

ISSN 0239-9091

Janusz Telega

**Eksperymentalne badania wpływu wirów
wzdłużnych na niestacjonarne oderwanie
wywołane falą uderzeniową**

565/1524/2019



GDAŃSK 2019

Recenzenci/Reviewers

prof. dr hab. Tomasz Kowalewski
Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk

prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielniak
Politechnika Śląska

Praca wpłynęła do redakcji 2 października 2019 r.

Komitety Redakcyjny/Editorial Committee

Jan Kiciński (przewodniczący/editorial director), Marcin Lackowski,
Piotr Doerffer, Alicja Krella, Mirosław Dors, Dariusz Kardaś,
Piotr Lampart, Wiesław Ostachowicz

Redaktor serii/Series Editor

Jarosław Frączak

Wydrukowano z matryc dostarczonych przez autora.

© Copyright by Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego
Polskiej Akademii Nauk, Gdańsk 2019

All Rights Reserved

ISSN 0239-9091

ISBN 978-83-88237-94-2

Wydawnictwo IMP PAN

Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk

ul. Józefa Fiszera 14, 80-231 Gdańsk, Poland

tel. 58-52-25-141, fax 58-341-61-44, e-mail: redakcja@imp.gda.pl

<http://www.imp.gda.pl/zeszyty-naukowe-imppan/>

Wydanie I. Nakład 25 egz.

Druk i oprawa:

Studio 4

Spis treści

Oznaczenia	7
1 Wprowadzenie	11
1.1 Analiza literatury i stanu wiedzy	11
1.2 Cel i zakres pracy	63
2 Stanowisko badawcze	67
2.1 Tunel transoniczny	67
2.2 Sekcja badawcza	72
3 Metody i narzędzia	76
3.1 Wstęp	76
3.2 Projektowanie dyszy metodą charakterystyk	79
3.2.1 Równania charakterystyk	79
3.2.2 Projektowanie kształtu dyszy	81
3.3 Pomiar rozkładu liczby Macha w dyszy	87
3.4 Pomiar parametrów warstw przyściennych	88
3.5 Wizualizacja olejowa	91
3.6 Układ do wizualizacji metodą smugową; "Schlieren"	94
3.7 Pomiar i analiza geometrii układu falowego	97
3.8 Pomiar ciśnienia statycznego metodą PSP (farb czułych na ciśnienie)	99
3.8.1 Zasada pomiaru ciśnienia statycznego farbą PSP . . .	99
3.8.2 Realizacja metody PSP	102

3.9	Analiza zdjęć interferometrycznych metodą FTFA	120
3.9.1	Metoda FTFA	120
3.9.2	Niepewność metody	130
3.9.3	Implementacja numeryczna	132
3.10	Pomiar i analiza oscylacji ciśnienia statycznego	133
3.11	Pomiar i analiza oscylacji fali uderzeniowej	135
4	Wyniki badań stacjonarnej struktury przepływu	140
4.1	Synteza kształtu dyszy	140
4.2	Rozkład liczby Macha wzdłuż osi dyszy	145
4.3	Geometria stopy lambda	156
4.4	Warstwy przyścienne	158
4.4.1	Trawers 25 mm powyżej fali uderzeniowej	161
4.4.2	Trawers 30 mm poniżej fali uderzeniowej	165
4.4.3	Trawers 55 mm poniżej fali uderzeniowej	169
4.5	Wizualizacja olejowa	171
4.6	Wizualizacja metodą PSP	176
4.7	Wizualizacja metodą FTFA	179
5	Wyniki badań efektów niestacjonarnych	182
5.1	Oscylacje ciśnienia statycznego	183
5.2	Oscylacje fali uderzeniowej	190
5.2.1	Przednia fala	192
5.2.2	Tyłna fala	197
5.2.3	Główna fala	198
5.2.4	Odległość pomiędzy falami	199
5.3	Kształt fali podczas oscylacji	203
6	Zakończenie	208
6.1	Wnioski końcowe	208
6.2	Podsumowanie	212

7	Dodatki	214
7.1	Położenia punktów pomiaru ciśnienia statycznego	214
7.2	Analiza wpływu rozmiaru sondy na pomiary warstw przy- ściennych	216
7.3	Warstwy przyścienne, kompletne wyniki	219
7.4	Wizualizacja olejowa, kompletne wyniki	225
7.5	Numeryczna implementacja metody FTFA	231
	7.5.1 Przygotowanie danych	231
	7.5.2 Wyznaczenie obszaru zawierającego informacje	232
	7.5.3 Wyznaczenie mapy fazowej obrazów	237
7.6	Oscylacje fali uderzeniowej, kompletne wyniki	243
	7.6.1 Przednia fala	243
	7.6.2 Tylna fala	248
	7.6.3 Główna fala	253
	7.6.4 Odległość pomiędzy falami	259
7.7	Weryfikacja narzędzia do prowadzenia analizy Fouriera	264
7.8	Analiza STFT	265
7.9	Kształt fali podczas oscylacji, dodatkowe wykresy	267
	Spis rysunków	276
	Spis tabel	278
	Bibliografia	279

Oznaczenia

- AJVG** – strumieniowe powietrzne generatory wirów
(ang. *Air Jet Vortex Generators*)
- BLC** – kontrola warstwy przyściennej
(ang. *Boundary Layer Control*)
- a** – izentropowa prędkość dźwięku $\left[\frac{m}{s}\right]$
- $b(\vec{r})$** – wartość sygnału tła [–]
- c** – cięciwa [mm]
- c_f** – współczynnik tarcia [–]
- c_p** – współczynnik ciśnienia ($c_p = \frac{2 \cdot (P - P_\infty)}{\rho \cdot v_\infty^2}$) [–]
- d** – długość drogi wiązki wewnątrz tunelu (pomiędzy oknami) [m]
- D** – tensor prędkości deformacji $\left[\frac{1}{s}\right]$
- E** – tensor jednostkowy
- e** – gęstość energii $\left[\frac{J}{m^3}\right]$
- FC** – metoda *Film Cooling*
- FTFA** – metoda *Fourier Transform Fringe Analysis*
- H_{12}** – parametr kształtu profilu warstwy przyściennej [–]
- h** – wysokość [mm]
- $h(\vec{r})$** – amplituda sygnału (maksymalna wartość) pierwszej harmonicznej [–]
- $i(\vec{r})$** – wartość jasności w punkcie numerycznego obrazu [–]
- j** – gęstość strumienia energii $\left[\frac{J}{s \cdot m^2}\right]$
- K** – stała Gladstone’a-Dale’a $\left[\frac{m^3}{kg}\right]$
- k** – podziałka [–]
- L1, L2** – niezmienniki Busemanna [–]
- LDA** – Dopplerowska anemometria laserowa (ang. *Laser Doppler Anemometry*)
- M** – liczba Macha [–]
- M_{is}** – izentropowa liczba Macha [–]
- $m(\vec{r})$** – amplituda sygnału (maksymalna wartość jasności w punkcie obrazu) [–]

NOBLC	– bez Kontroli warstwy przyściennej (ang. <i>No Boundary Layer Control</i>)
$n(\vec{r})$	– wartość sygnału szumu w rozdziale dotyczącym metody FTFA [–]
n	– współczynnik załamania światła [–]
P	– tensor naprężeń [Pa]
p	– ciśnienie [Pa]
p_0	– ciśnienie spiętrzenia [Pa]
p_i	– ciśnienie w i-tym punkcie warstwy przyściennej [Pa]
$\langle p \rangle$	– ciśnienie średnie [Pa]
$\langle p_{min} \rangle$	– ciśnienie minimalne [Pa]
$\langle p_{maks} \rangle$	– ciśnienie maksymalne [Pa]
$\langle p_{osc} \rangle$	– średnia oscylacji ciśnienia [Pa]
$\langle p_{RMS} \rangle$	– wartość RMS ciśnienia [Pa]
p_{TE}	– ciśnienia na krawędzi spływu [Pa]
PIV	– metoda <i>Particle Image Velocimetry</i>
Re	– liczba Reynoldsa [–]
R	– stała gazowa powietrza $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
\vec{r}	– położenie [m]
S	– odległość pomiędzy sąsiednimi generatorami [m]
S	– przekrój dyszy [m ²]
S_{kr}	– przekrój krytyczny dyszy [m ²]
T	– temperatura [K]
t	– czas [s]
U	– składowa X prędkości $\left[\frac{m}{s}\right]$
\vec{u}	– prędkość $\left[\frac{m}{s}\right]$
u	– składowa X prędkości $\left[\frac{m}{s}\right]$
V	– składowa Y prędkości $\left[\frac{m}{s}\right]$
v	– składowa Y prędkości $\left[\frac{m}{s}\right]$
W	– składowa Z prędkości $\left[\frac{m}{s}\right]$
VG	– generatory wirów (ang. <i>Vortex Generators</i>)
VR	– współczynnik prędkości wydmuchu do przepływu głównego [–]
V_∞	– prędkość przepływu głównego $\left[\frac{m}{s}\right]$
X_{Sh}	– położenie fali uderzeniowej [mm]
X_{Shock}	– położenie fali uderzeniowej [mm]
x	– składowa x położenia [mm]
y	– składowa y położenia [mm]

α	– kąt natarcia [°]
α_M	– kąt Macha [°]
α	– kąt wydmuchu od płaszczyzny ścianki [°]
γ	– współczynnik czasu ruchu małoskalowego [–] o kierunku zgodnym z głównym przepływem [–]
$\Delta\phi$	– różnica faz pomiędzy transformacjami obrazów [rad]
δ	– grubość warstwy przyściennej [mm]
δ_1	– grubość straty przekroju [mm]
δ_2	– grubość straty ilości ruchu [mm]
θ	– kąt wydmuchu względem kierunku przepływu głównego [°]
κ	– wykładnik adiabaty [–]
Λ	– współczynnik prędkości [–]
λ	– współczynnik prędkości wydmuchu do przepływu głównego [–]
$\vec{\nu}$	– wektor falowy $\left[\frac{1}{m}\right]$
ρ	– gęstość $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
$\phi_{ref}(\vec{r}), \phi_{flow}(\vec{r})$	– kąt fazowy w rozdziale dotyczącym metody FTFA [rad]
ϕ	– średnica dżetu [mm]
ω	– prędkość kątowna $\left[\frac{1}{s}\right]$

Operatory

- \otimes – splot
- $*$ – sprzężenie zespolone
- Im*** – obliczanie części urojonej
- Re*** – obliczanie części rzeczywistej

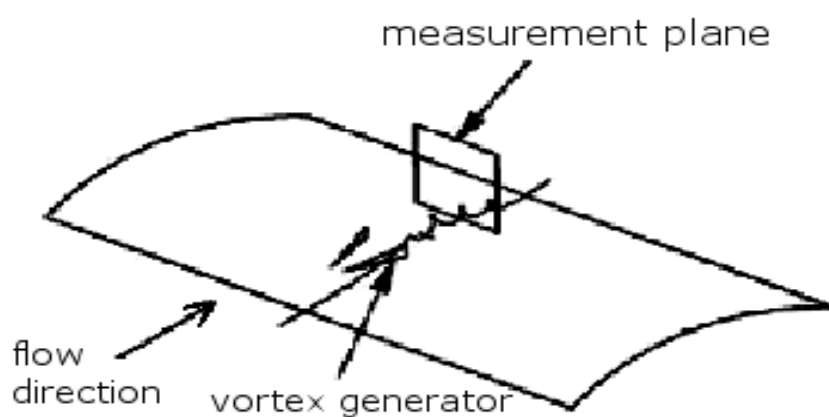
Rozdział 1

Wprowadzenie

1.1 Analiza literatury i stanu wiedzy

Zagadnienie zastosowania wirów wzdłużnych generowanych przez strumienie powietrza (dżety, ang. "jets") do sterowania przepływem pojawia się po raz pierwszy w publikacjach naukowych we wczesnych latach 50-tych ubiegłego wieku (prace Wallisa [1, 2, 3]). Pomysł na taką tematykę prowadzonych badań to efekt prowadzonych wówczas intensywnych prac nad stałymi generatorami wirów. Stanowiły one nowość, ale były już stosowane praktycznie w ówczesnym lotnictwie, na przykład w samolotach P-80A-1 i YF-86D. Generatory te w formie blaszki o kształcie litery V powodowały powstanie wiru wzdłużnego, który przenosił powietrze z zewnętrznych do głębszych obszarów warstwy przyściennej, zwiększając jej pęd. Powodowało to zwiększenie energii dolnych obszarów warstwy, przesuwało oderwanie w dół przepływu i pozwalało na pracę profilu przy większych obciążeniach, oraz dawało zmniejszenie oporu i zwiększenie siły nośnej. W pierwszej ze swoich prac [1] Wallis opisuje eksperymentalne badania w zakresie prędkości poddźwiękowych. Dla opóźnienia oderwania turbulენტnej warstwy przyściennej stosuje rząd kołowych otworów wydmuchujących strumienie powietrza prostopadle do powierzchni profilu. Działanie takiej metody sterowania zachowaniem przepływu tłumaczy jako efekt intensyfikacji mieszania spowodowanego wy-

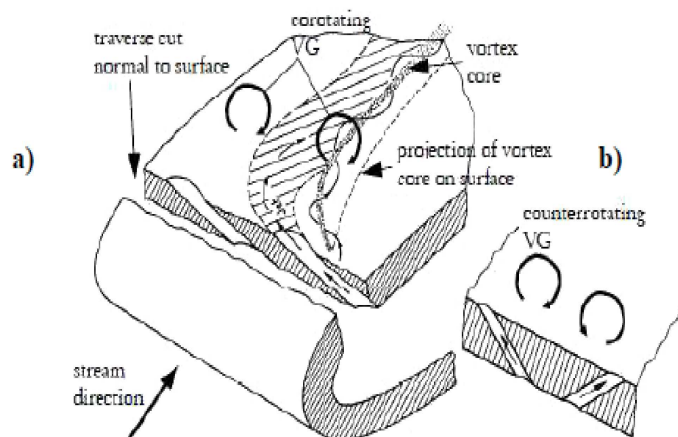
wołanymi wirami. Uzyskane wyniki dotyczące oderwania są pozytywne, ale wskazują na dużo mniejszą skuteczność generatorów opartych na dżetach, niż generatorów stałych, na przykład takich, jak schematycznie przedstawione na rysunku 1.1 generatorów blaszkowych. Generowane wiry są słabsze i krócej utrzymują się w przepływie.



Rys. 1.1. Schemat przepływu z obecnością generatorów stałych [4]

W kolejnej swojej pracy [2] proponuje ulepszenie generatorów strumieniowych poprzez ich pochylenie w kierunku stycznym do kierunku przepływu w celu nadania im składowej prędkości w tym kierunku. Uzyskiwane w ten sposób wiry wykazują intensywność i trwałość zbliżone do tych generowanych przez stałe generatory wirów.

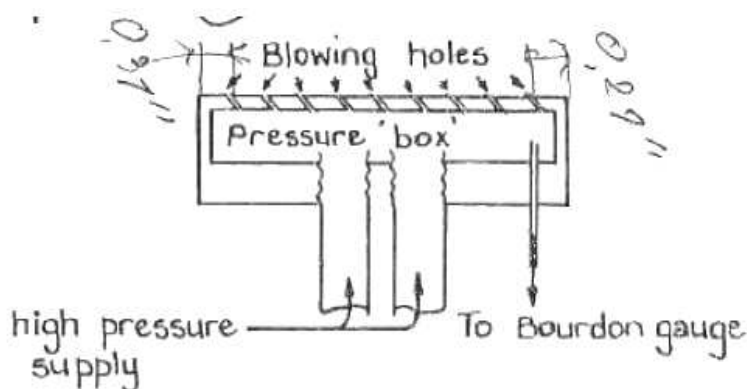
Przedstawioną w tej pracy strukturę wirów dla dwóch konfiguracji generatorów przedstawia rysunek 1.2.



Rys. 1.2. Schemat przepływu z obecnością generatorów i wirów [1]

Przy współobrotowej konfiguracji ("corotating VG", lewa część "a") na rysunku 1.2 kierunek obrotu wirów jest taki sam, natomiast przy przeciwoobrotowej konfiguracji generatorów ("counterrotating VG", prawa część "b") na rysunku 1.2 kierunek ten jest przeciwny. Autor zauważa, że generatory wirów w postaci dżetów pomimo nieco mniejszej efektywności, posiadają istotne zalety w porównaniu do generatorów stałych. Wynikają one z możliwości aktywowania ich tylko w wymagających tego fazach lotu, co pozwala uniknąć dodatkowego, stałego oporu związanego z generatorami blaszkowymi montowanymi na poszyciu. W trzeciej pracy [3] Wallis opisuje cykl badań przeprowadzonych w przepływie naddźwiękowym. Na podstawie swoich poprzednich doświadczeń [1] i [2] jako generator wirów stosuje rząd otworków pochylonych w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku przepływu głównego i generujących wiry współobrotowe. Schemat zastosowanego generatora wirów przedstawia rysunek 1.3. Badania prowadzone są na dwóch półprofilach umieszczonych w tunelu. Kąt wydmuchu dżetów wynosi 45° , wypływające strumienie przechylone są w kierunku lewej ściany tunelu. Na szerokości tu-

nelu rozmieszczono 10 dżetów równo oddalonych od siebie o 7,87 mm (0,31') i od lewej ściany. Odległość ta odpowiada 0,05 długości cięciwy profilu i została dobrana na bazie doświadczeń z generatorami blaszkowymi. Odległość od prawej ściany wynosiła 5,33 mm (0,21'), gdyż nie musiała umożliwiać "swobodnego" ruchu generowanego wiru w tym kierunku podczas spływania w dół przepływu.

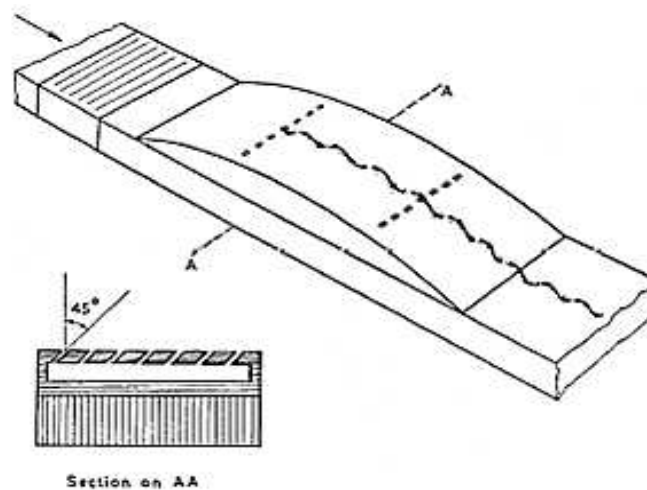


Rys. 1.3. Schemat generatora wirów [3]

Na półprofilu wykonano dwa rzędy otworów (w 40% i 66,7% cięciwy dla profilu o grubości względnej 6% i odpowiednio w 45,5% i 69,7% dla profilu o grubości względnej 8%). Eksperymenty rozpoczęto dla profilu 6% z jednym rzędem otworków o średnicy 0,53 mm (0,021'), ale po pierwszych, niezwykle zachęcających pomiarach otwory zostały powiększone do 0,79 mm (0,031') oraz dodano drugi ich rząd. Wyniki dotyczące otworów o średnicy 0,53 mm (0,021') nie zostały opublikowane. Prowadzone badania dotyczyły głównie przypadków dżetów zasilanych ciśnieniem wyższym niż ciśnienie spiętrzenia przepływu, jednakże autor stwierdza ich skuteczność przy zasilaniu ciśnieniem spiętrzenia przepływu głównego, a także wskazuje na ich prawdopodobną przewagę nad generatorami blaszkowymi (z zastrzeżeniem, że wyniki nie były uzyskane w dokładnie odpowiadających sobie eksperymentach). Autor stwierdza, że dżety potrafią generować tak samo

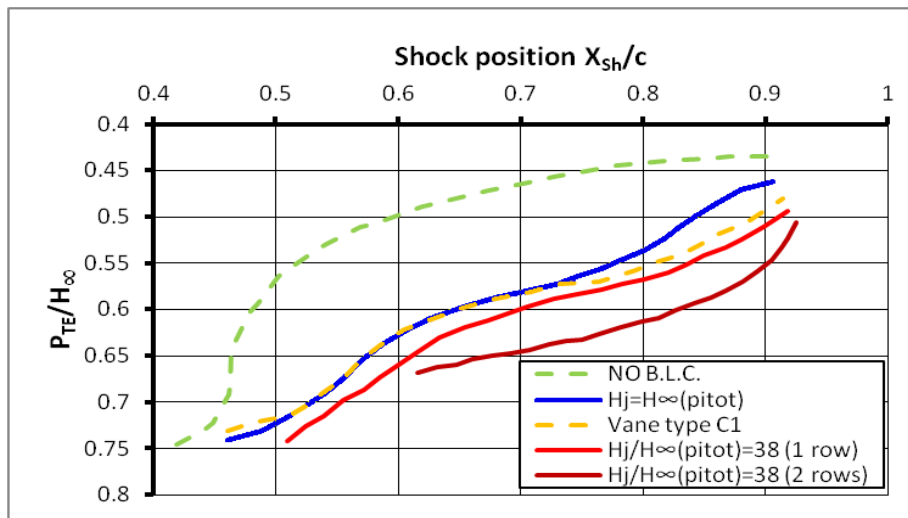
trwale i intensywne wiry jak generatory blaszkowe, oraz że pracują od nich efektywniej w przypadku małych odległości od generatora do fali uderzeniowej. Dodatkowo wskazuje na ich skuteczność także przy umieszczeniu w strefie oderwania przepływu. Liczba Reynoldsa tych pomiarów przy liczbie Macha przepływu głównego $M=0,9$, wynosiła $Re=2 \times 10^6$. Podsumowanie ówczesnej wiedzy na temat strumieniowych generatorów wirów na tle generatorów stałych stanowi praca Pearcy-ego [5], porównująca różne metody sterowania oderwaniem wywołanym falą uderzeniową. Tematyka tej pracy obejmuje generatory blaszkowe, wydmuch przez szczelinę, generatory strumieniowe i odsysanie przez perforowaną powierzchnię. We wprowadzeniu autor przyznaje, że mechanizm powodujący opisane przez Wallisa [3] zwiększenie efektywności generatorów strumieniowych przy ich pochyleniu nie jest wyjaśniony. Następnie proponuje opis zjawiska, w którym dżet po stronie kąta rozwartego wzmacnia jeden z pary przeciwbrotowych wirów, które były by równorzędne przy prostopadłym do powierzchni kierunku wydmuchu. Wzmocniony wir podróżuje blisko powierzchni, w przeciwieństwie do drugiego, który pojawia się powyżej. Następnie silniejszy wir wchłania ten słabszy (nie wywiera to na niego dużego wpływu). Taki mechanizm realizowany na krótkiej odległości w dół przepływu od generatora powoduje zastąpienie dwóch przeciwbrotowych wirów przez jeden silny wir poruszający się blisko powierzchni profilu. Składa się on częściowo z "oryginalnych" cząstek wdmuchiowanych przez dżety. W dalszej części, cytując publikację [3] oraz nieopublikowane materiały [6, 7] opisuje badania eksperymentalne generatorów strumieniowych przeprowadzone na półprofilu i na dwuwymiarowym profilu. Geometria układu w obydwóch doświadczeniach była dobrana na podstawie analogii do generatorów blaszkowych. Długość cięciwy badanego profilu wynosiła 152,4 mm (6'). Odległość pomiędzy generatorami wynosiła 0,05 długości cięciwy profilu (generatory blaszkowe wirów współbrotowych miały wysokość 0,01 długości cięciwy profilu, i rozstawione były

co 0,05 długości cięciwy profilu). Średnica otworu wynosiła 0,8 mm, kąt wydmuchu wynosił 45° . Schematycznie użyty model przedstawia rysunek 1.4.



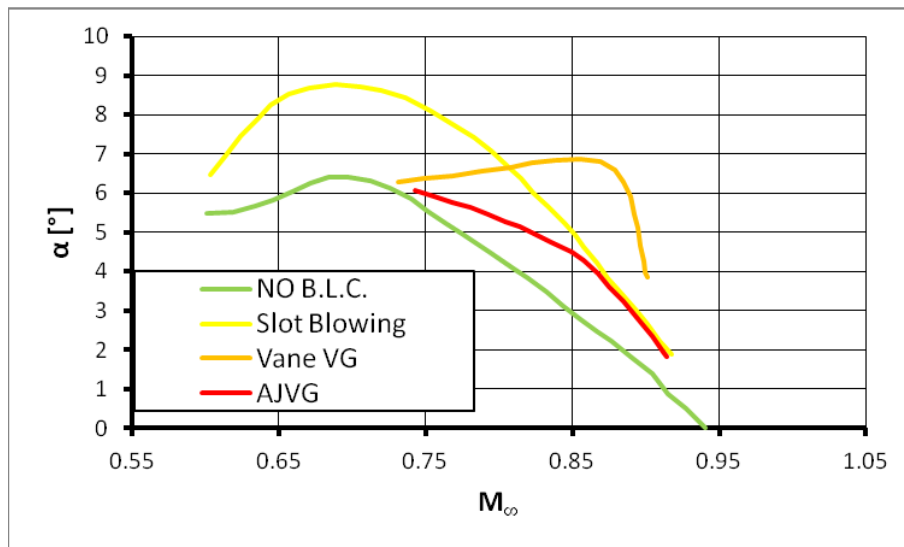
Rys. 1.4. Schemat kanału pomiarowego (półprofilu) [5]

Analizując otrzymane rezultaty autor wykazuje, że już przy zasilaniu generatorów ciśnieniem spiętrzenia przepływu głównego są one prawie tak skuteczne, jak generatory stałe, a zwiększanie tego ciśnienia przynosi już niewielki wzrost ich efektywności. Wykres na rysunku 1.5 zestawia znormalizowane ciśnienie na krawędzi spływu w funkcji położenia fali uderzeniowej na profilu; im większą ma ono wartość, tym mniejsza jest tendencja do ode-
rwanego przepływu od profilu. W pomiarach układ geometryczny nie zmieniał się, kolejne pozycje fali uderzeniowej uzyskiwano zmieniając liczbę Macha przepływu głównego.



Rys. 1.5. Wpływ zastosowania generatorów wirów na wartość ciśnienia na krawędzi spływu w funkcji położenia fali uderzeniowej [5]

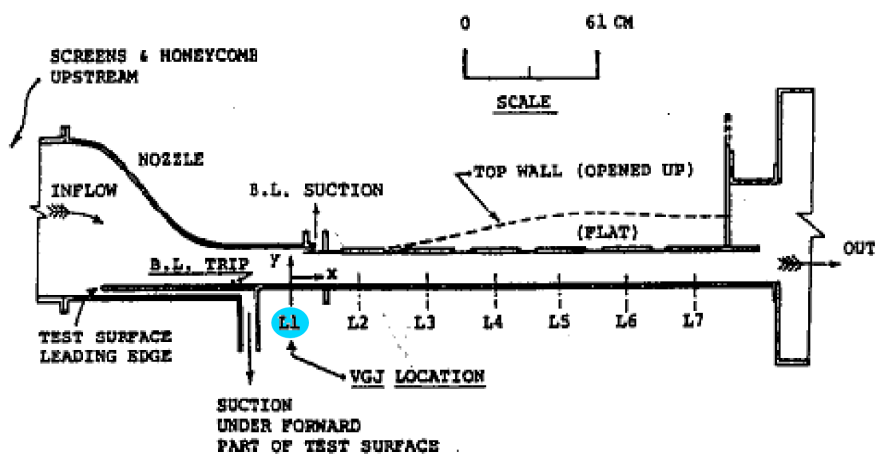
Wyraźnie widoczna jest, że skuteczność generowania wirów przez dżety jest zbliżona do skuteczności generatorów blaszkowych. Widoczne jest także, że wszystkie z badanych metod powodują zmniejszenie tendencji przepływu do oderwania. Najbardziej skłonny do oderwania jest przepływ bez kontroli warstwy przyściennej opisywany linią zieloną przerywaną. Najbardziej odporny na oderwanie jest przepływ opisywany ciągłą czerwoną krzywą. Autor sugeruje, że niewyjaśniony mechanizm kształtowania się wirów może w dużo większym stopniu zależeć od rozmieszczenia i kątów pochylenia dżetów, niż od ilości dostarczanego przez nie do warstwy pędu. Wniosek ten opiera na bardzo słabym wpływie zwiększania ciśnienia na efekty wytwarzane przez wiry. W badaniach na dwuwymiarowym profilu porównano skuteczność zapobiegania powstawaniu oderwania różnych metod takich jak dżety, generatory blaszkowe i wydmuch przez szczelinę; wszystkie umieszczone w 0,15 cięciwy. Analizowano je w funkcji kąta natarcia i liczby Macha przepływu. Moment (w sensie kąta natarcia) powstania oderwania warstwy od profilu obrazuje wykres na rysunku 1.6.



Rys. 1.6. Zestawienie wpływu różnych metod sterowania przepływem [5] na warunki pojawienia się oderwania

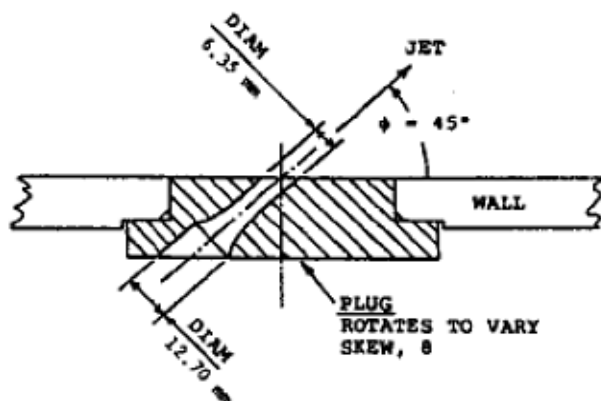
Widoczny jest bardzo mały zakres kątowy skuteczności dżetów, które wpływają pozytywnie na przepływ tylko do kąta natarcia mniejszego niż 6° . Dodatkowo, nawet w tym zakresie kątów ich efektywność jest znacząco niższa niż pozostałych metod. Autor nie przedstawia wyjaśnienia takich wyników. Wskazuje jednakże na konieczność dalszych badań dotyczących strumieniowych generatorów wirów zmierzających do wyjaśnienia mechanizmu ich powstawania w przepływie, oraz poznania metod optymalnego doboru parametrów samego generatora jak i prawidłowego jego umieszczenie w przepływie.

Kolejnym autorem, który podjął tą tematykę w szeregu ([8, 9, 10, 11, 12]) swoich prac jest Johnston ze współpracownikami. W pracy [8] autorzy ci za cel stawiają sobie między innymi stwierdzenie, czy strumieniowy generator wirów w formie rzędu pochylonych dysz (zaproponowany przez Wallisa [1, 2]) rzeczywiście wytwarza wiry w turbulentnej warstwie przyściennej. Pomiary prowadzono przy bardzo niskich prędkościach (15 m/s) przepływu głównego w tunelu o przekroju prostokątnym (szerokość 61 cm, wysokość 12,7 cm w położeniu generatorów - na rysunku 1.7 jest to pozycja "L1" wyróżniona na rysunku błękitną podkładką), zapewniającym dobrą dwuwymiarowość przepływu.



Rys. 1.7. Stanowisko pomiarowe [8]

Generatory były wykonane w formie umożliwiającej obrót do ustawiania dowolnego kąta odchylenia osi dżetów od kierunku przepływu głównego ¹, przedstawionej na rysunku 1.8.

