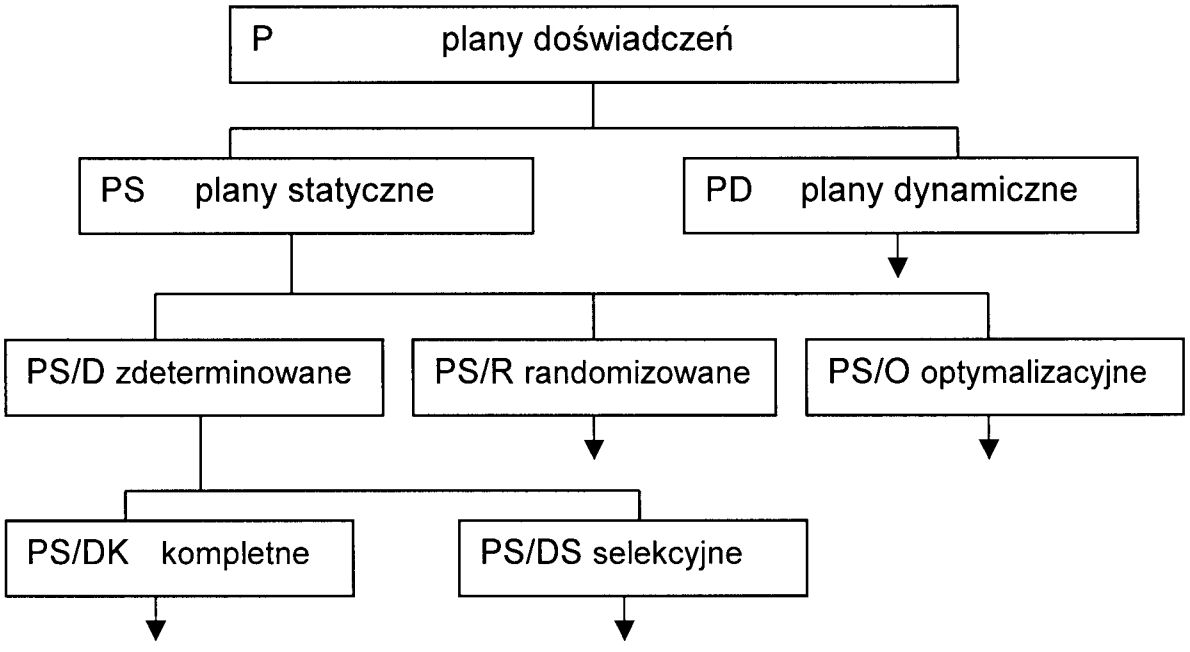
Wynika z powyższego, że każdej wielkości wejściowej odpowiada pewna określona liczba jej wartości: n_1, n_2, n_3 ..., n_k, ..., n_i. Wartości te należą do zakresu zmian określonego przedziałami domkniętymi, które opisać można jako: $[x_{1min}, x_{1max}]$, $[x_{2min}, x_{2max}]$, $[x_{kmin}, x_{kmax}]$, $[x_{imin}, x_{imax}]$.

Równocześnie można wprowadzić pojęcie największej liczby wartości wielkości wejściowych n_{max} oraz wyróżnić alternatywę:

- niejednakowych liczb wartości wielkości wejściowych, $n_k \neq const$,
- jednakowych liczb wartości wszystkich wielkości wejściowych, $n_k = const$.

Największa liczba wartości wielkości wejściowych n_{max}, zwłaszcza – w najczęściej występującym przypadku - jednakowych liczb tych wartości, stanowi istotny element charakterystyki planu doświadczenia. Liczby te należą oczywiście do liczb całkowitych dodatnich, przy czym praktycznie wykluczyć należy liczbę jeden (dla $n_k = 1$ niemożliwe jest utworzenie funkcji obiektu badań, gdyż uzyskuje się tylko jeden wynik pomiaru).

Wybór planu doświadczenia jest niezwykle istotny. Jak podaje autor pracy [50], klasyfikacji planów doświadczalnych dokonać można korzystając z systematyki modeli matematycznych obiektów badań. Klasyfikację planów doświadczeń przedstawiono na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Podstawowe grupy planów doświadczeń [50].

W przypadku planów zdeterminowanych PS/D i randomizowanych PS/R wszystkie układy wartości wielkości wejściowych, dla których mierzy się wartości wielkości wyjściowej, są ustalone przed rozpoczęciem badań doświadczalnych i w trakcie ich realizacji nie ulegają zmianie.

Plany optymalizacyjne PS/O są tworzone z reguły na zasadzie pewnej procedury iteracyjnej, polegającej na tym, że przed rozpoczęciem badań określa się: ograniczoną liczbę układów wartości wielkości wejściowych (układy centralne), algorytm (procedurę) analizy wyników pomiarów, umożliwiających sukcesywne określanie dalszych układów.

Oznacza to, że plan optymalizacyjny dzieli się na sekwencje:

- przyjęcie początkowych (centralnych) układów wielkości wejściowych,
- realizacja pomiarów i analiza wyników,
- przyjęcie nowych układów,
- pomiary i analiza wyników itd.

Uzyskiwane wyniki pomiarów stanowią więc podstawę do tworzenia nowych, zmieniających się układów planu doświadczenia.

Plany o ustalonych układach, zwłaszcza plany zdeterminowane PS/D, ułatwiają techniczno-organizacyjne przygotowanie badań.

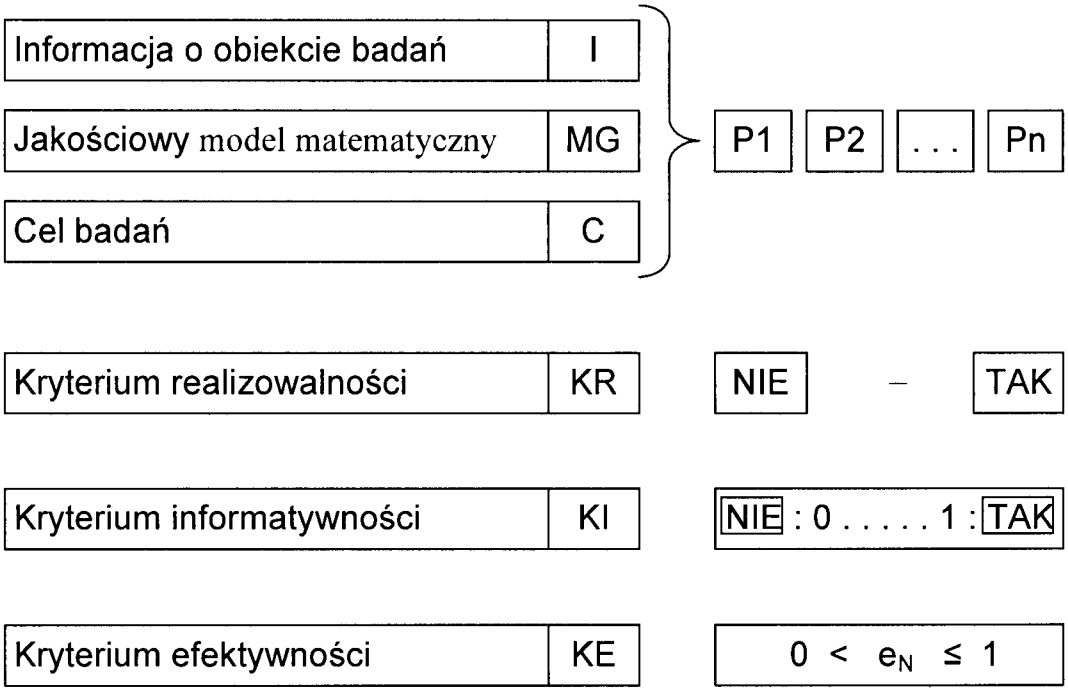
Podstawową cechą planów kompletnych PS/DK jest to, że liczba układów wartości wielkości wejściowych jest największą liczbą, jaka może być utworzona przy ustalonym zakresie zmienności i przyjętej dyskretyzacji tych wartości. Liczba ta jest zwykle bardzo duża, np. dla dziesięciu wielkości *(i = 10)* oraz dziesięciu wartości każdej z nich *(n_{max} = 10)* wynosi $n = 10^{10}$, dlatego też rozwój współczesnej teorii doświadczeń zmierza zdecydowanie do opracowania takich planów, które zachowując zdolność do utworzenia funkcji obiektu badań odznaczają się ograniczeniem do „rozsądnych" granic liczb układów wartości wielkości wejściowych, a tym samym liczb pomiarów wymaganych do realizacji planu.

Postulat ten spełnia szczególnie liczna grupa planów selekcyjnych. Podstawową cechą programów statycznych zdeterminowanych selekcyjnych PS/DS jest to, że liczba tworzących je układów wartości wielkości wejściowych została znacznie zmniejszona w stosunku do liczby układów planu kompletnego, przy zachowaniu możliwości określenia funkcji obiektu badań.

5.2 Kryteria wyboru planu doświadczenia

Autor [50] proponuje przyjmować trzy kryteria wyboru planu:

- kryterium realizowalności (KR),
- kryterium informatywności (KI),
- kryterium efektywności (KE).



Rys. 5.2. Schemat kryteriów wyboru planu doświadczenia [50].

Kryterium realizowalności (KR) to sprawdzenie, czy plan doświadczenia jest możliwy do zrealizowania w odniesieniu do rzeczywistego obiektu badań przy zastosowaniu określonych metod i środków pomiarowych, przy czym kryterium to oznacza, że:

- obiekt badań funkcjonuje prawidłowo w przyjętych układach (skojarzeniach) wartości wielkości wejściowych,
- wielkości wejściowe i wielkości stałe obiektu badań są mierzalne z dopuszczalną niedokładnością,
- wielkości wejściowe są sterowalne, tzn. wartości ich mogą być ustalone z niedokładnością mniejszą od zakresu zmian narzucanych przez plan doświadczenia.

Spełnienie kryterium realizowalności jest niezbędne, aby plan mógł być uwzględniany w dalszej analizie. Rezultat oceny planu na podstawie kryterium realizowal-

ności, przy uwzględnieniu wszelkich ewentualnych poprawek i modyfikacji obiektu badań, stanowi alternatywę TAK-NIE.

Kryterium informatywności (KI) to sprawdzenie, czy plan przyjęty do realizacji doświadczenia zapewnia uzyskanie informacji niezbędnej do spełnienia celu badań. Ponieważ różne są cele badań doświadczalnych, zatem różne mogą być sposoby oceny planów na podstawie kryterium informatywności.
Podstawowym, a zarazem najbardziej ogólnym kryterium informatywności jest sprawdzenie, czy plan doświadczenia umożliwia utworzenie modelu matematycznego obiektu badań. Odpowiedź może stanowić w tym przypadku alternatywę TAK-NIE, a wybór odpowiedzi jest decyzją arbitralną.

Kryterium efektywności (KE) to sprawdzenie, czy plan doświadczenia, możliwy do realizacji i zapewniający informatywność odpowiadającą celowi badań, jest jednocześnie planem minimalnym z punktu widzenia nakładów wymaganych do jego realizacji.

5.3 Etapy badań dyszy osiowosymetrycznej

Podstawowym celem przeprowadzanych badań będzie, zgodnie z tezą pracy, możliwość sterowania przepływem powietrza przez dyszę i określenie wpływu wybranych parametrów na rozkład temperatury i ilość ciepła przejmowanego przez ścianę od opływającego powietrza.

W tym celu określone zostały następujące niezależne zmienne wejściowe:

Q_m - natężenie objętościowe strumienia wyjściowego,

l_w - odległość ściany od końca dyszy (rdzenia wewnętrznego),

f_c - częstotliwość przełączania strumienia sterującego,

PWM - stopień wypełnienia sygnału sterującego,

t - czas trwania procesu ogrzewania ściany.

Wielkością wyjściową jest temperatura ściany oporowej:

$T_{(r)}$ - wartość temperatury ściany w funkcji promienia.

Pierwszy etap badań

Pierwszym etapem badań będą obliczenia numeryczne przepływu powietrza przez dyszę. Badania te pozwolą wstępnie określić możliwość zmiany geometrii

dyszy. Badania te przeprowadzone będą w celu zminimalizowania kosztów, jakie należałoby ponieść na wykonanie serii elementów do badań doświadczalnych. Obliczenia numeryczne pozwolą zaobserwować przepływ powietrza wewnątrz dyszy w okolicy spojlera, gdzie przeprowadzenie badań doświadczalnych (pomiarów prędkości i wizualizacji) jest bardzo trudne.

Drugi etap badań

Drugi etap badań obejmie wizualizację przepływu powietrza wypływającego z dyszy. Celem tych badań będzie określenie jakościowego charakteru opływu płaskiej ściany oporowej. Z uwagi na to, że opływ ściany zależy od stanu ustalonego wypływu powietrza z dyszy oraz odległości ściany od dyszy, badania te mają na celu określenie zakresu zmian niezależnej wielkości wejściowej I_w. Na podstawie tych badań będzie można określić zakres zmian wielkości I_w, dla którego można zaobserwować poprawną pracę urządzenia, tzn. przełączanie się strumienia wyjściowego ze stanu pierwszego do stanu drugiego oraz ze stanu drugiego do stanu pierwszego. Oprócz tego badania wizualizacyjne powinny pozwolić określić maksymalną wartość częstotliwości pulsacji strumienia f_c oraz minimalną i maksymalną wartość stopnia wypełnienia sygnału sterującego PWM.

Trzeci etap badań

Ten etap badań dotyczyć będzie wyznaczenia profilów prędkości strumienia w stanie ustalonym pierwszym i drugim w określonym obszarze badanej ściany w funkcji promienia dyszy dla wyznaczonego podczas wizualizacji zakresu odległości ściany od dyszy. Ze względów technicznych jako minimalną wartość odległości sondy termoanemometrycznej przyjęto $l_s = 0{,}005\,m$. Celem badań będzie wyznaczenie profilów prędkości powietrza opływającego ścianę w szczególnie istotnym obszarze zmian kierunku opływu badanej ściany w zależności od stanu ustalonego wypływu powietrza z dyszy. Badania te przeprowadzone będą w celu zweryfikowania wyników uzyskanych podczas obliczeń numerycznych.

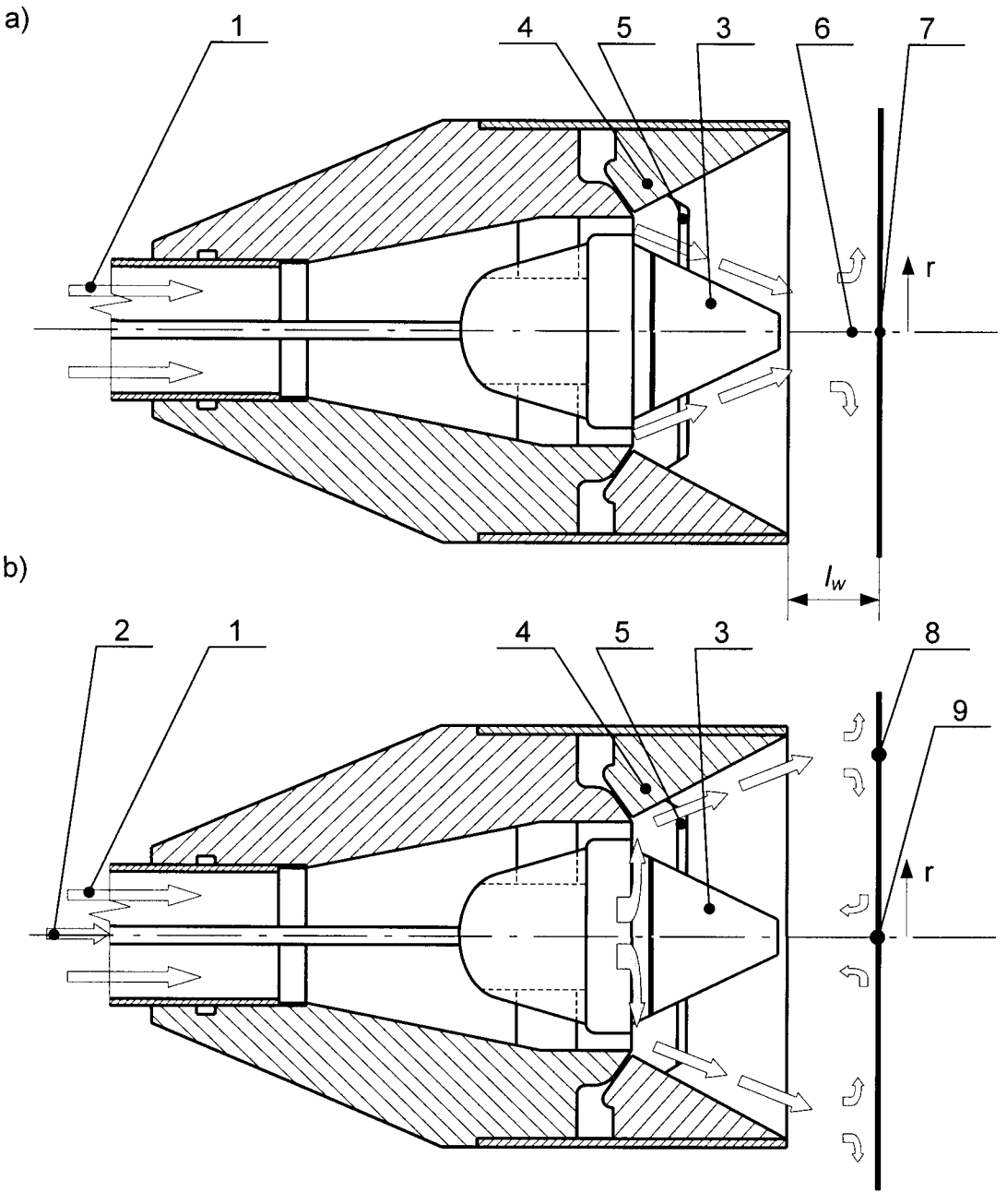
Czwarty etap badań

Czwarty, a zarazem najistotniejszy dla tezy pracy etap badań to badania termograficzne. Badania termograficzne obejmować będą pomiar temperatury obszaru ściany o wymiarach $A \times B$, gdzie zarówno wymiar A jak i B przyjęto jako wartość

stałą $A = B = 3D_{zd} = 450\ \text{mm}$. Pomiary temperatury prowadzone będą w trybie ciągłym podczas procesu ogrzewania ściany. Z uwagi na dynamiczny charakter opływu ściany i potrzebę wyznaczenia przyrostu temperatury w czasie trwania procesu układ ogrzewania powietrza załączany będzie po rozpoczęciu procesu rejestracji temperatury. Podczas tych badań istotnym elementem będzie także temperatura strumienia zasilającego, która będzie także rejestrowana.

6 Badanie numeryczne przepływu strumienia głównego

6.1 Model fizyczny opływu płaskiej ściany



Rys. 6.1. Model opływu ściany: a) stan ustalony pierwszy, b) stan ustalony drugi; 1-strumień zasilający, 2-strumień sterujący, 3-rdzeń wewnętrzny dyszy, 4-stożek zewnętrzny dyszy, 5-spojler, 6-punkt złączenia się strumienia, 7-punkt stagnacji, 8-okrąg stagnacji, 9-punkt stagnacji strumienia zwrotnego.

6.2 Model numeryczny

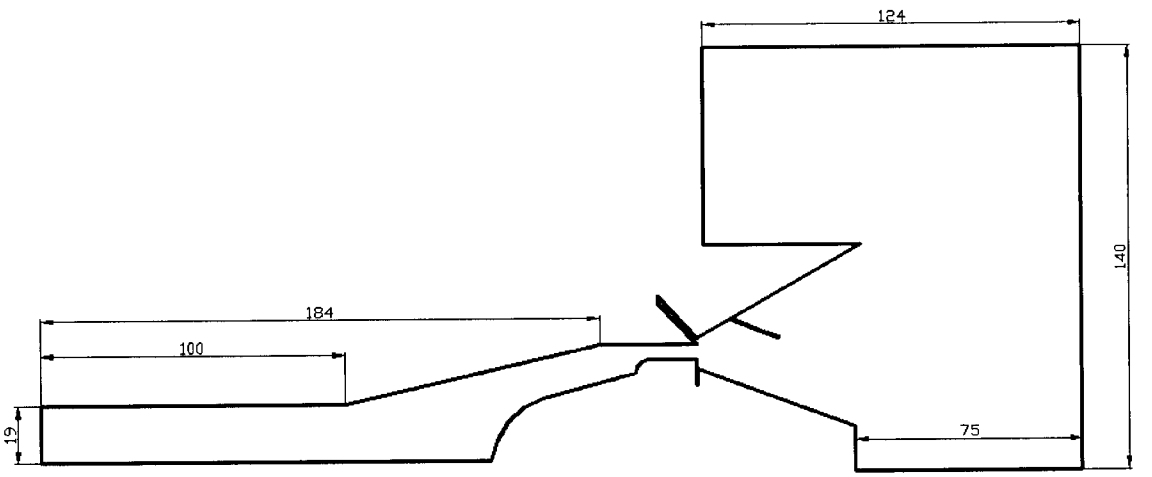
Numeryczne modelowanie zjawisk przepływu powietrza przez dyszę i opływu płaskiej ściany oporowej umieszczonej prostopadle za dyszą przeprowadzono wykorzystując środowisko obliczeniowe FLUENT. Oprogramowania tego typu używają badacze do symulacji zjawisk przepływowych [16, 53].

Podczas budowy modelu geometrycznego dokonano uproszczeń w części zasilającej dyszę. Uproszczenia te to pominięcie prostownicy strumienia umieszczonej w kanale zasilającym oraz mocowania rurki będącej kanałem strumienia sterującego. Korzystając z dwuwymiarowego rysunku konstrukcyjnego dyszy przygotowano model geometrii dyszy w skali 1:1. Do budowy modelu wykorzystano program GAMBIT 2.0.

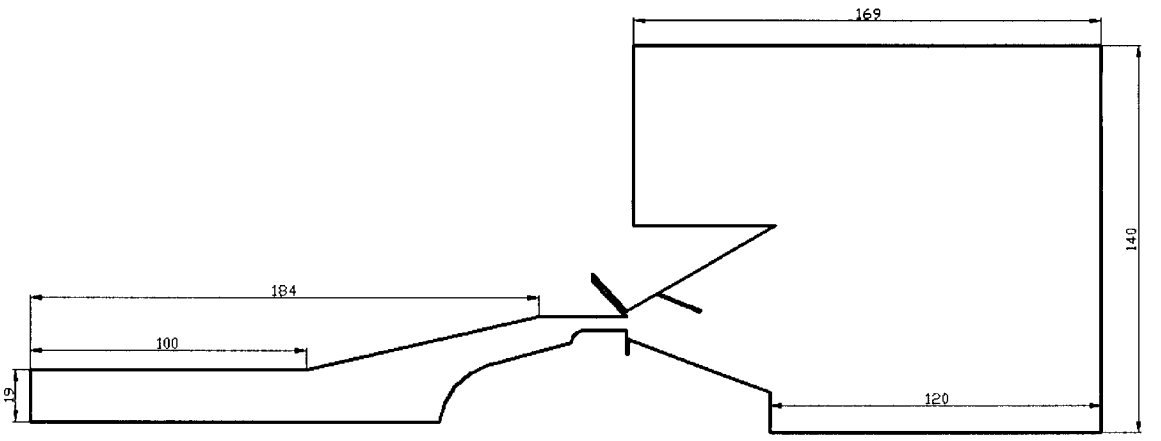
Przygotowane modele podzielić można na dwie zasadnicze grupy:

- model do symulacji przepływu bez ściany oporowej,
- model do symulacji przepływu ze ścianą oporową.

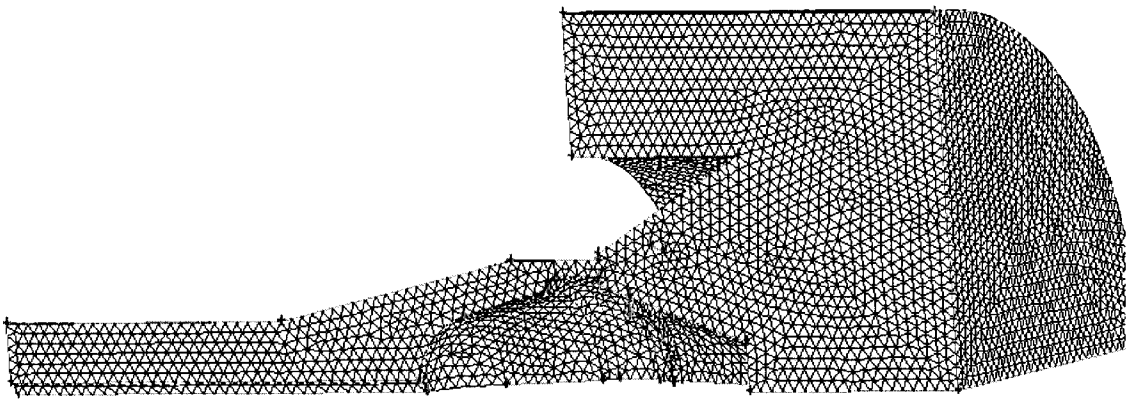
Do badania przepływu w pierwszym i drugim stanie ustalonym stosowany będzie ten sam model. Różnicę stanowić będzie ustalenie innych warunków brzegowych strumienia sterującego (jako załączonego lub wyłączonego).



Rys. 6.2. Wymiary obszaru modelowania przepływu przed i za dyszą dla modelu do symulacji przepływu ze ścianą oporową.



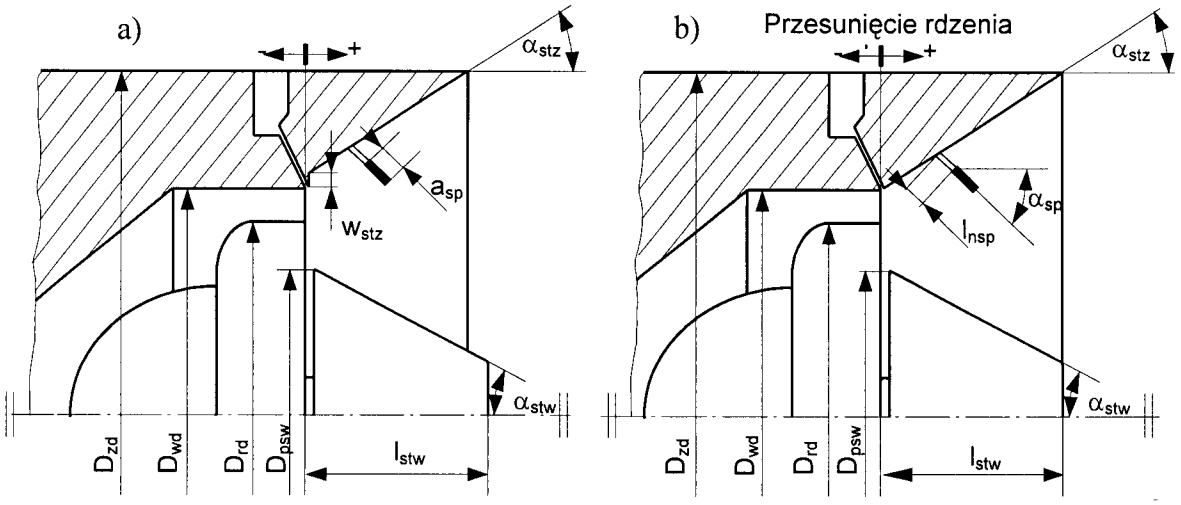
Rys. 6.3. Wymiary obszaru modelowania przepływu przed i za dyszą dla modelu do symulacji wypływu swobodnego z dyszy.



Rys. 6.4. Widok modelu wraz z siatką elementów skończonych. Model wygenerowano w programie GAMBIT. [77]

Analizę numeryczną przeprowadzono w celu określenia wpływu nóżek spojlera (ich długości - l_{nsp}) na opływ płata spojlera. Symulacje numeryczne ułatwiają badanie obiektów tam, gdzie utrudnione jest przeprowadzenie badań doświadczalnych. W celu przyspieszenia i uproszczenia badań przepływu powietrza wewnątrz dyszy zdecydowałem się na przeprowadzenie obliczeń numerycznych. Z uwagi na zamocowany spojler i jednoosiowy termoanemometryczny system pomiaru prędkości badania wewnątrz dyszy są w znacznym stopniu utrudnione.

Część symulacji numerycznych dla dyszy przedstawionej na rysunku 6.5.a była już prezentowana w pracy [77]. W pracy tej modyfikacji podlegała jedynie długość nóżek spojlera l_{nsp}.



Rys.6.5. Schemat dyszy wraz z oznaczeniami głównych parametrów; wartości wybranych parametrów zmieniano w symulacji numerycznej; a) element z widocznym odsadzeniem na stożku zewnętrznym, b) dysza bez odsadzenia na stożku zewnętrznym

W dalszych obliczeniach modyfikacjom poddano także stożek zewnętrzny dyszy. Parametry i zakres zmian ich wartości były następujące:

- kąt stożka zewnętrznego α_{stz}, równy kolejno $29,30,31 i 32°$,
- odskok na początku stożka w_{stz}, o wartościach $0,1,2,3,4 i 5\,mm$,
- długość nóżki spojlera l_{nsp}, o wartościach $8,9,10,11 i 12\,mm$.

Analizę numeryczną przeprowadzono dla przepływu ustalonego w stanie pierwszym i drugim, dla następujących zmiennych wejściowych:

- $l_w = 75\,mm$ oraz wypływu swobodnego bez ściany
- $\mathrm{Re} = 2500$,
- $Q_c = 0{,}00008564\,m^3/s \Rightarrow V_c = 8\,m/s$.

Jeżeli przyjmie się oznaczenie istnienia sygnału sterującego (wypływ w stanie ustalonym drugim) jako $Q_{c(1)}$ – dla załączonego strumienia i $Q_{c(0)}$ – dla wyłączonego strumienia, liczbę wartości parametrów stożka zewnętrznego $n_{wstz} = 6$, $n_{\alpha stz} = 4$ i liczbę długości nóżek spojlera, otrzyma się całkowitą liczbę symulacji, które należy przeprowadzić. Liczba ta wynosi:

$$n_{sym} = n_{\alpha stz} \cdot n_{wstz} \cdot n_{lnsp} \cdot n_{lw} \cdot n_{Q_c} = 4 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 2 = 480 \qquad (6.1)$$

Do obliczeń numerycznych przyjęto model wykonany w preprocesorze GAMBIT, charakteryzujący się siatką elementów skończonych o kształcie tetragonalnym. Dokonano podziału siatką strukturalną ustalając rozmiar elementów

o wartości 4. Przy takim podziale dla układu ze ścianą w odległości $l_w = 75mm$ otrzymano 496578 elementów skończonych, 1017725 elementarnych powierzchni trójkątnych i 94311 węzłów. Dla modelu do symulacji przepływu w stanie swobodnym (rys. 6.3) otrzymano 31273 elementy skończone, 639653 elementarne powierzchnie trójkątne i 59339 węzłów. Dla przepływu swobodnego długość obszaru w otoczeniu wylotu dyszy wynosiła 120 mm. W zależności od zmiany kąta stożka zewnętrznego α_{stz} ilości te nieznacznie się zmieniały.

Do zamodelowania przepływu turbulentnego wykorzystano model $k\varepsilon$.

Jednym z celów badań numerycznych jest określenie wpływu długości nóżek spojlera na przepływ powietrza w dyszy. Z długości nóżek spojlera wynika odległość l_{sp} spojlera od końca obudowy. Zaobserwowane we wcześniejszych badaniach zakłócenia przepływu wywołane przez nóżki spojlera wpływają na proces przejmowania ciepła przez ścianę [68, 76]. Głównej ocenie podlegać będzie przepływ powietrza przez dyszę w drugim stanie ustalonym. Po wstępnej symulacji, której wynik przedstawiono na rysunku 6.5, do dalszych symulacji przyjęto liczbę nóżek spojlera 4.

Badania te obejmują zmiany długości nóżek spojlera i ich ilość, przy stałej prędkości strumienia zasilającego i sterującego. Oprócz tego przeanalizowana zostanie możliwość zmiany kąta tworzącej stożka zewnętrznego.

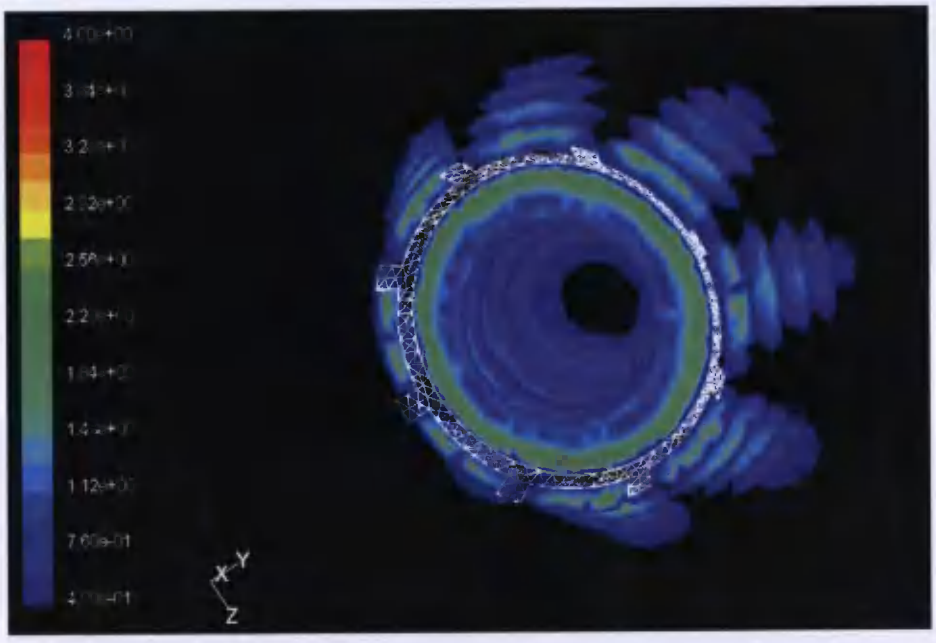
Tabela 6.1 Oznaczenia układów do analizy opływu spojlera.

		Długość nogi spojlera					
		8	9	10	11	12	13
Kąt nachylenia tworzącej stożka zewnętrznego	30	Dspn08a30	Dspn09a30	Dspn10a30	Dspn11a30	Dspn12a30	Dspn13a30
	31	Dspn08a31	Dspn09a31	Dspn10a31	Dspn11a31	Dspn12a31	Dspn13a31
	32	Dspn08a32	Dspn09a32	Dspn10a32	Dspn11a32	Dspn12a32	Dspn13a32
	33	Dspn08a33	Dspn09a33	Dspn10a33	Dspn11a33	Dspn12a33	Dspn13a33
	34	Dspn08a34	Dspn09a34	Dspn10a34	Dspn11a34	Dspn12a34	Dspn13a34

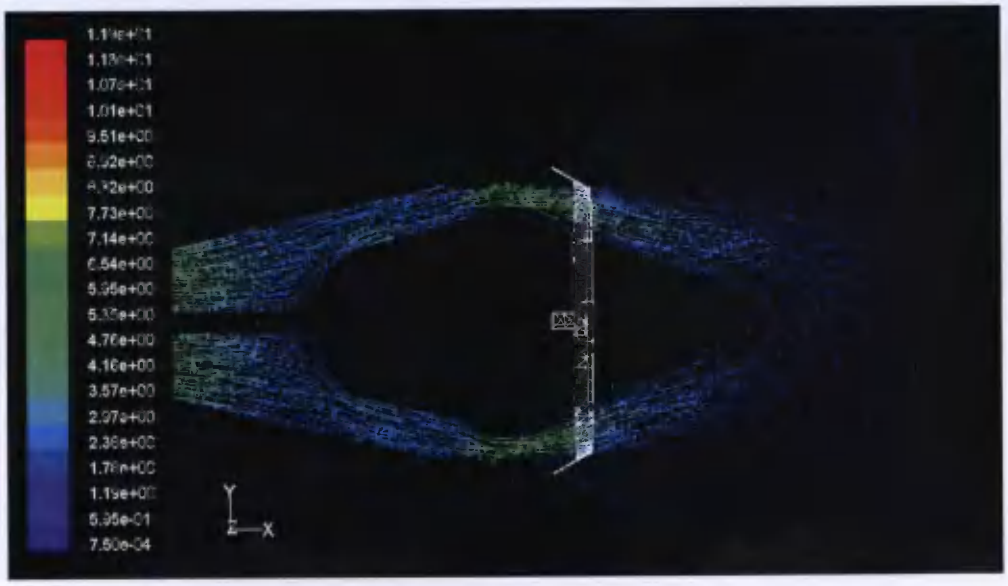
Dodatkowym oznaczeniem będzie oznaczenie załączonego lub wyłączonego strumienia sterującego. Strumień sterujący załączony oznaczony będzie jako Qc(1), strumień sterujący wyłączony jako Qc(0).

6.3 Wyniki obliczeń numerycznych

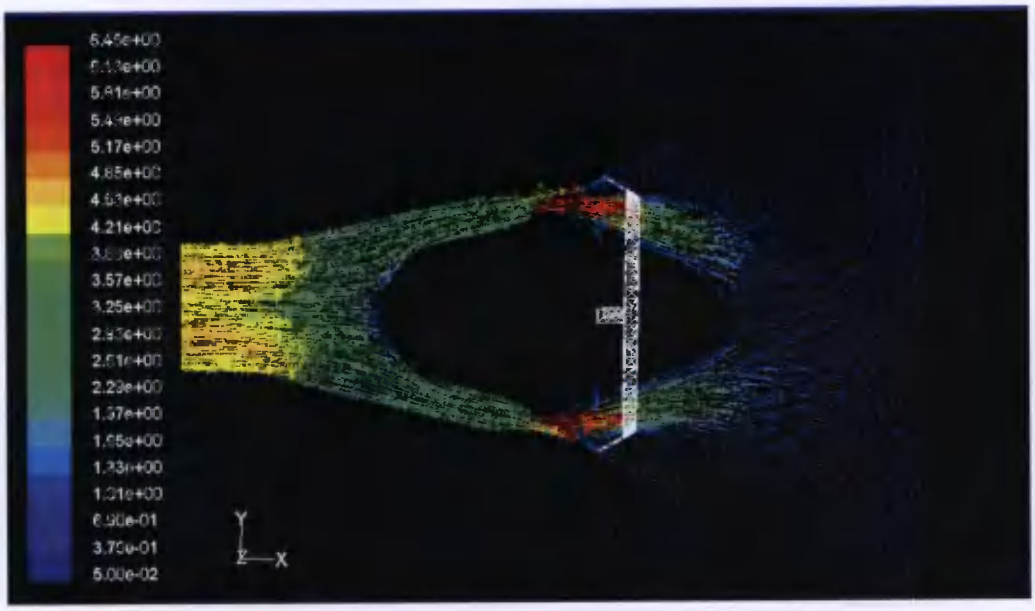
Poniżej są zaprezentowane wybrane wyniki obliczeń numerycznych. Wartości prędkości i kierunek przepływu przedstawione będą w postaci wektorowej. Kolory na skali prędkości przepływu odpowiadają przedstawionym obok zakresom prędkości.



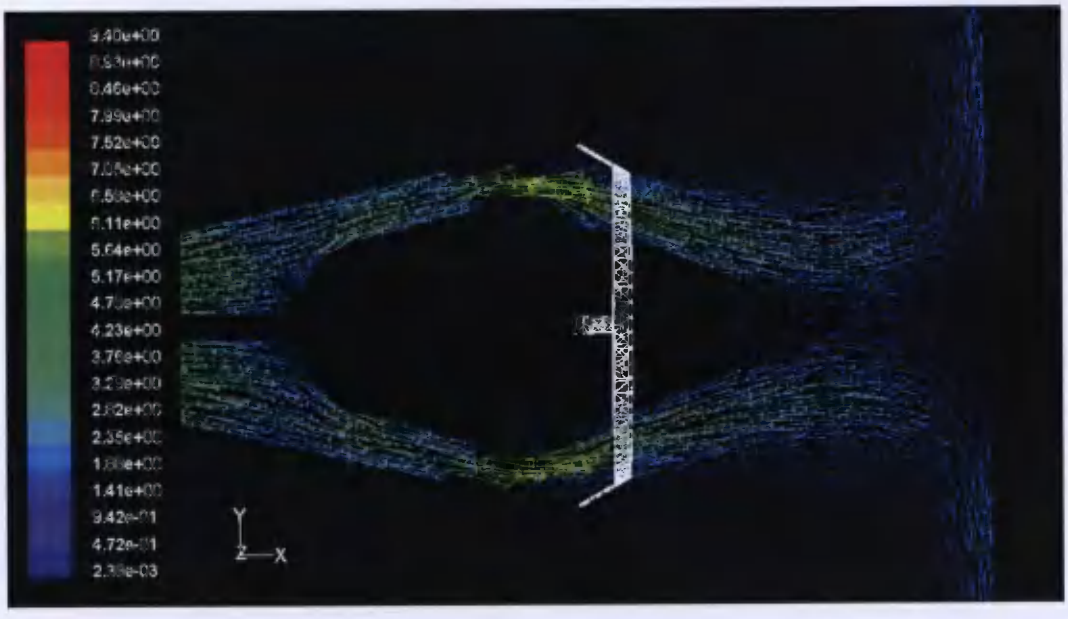
Rys.6.6. Konturowe zestawienie prędkości strumienia za spojlerem dla spojlera z ośmioma nożkami [77].



Rys.6.7. Wynik symulacji dla modelu Dspn08a30Qc(0).