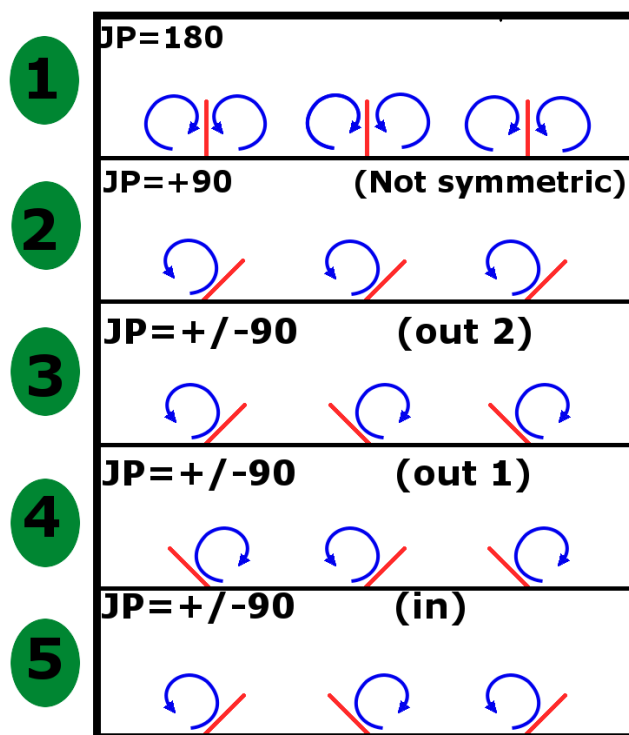


Rys. 1.8. Generator wirów o dowolnym kącie odchylenia od kierunku przepływu [8]

Średnica dżetów wynosiła 6,35 mm i były one równo rozłożone na szerokości tunelu co 102 mm symetrycznie względem pionowej płaszczyzny symetrii tunelu w położeniach $\pm 5,1$, $\pm 15,3$, $\pm 25,5$. Przy położeniu ściany bocznej lewej $X_{wl} = -30,5$ oraz prawej $X_{wp} = 30,5$, dając podziałkę odległości do średnicy dżetu 16. Grubość warstwy przyściennej w położeniu generatorów wirów wynosiła 14 mm.

¹Zależnie od pracy kąt ten jest oznaczany jako θ albo β .

Stosowano pięć konfiguracji zebranych na rysunku 1.9. Obejmowały one zarówno wydmuch w kierunku normalnym, jak i różne wzajemne ustawienia generatorów.



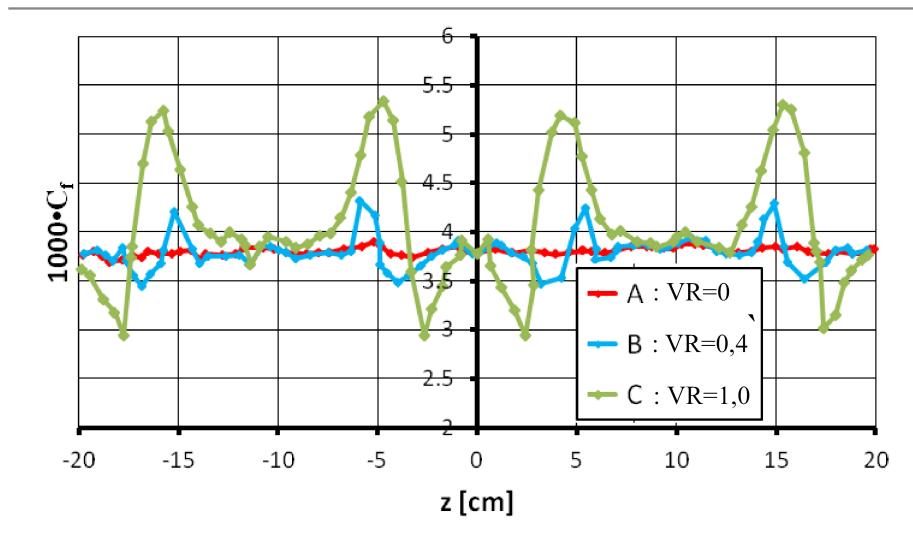
Rys. 1.9. Konfiguracje generatorów z zaznaczonymi kierunkami wirów [8]

Przy ustawionym kącie odchylenia 90° (konfiguracja "5" z rysunku 1.9) wyznaczono rozkład współczynnika tarcia C_f w odległości 229 mm w dół przepływu od generatorów ² dla trzech wartości parametru VR ³ wynoszących 0,4, i 1,0. Oznacza to pomiar przy prędkości wypływu z dżetów 6 m/s oraz 15 m/s i prędkości przepływu głównego 15 m/s. Uzyskane przebiegi

²Jest to położenie L2 na rysunku 1.7.

³VR - stosunek prędkości wydmuchu z generatora do prędkości przepływu głównego, w zależności od autorów w dalszych cytowaniach oznaczany też przez Λ .

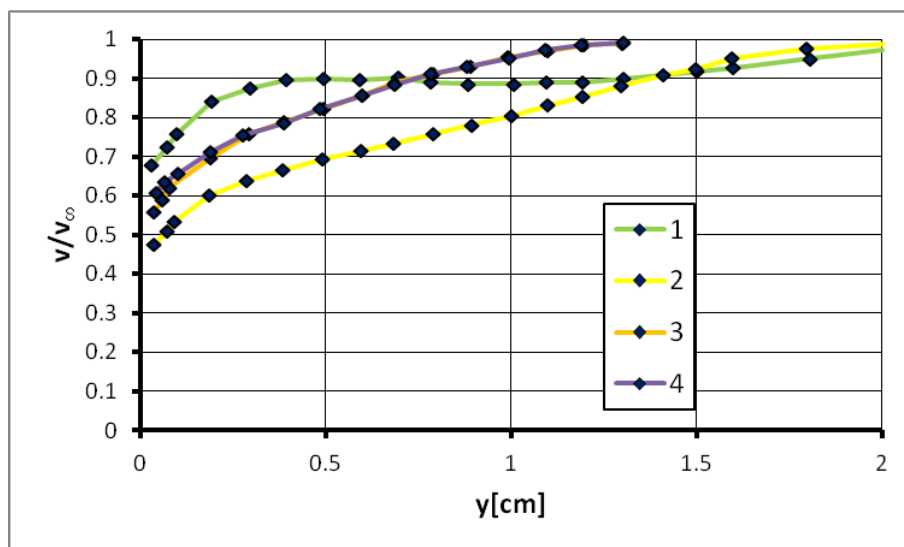
zebrano na rysunku 1.10.



Rys. 1.10. Rozkład współczynnika tarcia powierzchniowego dla różnych intensywności pracy generatorów wirów [8]

Krzywa A ($VR=0$, bez wydmuchu) odpowiada w przybliżeniu stałej wartości w całej rozpiętości kanału. Krzywe B i C ($VR=0,4$ i $VR=1,0$) wykazują bardzo wyraźną strukturę o czterech maksimach równo rozłożonych w poprzek tunelu. Wielkość ekstremów jest zależna od siły wydmuchu. Porównując otrzymane rozkłady z dostępnymi pracami dotyczącymi wirów wzdłużnych generowanych przez generatory stałe autorzy konkludują, że zgodnie z oczekiwaniami, maksima współczynnika tarcia występują tam, gdzie prędkość indukowana wirem była kierowana do ścianki, a po drugiej stronie wiru transport w kierunku od ścianki powoduje lokalne minimum współczynnika C_f . Pomiędzy ekstremami widoczne są obszary, gdzie wszystkie krzywe mają bardzo zbliżone wartości. Związane jest to z bardzo dużą podziałką, i występowaniem obszarów przepływu w których działanie generatorów jest "prawie niezauważalne". W celu bardziej jednoznacznego uzasadnienia wniosku o obecności wirów wzdłużnych, zmierzone zostają także trawersy

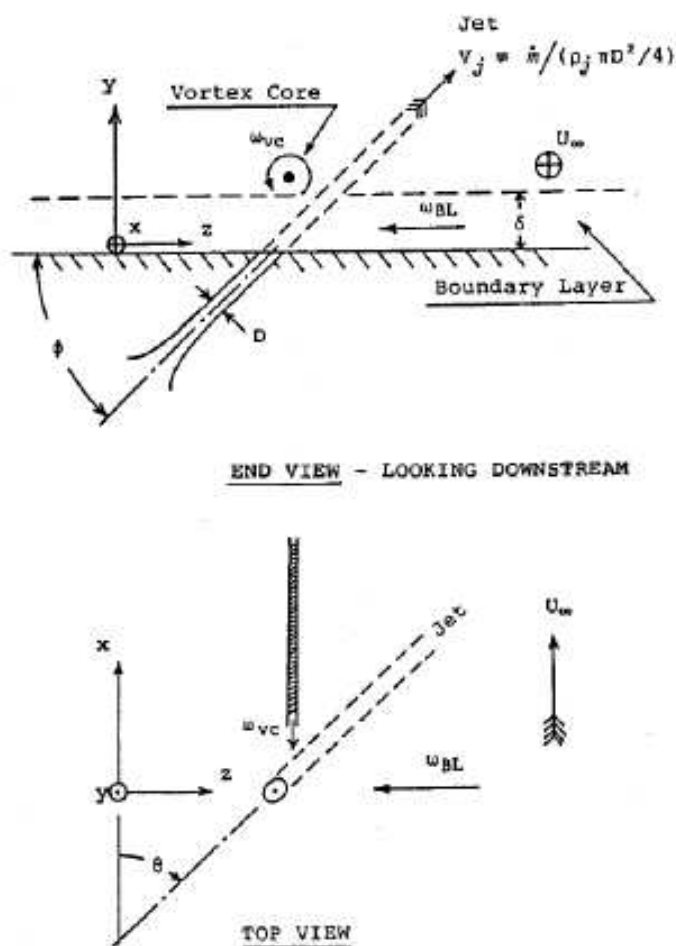
średniej prędkości w tym samym położeniu w kierunku przepływu, co współczynnik tarcia, w charakterystycznych płaszczyznach pionowych. Uzyskane wartości zebrane są na rysunku 1.11. Przyjęte na tym wykresie oznaczenia to: "#1" - płaszczyzna maksimum C_f , "#2" - płaszczyzna minimum C_f , "#3" - płaszczyzna położona w środku odległości pomiędzy sąsiednimi dżetami, "#4"- płaszczyzna symetrii tunelu, bez wydmuchu.



Rys. 1.11. Profile prędkości w warstwie przyściennej dla $VR=1$ [8]

Autorzy porównują te profile z analogicznymi z prac dotyczących stałych generatorów wirów i stwierdzają pełną analogię. Na tej podstawie wnioskują, że zastosowane dżety rzeczywiście wytwarzają w przepływie wiry wzdłużne tak jak stałe generatory wirów. Profile te wyjaśniają także pochodzenie ekstremów współczynnika C_f . Napływ czynnika o dużej prędkości "z góry" powoduje pocienienie warstwy w stosunku do przepływu bez wirów i wzrost współczynnika tarcia. Z drugiej strony wiru występuje z kolei "wypływ" czynnika o niskiej prędkości i "pogrubienie" warstwy.

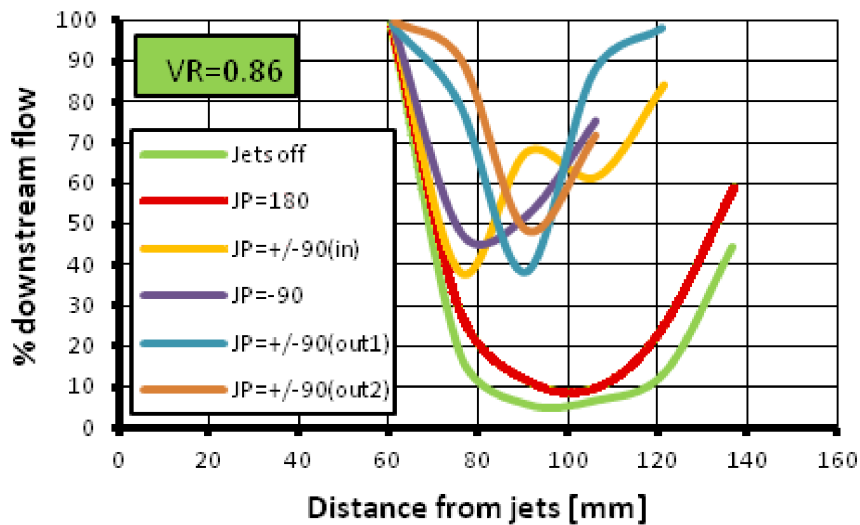
Autorzy proponują mechanizm powstawania wiru przedstawiony na rysunku 1.12



Rys. 1.12. Sytuacja w przepływie z warstwą przyścienną i aktywnym generatorem wirów [8]

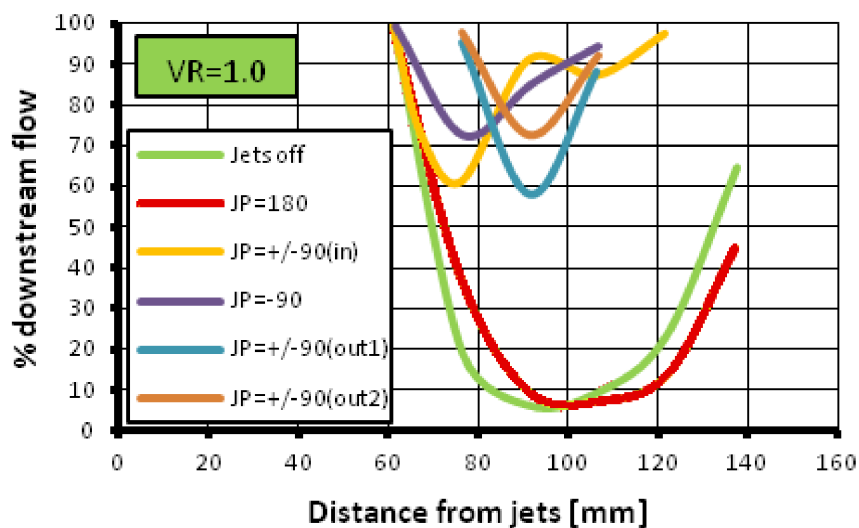
Autorzy w tej pracy wspominają także o wynikach dotyczących dżetów skierowanych przeciwnie do kierunku przepływu głównego (kąąt odchylenia 180°), gdzie zgodnie z przewidywaniami powstawały dwa przeciwnie skierowane wiry, zdecydowanie słabsze niż dla kąta 90° . W celu zbadania wpływu wirów na oderwanie w osi dolnej ścianki tunelu umieszczono szereg

czujników typu "thermal tuft". Czujnik taki składa się z cienkiego drutu oporowego o długości 6 mm, umieszczonego 0,3 mm nad ścianką tunelu, poprzecznie do kierunku przepływu. Równoległe do niego 2,5 mm powyżej i poniżej w kierunku przepływu umieszczone są równoległe do niego cienkie druty platynowe będące elementami mostka Wheatstone-a. W zależności od chwilowego kierunku przepływu silniej ogrzewane poprzez ciepło niesione z przepływem od włókna grzejnego jest jedno z ramion układu. Zaburza to balans mostka i daje sygnał napięciowy o kierunku i wielkości zależnej od kierunku i wartości prędkości. Autorzy definiują współczynnik γ określony jako stosunek czasu trwania małoskalowego ruchu o zwrocie zgodnym z głównym przepływem do całego czasu tego ruchu. We wcześniejszych badaniach stwierdzono, że turbulentna warstwa przyścienna jest oderwana, gdy współczynnik γ ma wartość mniejszą lub równą 50%. W punkcie oderwania ma on wartość 50% i maleje w dół przepływu, natomiast w punkcie przylgnięcia ma wartość 50% i rośnie w dół przepływu. W obszarze przepływu przylgniętego współczynnik ma wartość 100%, co opisuje ruch w kierunku zgodnym z głównym przepływem, bez ruchów chaotycznych. Wykresy tego współczynnika dla współczynnika prędkości $VR = 0.86$ i $VR = 1.0$ przedstawia rysunek 1.13



Rys. 1.13. Procent czasu ruchu o zwrocie zgodnym z przepływem głównym w funkcji odległości od generatorów, współczynnik prędkości $VR = 0.86$ [8]

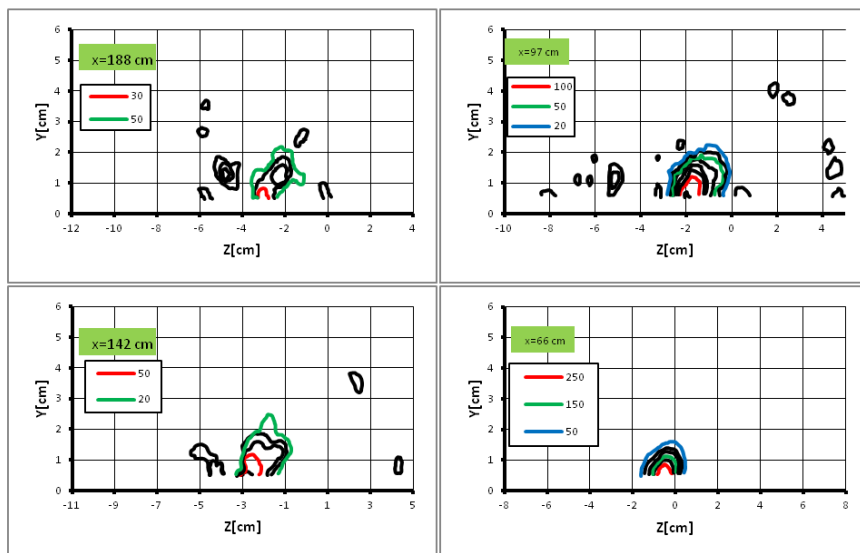
oraz rysunek 1.14.



Rys. 1.14. Procent czasu ruchu o zwrocie zgodnym z przepływem głównym w funkcji odległości od generatorów, współczynnik prędkości $VR = 1.0$ [8]

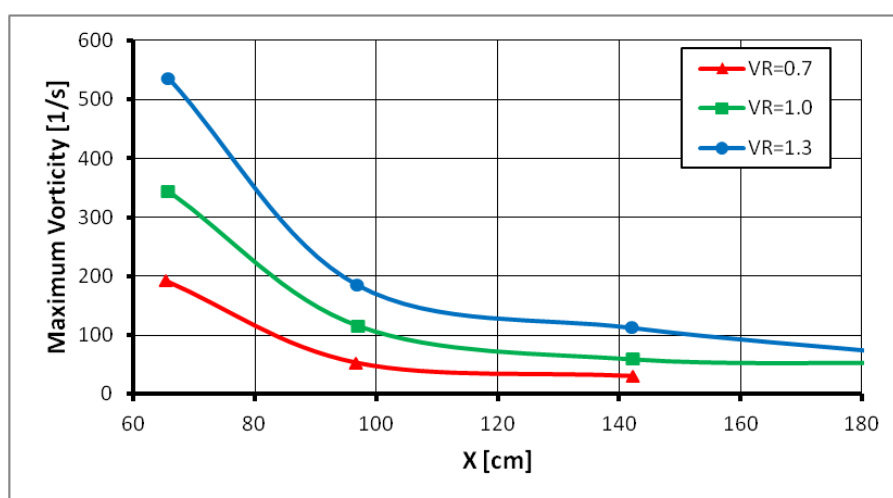
Na tej podstawie autorzy wykazali że generatory mają istotny wpływ na zmniejszenie obszaru oderwania dla $VR > 0,8$. Zgodnie z oczekiwaniami, dla kąta odchylenia 180° generatory nie mają istotnego wpływu na wielkość oderwania, nawet przy wysokich wartościach wypływu aż do $VR=1,0$. Kolejna praca tego autora [9] dotyczy ewolucji generowanego wiru podczas jego ruchu z przepływem. Badania były prowadzone na tym samym stanowisku co poprzednio, przy identycznej prędkości przepływu głównego 15 m/s . Badano pojedynczy generator wiru taki jak poprzednio, przedstawiony na Rysunku 6. Był on umieszczony w płaszczyźnie symetrii ścianki. Kąt wydmuchu był stały i wynosił 45° , VR wynosiło 1 dla kątów odchylenia θ wynoszących 0° , 45° , 90° , 135° i 180° . Dodatkowo, dla kąta odchylenia $\theta=90^\circ$ prowadzono pomiary przy zmniejszonym i zwiększonym wydmuchu ($VR=0,7$ i $VR=1,3$). Wielkością mierzoną były rozkłady wszystkich trzech składowych prędkości w czterech płaszczyznach Y-Z położonych odpowiednio w $x=66 \text{ cm}$, $x=97 \text{ cm}$, $x=142 \text{ cm}$ i $x=188 \text{ cm}$ (pozycje L1, L2, L2 i L4, na rysunku 1.7). Generator umieszczony był w odległości $x=53 \text{ cm}$. Prędkości były mierzone na siatce kwadratowej o boku 5 mm , a następnie interpolowane na siatce o boku $2,5 \text{ mm}$.

Na podstawie tak uzyskanych danych wyznaczano składową OX wirowości i sporządzono wykresy takie jak na rysunku 1.15.



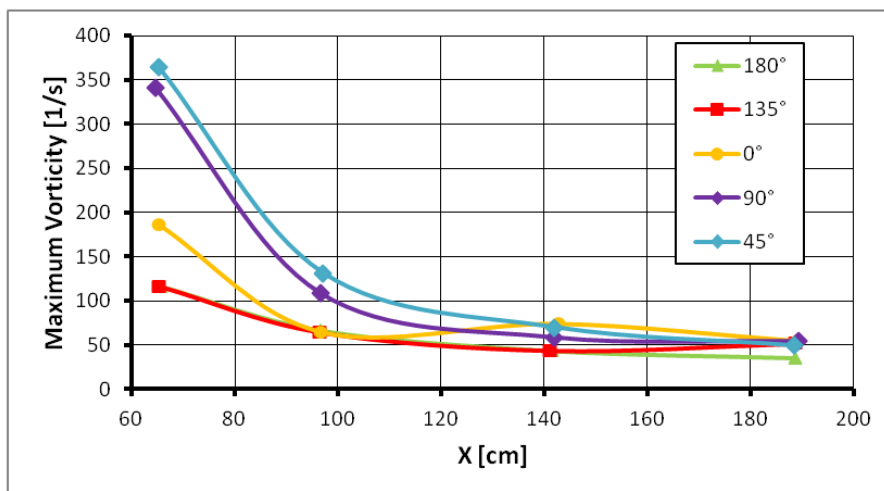
Rys. 1.15. Rozkłady wirowości wzdłużnej dla kąta odchylenia $\theta=90^\circ$ na płaszczyznach normalnych do osi tunelu [9]

Z ilustrowanych wartości wynika, że wir osiowy pozostaje bardzo silny jeszcze w płaszczyźnie $x=97$ cm, a więc 35d od położenia generatorów. Dalej wirowość stopniowo zanika, ale jest nadal wyraźna w płaszczyźnie $x=188$ cm. Potwierdza to wykres z rysunku 1.16 sporządzony dla trzech różnych intensywności wydmuchu wynoszących $VR=0,7$, $VR=1,0$ i $VR=1,3$.



Rys. 1.16. Maksymalne wartości wirowości w funkcji odległości od generatorów przy kącie odchylenia $\theta=90^\circ$ dla różnych prędkości wydmuchu [9]

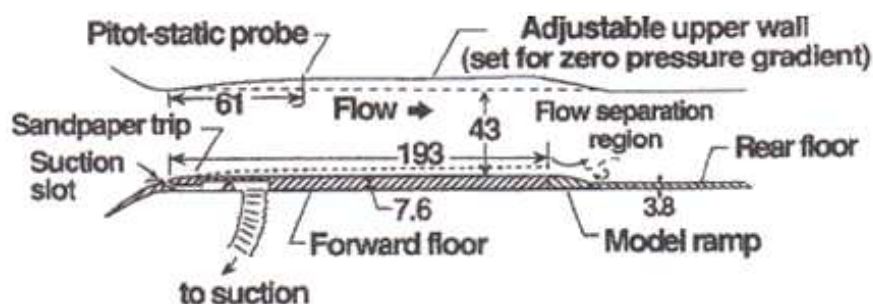
Powyższe wyniki dotyczyły kąta odchylenia $\theta=90^\circ$, ale w pracy przedstawione są także porównania maksymalnej wirowości wzdłużnej (składowej OX) w funkcji kąta odchylenia od kierunku przepływu głównego przy ustalonej prędkości wypływu. Krzywe te dla $VR=1,0$, przedstawione są na rysunku 1.17.



Rys. 1.17. Maksymalne wartości wirowości w funkcji odległości od generatorów dla różnych kątów odchylenia wydmuchu przy jednostkowej wartości współczynnika VR[9]

Wyraźnie wskazują one na to, że kąty 0° i 180° są zdecydowanie mniej efektywne w generowaniu wirów. Autorzy stwierdzają, że optymalny kąt odchylenia θ zawiera się pomiędzy 45° i 90° . Mechanizm formowania się wiru uznają za wciąż nierozpoznany, jednak wskazują na prawdopodobne oddziaływanie z wirowością warstwy przyściennej w bliskim sąsiedztwie generatora. Bazują na fakcie, że w tym obszarze widoczny jest największy spadek wartości wirowości.

W tym samym roku opublikowana została praca Selby-ego i współpracowników [13], oparta na badaniach prowadzonych w tunelu o przekroju 51 cm X 71 cm i niskim poziomie turbulencji ⁴ przy prędkości przepływu głównego 40 m/s, przedstawionym schematycznie na rysunku 1.18.

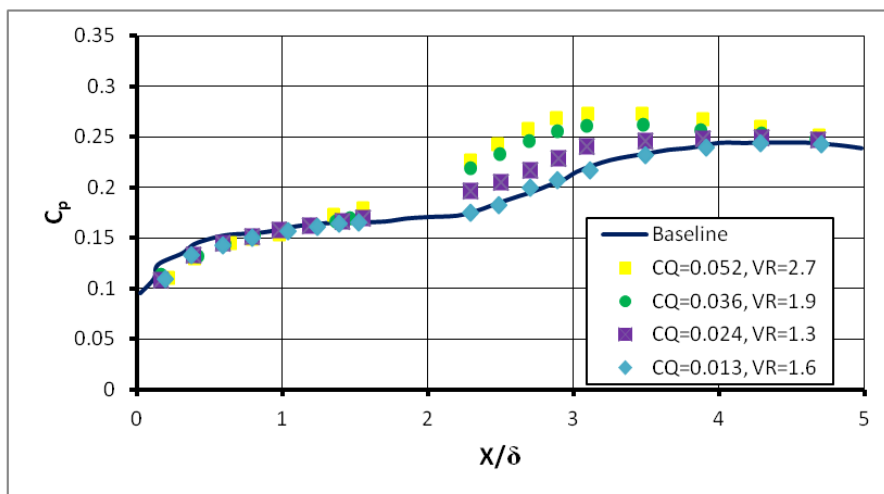


Rys. 1.18. Stanowisko pomiarowe [13]

Za wlotem do tunelu znajdowała się szczelina odciągająca warstwę. Tworząca się od tego miejsca nowa, laminarna warstwa przyścienna była w sposób "sztuczny" i kontrolowana turbulizowana naklejonym na dolnej ścianie pasem papieru ściernego; jest on zaznaczony na schemacie stanowiska. Tuż przed linią oderwania turbulenta warstwa przyścienna miała grubość 3,3 cm, grubość straty pędu wynosiła 3,3 mm, a oparta na niej liczba Reynoldsa $Re=9000$. Generator wirów składał się z dziesięciu dżetów rozłożonych co 30 mm i położonych w odległości $3,5\delta$ powyżej linii oderwania przepływu bez elementów sterowania. W badaniach zmieniane były następujące parametry generatora: - średnica dżetu (0,8 mm, 1,6 mm, 3,2 mm, 4,8 mm), kąt wydmuchu (od 15° do 90° od płaszczyzny dolnej ściany tunelu), kąt odchylenia od kierunku głównego przepływu (od 0° do 90°).

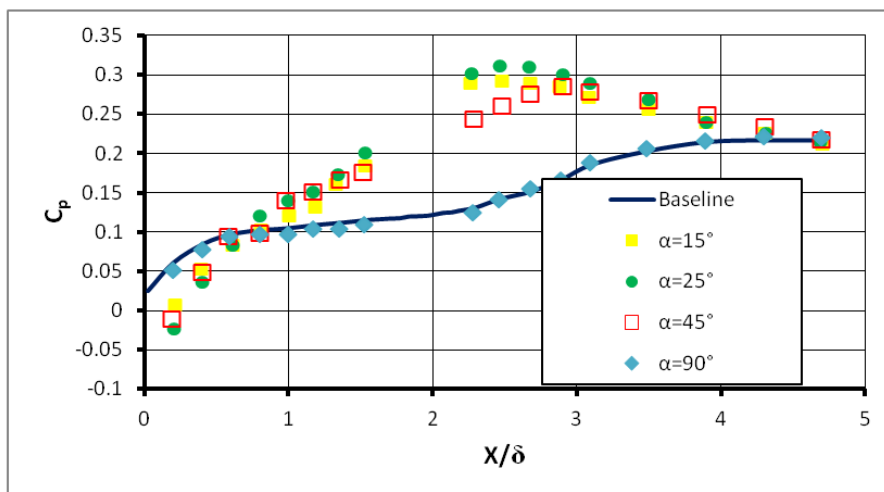
Autorzy ilustrują wpływ dżetów na przepływ poprzez rozkłady współczynnika ciśnienia c_p . Wykres na rysunku 1.19 przedstawia porównanie takich wyników parametryzowanych przez różną wartość wydatku masowego generatorów.

⁴Wynoszącym $u'/V_\infty < 0,005$.



Rys. 1.19. Wpływ wydatku masowego generatorów na rozkład współczynnika ciśnienia na dolnej ścianie [13]

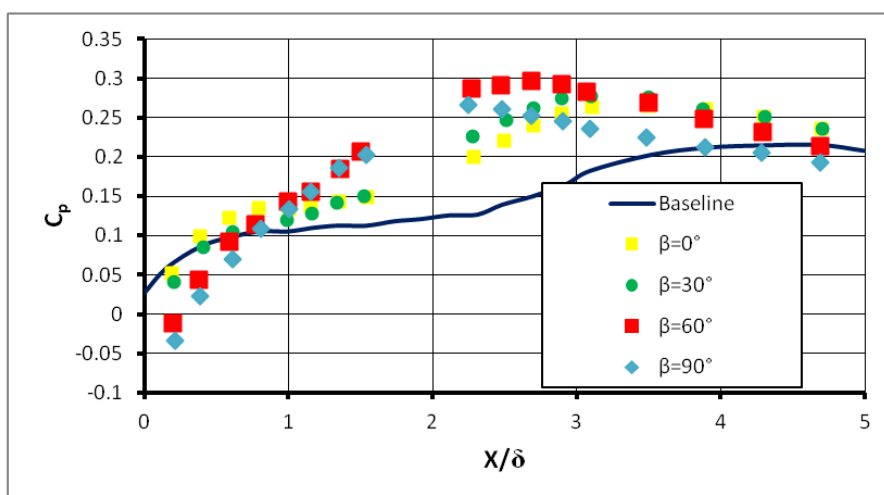
Widoczny jest wyraźny wzrost wpływu wirów przy zwiększaniu prędkości wypływu przez dzęty. Wykres przedstawiający zależność od kąta wypływu jest przedstawiony na rysunku 1.20.



Rys. 1.20. Wpływ kąta wydmuchu generatorów na rozkład współczynnika ciśnienia [13]

Jak widać przy kącie wydmuchu 90° punkty pomiarowe leżą na krzywej odniesienia, a więc efekt jest niemierzalny. Zmniejszenie kąta do 45° skutkuje podniesieniem się charakterystyki współczynnika ciśnienia. Redukcja kąta do 25° nadal daje przyrost rozkładu współczynnika ciśnienia. Przy dalszym zmniejszaniu tego kąta do 15° uzyskana charakterystyka leży poniżej tej uzyskanej dla kąta 25° . Na tej podstawie autorzy wnioskują, że optymalny kąt wydmuchu leży z zakresie między 15° a 25° .

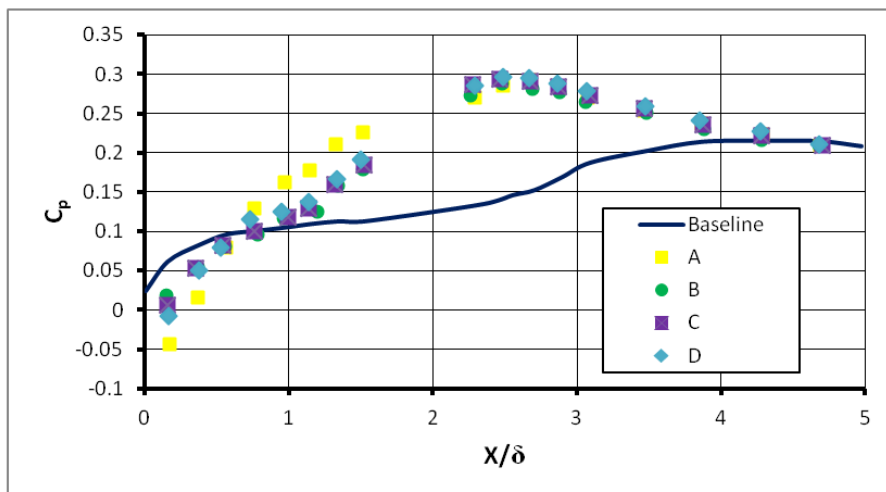
Analogiczną zależność współczynnika ciśnienia od kąta odchylenia w stosunku do kierunku przepływu głównego przedstawia rysunek 1.21.