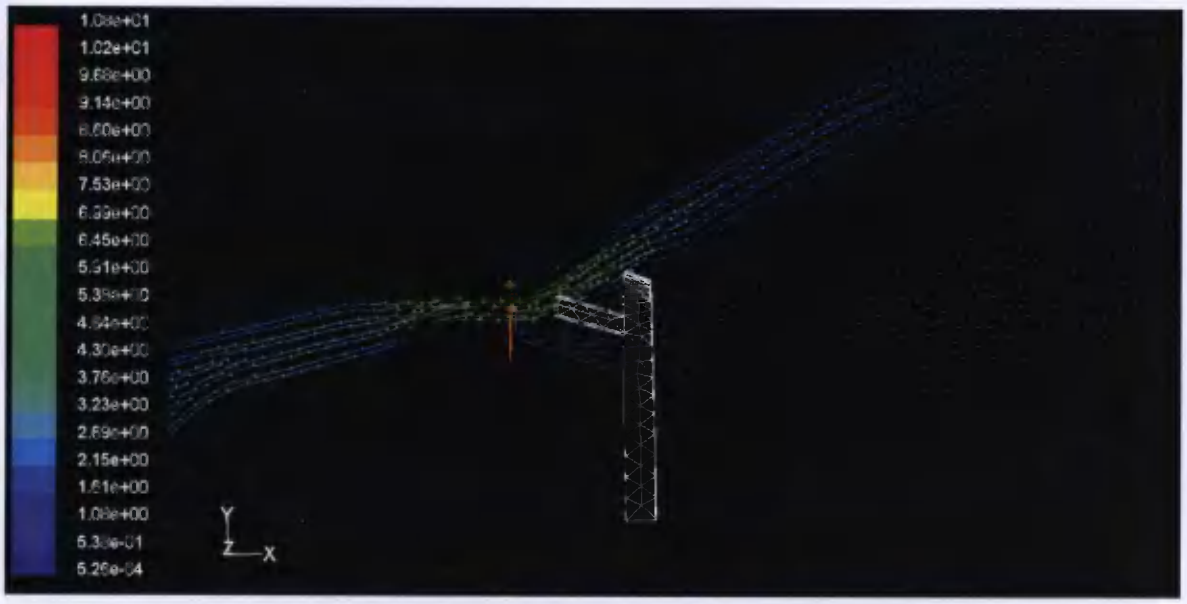


Rys.6.8. Wynik symulacji dla modelu Dspn10a30Qc(0).

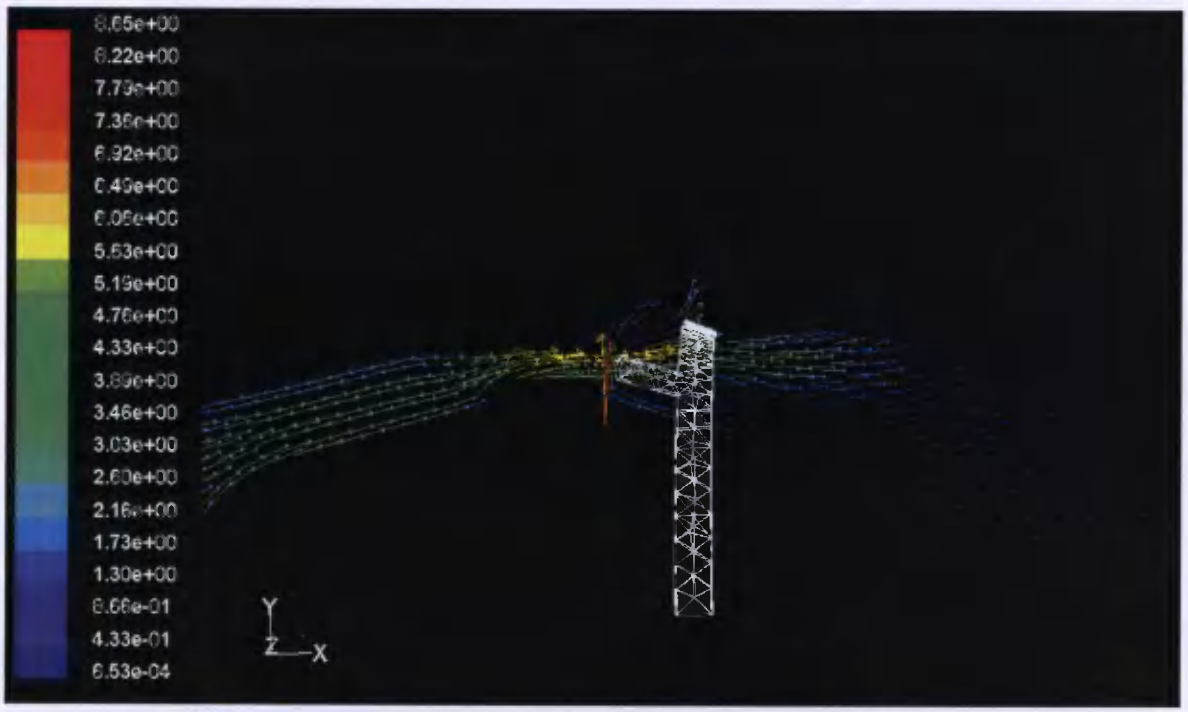


Rys.6.9. Wynik symulacji dla modelu Dspn11a30Qc(0).

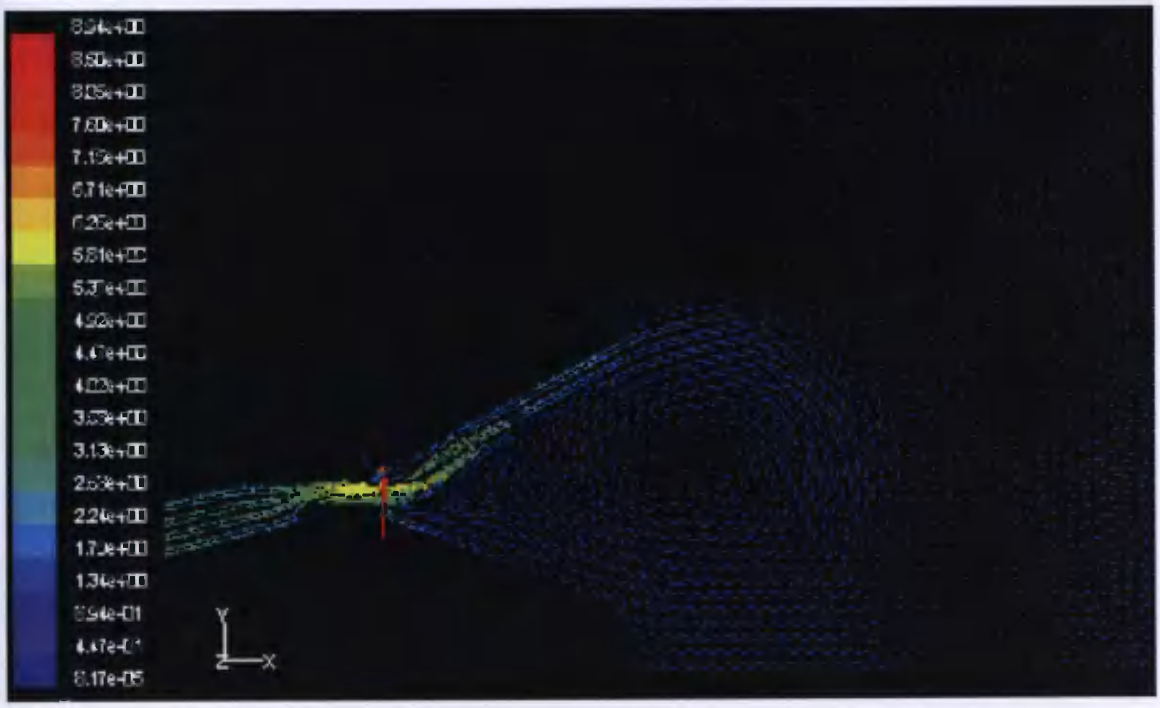
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
BIBLIOTEKA GŁÓWNA



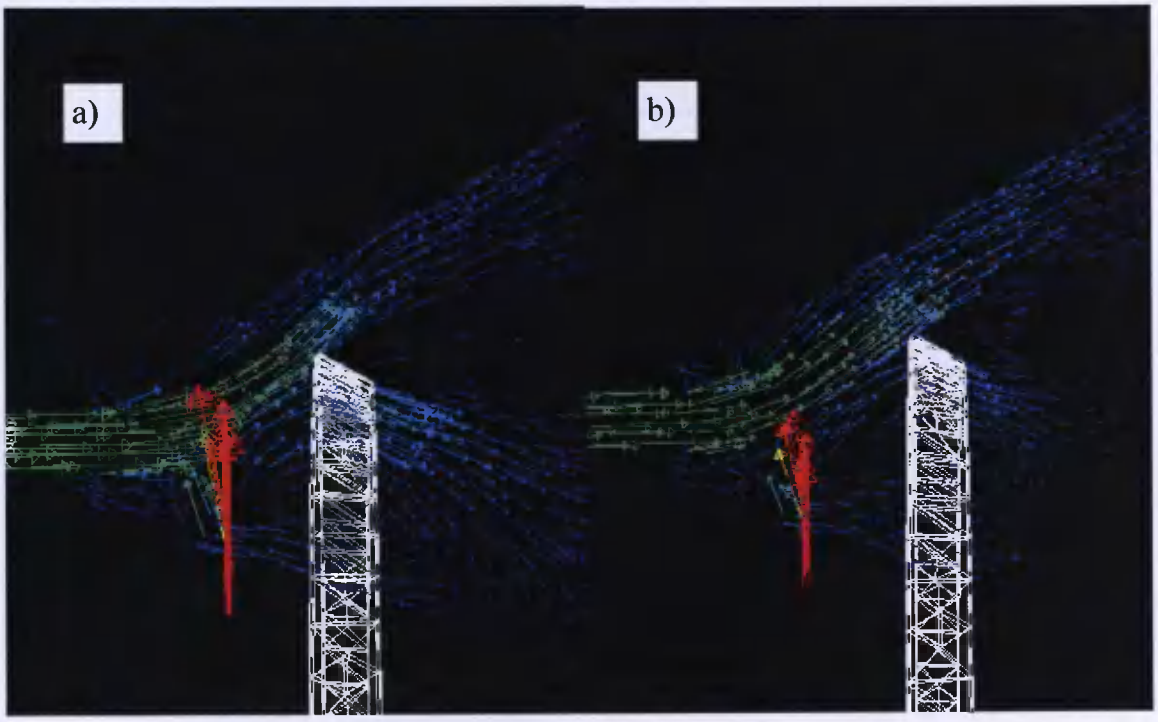
Rys.6.10. Wynik symulacji dla modelu Dspn12a30Qc(1).



Rys.6.11. Wynik symulacji dla modelu z odsadzeniem stożka zewnętrznego $w_{stz} = 2$ z załączonym strumieniem sterującym Qc(1).



Rys.6.12. Wynik symulacji dla modelu a29w01spE z załączonym strumieniem sterującym Qc(1) – wypływ swobodny bez ściany oporowej.



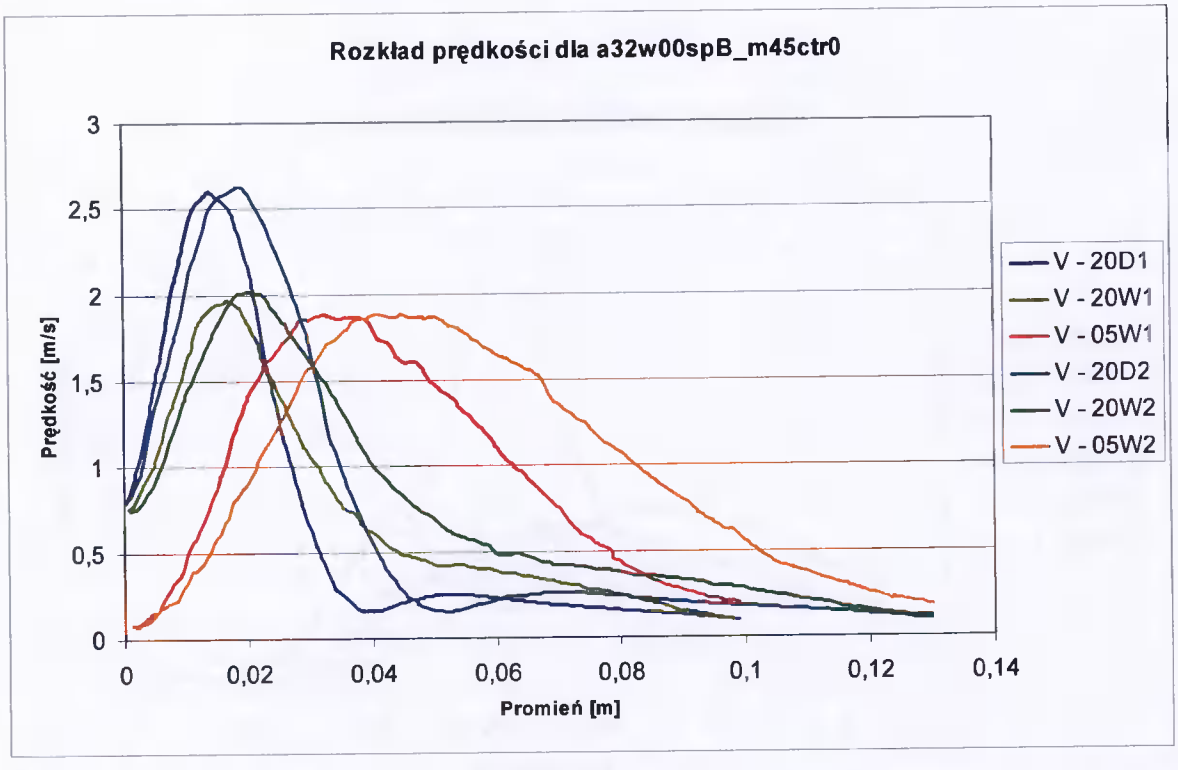
Rys. 6.13. Porównanie przepływu powietrza pod spojlerem w stanie ustalonym drugim; a) długość nóżki 8mm, b) długość nóżki 11mm.

Oprócz zmiany długości nóżki spojlera dokonano symulacji numerycznej dla zmiany kąta pochylenia tworzącej stożka zewnętrznego.

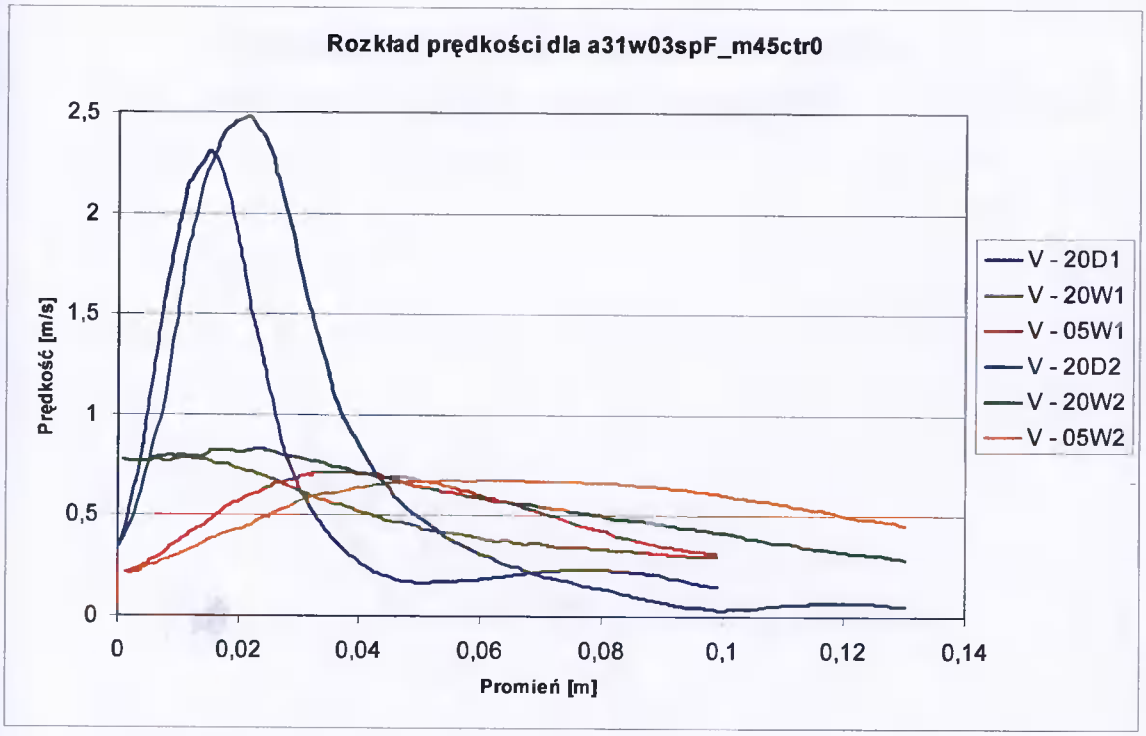
Poniżej podaję serię wyników przedstawiających wykresy prędkości powietrza wypływającego z dyszy w stanie ustalonym pierwszym i drugim dla

wybranych modeli. Dla wyników numerycznej symulacji przepływu prędkość powietrza odczytana była w dwóch płaszczyznach. Pierwszą grupę stanowią pomiary w płaszczyźnie nóżki spojlera. Druga grupa to pomiary w płaszczyźnie pomiędzy nóżkami spojlera. Odczytu prędkości dokonano 20 mm za końcem dyszy, 20 mm przed ścianą oporową i 5 mm przed ścianą oporową.

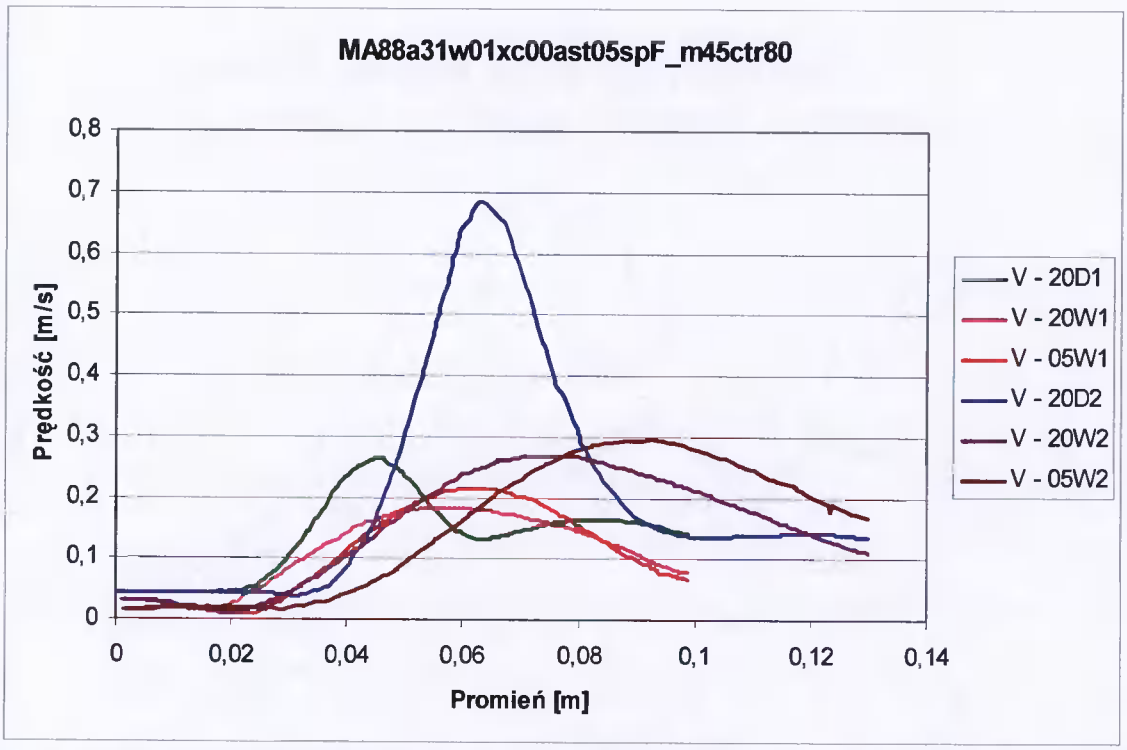
Na poniższych rysunkach zastosowano następujące oznaczenia: 20D1 – pomiar prędkości 20 mm za dyszą w płaszczyźnie nóżki spojlera, 20W1 – pomiar 20 mm przed ścianą w płaszczyźnie nóżki spojlera, 05W1 – pomiar 5 mm przed ścianą w płaszczyźnie nóżki spojlera. Dla grupy drugiej pomiarów, w płaszczyźnie pomiędzy nóżkami spojlera oznaczenia mają cyfrę 2 na końcu (20D2, 20W2, 5W2). Oprócz tego oznaczenia wykresów zawierają wartość kąta stożka zewnętrznego, np. $a32 \Rightarrow \alpha_{stz} = 32^{\circ}$, wielkość odsadzenia na stożku zewnętrznym $w01 \Rightarrow w_{stz} = 1mm$, oraz długość nóżki spojlera – kolejno od A do F, gdzie poszczególnym literom przepisano wartości od 8 mm do 13mm.



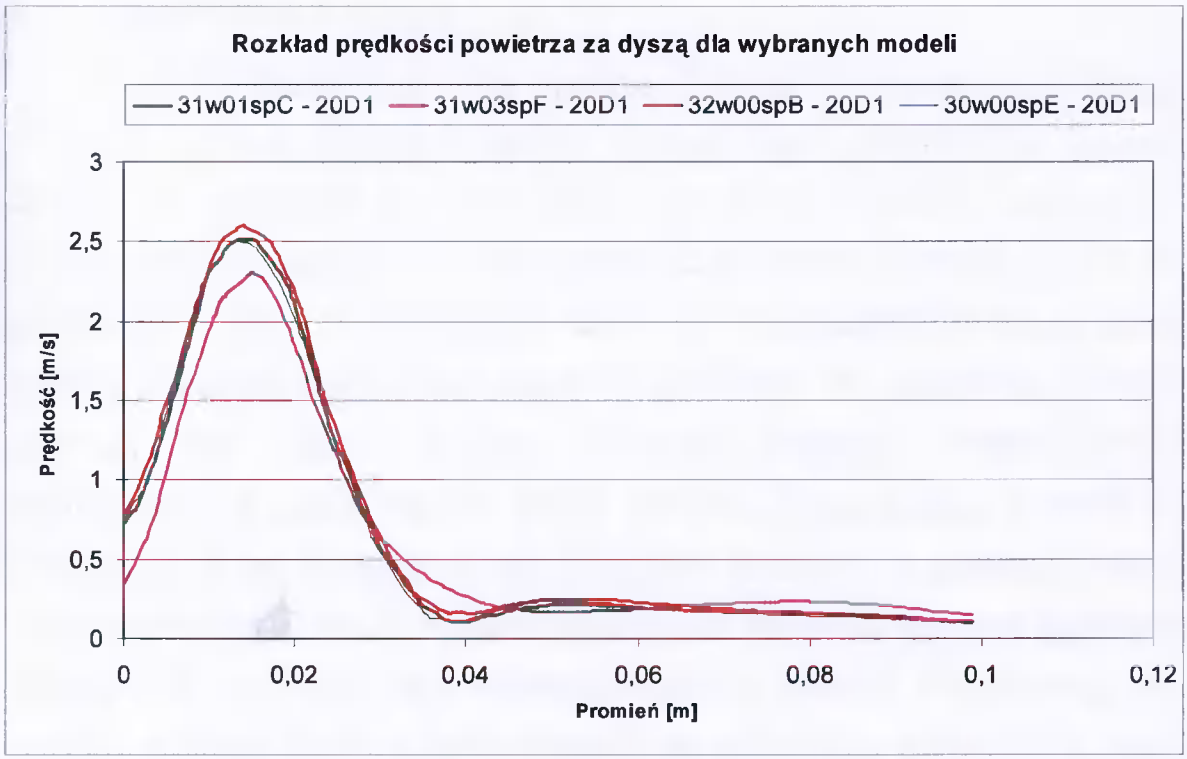
Rys. 6.14. Prędkość powietrza za dyszą w stanie ustalonym pierwszym dla modelu a32w00spB_Qc(0).



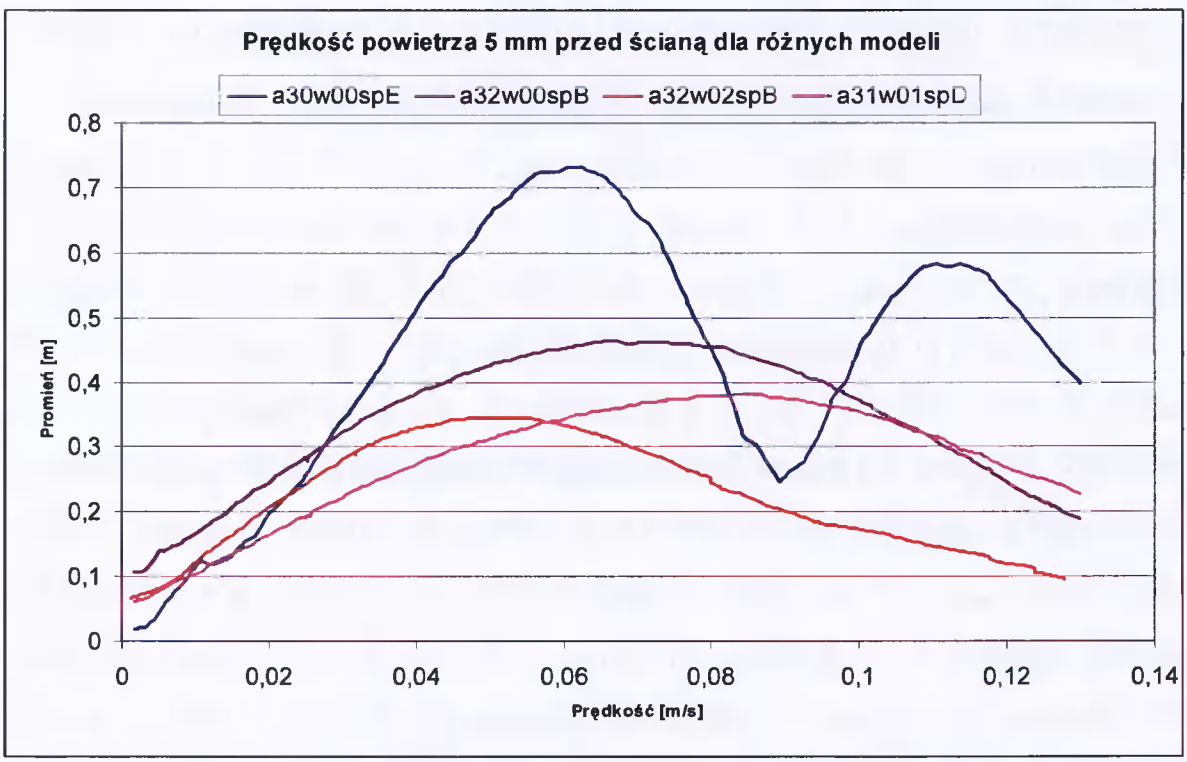
Rys. 6.15. Prędkość powietrza za dyszą w stanie ustalonym pierwszym dla modelu a31w03spB_Qc(0).



Rys. 6.16. Prędkość powietrza za dyszą w stanie ustalonym drugim Qc(1) w płaszczyźnie pierwszej i drugiej dla modelu a31w01spF_Qc(1).



Rys. 6.17. Prędkość powietrza w odległości 20 mm za dyszą (w płaszczyźnie nóżki spojlera) dla różnych modeli dla przepływu w stanie ustalonym pierwszym Qc(0).



Rys. 6.18. Prędkość powietrza w odległości 5 mm przed ścianą dla różnych modeli w stanie ustalonym drugim Qc(1).

6.4 Podsumowanie i wnioski

Przedstawiona na rysunku 6.6 wizualizacja numeryczna przepływu powietrza wewnątrz dyszy za spojlerem wykazuje wyraźny spadek prędkości za nóżkami spojlera. Te zakłócenia przepływu (spadek prędkości powietrza) powodowały lokalne obniżenie temperatury na ścianie [68]. Na kolejnych rysunkach 6.7, 6.8, 6.9 przedstawiono przepływ powietrza w pierwszym stanie ustalonym, dla tej samej wartości natężenia przepływu strumienia głównego. Na pierwszym rysunku widoczny jest wypływ w stanie ustalonym pierwszym wzdłuż stożka wewnętrznego. Przepływ ten jest jednak zakłócany przez spojler. Widoczne są zawirowania, które powodują drobne odchylenie strumienia w kierunku rosnącej wartości promienia dyszy. Podczas zwiększania odległości spojlera zakłócenia powodowane przez jego płat zmniejszają się. Na rysunku 6.9 widoczny jest wyraźny przepływ wzdłuż stożka wewnętrznego, przepływ w okolicy osi dyszy za końcem rdzenia i promieniowy opływ ściany umieszczonej za dyszą. Na rysunku 6.10 widoczny jest wyraźny przepływ strumienia w stanie ustalonym drugim, uzyskany dla modelu Dspn12a30Qc(1) – o kącie stożka zewnętrznego $\alpha = 30^\circ$ i długości nóżki spojlera $l_{nsp} = 12mm$. Dla odsadzenia na stożku zewnętrznym w_{stz} większego od 3 mm w wyniku symulacji numerycznej nie uzyskano przepływu powietrza w stanie ustalonym drugim (przepływu wzdłuż stożka zewnętrznego), czego przykładem jest rysunek 6.11. Na rysunku 6.12 przedstawiono wynik symulacji przepływu dla stanu ustalonego drugiego – Qc(1) – dla wypływu swobodnego. Zgodnie z założeniami i wcześniejszymi badaniami [39, 66, 80, 83] za dyszą powstaje toroidalny wir. Wypływające z dyszy powietrze (wzdłuż stożka zewnętrznego) zawraca w kierunku zbliżenia okolicy spojlera i przepływ powietrza w stanie ustalonym drugim. Widoczne są wyraźne różnice w ilości powietrza przepływającego pod spojlerem dla wartości długości nóżki $l_{nsp} = 8$ i $l_{nsp} = 11mm$. Dla mniejszej długości nóżek około 50% strumienia odchyla się w kierunku rdzenia dyszy. Dla nóżki o długości 11 mm odchyla się zdecydowanie mniejsza część strumienia. Zakładam, że jest to wystarczające zakłócenie przepływu, które powodować będzie powrót strumienia głównego do stanu ustalonego pierwszego po wyłączeniu strumienia sterującego.

Na rysunku 6.13 pokazano zbliżenie okolicy spojlera i przepływ powietrza

Na rysunkach 6.14 do 6.18 przedstawiono prędkość powietrza wypływającego z dyszy dla różnych modeli. Na pierwszym rysunku widoczna jest wysoka wartość prędkości powietrza w pobliżu osi symetrii dyszy. Dla przepływu w stanie ustalonym pierwszym maksymalne wartości prędkości uzyskuje się w okolicy odległości $r = 0{,}016m$ od osi dyszy. W stanie ustalonym drugim wartości maksymalne prędkości uzyskano w okolicy odległości $r = 0{,}07m$. Wykres prędkości powietrza w stanie drugim dla modelu a30w00spE (rys. 6.18) ukazuje wyraźny spadek prędkości w okolicy punktu $r = 0{,}09m$. Jest to potwierdzenie rozdzielenia się strumienia wypływającego z dyszy i powstanie okręgu stagnacji zaznaczonego na rysunku 6.1. Przeprowadzone badania numeryczne wykazują, że zmiana parametrów stożka zewnętrznego α_{stz} oraz długości nóżek spojlera l_{nsp} nie wpływa w sposób istotny na parametry przepływu powietrza w stanie ustalonym pierwszym (rys. 6.17). Wpływ tych zmian daje się wyraźnie zaobserwować przy przepływie powietrza w stanie ustalonym drugim (rys. 6.18). Dla modeli z krótszą nóżką $l_{nsp} = 9mm$ i odsadzeniem na stożku zewnętrznym $w_{stz} = 3mm$ wartości prędkości uzyskane za dyszą i przy ścianie są wyraźnie niższe niż dla modeli bez odsadzenia i z nóżką dłuższą.

Wyniki symulacji wskazują, że wprowadzone na początku stożka zewnętrznego odsadzenie utrudnia przełączenie się strumienia wyjściowego z dyszy do stanu ustalonego drugiego.

Podsumowując powyższe, trzeba powiedzieć, że wyniki różnych parametrów przepływu i pracy dyszy, uzyskane podczas badań numerycznych, pozwalają na sformułowanie założeń i przyjęcie wymiarów geometrycznych dyszy do badań doświadczalnych.

I tak:

- długość nóżki spojlera $l_{nsp} = 12mm$,
- odsadzenie na stożku zewnętrznym $w_{stz} = 0$,
- kąt stożka zewnętrznego $\alpha_{stz} = 30°$,
- kąt nachylenia płata spojlera $\alpha_{sp} = 22°$,
- szerokość płata spojlera $a_{sp} = 4mm$.

6.5 Model rzeczywisty dyszy osiowosymetrycznej do badań doświadczalnych

Materiałem, z którego wykonana będzie dysza jest stop aluminium PA6. Spojler wykonany będzie także z aluminium. Wycięty będzie z blachy o grubości $g_{sp} = 0{,}1\ mm$. Autor uważa, że weryfikacja doświadczalna obliczeń numerycznych jest bardzo ważna. Z tego powodu przyjęto wykonać trzy modele stożka zewnętrznego, które będą wstępnie zweryfikowane doświadczalnie i do badań doświadczalnych (termograficznych) przyjęty będzie jeden z nich. Parametry stożków przeznaczonych do wykonania są następujące:

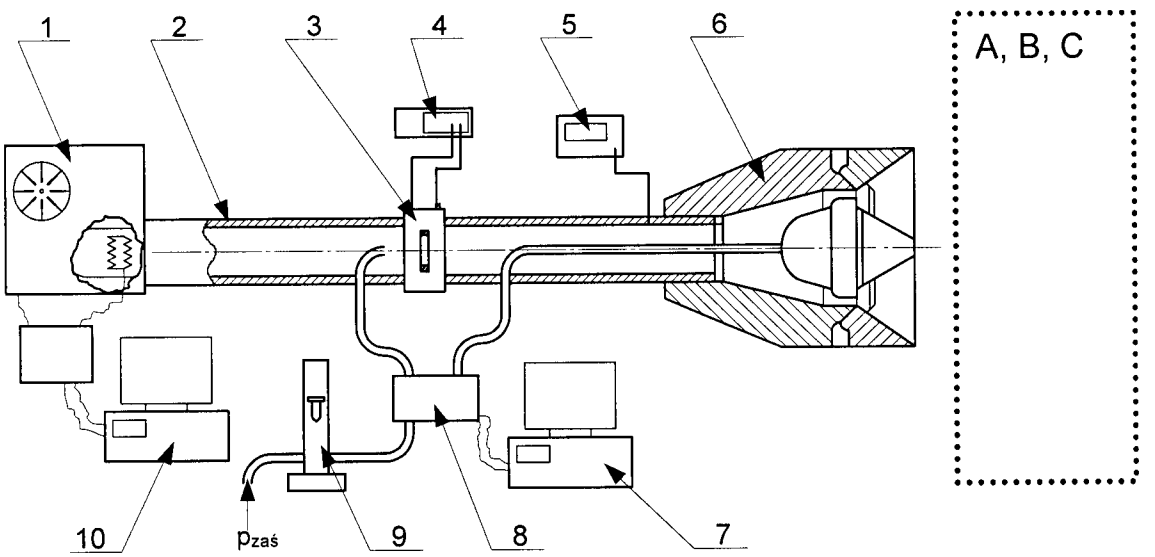
- $\alpha_{stz} = 30°$, $w_{stz} = 0\,mm$,
- $\alpha_{stz} = 30°$, $w_{stz} = 1\,mm$,
- $\alpha_{stz} = 31°$, $w_{stz} = 0\,mm$

Rysunki wykonawcze elementów dyszy, w tym także trzech wersji stożka zewnętrznego, przeznaczonych do dalszych badań zamieszczono w załączniku nr 1. W załączniku tym zamieszczono także rysunek złożeniowy dyszy osiowosymetrycznej wykorzystywanej w dalszych badaniach wizualizacyjnych i termograficznych.

7 Badanie doświadczalne jakości procesu wymiany ciepła

7.1 Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze dyszy osiowosymetrycznej przedstawiono na rysunku 7.1. Przedstawiona ramka A, B, C oznacza stosowane zamiennie układy pomiarowe do rejestracji określonych cech i parametrów strumienia głównego wypływającego z dyszy.



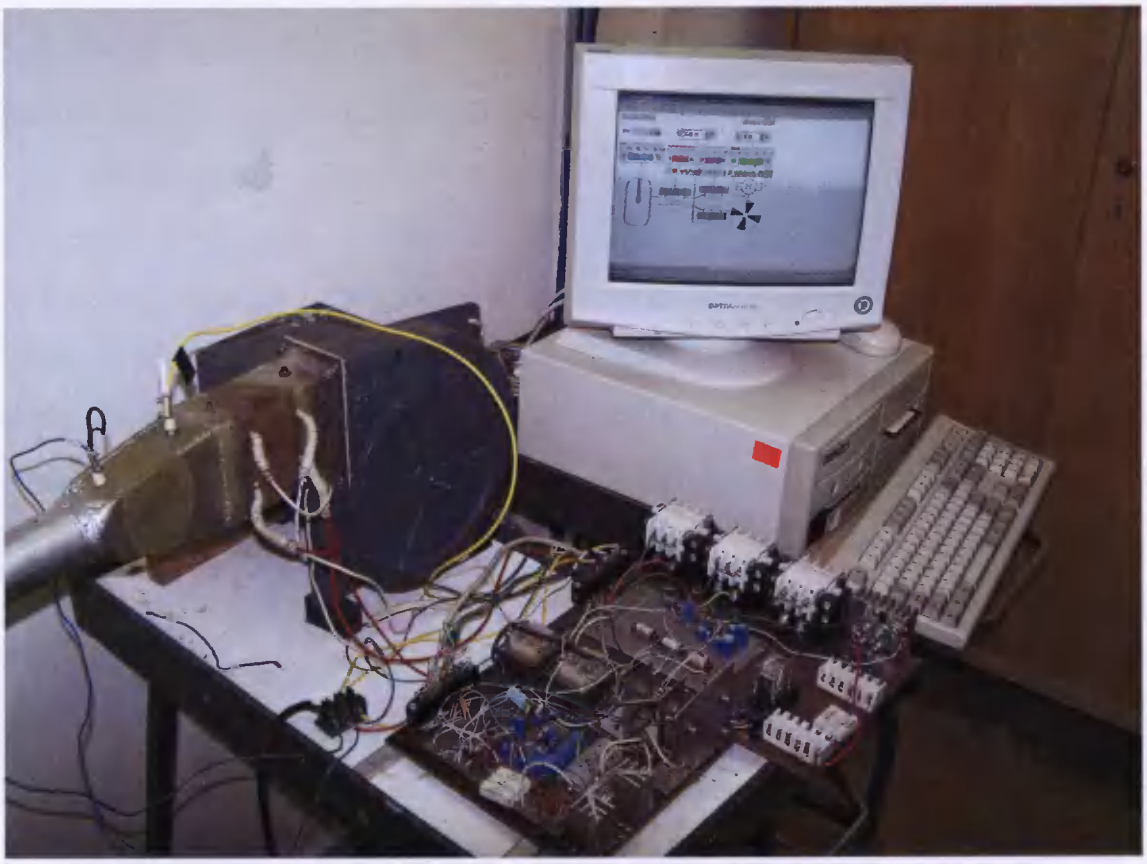
Rys. 7.1. Schemat stanowiska badawczego: 1-układ zasilania i ogrzewania strumienia głównego, 2-rurociąg zasilający, 3-kryza pomiarowa, 4-cyfrowy mikromanometr różnicowy CMR-10A, 5-układ pomiaru i rejestracji temperatury strumienia powietrza wpływającego do dyszy, 6-badana dysza osiowosymetryczna z rdzeniem wewnętrznym, 7-komputer PC z kartą pomiarową, wytwarzający sygnały sterujące f_c i PWM, 8-elektropneumatyczny zawór przełączający przepływ strumienia sterującego, 9-rotametr, 10- komputer PC z kartą pomiarową do sterowania natężeniem przepływu i temperaturą strumienia zasilającego (głównego), $p_{zaś}$-źródło strumienia sterującego

Układ pomiarowy A jest to układ służący do pomiaru i rejestracji temperatury ściany oporowej opływanej i ogrzewanej przez wypływający z dyszy strumień gorącego powietrza.

Układ pomiarowy B jest to układ stosowany do pomiaru prędkości powietrza wypływającego z dyszy. Układ ten umożliwia pomiar prędkości powietrza podczas wypływu swobodnego (bez ściany oporowej) i podczas opływu płaskiej ściany. Z przyczyn technicznych minimalna odległość punktu pomiarowego (końcówki sondy) od powierzchni ściany wynosi 5 mm.

Układ pomiarowy C jest to układ służący do wizualizacji przepływu powietrza za dyszą. Tak jak przy układzie do pomiaru prędkości, możliwa jest wizualizacja przepływu swobodnego i wizualizacja opływu płaskiej ściany oporowej. Szczegóły poszczególnych układów przedstawione są na rysunku 7.4.

Układ zasilania dyszy (rys. 7.2) składa się z wentylatora promieniowego i zestawu trzech elementów grzejnych. Zakres badań wymaga sterowania natężeniem przepływu i temperaturą strumienia powietrza. Układ sterownia składa się z komputera PC i karty pomiarowej Adventech PCL-812.