Rys. 1.21. Wpływ kąta odchylenia kierunku wydmuchu generatorów na rozkład współczynnika ciśnienia [13]

Widoczna jest największa skuteczność generatorów przy kącie odchylenia 60° . Autorzy przebadali także zależność profili ciśnienia statycznego od położenia w kierunku OZ, czyli poprzecznie do kierunku przepływu głównego. Ze względu na możliwość pomiaru ciśnienia tylko w linii środkowej dolnej ściany, do tych pomiarów przesuwano generator z pozycji centralnej bliżej jednej ze ścian. Generator przesuwano o nie więcej niż $\frac{3}{4}$ odległości pomiędzy dżetami, czyli 2,25 mm. Pozostawał on stale w "obszarze dwuwymiarowości

warstwy przyściennej”. Wykres otrzymanych zależności przedstawiony jest na rysunku 1.22.

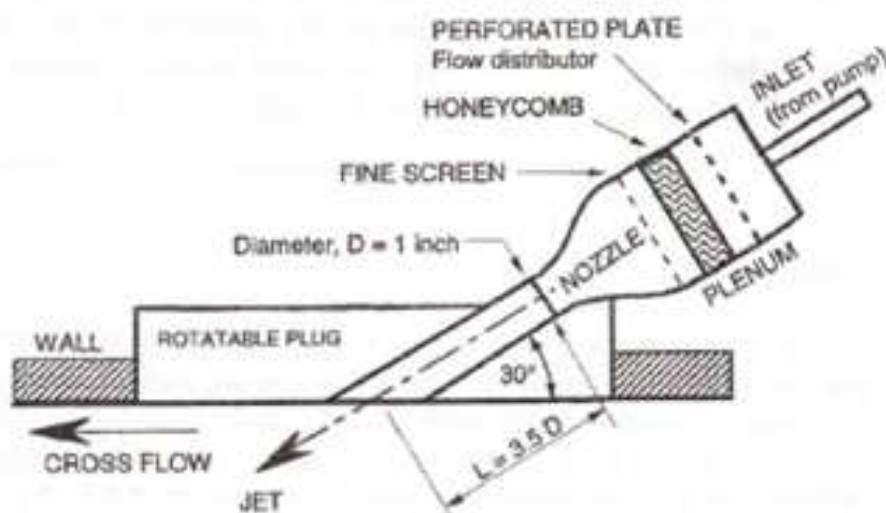


Rys. 1.22. Wpływ położenia poprzecznego generatora na współczynnik ciśnienia

Pomiary prowadzono w płaszczyźnie centralnej, oraz w płaszczyznach położonych o $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ odległości pomiędzy centralnymi dżetami. Z uzyskanych wartości wynika, że rozkłady ciśnienia w bardzo niewielkim stopniu zależą od położenia w kierunku poprzecznym. Autorzy na podstawie analizy całego zestawu wyników dochodzą do następujących wniosków:

- optymalnym kątem wydmuchu α jest wartość z zakresu $\langle 15^\circ, 25^\circ \rangle$,
- optymalny kąt odchylenia kierunku wydmuchu od kierunku przepływu głównego θ ma wartość zbliżoną do 60° ,
- przy ustalonym wydatku masowym skuteczność dżetu rośnie przy zmniejszaniu jego średnicy,
- generatory wirów współobrotowych są efektywniejsze niż generatory wirów przeciwoobrotowych.

Kolejną pracą tych autorów w tej tematyce jest [11]. Praca ta opisuje badania generatora prowadzone w tunelu wodnym o powierzchni swobodnej przy bardzo niskich prędkościach, liczba Reynoldsa 5000. Są one interesujące ze względu na zastosowanie techniki LDV (Laser Doppler Velocimetry) pozwalającej na lepsze poznanie przepływu. Zastosowany generator, przedstawiony na rysunku 1.23, był zamontowany w bocznej ścianie tunelu i pozwalał na dowolne ustawienie kąta odchylenia⁵.



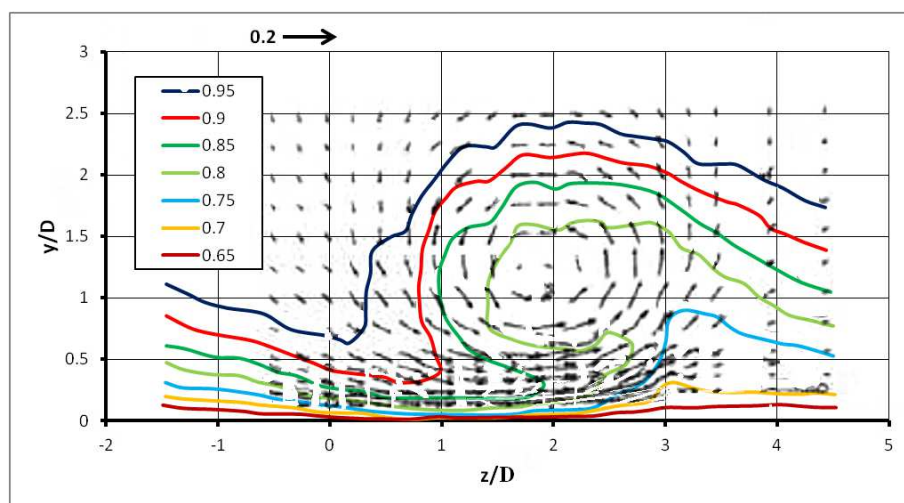
Rys. 1.23. Generator [11]

Przedmiotem pomiarów było pole przepływu generowane przez pojedynczy dżet w konfiguracji $\phi=30^\circ$, $\theta=90^\circ$ ⁶, grubość warstwy przyściennej w położeniu dżetu była równa podwójnej średnicy dżetu, czyli 5,08 cm, liczba Reynoldsa oparta na grubości straty pędu wynosiła 1100. Liczba Reynoldsa dżetu oparta na średnicy i średniej prędkości wynosiła 5000. Pomiar prowadzono w płaszczyźnie $x/D=20$ poniżej generatora. Mierzono przebiegi

⁵Analogicznie do generatora z pracy [8], przedstawionego na rysunku 1.8.

⁶Parametry wybrano na podstawie [10] ze względu na generowanie najintensywniejszego wiru przy $VR=1$.

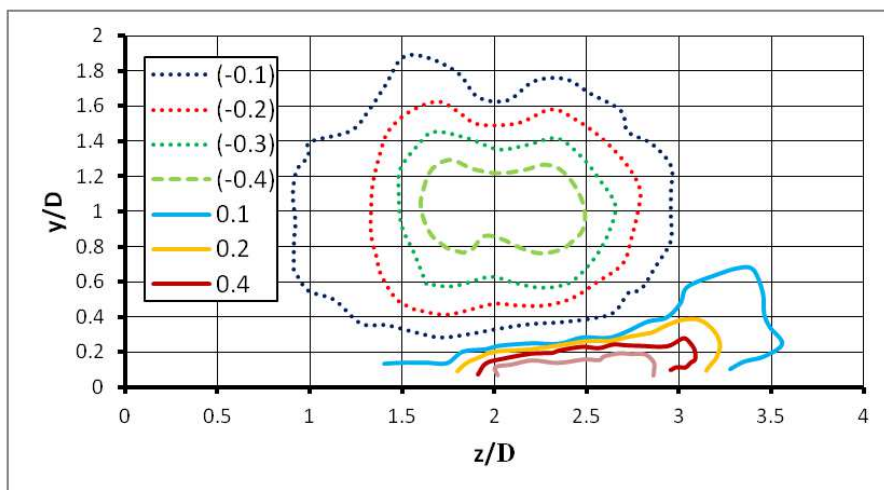
3 składowych prędkości, jednak do analizy interesujące były składowe V i W , które niosą informacje o wirowości wzdłużnej. Jeden z takich rozkładów przedstawia rysunek 1.24 .



Rys. 1.24. Pole prędkości za dżetem z zaznaczonymi izoliniami składowej wzdłużnej prędkości [11]

Na wykresie naniesione są także izoliny wartości wzdłużnej składowej prędkości (w kierunku przepływu głównego). Powyżej układu współrzędnych naniesiony jest wektor o długości odpowiadającej wektorowi prędkości przepływu głównego $V=0,2$ m/s. Z przebiegu izolinii wyraźnie widoczny jest wpływ ruchu wirowego na grubość warstwy przyściennej. Z lewej strony wiru do ściany transportowane są cząstki o wysokiej prędkości z ponad warstwy przyściennej przepływu referencyjnego bez wirów. Izolinia $V=0,95$ prędkości przepływu głównego wskutek tego wyraźnie zbliża się do ściany. Po drugiej stronie wiru powolne cząstki z pobliża ściany są przenoszone w górę warstwy, spowalniając ją i powodując odchylenie rozważanej izoliny od ściany. Przebieg tej linii wyznacza grubość warstwy przyściennej, która w ten sposób jest modyfikowana przez wiry. Autorzy proponują dwa wytłumaczenia zbliżonego do owalnego kształtu wiru. Podejrzewają, iż jest

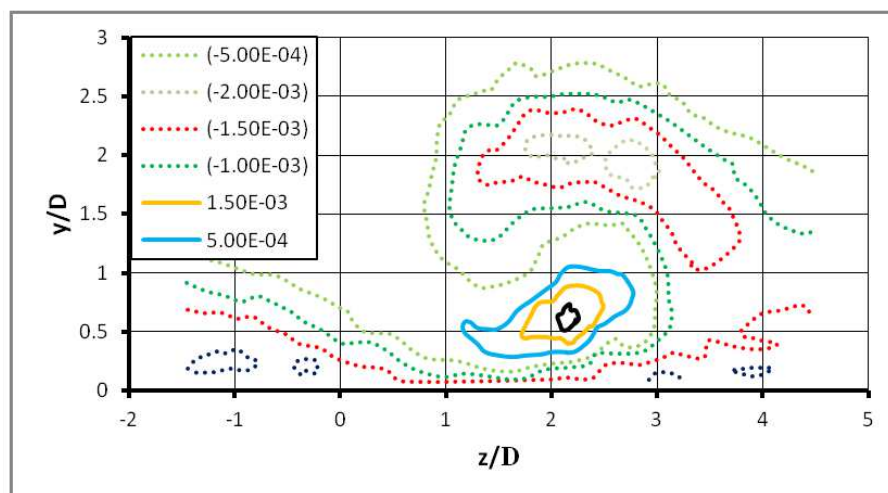
to "wypłaszczający" wpływ bliskości ściany, albo wpływ przypadkowych ruchów w kierunku poprzecznym, które dostrzegli w prowadzonych wizualizacjach. Podczas pomiarów zauważyli, że wir "delikatnie meandruje". W dalszej analizie z danych pomiarowych wyznaczano wirowość uzyskując pole jak na rysunku 1.25.



Rys. 1.25. Pole wirowości za dżetem [11]

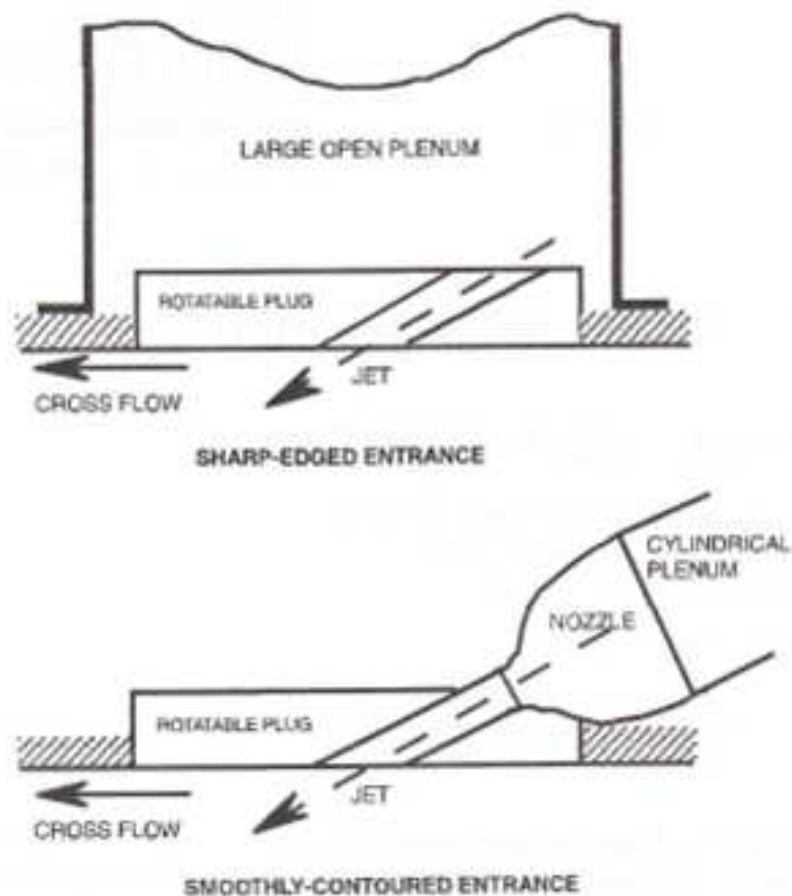
W rozkładzie wirowości widoczne są dwa obszary różniące się znakiem wirowości. Dodatnie wartości zaznaczone liniami kropkowanymi odpowiadają wirowi wzdłużnemu, natomiast ujemne prowadzone liniami ciągłymi są obrazem naprężeń poprzecznych w przepływie w pobliżu ściany na granicy obszarów transportu płynu "do" i "od" ściany.

W tym samym położeniu obliczono także pole naprężeń stycznych $\langle uv \rangle$, które ilustruje rysunek 1.26.



Rys. 1.26. Pole naprężeń stycznych $\langle uv \rangle$ za dżetem [11]

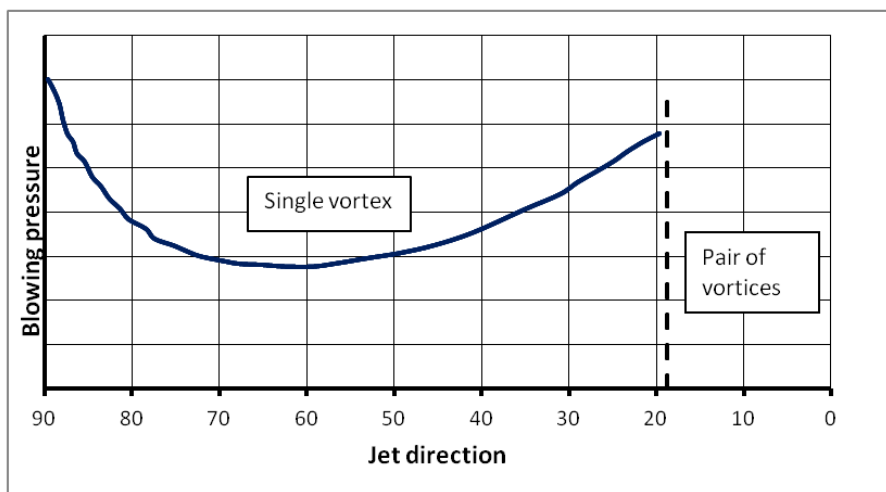
Widoczne są obszary dodatnich naprężeń poniżej centrum wiru. Są one związane ze zmienionym przez obecność wiru rozkładem prędkości. Obszar ujemnych naprężeń po obu stronach wiru jest skutkiem pocienienia i pogrubienia warstwy przez wir. Autorzy wykazują także, że wiry powodują wzrost poziomu turbulencji warstwy, zwłaszcza w pobliżu ścianki, pod wir. Praca [12] stanowi kontynuację poprzedniej [11] poszerzając ją o analizę wpływu geometrii "komory wlotowej" dżetu na generowane wiry wzdłużne. Pomiary zostały przeprowadzone dla komory o łagodnych i gwałtownych zmianach przekroju jak przedstawiono na rysunku 1.27.



Rys. 1.27. "Ostre" i "łagodne" zmiany przekroju generatora [12]

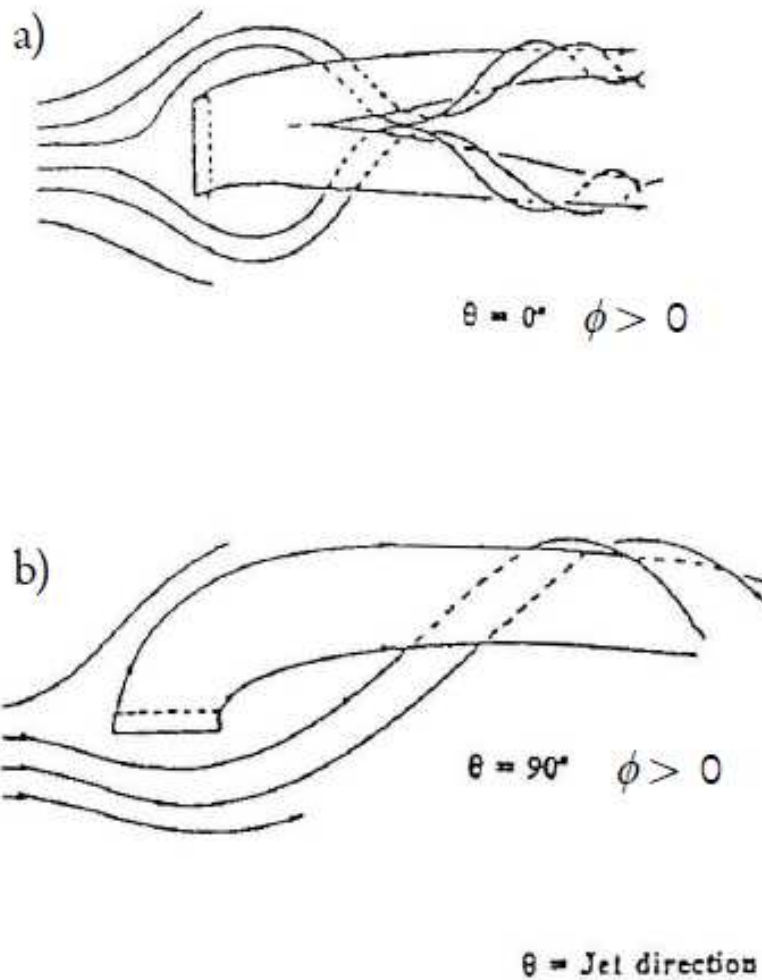
Pomiary prowadzono przy warunkach takich jak w [11], czyli prędkość przepływu głównego 0,2 m/s, wypływ z generatora z prędkością przepływu głównego. Autorzy przeprowadzili pomiary LDV i wizualizacje przepływów dla obydwóch generatorów. Stwierdzają, że różnice występują tylko w obszarze blisko generatora, gdzie $x/D \leq 5$. W tym obszarze użycie generatora o gwałtownych zmianach przekroju powoduje większą turbulencję. Dla większych odległości od generatora różnica jest niezauważalna. W związku z tym przy używaniu wirów do sterowania oderwaniem używanie łagodnych zmian

przekroju generatora nie jest uzasadnione, ponieważ jest to technologicznie trudniejsze, a nie ma wpływu na intensywność głównego wiru. Można je rozważać na przykład przy chłodzeniu filmem generowanym przez dżety, gdy należy unikać intensywnego mieszania w początkowej fazie wypływu. W pracy [14] autor na bazie prowadzonych pod kierunkiem Pearcey-a badań doświadczalnych, wyznacza zakresy parametrów decydujące o generowanej ilości wirów. Analizuje kryteria powstania jednego lub dwóch wirów powstających po dwóch stronach dżetu i wirujących w przeciwnych kierunkach. Ilustruje to wykres na rysunku 1.28.



Rys. 1.28. Zależność generowanego układu wirowego od kąta odchylenia [14]

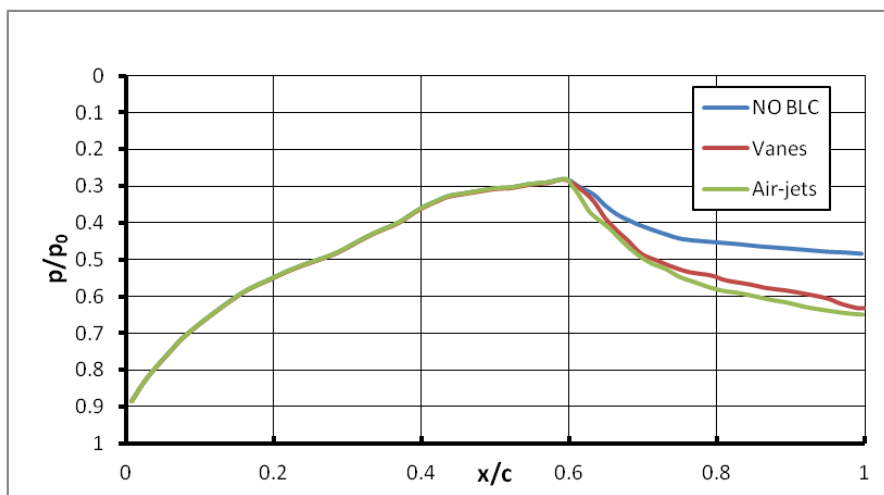
Ciągła linia przedstawia prędkość powyżej której dwa generowane wi-ry przechodzą w pojedynczy wir. Prędkość ta osiąga minimum przy kącie odchylenia wydmuchu od kierunku przepływu wynoszącym około 60°. Przerywana pionowa linia wyznacza zakres kątów w którym niezależnie od prędkości wydmuchu nie powstaje pojedynczy wir. Na podstawie dalszych badań przedstawionych w pracy [15] autorzy przedstawiają mechanizm formowania się wiru przedstawiony na rysunku 1.29.



Rys. 1.29. Schemat generowania wiru [15]

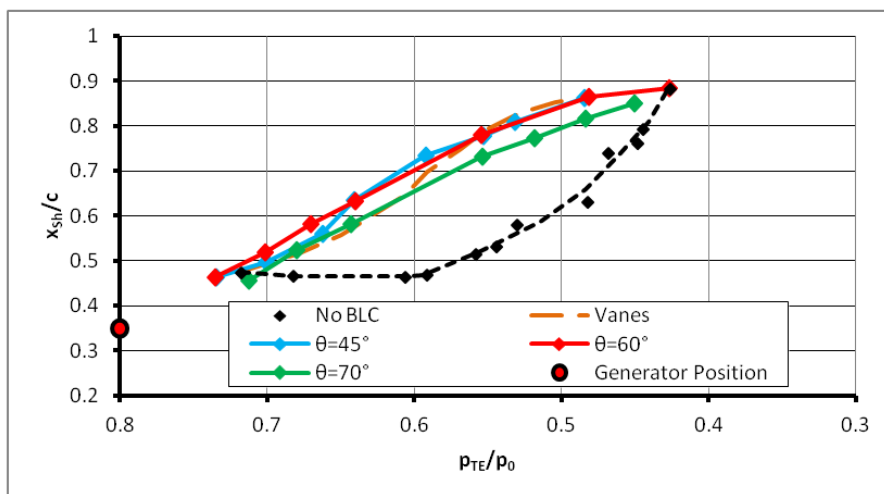
Przy wydmuchu równoległe do kierunku przepływu głównego (kąt odchylenia zerowy, część "a)" rysunku 1.29), po obydwóch stronach dżetu powstają dwa symetryczne, przeciwbrotowe wiry o kierunku wirowania skierowanym od dżetu. Przy niezerowym kącie odchylenia generatora (kierunek wydmuchu nierównoległy do kierunku przepływu) wir generowany po stronie przeciwnej niż kierunek odchylenia dżetu jest silniejszy. Następnie wir

silniejszy wchłania słabszy i podróżuje w dół przepływu zawierając w sobie strumień pochodzący z generatora. W pracy tej przedstawione są pomiary dotyczące generatorów o prostokątnym wylocie. Testowano dwa rozmiary: 1,6x1,6 i 12,7x1,6. Badania prowadzono na półprofilu o cięciwie 305 mm przy liczbie Macha 1,4 i 1,6. Generator umieszczony był w odległości 0,35C od krawędzi natarcia; ciśnienie zasilające obejmowało zakres od 1 do 1,8 razy ciśnienia spiętrzenia przepływu głównego; kąt odchylenia θ obejmował zakres od 45° do 90°, a kąt wydmuchu ϕ wynosił 30° i 45°.



Rys. 1.30. Wpływ zastosowania wirów na rozkład ciśnienia na profilu [15]

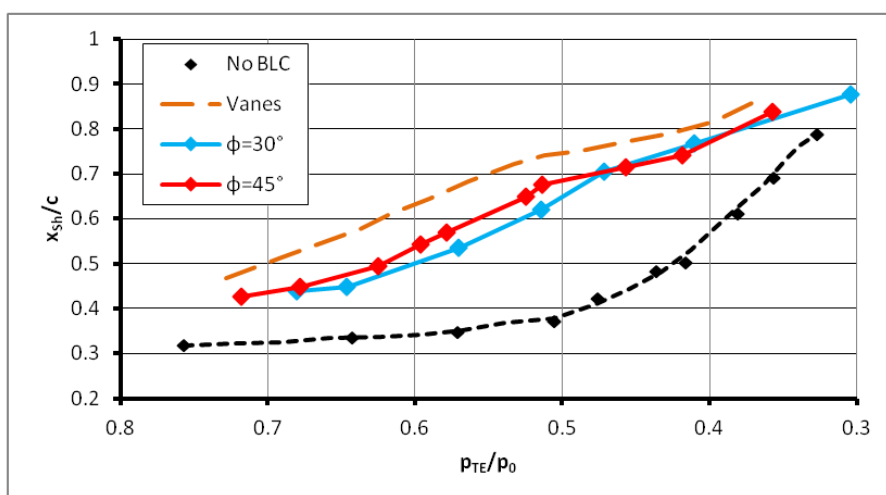
Wykres na rysunku 1.30 przedstawia porównanie ciśnienia na profilu przy liczbie Macha 1,4 dla przypadku bez wirów ("No BLC"), z generatorem blaszkowym ("Vanes") i z generatorem dżetowym ("Air-jets"). W przebiegu tego wykresu widoczna jest skuteczność generatorów strumieniowych. Powodują one zmniejszenie oderwania widoczne w zmianie ciśnienia na fali uderzeniowej, oraz wielkości straty ciśnienia na krawędzi spływu. W tym przypadku generatory strumieniowe pracują efektywniej niż blaszkowe, trzeba jednak pamiętać, że wykres dotyczy generatorów zasilanych ciśnieniem 1,8 razy większym niż ciśnienie spiętrzenia przepływu głównego.



Rys. 1.31. Wpływ generatorów na ciśnienie na krawędzi spływu dla różnych kątów odchylenia [15]

Także wykres z rysunku 1.31 potwierdza skuteczność generatorów strumieniowych. Dla niskich liczb Macha zależność od kąta wydmuchu jest słaba. Dopiero przy wzroście liczby Macha i towarzyszącym mu wzroście odległości generatora do fali uderzeniowej wyraźniej zaznacza się mniejsza efektywność generatorów o dużym kącie odchylenia $\theta=75^\circ$.

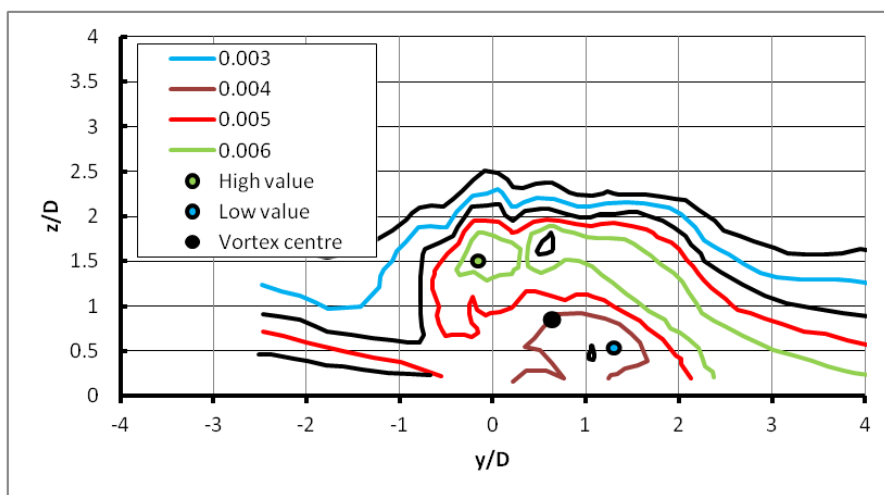
Analogiczne pomiary przy zmianie kąta wydmuchu $\phi=30^\circ$ i $\phi=45^\circ$, przedstawia rysunek 1.32. Wskazują one na taką samą skuteczność generatorów w tym zakresie kątowym.



Rys. 1.32. Wpływ generatorów na ciśnienie na krawędzi spływu dla dwóch kątów wydmuchu [15]

Na przełomie XX i XXI wieku ukazuje się cykl prac współautorstwa Zhanga, opisujących badania LDA przepływu z generatorami strumieniowymi. Pomiary prowadzono w tunelu o przekroju 3,5 m x 2,6 m przy prędkości przepływu głównego 20 m/s. Pierwsza praca [16] dotyczy formowania się wiru w pobliżu generatora ("nearfield"). Generator w postaci okrągłego dżetu o średnicy 14 mm był umieszczony na ścianie, pod warstwą przyścienną o grubości 25 mm, przy grubości straty przekroju 3,02 mm i grubości straty pędu 2,40 mm. Zasilany był przepływem o prędkości równej pożądanej wielokrotności prędkości przepływu głównego. Jako przypadek podstawowy przyjęto $\phi=45^\circ$, $\theta=45^\circ$ i $VR=1$, kolejne przypadki pomiarowe powstawały poprzez zmianę jednej z tych wartości w zakresach: $\phi=\langle 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ \rangle$, $\theta=\langle 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 135^\circ \rangle$, $VR=\langle 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 \rangle$. Pomiary prowadzono w płaszczyznach $x=5D, 10D, 20D, 30D, 40D$ i $50D$, gdzie

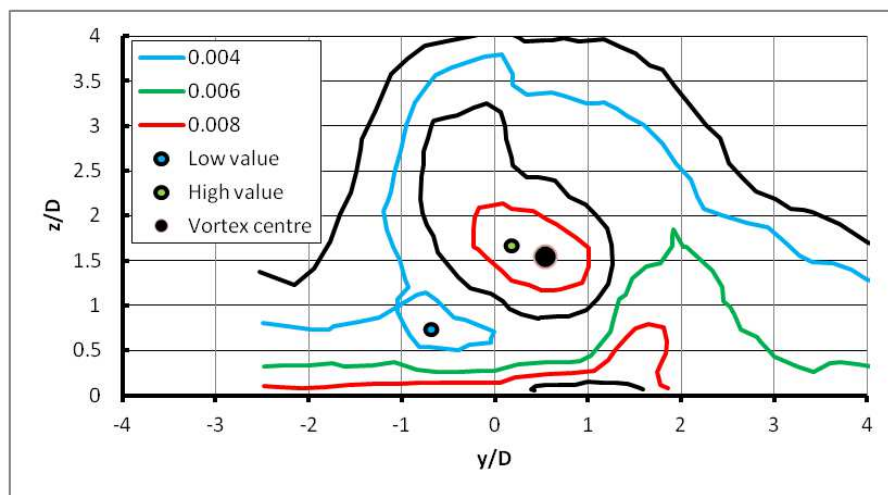
wylot generatora wyznaczał płaszczyznę $x=0$. W uzyskanych wynikach widoczne jest, że w początkowej fazie poza wirem głównym formuje się dodatkowy słabszy wir po drugiej stronie dżetu, który jest wchłaniany przez wir główny w odległości pomiędzy $5D$ a $10D$. Na podstawie analizy wpływu konfiguracji geometrycznej ustalono, że najsilniejszy wir uzyskuje się przy kącie odchylenia $\theta=60^\circ$. Nie zauważono znaczącego wpływu kąta wydmuchu ϕ na efektywność generatora, ani na odległość od ściany powstającego wiru. Najkorzystniejszym zakresem prędkości wydmuchu jest obszar $1 < VR < 1,5$ dający wir działający wewnątrz warstwy przyściennej. Mniejsze prędkości dawały bardzo słabe wiry, a większe generowały wiry, które wychodziły powyżej warstwy przyściennej do strumienia głównego. W kolejnej pracy [17] autor przedstawia pomiary LDA i analizę naprężeń turbulentnych dla generatora jak w pracy [16] przy $\phi=45^\circ, \theta=45^\circ$ i $VR=\langle 0,5; 1; 1,5 \rangle$. Pomiary wykazują jakościową różnicę pomiędzy przypadkiem $VR=1,5$ a przypadkami $VR=0,5$ i $VR=1,0$.



Rys. 1.33. Położenie środka wiru w polu wirowości dla $VR=1,0$ [17]

Dla $VR=1,0$ położenie środka wiru nie pokrywa się z położeniem maksimum pola wirowości. Na rysunku 1.33 środek wiru zaznaczony jest kropką.

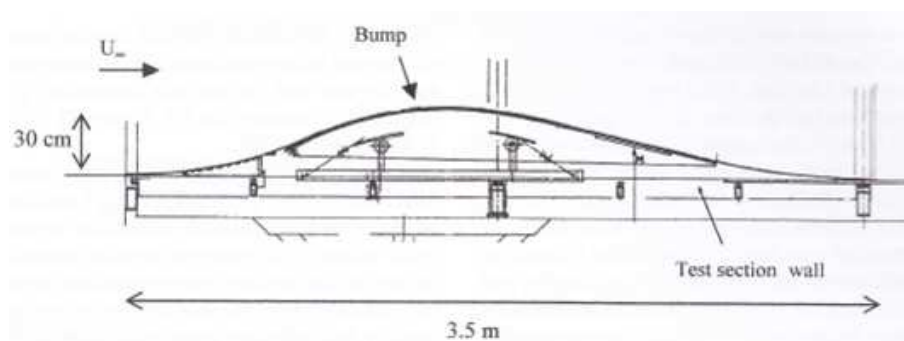
Dla $VR=1,5$ występuje lokalny obszar wysokich naprężeń normalnych w położeniu środka wiru i środek wiru pokrywa się z położeniem maksimum wirowości, a poza nim w obszarze transportu "od ściany" znajduje się obszar niskich naprężeń; ilustruje to rysunek 1.34.



Rys. 1.34. Położenie środka wiru w polu wirowości dla $VR=1,5$ [17]

Autor zauważa także, że w początkowej fazie tworzenia się wiru głównym mechanizmem tworzenia naprężeń stycznych jest konwekcja, a w dalszym przepływie, gdy w przepływie znajduje się już tylko pojedynczy wir dominującym czynnikiem jest produkcja turbulencji. Kolejne prace autora ([18] i [19]) dotyczą badań przeprowadzonych na tym samym stanowisku i w podobnym zakresie parametrów, ale dotyczących generatora o wylocie prostokątnym. Wymiary wylotu wnoszą 28 mmx5,5 mm; odpowiada to średnicy hydraulicznej 14 mm, czyli tyle, ile średnica dyszy w pracach [16] i [17]. Z analizy przedstawionych w tych pracach pomiarów wynika, że dysze prostokątne przy tych samych kątach i wydatkach masowych pozwalają wygenerować silniejszy wir. Wir ten jakościowo jest bardzo podobny do wiru generowanego przez dyszę okrągłą. Uzyskiwana wysoka wirowość nie zmienia się znacząco w zakresie kątów odchylenia θ między 45° a 90° ,

wskazując na ten zakres jako właściwy dla generatorów. Praca [20] opisuje prowadzone w ramach projektu AEROMEMES II badania parametryczne zmierzające do optymalizacji okrągłego, strumieniowego generatora wirów. Praca ta stanowi część cyklu trzech publikacji tych autorów dotyczących prowadzonych badań różnych generatorów wirów. Pomiary prowadzone w tunelu poddźwiękowym o maksymalnej prędkości przepływu 10 m/s, w komorze pomiarowej o rozmiarach przekroju poprzecznego 1 m x 2 m i długości 20 m. Dla uzyskania pożądanego przepływu w tunelu zainstalowano wypukłą ścianę dolną przedstawioną na rysunku 1.35.



Rys. 1.35. Wypukła dolna ściana tunelu [20]

W tej ścianie instalowany był wymienny generator. w nim znajdowały się odpowiednio przygotowane otwory stanowiące dysze, z podłączonymi do nich wężykami zasilającymi. Zestaw takich elementów umożliwiał przebadanie różnych konfiguracji generatorów wirów. Oceny efektywności generatorów wirów dokonywano na podstawie pomiarów współczynnika tarcia mierzonego przy użyciu specjalnej folii naklejonej na powierzchni ściany w odległości około 1 metra poniżej generatorów.

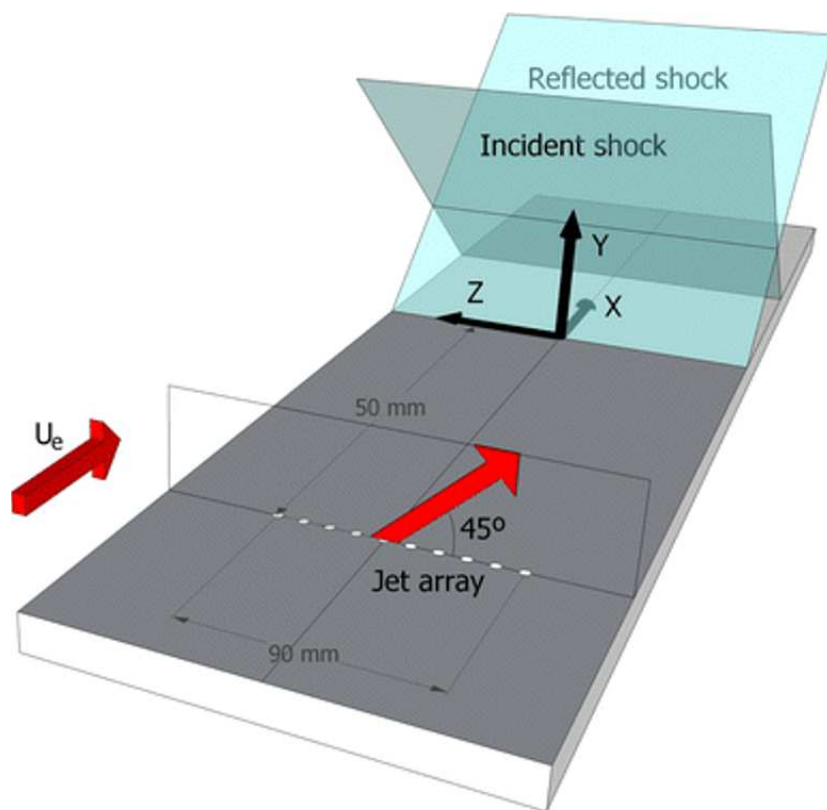
Grubość warstwy przyściennej przed generatorami wirów wynosiła 165 mm, dla wszystkich konfiguracji kąt wydmuchu dżetu ϕ wynosił 45° . Zakres badanych generatorów obejmował dwa kąty odchylenia generatora: $\theta=45^\circ$ i $\theta=90^\circ$, cztery podziałki: $S/D=\langle 6; 10; 13; 16 \rangle$ oraz trzy prędkości wypływu z generatorów: $VR=\langle 1,6; 3,1; 4,7 \rangle$. We wszystkich przypadkach VR było większe od jeden, czyli generatory były zasilane ze zbiornika o ciśnieniu wyższym od ciśnienia spiętrzenia przepływu głównego. Na podstawie otrzymanych wyników autorzy stwierdzili, że:

- Zwiększanie prędkości wypływu powoduje wzrost efektywności wirów.
- Zmiana kąta odchylenia θ z 45° na 90° nie powoduje znaczącej zmiany w wartości maksymalnej współczynnika tarcia, czyli efektywności generatora wirów. Na podstawie literatury [9, 13, 10] jako optymalny proponują kąt odchylenia $\theta=60^\circ$.
- Efektywność generatorów wzrasta w miarę zmniejszania odległości pomiędzy nimi (najlepsze rezultaty uzyskano przy najmniejszej z badanych podziałek $S/D=6$), ale autorzy podejrzewają, że dalsze zmniejszenie podziałki spowoduje przyspieszenie oddziaływania pomiędzy sąsiednimi wirami i zdecydowane zmniejszenie ich skuteczności.
- przy zachowaniu podziałki i względnej prędkości wypływu z dżetu VR, w badanym zakresie nie jest widoczny wpływ średnicy na efektywność generatora.

Autorzy przeprowadzili także pomiary dla różnych ilości dżetów tworzących generator. Szerokość uzyskiwanego rozkładu zmieniała się, ale nie zmieniała się wartość maksymalna świadcząca o efektywności generatorów. Na tej podstawie wysnuto wniosek, że uzyskane wyniki można wprost ekstrapolować na układy o dużej ilości dżetów. Zaobserwowany w tych badaniach brak zależności od średnicy i kąta odchylenia dżetu prawdopodobnie wynika z bardzo małych rozmiarów dżetów. Badano elementy o średnicy 4 i 6 mm, (stosunek D/d wynosił odpowiednio 0,024 i 0,036, czyli był około jednego rzędu niższy niż w opisywanych już pomiarach, jest on mniejszy nawet od grubości straty przekroju), i w dużej odległości trawersu pomiarowego od położenia generatora, wynoszącej około $170D$. Te dwa czynniki mogły spowodować dyssypację wiru i zacieranie różnic we współczynniku tarcia dla różnych parametrów.

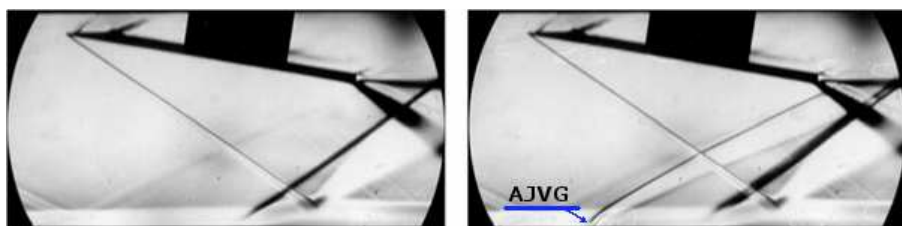
W publikacji [21] autorzy opisują badania dotyczące sterowania oderwaniem warstwy przy użyciu generatorów wirów strumieniowych. Eksperymenty były prowadzone na uniwersytecie IUSTI w Marsylii w ramach programu europejskiego UFAST. Był to program realizowany w ramach szóstego programu ramowego ("FP6") w latach 2005-2009 przez konsorcjum 18 europejskich jednostek naukowych. Projekt był koordynowany przez Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku. W przytaczanych badaniach wykorzystano bardzo nowoczesne przyrządy pomiarowe takie jak trójwymiarowe PIV oraz CTA o częstotliwości próbkowania i zapisu 2 MHz. Opisywane w tej pracy pomiary prowadzono przy liczbie Macha przepływu głównego $M=2,3$, ciśnienie spiętrzenia przepływu głównego wynosiło 0,5 bar, grubość warstwy przyściennej wynosiła 10 mm, a grubość straty przekroju 3 mm.

Generator stanowiło dziesięć otworów o średnicy 0,8 mm rozłożonych co 10 mm o kącie wydmuchu $\phi=45^\circ$ i kącie odchylenia $\theta=90^\circ$. Przez te otwory wpływało z prędkością krytyczną powietrze o ciśnieniu spiętrzenia 0,4 bar. Generator znajdował się w odległości 5δ przed początkiem obszaru oscylacji fali odbitej (w przyjętym układzie odniesienia generator znajdował się w $X=212,5$, a obszar fali rozpoczynał się w $X=270$). Wzajemne położenia elementów przepływu przedstawia rysunek 1.36.



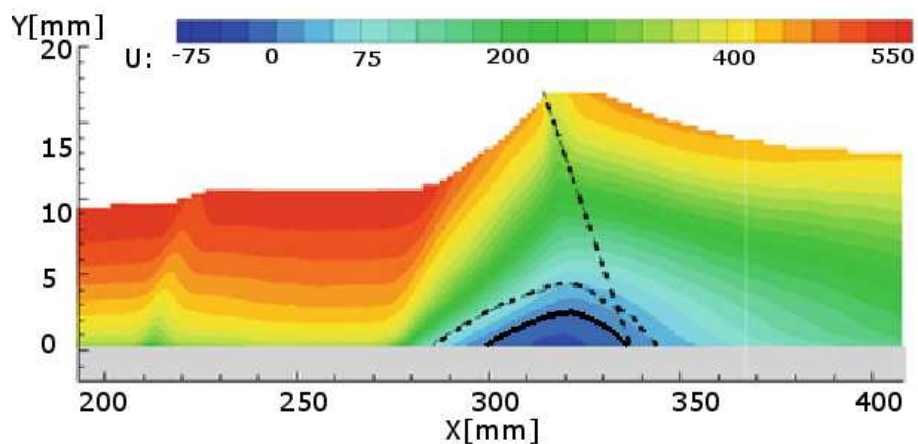
Rys. 1.36. Schemat przepływu z zaznaczeniem pozycji generatora wirów [21]

Zapis wizualizacji metodą "Schlieren" przepływu przedstawia rysunek 1.37.



Rys. 1.37. Zapis wizualizacji "Schlieren" przepływu bez i z generatorem wirów [21]

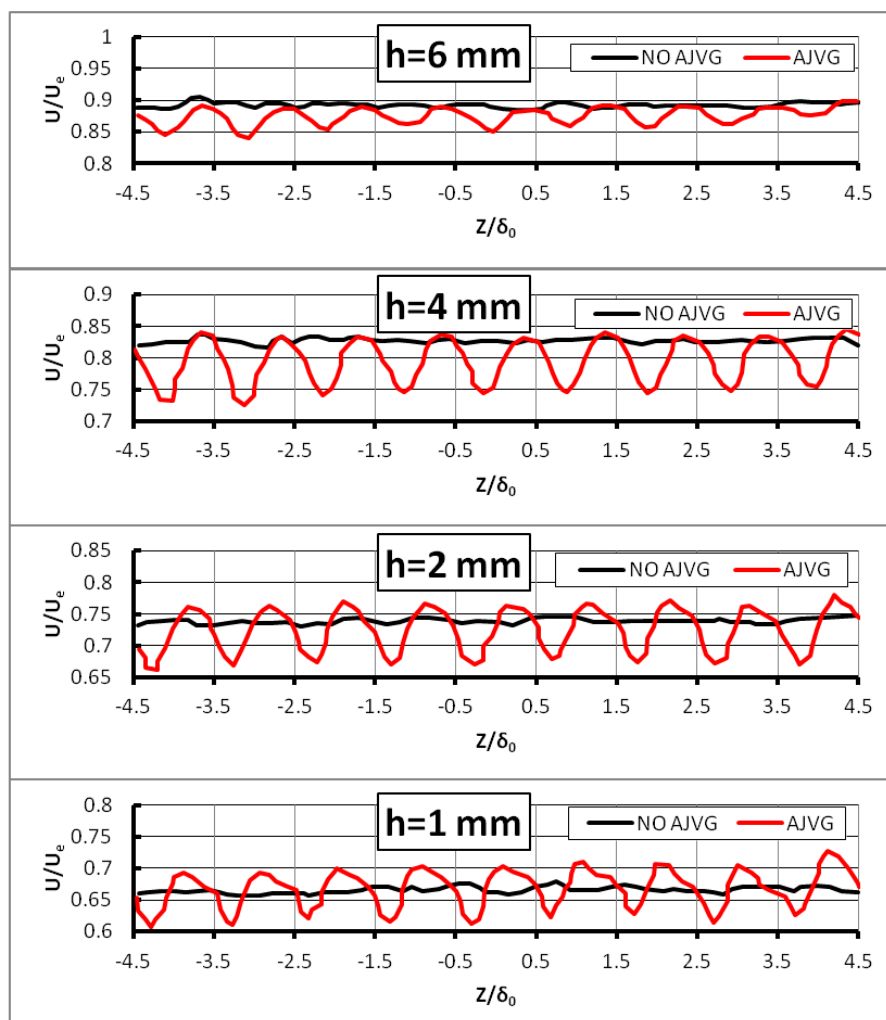
Po lewej stronie widoczny jest przepływ odniesienia bez wirów, po prawej przypadek z uruchomionymi generatorami wirów; ich pozycję wskazuje niebieska strzałka. W odległości około 5δ za generatorami wirów widoczne jest oddziaływanie fali z warstwą przyścienną. Pojawia się pogrubienie warstwy przyściennej oraz odchylenie od ściany i oderwanie przepływu. Przy użyciu metody PIV zostały zmierzone rozkłady średniej prędkości, w płaszczyźnie prostopadłej do dolnej ściany tunelu, wzdłuż przepływu zarówno dla przepływu odniesienia, jak i przy aktywnych generatorach wirów. Uzyskany rozkład dla przepływu z aktywnymi generatorami wirów przedstawia rysunek 1.38.



Rys. 1.38. Rozkład prędkości średniej [21]

Na wykresie przepływ odbywał się od lewej strony do prawej. Widoczne jest zaburzenie wywołane aktywnością dżetów. Na podstawie porównania z wynikami uzyskanymi dla przepływu bez wirów stwierdzono, że nie przenosi się ono poza warstwę przyścienną. W obszarze od około $X=270$ widoczne jest oddziaływanie fali z warstwą przyścienną i obszar oderwania. Czarna, ciągła linia wskazuje bąbel oderwania. Czarną, przerywaną linią zaznaczono kształt obszaru oderwania dla przepływu odniesienia. Zmniejszenie zarówno długości jak i wysokości bąbla oderwania jest bardzo wyraźne. W pracy przedstawione są także rezultaty uzyskane przy pomocy PIV obrazujące trzy składowe prędkości w płaszczyznach poziomych ($Y=1$ mm, $Y=2$ mm, $Y=4$ mm, $Y=8$ mm).

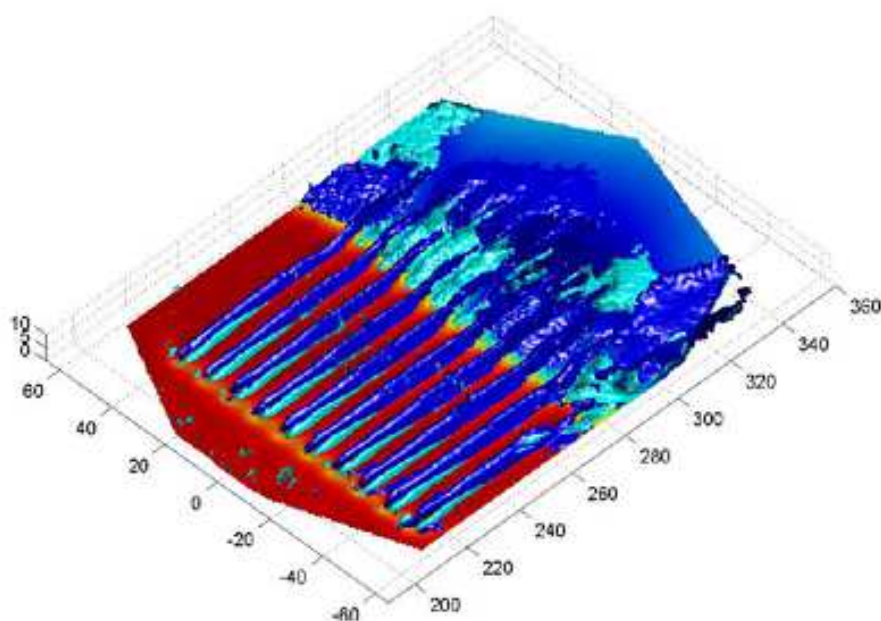
Wykresy dla składowej wzdłużnej w położeniu $X=260$ przedstawia rysunek 1.39.



Rys. 1.39. Składowa wzdłużna w położeniu $X=260$ [21]

Zawiera on zestawienie składowej wzdłużnej prędkości odniesionej do prędkości poza warstwą przyścienną... w przepływie bez wirów i z wirami dla kolejnych płaszczyzn ($Y=1$ mm – dolny układ współrzędnych na rysunku, $Y=2$ mm, $Y=4$ mm, $Y=8$ mm – górny układ współrzędnych na rysunku). Wykresy te pokazują bardzo wyraźnie modulację prędkości przez

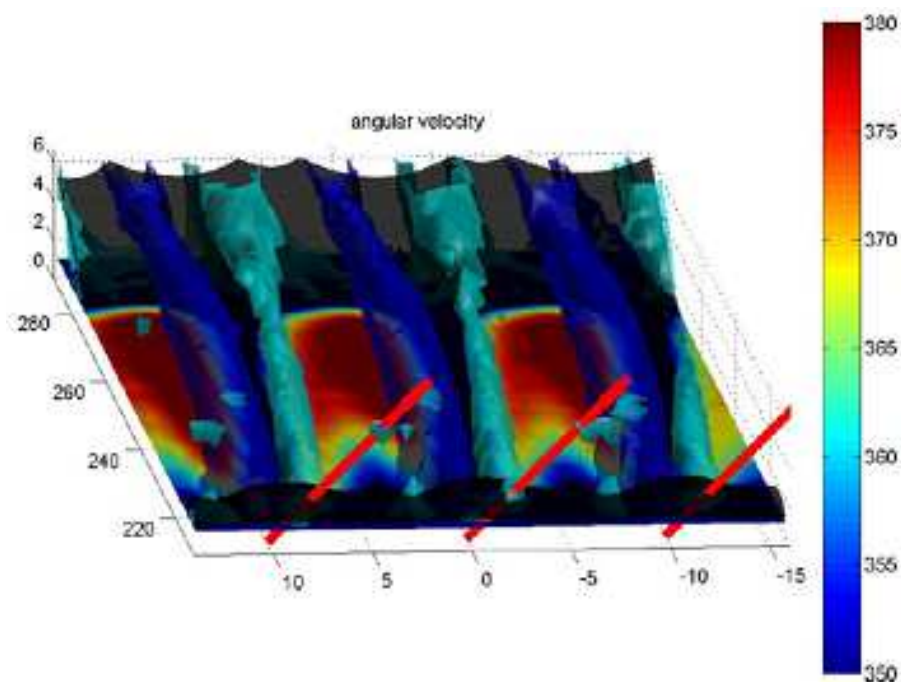
wiry – tworzenie periodycznego układu lokalnych maksimów i minimów. Widoczna jest także zmiana wartości średniej w funkcji położenia w kierunku osi OZ; jest ona najlepiej widoczna w dolnym układzie współrzędnych, gdzie wartość średnia zmienia się w funkcji położenia na osi OZ. Wyniki te pozwoliły na obliczenie rozkładów prędkości kątowej w obszarze obejmującym niezaburzoną warstwę, generatory, obszar fali i oderwanie. Przedstawia je wykres na rysunku 1.40.



Rys. 1.40. Rozkłady prędkości kątowej [21]

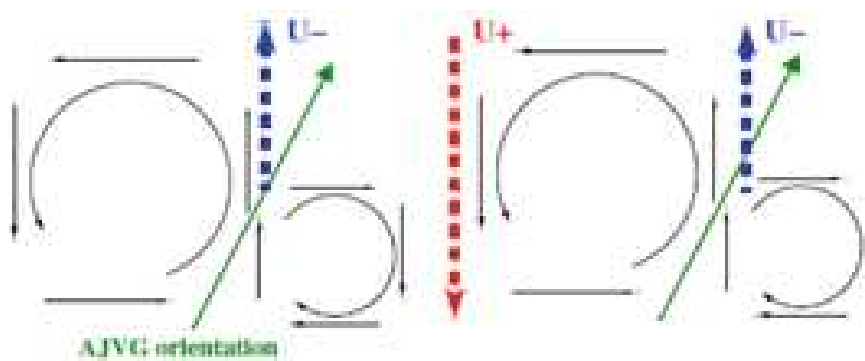
Zostały na nim pokazane powierzchnie stałej wartości prędkości kątowej ($\omega_1 = -5 \times 10^3$ rad/s kolorem granatowym i $\omega_2 = 5 \times 10^3$ rad/s kolorem turkusowym) nałożone na kontury średniej wartości składowej wzdłużnej prędkości na wysokości 1 mm. Jednoznacznie wynika z niego, że każdy generator tworzy dwa wiry o przeciwnych kierunkach wirowania. Jeden z nich jest bardzo nietrwały, ilustruje go kolor turkusowy, który przestaje być widoczny już przy $X=240$, czyli intensywność tego wiru zmniejsza się jeszcze przed od-

działaniem z falą. Drugi wir, zaznaczony kolorem granatowym, zachowuje swoją wysoką intensywność aż poza falę uderzeniową. Autorzy różnicę między nimi wyjaśniają tym, że górny, silny wir powstaje pomiędzy dżetem a przepływem zewnętrznym, natomiast powstawanie dolnego wiru ma miejsce pomiędzy dżetem a ścianą. Odchylenie dżetu od kierunku prostopadłego do ściany powoduje "ściśnięcie" i osłabienie wiru tworzącego się pomiędzy dżetem a ścianką, przy jednoczesnym wzmocnieniu wiru "górnego". Można także zauważyć niewielkie odchylenie kierunku przepływu od osi OX. Koreponduje ono z widoczną na poprzednim rysunku zmianą średniej prędkości w funkcji położenia w kierunku OZ. W pracy zamieszczony jest także powiększony element tego rozkładu, przedstawia go rysunek 1.41, wraz z zaznaczonymi czerwonymi strzałkami położeniami i orientacjami generatorów wirów.



Rys. 1.41. Szczegółowy rozkład prędkości kątowej [21]

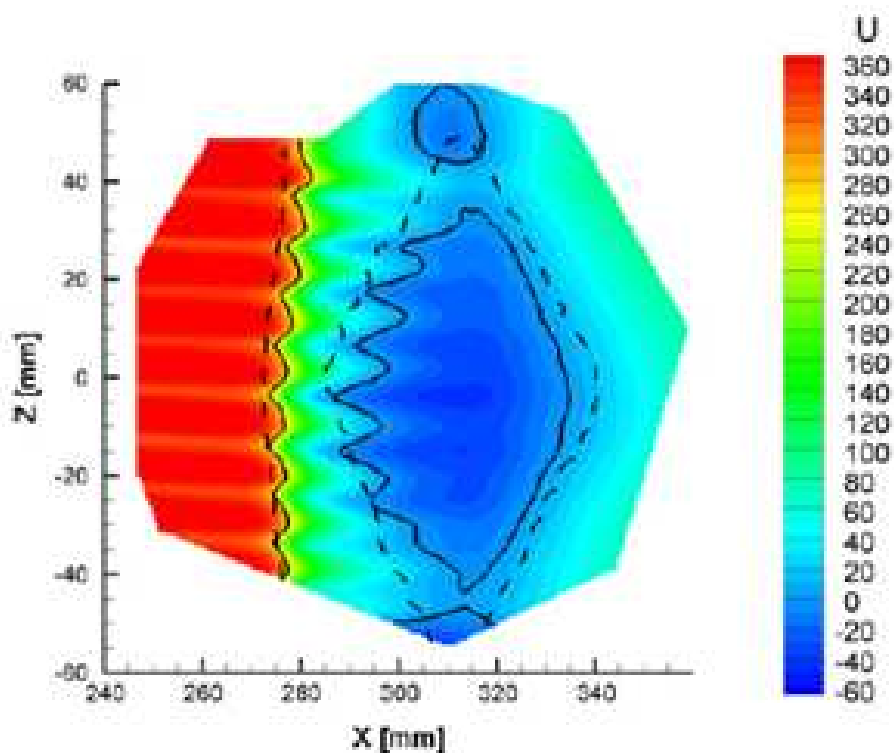
Widoczne jest, że prędkość w obszarze pomiędzy wirami wytwarzanymi przez sąsiednie generatory przyrasta i maleje w obszarze pomiędzy wirami przynależnymi do jednego dżetu. Autorzy wyjaśniają to na bazie różnic w pędzie transportowanego płynu zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1.42.



Rys. 1.42. Szczegóły transportu pędu [21]

Zielone strzałki symbolizują kierunki i położenia dżetów, czarne strzałki opisują konfigurację wirów. Czerwona strzałka wskazuje na obszar, gdzie wiry wskutek odpowiedniej orientacji ich zwrotów względem ściany powodują transport płynu o dużej prędkości z wysokich warstw w kierunku ściany. Niebieskie strzałki to obszary, gdzie wskutek "odwrotnego w stosunku do ściany" zorientowania prędkości sąsiednich wirów powodują one przeniesienie czynnika z warstw niskich do wysokich.

W dalszej części pracy przedstawione są wyniki opisujące różnice obszaru oderwania które są przedstawione na rysunku 1.43.

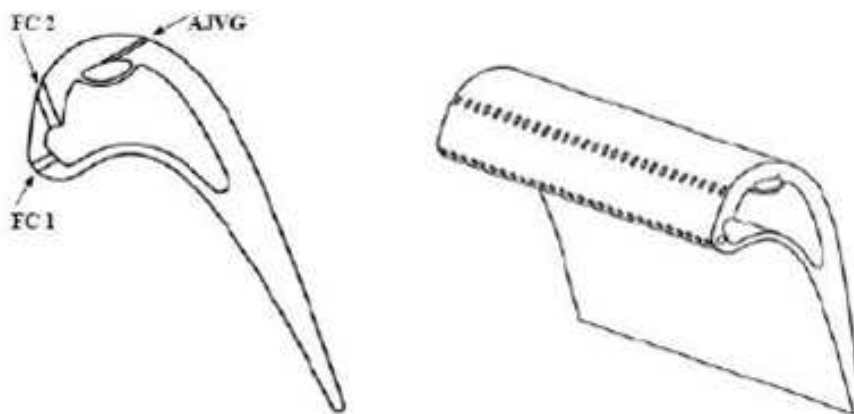


Rys. 1.43. Średnia prędkość wzdłużna na wysokości $Y=1$ mm w obszarze oderwania [21]

Przytoczony wykres przedstawia średnią prędkość wzdłużną na wysokości $Y=1$ mm w obszarze zawierającym bąbel oderwania. Czarna linia przerywana oznacza izolnię prędkości $V=200$ m/s w pobliżu fali oraz zerową prędkość, czyli brzeg obszaru oderwania dla przepływu bez generatorów wirów. Czarna linia ciągła wskazuje te same elementy dla przepływu z aktywnymi generatorami. Aktywność generatorów wyraźnie zmniejsza rozmiar oderwania zarówno w kierunku OX jak i OZ . Periodeczna struktura generatora wirów jest widoczna tak dla konturu prędkości, jak i dla linii oderwania. Można ją zaobserwować do około połowy długości oderwania,

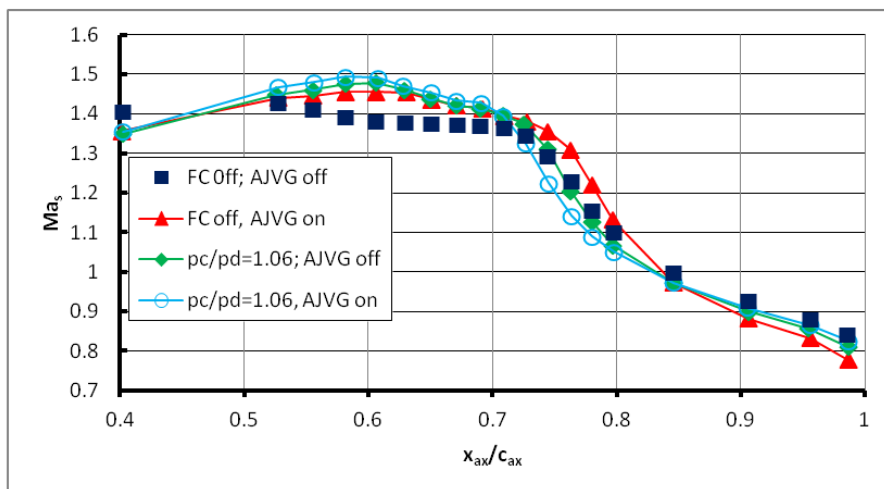
natomiast nie ma śladu wirów na linii przyłgnięcia ani poniżej. Autorzy nie wyjaśniają tego zjawiska, sugerują, że może to się wiązać z "unoszeniem" wirów w kierunku OY nad bąblem oderwania, albo ich niszczeniem przez niestacjonarne zjawiska występujące w tym obszarze. Autorzy opisują także towarzyszące zmniejszeniu bąbla oderwania zwiększenie o około 50% częstotliwości maksymalnej mocy oscylacji oraz brak wpływu generatorów na pozycję i amplitudę oscylacji fali uderzeniowej.