Rys. 7.2. Zdjęcie układu sterowania zasilaniem stanowiska.

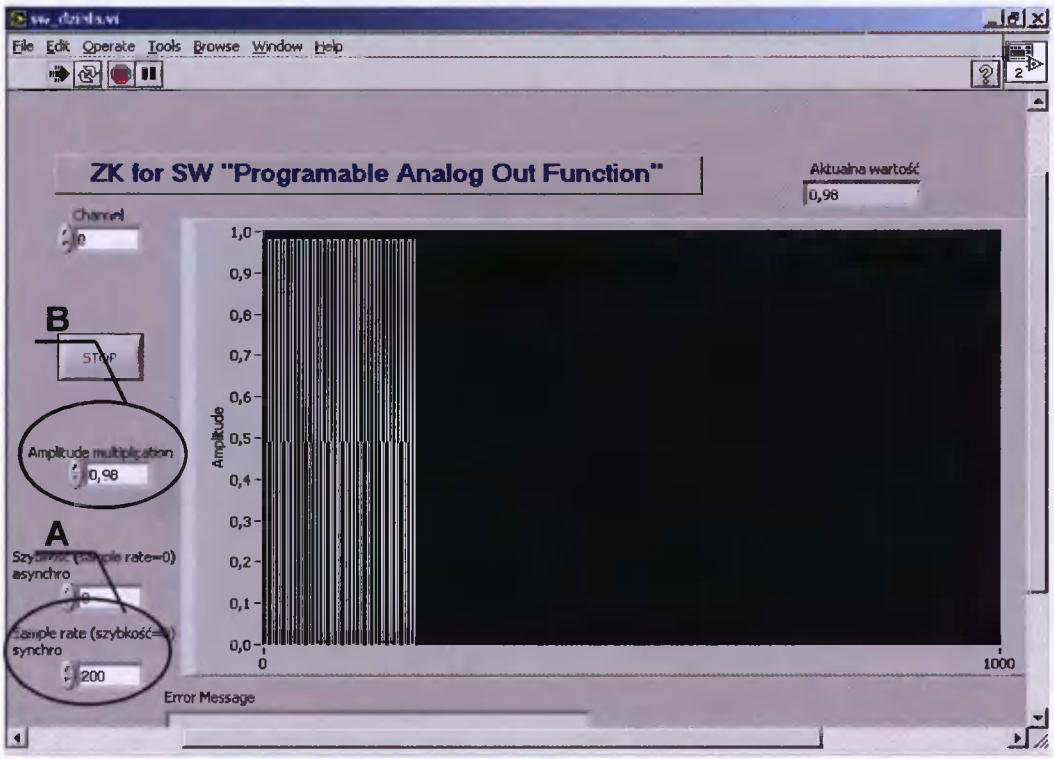
Przy korzystaniu z aplikacji Advantech GeniDAQ do obsługi karty pomiarowej stworzono aplikację umożliwiającą sterowanie obrotami wentylatora (natężeniem przepływu) i napięciem podawanym na elementy grzejne (temperaturą strumienia zasilającego). Sterowanie prędkością obrotową wentylatora realizowane jest poprzez zmianę napięcia zasilającego w zakresie od 4 V do 16 V z krokiem co 0,1 V. Taki zakres zmian pozwala uzyskać natężenie przepływu strumienia zasilającego w zakresie od $Q_m = 0{,}0066476\ m^3/s$ do $Q_m = 0{,}016619\ m^3/s$.

Regulacja załączenia liczby grzałek (jedna, dwie lub trzy) oraz regulacja mocy grzałek pozwala uzyskać temperaturę strumienia zasilającego do $T_z = 70°C$. Układ pozwala zmieniać moc oraz włączać i wyłączać elementy grzejne podczas pracy wentylatora.

Do pomiaru temperatury strumienia głównego wpływającego do dyszy wykorzystywana jest termopara podłączona do multimetru Metex M-3660D. Dokładność pomiaru temperatury wynosi $1°C$. Dołączone do urządzenia oprogramowanie pozwala rejestrować zmiany mierzonej temperatury na komputerze PC. Dane mogą być rejestrowane w formie wykresu lub w postaci pliku tekstowego z wartościami temperatury z taktowaniem co $1s$.

Pomiar rzeczywistego natężenia przepływu w rurociągu zasilającym odbywa się metodą pośrednią z wykorzystaniem kryzy pomiarowej. Kryzy i zwężki pomiarowe są często stosowane podczas pomiarów natężenia przepływu, a ich udział w przemyśle szacuje się na około 30% [7, 8]. Różnica ciśnienia na kryzie mierzona jest przy pomocy mikromanometru różnicowego CMR-10A. Dokładność pomiaru tego manometru wynosi $0{,}1Pa$. Na podstawie zmierzonej różnicy ciśnień wyznaczana jest prędkość przepływu powietrza w rurociągu i obliczane natężenie przepływu. Strumień sterujący pobierany był z sieci sprężonego powietrza. Ciśnienie zasilania strumienia sterującego wynosiło $p_{zaś} = 210kPa$. Między reduktorem a rotametrem umieszczono zbiornik o pojemności około 7 dm^3. Temperatura strumienia sterującego wprowadzanego do badanej dyszy wynosiła $T_c = 23°C$. Do sterowania pulsacjami strumienia wyjściowego wykorzystywany jest zawór elektropneumatyczny, przełączający strumień sterujący do kanału zasilającego lub kanału sterującego. Układ sterowania zaworem składa się z komputera PC z zainstalowaną kartą pomiarową Advantech PCL-711 oraz oprogramowania LabView 7, w którym napisano program do generowania sygnałów sterujących załączeniem zaworu. Sygnał wyjściowy z karty pomiarowej przechodzi przez wzmacniacz i podawany jest na zawór. W wielu układach technicznych pulsacje ciśnienia są niepożądane i prowadzi się badania nad ich tłumieniem [26]. W badanym urządzeniu (dysza strumieniowa) sygnał sterujący (pneumatyczny) nie powinien podle-

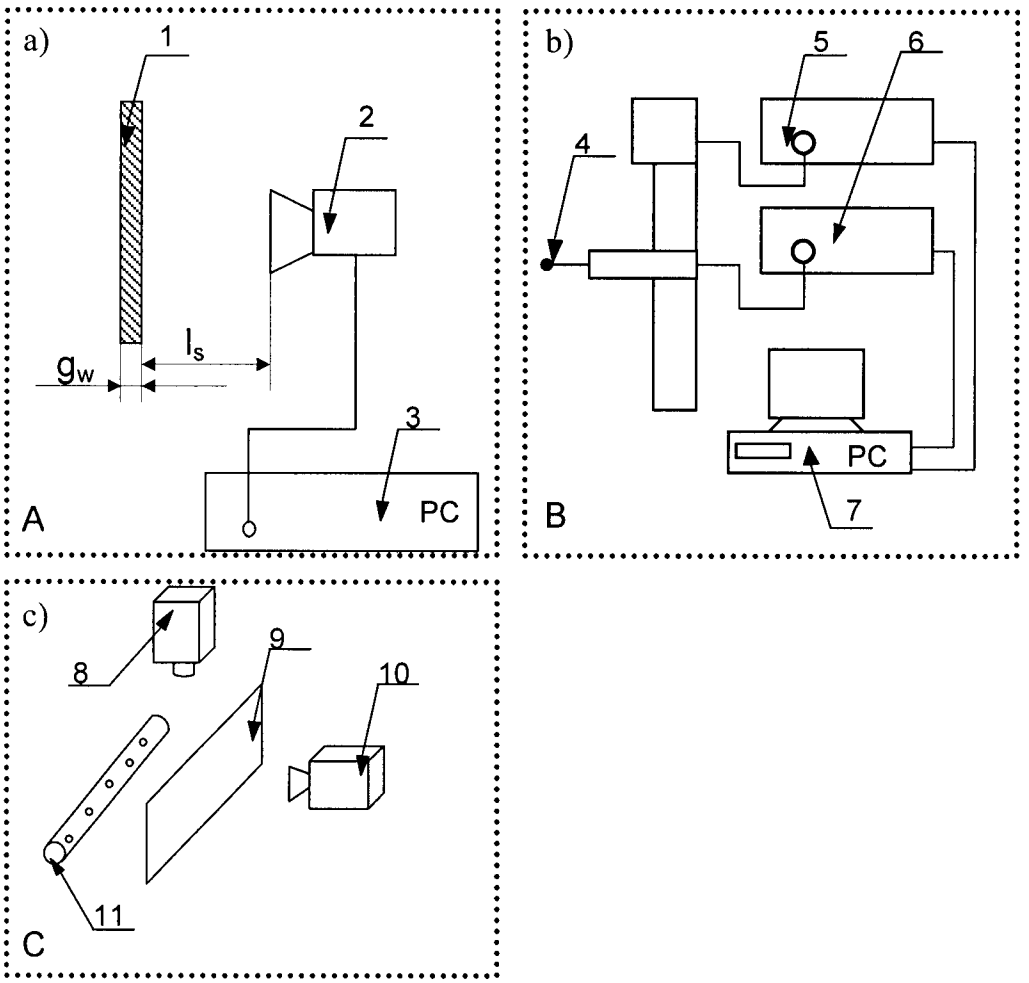
gać tłumieniu i powinien mieć charakterystykę okresową zbliżoną do charakterystyki napięciowego sygnału sterującego pracą zaworu rozdzielającego [23, 24].



Rys. 7.3. Widok ogólny okna aplikacji do generowania sygnałów sterujących zaworem rozdzielającym; szczegół A-okno nastawy częstotliwości sygnału sterującego f_c, B-wartość napięcia sygnału sterującego podawanego do wzmacniacza.

Układ ten umożliwia regulację zarówno częstotliwości sygnału sterującego jak i stopnia wypełnienia sygnału PWM. W procesie przepływu powietrza przez dyszę, układ ten umożliwia regulację częstotliwości pulsacji strumienia wyjściowego, a także regulację czasu trwania stanu ustalonego przepływu pierwszego i drugiego w jednym okresie T. Natężenie przepływu sygnału sterującego mierzy się za pomocą rotametru, umieszczonego przed zaworem rozdzielającym. Rotametr wyposażony jest także w zawór umożliwiający regulację natężenia przepływu strumienia sterującego.

Na rysunku 7.4 przedstawiono schematy układów pomiarowych wyszczególnionych na rysunku 7.1 jako A, B, C.



Rys. 7.4. Schematy układów pomiarowych stosowanych na stanowisku (rys. 7.1): a)pomiaru temperatury opływanej ściany, b)pomiaru prędkości powietrza wypływającego z dyszy, c)wizualizacji wypływu powietrza z dyszy i opływu ściany oporowej; 1-element ogrzewany (ściana oporowa) przez strumień wypływający z dyszy, 2-kamera (skaner) termograficzna, 3-komputer PC rejestrujący dane z kamery, 4-jednowłóknowa sonda pomiarowa 55P11, 5-jednoosiowy układ trawersacji Dantec Light Weight Traverse, 6-anemometr termiczny StreamLine z pojedynczym modułem CTA90C10, 7-komputer PC z oprogramowaniem rejestrującym wyniki pomiarów prędkości powietrza i oprogramowaniem do kontroli układu trawersacji, 8-kamera cyfrowa rejestrująca wizualizowany przepływ powietrza, 9-przezroczysta ściana oporowa, 10-układ oświetlenia z regulacją szerokości wiązki światła, 11-układ wytwarzania oparów parafiny wizualizujących przepływ powietrza.

Do pomiaru temperatury ściany używano kamery termograficznej typu V-20 II firmy VIGO System S.A. Kamera ta jest w zasadzie liniowym skanerem dwuwymiarowym, umożliwiającym uzyskanie obrazu o maksymalnej rozdzielczości 240×240 punktów. Kamera obsługiwana może być z poziomu komputera PC, z którym połączona jest poprzez port szeregowy lub USB (w tych badaniach używano łącza USB) [68]. Załączone przez producenta kamery oprogramowanie

THERM V-20 pozwala na określenie wielu parametrów pracy kamery. Ustaleniu podlega ilość linii pomiarowych, tzn. określenie czy pomiar obejmie cały zakres 240 linii czy pomiar ma objąć tylko wybraną linię oraz interwał czasowy pomiędzy wykonywanymi pomiarami. Z uwagi na czas trwania jednego pełnego cyklu pomiarowego, wynoszącego 25 sekund, uzyskane wyniki pomiaru temperatury ściany w osi pionowej nie przedstawiają ich wartości w tej samej chwili t_p procesu. Zachowując zerowy interwał czasowy pomiędzy pomiarami (skanowaniem) oraz jednakowe warunki początkowe czasu załączenia ogrzewania i skanowania termograficznego można otrzymać wyniki pomiarów wartości temperatury poszczególnych punktów ściany oporowej w tych samych chwilach procesu dla różnych wartości zmiennych wejściowych. f_c, PWM oraz I_w / D_{wd}. Dlatego do obliczeń ilości ciepła przyjęte będą tylko wyniki dla 120 linii pomiarowej skanera, uzyskane podczas przeprowadzanych badań.

Do badania rozkładu prędkości strumienia wypływającego z dyszy wykorzystywany jest anemometr termiczny (HWA) pracujący w układzie ze stałą temperaturą włókna pomiarowego (CT). Sonda anemometru sprzężona jest z jednoosiowym układem trawersującym Light Weight Traverse 41T85. Do zbierania danych z pomiarów służy komputer PC z wielofunkcyjną kartą pomiarową AT MIO-E10 oraz przetwornik sygnału SCB-68. Producentem karty pomiarowej i przetwornika jest firma National Instrument [75, 78].

Do badań wizualizacyjnych stosowana jest metoda wykorzystująca opary parafiny. Opary parafiny wytwarzane są w ogrzewanej rurce umieszczonej za dyszą. Umieszczone za szklaną przegrodą źródło światła oświetla przepływające opary parafiny, a umieszczona nad dyszą kamera przesyła obraz do komputera. Kamera połączona jest z kartą telewizyjną zainstalowaną w komputerze przewodem kompozytowym typu chinch [66, 70].

7.2 Program badań

Na podstawie zasad planowania doświadczeń przedstawionych w punkcie 5.1 i 5.2 pracy oraz analizy parametrów wejściowych i wyjściowych procesu przyjęto do badań plan statyczny zdeterminowany.

Zbiór wielkości wejściowych posiada trzy elementy. Są to następujące wielkości:

- l_w – odległość ściany oporowej od końca dyszy,
- f_c – częstotliwość sygnału sterującego (pulsacji strumienia wyjściowego z dyszy),
- PWM – stopień wypełnienia sygnału sterującego.

Zbiór wielkości wyjściowych jest zbiorem jednoelementowym. Wielkością wyjściową jest:

- T_r – temperatura ściany oporowej.

Zbiór wielkości stałych jest zbiorem trzyelementowym. Wielkościami stałymi w przeprowadzanych badaniach są:

- T_z – temperatura strumienia zasilającego,
- Re – parametr określający natężenie przepływu powietrza przez dyszę,
- t – czas trwania procesu przenoszenia ciepła.

Wybrany plan badawczy, uwzględniający przedstawione powyżej zbiory wielkości wejściowych i stałych poddano ocenie według kryteriów przedstawionych w punkcie 5.2 pracy.

Wszystkie wielkości wejściowe i wyjściowe są mierzalne oraz sterowalne. Obiekt badań funkcjonuje prawidłowo dla przyjętych skojarzeń wartości wielkości wejściowych. Wobec powyższych stwierdzeń uznano, że kryterium realizowalności (KR) jest spełnione.

Wyniki uzyskane podczas badań pozwolą określić wpływ wybranych parametrów na proces przejmowania ciepła przez opływaną płaską ścianę oporową. Wyniki te będą potwierdzeniem lub zaprzeczeniem tezy postawionej w pracy. Z tego względu, według autora, kryterium informatywności (KI) można uznać za spełnione.

Program badawczy nie przewiduje zmian ani modyfikacji obiektu badań. Większość zmian wartości wielkości wejściowych odbywa się poprzez zmianę parametrów w układach sterujących tymi wielkościami. Nakłady ponoszone podczas realizacji tych badań są jednorazowe. Realizacja przedstawionego programu badawczego nie wymaga dodatkowych nakładów.. Wobec powyższego autor uważa, że spełnione jest także kryterium efektywności (KE).

7.2.1 Badanie jakościowe i ilościowe opływu ściany

Biorąc pod uwagę możliwości techniczne stanowiska badawczego, a w szczególności sterowalność procesu przełączania strumienia wyjściowego z dyszy, w badaniach wizualizacyjnych przyjęto następujące wartości wielkości wejściowych:

- Re = 4200
- l_w = 55 – 100 mm z krokiem co 5 mm;
- f_c = 0,5 –3,0Hz z krokiem co 0,5Hz,
- PWM = 20%, 50%, 80%.

Liczba wartości poszczególnych wielkości wejściowych wynosi odpowiednio:

- n_{lw}=10,
- n_{fc}=7
- n_{PWM}=3

Z powyższego zestawienia wynika, że należy przeprowadzić wizualizację dla n=210 zestawów wielkości wejściowych. Do tej liczby należy dodać 22 pomiary, przeprowadzone dla przepływu w stanie ustalonym pierwszym i drugim, przy wypływie swobodnym i opływie ściany oporowej.

W celu łatwiejszego porównania wyników badań przyjęto jedną wartość natężenia przepływu strumienia sterującego, równą $Q_c = 0{,}001\, m^3 s^{-1}$, dla wszystkich pomiarów, niezależnie od natężenia strumienia sterującego. W tabeli 7.1 przedstawiono zestawienie numeracji i wartości parametrów do badań wizualizacyjnych. Puste komórki tabeli oznaczają brak zastosowania danego parametru.

Tabela 7.1. Zestawienie numerów pomiarów i wartości zmiennych do badań wizualizacyjnych.

NR	Lw	PWM	f	NR	Lw	PWM	f	NR	Lw	PWM	f	NR	Lw	PWM	f	NR	Lw	PWM	f
1	100	PWM20	F0,5	24	95	PWM20	F0,5	47	90	PWM20	F0,5	70	85	PWM20	F0,5	93	80	PWM20	F0,5
2	100	PWM20	F1,0	25	95	PWM20	F1,0	48	90	PWM20	F1,0	71	85	PWM20	F1,0	94	80	PWM20	F1,0
3	100	PWM20	F1,5	26	95	PWM20	F1,5	49	90	PWM20	F1,5	72	85	PWM20	F1,5	95	80	PWM20	F1,5
4	100	PWM20	F2,0	27	95	PWM20	F2,0	50	90	PWM20	F2,0	73	85	PWM20	F2,0	96	80	PWM20	F2,0
5	100	PWM20	F2,5	28	95	PWM20	F2,5	51	90	PWM20	F2,5	74	85	PWM20	F2,5	97	80	PWM20	F2,5
6	100	PWM20	F3,0	29	95	PWM20	F3,0	52	90	PWM20	F3,0	75	85	PWM20	F3,0	98	80	PWM20	F3,0
7	100	PWM20	F3,5	30	95	PWM20	F3,5	53	90	PWM20	F3,5	76	85	PWM20	F3,5	99	80	PWM20	F3,5
8	100	PWM50	F0,5	31	95	PWM50	F0,5	54	90	PWM50	F0,5	77	85	PWM50	F0,5	100	80	PWM50	F0,5
9	100	PWM50	F1,0	32	95	PWM50	F1,0	55	90	PWM50	F1,0	78	85	PWM50	F1,0	101	80	PWM50	F1,0
10	100	PWM50	F1,5	33	95	PWM50	F1,5	56	90	PWM50	F1,5	79	85	PWM50	F1,5	102	80	PWM50	F1,5
11	100	PWM50	F2,0	34	95	PWM50	F2,0	57	90	PWM50	F2,0	80	85	PWM50	F2,0	103	80	PWM50	F2,0
12	100	PWM50	F2,5	35	95	PWM50	F2,5	58	90	PWM50	F2,5	81	85	PWM50	F2,5	104	80	PWM50	F2,5
13	100	PWM50	F3,0	36	95	PWM50	F3,0	59	90	PWM50	F3,0	82	85	PWM50	F3,0	105	80	PWM50	F3,0
14	100	PWM50	F3,5	37	95	PWM50	F3,5	60	90	PWM50	F3,5	83	85	PWM50	F3,5	106	80	PWM50	F3,5
15	100	PWM80	F0,5	38	95	PWM80	F0,5	61	90	PWM80	F0,5	84	85	PWM80	F0,5	107	80	PWM80	F0,5
16	100	PWM80	F1,0	39	95	PWM80	F1,0	62	90	PWM80	F1,0	85	85	PWM80	F1,0	108	80	PWM80	F1,0
17	100	PWM80	F1,5	40	95	PWM80	F1,5	63	90	PWM80	F1,5	86	85	PWM80	F1,5	109	80	PWM80	F1,5
18	100	PWM80	F2,0	41	95	PWM80	F2,0	64	90	PWM80	F2,0	87	85	PWM80	F2,0	110	80	PWM80	F2,0
19	100	PWM80	F2,5	42	95	PWM80	F2,5	65	90	PWM80	F2,5	88	85	PWM80	F2,5	111	80	PWM80	F2,5
20	100	PWM80	F3,0	43	95	PWM80	F3,0	66	90	PWM80	F3,0	89	85	PWM80	F3,0	112	80	PWM80	F3,0
21	100	PWM80	F3,5	44	95	PWM80	F3,5	67	90	PWM80	F3,5	90	85	PWM80	F3,5	113	80	PWM80	F3,5
22	100	Stan1		45	95	Stan1		68	90	Stan1		91	85	Stan1		114	80	Stan1	
23	100	Stan2		46	95	Stan2		69	90	Stan2		92	85	Stan2		115	80	Stan2	
116	75	PWM20	F0.5	139	70	PWM20	F0.5	162	65	PWM20	F0.5	185	60	PWM20	F0.5	208	55	PWM20	F0.5
117	75	PWM20	F1,0	140	70	PWM20	F1,0	163	65	PWM20	F1,0	186	60	PWM20	F1,0	299	55	PWM20	F1,0
118	75	PWM20	F1,5	141	70	PWM20	F1,5	164	65	PWM20	F1,5	187	60	PWM20	F1,5	210	55	PWM20	F1,5
119	75	PWM20	F2,0	142	70	PWM20	F2,0	165	65	PWM20	F2,0	188	60	PWM20	F2,0	211	55	PWM20	F2,0
120	75	PWM20	F2,5	143	70	PWM20	F2,5	166	65	PWM20	F2,5	189	60	PWM20	F2,5	212	55	PWM20	F2,5
121	75	PWM20	F3,0	144	70	PWM20	F3,0	167	65	PWM20	F3,0	190	60	PWM20	F3,0	213	55	PWM20	F3,0
122	75	PWM20	F3,5	145	70	PWM20	F3,5	168	65	PWM20	F3,5	191	60	PWM20	F3,5	214	55	PWM20	F3,5
123	75	PWM50	F0,5	146	70	PWM50	F0,5	169	65	PWM50	F0,5	192	60	PWM50	F0,5	215	55	PWM50	F0,5
124	75	PWM50	F1,0	147	70	PWM50	F1,0	170	65	PWM50	F1,0	193	60	PWM50	F1,0	216	55	PWM50	F1,0
125	75	PWM50	F1,5	148	70	PWM50	F1,5	171	65	PWM50	F1,5	194	60	PWM50	F1,5	217	55	PWM50	F1,5
126	75	PWM50	F2,0	149	70	PWM50	F2,0	172	65	PWM50	F2,0	195	60	PWM50	F2,0	218	55	PWM50	F2,0
127	75	PWM50	F2,5	150	70	PWM50	F2,5	173	65	PWM50	F2,5	196	60	PWM50	F2,5	219	55	PWM50	F2,5
128	75	PWM50	F3,0	151	70	PWM50	F3,0	174	65	PWM50	F3,0	197	60	PWM50	F3,0	220	55	PWM50	F3,0
129	75	PWM50	F3,5	152	70	PWM50	F3,5	175	65	PWM50	F3,5	198	60	PWM50	F3,5	221	55	PWM50	F3,5
130	75	PWM80	F0,5	153	70	PWM80	F0,5	176	65	PWM80	F0,5	199	60	PWM80	F0,5	222	55	PWM80	F0,5
131	75	PWM80	F1,0	154	70	PWM80	F1,0	177	65	PWM80	F1,0	200	60	PWM80	F1,0	223	55	PWM80	F1,0
132	75	PWM80	F1,5	155	70	PWM80	F1,5	178	65	PWM80	F1,5	201	60	PWM80	F1,5	224	55	PWM80	F1,5
133	75	PWM80	F2,0	156	70	PWM80	F2,0	179	65	PWM80	F2,0	202	60	PWM80	F2,0	225	55	PWM80	F2,0
134	75	PWM80	F2,5	157	70	PWM80	F2,5	180	65	PWM80	F2,5	203	60	PWM80	F2,5	226	55	PWM80	F2,5
135	75	PWM80	F3,0	158	70	PWM80	F3,0	181	65	PWM80	F3,0	204	60	PWM80	F3,0	227	55	PWM80	F3,0
136	75	PWM80	F3,5	159	70	PWM80	F3,5	182	65	PWM80	F3,5	205	60	PWM80	F3,5	228	55	PWM80	F3,5
137	75	Stan1		160	70	Stan1		183	65	Stan1		206	60	Stan1		229	55	Stan1	
138	75	Stan2		161	70	Stan2		184	65	Stan2		207	60	Stan2		230	55	Stan2	
231		Stan1		232		Stan2													

7.2.2 Badanie termograficzne temperatury ściany oporowej

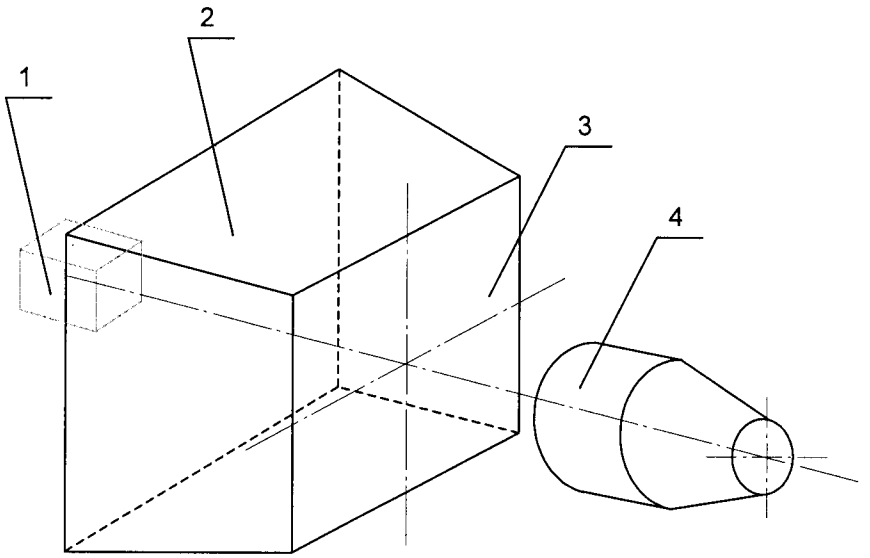
Dokładne wartości graniczne częstotliwości strumienia sterującego i wartości stopnia wypełnienia sygnału przyjęte będą po przeprowadzeniu badań wizualizacyjnych. Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań spodziewać się można, że dla częstotliwości z górnej części zakresu przyjętego do wizualizacji mogą wystąpić kłopoty z pełnym przesterowaniem strumienia głównego. Wyraźnie zaznaczyć się może to dla najniższych i najwyższych wartości stopnia wypełnienia sygnału *PWM*.

Szczególnie istotne jest, aby podczas badań zachowane były stałe warunki otoczenia. Podczas ogrzewania ściany oporowej wzrastać będzie także temperatura otoczenia, a więc przed przystąpieniem do pomiarów należy ustabilizować temperaturę otoczenia. Z uwagi na fakt, że pomieszczenie, w którym prowadzone będą badania, ma okna od strony południowej, ustabilizowana temperatura początkowa otoczenia wynosi $T_o = 24°C$. Temperatura ta jest przy tym średnią temperaturą z trzech punktów pomiarowych w pomieszczeniu. Pomiary rozpoczynano w momencie, gdy średnia temperatura z trzech punktów pomiarowych wynosiła $T_{ośś} = 24 \pm 0{,}5°C$. Aby zminimalizować straty ciepła poprzez nagrzewanie się dyszy, przed rozpoczęciem pomiarów układ ogrzewania strumienia głównego był załączany na czas trzydziestu minut. Temperatura strumienia powietrza wpływającego do dyszy osiągała wartość $T_z = 50°C$.

Ściana oporowa wykonana jest z blachy ze stopu aluminium PA6 o grubości $0{,}1mm$. Wymiary blachy to $0{,}5m \times 0{,}5m$. Od strony kamery termograficznej blachę pokryto natryskowo matową farbą podkładową. Temperaturę mierzono na zewnętrznej stronie ściany za pomocą kamery termograficznej. Ponieważ ogrzane powietrze, wypływające z dyszy, mogłoby po opłynięciu ściany zakłócać pomiar, między kamerą a ścianą zamontowano osłonę (rys. 7.5). Osłona ta uniemożliwia bezpośredni przepływ powietrza między kamerą a ścianą.

Osłona ta ma kształt ściętego ostrosłupa o podstawie czworokąta. W miejscu mniejszej podstawy umocowana jest ściana oporowa. W miejscu większej podstawy ustawiona jest kamera termograficzna. Osłona ta wyposażona jest w cztery regulo-

wane nóżki, które umożliwiają dokładne ustawienie ściany prostopadle do osi symetrii dyszy.

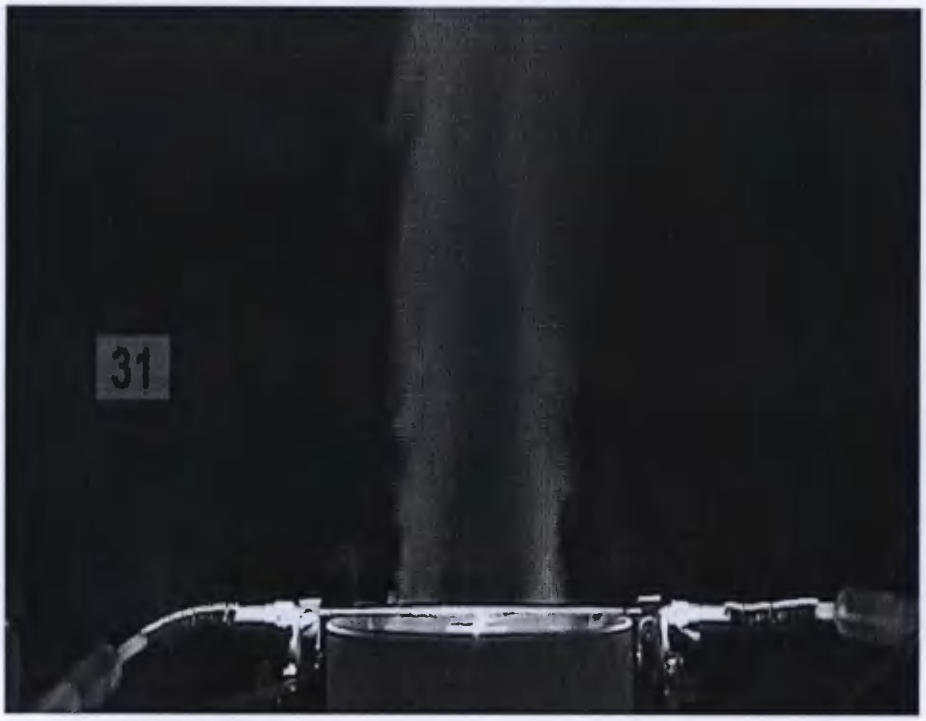


Rys. 7.5. Schemat osłony kamery termograficznej; 1-kamera termograficzna, 2-ściana osłony, 3-ściana oporowa, 4-dysza.

7.3 Wyniki badań doświadczalnych

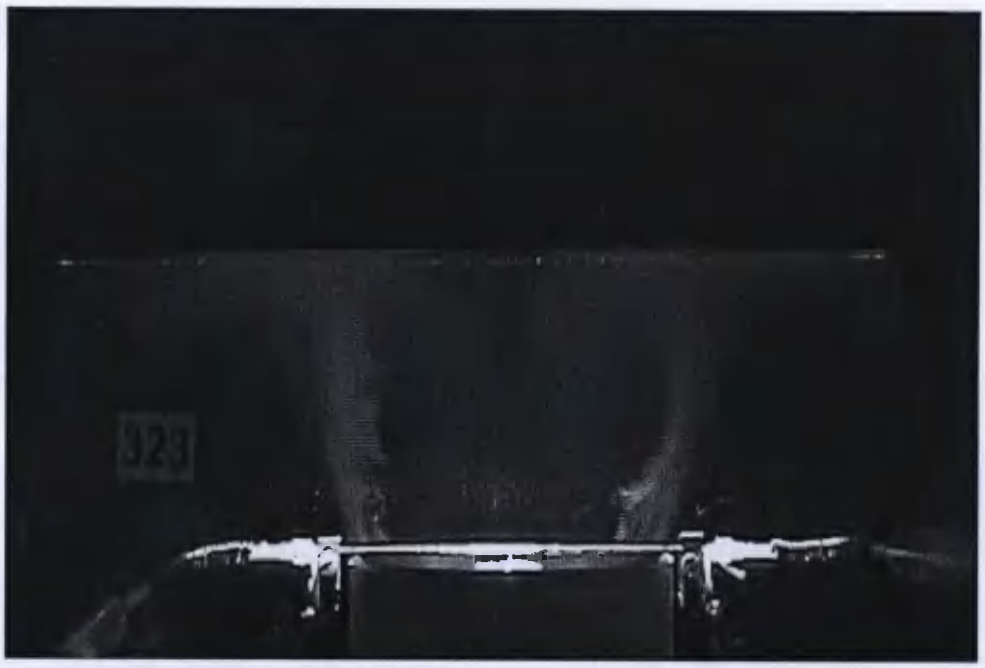
7.3.1 Wyniki badań wizualizacyjnych

Po wstępnej weryfikacji doświadczalnej wykonanych stożków do dalszych badań przyjęto stożek o parametrach $\alpha_{stz} = 30^{o}$ i $w_{stz} = 0$ - bez odsadzenia. Zgodnie z tabelą 7.1. badania o jakościowym charakterze prowadzono dla zmiennych parametrów $l_w = 55 \div 100\,mm$, $PWM = 20;50;80$, i $f_c = 0{,}5 \div 3{,}0\,Hz$. W rezultacie otrzymano 232 wyniki wizualizacji opływu ścianki przez powietrze. Wybrane wizualizacje (oznaczone numerami pomiarów zgodnie z tabelą 7.1) przedstawiono na rysunkach 7.6 ÷ 7.16.

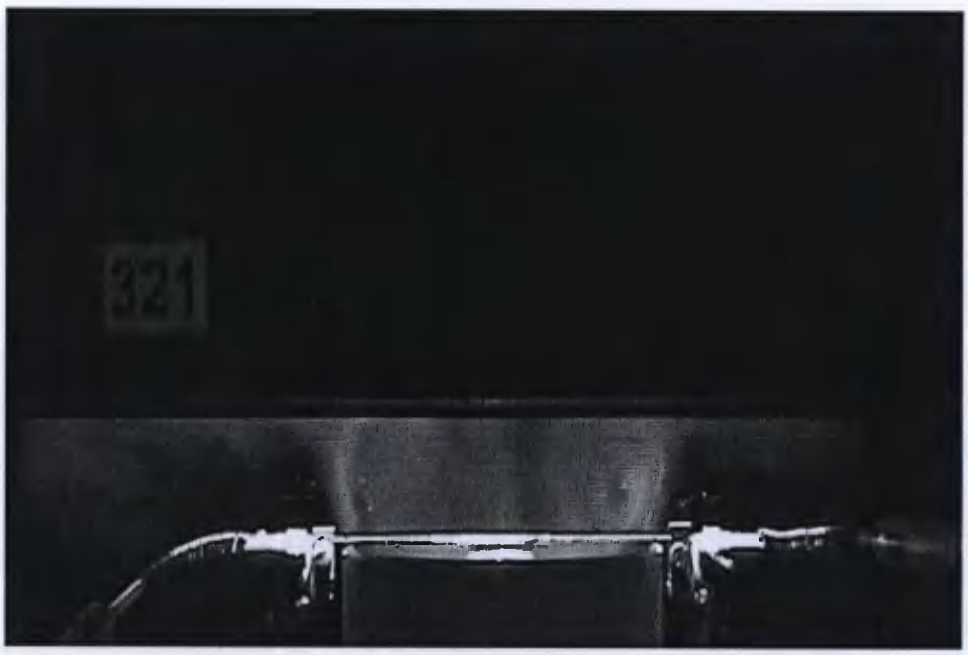


Rys. 7.6. Wizualizacja wypływu swobodnego strumienia w stanie ustalonym pierwszym (pomiar 231).

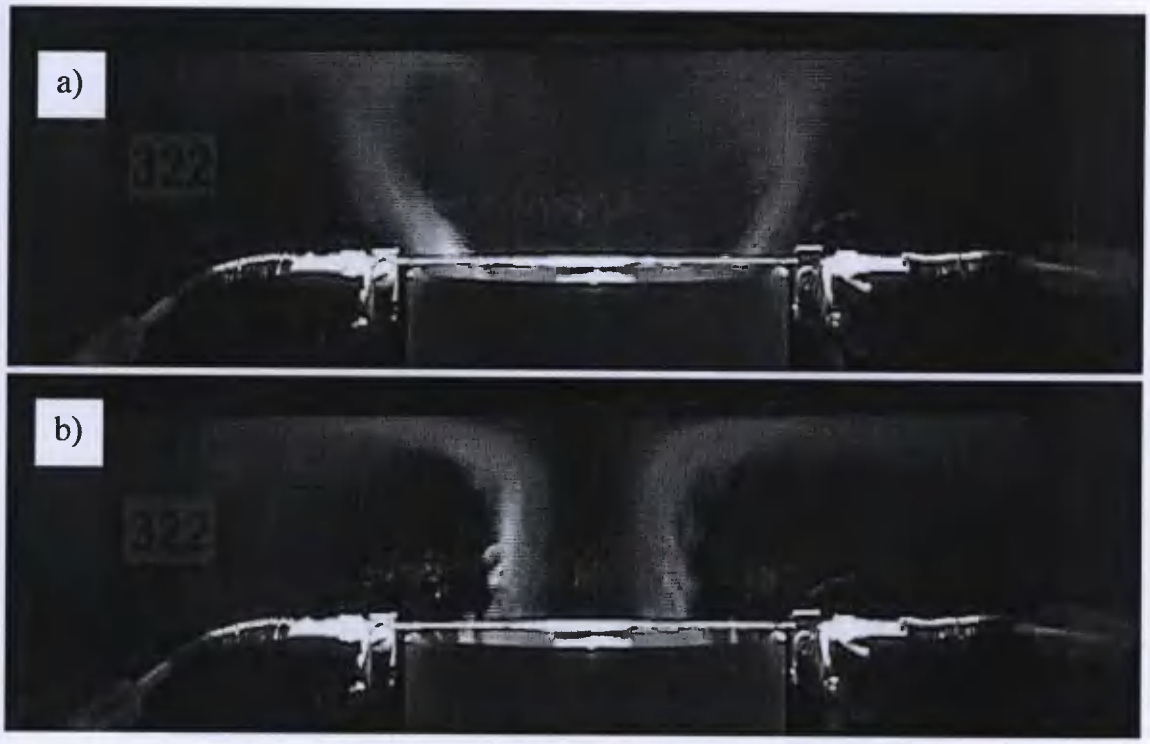
Rys. 7.7. Wizualizacja wypływu swobodnego strumienia w stanie ustalonym drugim (pomiar 232).



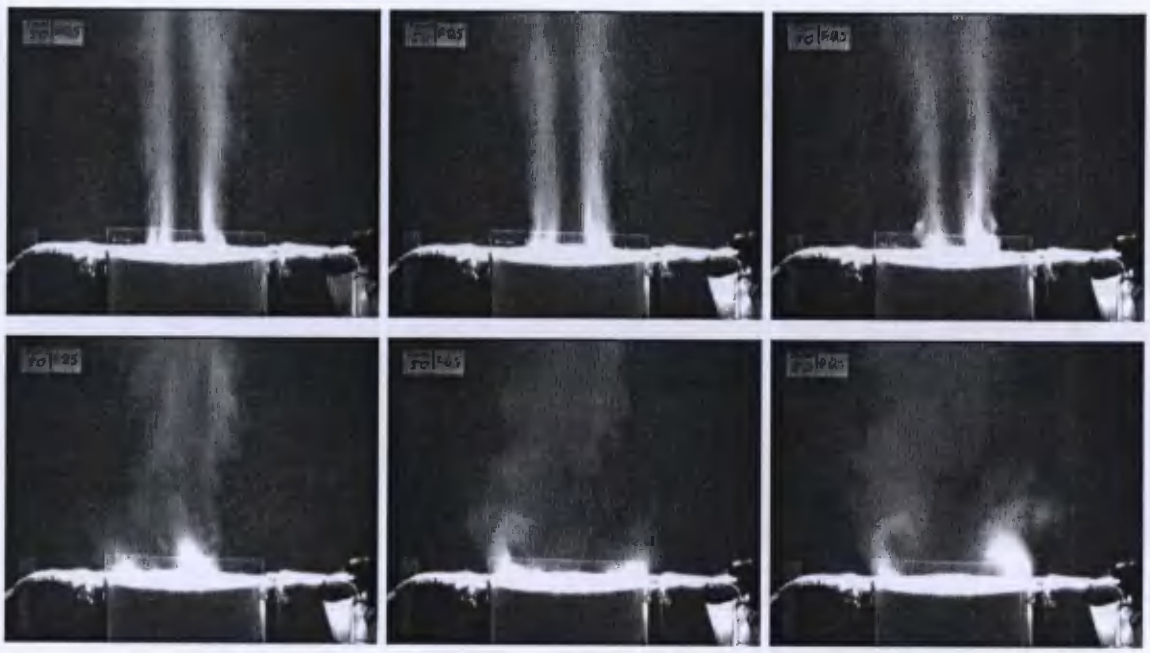
Rys. 7.8. Wizualizacja wypływu strumienia w stanie ustalonym drugim dla $I_w = 100$ (pomiar 22).