Poza badaniami "podstawowymi" takimi jak przytaczane dotychczas i dotyczące podstawowych zależności koniecznych do pogłębienia rozumienia istoty fizycznej zjawisk im towarzyszących w przepływach zewnętrznych od pewnego czasu są już także prowadzone analogiczne prace dla przepływów wewnętrznych, mające charakter aplikacyjny. Ważnym przykładem takich badań jest projekt AITEB-2 zrealizowany w latach 2004-2009 w ramach Szóstego Programu Ramowego Unii Europejskiej. Projekt ten był realizowany ze znaczącym udziałem partnerów przemysłowych; koordynatorem był ROLLS-ROYCE DEUTSCHLAND LTD. Jego celem było zmniejszenie ilości łopatek w turbinie gazowej przez umożliwienie jej pracy przy wyższych obciążeniach. Aby to osiągnąć należy zapobiegać oderwaniu po stronie ssącej łopatki które towarzyszy przepływowi transonicznym i poprawić jej chłodzenie. Badana łopatka przedstawiona jest na rysunku 1.44.



Rys. 1.44. Łopatka badana w projekcie AITEB-2

Poza generatorami wirów ("AJVG") zaznaczone są także otwory służące do chłodzenia łopatki ("FC" – "Film Cooling"). Pomiary prowadzono dla dwóch liczb Macha wynoszących $M=0,79$ i $M=0,95$. Przykładowy wynik obejmujący rozkład izentropowej liczby Macha po stronie ssącej łopatki przedstawia wykres na rysunku 1.45.



Rys. 1.45. Liczba Macha na stronie ssącej łopatki, projekt AITEB-2

Przedstawione na nim są rozkłady dla wszystkich kombinacji aktywności generatorów wirów oraz wydmuchu przez otwory chłodzące. Wartości uzyskane dla przepływu odniesienia są symbolizowane czarnymi kwadratami. Widoczny jest pozytywny wpływ wirów na charakterystykę przepływu (ciągła linia z trójkątami). W przypadku przepływu z aktywnym wydmuchem systemu chłodzenia efektywność generatorów wirów wydaje się mała (pozostałe dwie krzywe zaznaczone zieloną i niebieską linią na wykresie, których przebieg jest bardzo zbliżony). Wynika to z faktu relatywnie niskiej liczby Macha przed falą uderzeniową wynoszącej $M=1,37$. Generowała ona stosunkowo niewielkie oderwanie. Było ono skutecznie likwidowane już przez wirowość wywoływaną wprowadzaniem czynnika chłodzącego. W takiej sytuacji ocena na tej podstawie efektywności dżetów w aspekcie sterowania oderwaniem jest niewłaściwa. Należy dodać, że w tych badaniach dowiedziono skuteczności generatorów do bardziej równomiernego rozprowadzania czynnika chłodzącego. W tym obszarze zastosowań jest to bardzo duża zaleta gdyż na łopatkach, zwłaszcza ich krawędziach spływowych, występują silne naprężenia termiczne.

Podsumowując przedstawioną analizę literatury można wysnuć następujące wnioski.

- Ze względu na ciągłe dążenie do miniaturyzacji przy jednoczesnym zwiększaniu mocy szeroko rozumianych urządzeń technicznych związanych z przepływami coraz częstszym wymogiem jest, aby nominalne warunki pracy obejmowały przepływy transoniczne.
- Przy obecności fal uderzeniowych często występuje zjawisko oderwania, które prowadzi do niestacjonarności oraz bardzo pogarsza warunki wymiany ciepła.
- Stosowane w niektórych urządzeniach stałe, blaszkowe generatory wirów są skuteczne, ale mają wady takie jak :
 - możliwość oderwania od powierzchni, prowadzącego do uszkodzenia urządzenia,
 - brak możliwości sterowania (włączania i wyłączania w zależności od potrzeb),
 - generowanie dodatkowego oporu,
 - obecność generatora oznacza lokalną, dużą zmianę opływanego profilu,
 - znacząca komplikacja części projektowej i mechanicznej urządzenia.

Cechy te wykluczają je z licznych zastosowań i utrudniają ich zastosowanie w wielu obszarach. W szczególności w przepływach wewnętrznych, gdzie oderwana blaszka może spowodować poważne uszkodzenia dalszych stopni turbiny lub sprężarki.

- Strumieniowe generatory wirów wzdłużnych pozwalają na skuteczną redukcję rozmiaru oderwania. Można je w relatywnie prosty sposób

włączać i wyłączać zależnie od potrzeb, często można je zasilać z obszaru wyższego ciśnienia, który jest łatwo dostępny do tych celów na krawędziach natarcia.

- W zastosowaniu do przepływów transonicznych generatory wirów są efektywne nawet przy zasilaniu ciśnieniem spiętrzenia przepływu głównego.
- Strumieniowe generatory wirów odchylają napływający strumień główny i już w niewielkiej odległości od generatora wytwarzają wir. Wir ten długo utrzymuje się w przepływie przemieszczając się blisko ściany i zawiera strumień wypływający z generatora.
- Korzystne jest położenie generatora w niewielkiej odległości od linii oderwania, rzędu 10δ .
- Konfiguracja generatora, która generuje szereg wirów o tym samym kierunku wirowania jest efektywniejsza od konfiguracji generatorów "przeciwbrotowych" o naprzemiennym kierunku pochylenia dżetów [8], [21].
- Najkorzystniejszy kąt odchylenia dżetu wynosi $\theta = 60^\circ$ i kąt wydmuchu $\phi = 30^\circ$.
- Obecność wirów wzdłużnych w przepływie powoduje lepsze, bardziej jednorodne rozprowadzenia czynnika chłodzącego na powierzchni opływanej, zmniejszając w ten sposób występujące naprężenia termiczne.

1.2 Cel i zakres pracy

Celem pracy jest eksperymentalne badanie zespołu zjawisk występujących w przepływie z falą uderzeniową i wirami generowanymi przed falą uderzeniową przy użyciu strumieniowych generatorów wirów wzdłużnych. Wybrana tematyka wpisuje się w dalsze zamierzenia użycia tego typu generatorów do zmniejszenia oderwania przepływu związanego z falą uderzeniową i redukcji niestacjonarności towarzyszącej fali uderzeniowej oraz w dążenie do poszerzenia dostępnej wiedzy dotyczącej tej tematyki.

Przedmiotem badań był wpływ konfiguracji tego typu generatorów wyrażonej przez parametry takie jak:

- α - kąt od płaszczyzny ścianki dyszy ("*skew angle*") ,
- ϕ - średnica
- θ - kąt od kierunku przepływu głównego ("*pitch angle*") ,
- k - podziałka,
- X_{Shock} - położenie fali uderzeniowej (odległość do generatorów wirów),
- C_q - współczynnik wydatku masowego dżetów ,

na niestacjonarność fali oraz obszaru oderwania przepływu.

Podstawą rozważań są wyniki przeprowadzonych prac eksperymentalnych. Doświadczenia były prowadzone w tunelu aerodynamicznym przy izentropowej liczbie Macha na dolnej ścianie dyszy przed falą uderzeniową wynoszącej $M=1,45$. Przyjęte przypadki pomiarowe określone zostały przez wartości opisanych powyżej parametrów (kąty α i θ , średnicę ϕ , podziałkę k , odległość od fali uderzeniowej X_{Shock} oraz współczynnik wydatku masowego(C_q)).

Na podstawie analizy stanu wiedzy, do badań wybrano następujące przypadki pomiarowe:

- **A)**Przypadek referencyjny, bez generatorów wirów.
- **B)**Standardowe generatory wirów:
 $\phi=0,5$ mm, $\alpha = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $C_q = 1,0$, $X_{Shock} = 237,5$ mm, $k=5$ mm
- **C)**Zoptymalizowane generatory wirów:
 $\phi=0,5$ mm, $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 75^\circ$, $C_q = 1,0$, $X_{Shock} = 237,5$ mm, $k=5$ mm
- **D)**standardowe generatory wirów o powiększonej średnicy:
z $\phi=0,8$ mm, $\alpha = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $C_q = 1,0$, $X_{Shock} = 237,5$ mm, $k=8$ mm
- **E)**Zoptymalizowane generatory wirów ze zmniejszonym o połowę wydatkiem:
 $\phi=0,5$ mm, $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 75^\circ$, $C_q = 0,5$, $X_{Shock} = 237,5$ mm, $k=5$ mm
- **F)**Zoptymalizowane generatory wirów ze zmniejszoną odległością od fali uderzeniowej:
 $\phi=0,5$ mm, $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 75^\circ$, $C_q = 1,0$, $X_{Shock} = 212,5$ mm, $k=5$ mm

Przypadki **C**, **E**, **F** w dalszej części pracy funkcjonują jako przypadki "optymalne". Nazwa ta jest przyjęta i zasadna w znaczeniu tylko takim, że geometria została uzyskana w wyniku przeprowadzenia numerycznej optymalizacji. Dla każdego z powyższych przypadków wykonano pomiary stacjonarnej struktury przepływu obejmujące:

- rozkłady ciśnienia statycznego na ściance dyszy,

- pomiary warstw przyściennych,
- wizualizacje przepływu metodą "Schlieren" ze szczególnym uwzględnieniem konfiguracji fali uderzeniowej,
- wizualizacje olejowe obszaru fali i obszaru oderwania.

Istotną częścią pracy jest analiza niestacjonarności fali uderzeniowej i towarzyszącego jej oderwania przepływu dla wybranej geometrii generatora wirów. Ta część pracy została zrealizowana w ramach prac prowadzonych w projekcie Unii Europejskiej UFAST. Całość pomiarów dotyczących tej części oraz oprogramowanie do analizy uzyskanych wyników to efekty pracy autora. Na podstawie wyników wizualizacji olejowej, do badania efektów niestacjonarnych wybrano przypadek (**D** (standardowe generatory wirów o powiększonej średnicy: $\phi=0,8$ mm, $\alpha = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $C_q = 1,0$, $X_{Shock} = 237,5$ mm, $k=8$ mm)). Wyniki wizualizacji olejowej wskazywały na najsilniejszy wpływ tej właśnie konfiguracji generatorów wirów na charakter obszaru oderwania. Wykonane pomiary wielkości niestacjonarnych to:

- oscylacje ciśnienia statycznego na dolnej, poziomej ścianie dyszy w obszarze obejmującym fałę uderzeniową oraz oderwanie i przyłgnięcie przepływu,
- oscylacje fali uderzeniowej z możliwością niezależnej analizy oscylacji dowolnego punktu fali uderzeniowej.

Znaczącym elementem prowadzonych prac było wdrożenie nowych w skali kraju metod pomiarowych:

- Pomiar ciśnienia farbami czułymi na ciśnienie (PSP, ang. **P**ressure **S**ensitive **P**aints)
- Ilościowa, numeryczna analiza wizualizacji interferometrycznych (FTFA ang. **F**ourier **T**ransform **F**ringe **A**nalysis).

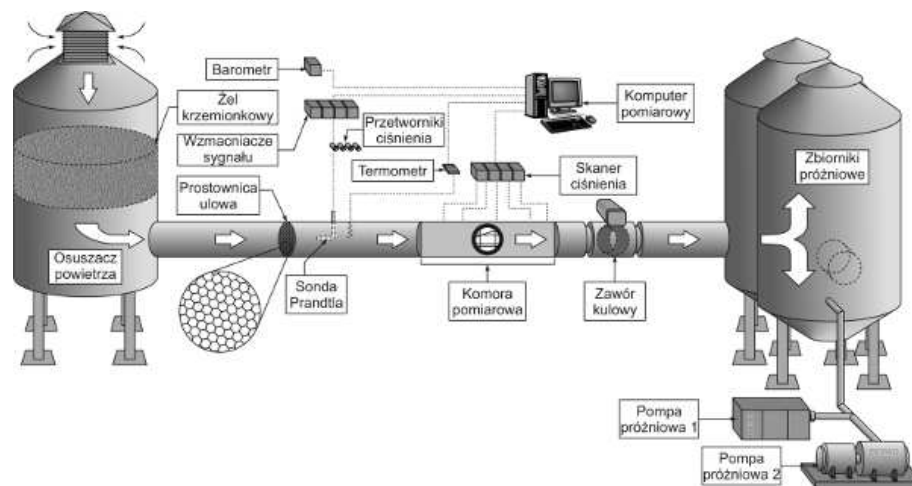
Prace nad powyższymi metodami pomiarowymi obejmowały stworzenie narzędzi numerycznych oraz praktyczną część eksperymentalną pozwalającą na weryfikację ich prawidłowości, a następnie uzupełnienie wyników uzyskanych z pomiarów innymi metodami.

Rozdział 2

Stanowisko badawcze

2.1 Tunel transoniczny

Wszystkie prace doświadczalne były prowadzone w Zakładzie Przepływów Transonicznych i Metod Numerycznych Ośrodka Termomechaniki Płynów Instytutu Maszyn Przepływowych w Gdańsku. Jest to podciśnieniowy tunel o nieciągłym reżimie pracy; rysunek 2.1 przedstawia jego schemat.



Rys. 2.1. Schemat stanowiska pomiarowego

Zasysane powietrze przechodzi do wlotu przez osuszacz i rurociąg do prostownicy ulowej, następnie opływa termometr i sondę Prandtla (pomiar

ciśnienia całkowitego i ciśnienia statycznego), wpływa do sekcji badawczej znajdującej się w pomieszczeniu laboratorium. Opuściwszy sekcję badawczą przepływa przez zawór uruchamiający przepływ do zbiorników próżniowych. Przy zamkniętym zaworze uruchamiającym przepływ powietrze ze zbiorników jest usuwane przez układ dwóch sprzężonych pomp próżniowych. Stnowisko badawcze składa się z poniższych elementów.

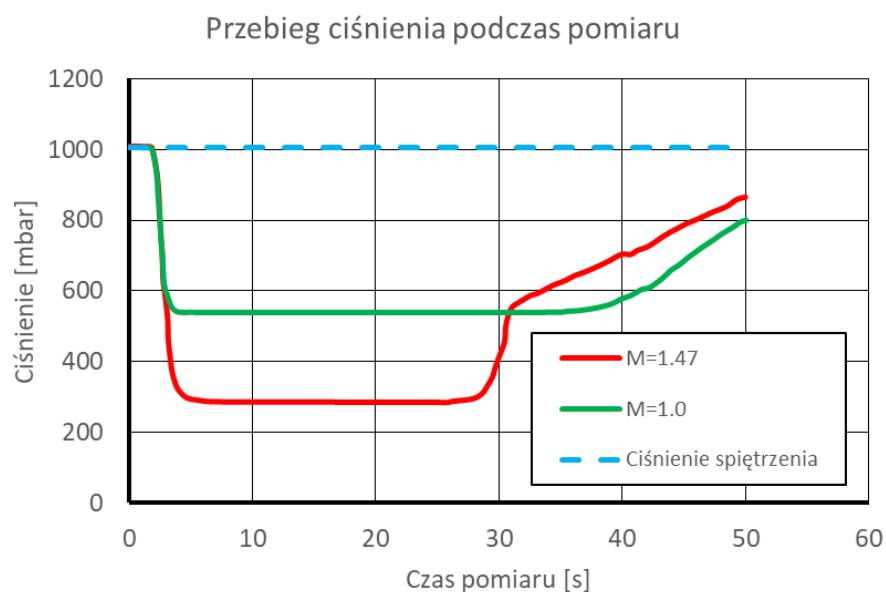
- **Osuszacz** zbudowany jest ze zbiornika stalowego zawierającego granulację żelazną krzemionkową. Dwie tony krzemionki umieszczone są w cylindrycznym metalowym zbiorniku. Wpływające powietrze pozostawia wilgoć na higroskopijnej granulacji, co zapewnia stałą suchotę gazu niezależnie od zewnętrznych warunków pogodowych. Co około 200 dmuchów żel jest regenerowany. Regeneracja polega na podgrzaniu całej masy do 150°C. W tej temperaturze woda zawarta w granulacji jest uwalniana w postaci pary. Podgrzanie realizowane jest przez nadmuch gorącego powietrza, które jednocześnie wynosi parę poza zbiornik, do atmosfery. Powietrze jest ogrzewane przez trzy grzałki o łącznej mocy 81 kW, proces suszenia jest zautomatyzowany.
- **Rurociąg** jest zespawany z odcinków rury stalowej o średnicy zewnętrznej 457 mm, wewnętrznej 437 mm.
- **Prostownica ulowa** ujednorodnia i uspokaja pole prędkości przepływu, jej grubość wynosi 100 mm.
- **Sondy ciśnienia i temperatury spiętrzenia** wraz z odpowiednimi przetwornikami umieszczone w rurociągu przed sekcją badawczą umożliwiają pomiar parametrów spiętrzenia dla badanego przepływu w komorze badawczej i uwzględniają straty wywołane przepływem przez wlot, osuszacz i prostownicę.
- **Sekcja badawcza** przedstawiona na rysunku 2.3 jest wymiennym

elementem tunelu o długości 1800 mm, przekroju prostokątnym wewnętrznym 100 mmx350 mm. W niej instalowana jest dysza i dodatkowe przyrządy pomiarowe. Boczne ściany są zamocowane na zawiasach, umożliwiając dostęp do wnętrza pomiędzy pomiarami, znajdują się w nich także szklane okna do pomiarów optycznych.

- **Zawór kulowy** z napędem pneumatycznym, sterowany elektrycznie. Pozwala on rozpocząć i zakończyć przepływ. Czas otwierania zaworu wynosi około 1 s.
- **Zbiorniki próżniowe** stalowe o łącznej pojemności 120 m³.
- **pompy próżniowe** (DEMAG RVA280 i KAESER BSV100). Pompa DEMAG o mocy 60 kW pozwala na osiągnięcie ciśnienia odpowiadającego 85% próżni, poniżej tego ciśnienia jest automatycznie odłączana od instalacji próżniowej i przełączana w tryb pracy jałowej. Pompa KAESER o mocy 20 kW pozwala na osiągnięcie ciśnienia 10 mbar, po czym przełącza się w tryb utrzymywania ciśnienia. Podczas prowadzenia pomiarów obydwie pompy pracują równolegle do chwili uzyskania ciśnienia odpowiadającego 85% próżni; wtedy następuje odłączenie od instalacji pompy DEMAG i dalsza praca wykonywana jest tylko przez pompę KAESER. Po wykonaniu dmuchu elektrozawory sterowane presostatami ponownie dołączają pompę DEMAG do instalacji.

Przy gardle o przekroju 100 cm² możliwe jest uzyskiwanie stabilnego przepływu krytycznego o czasie 20 sekund co 5 minut.

Przebiegi ciśnienia mierzonego na dolnej ścianie dyszy przedstawia wykres na rysunku 2.2.



Rys. 2.2. Przebieg ciśnienia w czasie pomiaru

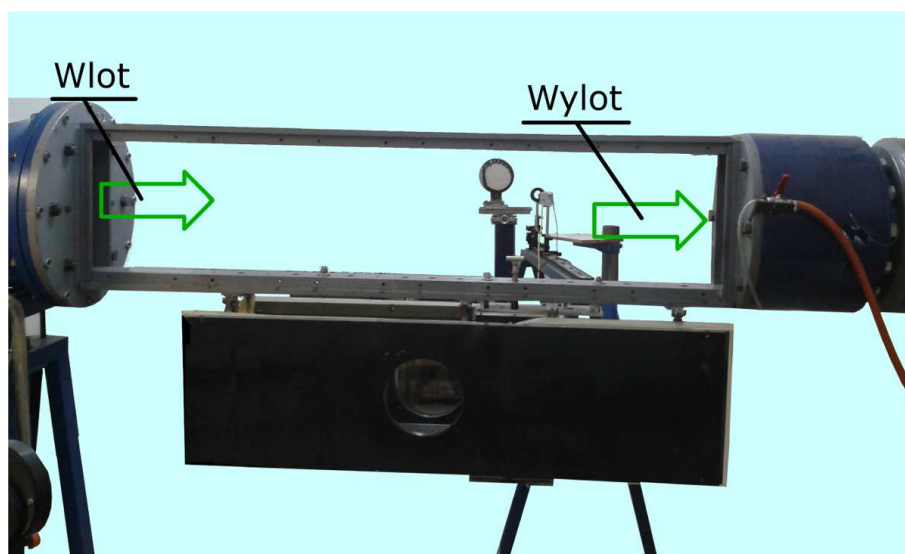
Zielona i czerwona krzywa to wyniki dla liczb Macha odpowiednio 1 i 1,47; niebieska krzywa to przebieg ciśnienia spiętrzenia przed dyszą. Jak widać przepływ naddźwiękowy stabilizuje się około 6 sekund po otworzeniu zaworu i przez kolejne 20 sekund pozostaje w stanie ustalonym. Czas ten zależy od liczby Macha i przekroju gardła; przytoczone wartości jednak odpowiadają z bezpiecznym zapasem warunkom eksperymentów będących przedmiotem pracy. Każdy z pomiarów rozpoczynano w 8 sekundzie tak, aby prowadzić go w warunkach ustalonych.

Na schemacie z rysunku 2.1 zaznaczone są także układy pomiaru podstawowych wielkości, których znajomość jest konieczna praktycznie niezależnie od tematyki prowadzonych badań.

- **Ciśnienie spiętrzenia** mierzone jest za pomocą sondy ciśnienia spiętrzenia z różnicowym przetwornikiem ciśnienia zainstalowanej przed wlotem do komory pomiarowej. Sygnał z przetwornika trafia do wzmacniacza pomiarowego i następnie do karty przetworników analogowo-cyfrowych w komputerze pomiarowym. Dedykowana aplikacja na bazie tego sygnału, oraz ciśnienia atmosferycznego odczytowanego z rezonansowego barometru DRUCK DPI 141 wyznacza ciśnienie całkowite na wlocie do sekcji pomiarowej.
- **Temperatura spiętrzenia** mierzona jest przy użyciu termopary typu **K** umieszczonej w tej samej odległości przed wlotem do komory pomiarowej co sonda ciśnienia spiętrzenia. Napięcie termoelementu jest kondycjonowane przez przetwornik i następnie trafia do karty przetworników analogowo-cyfrowych w komputerze pomiarowym.
- **Rozkład ciśnienia statycznego** jest mierzony przy pomocy skanera ciśnienia typu PSI 9010 . Jest on złożony z czterech modułów. Każdy z nich umożliwia niezależny, równoczesny pomiar 16 wartości ciśnienia, co w sumie pozwala na pomiar w 64 punktach.

2.2 Sekcja badawcza

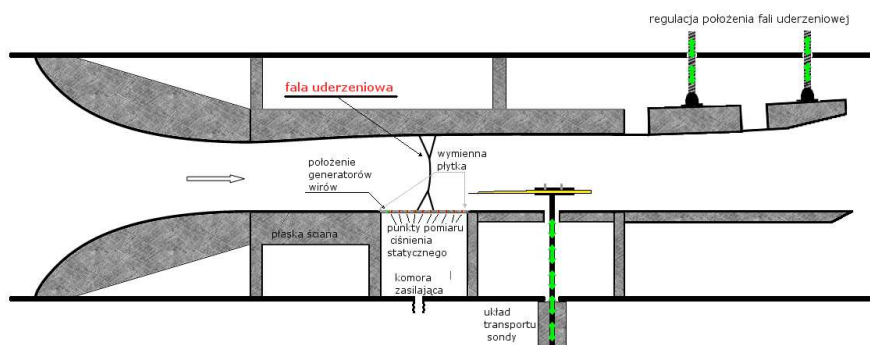
Właściwą przestrzeń pomiarową w tunelu stanowi sekcja badawcza. Jej obszar jest widoczny na zdjęciu z rysunku 2.3 ¹.



Rys. 2.3. Sekcja pomiarowa

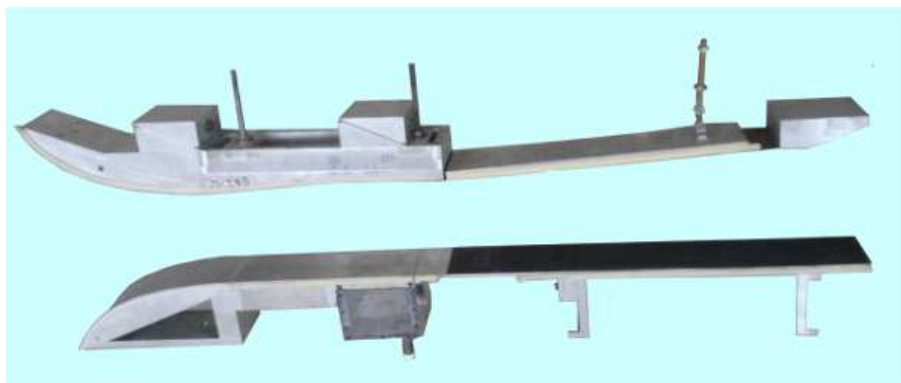
Wewnątrz sekcji instalowana jest odpowiednia do prowadzonych pomiarów dysza. Schematycznie sekcję z dyszą przedstawia rysunek 2.4.

¹Na rysunku dodane są strzałki "Wlot" i "Wylot" określające początek i koniec obszaru sekcji pomiarowej.



Rys. 2.4. Schemat sekcji pomiarowej

Na rysunku zaznaczona jest płytki z generatorami wirów i otworami pomiaru ciśnienia statycznego, układ transportu sond (ciśnienia spiętrzenia z rysunku 3.5, ciśnienia statycznego, lub termoanemometrycznych) oraz układ regulacji położenia fali uderzeniowej. Elementy rzeczywistej dyszy użytej do badań przedstawia zdjęcie z rysunku 2.5.



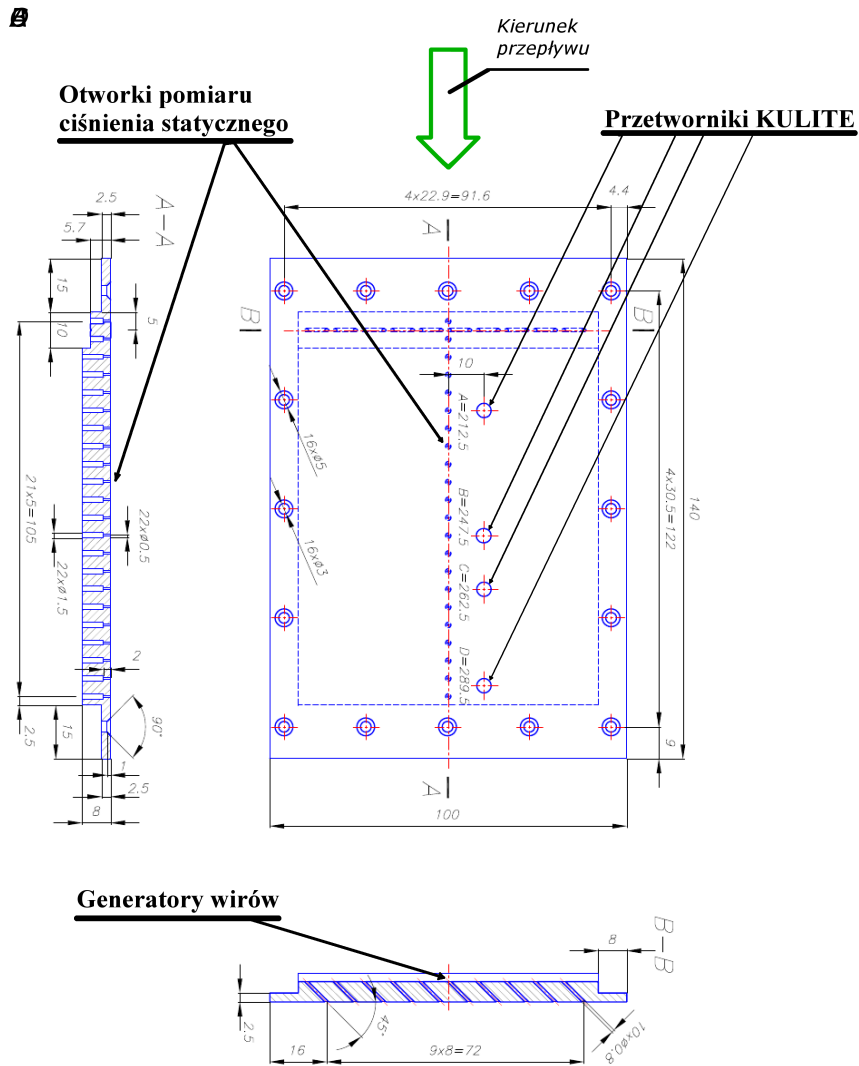
Rys. 2.5. Rzeczywista dysza

W celu umożliwienia badania różnych konfiguracji generatorów wirów, są one umieszczone na płytce łatwej do wymiany bez konieczności demontażu całej dyszy. Rysunek techniczny takiej płytki dla konfiguracji $\alpha = 90, \theta = 45, \phi = 0,8$ przedstawia rysunek 2.6. W osi płytki widoczne

są otwory służące do pomiaru rozkładu ciśnienia statycznego, zaznaczone i opisane liczbowo są także położenia (**A,B,C,D**) szybkich przetworników KULITE do pomiarów oscylacji ciśnienia statycznego.

Ze względów wykonawczych, nie dla wszystkich płytek możliwe było umieszczenie takiej samej ilości punktów pomiaru ciśnienia statycznego ².

²Położenia punktów pomiaru przedstawia tabela (1) zamieszczona w dodatku 7.1.



Rys. 2.6. Wymienna płytkę z generatorami wirów, punktami pomiaru ciśnienia statycznego i szybkimi przetwornikami ciśnienia

Rozdział 3

Metody i narzędzia

3.1 Wstęp

Do realizacji celu pracy został wykorzystany szereg metod i narzędzi, które wymagają dokładniejszego opisu.

W pierwszej kolejności (podrozdział 3.2) przedstawiony zostanie opis analitycznej metody projektowania dyszy dla osiągnięcia założonych warunków przepływu. Przed wykonaniem dyszy zostały przeprowadzone jej symulacje numeryczne, których wyniki są także przytoczone w tej części.

Kolejne podrozdziały (od 3.3 do 3.11) dotyczą metod uzyskiwania wyników związanych bezpośrednio z celem badawczym pracy.

Pierwsza z opisywanych metod (podrozdział 3.3) dotyczy pomiaru rozkładu liczby Macha wzdłuż osi dyszy. Uzyskiwane w ten sposób wyniki z jednej strony są weryfikacją prawidłowości wykonania i montażu dyszy, a z drugiej strony widoczny w nich jest wpływ wirów wzdłużnych.

Podrozdział 3.4 dotyczy metodyki pomiarów i wyznaczania parametrów warstw przyściennych. Pomiary prowadzono przed falą uderzeniową i w dwóch położeniach poniżej fali uderzeniowej. Następnie wyznaczano zarówno rozkłady parametrów w warstwie jak i parametry całkowite warstwy. Znajomość tych wielkości pozwala ocenić wpływ obecności wirów na rozkład prędkości w funkcji położenia w warstwie.

Kolejną z opisywanych metod jest wizualizacja olejowa (podrozdział 3.5). Jest to bardzo klasyczna technika pozwalająca uzyskać obraz przepływu na powierzchni opływanej (na ścianie dyszy). Uzyskiwane w ten sposób kształty linii prądu wyznaczają położenia i kształty fali uderzeniowej, linii przyłgnięcia, obszaru oderwania. Co bardzo istotne w opisywanych badaniach ta technika pokazuje także ślady ścieżki wirów. Pozwala to zbadać zachowanie się wirów po przejściu przez falę uderzeniową i obszar oderwania oraz przyłgnięcia przepływu.

Podrozdział 3.6 opisuje szeroko stosowaną w badaniach przepływów ściśliwych metodę wizualizacji smugowej, znaną jako "wizualizacja schlierenna". Pozwala ona uzyskać obraz gradientów ciśnienia w wybranym kierunku w płaszczyźnie osi tunelu¹. W opisywanych badaniach metoda ta pozwala bardzo dobrze wizualizować falę uderzeniową. Wykorzystywane to jest do analizy jej kształtu, co jest opisane w podrozdziale 3.7. Ze względu na swoją naturę metoda ta, w odróżnieniu od na przykład wizualizacji olejowej czy metody PSP, nie wprowadza praktycznie żadnego mierzalnego opóźnienia. Uzyskiwany w danej chwili obraz dokładnie odpowiada rzeczywistemu rozkładowi w tej chwili. Co więcej ma ona pasmo sięgające setek tysięcy obrazów na sekundę, dlatego jest wykorzystywana do badań oscylacji układu falowego. Analiza oscylacji pozwala na ocenę amplitudy i widma częstotliwości oscylacji układu falowego w zależności od aktywności generatorów wirów.

Nową metodą, we wdrażaniu której brał udział autor, jest metoda pomiaru ciśnienia statycznego metodą farb czułych na ciśnienie PSP (*ang. Pressure Sensitive Paint*), opisana w podrozdziale 3.8. Jest to metoda uzyskiwania mapy ciśnienia statycznego na powierzchni opływanej. Taka mapa wraz z wynikiem wizualizacji olejowej opisuje całą topografię przepływu na ścianie dyszy. Widoczne są na niej kształty i położenia fali uderzeniowej,

¹Położenie tej płaszczyzny wynika z wzajemnego ustawienia układu optycznego i osi przepływu, ale ustawienie inne niż opisywane w tej pracy jest niespotykane.

linii przylgnięcia, obszaru oderwania oraz efektów związanych z obecnością naroża w dyszy.

Drugą nową metodą, której opanowanie była jednym z elementów samodzielnej pracy autora, jest metoda FTFA (Fourier Transform Fringe Analysis), będąca przedmiotem podrozdziału 3.9. Metoda ta pozwala na uzyskanie ilościowej mapy ciśnienia statycznego na podstawie interferogramu. Uzyskane w ten sposób dane obejmują cały przekrój komory pomiarowej (w płaszczyźnie pionowej). Pozwalają na ocenę ciśnienia w miejscach w których nie można umieścić rurki czujnika pneumatycznego.

Podrozdział 3.10 dotyczy pomiarów ciśnienia statycznego przy użyciu szybkich przetworników KULITE. Położenia przetworników² na dolnej ścianie dyszy dobrano tak aby znalazły się one we wszystkich interesujących obszarach przepływu, czyli: powyżej fali uderzeniowej, w obszarze silnych zmian ciśnienia na fali uderzeniowej, w obszarze przylgnięcia i w obszarze poniżej przylgnięcia. Przeprowadzona na tej podstawie analiza częstotliwościowa pozwala na ocenę wpływu wirów na oscylację ciśnienia statycznego w każdym z tych obszarów.

Opis metod zamyka odrozdział 3.11, który przedstawia metodykę pomiarów oscylacji fali uderzeniowej. Wyniki uzyskiwano na podstawie analizy wizualizacji metodą "Schlieren" zapisywanej szybką kamerą. Na podstawie tego materiału wznaczano przebieg położenia fali uderzeniowej w czasie i następnie prowadzono analizę częstotliwościową (tak jak w rozdziale 3.10 dotyczącym oscylacji ciśnienia statycznego). Prowadzona analiza częstotliwościowa zmierzała do dokonania oceny wpływu wirów na charakter oscylacji fali udrzeniowej.

²Położenia te są zaznaczone na rysunku 2.6.

3.2 Projektowanie dyszy metodą charakterystyk

3.2.1 Równania charakterystyk

Metoda charakterystyk pozwala na zaprojektowanie kształtu części nadźwiękowej dyszy zbieżno-rozbieżnej. W tej pracy została ona wykorzystana do wyznaczenia kształtu najkrótszej możliwej dyszy dającej jednorodny rozkład prędkości wylotowej przy zadanej wartości liczby Macha. Metoda ta została wyprowadzona dla przypadku, gdy układ równań stosowany zazwyczaj przy opisie przepływów gazu (1):

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{d\rho}{dt} + \rho \cdot \operatorname{div}(\vec{u}) = 0 & \text{z. z. masy} \\ \rho \cdot \frac{d\vec{u}}{dt} = \rho \vec{f} + \operatorname{div}(P) & \text{z. z. ilości ruchu} \\ \rho \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{u^2}{2} + e \right) = \rho \cdot \vec{f} \cdot \vec{u} + \operatorname{div}(P\vec{u}) - \operatorname{div}(j) & \text{z. z. energii} \\ \frac{p}{\rho} = RT & \text{równanie stanu} \end{array} \right. \quad (1)$$

zostaje uproszczony do postaci słusznej dla płynu ściśliwego, nielepkiego, nieprzewodzącego ciepła, w stacjonarnym, bezwirowym, płaskim przepływie, przy założeniu pomijalności sił masowych. Dla takiego przepływu układ (1) sprowadza się do :

$$\left\{ \begin{array}{l} (\rho \cdot u)_x + (\rho \cdot v)_y = 0 \\ \frac{d\vec{U}}{dt} = \frac{1}{\rho} \cdot \operatorname{grad}(p) \\ \frac{u^2+v^2}{2} + \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \frac{p}{\rho} = \operatorname{const}. \end{array} \right. \quad (2)$$

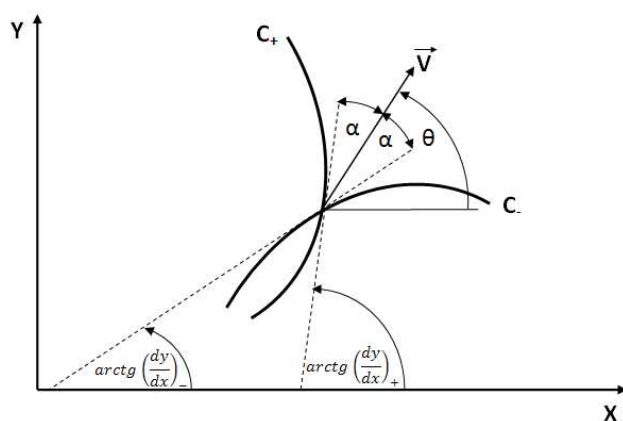
Układ równań (2) opisuje przyjętą sytuację, gdy płaszczyzna (x, y) jest płaszczyzną przepływu, a oś OX wyznacza jego główny kierunek i zwrot³. Dla przepływu naddźwiękowego pozwala się on sprowadzić do równania rzędu drugiego typu hiperbolicznego, dzięki czemu posiada dwie charakterystyki rzeczywiste opisujące kierunki rozchodzenia się stanów w przepływie.

³Jest to klasyczna postać tych równań, występuje ona między innymi w podręczniku [22]

Można [22] z niego otrzymać równania różniczkowe charakterystyk w płaszczyźnie (x, y) postaci:

$$\begin{cases} y'_+ = \left(\frac{dy}{dx}\right)_+ = \frac{-2 \cdot u \cdot v - 2 \cdot a \cdot \sqrt{v^2 - a^2}}{2 \cdot (a^2 - u^2)} = \frac{u \cdot v + a \cdot \sqrt{v^2 - a^2}}{a^2 - u^2} = \operatorname{tg}(\alpha + \theta) \\ y'_- = \left(\frac{dy}{dx}\right)_- = \frac{-2 \cdot u \cdot v + 2 \cdot a \cdot \sqrt{v^2 - a^2}}{2 \cdot (a^2 - u^2)} = \frac{u \cdot v - a \cdot \sqrt{v^2 - a^2}}{a^2 - u^2} = \operatorname{tg}(\alpha - \theta). \end{cases} \quad (3)$$

Rodzinę linii określonych równaniem $y'_+ = \operatorname{tg}(\alpha + \theta)$ przyjęło się nazywać rodziną charakterystyk C_+ , a tą określoną równaniem $y'_- = \operatorname{tg}(\alpha - \theta)$ rodziną charakterystyk C_- . Rysunek 3.1 przedstawia interpretację geometryczną kątów opisujących charakterystyki.



Rys. 3.1. Interpretacja graficzna równań charakterystyk

Ilustruje on fakt, że w każdym punkcie płaszczyzny przepływu naddźwiękowego kąt między wektorem prędkości a charakterystyką przechodzącą przez ten punkt jest równy kątowi Macha, a rzut prędkości na normalną do charakterystyki jest równy lokalnej prędkości dźwięku.

W płaszczyźnie hodografu prędkości (u, v) można otrzymać równania

określające charakterystyki C_+ i C_- postaci:

$$\begin{cases} \frac{du_+}{y_-} + dv_+ = 0 & \text{dla } C_+ \\ \frac{du_-}{y_+} + dv_- = 0 & \text{dla } C_- \end{cases} \quad (4)$$

Po ich scałkowaniu otrzymuje się równania charakterystyk Γ_+ i Γ_- na płaszczyźnie hodografu prędkości w formie epicykloid Busemanna:

$$\theta - \theta_* = \pm f(\lambda). \quad (5)$$

Dla jednoznaczności Busemann wprowadził niezmienniki L_1 i L_2 następującą definicją:

$$\begin{cases} L_1 = 600 + \frac{90}{\pi} \cdot \theta_* = \text{const} & \text{na } \Gamma_+ \text{ i na } C_- \\ L_2 = 400 - \frac{90}{\pi} \cdot \theta_* = \text{const} & \text{na } \Gamma_- \text{ i na } C_+ \end{cases}, \quad (6)$$

która powoduje, że wartości niezmienników L_1 i L_2 na charakterystykach różnych rodzin zaczynających się w tym samym punkcie różnią się o 200. Na podstawie znajomości wartości niezmienników L_1 i L_2 można określić kierunki charakterystyczne na podstawie zależności :

$$\begin{cases} \arctg(y'_+) = L_1 - L_2 - 200 + \alpha \\ \arctg(y'_-) = L_1 - L_2 - 200 - \alpha \end{cases}, \quad (7)$$

gdzie wartość α można wyznaczyć ze wzoru :

$$\text{ctg}^2(\alpha) = \frac{\lambda^2 - 1}{1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \cdot \lambda^2}. \quad (8)$$

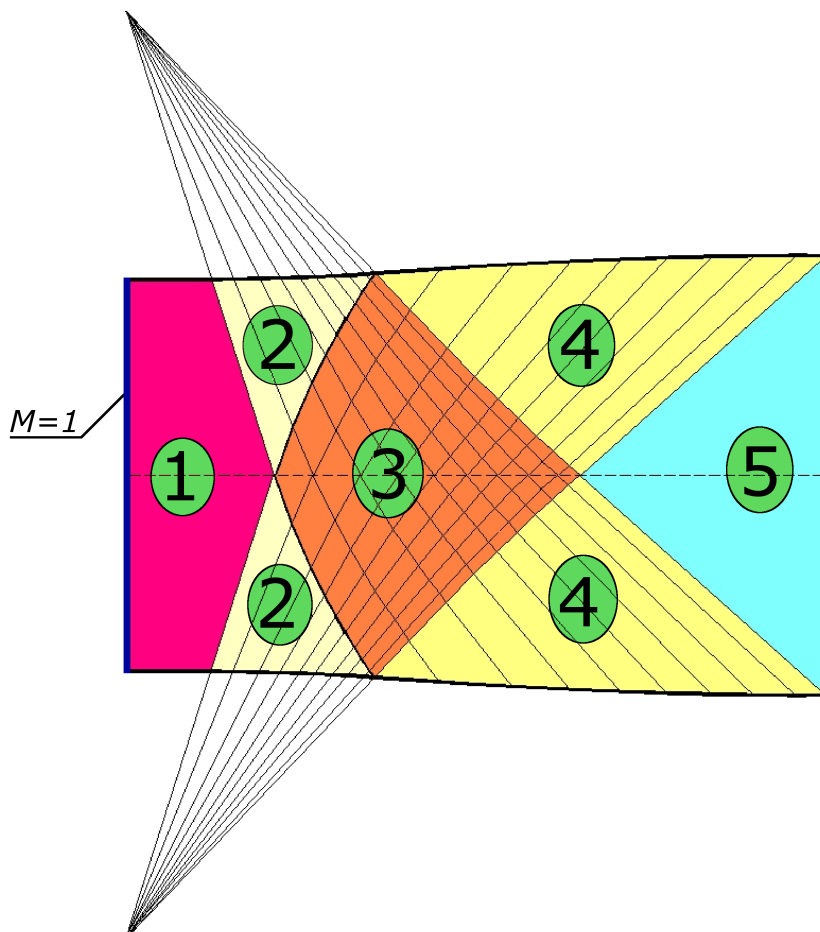
Zależność ta pozwala wyznaczyć liczbę Macha w punkcie przecięcia charakterystyk C_+ i C_- , i w połączeniu ze znajomością siatki charakterystyk umożliwia określenie przepływu przez wyznaczenie pola wektora prędkości.

3.2.2 Projektowanie kształtu dyszy

Wyniki uzyskane na podstawie metody charakterystyk są punktem wyjścia dla symulacji numerycznych, które pozwalają na uwzględnienie bardziej skomplikowanych modeli płynu i korektę kształtu dyszy ze względu na istnienie warstw przyściennych.

W ramach przyjętego modelu płynu, wykorzystując równania charakterystyk, możliwe jest wyznaczenie kształtu najkrótszej możliwej dyszy o jednorodnym strumieniu na wylocie dla zadanej liczby Macha. Konstruowana dysza będzie klasyczną dyszą symetryczną zbieżną w części poddźwiękowej i rozbieżną w części naddźwiękowej. Ponieważ układ równań 2 opisujący przepływ ma dwie charakterystyki rzeczywiste tylko dla przepływów naddźwiękowych, dlatego też część poddźwiękowa zostanie zaprojektowana metodą odpowiednią dla takich przepływów. Dla uproszczenia zakłada się, że linia dźwięku w dyszy ma kształt prostoliniowy i jest prostopadła do osi. Aby to założenie było spełnione, część wlotową dyszy konstruuje się tak, aby krzywizna ścianki dochodzącej do gardła od wlotu była możliwie najmniejsza.

Schemat części naddźwiękowej takiej dyszy z zaznaczonymi różnymi obszarami przepływu przedstawia rysunek 3.2.



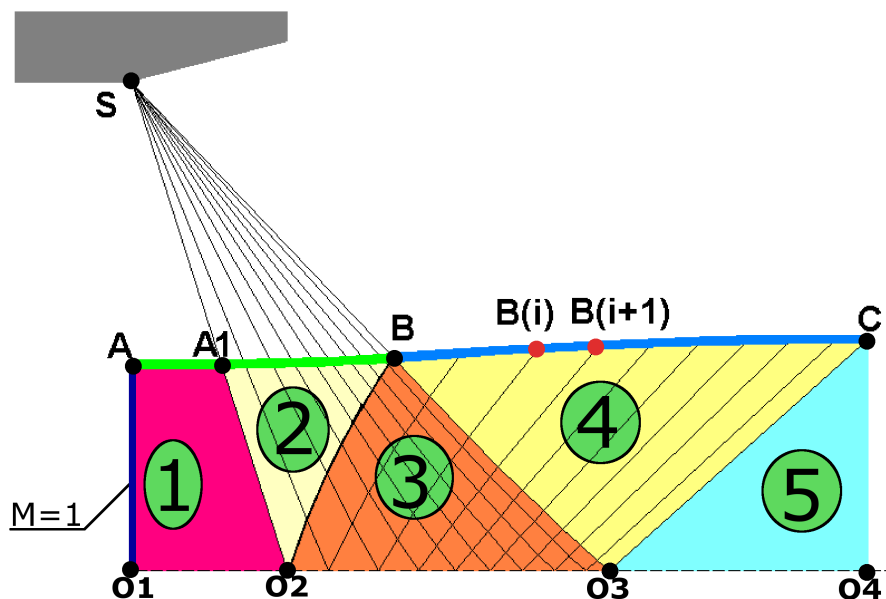
Rys. 3.2. Schemat dyszy

Przepływ odbywa się od lewej do prawej strony. Kolor amarantowy "1" to obszar przybliżenia rozpoczynający się od linii dźwięku (przybliżonej prostą w gardle dyszy od którego rozpoczyna się konstrukcja) na której nie istnieją użyteczne rozwiązania odpowiednich równań charakterystyk (3). Na rysunku, dla lepszej czytelności, jest on duży i wyróżniony kolorem. W rze-

czywistych obliczeniach ten obszar jest bardzo mały i wynika z tego, jak bliska jedności jest liczba Macha przyjęta jako początkowa wartość do wyznaczania siatki charakterystyk. Obszar jasnożółty "2" to obszar przepływu opisywanego przez pojedyncze charakterystyki jednej z rodzin. Stanowi on obszar ekspansji wokół hipotetycznego naroża, z którego są wystawiane charakterystyki.

Obszar pomarańczowy 3 to "obszar wpływów". W tej strefie analizuje się nakładanie się dwóch fal prostych. W każdym z punktów tego obszaru przecinają się dwie charakterystyki różnych rodzin. Obszar ciemnożółty 4 to kolejny obszar przepływu stanowiącego falę prostą. Przepływ w tym obszarze jest opisywany przez pojedyncze charakterystyki których kierunki są wynikiem wzajemnej interakcji charakterystyk w "obszarze wpływów". Kierunki te wyznaczają nachylenie konturu dyszy, dzięki czemu nie występują odbicia charakterystyk od tak nachylonej ścianki. W obszarze błękitnym 5 uzyskany zostaje strumień o jednorodnym rozkładzie prędkości i kierunku przepływu.

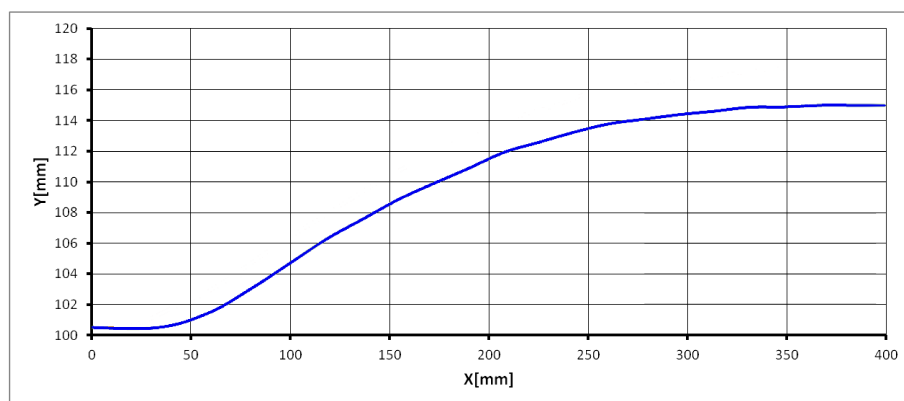
Ze względu na symetrię dyszy opis jej konstrukcji zostanie przytoczony tylko dla jednej jej połowy. Konstrukcję kształtu rozpoczyna się od ustalenia odległości punktów wystawiania charakterystyk od osi symetrii i przez to ustalenie wielkości dyszy (rysunek 3.2 i rysunek 3.3).



Rys. 3.3. Schemat konstruowanej połowy dyszy

Pierwszy odcinek dyszy od punktu A do B, zaznaczony zielonym kolorem konstruuje się jako linię ekspansji przepływu wokół hipotetycznego naroża "S" umieszczonego w punkcie wystawienia charakterystyk (Rys.3.3). Odcinek od punktu B do punktu C, zaznaczony na niebiesko, konstruuje się w taki sposób aby w każdym punkcie był równoległy do wektora prędkości płynu na tej charakterystyce. Dzięki temu od tej części ściany dyszy nie następuje żadne odbicie charakterystyki i strumień za charakterystyką jest jednorodny, pomimo faktu, że na każdej kolejnej charakterystyce liczba Macha jest coraz większa. Zakres niezmienników charakterystyk koniecznych do przeprowadzenia konstrukcji dyszy wynika z założonej liczby Macha na

wylocie z dyszy. Ze względu na skończoną ilość charakterystyk użytych do konstrukcji ten odcinek dyszy to krzywa łamana złożona z odcinków łączących daną charakterystyką z kolejną, przez co kąt wystawienia każdego z odcinków jest określony przez dwie charakterystyki. Aby to uwzględnić, kąt ten jest wyznaczany jako średnia wartość kątów wynikających z numerów charakterystyk wyznaczających początek odcinka i jego koniec (punkty $B(i)$ i $B(i+1)$ na rysunku 3.3). Procedura ta jest realizowana aż do charakterystyki na której kąt θ jest zerowy i liczba Macha ma założoną wartość. Pozwala to wyznaczyć punkt C i tym samym kończy konstrukcję części naddźwiękowej dyszy. Do realizacji przedstawionego algorytmu został napisany program w języku MATLAB. Wynikiem jego działania jest zapisany w formacie programu MS-EXCEL plik zawierający współrzędne punktów opisujących kształt dyszy. Obliczony kształt części naddźwiękowej dyszy przedstawia wykres na rysunku 3.4.



Rys. 3.4. Kształt części naddźwiękowej dyszy obliczony na podstawie metody charakterystyk

3.3 Pomiar rozkładu liczby Macha w dyszy

Rozkład liczby Macha wzdłuż dyszy wyznaczano na podstawie pomiaru ciśnień:

- ciśnienia spiętrzenia p_0 na wlocie do komory,
- ciśnień statycznych p_i mierzonych w otworkach w osi dolnej ściany dyszy.

Liczbę Macha wyznaczano przy założeniu izentropowości przepływu na podstawie wzoru:

$$M_{is} = \sqrt{\left[\left(\frac{p_0}{p_i} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \frac{2}{\kappa-1}} \quad (9)$$

Ciśnienia statyczne były mierzone skanerem ciśnienia⁴ na dolnej ścianie dyszy (rysunek 2.6) zainstalowanej w komorze pomiarowej opisanej w podrozdziale 2.2. W punktach pomiaru ciśnień leżących na ścianie, wskutek sił adhezji, prędkość czynnika jest zerowa. Z tego też powodu liczba Macha opisująca stosunek prędkości czynnika do lokalnej prędkości dźwięku jest zerowa. W ramach przybliżenia zaproponowanego równaniami Prandtla, ciśnienie w warstwie przyściennej jest stałe w kierunku normalnym do ścianki. Oznacza to, że zmierzona wartość ciśnienia statycznego bardzo dobrze odpowiada wartości poza warstwą przyścienną i pozwala mówić o liczbie Macha poza warstwą przyścienną na podstawie tak prowadzonych przeliczeń.

⁴Opisuje go podrozdział 2.1.

3.4 Pomiar parametrów warstw przyściennych

Pomiary dotyczące warstw przyściennych bazowały na pomiarze ciśnienia spiętrzenia w funkcji odległości od ściany dyszy w kolejnych trawersach. Jednocześnie mierzone było ciśnienie statyczne na dolnej ściance dyszy w punkcie odpowiadającym położeniu mierzonego trawersu. Pomiar prowadzony był "igłową" sondą Pitota o profilu okrągłym. W części wlotowej średnica sondy wynosiła 0,5 mm, kolejny segment o średnicy 1,4 mm przechodził w następny o średnicy 3 mm i w kolejny o średnicy 5 mm. Segmenty zostały zestawione w taki sposób, aby sonda mogła przylegać do ścianki, co jest widoczne na rysunku 3.5.



Rys. 3.5. Sonda do pomiaru ciśnienia spiętrzenia

Dzięki takiej budowie sondy, wartości uzyskanej przy jej najniższym położeniu przypisywano wysokość 0,25 mm nad dolną ścianką dyszy. W rzeczywistości mierzona jest wartość średnia z obszaru przekroju wlotowego sondy, jednakże z przyczyn technologicznych nie było innej możliwości, a popełniany błąd nie jest znaczący ⁵. Ze względu na naddźwiękową prędkość przepływu, w warstwie przyściennej występują zarówno prędkości poddźwiękowe, jak i naddźwiękowe. Przy pomiarze w części naddźwiękowej przed sondą występuje odsunięta fala uderzeniowa, która powoduje dodatkowe straty ciśnienia spiętrzenia. W celu wyznaczenia prawidłowych profi-

⁵Uzasadnienie tego założenia zawiera dodatek 7.2

łów liczby Macha w warstwie korzystano z dwóch różnych zależności[22]. W części poddźwiękowej przekształcenia oparte były o izentropową zależność:

$$\frac{p_0}{p_i} = \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_i^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}, \quad (10)$$

śluszną w poddźwiękowej części warstwy, w której:

$$\frac{p_0}{p_i} \leq \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_i^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}. \quad (11)$$

W dalszej, naddźwiękowej części warstwy korzystano z wzoru Rayleigh'a, uwzględniając w ten sposób straty związane z obecnością fali uderzeniowej przed sondą (wzór 12):

$$\frac{p_0}{p_i} = \frac{\left(1 + \frac{\kappa + 1}{2} M_i^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}}{\left(\frac{2\kappa}{\kappa + 1} M_i^2 \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1}\right)^{\frac{1}{\kappa - 1}}}. \quad (12)$$

Na podstawie wyznaczonych rozkładów liczby Macha wyznaczono profile prędkości przekształcając zależność definiującą liczbę Macha i przyjmując założenie o stałości temperatury spiętrzenia T_0 w warstwie przyściennej:

$$u = Ma = M\sqrt{\kappa RT} = \frac{M}{\sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2}} \sqrt{\kappa RT_0}. \quad (13)$$

Na podstawie równania stanu wyznaczono profile gęstości:

$$\rho = \frac{p}{RT} = \frac{p \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2\right)}{RT_0}. \quad (14)$$

Grubość warstwy przyściennej δ określano jako wysokość nad dolną ścianą dyszy, na której prędkość osiągała 99,5% prędkości przepływu głównego, następnie wyznaczano całkowite parametry związane z profilem warstwy :

- grubość straty przekroju δ_1 :

$$\delta_1 = \int_0^\delta \frac{(\rho_i u_i - \rho u)}{\rho_w u_w}, \quad (15)$$

- grubość straty pędu δ_2 :

$$\delta_2 = \frac{1}{\rho_w u_w^2} \left(\int_{\delta_1}^{\delta} \rho_i(y) u_i(y) u_i(y) dy - \int_0^{\delta} \rho(y) u(y) u(y) dy \right), \quad (16)$$

- parametr kształtu:

$$H_{12} = \frac{\delta_1}{\delta_2}. \quad (17)$$

Wzory 15 i 16 są słuszne dla przepływów, w których ciśnienie statyczne nie jest zmienne w funkcji odległości od ścianki. W przypadku przepływów wzdłuż ścianki zakrzywionej lub obecności fal ciśnienie statyczne zmienia się w poprzek warstwy, i wtedy należy stosować wzory uwzględniające jego zmienność

- grubość straty przekroju δ_1 :

$$\delta_1 = \int_0^{\delta} \left(\frac{\rho_i(y) u_i(y) - \rho(y) u(y)}{\rho_w u_w} \right) dy \quad (18)$$

- grubość straty pędu δ_2 :

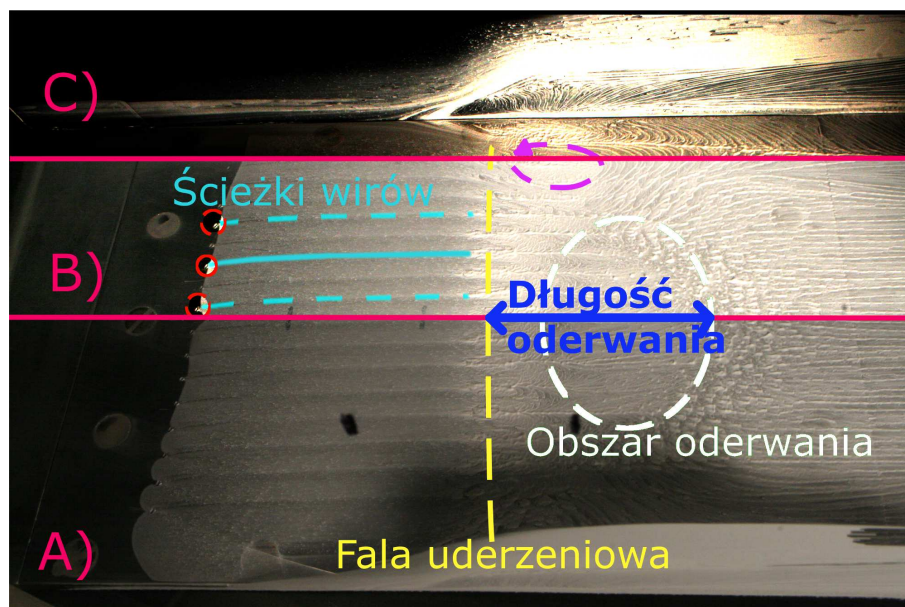
$$\delta_2 = \int_0^{\delta} \frac{\rho_i(y) u_i^2(y) - \rho(y) u^2(y)}{\rho_w u_w^2} dy - \delta_1. \quad (19)$$

Pomiary prowadzono dla trawersów położonych 25 mm przed falą uderzeniową, 30 mm za falą uderzeniową i 55 mm za falą uderzeniową (wyjątek stanowił przypadek z przesuniętą pozycją fali, gdzie z przyczyn konstrukcyjnych nie było możliwe prowadzenie pomiaru w trawersie 25 mm przed falą uderzeniową; wykonano go w trawersie 10 mm przed falą uderzeniową).

3.5 Wizualizacja olejowa

Do analizy struktury przepływu na dolnej ściance i w narożu dyszy wykorzystano wizualizację olejową. Metoda ta polega na wykorzystaniu oleju z barwnikiem, którym pokrywa się obiekt, którego opływ ma być wizualizowany. Po rozpoczęciu przepływu na olej działają siły związane z naprężeniami stycznymi generowanymi przez przepływ na ściance. Siły te powodują ruch oleju, który przenoszony zwilża ściankę i kreśli na niej ścieżkę swojego ruchu. Różne elementy przepływu takie jak na przykład oderwanie bądź przylgnięcie, tworzą charakterystyczne wzory w wizualizacji olejowej, pozwalające zidentyfikować je na obrazie. W opisywanych eksperymentach zawieszoną TiO_2 (biel tytanowa) w oleju metylosilikonowym malowano płytkę pomiarową rozpoczynając około 5 mm poniżej linii generatorów wirów, następnie uruchamiano zapis filmowy i rozpoczynano przepływ. Ze względu na możliwe do uzyskania warunki oświetleniowe rozpoznawanie struktur w różnych regionach przepływu wymagało numerycznej analizy zapisywanych zdjęć.

Przykład takiego zdjęcia zmodyfikowanego dla uwyraźnienia interesujących elementów przedstawia rysunek 3.6.



Rys. 3.6. Wizualizacja olejowa

Obszar **A** (dolna część rysunku) przedstawia nie zmodyfikowane zdjęcie wizualizacji olejowej uzyskanej podczas pomiarów.

W obszarze **B** (środkowy obszar) numerycznie zmieniono jasność i kontrast w taki sposób, aby dobrze widoczne były interesujące elementy przepływu. Dla zachowania czytelności tylko wybrane trzy generatory zaznaczone są czerwonymi obwódkami, wychodzące z nich ścieżki wirów wyróżniono błękitnymi liniami (jedną ścieżkę przedstawiono w całości linią ciągłą). Żółta linia odpowiada położeniu fali uderzeniowej, a linią białą otoczono obszar oderwania.

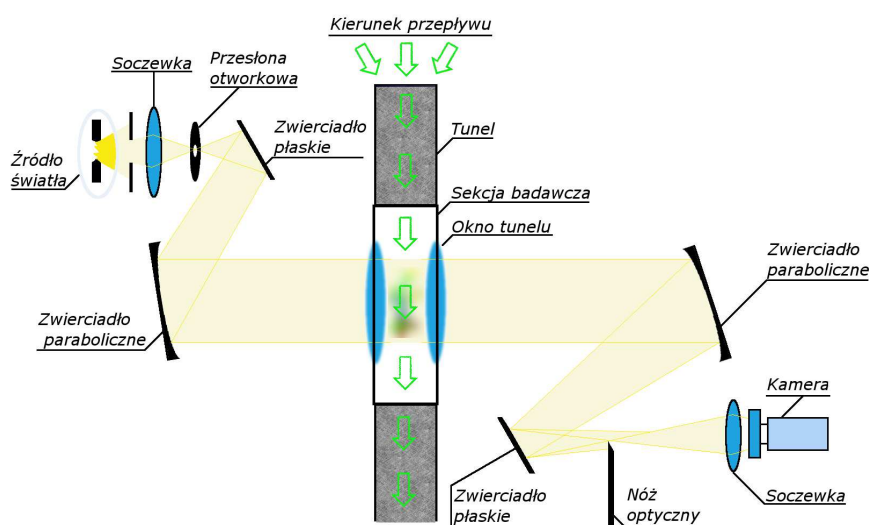
W górnej części rysunku (obszar **C**) odwzorowanie kolorów dopasowano tak, aby wyraźnie widoczne były efekty związane z obecnością naroża.

W dalszej części pracy jako długość oderwania przyjmowana będzie odległość od fali uderzeniowej do linii przylgnięcia zaznaczona na rysunku

niebieską dwustronną strzałką. Takie zaznaczenie długości oderwania może wydać się nieścisłe jako że oderwanie zaczyna się za falą uderzeniową. Jest to podyktowane to tym, że w pracy badany jest wpływ "całego zaburzenia", które rozpoczyna się na fali uderzeniowej, a sięga aż do linii przyłgnięcia.