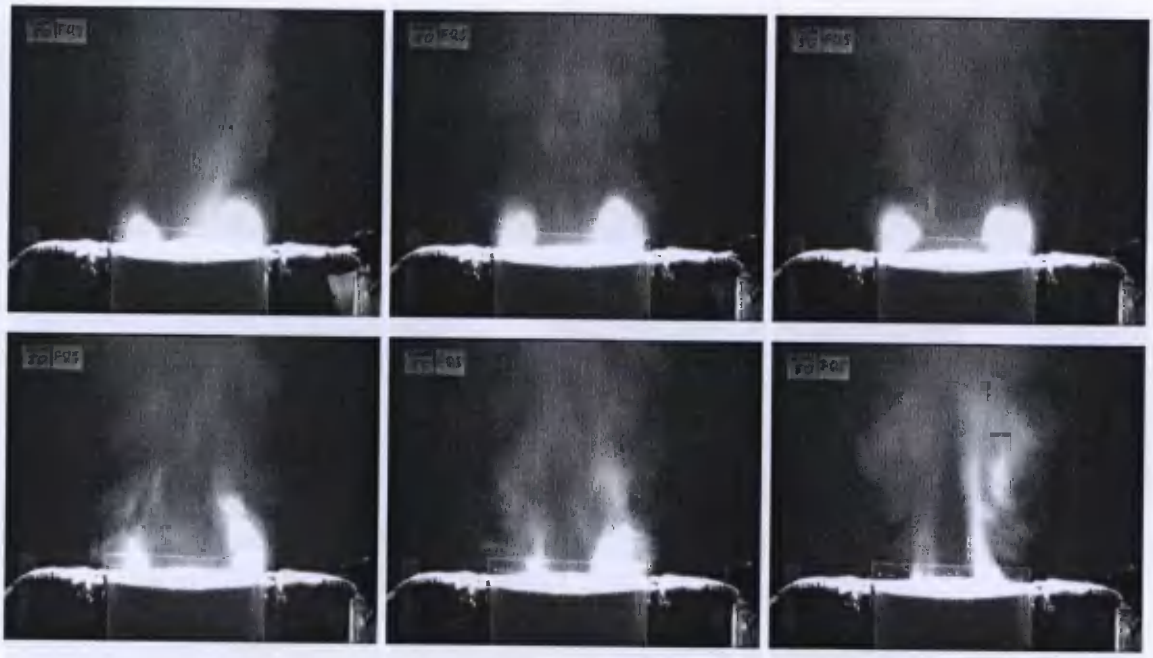
Rys. 7.9. Wizualizacja wypływu strumienia w stanie ustalonym drugim dla $I_w = 50$ (pomiar 230).



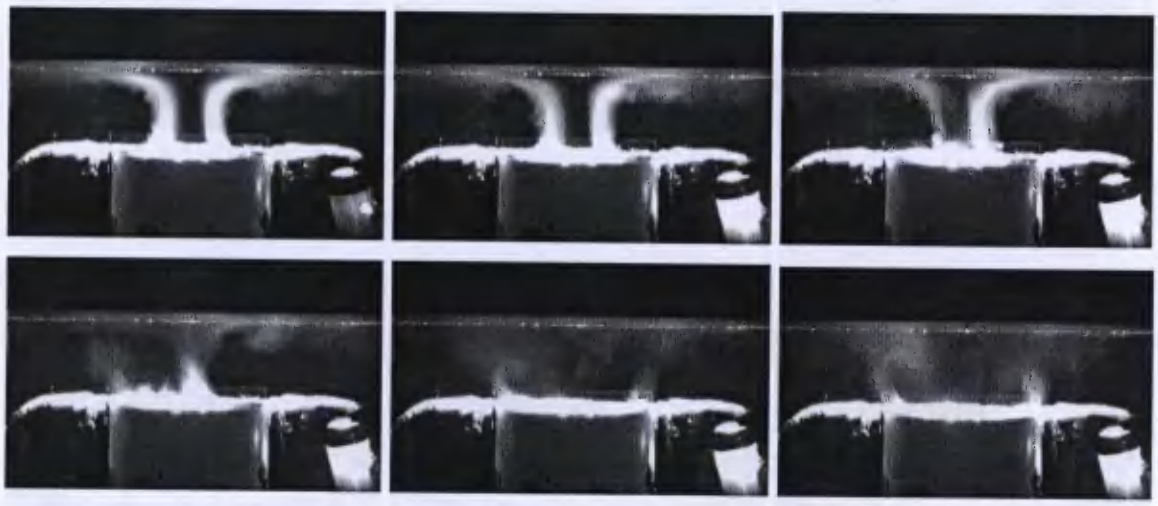
Rys. 7.10. Porównanie wypływu strumienia w stanie ustalonym drugim i pierwszym dla $l_w = 75\text{mm}$, a) pomiar 138, b) pomiar137.



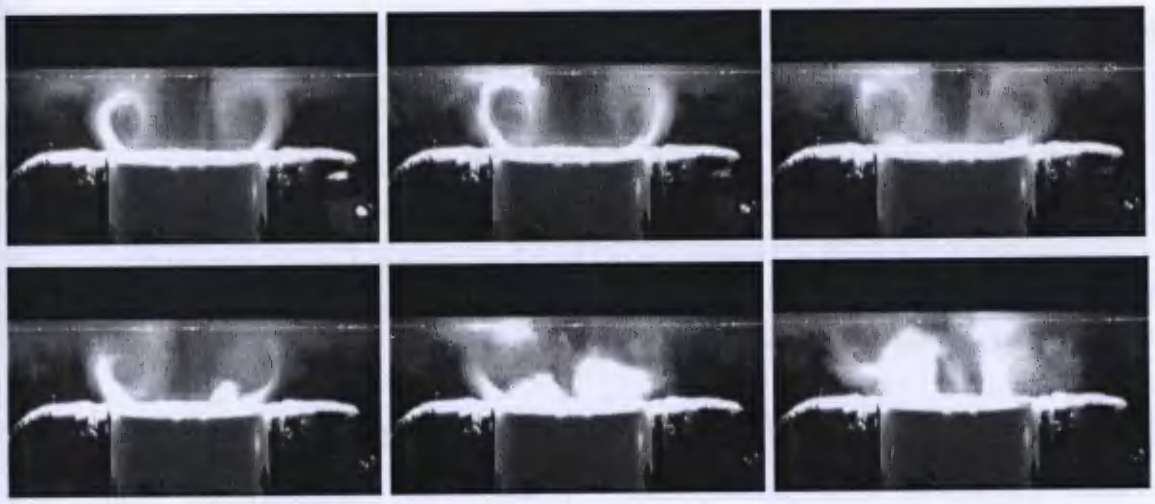
Rys. 7.11. Wybrane kadry filmu z wizualizacji zmiany przepływu ze stanu pierwszego do drugiego dla wypływu swobodnego bez ściany – pomiar 231⇒232.



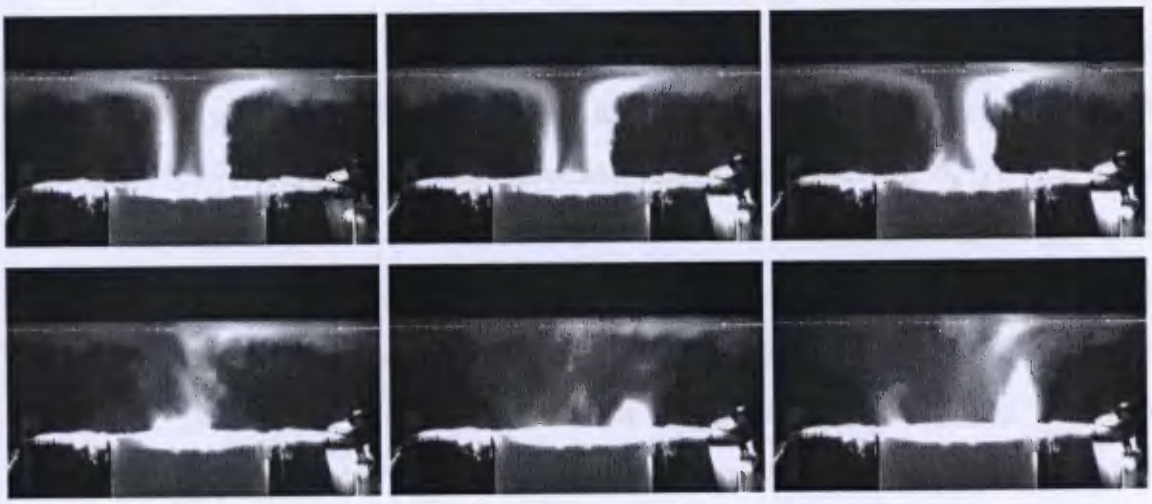
Rys. 7.12. Wybrane kadry filmu z wizualizacji zmiany przepływu ze stanu drugiego do pierwszego dla wypływu swobodnego bez ściany – pomiar 232⇒231.



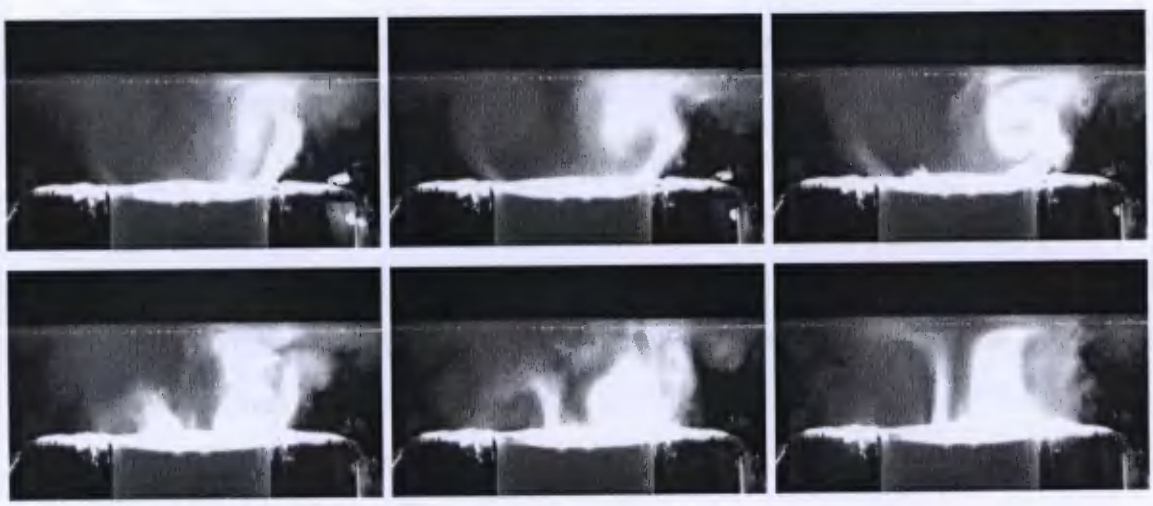
Rys. 7.13. Wybrane kadry filmu z wizualizacji zmiany przepływu ze stanu pierwszego do drugiego dla pomiaru o numerze 106.



Rys. 7.14. Wybrane kadry filmu z wizualizacji zmiany przepływu ze stanu drugiego do pierwszego dla pomiaru o numerze 106.



Rys. 7.15. Wybrane kadry filmu z wizualizacji zmiany przepływu ze stanu pierwszego do drugiego dla pomiaru o numerze 8.



Rys. 7.16. Wybrane kadry filmu z wizualizacji zmiany przepływu ze stanu drugiego do pierwszego dla pomiaru o numerze 8.

Tabela. 7.2. Zestawienie obliczonych wartości czasu trwania (w sekundach) przepływu powietrza w stanach ustalonych dla jednego okresu drgań.

Częstotliwość fc [Hz]	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	Częstotliwość fc [Hz]
Okres drgań T=1/f [s]	2,0	1,0	0,667	0,50	0,40	0,333	0,286	Okres drgań T=1/f [s]
Czas 1 ST PWM50%	1,0	0,5	0,333	0,25	0,20	0,167	0,143	Czas 2 ST PWM50%
Czas 1 ST PWM20%	1,6	0,8	0,533	0,40	0,32	0,267	0,228	Czas 2 ST PWM80%
Czas 1 ST PWM80%	0,4	0,2	0,133	0,10	0,08	0,067	0,057	Czas 2 ST PWM20%

Badania wizualizacyjne wykazały, że dla częstotliwości f_c wyższej od 2Hz stosowanie minimalnych ($PWM = 20$) i maksymalnych ($PWM = 80$) wartości stopnia wypełnienia sygnału nie pozwala osiągać pełnych zmian wektora kierunku opływu ściany przez strumień. Pojawiają się okresowe wiry uderzające w ścianę. Dla stopnia wypełnienia sygnału $PWM = 80$, to jest 80% czasu wypływu strumienia w stanie ustalonym drugim w stosunku do całego okresu drgań dla częstotliwości powyżej 2,5 Hz, praktycznie niezauważalne jest opływanie ściany w stanie ustalonym pierwszym. Trudności w zaobserwowaniu zmian przepływu dla niskich i wysokich wartości PWM przy wyższych wartościach częstotliwości nie wynikają tylko z matematycznie obliczonego krótkiego czasu trwania danego stanu ustalonego. Wynikają także z parametrów konstrukcyjnych kanału strumienia sterującego oraz zjawisk przepływowych w dyszy, szczególnie wzajemnego oddziaływania strumienia sterującego na strumień główny i efektu Coanda warunkującego wypływ w stanie ustalonym pierwszym.

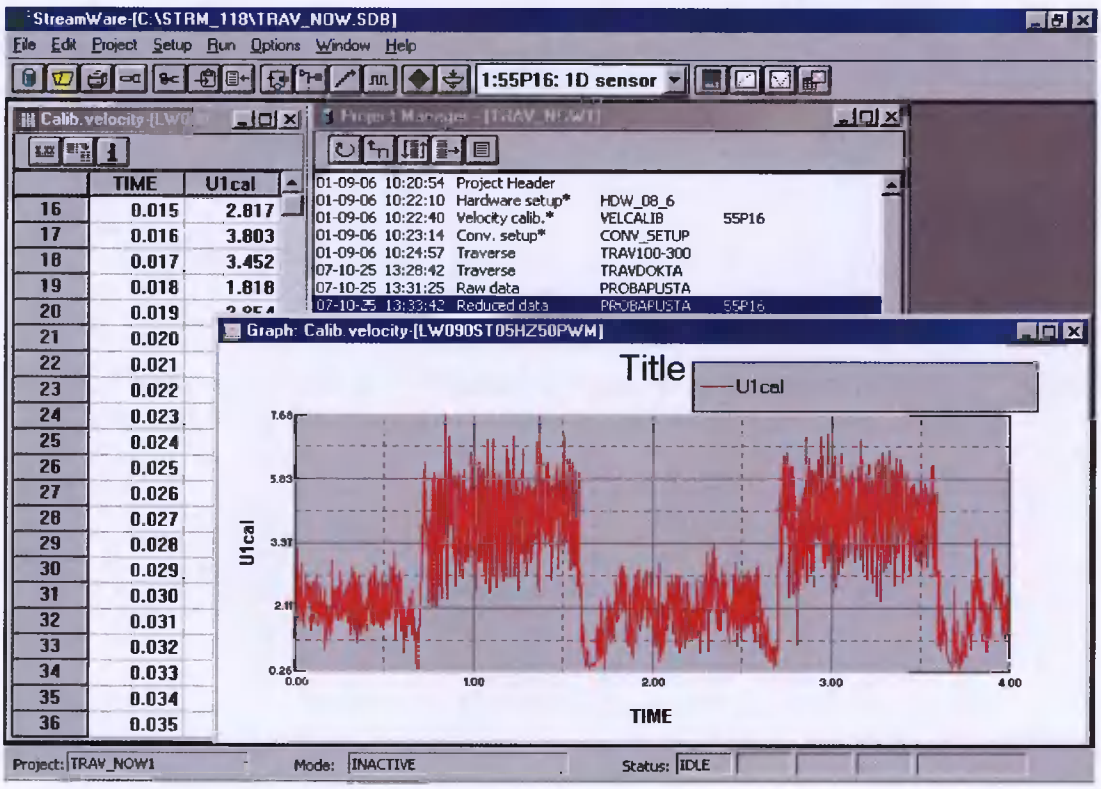
Układ wizualizacji i rejestracji przepływu powietrza wyposażony był w lampę sygnalizującą załączenie i wyłączenie zaworu elektropneumatycznego przełączającego strumień sterujący.

Dokładność pomiaru czasu opóźnienia przełączenia się strumienia wyjściowego z dyszy wynika z parametrów zastosowanej kamery. Obraz rejestrowany składa się z pięćdziesięciu ramek zawierających linie parzyste i nieparzyste. Pojedyncza klatka filmu składa się z dwóch takich ramek. Średni czas powstawania jednej klatki filmu równy jest czterem milisekundom. Wynika z tego, że czas przełączania strumienia wyjściowego z dyszy można określić z dokładnością do czterech milisekund

Analizując rysunki od 7.13 do 7.16, przedstawiające wybrane klatki filmów i pozostałe wyniki z badań wizualizacyjnych można stwierdzić, że średni czas przełączenia się strumienia głównego ze stanu ustalonego pierwszego do drugiego wynosił 16 milisekund. Czas przełączania się strumienia ze stanu ustalonego drugiego do pierwszego wynosił 20 milisekund.

7.3.2 Rozkład prędkości powietrza za dyszą

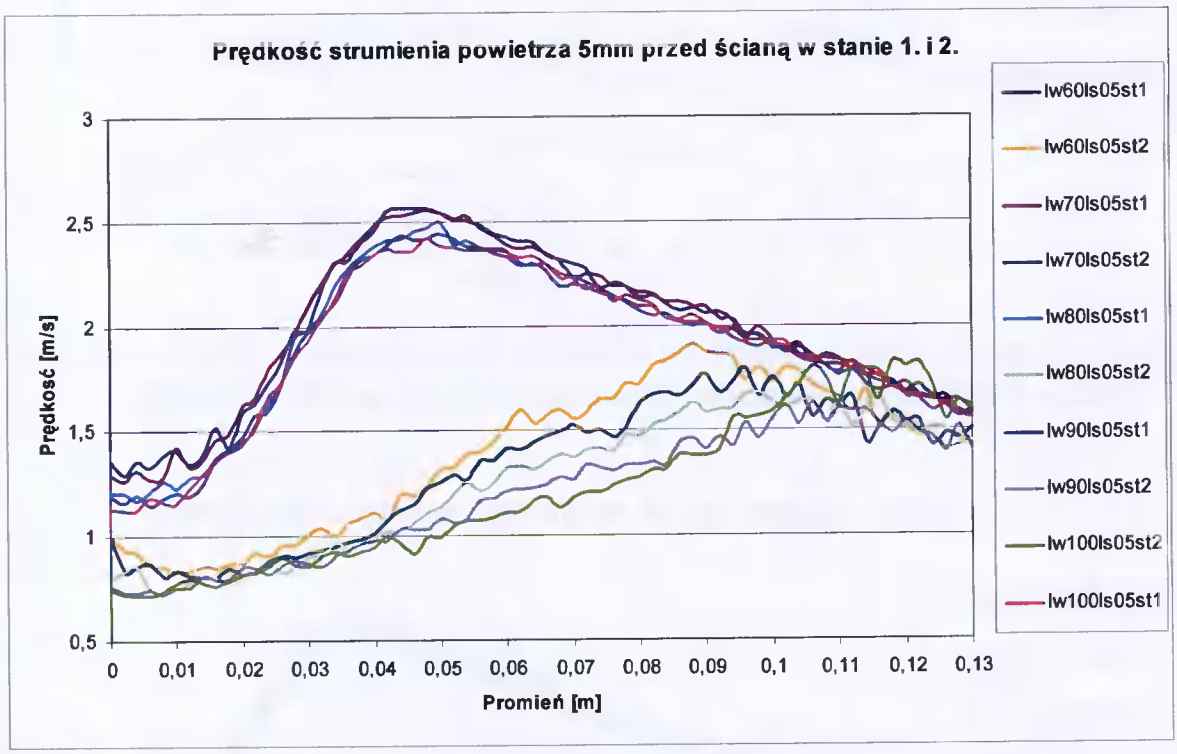
Pomiary prędkości powietrza wypływającego z dyszy przeprowadzono zarówno dla stanu ustalonego pierwszego jak i drugiego. Zakres pomiaru wynosił $r = \pm 130 mm$ z krokiem $2 mm$. Częstotliwość próbkowania wynosiła $f_s = 1000 Hz$. Liczba pomiarów $n = 4000$. Pomiary prowadzono dla odległości sondy od ściany $l_s = 5 mm$. Uzyskane wyniki poddano obróbce w arkuszu kalkulacyjnym MS Excel. Poniżej zamieszczono rysunek z oknem aplikacji do pomiaru prędkości wraz z przykładowym wykresem pomiaru prędkości.



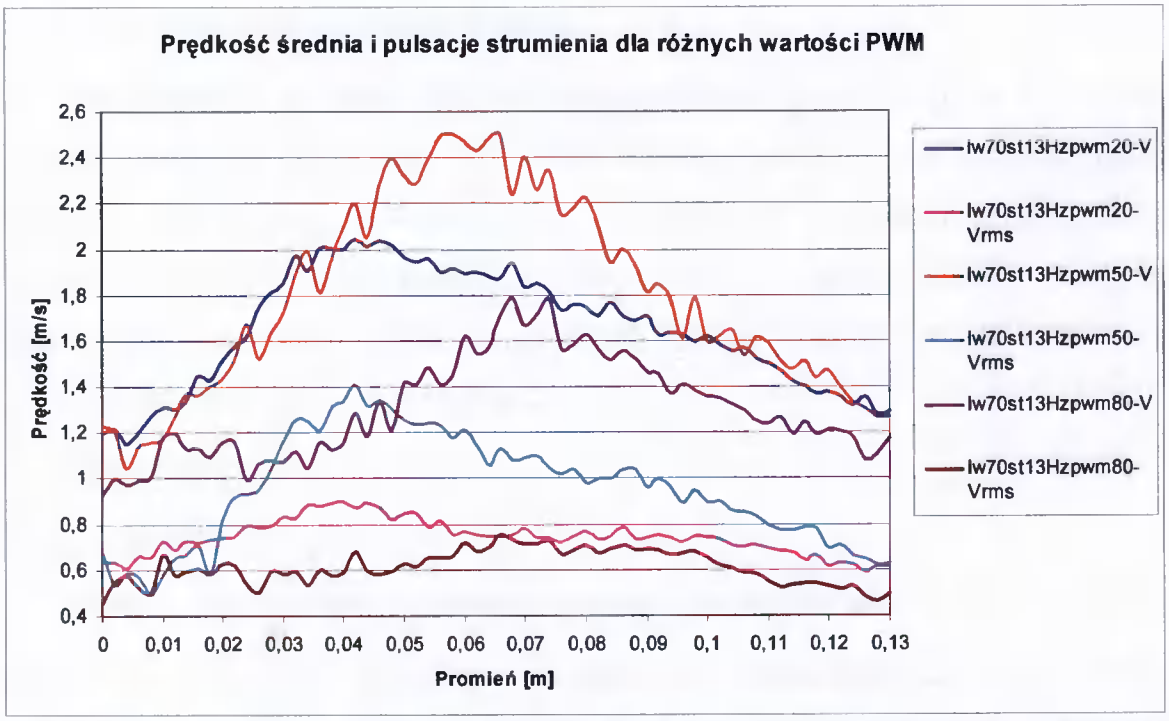
Rys. 7.17. Widok okna aplikacji StreamWare do obsługi termoanemometru podczas badania prędkości powietrza wypływającego z dyszy.

Widoczny na rysunku 7.17 przebieg zmian napięcia sondy termoanemotrycznej (kolor czerwony) przedstawia pomiar prędkości powietrza w jednym punkcie pomiarowym. Jest to wynik zarejestrowany dla częstotliwości strumienia sterującego

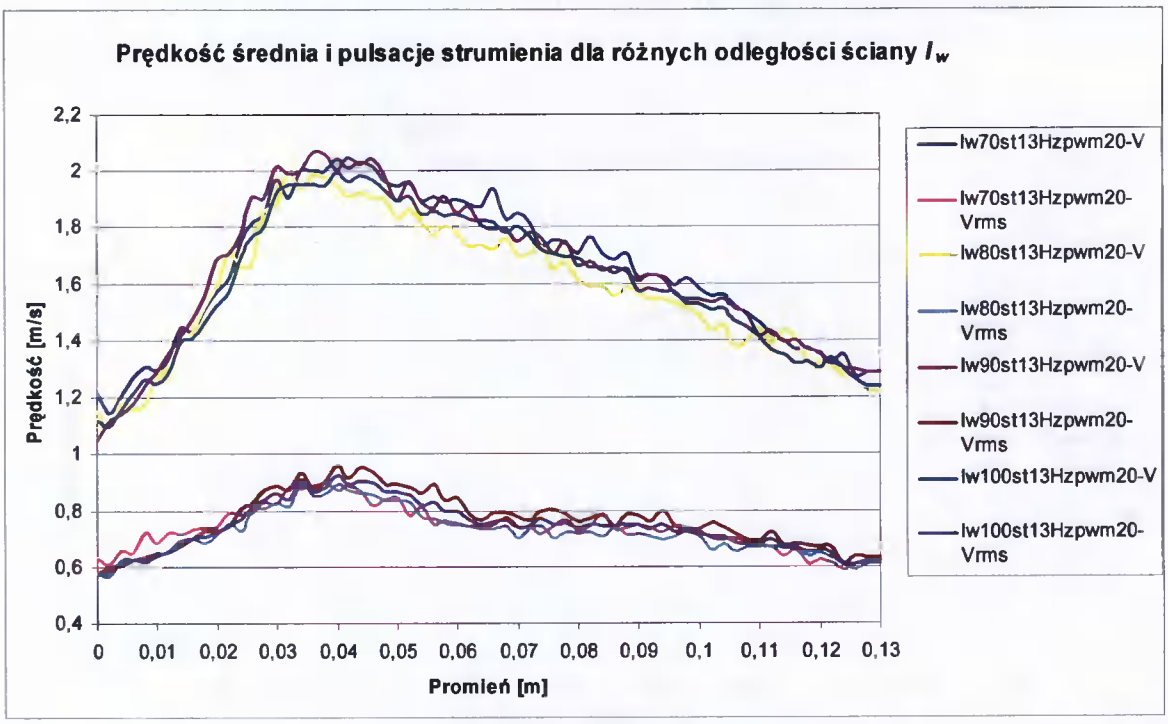
$f_c = 0{,}5\,Hz$, dla odległości ściany $l_w = 90\,mm$, stopnia wypełnienia sygnału $PWM = 50$ w punkcie o promieniu $r = 50\,mm$. Na poniższych rysunkach zastosowano oznaczenia prędkości i pulsacji strumienia zaczerpnięte z oprogramowania StreamLine. Prędkość średnia oznaczona była literą V, pulsacje strumienia oznaczono $Vrms$. Oznaczenia te występują po opisie parametrów przepływu.



Rys. 7.18. Prędkość powietrza w odległości 5 mm przed ścianą dla różnych odległości ściany od dyszy dla przepływu w stanie ustalonym pierwszym i drugim.



Rys. 7.19. Prędkość średnia i pulsacje strumienia dla różnych wartości stopnia wypełnienia sygnału *PWM* dla wybranej częstotliwości strumienia sterującego $f_c = 1{,}3\,Hz$.



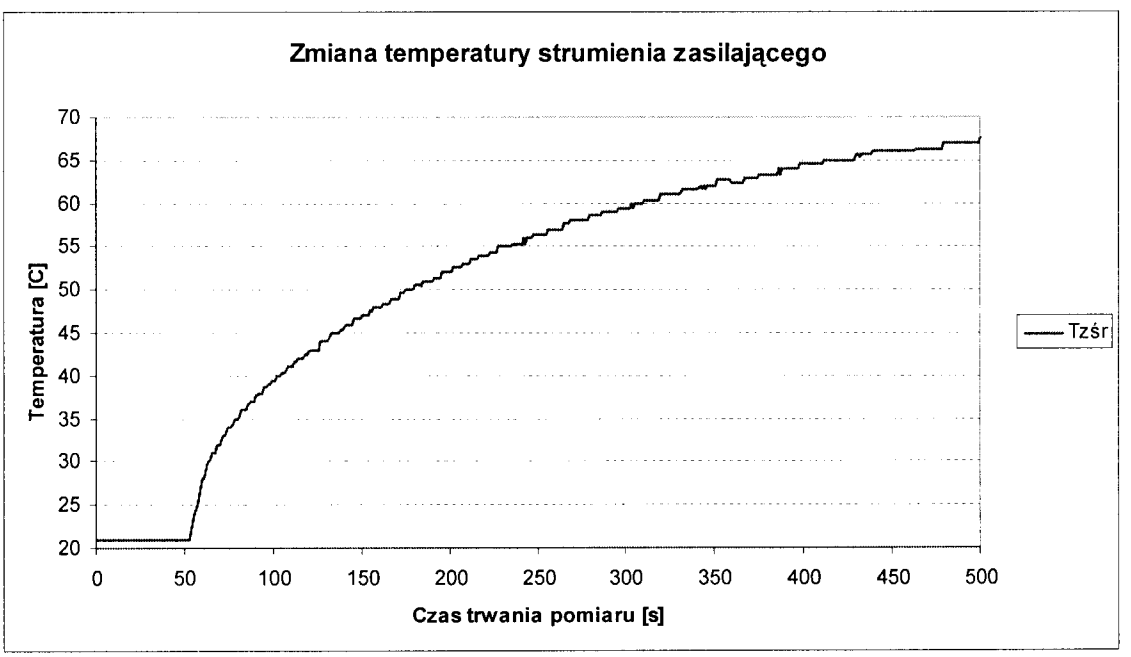
Rys. 7.20. Prędkość średnia i pulsacje strumienia powietrza dla różnych wartości odległości ściany od dyszy, dla $PWM = 20$ i $f_c = 1{,}3\,Hz$.

7.3.3 Wyniki badań termograficznych

Na podstawie wyników badań wizualizacyjnych stwierdzono, że dla częstotliwości strumienia sterującego o wartości większej od 2 Hz nie zachodzi pełne przesterowanie strumienia wyjściowego. W badaniach termograficznych zmniejszony był zakres wartości częstotliwości strumienia sterującego. Badania termograficzne przeprowadzone były dla następujących wartości wielkości wejściowych:

- $f_c = 0{,}5; 0{,}8; 0{,}9; 1{,}0; 1{,}1; 1{,}2; 1{,}3; 1{,}5\ oraz\ 2{,}0\ Hz$,
- $PWM = 20; 50; 80$,
- $l_w = 70; 80; 90; 100\ mm$.

Czas t_p trwania całego pomiaru wynosił 8 minut i 20 sekund. Czas ten wynikał z czasu uzyskania 20 przebiegów skanera termograficznego. Układ ogrzewania strumienia głównego załączany był w 50 sekundzie pomiaru, po uzyskaniu dwóch pomiarów temperatury początkowej ściany oporowej. Pomiary powtarzano wielokrotnie. Przebieg zmiany temperatury strumienia głównego wpływającego do dyszy przedstawiony jest na rysunku 7.21.

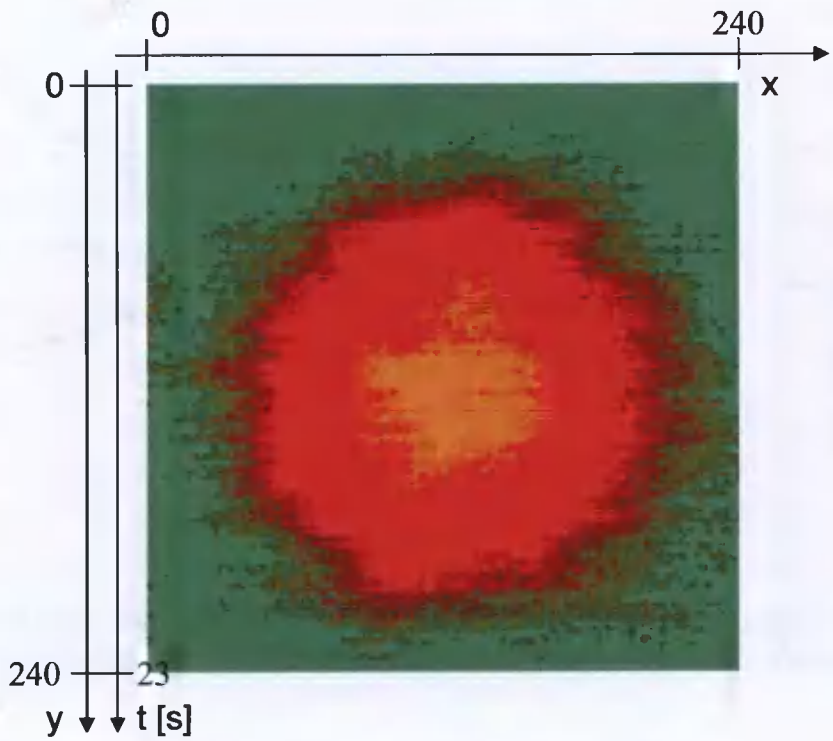


Rys. 7.21. Wykres zmiany temperatury strumienia głównego w czasie trwania procesu ogrzewania ściany.

Wyniki pomiarów temperatury ściany opływanej przez powietrze można przedstawić:

- w postaci obrazu termograficznego,
- w postaci tabeli wartości temperatury.

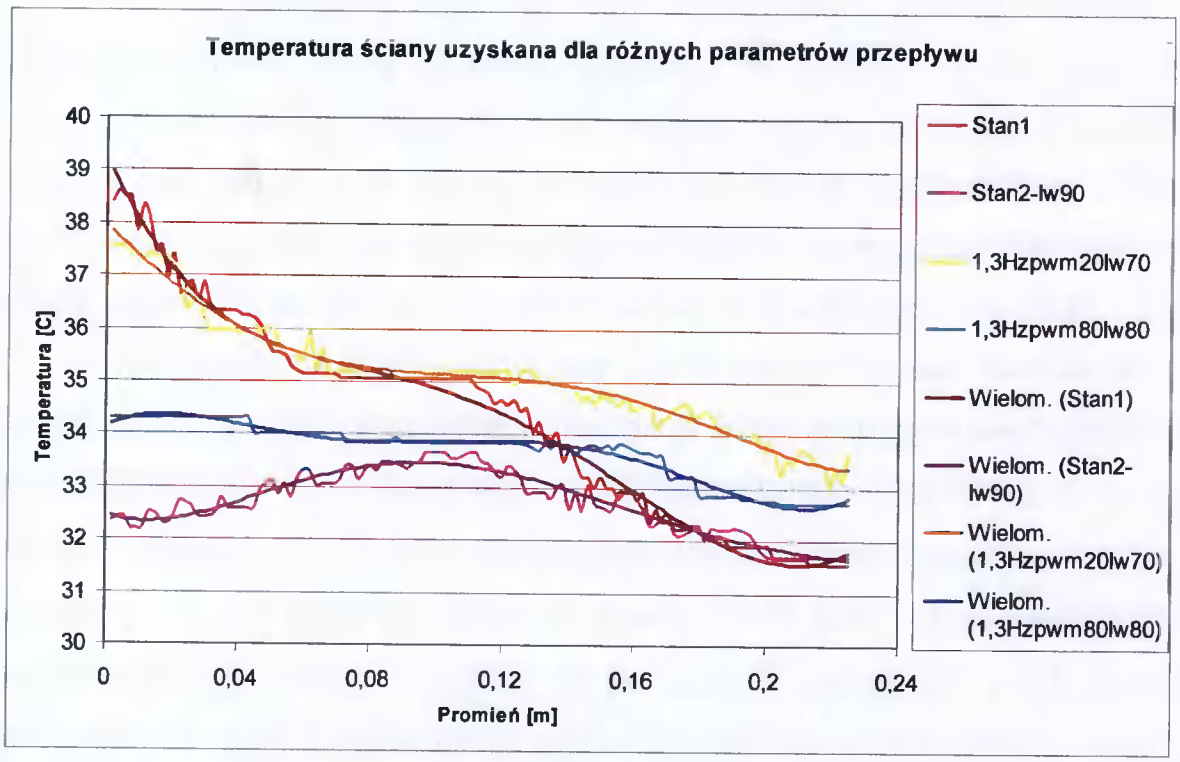
Wyniki pomiarów przedstawione w postaci kolorowego obrazu graficznego, na którym poszczególne zakresy temperatury reprezentowane są przez odpowiedni kolor dają się łatwiej analizować a następnie interpretować. Ponieważ urządzeniem pomiarowym jest skaner termograficzny, wynik pojedynczego pomiaru składa się z 240 linii, w których jest 240 punktów pomiarowych. Czas takiego pojedynczego pomiaru wynosi 23 sekundy. Gdyby wynik pomiaru przedstawić we współrzędnych kartezjańskich, z uwzględnieniem czasu trwania pomiaru, układ osi wielkości x, y oraz czasu t wyglądałby jak na rysunku 7.22.



Rys. 7.22. Rozkład temperatury na ścianie oporowej dla pierwszego stanu ustalonego, uzyskany w ostatnim pomiarze.

Ponieważ badana dysza jest osiowosymetryczna, wyniki pomiarów termograficznych przedstawione będą w funkcji promienia. Wartość promienia wynika z wielkości obszaru skanowanego podczas pomiarów. Wielkość obszaru badanego wynosiła $A \times B = 0{,}45m \times 0{,}45m$. Z wielkości obszaru i rozdzielczości kamery termograficznej wynika, że promień obszaru badanego wynosi $r = 0{,}225m$, a punkty

pomiarowe rozmieszczone były co $r_i = 0{,}001875\,m$. Wszystkie wyniki pomiarów eksportowane były do plików tekstowych. Pliki te były następnie obrabiane w arkuszu kalkulacyjnym MS Excel. Na poniższym rysunku (rys. 7.23) przedstawiono wybrane (charakterystyczne z punktu widzenia dalszej analizy przepływu ciepła i współczynnika nierównomierności rozkładu temperatury δ_T) wyniki rozkładu temperatury na badanej ścianie. Analiza przedstawionego rysunku zamieszczona jest w punkcie 7.4.



Rys. 7.23. Wyniki pomiarów temperatury ściany opływanej przez ogrzewane powietrze, uzyskane dla różnych parametrów przepływu, wraz z aproksymacją funkcją 5.-rzędu.

7.4 Podsumowanie i wnioski z badań doświadczalnych

Na rysunku 7.6 przedstawiona jest wizualizacja przepływu w stanie ustalonym pierwszym bez ściany oporowej. Widoczna jest koncentracja strumienia wokół osi symetrii dyszy. Brak oparów parafiny w centralnym obszarze strumienia spowodowany jest przez łącznik elementów wytwarzających opary wizualizacyjne. W bezpośrednim otoczeniu osi symetrii dyszy za stożkiem wewnętrznym występuje spadek prędkości strumienia powietrza. W związku z małą wartością składową promieniową prędkości strumienia w stanie ustalonym pierwszym nie następuje

mieszanie się strumienia. W pobliżu stożka zewnętrznego widoczny jest wsteczny ruch powietrza. Wypływający wzdłuż rdzenia strumień powietrza wywołuje lokalny spadek ciśnienia we wnętrzu dyszy w okolicy stożka zewnętrznego. Powoduje to „zasysanie" powietrza do wnętrza dyszy. W miarę zwiększania się odległości od dyszy spada prędkość średnia strumienia powietrza. Wraz ze wzrostem odległości zmniejsza się również procentowy spadek prędkości w osi dyszy v_{r0} do prędkości w odległości $r = 20mm$ od osi dyszy v_{r20} [80, 84].

W stanie ustalonym drugim zachodzi istotna zmiana charakteru wypływu powietrza z dyszy, zależna od ściany oporowej. Na rysunku 7.7 widoczna jest wizualizacja przepływu powietrza w stanie ustalonym drugim bez ściany oporowej. Widoczny na wyjściu z dyszy wir toroidalny ma środek umiejscowiony blisko końca dyszy. Umieszczenie ściany za dyszą powoduje „przyklejenie" się wiru do ściany i odsunięcie się środka wiru od końca dyszy w stronę ściany (rys. 7.8).

Przeprowadzona analiza numeryczna i wcześniejsze badania doświadczalne doprowadziły do zaproponowania zmian parametrów konstrukcyjnych spojlera umieszczonego wewnątrz dyszy oraz stożka zewnętrznego (kąta tworzącej α_{stz}). Wyniki wizualizacji przepływu dla różnych wartości częstotliwości strumienia sterującego f_c oraz stopnia wypełnienia sygnału PWM potwierdzają poprawność zaproponowanych zmian. Uzyskano bardzo małe i praktycznie rzecz biorąc nieróżniące się czasy przełączania się stanu ustalonego wypływu powietrza z dyszy osiowosymetrycznej, której cechą charakterystyczną jest rdzeń wewnętrzny z kanałem doprowadzającym strumień sterujący.