3.6 Układ do wizualizacji metodą smugową; "Schlieren"

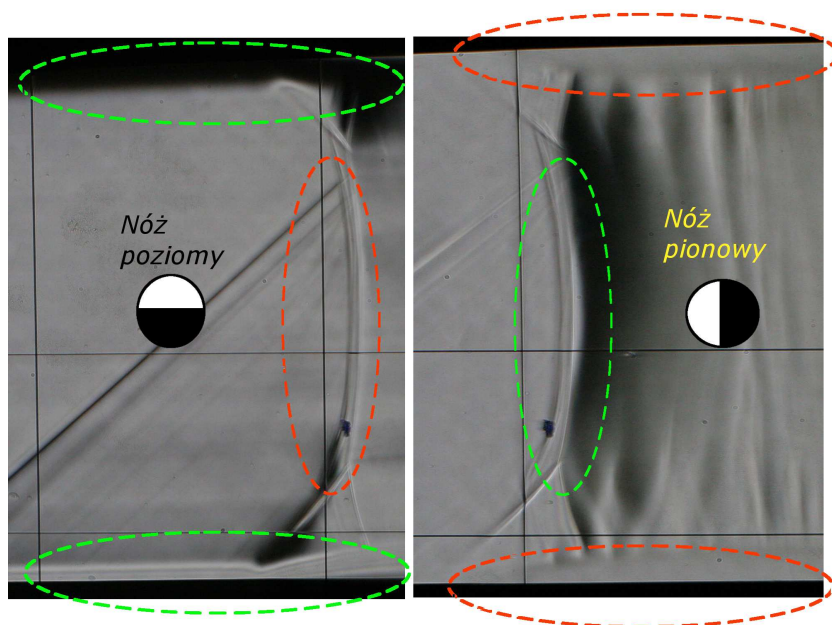
Wizualizację metodą smugową (zwyczajowo nazywaną "wizualizacją Schlierena") prowadzono przy pomocy układu przedstawionego na rysunku 3.7.



Rys. 3.7. Schemat układu do wizualizacji typu "Schlieren"

Jest to klasyczny układ znany jako "Z-type" we współczesnej literaturze przedmiotu [23]. Wiązka generowana przez białą lampę wyładowczą HAMAMATSU L2193 jest formowana w wiązkę równoległą za pomocą układu optycznego na który składają się: przesłona, soczewka, przesłona otworkowa, zwierciadło płaskie i skupiające zwierciadło paraboliczne. Wiązka ta jest kierowana na okno sekcji pomiarowej, przechodzi przez przepływ i wychodzi przez przeciwległe okno sekcji pomiarowej. Następnie wiązka przechodzi przez kolejny układ optyczny który tworzą: skupiające zwierciadło paraboliczne i zwierciadło płaskie. Występujące w tych układach zwierciadła płaskie nie są istotne dla działania metody, ich obecność wynika tylko z kształtu pomieszczenia laboratorium transonicznego w którym prowadzi-

ne są pomiary. W ognisku wiązki umieszczony jest nóż optyczny, a za nim aparat fotograficzny albo kamera. Występującym w przepływie gradientom gęstości towarzyszy niejednorodność współczynnika załamania światła. Promienie wiązki równoległej są odchylane zależnie od lokalnego gradientu gęstości gazu w komorze pomiarowej. Te odchylone promienie są ogniskowane w innym punkcie niż promienie wiązki równoległej, dzięki czemu trafiają one na nóż optyczny lub omijają go. W zależności od kierunku ustawienia płaskiego noża optycznego, w obrazie widoczne są obszary o wybranym kierunku gradientu parametrów przepływu prostopadłym do kierunku ustawienia noża optycznego. Generowany obraz zawiera przyciemnione albo rozjaśnione obszary ilustrujące pola wybranego kierunku gradientu gęstości. Przykładową wizualizację fali uderzeniowej przy poziomym i pionowym ustawieniu noża optycznego przedstawia rysunek 3.8.



Rys. 3.8. Wizualizacja typu "Schlieren"

Przy poziomym nożu (lewa część rysunku), zgodnie z zasadą przedstawio-

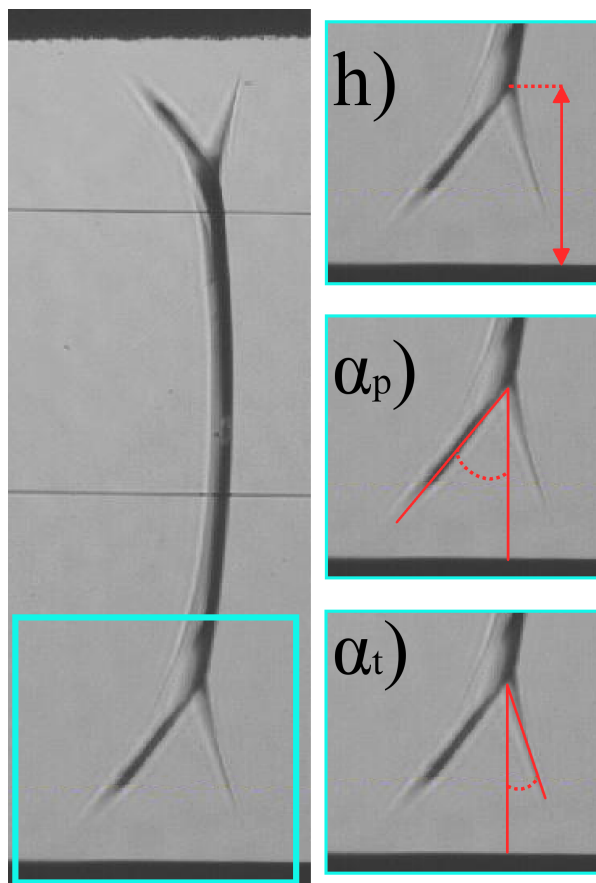
ną na rysunku 3.7, układ jest czuły na pionowe gradienty gęstości. Na ściankach dyszy widoczne są warstwy przyścienne (jasna i ciemna, co wynika z przeciwnych znaków pionowej składowej gradientu gęstości w górnej i dolnej warstwie przyściennej) zaznaczone zielonymi, przerywanymi elipsami. Przy pionowym nożu, czyli w prawej części rysunku, dobrze widoczna jest główna fala i towarzyszące jej poziome gradienty gęstości zaznaczone zieloną przerywaną elipsą, natomiast zupełnie niewidoczne są warstwy przyścienne; obszar w którym one występują zaznaczony jest czerwoną, przerywaną elipsą. Poza wizualizowanym przepływem na zdjęciu widoczne są także linie kwadratowej siatki. Jej rzeczywiste wymiary i położenie w laboratoryjnym układzie odniesienia są znane; umożliwia ona wyznaczenie rzeczywistych wymiarów obiektów wizualizowanych niezależnie od ustawień elementów optycznych.

3.7 Pomiar i analiza geometrii układu falo- wego

Na podstawie wizualizacji typu "Schlieren" wyznaczano parametry geometryczne fali uderzeniowej takie jak:

- wysokość punktu potrójnego h ,
- kąt α_p nachylenia przedniej fali stopy lambda,
- kąt α_t nachylenia tylnej fali stopy lambda,

zaznaczone na rysunku 3.9.



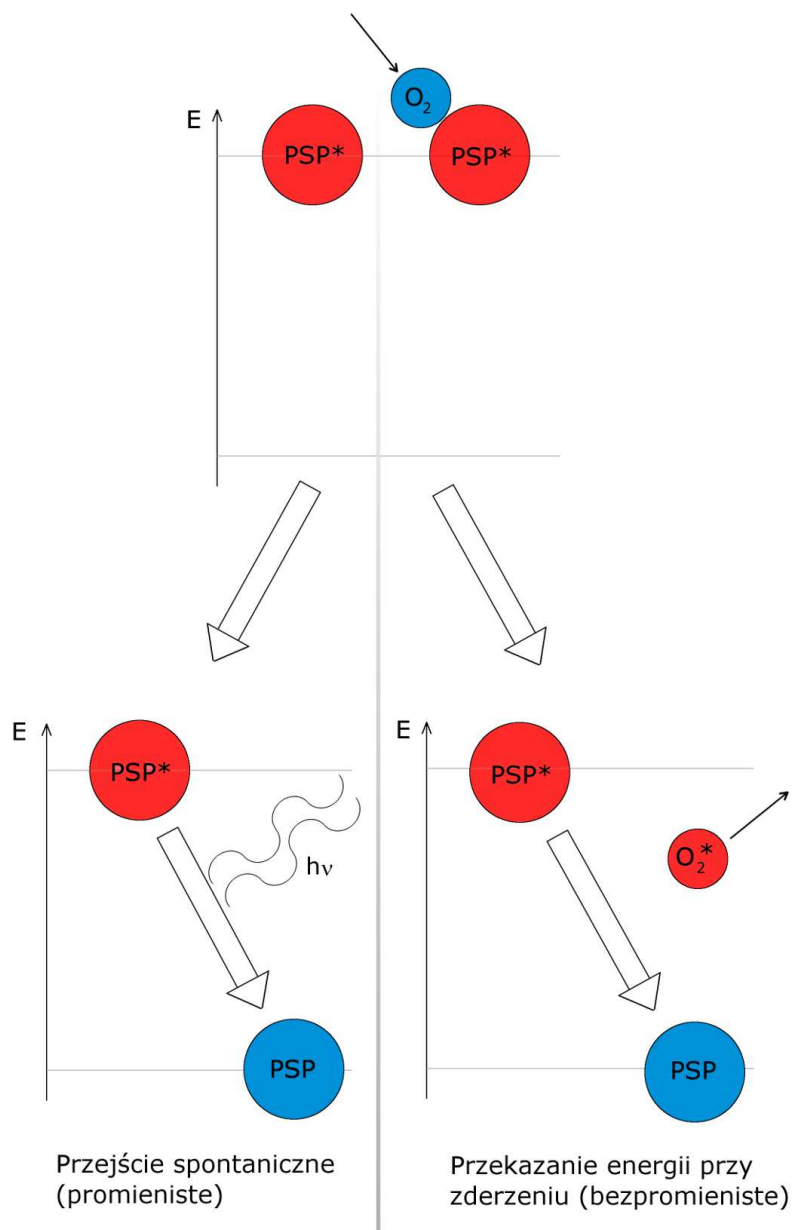
Rys. 3.9. Elementy geometrii stopy λ

Po lewej stronie rysunku 3.9 widoczne jest zdjęcie wizualizacji fali z zaznaczoną błękiną obwódką dolną stopą λ . W prawej części rysunku umieszczono trzykrotnie ten obszar z zaznaczonymi parametrami mierzonymi (od góry: wysokość punktu potrójnego h , kąt α_p i kąt α_t). Kąty są mierzone od kierunku prostopadłego do ścianki, przy czym w zastosowanej dyszy ścianka dolna była płaska, więc niezależnie od położenia fali był to ten sam kierunek.

3.8 Pomiar ciśnienia statycznego metodą PSP (farb czułych na ciśnienie)

3.8.1 Zasada pomiaru ciśnienia statycznego farbą PSP

Metoda pomiaru ciśnienia farbami czułymi na ciśnienie, częściej występująca jako metoda PSP (akronim od angielskiego *"Pressure Sensitive Paint"*), pozwala na optyczny pomiar ciśnienia statycznego na powierzchni. U podstaw tej techniki leży fakt istnienia molekuł, dla których przerwa energetyczna odpowiadająca samorzutnemu przejściu od stanu wzbudzonego do podstawowego odpowiada energii wzbudzenia molekuly tlenu od stanu podstawowego do jednego ze stanów wzbudzonych. Dzięki temu wzbudzona "molekuła PSP" może powrócić do stanu podstawowego na dwa sposoby [23]. Poprzez spontaniczne przejście z emisją energii w postaci promieniowania elektromagnetycznego, albo poprzez bezpromieniste przekazanie energii molekule tlenu w procesie zderzeniowym (jest to proces wygaszania fluorescencji, w literaturze anglojęzycznej okreśłany jako: *"oxygen quenching"*). Schematycznie ilustruje to rysunek 3.10.



Rys. 3.10. Możliwe sposoby transferu energii wzbudzonej molekuly farby PSP

W określonych warunkach, przy stałej koncentracji tlenu, czas życia sta-

nu wzbudzonego jest dla danej molekuly stały. Przy zmiennej tylko koncentracji tlenu prawdopodobieństwo wystąpienia procesu zderzeniowego zależy od chwilowej, lokalnej koncentracji tlenu w otoczeniu populacji wzbudzonych molekuł. Jeżeli ta koncentracja jest wysoka, to ilość zderzeń każdej wzbudzonej molekuly z molekułą tlenu, która może w wyniku zderzenia przejść i unieść energie wzbudzenia jest duża, co powoduje wzrost prawdopodobieństwa przejścia bezpromienistego. Analogicznie, obniżenie koncentracji tlenu przekłada się na spadek prawdopodobieństwa nastąpienia takiego przejścia w jednostce czasu. Obecność molekuł tlenu jest więc czynnikiem powodującym zmniejszenie intensywności promieniowania emitowanego przez populację wzbudzonych molekuł. Dla używanego w badaniach powietrza koncentracja molekuł tlenu jest liniową funkcją ciśnienia i dlatego czas życia molekuly w stanie wzbudzonym jest liniową funkcją ciśnienia powietrza ją opływającego. Równanie opisujące zależność intensywności emisji od ciśnienia powietrza zostało przedstawione przez Otto Sterna i Maxa Volmera w roku 1919 w formie:

$$\frac{i_{ref}(\vec{r})}{i(\vec{r})} = A + B \cdot \frac{p(\vec{r})}{p_{ref}(\vec{r})}. \quad (20)$$

Warunki odniesienia w tym przypadku oznaczają znaną wartość ciśnienia. Współczynniki A i B to stałe materiałowe zależące od składu użytej farby. Ich wyznaczenie odbywa się podczas procesu kalibracji, który będzie opisany w dalszej części. Równanie to pozwala wyznaczyć rozkład ciśnienia na podstawie pomiaru rozkładu intensywności emisji w warunkach odniesienia i w warunkach badanego przepływu (jest to tak zwana metoda "Intensywności PSP"). Możliwe jest także wyznaczanie ciśnienia na podstawie pomiaru czasu życia stanu wzbudzonego molekuly poprzez skorzystanie z równania:

$$\frac{\tau_{ref}(\vec{r})}{\tau(\vec{r})} = A + B \cdot \frac{p(\vec{r})}{p_{ref}(\vec{r})}, \quad (21)$$

które definiuje sposób postępowania w metodzie "Lifetime PSP". Ze względu na prostotę i mniejsze wymagania sprzętowe zdecydowano się na skorzy-

stanie z metody intensywnościowej (równanie 20), i tego podejścia będzie dotyczył dalszy opis metody PSP.

3.8.2 Realizacja metody PSP

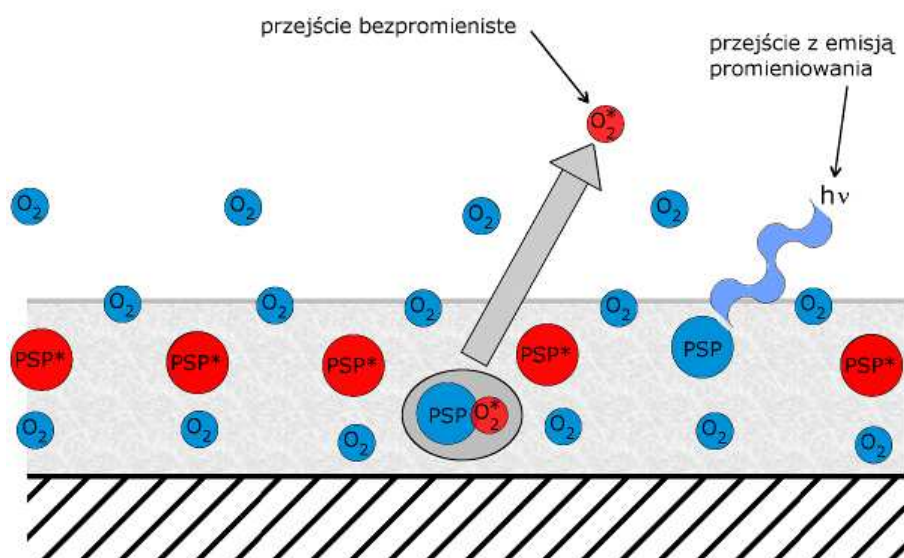
Układ do pomiarów PSP zrealizowano w ścisłej współpracy z pracownikami *ONERA - Le centre Onera de Meudon*. System realizujący pomiar PSP musi składać się z następujących elementów:

- farba,
- elementy optyczne,
- układ kalibracyjny,
- oprogramowanie do analizy uzyskanych danych,

które pozwalają na przeprowadzenie pomiarów i przetworzenie uzyskanych wyników.

Farba

Farba o pojedynczym luminoforze W najbardziej klasycznej wersji farba PSP składa się z polimeru w którym zawieszono są cząsteczki PSP (luminofor). Schematycznie przedstawia to rysunek 3.11.



Rys. 3.11. Schemat klasycznej farby PSP z pojedynczym luminoforem

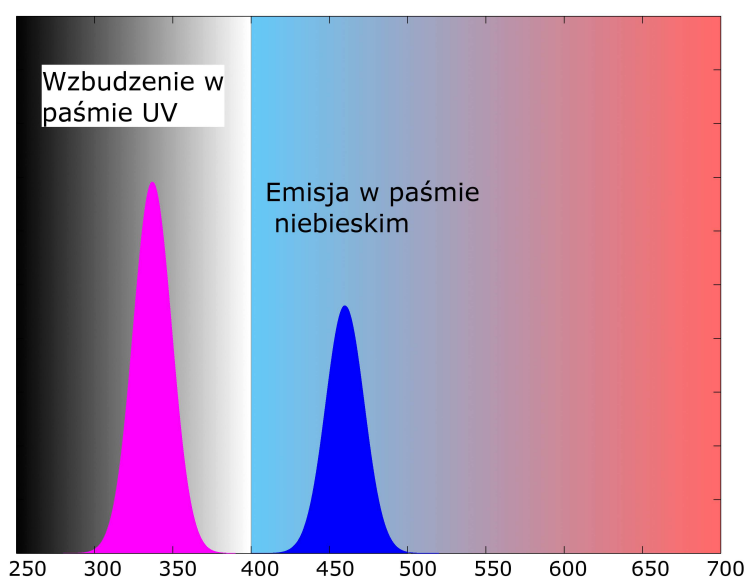
Polimer pełni głównie funkcję mechaniczną (pozwala na łatwe nanoszenie molekuł PSP na badaną powierzchnię), jest porowaty umożliwiając penetrację tlenu z powietrza do warstwy farby, ale dodatkowo musi mieć następujące cechy:

- przezroczystość dla światła wzbudzającego jak i emitowanego,
- odporność na światło wzbudzające i emitowane,
- brak wchodzenia w reakcję z molekułami PSP,
- dobra przyczepność do malowanej powierzchni,

- bezpieczeństwo użytkowania,
- łatwość syntezy lub dostępność komercyjna,

które udało się odnaleźć w komercyjnie dostępnej żywicy polimerowej. Żywica ta utwardza się w temperaturze pokojowej pod wpływem wilgoci zawartej w powietrzu. Ze względu na bardzo dobrą adhezję do używanych powierzchni przygotowanie podłoża sprowadza się do naniesienia czystej powłoki podkładowej z białej farby odpowiedniej do tworzącego powierzchnię dyszy materiału. Po utwardzeniu zgodnie z prawem Henry-ego koncentracja molekuł tlenu w polimerze jest proporcjonalna do ciśnienia tego gazu nad jego powierzchnią, co czyni go bardzo dogodną substancją do zastosowania w farbach PSP.

Jako luminofor czuły na stężenie tlenu stosuje się piren. Jest on wzbudzany promieniowaniem z zakresu bliskiego nadfioletu; maksimum absorpcji występuje przy długości fali 337 nm, natomiast emisja następuje w widzialnej części widma z maksimum przy długości fali 460 nm, co odpowiada kolorowi niebieskiemu. Widmo absorbcyjno-emisyjne pirenu przedstawia rysunek 3.12.

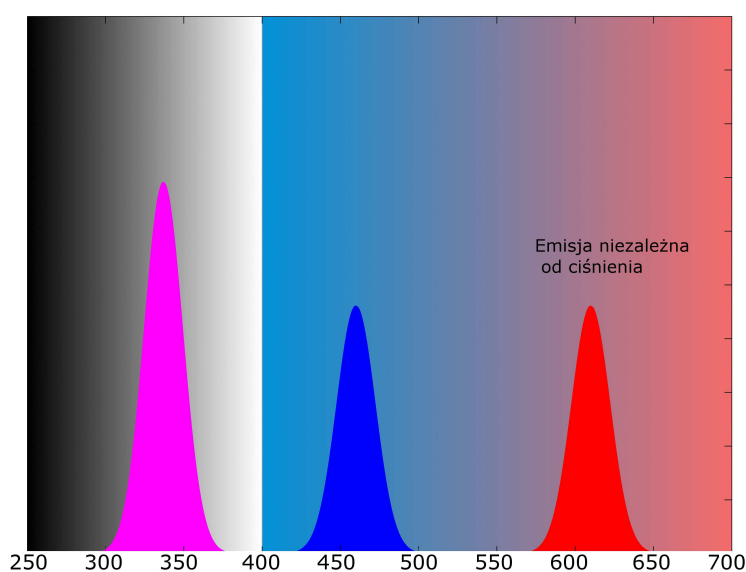


Rys. 3.12. Widmo farby PSP z pojedynczym luminoforem

Wielkość maksimum piksu emisji, przy stałym natężeniu światła wzbudzającego, jest funkcją koncentracji tlenu, a odpowiadająca mu długość fali 460 nm jest stałą. Pomiar przy użyciu takiej farby polega na wykonaniu zdjęcia w warunkach odniesienia oraz w obecności badanego przepływu i skorzystaniu z równania 20. Ponieważ ciśnienie wyznaczane jest na podstawie stosunku intensywności w każdym punkcie obrazu, można pracować przy prawie dowolnych intensywnościach światła wzbudzającego o ile tylko są one akceptowalne dla kamery, ale najkorzystniejsze ze względu na stosu-

nek sygnału do szumu są wysokie natężenia bliskie nasycenia przetwornika kamery. Problemem jest ewentualna niestabilność intensywności lampy wzbudzającej. Dla ustalonego ciśnienia emisja z molekuł PSP zależy liniowo od intensywności światła wzbudzającego i dlatego jej zmiany pomiędzy warunkami odniesienia a pomiaru powodują uzyskanie błędnych wyników. Aby usunąć ten problem stosuje się farby o dwóch luminoforach; były one stosowane w opisywanych tu pomiarach.

Farba o dwóch luminoforach Farba binarna (funkcjonująca w literaturze anglojęzycznej jako ”*binary paint*”) w stosunku do opisanej powyżej farby została wzbogacona o jeszcze jeden luminofor. Wzbudzenie tego związku następuje w tym samym paśmie co pirenu, natomiast pik emisji przypada na pasmo czerwone, (610 nm). Widmo absorbcyjno-emisyjne takiej farby przedstawia rysunek 3.13.



Rys. 3.13. Widmo binarnej farby PSP

Wielkość emisji drugiego luminoforu nie zależy od koncentracji tlenu na badanej powierzchni, a zależy liniowo tylko od intensywności światła wzbudzającego. Ponieważ zależność emisji ”niebieskiej” od intensywności wzbudzenia także jest liniowa, to emisję ”czerwoną” można wykorzystać do monitorowania zmian intensywności wzbudzenia i kompensacji ich wpływu na wynik poprzez modyfikację równania 20 do postaci 22:

$$\frac{\left(\frac{I_{ref}^{blue}(\vec{r})}{I_{ref}^{red}(\vec{r})}\right)}{\left(\frac{I_{flow}^{blue}(\vec{r})}{I_{flow}^{red}(\vec{r})}\right)} = A + B \cdot \frac{p(\vec{r})}{p_{ref}(\vec{r})}, \quad (22)$$

która pozwala usunąć błędy wynikające ze zmian oświetlenia pomiędzy układem odniesienia a pomiarowym. Odstęp czasu między nimi może wynikać z czynności koniecznych do wykonania dmuchu i być znacząco większy niż odstęp pomiędzy wykonaniem zdjęcia "niebieskiego" i "czerwonego", które można wykonać nawet podczas jednego dmuchu. Dodatkowy luminofor nie rozpuszcza się w stosowanym rozpuszczalniku i pozostaje w formie zawiesiny. Z tego powodu po dłuższym przechowywaniu farbę należy dokładnie rozmieszać. Efekty sedymentacyjne przedstawia rysunek 3.14. Lewy pojemnik to niewymieszana farba z widocznym skupieniem czerwonej luminescencji na dnie, prawy pojemnik to ta sama farba po wymieszaniu z widoczną luminescencją z całej objętości.



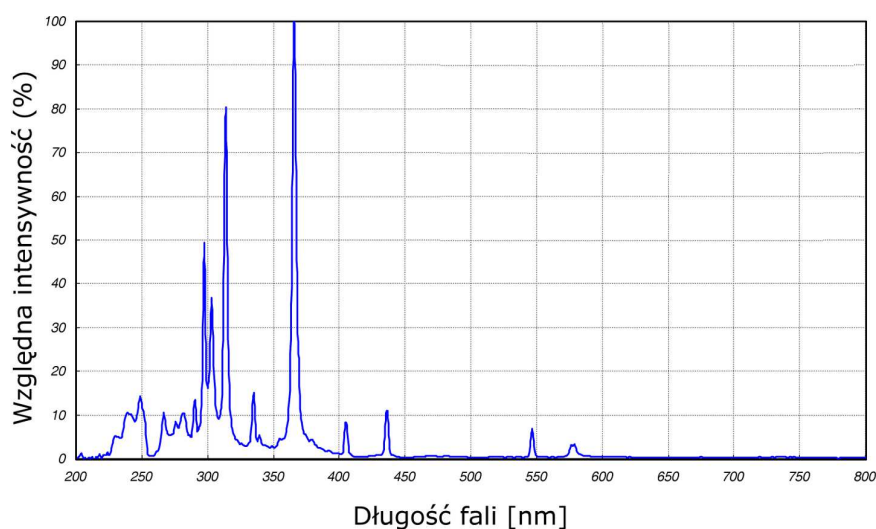
Rys. 3.14. Efekt sedymentacji

Elementy optyczne

Układ optyczny można podzielić ze względu na pełnione funkcje na:

- układ wzbudzania luminoforu,
- układ pomiaru promieniowania emitowanego.

Układ wzbudzania luminoforu Ta część systemu składa się z lampy UV Hamamatsu LC6 o widmie emisji jak na rysunku 3.15, uzupełnionej o dwa włókna światłowodowe, które pozwalają wygodnie skierować strumień światła na wybraną powierzchnię.



Rys. 3.15. Widmo emisyjne lampy wzbudzającej

Lampa umożliwia płynne sterowanie intensywnością.

Układ pomiaru promieniowania emitowanego Ta część systemu składa się z kamery oraz filtrów. Zastosowana kamera Hamamatsu ORCA II szczególnie nadaje się do tej aplikacji ze względu na parametry takie jak:

- wysoka rozdzielczość (1280X1024),
- niskie szумы (chłodzenie ogniwami Peltiera),
- duża rozdzielczość przetwornika AC (16 bitów),
- zaawansowany sterownik pozwalający na częściową automatyzację.

Aby umożliwić osobny pomiar intensywności emisji w paśmie niebieskim i czerwonym stosowane są dwa filtry pasmowo przepuszczalne. Filtr "czerwony" o częstotliwości środkowej odpowiadającej długości fali 625 nm i szerokości pasma odpowiadającej 10 nm oraz filtr "niebieski" o częstotliwości środkowej odpowiadającej długości fali 480 nm i szerokości pasma odpowiadającej 80 nm . Filtry te pozwalają na niezależny pomiar w obydwóch znaczących obszarach widmowych według rysunku 3.13. Do filtrów został wykonany zmieniacz; przedstawia go wraz z miejscem jego montażu rysunek 3.16. Pozwala on na łatwą zmianę zapisywanego pasma podczas prowadzenia pomiaru.



Rys. 3.16. Zmieniacz filtrów

Jako próbę usunięcia wpływu szumów własnych kamery zastosowano podejście polegające na odejmowaniu od każdego z obrazów zdjęcia uzyskanego przy zasłoniętym obiektywie. Takie zdjęcie stanowi zapis szumów i pozwala zmniejszyć wynikający z nich błąd. Nie jest to zupełna redukcja, ponieważ nie uwzględnia szumów losowych, ale pozwala na zmniejszenie wpływu stałych źródeł szumów. Uwzględnienie tego czynnika powoduje modyfikację równania 22 do postaci:

$$\frac{\left(\frac{I_{ref}^{blue}(\vec{r}) - I_{szum}(\vec{r})}{I_{ref}^{red}(\vec{r}) - I_{szum}(\vec{r})}\right)}{\left(\frac{I_{flow}^{blue}(\vec{r}) - I_{szum}(\vec{r})}{I_{flow}^{red}(\vec{r}) - I_{szum}(\vec{r})}\right)} = A + B \cdot \frac{p(\vec{r})}{p_{ref}(\vec{r})}. \quad (23)$$

Należy zaznaczyć, że zastosowana w opisywanych badaniach farba PSP jest przeznaczona do pomiarów w stanach ustalonych. Ze względu na użyty porowaty polimer jej stała czasowa wynosi około 1 sekundy.

Układ kalibracyjny

Kalibracja pozwala wyznaczyć wartość stałych materiałowych A i B używanej farby (są to współczynniki występujące w równaniach 20,21,22,23). Polega ona na wykonaniu serii pomiarów w znanych warunkach ciśnieniowych odpowiadających zakresowi w którym mają być prowadzone pomiary. Stosowane są dwa typy kalibracji: zewnętrzna odbywająca się w komorze kalibracyjnej albo 'in situ' na docelowym obiekcie w tunelu aerodynamicznym. Do zewnętrznej kalibracji wykonano komorę kalibracyjną umożliwiającą zadawanie warunków ciśnieniowych i prowadzenie pomiarów PSP; przedstawia ją fotografia na rysunku 3.17.



Rys. 3.17. Komora kalibracyjna

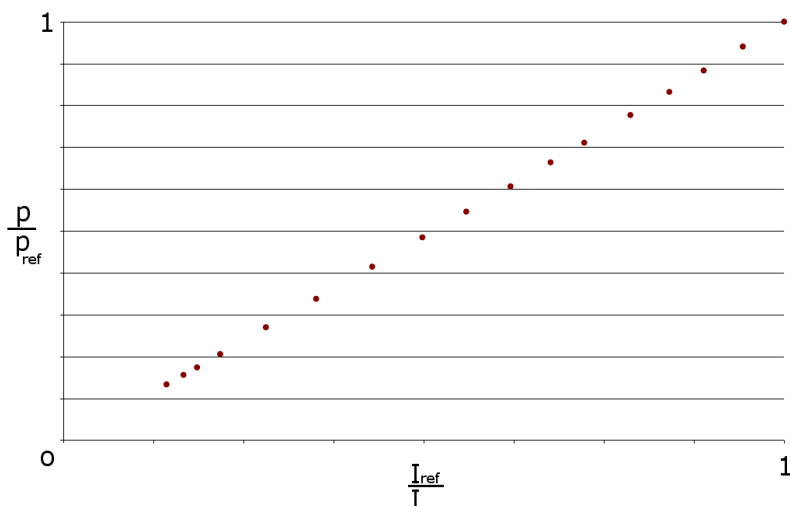
Zestawiony układ podczas kalibracji przedstawia zdjęcie na rysunku 3.18. Widoczna jest na nim komora z płytkami pokrytymi kalibrowaną farbą, kamera z filtrami oraz lampa ze światłowodami.