Na rysunku 7.18 przedstawiono wyniki pomiarów (5mm przed ścianą) prędkości średniej strumienia powietrza opływającego ścianę w stanie ustalonym pierwszym i drugim dla różnych wartości l_w / D_{zd}. Widoczny jest niewielki wpływ zmiany odległości ściany na wartość prędkości. Wraz ze wzrostem odległości nieznacznie zmniejsza się wartość prędkości średniej. Wraz ze wzrostem wartości promienia różnice prędkości maleją. Inaczej wygląda to dla prędkości przy przepływie w stanie ustalonym drugim. Wraz ze wzrostem wartości promienia wzrastają różnice pomiędzy wartościami prędkości dla zwiększającej się odległości ściany od dyszy. Zakres zmian wartości promienia, dla którego uzyskano maksymalne wartości

prędkości jest większy dla przepływu w stanie ustalonym drugim. Wraz ze wzrostem odległości ściany wzrasta wartość promienia, dla której uzyskano maksymalną wartość średnią prędkości. Na rysunku 7.19 przedstawiono wpływ zmiany stopnia wypełnienia sygnału sterującego PWM. Wraz ze wzrostem wartości stopnia wypełnienia sygnału wzrasta wartość promienia, przy którym uzyskuje się wartości maksymalne prędkości. Maksymalną wartość średnią prędkości uzyskano dla $PWM = 50$, minimalną wartość średnią prędkości uzyskano dla $PWM = 80$. Dla największych wartości promienia najwyższą wartość średnią prędkości uzyskano dla $PWM = 80$. Z pomiarów prędkości średniej wynika, że dla ściany umieszczonej w odległości $l_w = 80\,mm$ dla różnych częstotliwości strumienia sterującego f_c wartości prędkości średniej są niższe od wartości prędkości uzyskanych dla innych wartości l_w, czego przykładem jest wykres prędkości powietrza przedstawiony na rysunku 7.20.

Wyniki badań termograficznych wskazują na wpływ założonych parametrów na jakość procesu wymiany ciepła. Nie jest to jednak wpływ tak istotny, jak autor zakładał. Z punktu widzenia jakości procesu wymiany ciepła, dla niektórych wartości parametrów wejściowych uzyskano pogorszenie się (w odniesieniu do przepływu powietrza w stanie ustalonym pierwszym) parametrów pracy dyszy. Dokładną analizę uzyskanych wyników zawierał będzie następny rozdział. Wykres temperatury ściany z rysunku 7.23 przedstawia wyniki pomiarów uzyskane dla różnych parametrów przepływu. Są to wyniki najbardziej charakterystyczne. W stanie ustalonym pierwszym (kolor czerwony) uzyskano największą wartość współczynnika nierównomierności rozkładu temperatury δ_T. Wstanie ustalonym drugim (kolor fioletowy) uzyskano najmniejszą wartość ciepła przekazanego do ściany od opływającego ją powietrza. Dla przepływu o parametrach $f_c = 1{,}3\,Hz$, $PWM = 20$ oraz $l_w / D_{zd} = 0{,}466667$ (kolor żółty) otrzymano najwyższą wartość wskaźnika procesu wymiany ciepła w_Q. Dla przepływu o parametrach $f_c = 1{,}3\,Hz$, $PWM = 80$ oraz $l_w / D_{zd} = 0{,}533333$ otrzymano najniższą wartość współczynnika nierównomierności rozkładu temperatury δ_T. Uzyskane wyniki pomiarów termograficznych w postaci barwnych obrazów rozkładu temperatury nie wykazują wpływu nóżek spojlera (wywoływanych przez nie zakłóceń przepływu) na przenoszenie ciepła. Wynika to

głównie z dobrych właściwości materiału ściany (przewodność cieplna aluminium $\lambda = 237\ [J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}]$. Nie bez znaczenia pozostaje także zmniejszenie liczby nóżek z początkowych ośmiu do czterech oraz zmniejszenie szerokości nóżki spojlera do wartości $a_{nsp} = 4\,mm$.

Określenie wpływu parametrów przepływu na proces wymiany ciepła 86

8 Określenie wpływu parametrów przepływu na proces wymiany ciepła

8.1 Określenie wpływu zmian parametrów na ilość przenoszonego ciepła

Korzystając z ogólnego wzoru

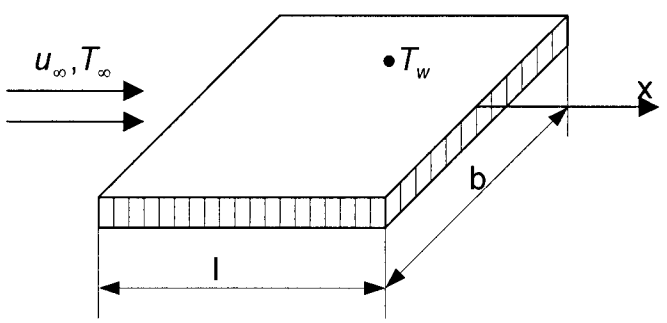
$$Q_c = \Delta T\, m\, c_p \ [J] \tag{8.1}$$

gdzie: ΔT - różnica temperatury $[K]$

m - masa elementu $[kg]$

c_p - ciepło właściwe materiału $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

można wyznaczyć całkowitą ilość ciepła przejętego przez określony element o danej masie. Wzór ten dotyczy przypadku, gdy cała masa elementu zmienia swą temperaturę.



Rys. 8.1. Schemat przejmowania ciepła przy opływie płaskiej płyty [29].

Dla przypadku opływu płaskiej dwuwymiarowej powierzchni (rys. 8.1) całkowitą ilość ciepła przekazaną w miejscu x w jednostce czasu przedstawić można za pomocą wzoru:

$$\dot{Q}_c = b \int_0^l \dot{q}(x) dx \tag{8.2}$$

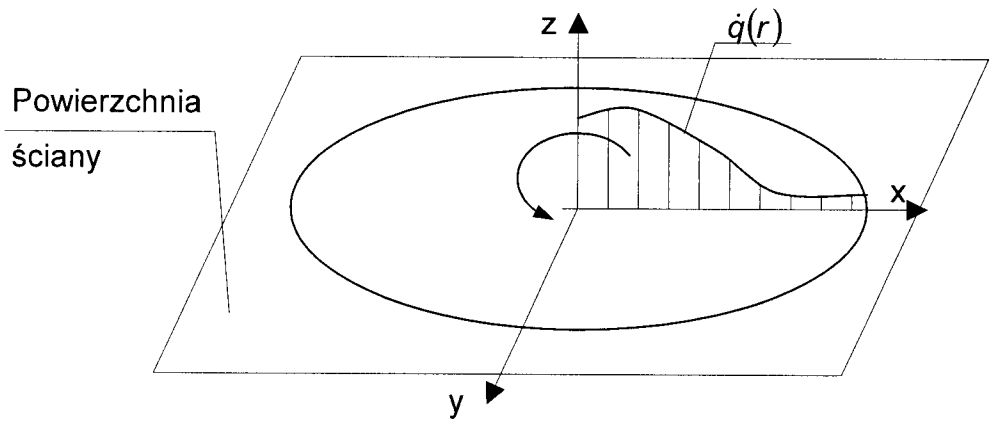
W powyższym wzorze lokalny strumień ciepła w odniesieniu do współczynnika przejmowania ciepła α dla warunków brzegowych na powierzchni płyty [29] wynosi:

$$\dot{q}(x) = \alpha(x)\left(T_w - T_\infty\right) \tag{8.3}$$

Ponieważ badany proces dotyczy osiowosymetrycznego przepływu strumienia płynu, całkowity strumień ciepła $\dot{Q}$ można wyznaczyć według:

$$\dot{Q} = \int_S \int \dot{q}(r) dr \tag{8.4}$$

Powyższy wzór jest całką funkcji lokalnego strumienia ciepła względem promienia badanego obszaru, w której całkowanie następuje po obszarze pod funkcją $\dot{q}(r)$. Schemat rozkład funkcji oraz współrzędne układu przedstawiono na rysunku 7.2. Model ściany przedstawiono we współrzędnych kartezjańskich, a funkcję strumienia ciepła odniesiono do promienia. Środek układu kartezjańskiego widocznej ściany umieszczony jest w osi symetrii badanej dyszy.



Rys. 8.2. Schemat współrzędnych i przykładowy rozkład funkcji gęstości strumienia ciepła w pierwszym stanie ustalonym.

Ponieważ przepływ powietrza jest zmienny (występują oscylacje zależne od f_c) rozkład funkcji $\dot{q}(r)$ nie jest stały w czasie. Jest inny dla stanu ustalonego pierwszego i stanu ustalonego drugiego. Aby obliczyć wartość strumienia ciepła w określonym obszarze ściany oporowej, należy znać oczywiście funkcję $\dot{q}(r)$.

W badanym przypadku znany jest rozkład temperatury ściany w funkcji promienia T_r. Na podstawie wyników pomiarów wyznaczyć można jednostkową ilość ciepła wg wzoru:

$$dQ = c_p \cdot \Delta T_{ri} \cdot dm \tag{8.5}$$

Całkowita ilość ciepła przejętego przez ścianę w określonym czasie trwania procesu ogrzewania obliczona może być z zależności:

$$Q = \sum_{ri=1}^{120} Q_r \tag{8.6}$$

Tabela 8.1. Zestawienie wyników obliczeń ilości ciepła przejętego przez ścianę od opływającego ją powietrza i wartości współczynnika nierównomierności rozkładu temperatury.

Parametry przepływu	Ilość ciepła Q [J]	Wsp. δ_T	Parametry przepływu	Ilość ciepła Q [J]	Wsp. δ_T
Stan1-lw70	1234,237	0,2008	Stan2-lw70	1113,016	0,0972
Stan1-lw80	1158,083	0,1746	Stan2-lw80	978,452	0,0511
Stan1-lw90	1215,264	0,1941	Stan2-lw90	1063,551	0,0681
Stan1-lw100	1195,326	0,1825	Stan2-lw100	1035,266	0,0530
Stan12-05hz-pwm20-lw70	1157,148	0,1072	Stan12-08hz-pwm20-lw70	1125,266	0,1029
Stan12-05hz-pwm20-lw80	1093,170	0,1264	Stan12-08hz-pwm20-lw80	1092,249	0,1001
Stan12-05hz-pwm20-lw90	1137,257	0,1366	Stan12-08hz-pwm20-lw90	1163,063	0,1015
Stan12-05hz-pwm20-lw100	1117,265	0,1341	Stan12-08hz-pwm20-lw100	1125,266	0,0991
Stan12-05hz-pwm50-lw70	1113,487	0,1011	Stan12-08hz-pwm50-lw70	1103,987	0,1018
Stan12-05hz-pwm50-lw80	1034,257	0,1321	Stan12-08hz-pwm50-lw80	1014,713	0,0972
Stan12-05hz-pwm50-lw90	1074,327	0,1034	Stan12-08hz-pwm50-lw90	1027,583	0,1045
Stan12-05hz-pwm50-lw100	1065,258	0,0891	Stan12-08hz-pwm50-lw100	989,2545	0,0955
Stan12-05hz-pwm80-lw70	1070,139	0,0835	Stan12-08hz-pwm80-lw70	1084,659	0,0958
Stan12-05hz-pwm80-lw80	997,909	0,0877	Stan12-08hz-pwm80-lw80	999,125	0,0954
Stan12-05hz-pwm80-lw90	1048,797	0,0736	Stan12-08hz-pwm80-lw90	1028,254	0,0836
Stan12-05hz-pwm80-lw100	988,2649	0,0792	Stan12-08hz-pwm80-lw100	1001,254	0,0780
Stan12-09hz-pwm20-lw70	1137,847	0,1029	Stan12-10hz-pwm20-lw70	1210,459	0,1078
Stan12-09hz-pwm20-lw80	1085,254	0,1006	Stan12-10hz-pwm20-lw80	1141,897	0,1239
Stan12-09hz-pwm20-lw90	1115,256	0,1025	Stan12-10hz-pwm20-lw90	1175,457	0,1031
Stan12-09hz-pwm20-lw100	1099,327	0,0975	Stan12-10hz-pwm20-lw100	1096,125	0,1162
Stan12-09hz-pwm50-lw70	1124,126	0,1029	Stan12-10hz-pwm50-lw70	1159,659	0,1115
Stan12-09hz-pwm50-lw80	1062,624	0,1031	Stan12-10hz-pwm50-lw80	1098,524	0,1179
Stan12-09hz-pwm50-lw90	1093,179	0,1071	Stan12-10hz-pwm50-lw90	1127,255	0,1018
Stan12-09hz-pwm50-lw100	1050,896	0,1046	Stan12-10hz-pwm50-lw100	1106,637	0,1092
Stan12-09hz-pwm80-lw70	1090,754	0,0959	Stan12-10hz-pwm80-lw70	1120,963	0,0916
Stan12-09hz-pwm80-lw80	985,2658	0,0986	Stan12-10hz-pwm80-lw80	1033,426	0,1022
Stan12-09hz-pwm80-lw90	1059,327	0,0891	Stan12-10hz-pwm80-lw90	1064,265	0,0669
Stan12-09hz-pwm80-lw100	1037,745	0,0864	Stan12-10hz-pwm80-lw100	999,4587	0,0671
Stan12-11hz-pwm20-lw70	1217,897	0,1029	Stan12-12hz-pwm20-lw70	1286,326	0,1226
Stan12-11hz-pwm20-lw80	1133,743	0,1032	Stan12-12hz-pwm20-lw80	1165,326	0,1297
Stan12-11hz-pwm20-lw90	1179,59	0,0997	Stan12-12hz-pwm20-lw90	1212,357	0,1146
Stan12-11hz-pwm20-lw100	1166,412	0,0944	Stan12-12hz-pwm20-lw100	1179,126	0,0955
Stan12-11hz-pwm50-lw70	1186,125	0,1044	Stan12-12hz-pwm50-lw70	1235,987	0,1039
Stan12-11hz-pwm50-lw80	1121,327	0,0909	Stan12-12hz-pwm50-lw80	1144,461	0,1056
Stan12-11hz-pwm50-lw90	1149,478	0,1037	Stan12-12hz-pwm50-lw90	1177,215	0,0939
Stan12-11hz-pwm50-lw100	1113,184	0,0992	Stan12-12hz-pwm50-lw100	1139,548	0,0913
Stan12-11hz-pwm80-lw70	1161,677	0,0887	Stan12-12hz-pwm80-lw70	1185,479	0,1057
Stan12-11hz-pwm80-lw80	1117,146	0,0893	Stan12-12hz-pwm80-lw80	1131,269	0,0926
Stan12-11hz-pwm80-lw90	1097,875	0,0906	Stan12-12hz-pwm80-lw90	1107,986	0,0974
Stan12-11hz-pwm80-lw100	1032,746	0,0822	Stan12-12hz-pwm80-lw100	1078,255	0,0880
Stan12-13hz-pwm20-lw70	1413,319	0,1244	Stan12-15hz-pwm20-lw70	1294,175	0,1127
Stan12-13hz-pwm20-lw80	1301,587	0,0954	Stan12-15hz-pwm20-lw80	1228,146	0,1084
Stan12-13hz-pwm20-lw90	1389,365	0,1093	Stan12-15hz-pwm20-lw90	1264,786	0,1131
Stan12-13hz-pwm20-lw100	1315,265	0,1066	Stan12-15hz-pwm20-lw100	1215,267	0,0998
Stan12-13hz-pwm50-lw70	1348,265	0,1101	Stan12-15hz-pwm50-lw70	1260,478	0,1045
Stan12-13hz-pwm50-lw80	1285,327	0,1030	Stan12-15hz-pwm50-lw80	1135,667	0,1397
Stan12-13hz-pwm50-lw90	1299,457	0,1020	Stan12-15hz-pwm50-lw90	1154,965	0,1051
Stan12-13hz-pwm50-lw100	1286,965	0,0901	Stan12-15hz-pwm50-lw100	1124,157	0,1038

Tabela 8.1. ciąg dalszy.

Stan12-13hz-pwm80-lw70	1242,273	0,0604	Stan12-15hz-pwm80-lw70	1204,987	0,0909
Stan12-13hz-pwm80-lw80	1190,636	0,0504	Stan12-15hz-pwm80-lw80	1122,521	0,0964
Stan12-13hz-pwm80-lw90	1188,265	0,0505	Stan12-15hz-pwm80-lw90	1107,265	0,0972
Stan12-13hz-pwm80-lw100	1170,987	0,0616	Stan12-15hz-pwm80-lw100	1015,659	0,0887
Stan12-20hz-pwm20-lw70	1206,246	0,1116	Stan12-20hz-pwm80-lw70	1135,265	0,0935
Stan12-20hz-pwm20-lw80	1099,955	0,1102	Stan12-20hz-pwm80-lw80	1056,319	0,0872
Stan12-20hz-pwm20-lw90	1164,259	0,1104	Stan12-20hz-pwm80-lw90	1085,369	0,0852
Stan12-20hz-pwm20-lw100	1125,963	0,1091	Stan12-20hz-pwm80-lw100	1068,655	0,0848
Stan12-20hz-pwm50-lw70	1205,449	0,1169			
Stan12-20hz-pwm50-lw80	1120,255	0,1152			
Stan12-20hz-pwm50-lw90	1148,255	0,1001			
Stan12-20hz-pwm50-lw100	1079,658	0,0972			

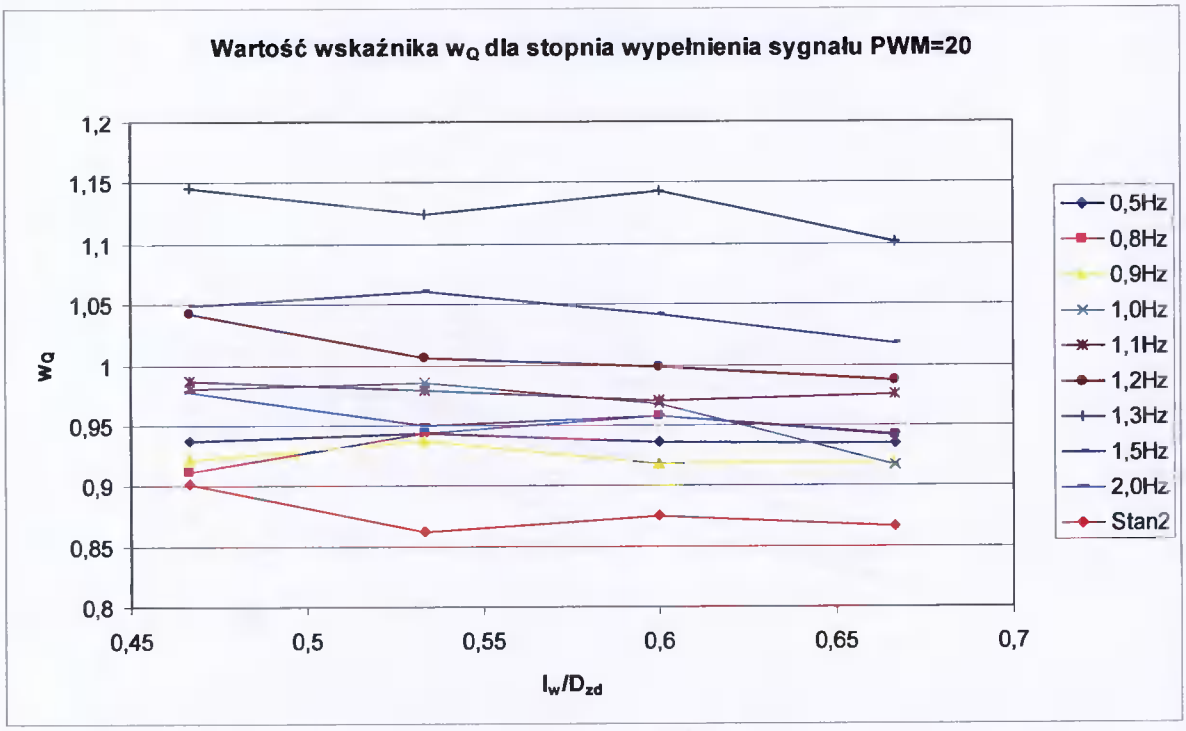
W celu uogólnienia wyników i analizy wpływu przyjętych zmian parametrów wejściowych będzie obliczony wskaźnik jakości procesu wymiany ciepła w_Q. Wskaźnik ten będzie ilorazem wartości ciepła przejętego przez ścianę dla przepływu z określonymi parametrami Q_u i wartości ciepła uzyskanego dla przepływu w stanie ustalonym pierwszym Q_{nom}. Wskaźnik ten został wyznaczony dla każdej z wartości zmian parametru $\frac{l_w}{D_{zd}}$.

$$w_Q = \frac{Q_{uz}}{Q_{nom}} \tag{8.7}$$

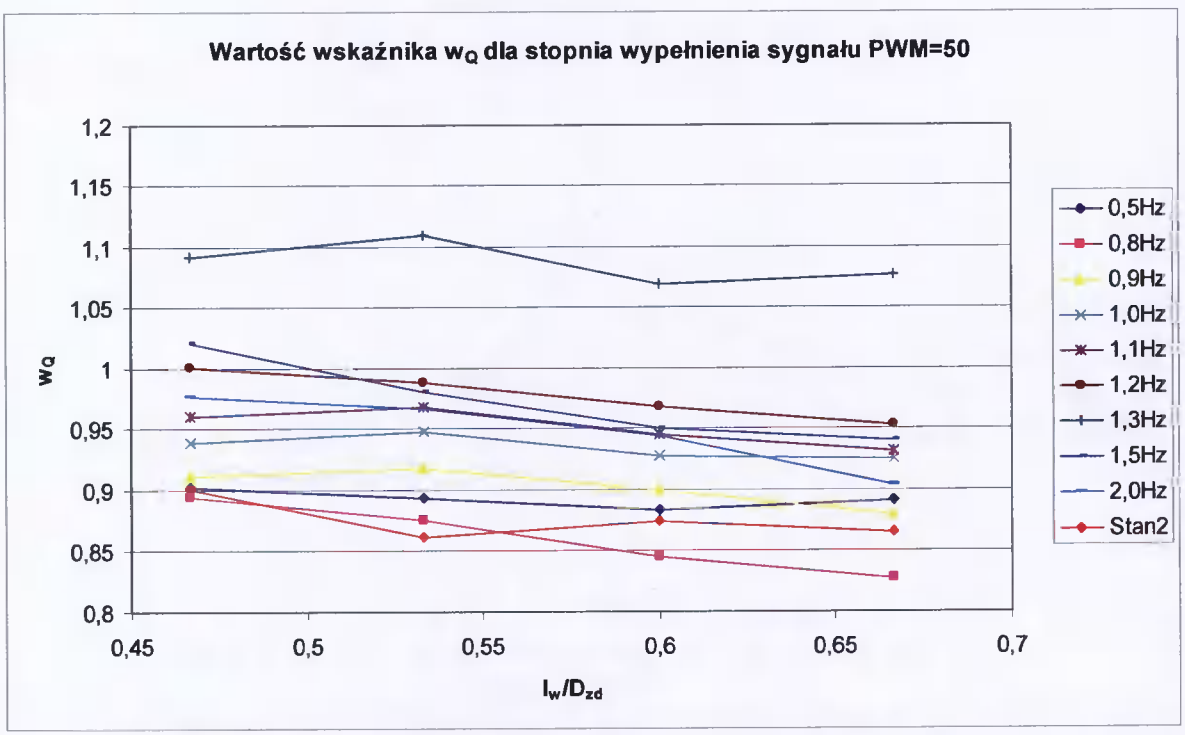
gdzie: Q_{uz} - ilość ciepła przejętego dla przepływu ze zmiennymi wartościami f_c i PWM przy określonej wartości parametru

Q_{nom} - ilość ciepła przejętego dla przepływu w stanie ustalonym pierwszym przy tej samej wartości parametru l_w / D_{zd}

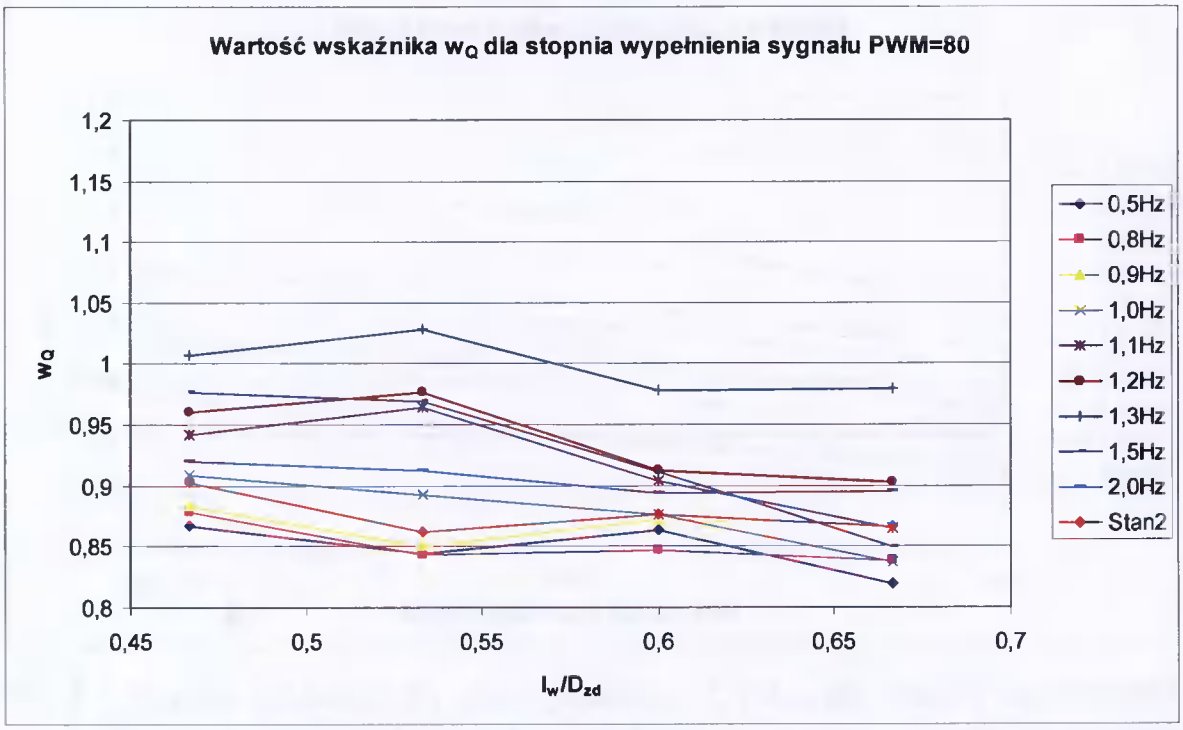
Wartość wskaźnika $w_Q > 1$ będzie świadczyć o polepszeniu jakości procesu wymiany ciepła. Jeżeli wskaźnik $w_Q < 1$,świadczyć to będzie o tym, że przenoszenie ciepła dla przepływu z określonym wartościami parametrów wejściowych jest mniejsze od przenoszenia ciepła dla przepływu w stanie ustalonym pierwszym dla określonej wartości l_w / D_{zd}. W ten sposób będzie można jednoznacznie określić wpływ zmian parametrów wejściowych na proce przenoszenia ciepła.



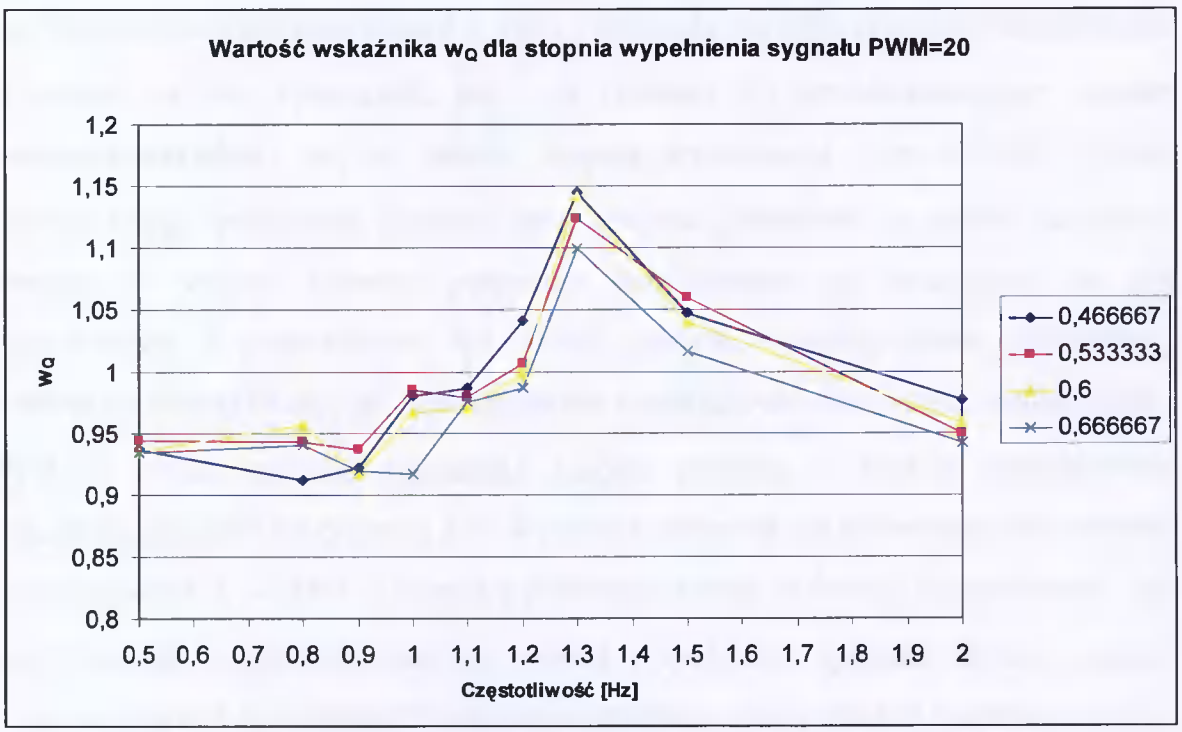
Rys. 8.3. Wartości wskaźnika w_Q, przy $PWM = 20$, dla różnych częstotliwości sygnału sterującego f_c oraz stanu ustalonego 2. w funkcji I_w / D_{zd}.



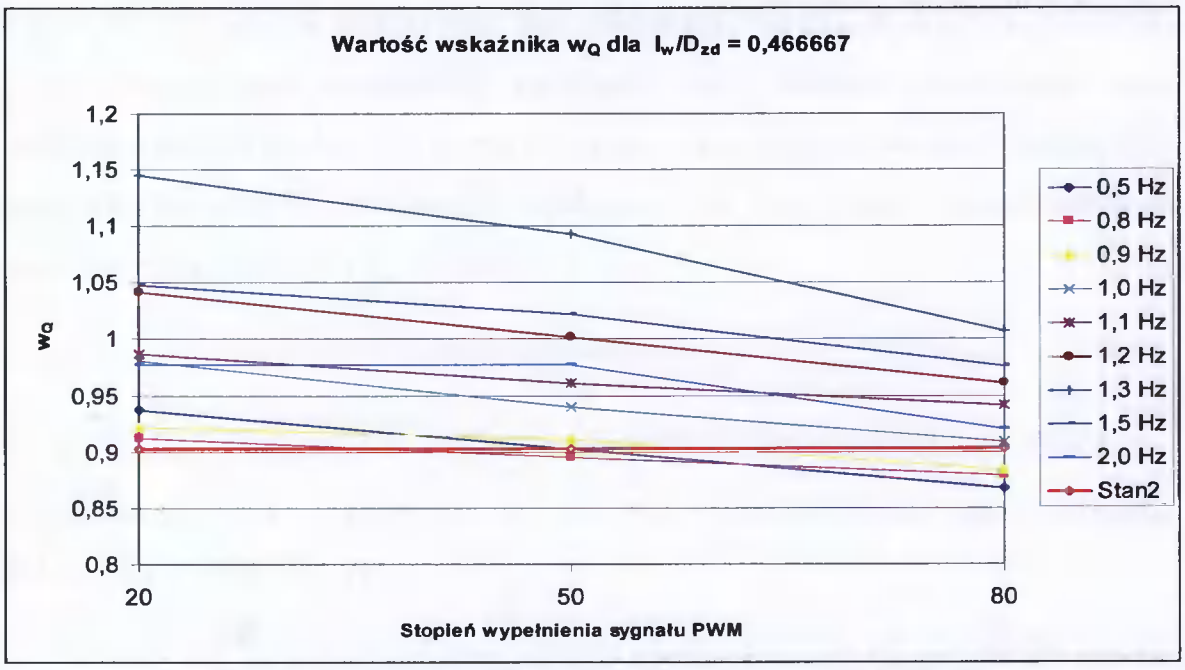
Rys. 8.4. Wartości wskaźnika w_Q, przy $PWM = 50$, dla różnych częstotliwości sygnału sterującego f_c oraz stanu ustalonego 2. w funkcji I_w / D_{zd}.



Rys. 8.5. Wartości wskaźnika w_Q, przy $PWM = 80$, dla różnych częstotliwości sygnału sterującego f_c oraz stanu ustalonego 2. w funkcji l_w / D_{zd}.



Rys. 8.6. Wartość wskaźnika w_Q, przy $PWM = 20$, dla różnych wartości l_w / D_{zd} w funkcji częstotliwości sygnału sterującego f_c.



Rys. 8.7. Wartość wskaźnika w_Q, przy określonym l_w / D_{zd}, dla różnych częstotliwości sygnału sterującego f_c oraz stanu ustalonego 2. w funkcji stopnia wypełnienia sygnału PWM.

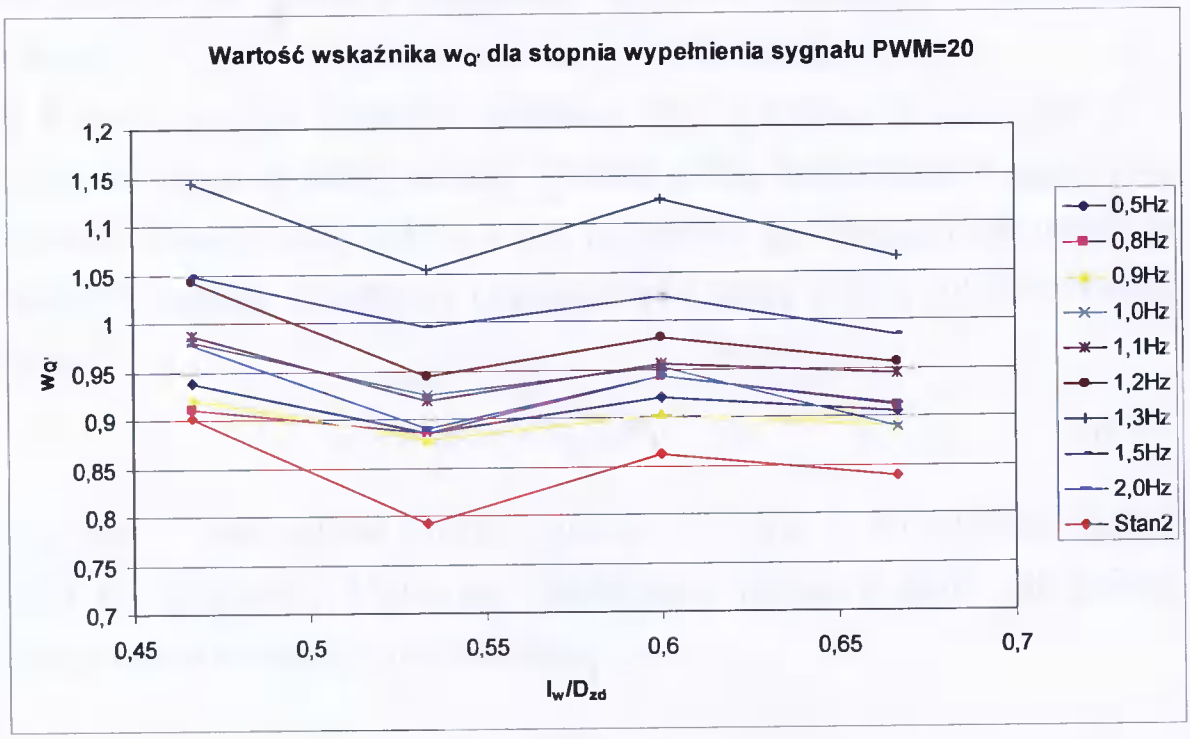
Przedstawione na rysunkach od 8.3 do 8.5 zmiany wskaźnika w_Q dla różnych częstotliwości i stopnia wypełnienia sygnału wyraźnie wskazują, że wraz ze wzrostem wartości parametru l_w / D_{zd} zmniejsza się ilość przejmowanego ciepła. Zarówno na tych rysunkach, jak i na rysunku 8.7 przedstawiającym zmiany wartości wskaźnika w_Q w funkcji stopnia wypełnienia sygnału PWM, wzrost wartości tego parametru (dłuższy czas trwania przepływu w stanie ustalonym drugim w jednym okresie) powoduje zmniejszenie się wskaźnika, co jest jednoznaczne z pogorszeniem się jakości procesu wymiany ciepła. Największy wpływ na intensyfikację procesu ciepła ma częstotliwość strumienia sterującego f_c. Wykres zmian wartości wskaźnika jakości procesu w funkcji częstotliwości przedstawiony jest na rysunku 8.6. Wyraźnie zaznacza się ekstremum dla wartości częstotliwości $f_c = 1{,}3 Hz$. Charakter przebiegu zmian w funkcji częstotliwości jest taki sam dla wszystkich wartości stopnia wypełnienia sygnału, chociaż różnice maksymalnych i minimalnych wartości wskaźnika maleją wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia sygnału.

Analizując tabelę 8.1, zawierającą wyniki obliczeń wartości bezwzględnych ilości ciepła przejętego przez ścianę od opływającego tę ścianę powietrza, zauważyłem

niższe wartości ciepła uzyskiwane dla odległości ściany od dyszy $l_w = 80mm$. Celem wychwycenia ewentualnej zależności tych spadków wyznaczono nowe wartości wskaźnika, odnosząc ciepło uzyskane dla zmiennych wartości parametrów przepływu do wartości ilości ciepła uzyskanego dla przepływu w stanie ustalonym pierwszym dla odległości $l_w = 70mm$:

$$w_{Q'} = \frac{Q_{uz}}{Q_{nom(lw=70)}} \tag{8.8}$$

Na poniższym rysunku 8.8 zamieszczony jest wykres wartości wskaźnika $w_{Q'}$ wyznaczonego dla przepływu ze zmienną częstotliwością, przy wartości $PWM = 20$ w funkcji l_w / D_{zd}.



Rys. 8.8. Wartości wskaźnika $w_{Q'}$ dla przepływu przy różnych częstotliwościach i stałej wartości PWM w funkcji l_w / D_{zd}.

Z rysunku 8.8, jak też z rysunków 8.3 – 8.5 wynika, że dla wszystkich zakresów zmian parametrów wejściowych wskaźnik jakości procesu wymiany ciepła $w_{Q'}$ maleje wraz ze wzrostem wartości l_w / D_{zd}. Na powyższym rysunku (8.8) zaznacza się jednak lokalne ekstremum dla $l_w / D_{zd} = 0{,}5333333$. Wytłumaczeniem tak niskich wartości wskaźnika otrzymanych dla tej wartości l_w / D_{zd} są niższe wartości prędkości średniej strumienia powietrza widoczne na rysunku 7.20 (kolor żółty)

oraz pulsacje strumienia (kolor błękitny). Na obecnym etapie nie można w sposób jednoznaczny określić przyczyny takiego zjawiska. Dla przepływu powietrza w stanach ustalonych pierwszym i drugim (rys. 7.18) nie zauważono szczególnego wpływu zmian wartości l_w / D_{zd} na przebieg zmian wartości prędkości średniej i pulsacji strumienia.

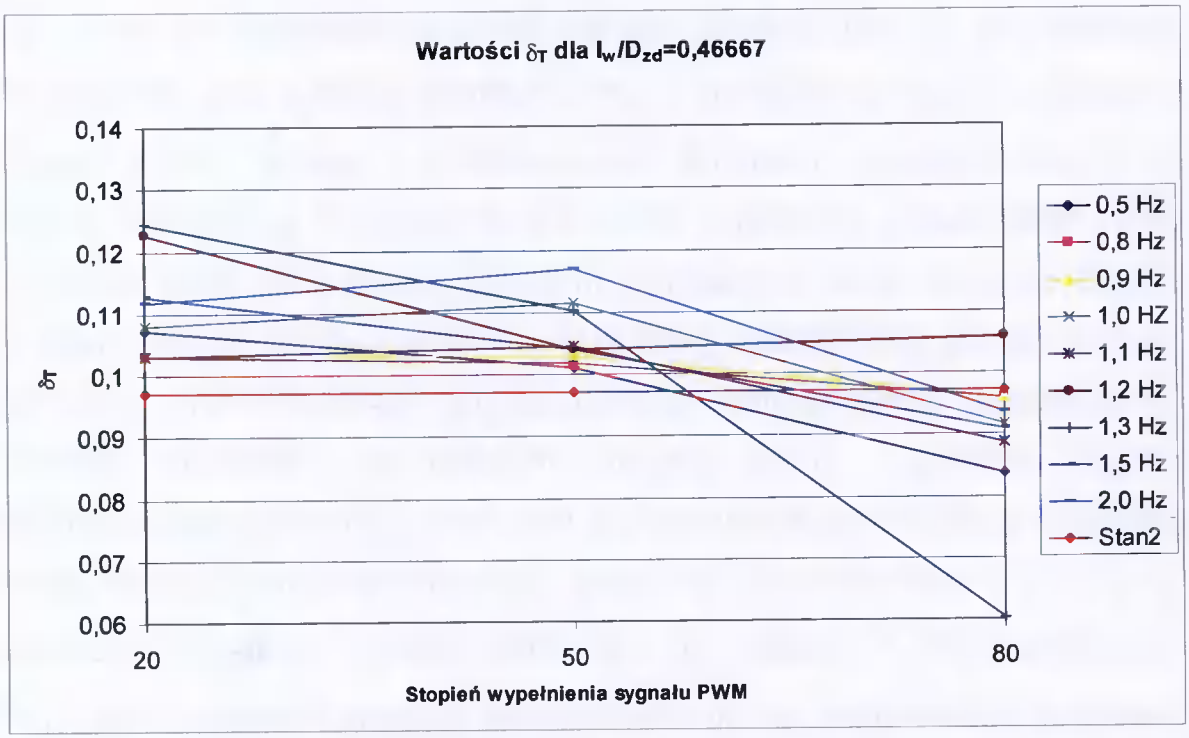
8.2 Określenie rozkładu temperatury na ogrzewanej ścianie

W badanym procesie przepływ powietrza wokół ogrzewanej ścianie był zmienny i zależał od ściśle określonych parametrów wejściowych. Uzyskane wartości temperatury i jej rozkładu w funkcji promienia ściany zmieniały się w zależności od wartości parametrów przepływu strumienia wypływającego z dyszy.

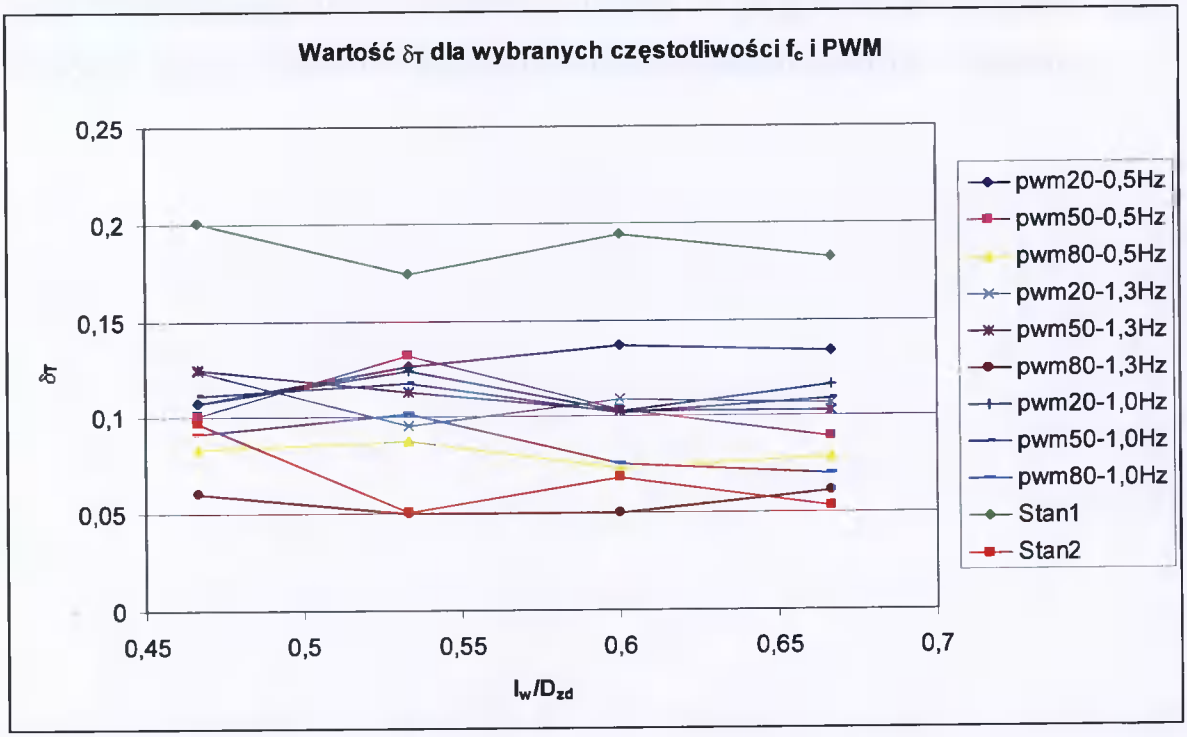
W badanym procesie celem było określenie wpływu wybranych parametrów przepływu strumienia na jakość procesu wymiany ciepła, dla polepszenia parametrów procesu wymiany ciepła. Jednym z tych parametrów jest współczynnik nierównomierności rozkładu temperatury (dla badanego obszaru ściany) obliczany według wzoru:

$$\delta_T = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{śr}} \tag{8.9}$$

Najniższa wartość współczynnika δ_T będzie świadczyć o najrównomierniejszym rozkładzie temperatury. Najwyższe wartości będą wskazywać wyniki, dla których rozkład będzie najbardziej nierównomierny.



Rys. 8.9. Wartości współczynnika δ_T przy określonym l_w / D_{zd}, dla różnych częstotliwości sygnału sterującego f_c oraz stanu ustalonego 2. w funkcji stopnia wypełnienia sygnału *PWM*.



Rys.8.10. Wartości współczynnika δ_T dla wybranych częstotliwości sygnału sterującego f_c oraz stanu ustalonego 1. i 2. w funkcji l_w / D_{zd}.

Na rysunku 8.9 przedstawiono wykres wartości współczynnika δ_T dla zmiennych częstotliwości przy wybranej wartości l_w / D_{zd} w funkcji zmian stopnia wypełnienia sygnału PWM. Zgodnie z wcześniejszymi założeniami największy wpływ na zmiany wartości tego współczynnika ma stopień wypełnienia sygnału PWM, który to stopień określa czas trwania przepływu powietrza w stanie ustalonym drugim w jednym okresie oscylacji strumienia przy danej częstotliwości. Istnieją wartości parametrów wejściowych, przy których można wyraźnie zwiększyć równomierność rozkładu temperatury na badanym obszarze ściany. Najwyższą wartość współczynnika uzyskano dla przepływów w stanie ustalonym pierwszym. Najniższą wartość współczynnika otrzymano przy przepływie z częstotliwością $f_c = 1{,}3\,Hz$, ze stopniem wypełnienia sygnału $PWM = 80$, dla wartości $l_w / D_{zd} = 0{,}5333333$. Najwyższe i najniższe wartości współczynnika nie są jednoznacznie powiązane z jakością (intensywnością) procesu wymiany ciepła. Wstanie ustalonym pierwszym uzyskano najwyższe wartości współczynnika δ_T, a nie uzyskano najwyższych co do wartości bezwzględnych ilości przejętego ciepła. Dla przepływu w stanie ustalonym drugim otrzymano najniższą co do wartości bezwzględnej ilość przejętego ciepła, a nie uzyskano najrównomierniejszego rozkładu temperatury.

9 Podsumowanie i wnioski końcowe

9.1 Wyniki badań

Skonstruowany element strumieniowy, którego cechą charakterystyczną jest rdzeń wewnętrzny z kanałem strumienia sterującego spełnia następujące założenia:

- ma dwa ustalone stany wypływu strumienia głównego,
- każdy ze stanów ustalonych charakteryzuje się odmienną koncentracją strumienia wypływającego powietrza,
- jest elementem monostabilnym, co oznacza, że bez strumienia sterującego wypływ strumienia głównego będzie zawsze następował tylko w jednym stanie ustalonym (w omawianym rozwiązaniu jest to wypływ wzdłuż stożka wewnętrznego),
- z powyższego stwierdzenia wynika,że do poprawnej pracy dyszy (charakter przekaźnikowy) potrzebny i wystarczający jest tylko jeden strumień sterujący,
- czasy przesterowania strumienia wyjściowego ze stanu 1. do 2. oraz 2. do 1. są praktycznie jednakowe; zaobserwowane w badaniach wizualizacyjnych różnice wynosiły około 4 milisekund,

Ograniczeniom jakim podlega zastosowanie tego elementu strumieniowego jest częstotliwość zmian stanu ustalonego przepływu. Zakres częstotliwości, przy którym dysza pracuje poprawnie z punktu widzenia sterowania przepływem strumienia wyjściowego jest niski i wynosi $f_c = 0 \div 2 Hz$.

Niewątpliwą zaletą tego rozwiązania jest to, że natężenie objętościowe strumienia sterującego, potrzebnego do poprawnej pracy dyszy (w przyjętym zakresie natężenia objętościowego strumienia głównego), wynosi do 10 % wartości natężenia objętościowego strumienia głównego.

Jednym z głównych aspektów pracy była analiza możliwości zastosowania sterowanej dyszy osiowosymetrycznej z rdzeniem wewnętrznym do poprawy jakości procesu wymiany ciepła między płaską przegrodą a opływającym ją strumieniem ogrzanego powietrza, wypływającym z omawianej dyszy. Sterowanie przepływem powietrza w określonym zakresie wartości wybranych parametrów, mają-

cych istotny wpływ na charakter opływu płaskiej przegrody umieszczonej za dyszą, miało na celu poprawienie (intensyfikację) jakości procesu wymiany ciepła.

Uzyskane wyniki badań pozwalają potwierdzić poprawność przyjętej tezy o istnieniu określonych parametrów, wpływających na intensyfikację procesu wymiany ciepła oraz na kształtowanie rozkładu temperatury na powierzchni badanego elementu. Ze względu na intensyfikację ciepła najistotniejszym parametrem wpływającym na przebieg tego procesu jest częstotliwość strumienia sterującego f_c. Przeprowadzone badania w zakresie niskich częstotliwości wykazały istnienie ekstremum, przy którym osiągnięto maksymalną wartość wskaźnika jakości procesu wymiany ciepła, równą $w_Q = 1{,}145$, co pozwala na ogólne stwierdzenie że uzyskano ponad czternastoprocentowy wzrost ilości przekazanej energii cieplnej. Dla pozostałych sześciu z zakresu dziewięciu wartości częstotliwości strumienia sterującego otrzymano wartości wskaźnika $w_Q < 1$, co wskazuje na pogorszenie się jakości procesu wymiany ciepła.

Rozpatrując aspekt kształtowania rozkładu temperatury na badanej ścianie, można stwierdzić, że różnice minimalnych wartości współczynnika δ_T uzyskane dla przepływu w stanie ustalonym drugim oraz dla przepływu z parametrami $f_c = 1{,}3\,Hz$ oraz $PWM = 80$ dla różnych l_w / D_{zd} osiągają wartości rzędu kilkunastu tysięcznych części. Tak małe różnice można uznać za nieistotne z tego punktu widzenia. Uzyskano jednak (w stosunku do stanu ustalonego drugiego) dużo wyższe wartości wskaźnika jakości procesu wymiany ciepła.

9.2 Zagadnienia do dalszych badań

Głównym i podstawowym celem dalszych prac związanych z badanym urządzeniem strumieniowym będzie opracowanie modelu matematycznego opartego na liczbach podobieństwa.

Ponieważ obecne badania obejmowały zakres zmian $l_w / D_{zd} << 1$, gdzie w przyjętym zakresie zmian wartości zachodziła zmiana kierunku opływu ściany umieszczonej za dyszą wraz ze zmianą stanu ustalonego wypływu, celowe wydawa-

łoby się określenie zależności ilości przejmowanego ciepła dla zmian parametrów stosowanych w tej pracy przy $l_w / D_{zd} > 1$.

Nie bez znaczenia pozostaje fakt zaistnienia spadku wskaźnika jakości procesu ciepła w okolicy (wartość bezwzględna) $l_w = 80\,mm$. Najbardziej prawdopodobną przyczyną takiego stanu rzeczy jest stożek wewnętrzny dyszy. Ma to związek z zakłóceniami przepływu powietrza za ściętą końcówką stożka.

Z naukowego punktu widzenia bardzo interesujące wydawałoby się kontynuowanie badań nad możliwością sterowania przepływem powietrza wypływającego z dyszy za pomocą strumieni syntetycznych. Światowa literatura wykazuje obecnie silny trend w tym kierunku.

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy Bydgoszcz BIBLIOTEKA GŁÓWNA

Literatura

[1] Bartoszewicz J., Bogusławski L.: Modelowanie transportu ciepła i pędu w obszarze uderzenia oraz spływu w strudze kołowej uderzającej, X Sympozjum wymiany ciepła i masy, Świeradów Zdrój, 1998, Prace Naukowe Instytutu Techniki Cieplnej i Mechaniki Płynów Pol. Wrocławskiej. str. 62-67

[2] Charun H.: Efektywność intensyfikacji konwekcyjnej wymiany ciepła w kanałach rurowych z turbulizatorami, Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja, nr 12 (429), Wydawnictwo Sigma Grudzień 2005,

[3] Choi M., Yoo H. S., Yang G., Lee J. S., Sohn D. K.: Measurements of impinging jet flow and heat transfer on a semi-circular concave surface, International Journal of Heat and Mass Transfer 43, rok 2000, str. 1811-1822

[4] Conway A.: A guide to fluidics, McDonald Publishers, London, 1971

[5] Dindorf R.: Energooszczędne sterowanie układami pneumatycznymi, Pneumatyka nr 2/63/2007, str.16-19

[6] Dindorf R, Łaski P., Wołkow J.: Wybrane problemy współczesnej mikropneumatyki, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Elektryka 39, Kielce, 2000, str.73-82

[7] Dindorf R.: Niepewność pomiarowa przepływomierza zwężkowego, Konferencja Naukowa Terotechnologia Urządzeń Przepływowych, Kielce, 17-19, 10 2001, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika 74, str.59-65

[8] Dindorf R.: Stanowisko do badania parametrów i charakterystyk przepływowych elementów pneumatycznych, Pneumatyka nr 6/61/2006, str.15-17

[9] Dutkowski K., Charun H.: Badanie wpływu zabudowy wymiennika na intensywność wymiany ciepła, X Sympozjum wymiany ciepła i masy, Świeradów Zdrój, 14-18 09 1998, Prace Naukowe Instytutu Techniki Cieplnej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej str. 224-229

[10] Flizikowski J. B. - redaktor: Maszyny środowiska rolno-spożywczego i chemicznego, Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, Bydgoszcz, 2002

[11] Flizikowski J. B., Flizikowski A.: Inteligentne systemy rozdrabniania żywności, VII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Żywienie Człowieka Inżynieria Maszyn, Bydgoszcz, luty 2002, Materiały konferencyjne str. 25-31

[12] Flizikowski J. B.: Projektowanie środowiskowe maszyn, Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, Bydgoszcz, 1998

[13] Flizikowski J. B.: Rozprawa o konstrukcji, Monograficzna seria wydawnicza Biblioteki Problemów Eksploatacji – Studia i Rozprawy, Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom, 2002

[14] Gawda M., Peszyński K.: Badanie charakterystyk sterowania strumienia wypływającego z dyszy o przekroju kołowym, VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, IMCR '98, Bydgoszcz, 1998

[15] Gomon Wł., Dobriański J., Rogaczewski J.: Metoda intensyfikacji wymiany ciepła w rurach za pomocą przewężeń turbulizacyjnych oraz jej praktyczne wykorzystanie, Prace naukowe Instytutu Techniki Cieplnej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej nr 53, Wrocław, 1998, str.272-279

[16] Gondek A., Sztaba G.: Symulacja CFD pomiaru przepływu płynu z zastosowaniem przepływomierza z krzywizną, Czasopismo Techniczne Mechanika, zeszyt 13-M/2004 (rok 101), Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, str. 45-53

[17] Göppert S., Gürtler T., Mocikat H., Herwig H.: Heat transfer under a precessing jet: effects of unsteady jet impigment, International Journal of Heat and Mass Transfer 47, rok 2004, str. 2795-2806

[18] Grom E., Wierciński Z.: Polepszenie rozdziału powietrza w pomieszczeniu wentylowanym za pomocą niestacjonarnego efektu Coanda, Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja, nr 10 (3919), Październik 2002, Wydawnictwo Sigma

[19] Hošek J., Trávníček Z., Peszyński K.: Symulacje numeryczne dyszy pierścieniowej ze sterowaniem strumieniowym, VI Seminarium naukowe "Postępy w konstrukcji i sterowaniu", Bydgoszcz – Duszniki 2002, str. 25-26 streszczenie, pełen tekst załączony na CD-ROM

[20] Jarosiński W.: Badania porównawcze konwekcyjnego przejmowania ciepła na powierzchni płaskiej ścianki znajdującej się w kanale o przekroju prostokątnym w przepływie ustalonym i oscylacyjnym, X Sympozjum wymiany ciepła i masy, Świeradów Zdrój, 14-18 09 1998, Prace Naukowe Instytutu Techniki Cieplnej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej str. 332-337

[21] Juncu Gh.: Unsteady forced convection heat/mass transfer from a flat plate, Heat and mass Transfer (2005) 41, str.1095-1102

[22] Kowalewski T. A., Stąsiek J.: Thermochromic liquid crystals in heat transfer research, Prace naukowe Instytutu Techniki Cieplnej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej nr 53, Wrocław, 1998, str.407-423

[23] Kulesza Z., Siemieniako F.: A system for shaping periodical pneumatic signals in the biotribological device, Active Noise and Vibration Control Methods, Wigry Poland, June, 8-12 2005

[24] Kulesza Z., Siemieniako F.: Struktura modelu matematycznego pneumatycznych przewodów połączeniowych, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Elektryka 39, Kielce, 2000, str.191-198

[25] Kulesza Z., Siemieniako F.: Using experimental researches results in modeling a driving system witch a membrane operating motor, Deutsch-Polnisches Seminar – Innovation und Fortschritt in der Fluidtechnik, Sopot, 20-21 september 2001, Technische Univeritat Warszawa, Institut fur Automatik und Robotik, Warszawa, 2001, str. 224-233

[26] Lawda S., Siemieniako F.: Problemy związane z tłumieniem pulsacji ciśnienia w układach technicznych, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej 2002, Budowa i eksploatacja Maszyn Z.9, str.279-284

[27] Lee D. H., Lee Y. M., Kim Y. T., Won S. Y., Chung Y. S.: Heat transfer enhancement by the perforated plate installed between an impinging jet and the target plate, International Journal of Heat and Mass Transfer 45, rok 2002, str. 213-217

[28] Lee J., Lee S.-J.: The effect of nozzle configuration on stagnation region heat transfer enhancement of axisymmetric jet impingement, International Journal of Heat and Mass Transfer 43, rok 2000, str. 3794-3509

[29] Li H.-Y., Chao .-M., Tsai G.-L.: Thermal performance measurement of heat sinks with confined impinging jet by infrared thermography, International Journal of Heat and Mass Transfer 48, rok 2005, str. 5386-5394

[30] Mika G., Szmyd J. S.: Analiza numeryczna turbulentnej konwekcji wymuszonej płynów newtonowskich w niecentrycznych kanałach pierścieniowych, Prace naukowe Instytutu Techniki Cieplnej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej nr 53, Wrocław, 1998, str.646-652

[31] Narayanan V., Yagoobi J. S., Page R. H.: An experimental study of fluid mechanics and heat transfer in an impinging slot jet flow, International Journal of Heat and Mass Transfer 47, rok 2004, str. 1827-1845

[32] Narayanan V., Yagoobi J. S., Page R.H.: Heat transfer characteristic of a slot jet Reattachment nozzle, Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer 120 (1998) str. 348-356

[33] Olszewski M., Kaczanowski S., Wański Z.: Płynowe elementy i ich układy logiczne, WKiŁ, Warszawa, 1970

[34] Orzechowski T.: Diagnostyka termalna maszyn i urządzeń technologicznych na przykładzie hamulca bębnowego, Konferencja naukowa Terotechnologia Urządzeń Przepływowych, Kielce, 17-19 październik 2001, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej Mechanika 74, str.75-84

[35] Pastucha L., Otwinowski H.: Podstawy przekazywania ciepła, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 1999

[36] Peszyński K., Hošek J., Kuszyński Z., Trávníček Z, Wawrzyniak S.: Active control of annular bistable jet, International Conference Engineering Mechanics 2000, Svratka Cech Republic 2000, Vol.4, str.149-154

[37] Peszyński K., Kamiński L. M., Golik A.: Układ do przetwarzania cyfrowo-analogowego zwłaszcza sygnałów pneumatycznych, Patent tymczasowy 100781 opublikowany 15.03.1979r

[38] Peszyński K., Kuszyński Z., Świtała A.: Konstrukcja i badania aktywnie sterowanej dyszy strumieniowej do urządzeń technologicznych, International Conference on Machinery Recycling 2000, Bydgoszcz, 2000, str. 47-54

[39] Peszyński K., Trávníček Z., Wawrzyniak S.: Optyczna i numeryczna wizualizacja pola prędkości na wyjściu dyszy do urządzeń suszących, XI Międzynarodowa Konferencja Recyrkulacja w Budowie Maszyn, 23-24 maja 2001, Bydgoszcz

[40] Peszyński K., Wawrzyniak S., Travnicek Z.: Badania strumienia pierścieniowego sterowanego strumieniem syntetycznym, IX Seminarium naukowe Postępy w sterowaniu i konstrukcji, Bydgoszcz – Muszyna 14-17 wrzesień 2005, pełen tekst załączony na CD-ROM

[41] Peszyński K., Wawrzyniak S.: „Badanie strumienia syntetycznego generowanego w szczelinie promieniowej" PNEUMATYKA nr 2(51)2005 str. 56-59

[42] Peszyński K.: 30 lat badań związanych z techniką strumieniową na Wydziale Mechanicznym ATR, VI seminarium naukowe Postępy w konstrukcji i sterowaniu, Bydgoszcz – Duszniki 2002, str. 39-40, Streszczenie, pełen tekst załączony na CD ROM – referat zamawiany przez Komitet Naukowy Seminarium

[43] Peszyński K.: Badania funkcjonalności rozdzielacza strumienia gazu technologicznego, VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, IMCR '98, Bydgoszcz, 1998

[44] Peszyński K.: Dwustanowy przerzutnik strumienia ścianowego, Konferencja Naukowo-Techniczna „Mechanika '97", Nauka i praktyka, Elbląg, 1997

[45] Peszyński K.: Flow control by axisymmetric fluidic device with radial switching, Engineering Mechanics '98, Institute of Thermomechanics CAS, Prague, Vol 3, pp.583–588.

[46] Peszyński K.: Konstrukcja i modelowanie numeryczne pneumatycznego rozdzielacza strumieniowego dużej mocy, XIII Krajowa Konferencja PNEUMA 2002, Artykuł w Hydraulika i Pneumatyka 3/2002, ISSN 1505-3954, str.46-49

[47] Peszyński K.: Strumieniowy układ logiczny w przetworniku cyfrowo-analogowym, Pomiary Automatyka Kontrola 8/1979, str. 306-308

[48] Piekarski M., Poniewski M.: Dynamika i sterowanie procesami wymiany ciepła i masy, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1994

[49] Pieńkowski C. A.: Przepływ ciepła i wymienniki, Rozprawy naukowe, nr 149, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok, 2007

[50] Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa, 1984

[51] Polat S.: Heat and mass transfer in impinging drying, Drying technology, 11 (6) 1993, str. 1147-1176

[52] Pudlik W.: Wymiana i wymienniki ciepła, wydanie 2, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1983

[53] Robinson M,. Ingham D. B.: Numerical modeling of the flow patterns induced by a push-pull ventilation system, Elsevier science, Vol. 40, No 3, rok 1996, str. 293-310

[54] Schlichting H., Gersten K.: Bounduary Layer Theory. 8-th ed. Springer, Berlin, 2000

[55] Siemieniako F., Huścio T., Dzierżek K.: Automatyzacja procesu dozowania i mieszania trzech cieczy, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, 2002, Budowa i eksploatacja Maszyn Z.9, str.415-421

[56] Siemieniako F.: Analiza wrażliwości parametrycznej tłumika, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej 1997, Budowa i eksploatacja Maszyn Z.4, str.193-205

[57] Stefanowski B., Jasiewicz J.: Podstawy techniki cieplnej, wydanie 7, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1977

[58] Szymański T., Wasiluk W.: Systemy wentylacji przemysłowej, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2000

[59] Tesař V., Peszyński K.: Dysze do strumieniowego ogrzewania lub suszenia, Pneumatyka, nr 1(38), rok 2003

[60] Tesař V., Peszyński K.: Wybrane aspekty budowy i zastosowań zaworów strumieniowych, Zeszyty Naukowe nr 212, Mechanika 42, ATR, Bydgoszcz, 1998, ISSN 0208-6395

[61] Tesař V., Peszyński K.: Zawory strumieniowe do sterowania przepływu wykorzystujące zjawisko Coandy, Pneuma'98, Koszalin, 1998.

[62] Tesař V.: Mezni vrstvy a turbulence (Bounduary layers and turbulence), CVUT Publishing, ISBN 80-01-00675-1, Praha, 1996

[63] Tesař V.: Rizena tryska pro generaci impakniho proudeni (Controlled nozzle for impinging jet flow generation) Proceedings of Topical Problems of Fluid Mechanics '97, ISBN 80-85918-26-9, p 59, Inst. Of Thermomechanics AS CR, Praha, February 1997

[64] Tianshu L., Sullivan J. P.: Heat transfer and flow structures in an excited circular impinging jet, International Journal of Heat and Mass Transfer 39, rok 1996, str. 3695-3706

[65] Trávniček Z., Peszyński K., Hošek J., Wawrzyniak S.: Aerodynamic and mass transfer characteristics of an annular bistable impinging jet with a fluidic flip-flop control, International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003) 1265-1278

[66] Wawrzyniak S., Nowicki K.: Analiza numeryczna rzeczywistego przepływu powietrza za dyszą osiowosymetyczną, PNEUMA 2004, Bydgoszcz – Wiktorowo, artykuł w Pneumatyka 4(47) 2004, str.34-36

[67] Wawrzyniak S., Peszyński K.: Badania i analiza strumienia syntetycznego w komorze rdzenia dyszy osiowosymetrycznej, Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne – Wrocław, 17-19.05.2005

[68] Wawrzyniak S., Peszyński K.: Badania wstępne własności termicznych sterownej dyszy osiowosymetrycznej, VIII Seminarium Naukowe Postępy w Konstrukcji i Sterowaniu, Mala Lucivna 2004, materiały konferencyjne zbiór streszczeń str. 73, pełny referat na płycie CD-ROM

[69] Wawrzyniak S., Peszyński K.: Badania zmian prędkości fluktuacji i prędkości średniej w zależności od wymuszeń okresowych w pierścieniowej strudze swobodnej, Postępy w Sterowaniu i Konstrukcji, Bydgoszcz, 2001

[70] Wawrzyniak S., Peszyński K.: Continuous visualization of flow in power fluidic elements and basic analysis, National Conference with International Participation ENGINEERING MECHANICS 2003, Svratka, Czech Republic, rozszerzone streszczenie str.248-249

[71] Wawrzyniak S., Peszyński K.: Experimental examinations of synthetic flow impact on axisymmetric nozzle output jet, INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2005 Svratka, Česká republika, 9. - 12. května 2005

[72] Wawrzyniak S., Peszyński K.: Investigations of turbulent pulsation changes and average velocity in axisymmetric nozzle in dependence on vibration damping forcing frequency, Developments in machinery design and control, vol. 2, WU ATR w Bydgoszczy 2003, str.93-98

[73] Wawrzyniak S., Peszyński K.: Numeryczna analiza wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych na własności dyszy osiowosymetrycznej" Postępy w Sterowaniu i Konstrukcji, Bydgoszcz, 1999

[74] Wawrzyniak S., Peszyński K.: Preliminary study into thermal properties of controlled axi-symmetric nozzle, INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2005 Svratka, Česká republika, 9.-12. května 2005

[75] Wawrzyniak S., Peszyński K.: Problematyka pomiaru prędkości miejscowych przy pomocy termoanemometru w urządzeniach technologicznych, International Conference on Machinery Recycling 2000, Bydgoszcz, 2000, str. 41-46

[76] Wawrzyniak S., Siemieniako F.: Ocena intensywności wymiany ciepła między pulsującym strumieniem powietrza a ścianą, IX Seminarium Naukowe Postępy w Sterowaniu i Konstrukcji, Bydgoszcz – Muszyna 2005, Muszyna 14-17.09-2005

[77] Wawrzyniak S.: Analiza numeryczna przepływu powietrza w dyszy osiowosymetrycznej, X Międzynarodowe Seminarium Naukowe Postępy w Sterowaniu i Konstrukcji 2006, Bierzgłów 11-14.09-2006, materiały konferencyjne zbiór streszczeń str. 93, pełny referat na płycie CD-ROM

[78] Wawrzyniak S.: Badania anemometryczne pól prędkości na przykładzie dyszy osiowosymetrycznej, Seminarium Naukowe Postępy w Sterowaniu i Konstrukcji, Bydgoszcz, 2000

[79] Wawrzyniak S.: Badania doświadczalne syntetycznego strumienia wyjściowego z dyszy osiowosymetrycznej, Postępy w konstrukcji i sterowaniu, Bydgoszcz – Białystok, 20-23 wrzesień 2003, streszczenie str.59, pełen tekst załączony na CD-ROM

[80] Wawrzyniak S.: CT anamometric velocity profile investigation behind the axi-symmetric nozzle, Development in control and machinery design – Janusz Sempruch – editor, WU ATR w Bydgoszczy, 2002, str.95-100

[81] Wawrzyniak S.: Doświadczalne wyznaczanie wartości współczynnika przejmowania ciepła, 11th International Scientific Seminar on Developments in Machinery Design and Control, Červený Kláštor '2007, 11-14.09-2007, streszczenie str. 93, pełny referat na płycie CD-ROM

[82] Wawrzyniak S.: Numeryczne modelowanie elementów strumieniowych, II Forum Młodych-2000, Borówno 19-20.06.2000

[83] Wawrzyniak S.: Stanowisko do ciągłej wizualizacji przepływu w elementach strumieniowych, VI konferencja Postępy w konstrukcji i sterowaniu, Bydgoszcz – Duszniki Zdrój, 03-05 październik 2002, streszczenie str.61, pełen tekst załączony na CD-ROM

[84] Wawrzyniak S.: Wpływ częstotliwości sygnału sterującego na parametry wypływu strumienia powietrza z dyszy osiowosymetrycznej, Zeszyty naukowe nr 240 'Mechanika 52' WU ATR w Bydgoszczy, 2002, str. 137-143

[85] Wen M.-Y., Jang K.-J.: An impingement cooling on a flat surface by using circular jet with longitudinal swirling strips, International Journal of Heat and Mass Transfer 46, rok 2003, str. 4657-4667

[86] Wiśniewski S., Wiśniewski T.S.: Wymiana ciepła, Podręczniki akademickie – Mechanika, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Wyd. IV, Warszawa, 1997

[87] Yan W. M., Liu H. C., Soong C. Y., Yang W. J.: Experimental study of impinging heat transfer along rib-roughened walls by using transient liquid crystal technique, International Journal of Heat and Mass Transfer 48, rok 2005, str. 2420-2428

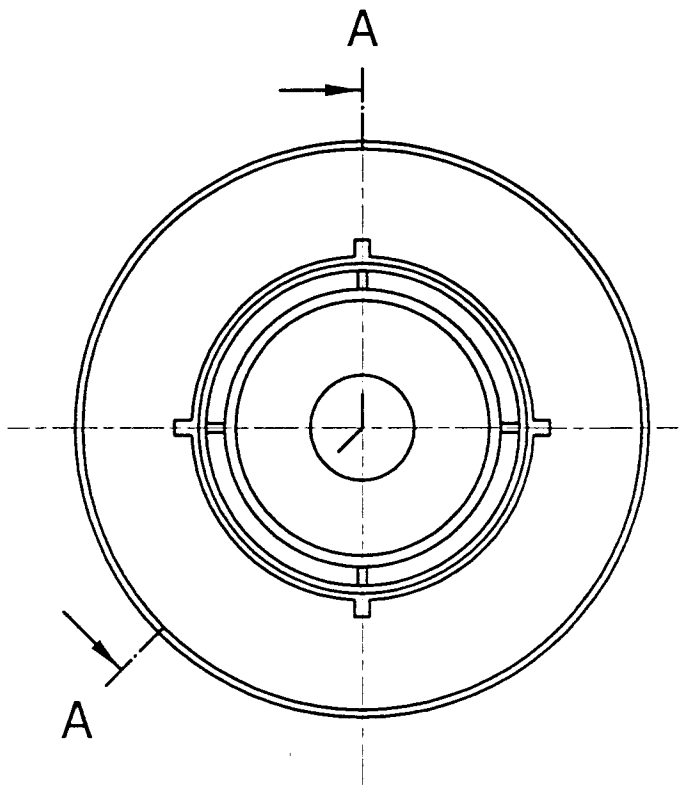
[88] Yang G., Choi M., Lee J. S.: An experimental study of slot jet impingement cooling on concave surface - effects of nozzle configuration and curvature, International Journal of Heat and Mass Transfer 42, rok 1999, str. 2199-2209

[89] Zalmanzon, L. A.: Teoria elementów stosowanych w technice strumieniowej, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1971

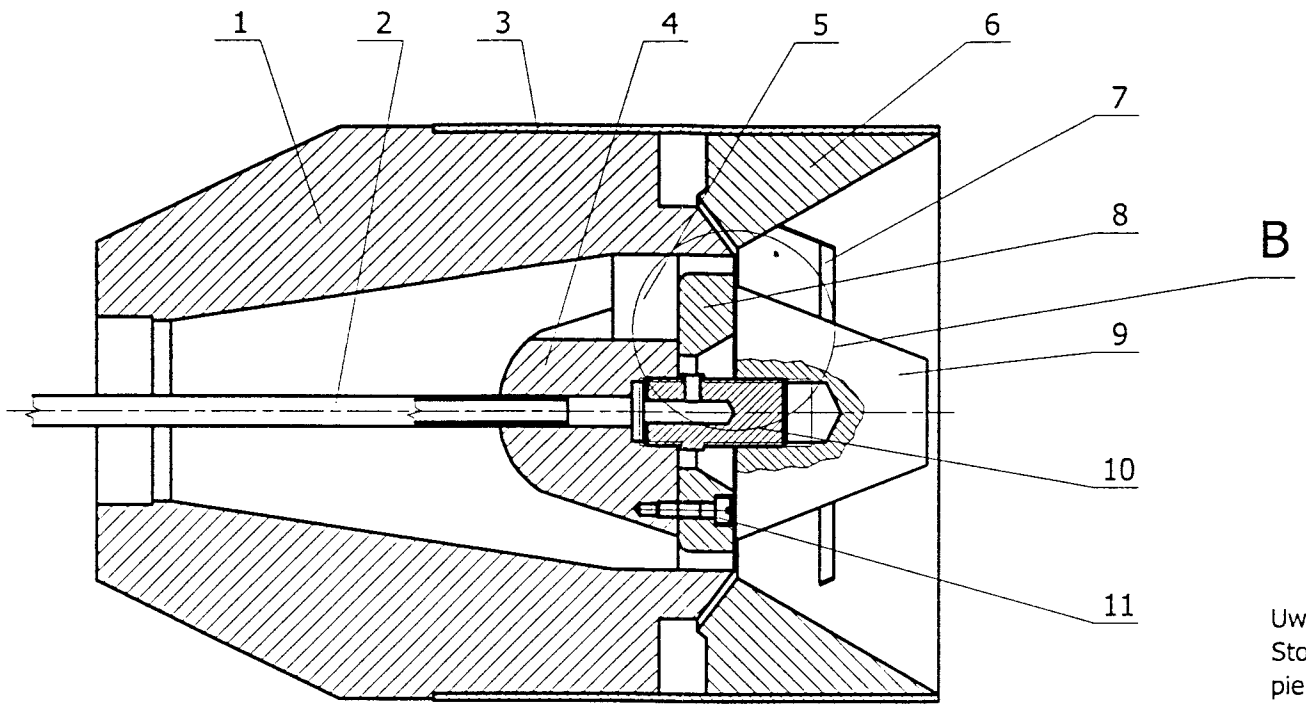
[90] Zierp, J.: Kryteria podobieństwa i zasady modelowania w mechanice płynów, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa, 1978

ZAŁĄCZNIKI

Załącznik nr 1 – Rysunki wykonawcze elementów dyszy osiowosymetrycznej oraz rysunek złożeniowy

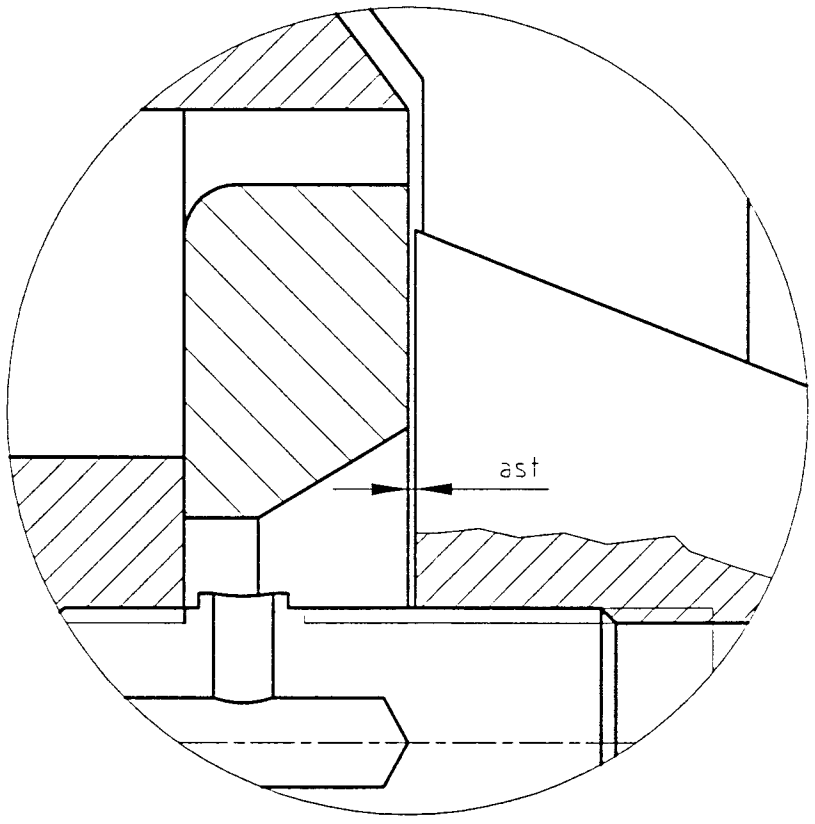


A - A



Uwaga.
Stożek wewnętrzny(9) ustalić w odległości ast=0,5 mm od pierścienia centralnego (8).
Spojler (7) mocować współosiowo ze stożkiem zewnętrznym (6), przykleić nóżki spojlera klejem Loctite.

Szczegół B

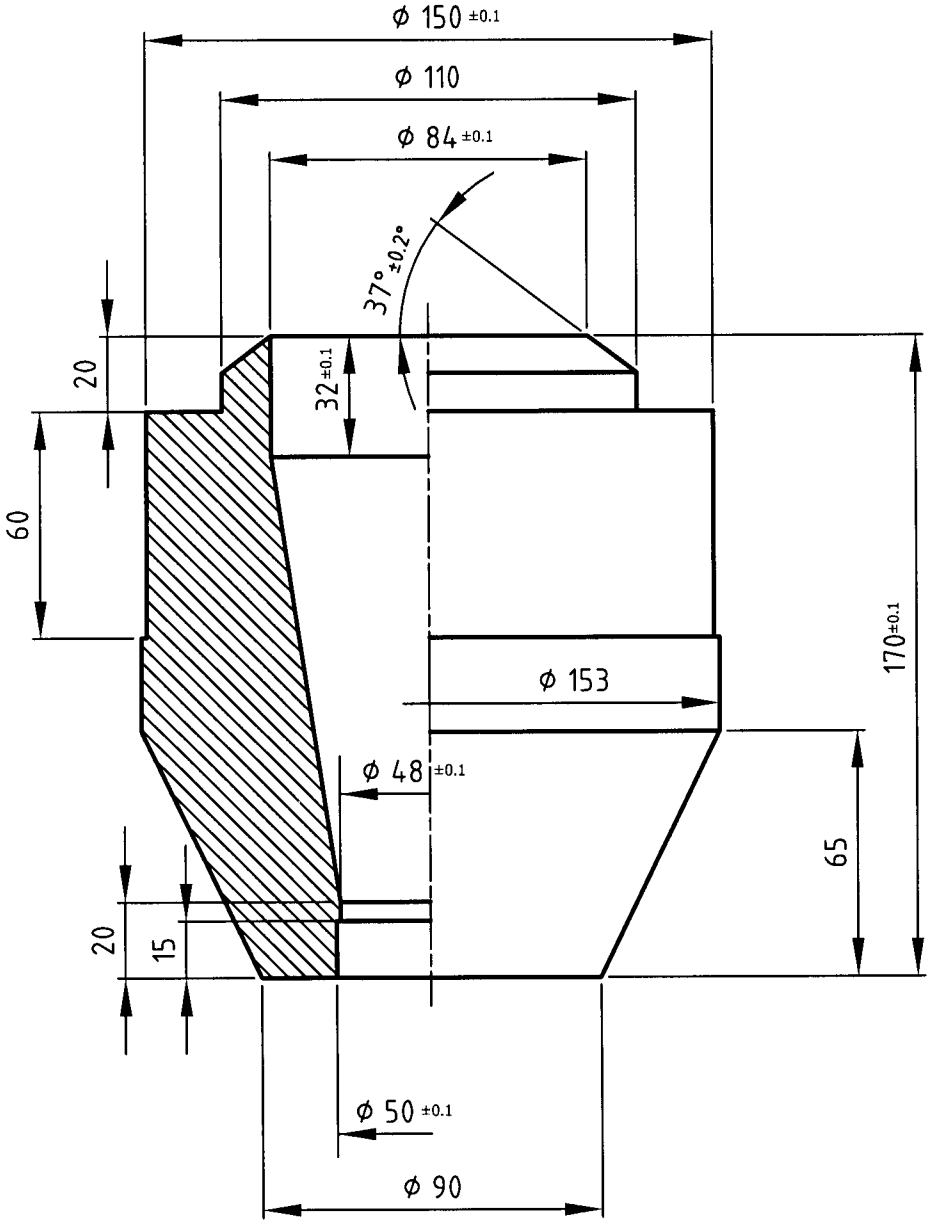


L. P.	Nazwa części	Sztuk	Materiał	Nr części	Uwagi
11	Wkręt M4x20	4		PN-ISO 965-3:2001	
10	Łącznik rdzenia	1	PA6	01.01.010	
9	Stożek wewnętrzny	1	PA6	01.01.009	
8	Pierścień centralny	1	PA6	01.01.008	
7	Spojler	1	PA6	01.01.007	
6	Stożek zewnętrzny	1	PA6	01.01.006	
5	Żebro ustalające	4	PA6	01.01.005	
4	Rdzeń ustalający	1	PA6	01.01.004	
3	Obudowa PCV	1	PVC	PN-EN 1452-2:2000	Ø150x120
2	Rurka strumienia sterującego	1	PA6	PN-EN 754-2:2002	Ø8x1x60
1	Obudowa dyszy	1	PA6	01.01.001	

	Nazwisko	Data	Podpis	Uniwersytet Technologiczno - Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy
Konstruował	Wawrzyniak S.			
Kreślił	Wawrzyniak S.			
Sprawdził				

Podziałka	Nazwa przedmiotu	Materiał	Nr rysunku
1:2	Dysza osiowosymetryczna		01.00.001

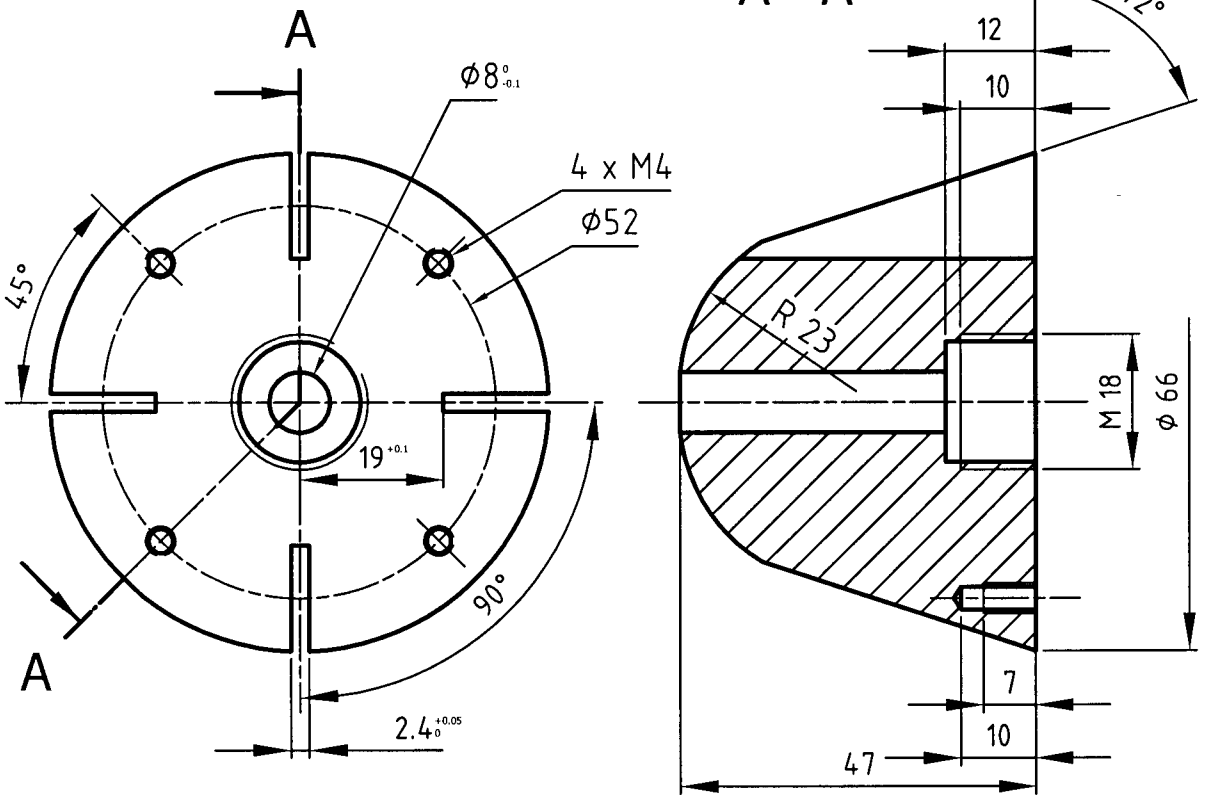
Ra 1.25



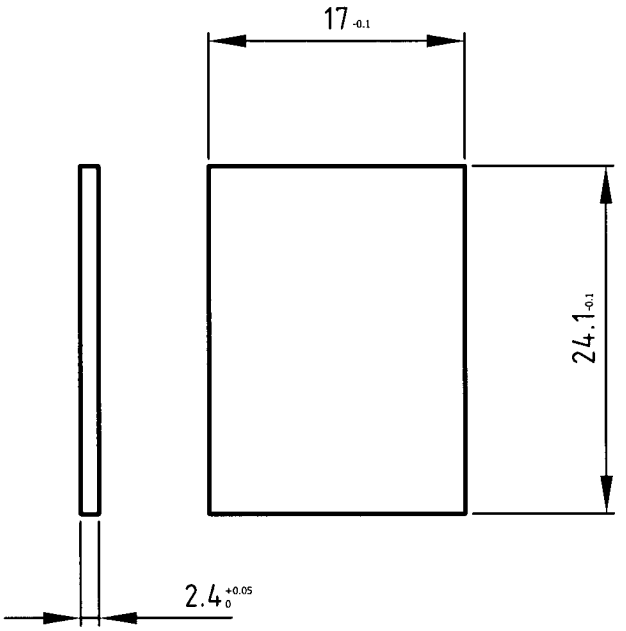
Uwaga.
Ostre krawędzie stępić

	Nazwisko	Data	Podpis	Uniwersytet Technologiczno - Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy	
Konstruował	Wawrzyniak S.				
Kreślił	Wawrzyniak S.				
Sprawdził					
Podziałka 1:2	Nazwa przedmiotu: Obudowa dyszy			Materiał: Stop aluminium PA6	Nr rysunku: 01.01.001

Ra 1.25



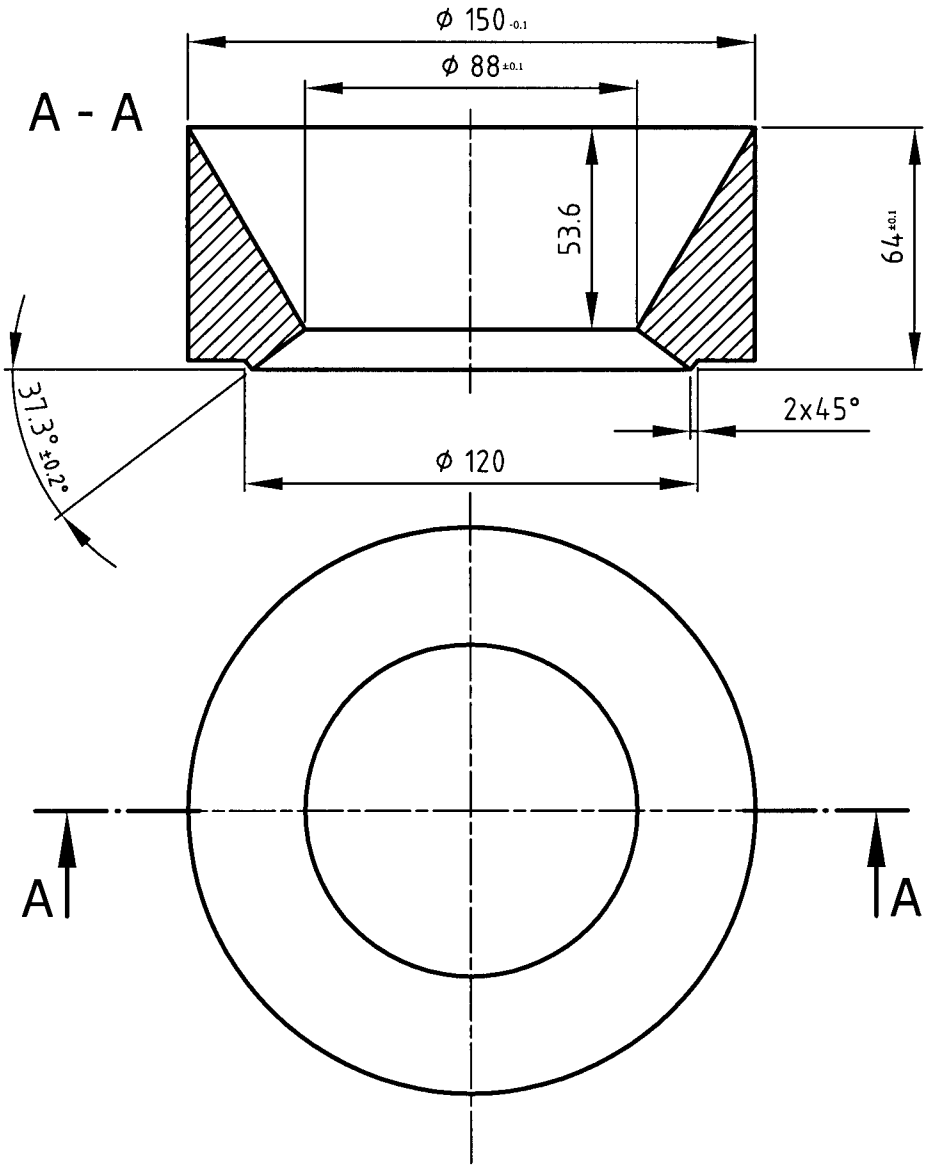
	Nazwisko	Data	Podpis	Uniwersytet Technologiczno - Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy	
Konstruował	Wawrzyniak S.				
Kreślił	Wawrzyniak S.				
Sprawdził					
Podziałka 1:1	Nazwa przedmiotu: Rdzeń ustalający			Materiał: Stop aluminium PA6	Nr rysunku: 01.01.004



Uwaga.
Ostre krawędzie stępić.

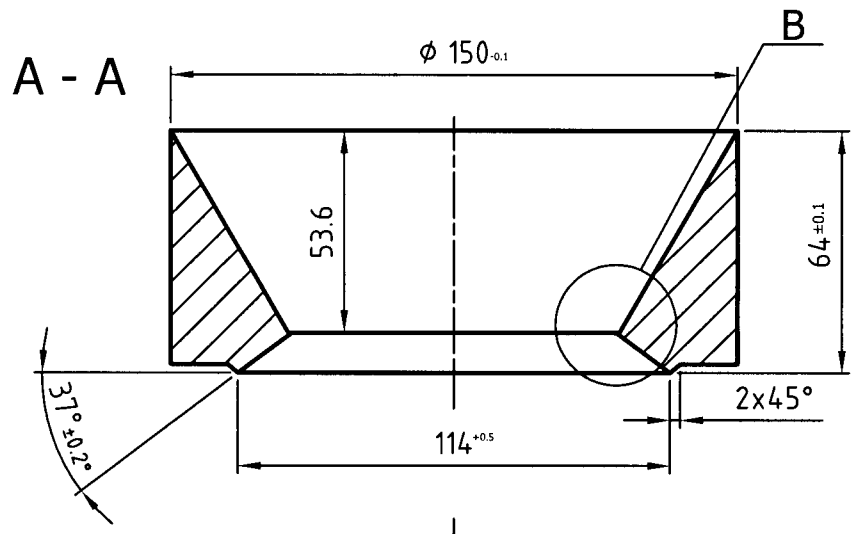
	Nazwisko	Data	Podpis	Uniwersytet Technologiczno - Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy	
Konstruował	Wawrzyniak S.				
Kreślił	Wawrzyniak S.				
Sprawdził					
Podziałka	Nazwa przedmiotu		Sztuk	Materiał	Nr rysunku
2:1	Żebro ustalające		4	Stop aluminium PA6	01.01.005

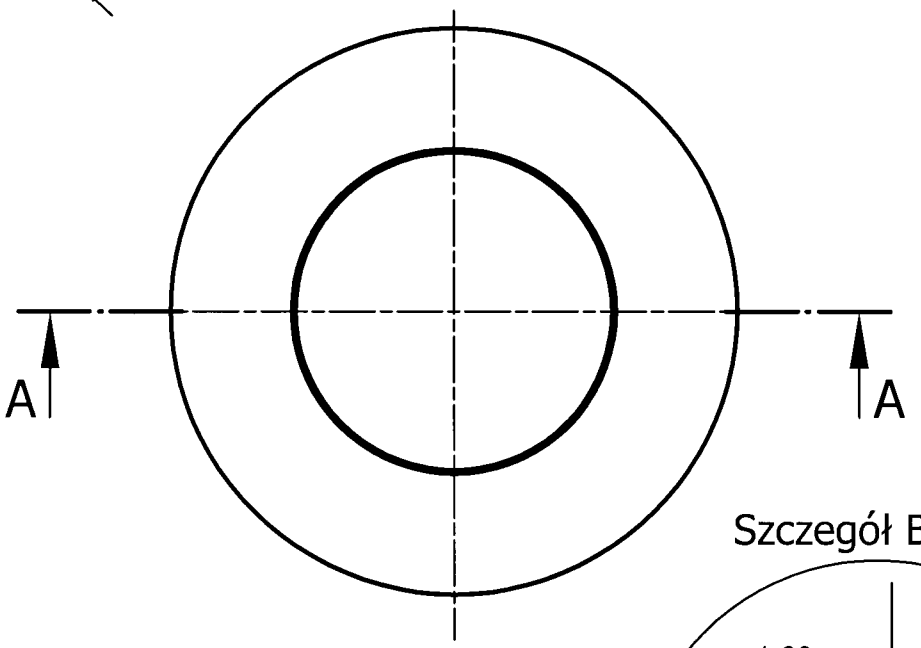
Ra 1.25



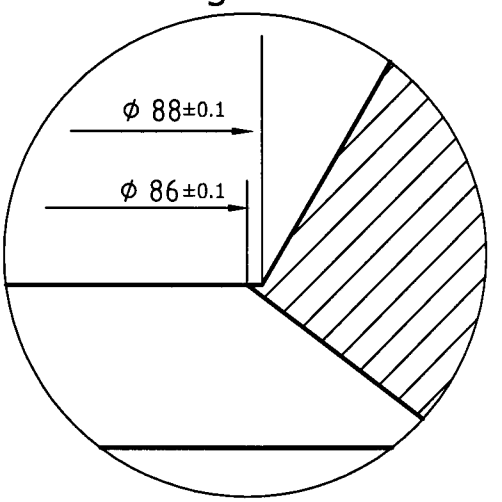
	Nazwisko	Data	Podpis	Uniwersytet Technologiczno - Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy	
Konstruował	Wawrzyniak S.				
Kreślił	Wawrzyniak S.				
Sprawdził					
Podziałka 1:2	Nazwa przedmiotu Stożek zewnętrzny a30w00			Materiał Stop aluminium PA6	Nr rysunku 01.01.006

Ra 1.25





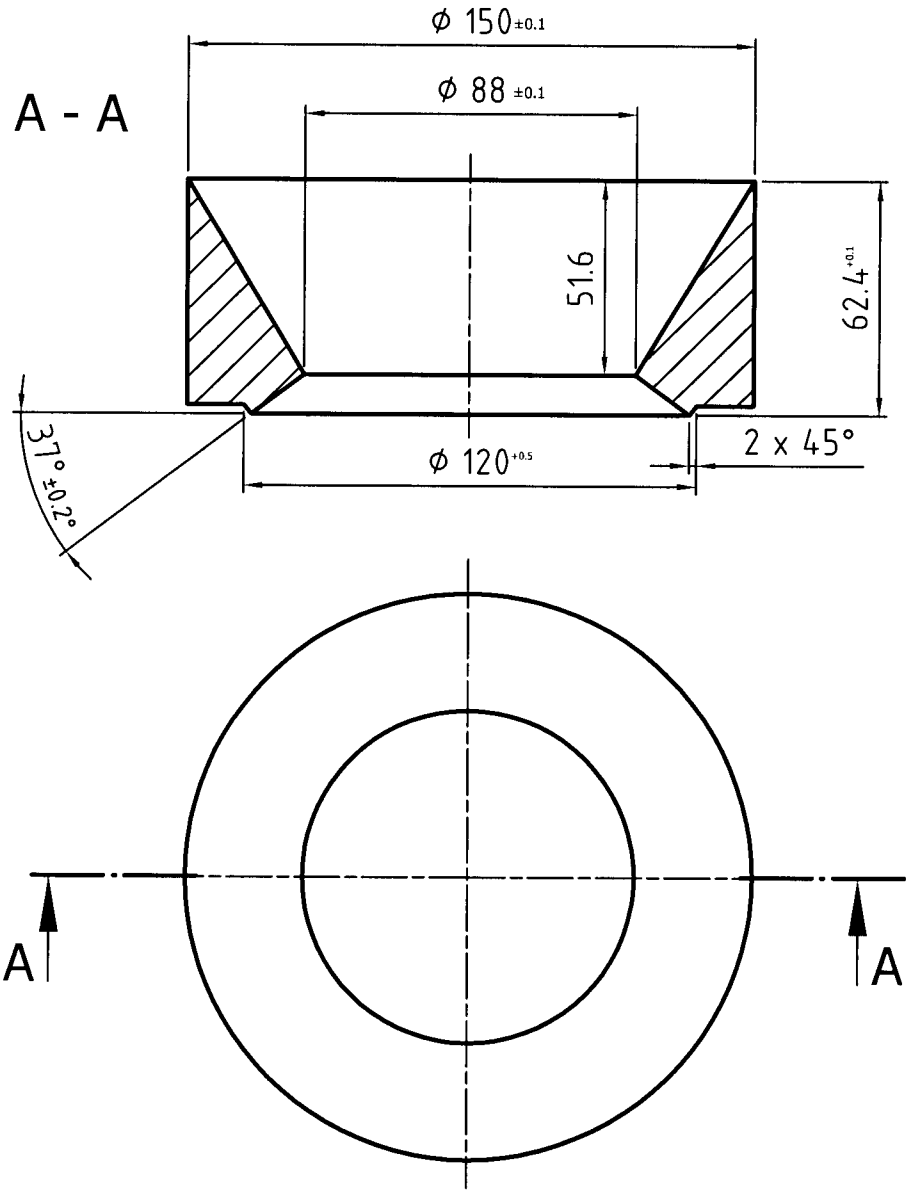
Szczegół B



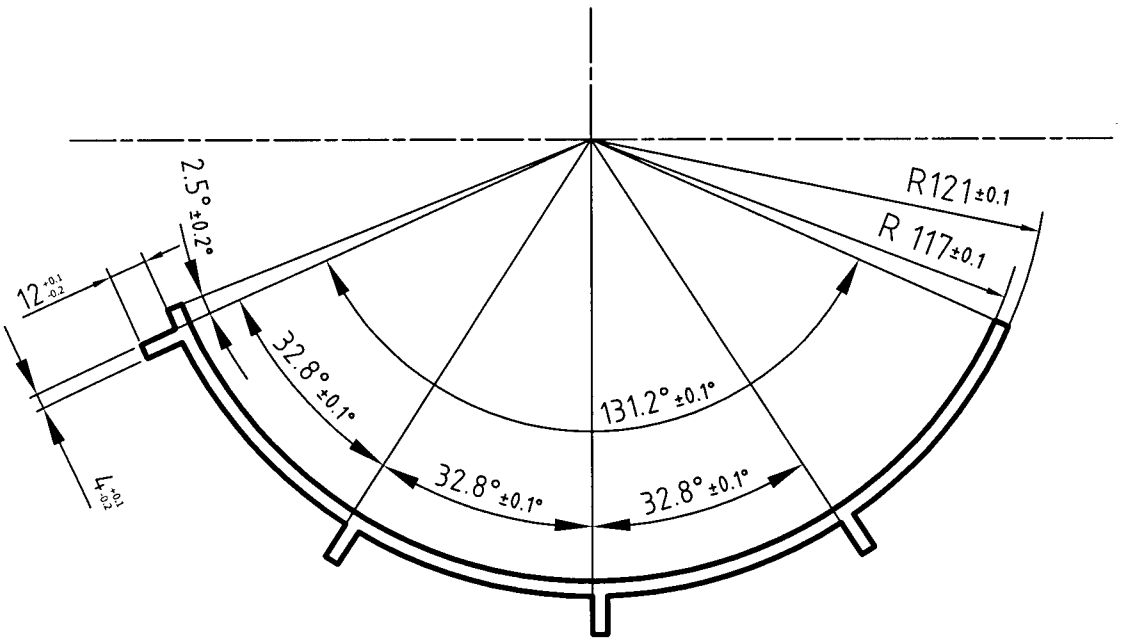
Uwaga.
Ostre krawędzie stępić.

	Nazwisko	Data	Podpis	Uniwersytet Technologiczno - Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy	
Konstruował	Wawrzyniak S.				
Kreślił	Wawrzyniak S.				
Sprawdził					
Podziałka 1:2	Nazwa przedmiotu: Stożek zewnętrzny a30w01			Materiał: Stop aluminium PA6	Nr rysunku: 01.02.006

Ra 1.25



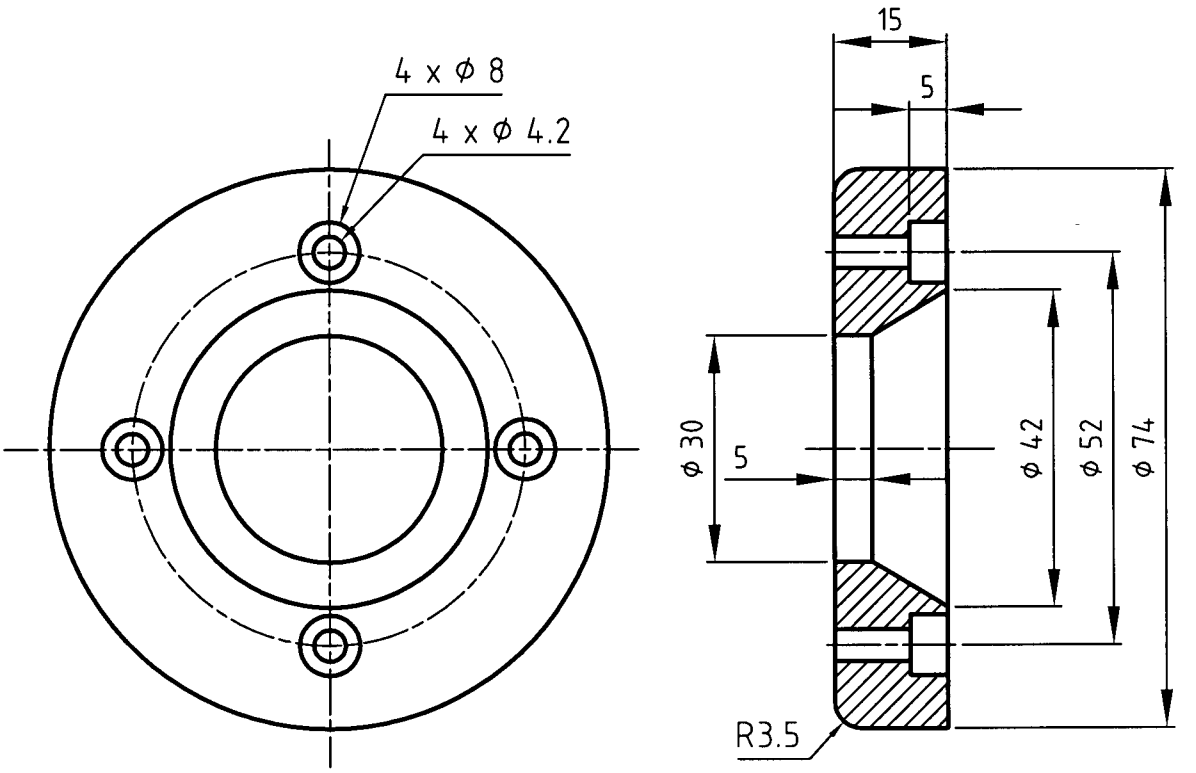
	Nazwisko	Data	Podpis	Uniwersytet Technologiczno - Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy	
Konstruował	Wawrzyniak S.				
Kreślił	Wawrzyniak S.				
Sprawdził					
Podziałka 1:2	Nazwa przedmiotu Stożek zewnętrzny a31w00			Materiał Stop aluminium PA6	Nr rysunku 01.03.006



Uwaga.
Grubość elementu 0.1 mm
Ostre krawędzie stępić
Chropowatość powierzchni bocznych Ra10

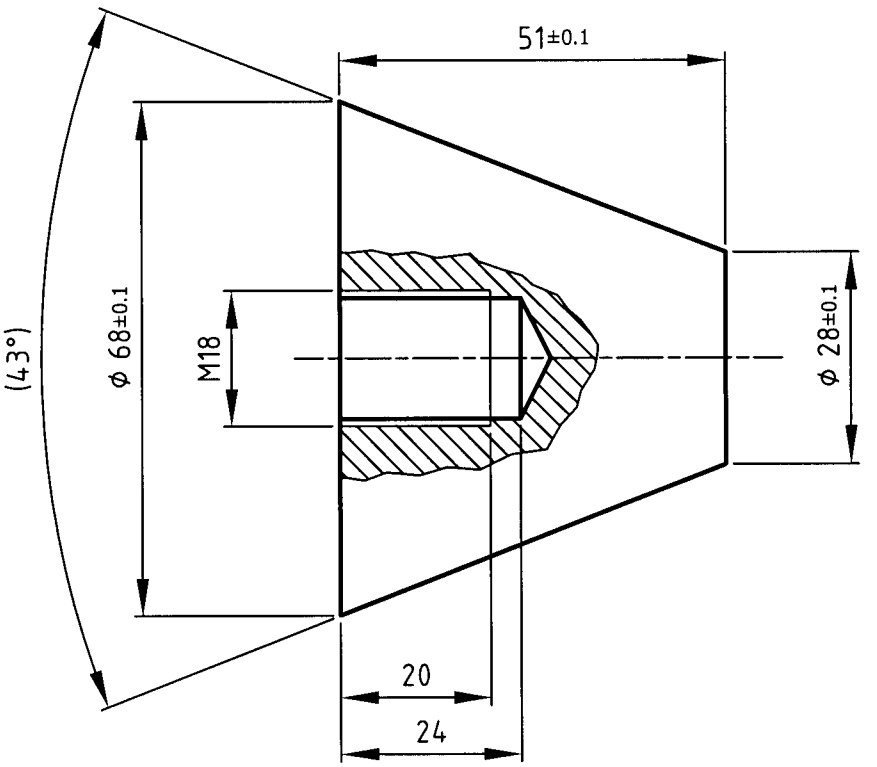
	Nazwisko	Data	Podpis	Uniwersytet Technologiczno - Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy	
Konstruował	Wawrzyniak S.				
Kreślił	Wawrzyniak S.				
Sprawdził					
Podziałka 1:2	Nazwa przedmiotu Spojler			Materiał Stop aluminium PA6	Nr rysunku 01.01.007

Ra 1.25



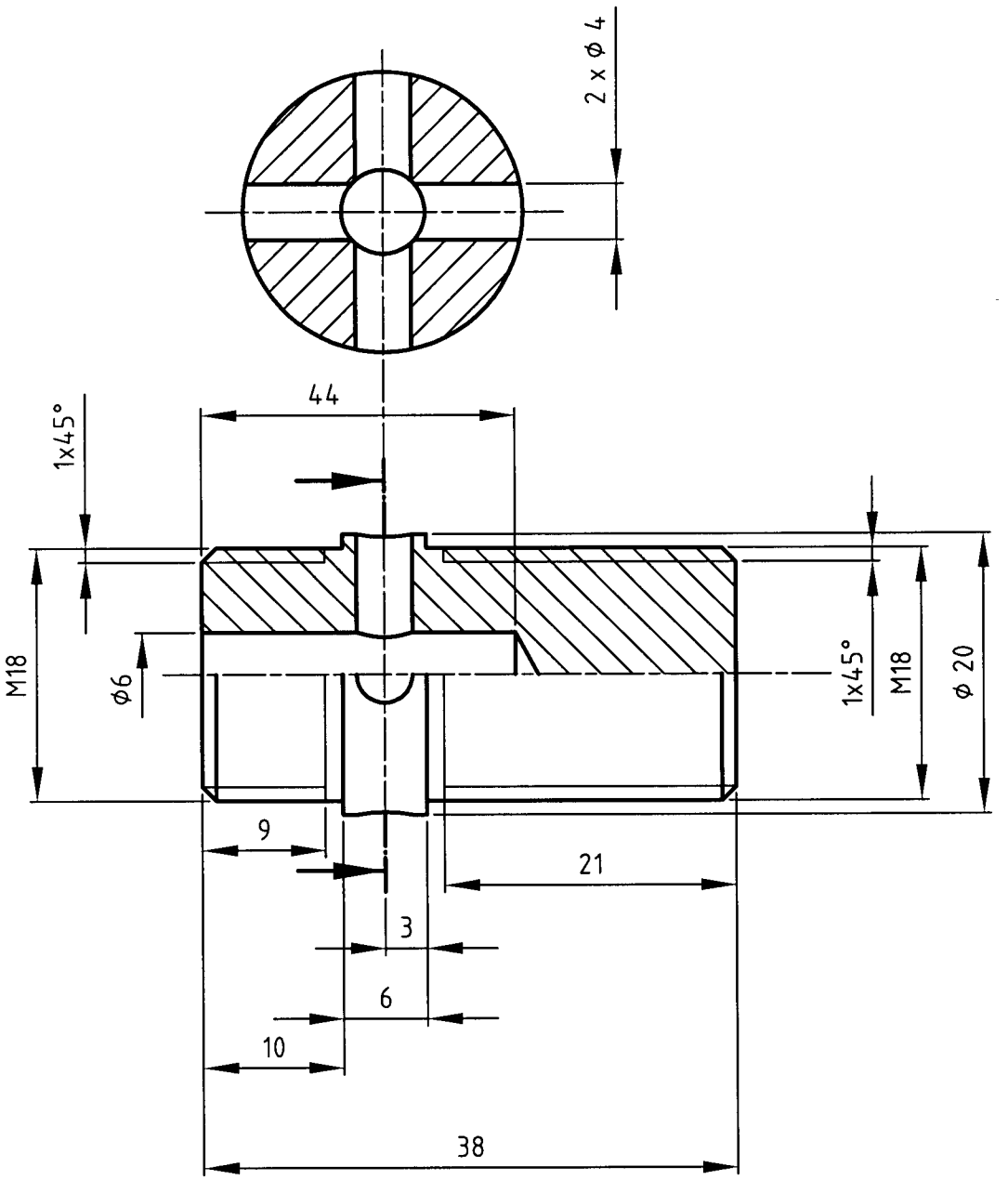
	Nazwisko	Data	Podpis	Uniwersytet Technologiczno - Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy	
Konstruował	Wawrzyniak S.				
Kreślił	Wawrzyniak S.				
Sprawdził					
Podziałka 1:1	Nazwa przedmiotu Pierścień centralny			Materiał Stop aluminium PA6	Nr rysunku 01.01.008

Ra 1.25



	Nazwisko	Data	Podpis	Uniwersytet Technologiczno - Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy	
Konstruował	Wawrzyniak S.				
Kreślił	Wawrzyniak S.				
Sprawdził					
Podziałka 1:1	Nazwa przedmiotu: Stożek wewnętrzny			Materiał: Stop aluminium PA6	Nr rysunku: 01.01.009

Ra 1.25



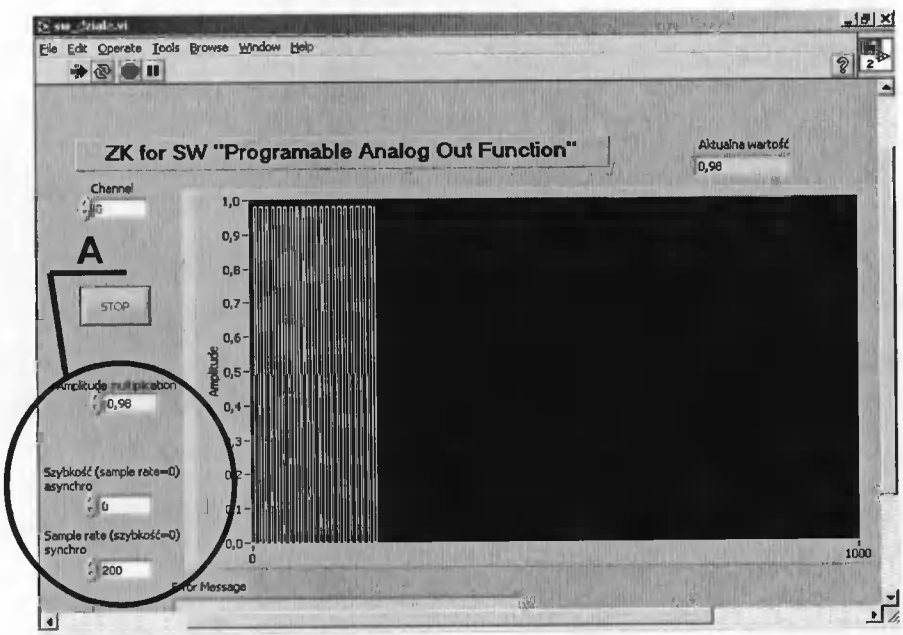
	Nazwisko	Data	Podpis	Uniwersytet Technologiczno - Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy	
Konstruował	Wawrzyniak S.				
Kreślił	Wawrzyniak S.				
Sprawdził					
Podziałka 2:1	Nazwa przedmiotu Łącznik rdzenia			Materiał Stop aluminium PA6	Nr rysunku 01.01.010

Załącznik nr 2 - Oprogramowanie wykorzystywane i stworzone na potrzeby badań

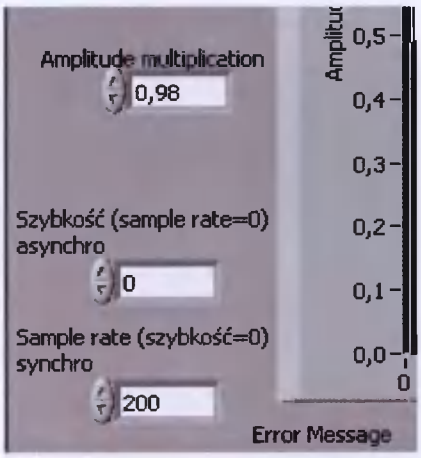
Podczas badań doświadczalnych korzystano z oprogramowania dostarczonego przez producentów sprzętu pomiarowego. Były to aplikacje do obsługi kamery termograficznej, termoanemometru, miernika cyfrowego oraz karty telewizyjnej, stosowanej przy wizualizacji przepływu.

Dla układów sterujących natężeniem przepływu i temperaturą strumienia głównego oraz częstotliwością załączania strumienia, stworzono w oparciu o karty pomiarowe aplikacje umożliwiające sterowanie tymi parametrami.

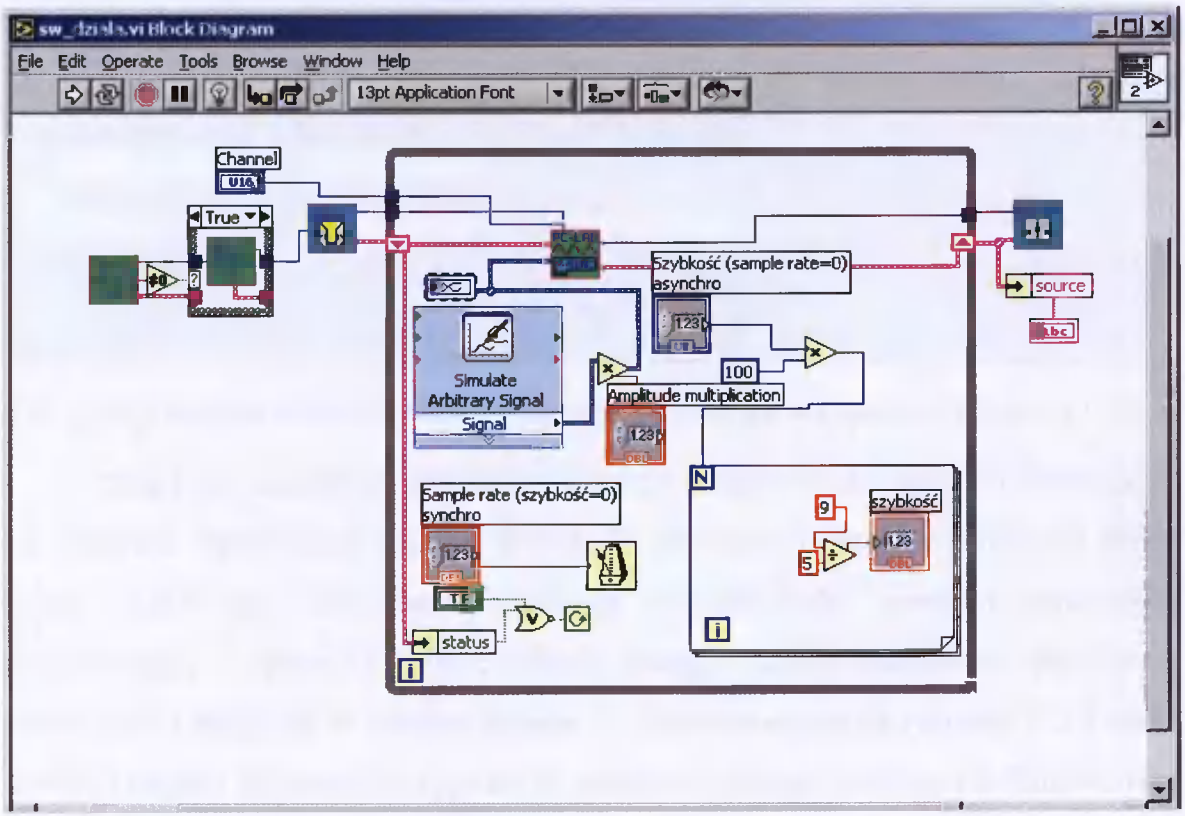
Do sterowania pulsacjami strumienia wyjściowego wykorzystywany jest zawór elektropneumatyczny, przełączający strumień sterujący do kanału zasilającego lub kanału sterującego. Układ sterowania zaworem składa się z komputera PC z zainstalowaną kartą pomiarową Advantech PCL-711 oraz oprogramowania LabView 7, w którym napisano program do generowania sygnałów sterujących załączeniem zaworu. Sygnał wyjściowy z karty pomiarowej przechodzi przez wzmacniacz mocy i podawany jest na zawór.



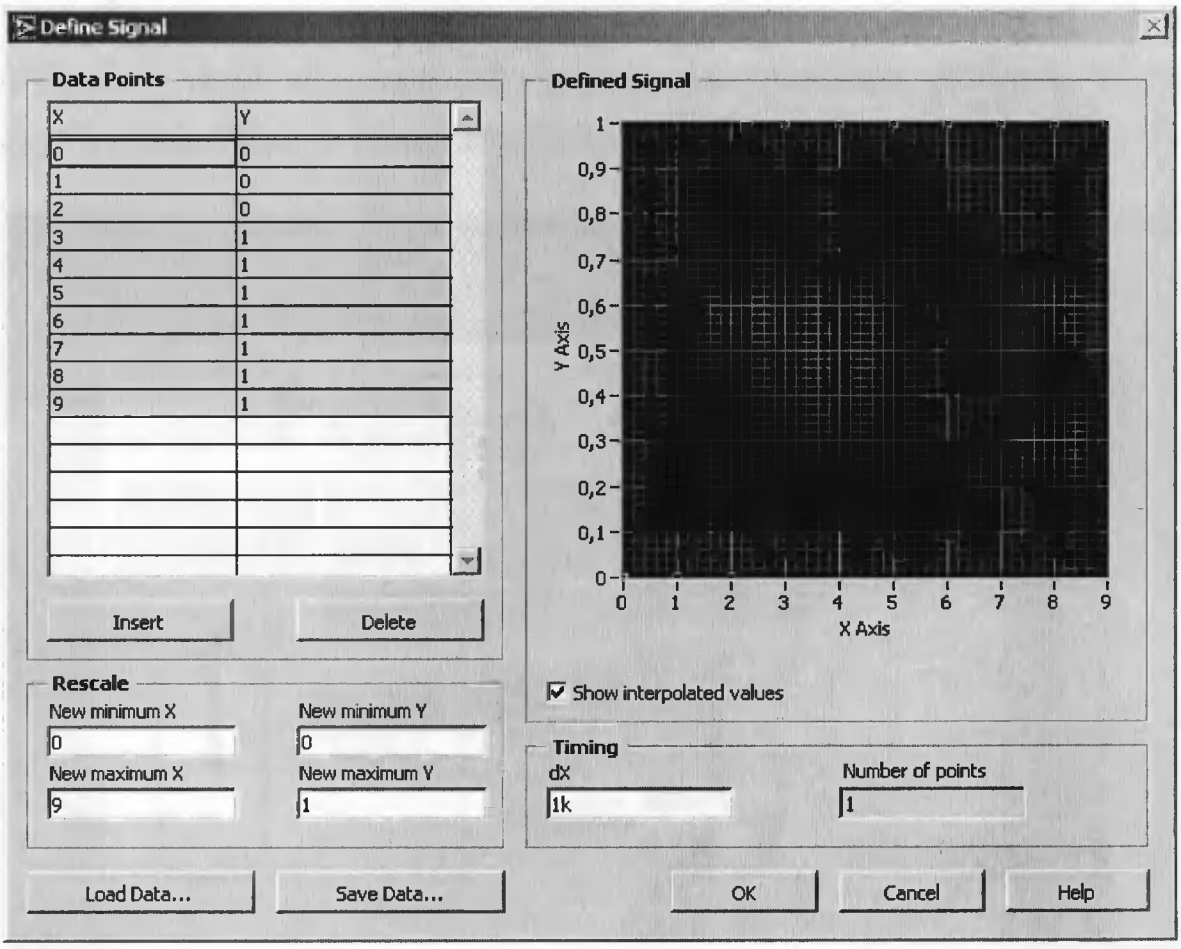
Rys. Z.2.1. Widok ogólny okna aplikacji do generowania sygnałów sterujących zaworem rozdzielającym, szczegół A – ustawienia częstotliwości i amplitudy sygnału.



Rys. Z.2.2. Szczegół A z rysunku Z.2.1.



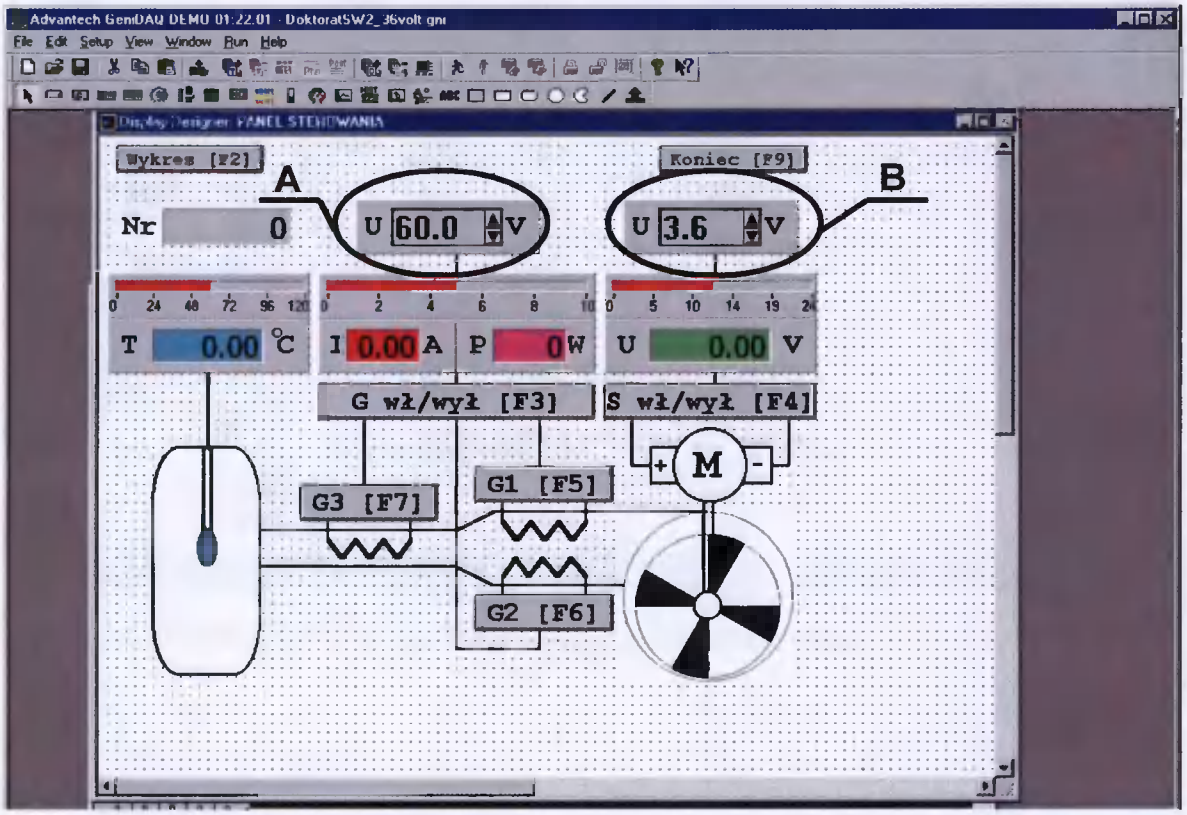
Rys. Z.2.3. Widok okna diagramu blokowego układu sterowania częstotliwością strumienia sterującego.



Rys. Z.2.4. Okno definiowania punktów opisujących stopień wypełnienia sygnału PWM.

Układ ten umożliwia regulację zarówno częstotliwości sygnału sterującego jak i stopnia wypełnienia sygnału PWM. W procesie przepływu powietrza przez dyszę układ ten umożliwia regulację częstotliwości pulsacji strumienia wyjściowego, a także regulację czasu trwania stanu ustalonego przepływu pierwszego i drugiego w jednym okresie T. Przedstawione na rysunku Z.2.4 okno definicji stopnia wypełnienia sygnału w widocznej formie, wraz ze zdefiniowanymi dziesięcioma punktami, umożliwia regulację stopnia wypełnienia sygnału sterującego z krokiem co 10%. Częstotliwość taktowania sygnału wyjściowego wynosi 1ms. Przy 10 zdefiniowanych punktach czas jednego przebiegu zdefiniowanych wartości wynosi 10 ms. Przy ustawionej (200) częstotliwości „Sample Rate (szybkość = 0)" w okienku na rysunku Z.2.2 częstotliwość sygnału sterującego zaworem rozdzielającym wynosi $f_c = 2Hz$. Dla tak zdefiniowanych punktów sygnału sterującego stopień wypełnienia sygnału wynosi $PWM = 70\%$.

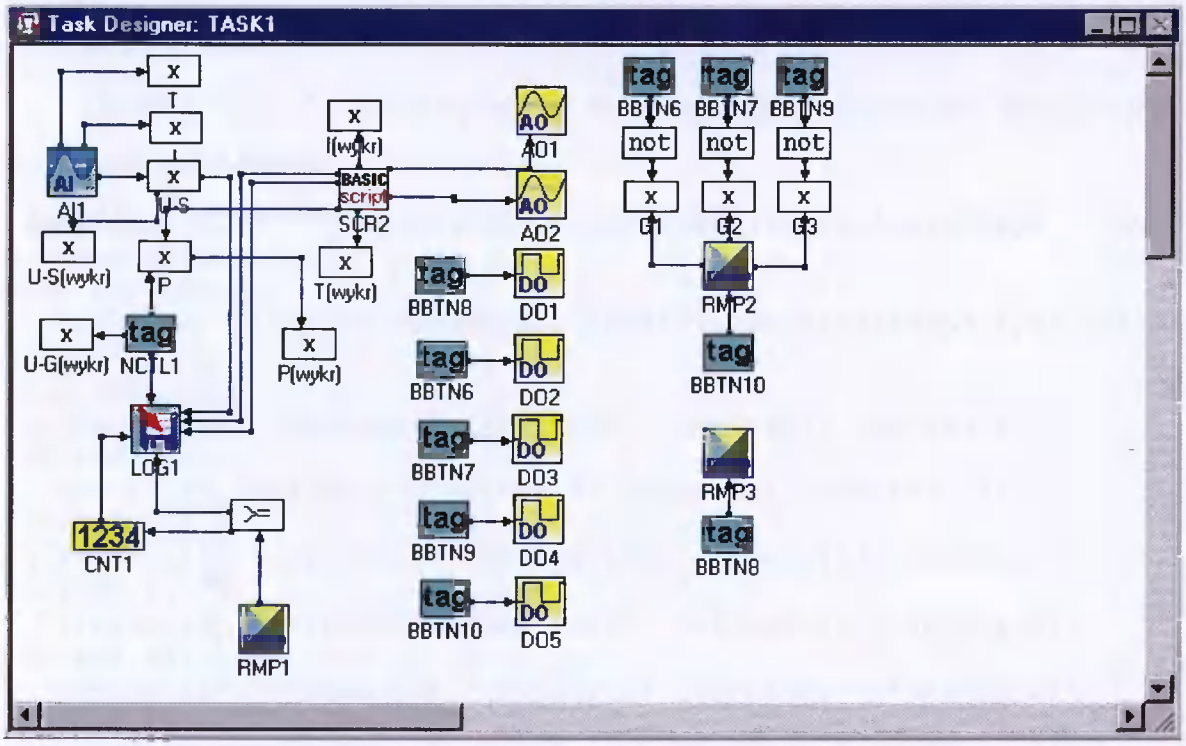
Do sterowania natężeniem przepływu i temperaturą strumienia głównego zbudowano układ w oparciu o kartę pomiarową Adventech PCL-812. Widok ogólny okna aplikacji sterującej przedstawiono na rysunku Z.2.5.



Rys. Z.2.5. Widok okna głównego panelu sterowania natężeniem przepływu i temperaturą strumienia głównego.

Aplikacja ta została stworzona w programie Advantech GeniDAQ. Widoczny na powyższym rysunku szczegół A to okno ustawienia napięcia zasilającego grzałki. Przycisk „G wł/wył [F3]" służy do załączenia zasilania grzałek. Każdą z trzech grzałek można załączyć i wyłączyć niezależnie od innych. Służą do tego przyciski „G1 [F5]", „G2 [F6]"oraz „G3 [F7]". Poniżej szczegółu A wyświetlana jest bieżąca wartość natężenia prądu płynącego przez grzałki oraz moc grzałek (aktualnie załączonych). Okienko oznaczone jako szczegół B umożliwia nastawienie napięcia zasilającego wentylator promieniowy, będący źródłem strumienia głównego. Bieżące napięcie na zaciskach silnika wentylatora wyświetlane jest poniżej.

Schemat blokowy programu sterującego układem zasilania przedstawiono poniżej na rysunku Z.2.6.



Rys. Z.2.6. Schemat blokowy aplikacji sterującej zasilaniem dyszy.

Załącznik nr 3 - Badania numeryczne

Listing pliku do automatycznego tworzenia siatki elementów skończonych w programie GAMBIT.

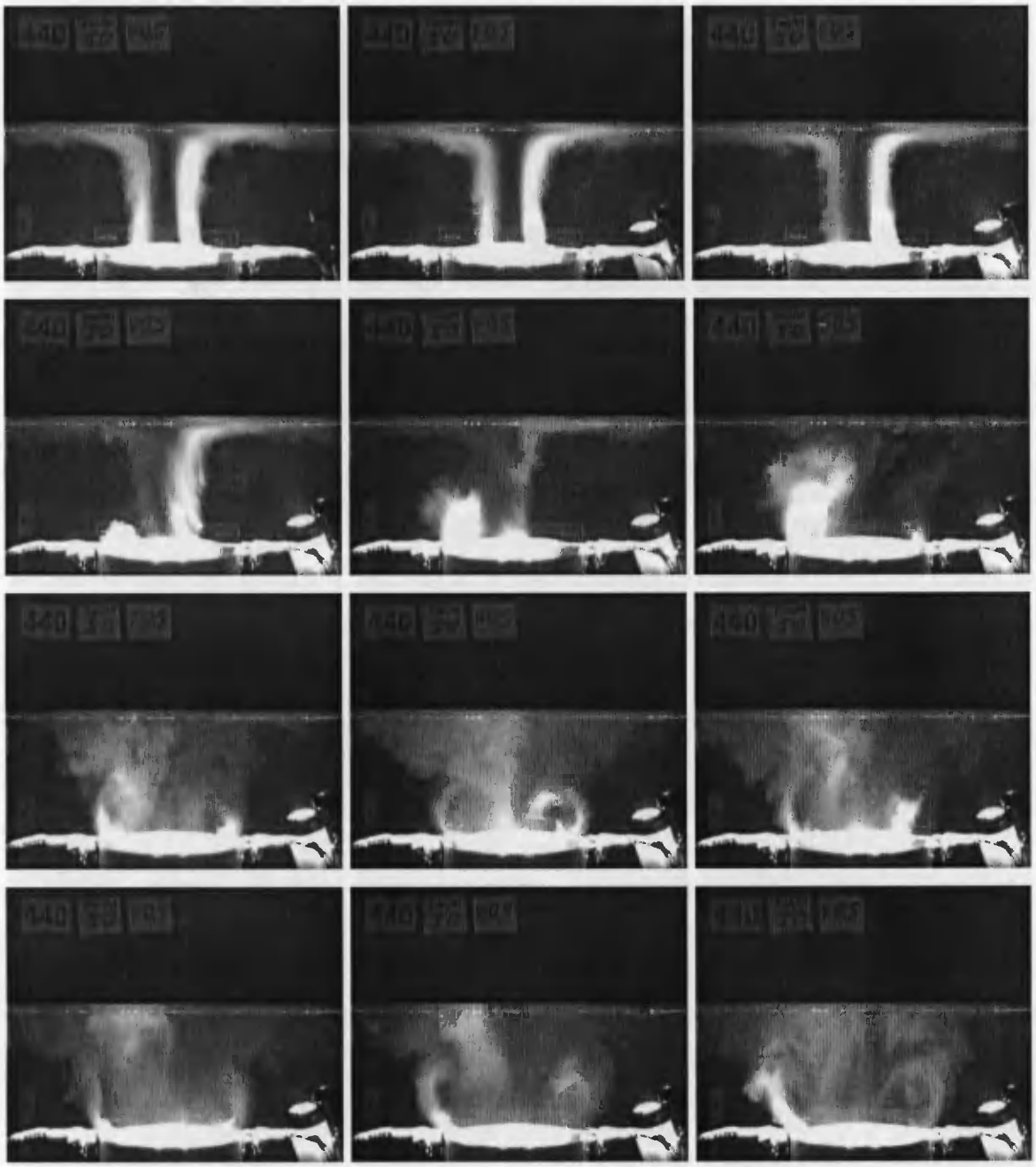
```
identifier name "C:\spare\ModelDyszy\MA88a32w02xc00ast05spE_" new
nosaveprevious
undo begingroup
import iges "C:\spare\ModelDyszy\MA88a32w02xc00ast05spE.igs" scale
1 spatial
undo endgroup
vertex convert "vertex.1" "vertex.2" "vertex.3" "vertex.4"
"vertex.5" \
  "vertex.6" "vertex.7" "vertex.8" "vertex.9" "vertex.10"
"vertex.11" \
  "vertex.12" "vertex.13" "vertex.14" "vertex.15" "vertex.16"
"vertex.17" \
  "vertex.18" "vertex.19" "vertex.20" "vertex.21" "vertex.22"
"vertex.23" \
  "vertex.24" "vertex.25" "vertex.26" "vertex.27" "vertex.28"
"vertex.29" \
  "vertex.30" "vertex.31" "vertex.32" "vertex.33" "vertex.34"
"vertex.35" \
  "vertex.36" "vertex.37" "vertex.38" "vertex.39" "vertex.40"
"vertex.41" \
  "vertex.42" "vertex.43" "vertex.44" "vertex.45" "vertex.46"
"vertex.47" \
  "vertex.48" "vertex.49" "vertex.50" "vertex.51" "vertex.52"
"vertex.53" \
  "vertex.54" "vertex.55" "vertex.56" "vertex.57" "vertex.58"
"vertex.59" \
  "vertex.60" "vertex.61" "vertex.62" "vertex.63" "vertex.64"
edge convert "edge.1" "edge.2" "edge.3" "edge.4" "edge.5" "edge.6"
"edge.7" \
  "edge.8" "edge.9" "edge.10" "edge.11" "edge.12" "edge.13"
"edge.14" \
  "edge.15" "edge.16" "edge.17" "edge.18" "edge.19" "edge.20"
"edge.21" \
  "edge.22" "edge.23" "edge.24" "edge.25" "edge.26" "edge.27"
"edge.28" \
  "edge.29" "edge.30" "edge.31" "edge.32"
face create "nog" wireframe "edge.29" "edge.30" "edge.31"
"edge.32" real
face create "spoj" wireframe "edge.25" "edge.26" "edge.27"
"edge.28" real
face create "dysz" wireframe "edge.1" "edge.2" "edge.3" "edge.4"
"edge.5" \
  "edge.6" "edge.7" "edge.8" "edge.9" "edge.10" "edge.11"
"edge.12" "edge.13" \
  "edge.14" "edge.15" "edge.16" "edge.17" "edge.18" "edge.19"
"edge.20" \
  "edge.21" "edge.22" "edge.23" "edge.24" real
face move "nog" dangle 42 vector 76 0 0 origin 267.5 -1.4210855e-
14 0
```

```
volume create "dysza" revolve "dysz" dangle 90 vector 76 0 0
origin 267.5 \
  -1.4210855e-14 0
volume create "noga" revolve "nog" dangle 6 vector 76 0 0 origin
267.5 \
  -1.4210855e-14 0
volume create "spojpla" revolve "spoj" dangle 90 vector 76 0 0
origin 267.5 \
  -1.4210855e-14 0
volume unite volumes "spojpla" "noga"
volume subtract "dysza" volumes "spojpla"
solver select "FIDAP"
physics create "fluid" ctype "FLUID" volume "dysza"
physics create "sym1" btype "SURFACE" face "dysz"
physics create "sym2" btype "SURFACE" face "face.4"
physics create "ctr" btype "WALL" face "face.12"
physics create "outaxi" btype "OUTFLOW" face "face.18"
physics create "outrad" btype "OUTFLOW" face "face.17"
physics create "vent" btype "VENT" face "face.5"
physics create "wall" btype "WALL" face "face.6" "face.7" "face.8"
"face.9" \
  "face.10" "face.11" "face.13" "face.14" "face.15" "face.16"
"face.19" \
  "face.20" "face.21" "face.22" "face.23" "face.24" "face.25"
"face.26" \
  "face.27" "nog" "face.28" "face.34" "face.35" "face.36"
"face.38" "face.39"
volume mesh "dysza" tetrahedral size 3.5
export fidap "C:\spare\ModelDyszy\MA88a32w02xc00ast05spE_.FDNEUT"
save
```

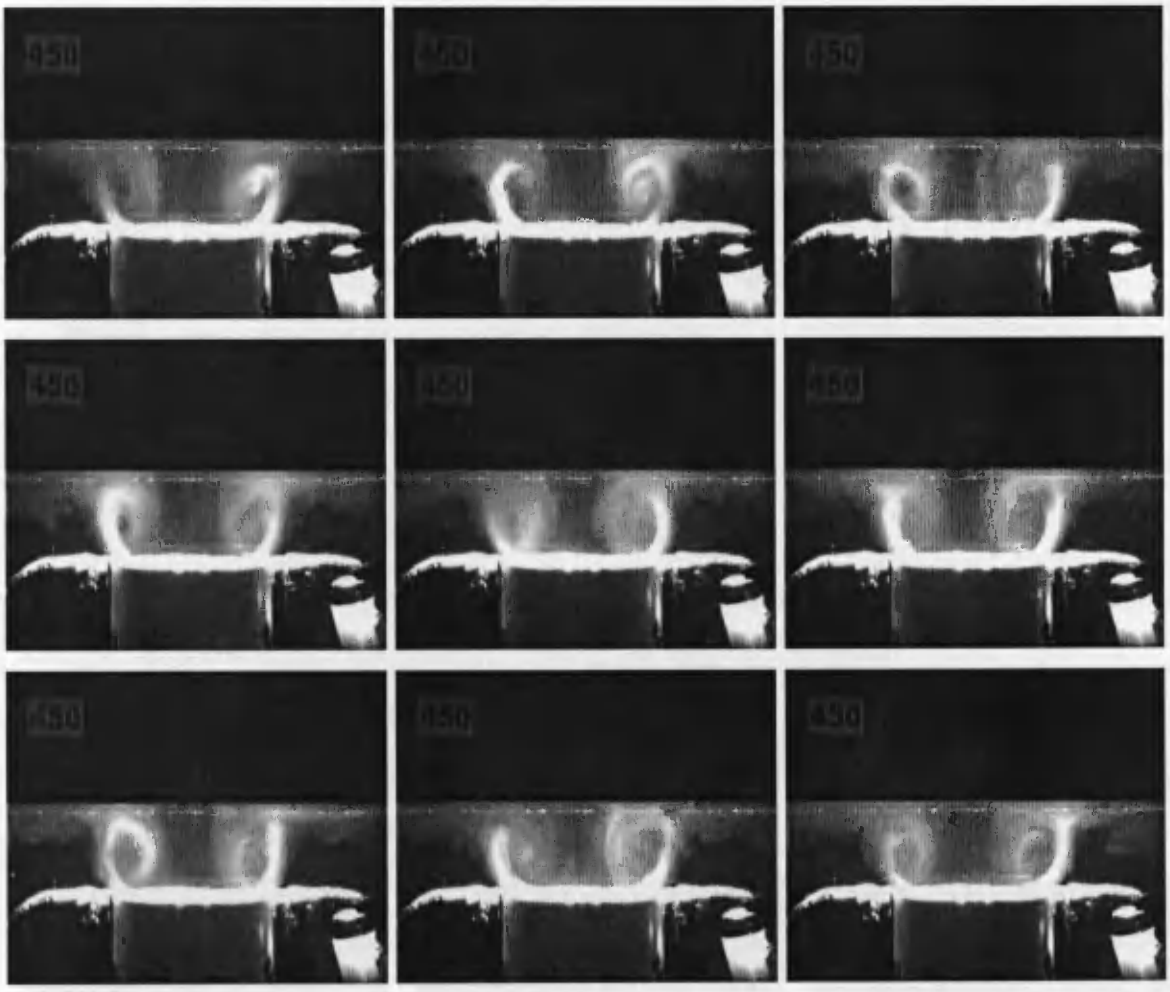
Tekst pogrubiony to nazwy plików importowanych i modeli eksportowanych. Nazwy te zmieniały się zgodnie ze zmianami wartości parametrów tworzonych modeli do obliczeń numerycznych.

Załącznik nr 4 - Badania wizualizacyjne i pomiary prędkości

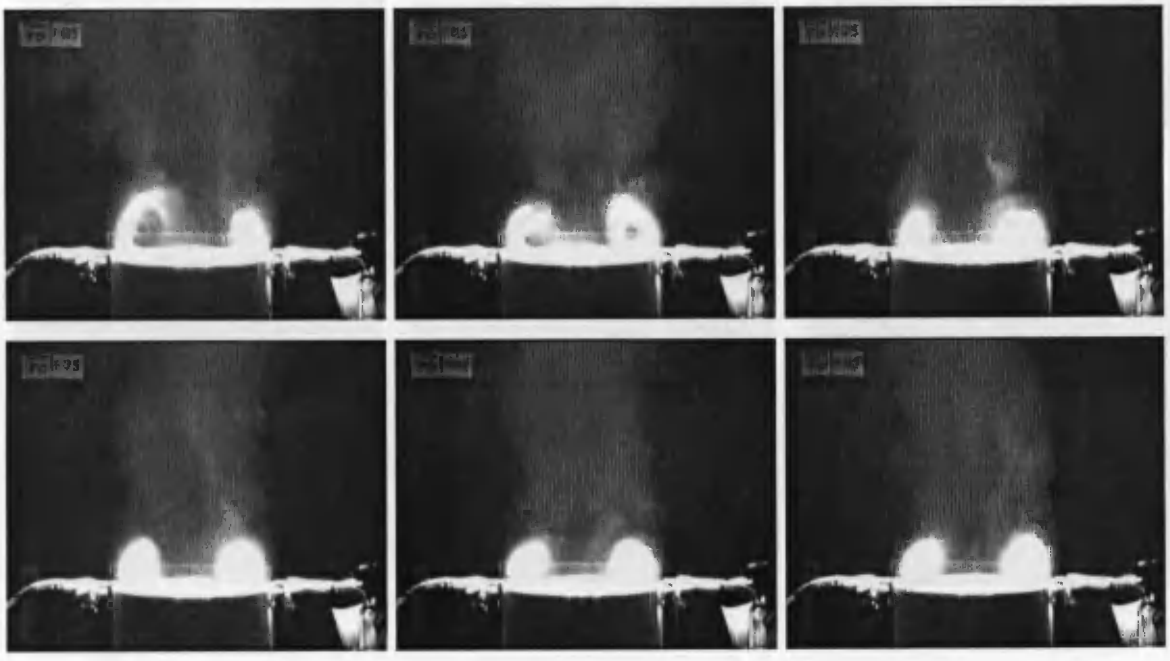
Wybrane klatki filmowe przedstawiające opływ ściany przez wypływający z dyszy strumień dla różnych odległości ściany od dyszy.



Wybrane klatki filmu dla wizualizacji przepływu dla lw=110mm



Wybrane klatki z filmu wizualizacji przepływu w stanie ustalonym 2. dla lw=70mm



Wybrane klatki dla przepływu swobodnego w stanie ustalonym drugim

Załącznik nr 5 - Badania termograficzne

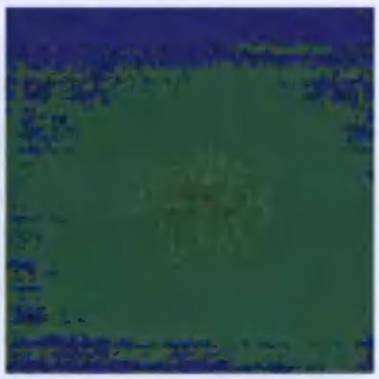
Z uwagi na dużą liczbę wyników pomiarów temperatury ściany ogrzewanej przedstawione będą wyniki wybrane. Opisy rysunków są jednocześnie oznaczeniem wartości parametrów wejściowych, nastawionych podczas danego pomiaru.

Przykładowo, opis „Stan12-11Hzlw080pwm20_15" oznacza:

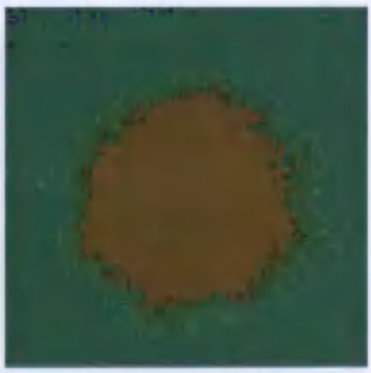
- Stan12 – przepływ ze zmianą stanu ustalonego
- Lw080 – odległość ściany od dyszy $l_w = 80\,mm$;
- 11Hz – częstotliwość strumienia sterującego $f_c = 1{,}1Hz$, dla częstotliwości $f_c = 1{,}5\,Hz$ oznaczenie ma postać 15Hz;
- pwm20 – stopień wypełnienia sygnału $PWM = 20\%$, dla wypływu strumienia tylko w stanie ustalonym pierwszym brak oznaczenia;
- _15 – numer kolejny pomiaru temperatury ściany.

Dla wszystkich wyników przyjęta została ta sama skala temperatury, określona na podstawie najniższej i najwyższej temperatury uzyskanej podczas pomiarów.

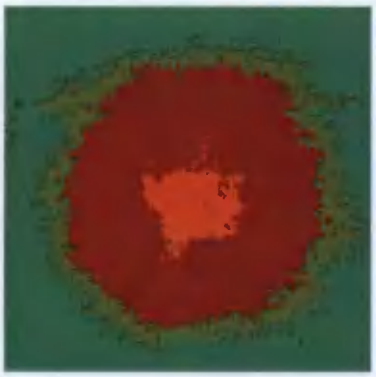
Stan 1 lw100_01



Stan1 lw100_08

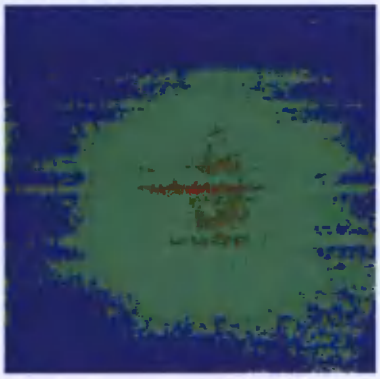


Stan1 lw100_14

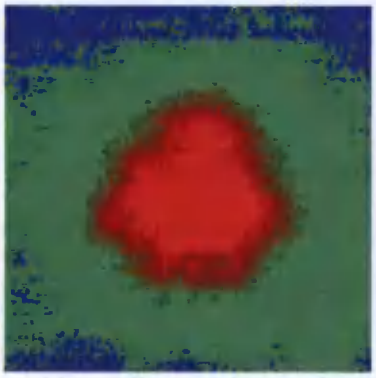


Stan1 lw100_20

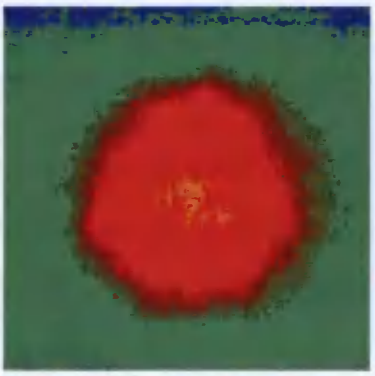
Stan1 lw60_01



Stan1 lw60_08



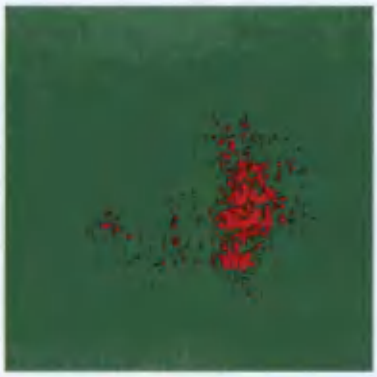
Stan1 lw60_14



Stan1 lw60_20

Stan2 lw70_01

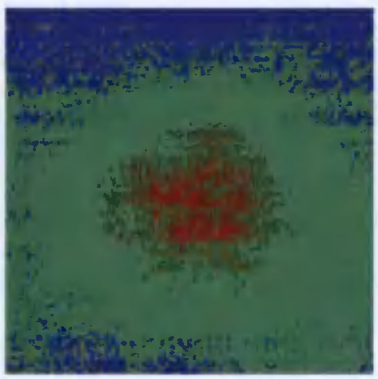
Stan2 lw70_08



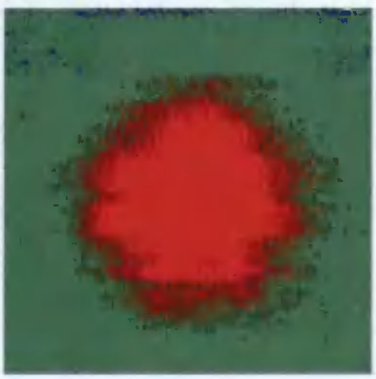
Stan2 lw70_14

Stan2 lw70_20

Stan1 lw70_01



Stan1 lw70_08



Stan1 lw70_14

Stan1 lw70_20

Załącznik nr 6 - Obróbka danych w aplikacji MS Excel.

Wyniki otrzymane w badaniach termograficznych exportowane były do plików tekstowych i obrabiane w arkuszu kalkulacyjnym MS Excel za pomocą poniższych procedur stworzonych w języku Visual Basic for Aplication.

```
'ZmianaNazwyArkusza
    Range("A16").Select
    ActiveSheet.Name = "export"
    Range("A7").Select

' KopiaDanychNowyArkusz
    Sheets.Add
    Sheets("export").Select
    Range("A4:IG248").Select
    Selection.Copy
    Sheets("Arkusz1").Select
    Range("A6").Select
    ActiveSheet.Paste
    Range("A5").Select
    Sheets.Add
    Sheets("export").Select
    Range("A249:IG493").Select
    Selection.Copy
    Sheets("Arkusz2").Select
    Range("A6").Select
    ActiveSheet.Paste
    Range("A5").Select
    Sheets.Add
    Sheets("export").Select
    Range("A494:IG738").Select
    Selection.Copy
    Sheets("Arkusz3").Select
    Range("A6").Select
    ActiveSheet.Paste
    Range("A5").Select
    Sheets.Add
    Sheets("export").Select
    Range("A739:IG983").Select
    Selection.Copy
    Sheets("Arkusz4").Select
    Range("A6").Select
    ActiveSheet.Paste
    Range("A5").Select
    Sheets.Add
    Sheets("export").Select
    Range("A984:IG1228").Select
    Selection.Copy
```

```
Sheets("Arkusz5").Select
Range("A6").Select
ActiveSheet.Paste
Range("A5").Select
Sheets.Add
Sheets("export").Select
Range("A1229:IG1473").Select
Selection.Copy
Sheets("Arkusz6").Select
Range("A6").Select
ActiveSheet.Paste
Range("A5").Select
Sheets.Add
Sheets("export").Select
Range("A1474:IG1718").Select
Selection.Copy
Sheets("Arkusz7").Select
Range("A6").Select
ActiveSheet.Paste
Range("A5").Select
Sheets.Add
Sheets("export").Select
Range("A1719:IG1963").Select
Selection.Copy
Sheets("Arkusz8").Select
Range("A6").Select
ActiveSheet.Paste
Range("A5").Select
Sheets.Add
Sheets("export").Select
Range("A1964:IG2208").Select
Selection.Copy
Sheets("Arkusz9").Select
Range("A6").Select
ActiveSheet.Paste
Range("A5").Select
Sheets.Add
Sheets("export").Select
Range("A2209:IG2453").Select
Selection.Copy
Sheets("Arkusz10").Select
Range("A6").Select
ActiveSheet.Paste
Range("A5").Select
Sheets.Add
Sheets("export").Select
Range("A2454:IG2698").Select
Selection.Copy
Sheets("Arkusz11").Select
Range("A6").Select
ActiveSheet.Paste
```

```
Range("A5").Select
Sheets.Add
Sheets("export").Select
Range("A2699:IG2943").Select
Selection.Copy
Sheets("Arkusz12").Select
Range("A6").Select
ActiveSheet.Paste
Range("A5").Select
Sheets.Add
Sheets("export").Select
Range("A2944:IG3188").Select
Selection.Copy
Sheets("Arkusz13").Select
Range("A6").Select
ActiveSheet.Paste
Range("A5").Select
Sheets.Add
Sheets("export").Select
Range("A3189:IG3433").Select
Selection.Copy
Sheets("Arkusz14").Select
Range("A6").Select
ActiveSheet.Paste
Range("A5").Select
Sheets.Add
Sheets("export").Select
Range("A3434:IG3678").Select
Selection.Copy
Sheets("Arkusz15").Select
Range("A6").Select
ActiveSheet.Paste
Range("A5").Select
Sheets.Add
Sheets("export").Select
Range("A3679:IG3923").Select
Selection.Copy
Sheets("Arkusz16").Select
Range("A6").Select
ActiveSheet.Paste
Range("A5").Select
Sheets.Add
Sheets("export").Select
Range("A3924:IG4168").Select
Selection.Copy
Sheets("Arkusz17").Select
Range("A6").Select
ActiveSheet.Paste
Range("A5").Select
Sheets.Add
Sheets("export").Select
```

```
    Range("A4169:IG4413").Select
    Selection.Copy
    Sheets("Arkusz18").Select
    Range("A6").Select
    ActiveSheet.Paste
    Range("A5").Select
    Sheets.Add
    Sheets("export").Select
    Range("A4414:IG4658").Select
    Selection.Copy
    Sheets("Arkusz19").Select
    Range("A6").Select
    ActiveSheet.Paste
    Range("A5").Select
    Sheets.Add
    Sheets("export").Select
    Range("A4659:IG4903").Select
    Selection.Copy
    Sheets("Arkusz20").Select
    Range("A6").Select
    ActiveSheet.Paste
    Range("A5").Select
Dim Ark As Integer
    For Ark = 1 To 20
    Sheets("Arkusz" & Ark & "").Select
    Range("A130:IG131").Select
    Selection.Copy
    Range("A255").Select
    ActiveSheet.Paste
    Range("B257").Select
    Application.CutCopyMode = False
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=AVERAGE(R[-2]C:R[-1]C)"
    Selection.AutoFill Destination:=Range("B257:IG257"), Type:=xlFillDefault
    Range("B257:IG257").Select
    Selection.Copy
    Cells(259, 2).Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
      False, Transpose:=False
    Next Ark
  Sheets.Add
  For Ark = 1 To 20
  Sheets("Arkusz" & Ark & "").Select
    Range("A7").Select
    Selection.Copy
    Sheets("Arkusz21").Select
    Cells((23 - Ark), 1).Select
    ActiveSheet.Paste
  Sheets("Arkusz" & Ark & "").Select
    Range("B257:IG257").Select
    Selection.Copy
  Sheets("Arkusz21").Select
```

```
    Cells((23 - Ark), 2).Select
    ActiveSheet.Paste
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
      False, Transpose:=False
Next Ark

Dim K, W As Integer
Dim T  As Single
    Range("B25").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=ROUND(R[-22]C,1)"
    Selection.AutoFill Destination:=Range("B25:I25"), Type:=xlFillDefault
    Range("B25:I25").Select
    Selection.AutoFill Destination:=Range("B25:IG25"), Type:=xlFillDefault
    Range("B25:IG25").Select
    Selection.AutoFill Destination:=Range("B25:IG44"), Type:=xlFillDefault
    Range("B25:IG44").Select
    ActiveWindow.ScrollColumn = 1
    Range("A3:A22").Select
    Selection.Copy Destination:=Range("A25:A44")
    Range("A25:A44").Select
    Range("A3:A22").Select
    Selection.Copy Destination:=Range("A47:A66")
    Range("A47:A66").Select
    For W = 1 To 20
      For K = 1 To 120
Cells(W + 46, K + 1).Value = (Cells(W + 24, 122 - K) + Cells(W + 24, 121 + K))/2
      Next K
    Next W
    Range("B2").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "1"
    Range("C2").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "2"
    Range("B2:C2").Select
    Selection.AutoFill Destination:=Range("B2:IG2"), Type:=xlFillDefault
    Range("B2:IG2").Select
    Range("A2").Select
    Range("B2:IG2").Select
    Selection.Copy
    Range("B24").Select
    ActiveSheet.Paste
    Range("B2:DQ2").Select
    Selection.Copy
    Range("B46").Select
    ActiveSheet.Paste
    Range("A46").Select

'A4_Makro_Obliczenie Różnicy temperatury Obraz20-Obraz1plusWykres
    Range("A69").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Obraz20DeltaT"
    Range("B69").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=R[-3]C-R[-22]C"
```

```
    Range("B69").Select
    Selection.AutoFill Destination:=Range("B69:DQ69"), Type:=xlFillDefault
    Range("A69:DQ69").Select
    Selection.Copy
    Range("A70").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
      False, Transpose:=False
    Application.CutCopyMode = False
      Range("A70:DQ70").Select
    Charts.Add
    ActiveChart.ChartType = xlXYScatterLinesNoMarkers
    ActiveChart.SetSourceData Source:=Sheets("Arkusz21").Range("A69:DQ69"), _
      PlotBy:=xlRows
    ActiveChart.Location Where:=xlLocationAsObject, Name:="Arkusz21"
    With ActiveChart
      .HasTitle = True
      .ChartTitle.Characters.Text = "Obraz20DeltaT"
      .Axes(xlCategory, xlPrimary).HasTitle = False
      .Axes(xlValue, xlPrimary).HasTitle = False
    End With
    ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
    ActiveChart.SeriesCollection(1).Trendlines.Add(Type:=xlPolynomial,Order:=3 _
      , Forward:=0, Backward:=0, DisplayEquation:=True, DisplayRSquared:= _
      False).Select
    ActiveWindow.Visible = False
    Range("A72").Select
    Sheets("Arkusz21").Select
    ActiveSheet.ChartObjects("Wykres 1").Activate
    ActiveChart.SeriesCollection(1).Trendlines(1).DataLabel.Select
      Selection.NumberFormat = "0.0000000"

'A5_Makro_WyznaczenieTmaxTminTśrorazDelta
   Range("B72").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Tmax"
    Range("C72").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Tmin"
    Range("D72").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Tsr"
    Range("B73").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=max"
    Range("B73").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MAX(R[-4]C:R[-4]C[119])"
    Range("C73").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MIN(R[-4]C[-1]:R[-4]C[118])"
    Range("D73").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=AVERAGE(R[-4]C[-2]:R[-4]C[117])"
    Range("A75").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "delta"
    Range("B75").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=(R[-2]C-R[-2]C[1])/R[-2]C[2]"
    Range("B75").Select
```

```
'A6_ObliczenieIlosciCiepla dQ=dm*cp*T()
  Range("A68").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"
  Range("B68").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "0.001875"
  Range("A68:B68").Select
  Selection.AutoFill Destination:=Range("A68:DQ68"), Type:=xlFillDefault
  Range("A68:DQ68").Select
  Range("A79").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "deQ="
  Range("D75").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "g="
  Range("D76").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "0.0006"
  Range("E75").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "ro="
  Range("E76").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "2720"
  Range("F75").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "c="
  Range("F76").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "896"
  Range("B79").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 = _
    "=3.1415927*(R[-11]C^2-R[-11]C[-1]^2)*R76C4*R76C5*R76C6*R[-10]C"
  Range("B79").Select
  Selection.AutoFill Destination:=Range("B79:DQ79"), Type:=xlFillDefault
  Range("B79:DQ79").Select
  Range("DR79").Select
  Range("A81").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "Q="
  Range("B81").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "=SUM(R[-2]C:R[-2]C[119])"
  Range("B82").Select

End Sub
```

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy BIBLIOTEKA GŁÓWNA

Biblioteka Główna UTP w Bydgoszczy
D 324