Rys. 3.18. Układ kalibracyjny

Przy użyciu takiego układu wykonuje się serię zdjęć dla różnych warun-

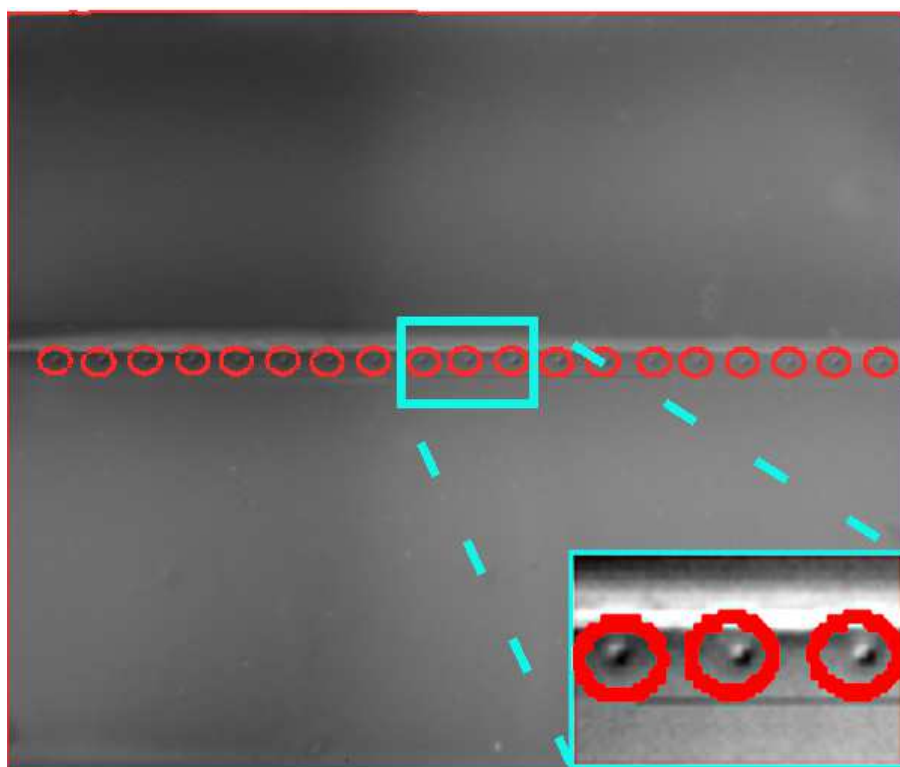
ków ciśnieniowych. Dla każdego wykonuje się zdjęcie "niebieskie" i "czerwone" oraz jedno wspólne zdjęcie szumów dla całej serii. Przykładowe wyniki takich pomiarów przedstawia wykres na rysunku 3.19.



Rys. 3.19. Rezultaty kalibracji

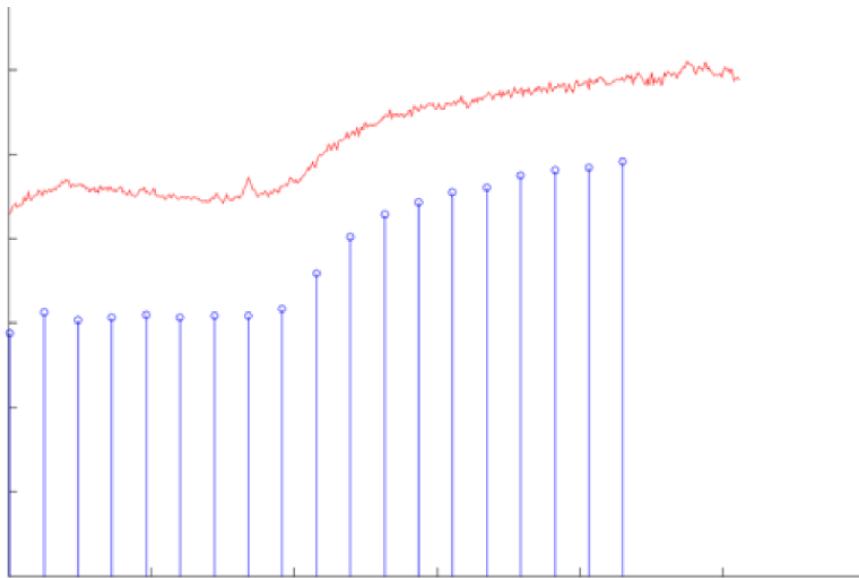
Następnie tak uzyskane punkty dopasowuje się do założonej w równaniu liniowej zależności (równanie 23) i na tej podstawie wyznacza się poszukiwane współczynniki. Na bazie obserwacji własnych (potwierdzonych później dyskusją ze specjalistami z ONERY) zauważono, że przebiegi ciśnień uzyskane przy użyciu współczynników A i B wyznaczonych w kalibracji zewnętrznej są przesunięte o pewną stałą wartość względem wartości rzeczywistych. Oznacza to błąd wyznaczenia wartości współczynnika A. Aby wyeliminować to zjawisko stosuje się kalibrację *'in situ'* (na docelowym obiekcie). Polega ona na prowadzeniu pomiaru farbą PSP o nieznanach współczynnikach A i B z jednoczesnym pomiarem ciśnienia inną metodą w conajmniej dwóch punktach badanej powierzchni. Na podstawie znajomości rezultatów

z PSP określonych lewą stroną równania 23 i dwóch wartości ciśnienia zmierzonych inną metodą można wyznaczyć poszukiwane współczynniki. W opisywanych badaniach PSP, dodatkowy pomiar, przy użyciu skanera ciśnień, odbywał się w 19 punktach położonych w osi badanej powierzchni; przedstawia to fotografia na rysunku 3.20. Ze względu na bardzo mały rozmiar otworków w stosunku do rozmiarów płytki ich położenia zostały zaznaczone czerwonymi obwódkami. Dodatkowo zaznaczony błękitną obwódką obszar został przedstawiony w powiększeniu umożliwiającym wyraźne pokazanie otworków.



Rys. 3.20. Powierzchnia pokryta PSP z otworkami do pomiaru ciśnienia

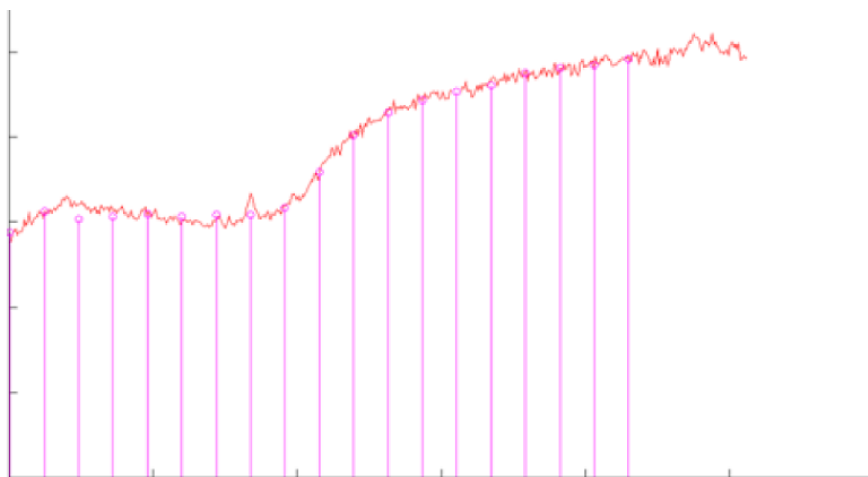
Wyniki takiego pomiaru przedstawia wykres na rysunku 3.21. Niebieskie słupki to wartości zmierzone przetwornikami ciśnienia, czerwony przebieg przedstawia lewą stronę równania 23.



Rys. 3.21. Sygnał PSP bez kalibracji i przebieg ciśnienia

Po wyznaczeniu współczynników A i B można przekształcić przebieg otrzymany z PSP do przebiegu ciśnienia.

Zestawienie takiego przebiegu z wartościami zmierzonymi przedstawia wykres na rysunku 3.22.



Rys. 3.22. Sygnał PSP z kalibracją i przebieg ciśnienia

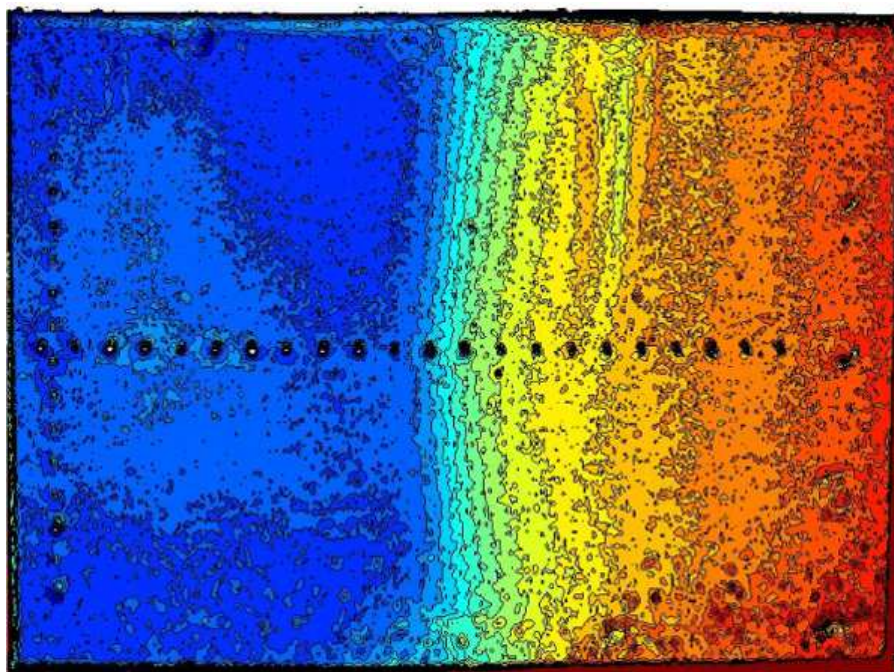
Tak uzyskane współczynniki stosuje się do uzyskania mapy ciśnień w przypadkach pomiarowych.

Oprogramowanie do analizy zebranych danych

Kalibracja zewnętrzna Do kalibracji zewnętrznej korzystano z programu "AFIX2". Program ten powstał we francuskim laboratorium aeronautycznym ONERA do analizy obrazów stanowiących wyniki różnorodnych pomiarów w tunelach aerodynamicznych; umożliwia on między innymi obliczenie współczynników kalibracyjnych dla farby PSP. Ponieważ, jak już wspomniano powyżej, ten sposób kalibracji nie daje prawidłowych rezultatów zrezygnowano z niego za wyjątkiem ustalania przydatności farby PSP do użycia po długim przechowywaniu (zewnętrzna kalibracja pozwala prawidłowo wyznaczyć współczynnik B odpowiadający czułości farby bez potrzeby wykonywania dmuchu w tunelu, co jest przydatne w fazie przygotowywania badań i kompletowania materiałów).

Analiza PSP Znając współczynniki materiałowe A i B można przekształcić zdjęcia PSP na mapę ciśnień na podstawie równania 23. W tym celu autor przygotował aplikację w języku MATLAB. Analiza i przetwarzanie otrzymanych wyników składa się z trzech etapów. Pierwszy etap to kalibracja *'in situ'*. Program umożliwia wskazanie plików ze zdjęciami (zdjęcie przy wyłączonej lampie, oraz zdjęcia "czerwone" i "niebieskie" układu odniesienia oraz układu z przepływem). Korzystając z nich obliczana jest na podstawie lewej strony równania 23 tablica wartości (w każdym punkcie obrazu, bez znajomości współczynników kalibracyjnych A i B). Następnie program umożliwia wskazanie linii na której użytkownik zamierza prowadzić kalibrację. Powinna to być pozioma linia wzdłuż której na zdjęciach układają się otwory pomiaru ciśnienia, tak jak na rysunku 3.20). Wybraną linię można dowolnie zmieniać, obserwując jednocześnie wyświetlany odpowiadający jej stosunek sygnałów PSP. Po zatwierdzeniu program przechodzi do kalibracji. Polega ona na dobraniu parametrów funkcji kalibracyjnej; właściwe wartości przekładają się na nałożenie się wartości w punktach pomiaru ciśnienia na przebieg uzyskany na podstawie zdjęć (rysunek 3.22). Tak uzyskaną funkcję stosuje się do całej tablicy wartości przekształcając ją w ten sposób w ilościową mapę ciśnienia. Ze względu na budowę tunelu niemożliwe jest wykonanie zdjęcia przy kamerze skierowanej prostopadle do dolnej (płaskiej) ścianki dyszy, na której odbywa się pomiar. Na obraz zapisywany przez kamerę wpływa efekt perspektywy, przez co jest on kłopotliwy w analizie tak przy pomiarze wielkości charakterystycznych jak i przy porównywaniu z innymi (kąt ustawienia kamery nie jest znany, a dodatkowo nie jest stały dla kolejnych pomiarów). Aby otrzymane wyniki były porównywalne i łatwiejsze do wykorzystania należy usunąć z nich efekt perspektywy. Taką transformację przeprowadza kolejna aplikacja; umożliwia ona wyznaczenie obrazu ciśnienia w rzeczywistym, prostokątnym układzie współrzędnych związanym z dyszą. Tak przetworzone obrazy przedstawia

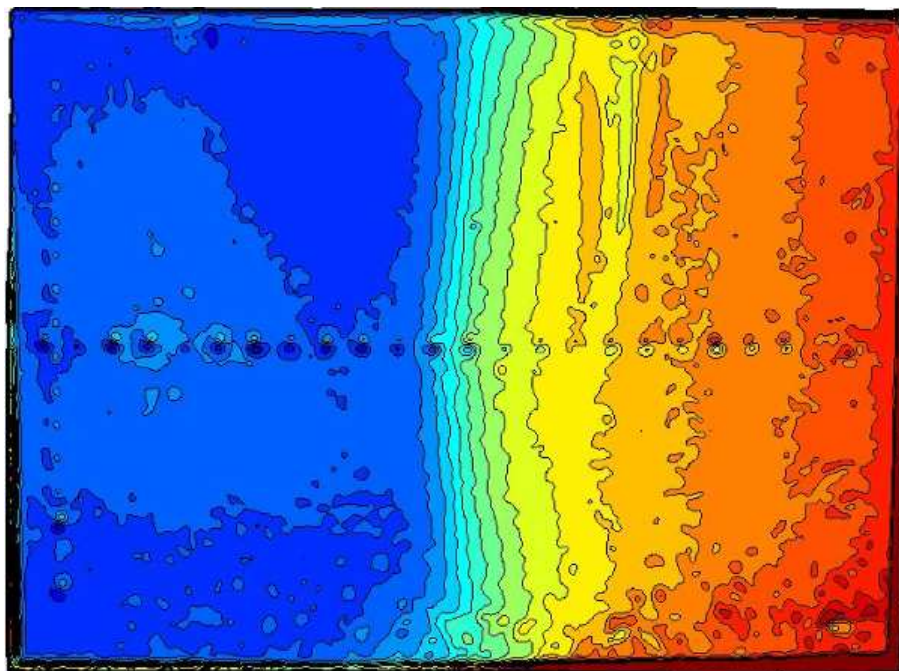
przykład na rysunku 3.23).



Rys. 3.23. Obraz PSP bez efektu perspektywy

Dysponując taką postacią wyników można łatwo porównywać między sobą oraz mierzyć wielkości charakterystycznych elementów przepływu. Na tak uzyskanym zapisie ciśnień widoczna jest duża ziarnistość oraz nie mające uzasadnienia w strukturze przepływu bardzo gwałtowne zmiany parametrów; linie stałego ciśnienia są "postrzępione". Cechy te wynikają ze skończonej ilości i wielkości punktów przetwornika CCD w kamerze. W celu korekcy tych właściwości rezultaty są filtrowane dolnoprzepustowym, dwuwymiarowym filtrem SOI. Użytkownik programu ma możliwość zastosowania go dowolną ilość razy. Ilość przeprowadzonych filtrowań należy dobrać tak, aby obraz był możliwie zbliżony do oczekiwanego, a jednocześnie aby nie zostały z niego usunięte szczegóły obrazowanego przepływu, ani aby nie zostały "rozmyte" obszary w których gwałtowne zmiany parametrów

odpowiadają rzeczywistości. Końcowy wynik to ilościowa mapa ciśnień na badanej powierzchni, jak przedstawiona na rysunku 3.24.

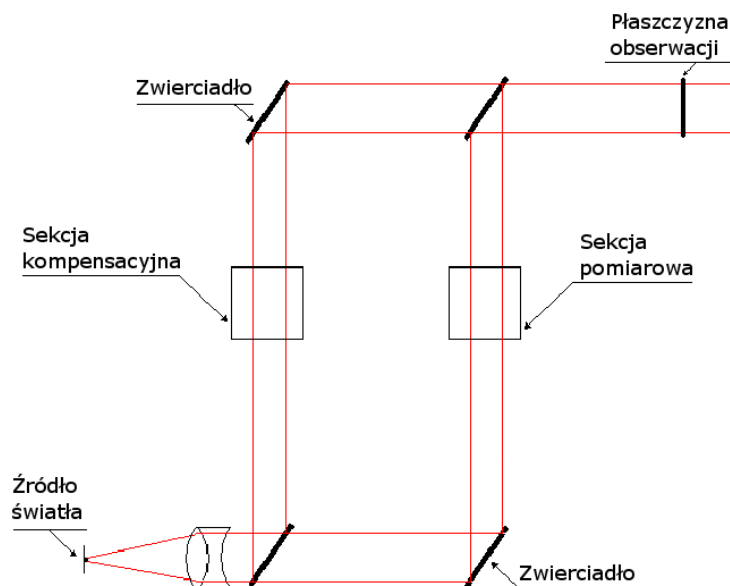


Rys. 3.24. Wygładzony obraz PSP

3.9 Analiza zdjęć interferometrycznych metodą FTFA

3.9.1 Metoda FTFA

Metoda analizy zdjęć interferometrycznych FTFA (akronim od angielskiego "Fourier Transform Fringe analysis") [24], [25], [26] pozwala na uzyskanie z nich ilościowej mapy zmian parametrów gazu w wizualizowanym obszarze. W opisywanych badaniach korzystano z interferometru Mach-Zendera o schemacie jak na rysunku 3.25.

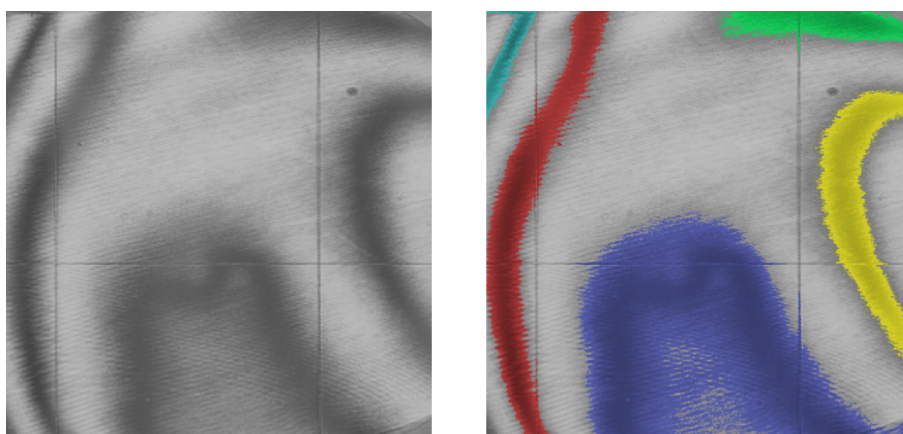


Rys. 3.25. Schemat interferometru Mach-Zendera

W tym przyrządzie poprzez rozdzielenie wiązki światła uzyskuje się dwie wiązki spójne. Jedna z nich przechodzi przez sekcję pomiarową w której odbywa się badany przepływ, druga jest prowadzona poza komorą tunelu poprzez komorę kompensacyjną (warstwa szkła o grubości okien komory badawczej). Następnie wiązki zostają połączone. W zależności od wzajemnego

ustawienia zwierciadeł przyrząd ten może pracować w dwóch trybach; w trybie nieskończonego prążka interferencyjnego albo w trybie skończonego prążka interferencyjnego[23].

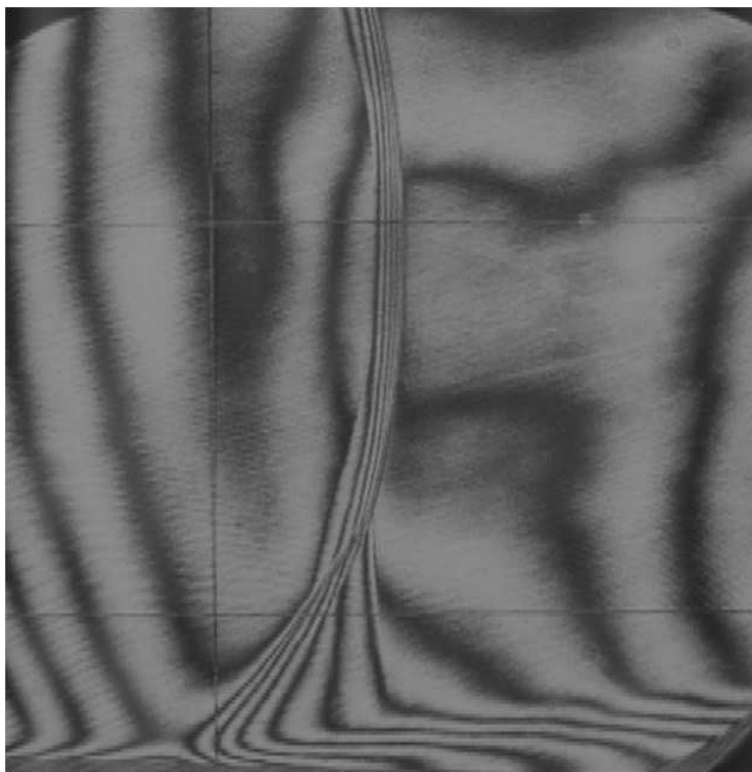
Ustawienie do pracy w trybie nieskończonego prążka interferencyjnego polega na uzyskaniu równoległości zwierciadeł. W tym ustawieniu bez przepływu różnica dróg optycznych pomiędzy wiązkami jest stała na całej powierzchni ich przekroju. Przekłada się to na stałą różnicę faz obydwóch wiązek i stałą jasność na płaszczyźnie obserwacji. Ten tryb pracy daje obrazy łatwe do analizy, ponieważ prążki wyznaczają linie stałej gęstości, ale ma poważne wady. Równoległość zwierciadeł powinna być uzyskana z dokładnością lepszą niż długość fali światła użytego w przyrządzie. To oznacza dużą trudność i czasochłonność regulacji układu optycznego. Wymagana dokładność dotyczy jakości wszystkich elementów optycznych, co przy ich stosunkowo dużych rozmiarach jest trudne i bardzo kosztowne do spełnienia. W rzeczywistych układach często godzimy się na niedoskonałości zarówno przyrządu jak i ustawienia, które przejawiają się jako kilka prążków widocznych w obrazie bez przepływu. Taki interferogram przedstawia lewa część rysunku 3.26.



Rys. 3.26. Rzeczywisty interferogram, tryb nieskończonego prążka interferencyjnego

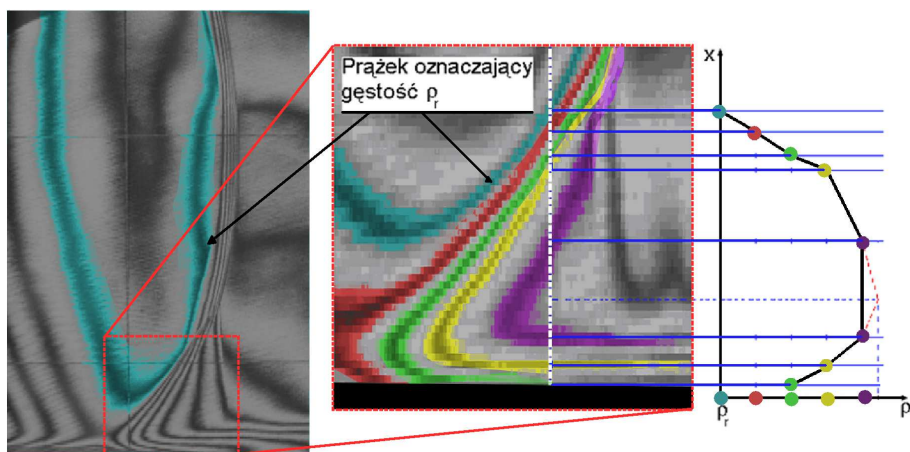
Po prawej stronie rysunku na interferogram naniesiono kolory odróżniające kolejne prążki. W tym przypadku widoczne jest aż pięć prążków, chociaż teoretycznie dla obszaru badanego o stałej gęstości nie powinno być żadnych widocznych prążków. Taki obraz jak powyżej świadczy o błędach ustawienia lub niedoskonałościach elementów optycznych interferometru. Ten błąd początkowy przekłada się na błąd w interpretacji interferogramów z obecnością przepływu.

Po uzyskaniu satysfakcjonującego obrazu bez przepływu należy uruchomić badany przepływ. Towarzyszące mu zmiany gęstości zmieniają rozkład gęstości optycznej i wprowadzają różnicę faz pomiędzy wiązkami. Ta różnica powoduje powstanie prążków interferencyjnych. Obraz interferometryczny dla przepływu z falą uderzeniową przedstawiony jest na rysunku 3.27



Rys. 3.27. Interferogram przepływu, tryb nieskończonego prążka

Na podstawie teorii interferencji można wykazać, że prążek jest linią stałej gęstości i różnica gęstości przy przejściu z dowolnego prążka na kolejny odpowiada zmianie gęstości o stałą wartość. Przekłada się to na różną szerokość prążków; duże ich zagęszczenie w obszarach o silnych gradientach i bardzo małą ilość bardzo szerokich prążków w obszarach o małych gradientach parametrów. Już w tym miejscu widoczny jest problem wynikający z możliwej dużej szerokości prążków i związanej z tym niejednoznacznością określenia jego położenia. Analiza takiego zdjęcia polega na zliczaniu odległości wyrażonej w ilości prążków od punktu o znanej gęstości. Schematycznie tok postępowania ilustruje rysunek 3.28.

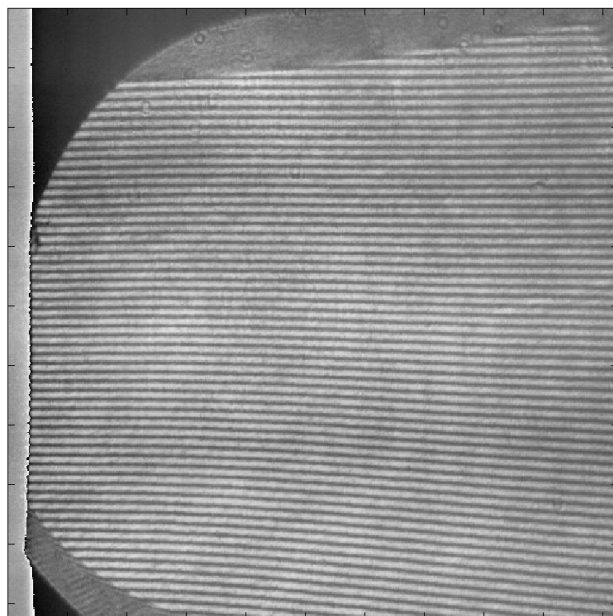


Rys. 3.28. Schemat analizy interferogramu, tryb nieskończonego prążka interferencyjnego

W lewej części zaznaczono kolorem jeden z prążków. Jest to prążek wyznaczający izolinię gęstości referencyjnej. Wybierając do analizy na przykład obszar zaznaczony czerwoną obwódką musimy znaleźć w nim prążek o znanej gęstości, tak jak w środkowej części rysunku 3.28. Dla lepszej czytelności, w tej części pokolorowano wszystkie prążki które będą zliczane. Aby wyznaczyć gęstość w dowolnym punkcie należy określić jego odległość (wyrażoną w pełnych prążkach) do prążka o znanej gęstości i otrzymaną wartość

pomnożyć przez zmianę gęstości odpowiadającą pojedynczemu prążkowi (przy parametrach używanego stanowiska wynosi ona około $\Delta\rho \approx 0.03 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$). Dla przykładowych punktów rozłożonych na odcinku zaznaczonym białą przerywaną linią można w ten sposób uzyskać punkty gęstości zaznaczone kolorem odpowiadającym prążkowi przedstawione w prawej części rysunku (przebieg ciągły gęstości jest interpolowany, nie dysponujemy informacją pomiędzy wyznaczonymi punktami). Tutaj uwagę zwraca kolejny problem, czyli mała rozdzielczość metody (w sensie gęstości), co wynika z trudności wyznaczenia odległości z precyzją lepszą niż połowa okresu. Jak już wskazano, analiza takich obrazów jest bardzo problematyczna w obszarach o niewielkich gradientach parametrów, gdzie prążki są bardzo szerokie. Wyniki uzyskiwane są na podstawie tylko interferogramu z przepływem i nie ma możliwości uwzględnienia niedoskonałości układu widocznych na interferogramie układu o stałej gęstości. Dodatkowo niepewność metody zależy od położenia na obrazie.

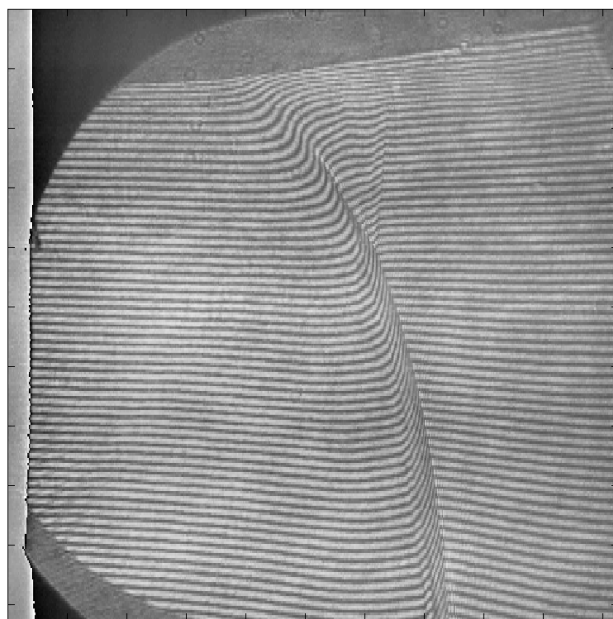
W odróżnieniu od powyższego, do uzyskania trybu skończonego prążka interferencyjnego zwierciadła ustawiamy tak, aby nie były równoległe. Przechylenie jednego z nich względem płaszczyzny drugiego wprowadza geometryczną różnicę dróg optycznych wiązek, która przyrasta liniowo w kierunku normalnym do osi względem której zwierciadło zostało obrócone poza pozycję równoległą. Powoduje to, że na obrazie o stałej gęstości widoczna jest duża ilość prostoliniowych, równoległych prążków, jak na rysunku 3.29.



Rys. 3.29. Zdjęcie bez przepływu

Przy obecności przepływu w komorze badawczej, gradienty gęstości powodują powstanie dodatkowych różnic w drodze optycznej pomiędzy wiązkami i zmianę tego interferogramu.

Interferogram uzyskany dla przepływu z falą uderzeniową przedstawia obraz na rysunku 3.30.



Rys. 3.30. Zdjęcie z przepływem

Oczywiście także tutaj niedoskonałości elementów optyki przekładają się na otrzymywany obraz, jednakże w tym trybie analiza bierze pod uwagę różnicę pomiędzy dwoma obrazami i umożliwia wyeliminowania stałych błędów wynikających z niedoskonałości elementów optycznych. Czas ustawiania przyrządu jest dużo krótszy niż przy trybie nieskończonego prążka interferencyjnego. W klasycznej metodzie analizy wyznaczano punkty przecięcia odpowiednich prążków i korzystając z tego, że są one dużo mniej rozległe niż w trybie nieskończonego prążka interferencyjnego uzyskiwano dużo większą rozdzielczość przestrzenną wyniku. Metoda ta jednak nadal nie mogła dać ciągłej (przestrzennie i w sensie wartości) mapy gęstości.

Opisywana metoda FTFA zachowuje wszystkie zalety trybu skończonego prążka interferencyjnego i jednocześnie dzięki zastosowaniu odpowiedniego podejścia matematycznego pozwala na uzyskanie ciągłego (przestrzennie i w sensie wartości) rozkładu gęstości. Opisywana metoda analizy wykorzystuje zdjęcie bez przepływu i z przepływem, takie jak przedstawiono na rysunku 3.29 i na rysunku 3.30, dzięki temu umożliwia redukcję błędów związanych z niedoskonałościami przyządu i jego ustawienia. W przypadku idealnego przyządu obraz interferencyjny ośrodka bez przepływu (o stałej gęstości) można opisać wzorem:

$$i(\vec{r}) = m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \vec{\nu}_0 \cdot \vec{r}). \quad (24)$$

Amplituda sygnału w każdym punkcie od lokalnej wartości fazy $2 \cdot \pi \cdot \vec{\nu}_0 \cdot \vec{r}$. Wartość nośnej częstotliwości przestrzennej $\vec{\nu}_0$ wynika z przechylenia luster względem siebie przy ustawianiu interferometru. Przechylenie to powoduje przy stałej gęstości czynnika zmianę drogi geometrycznej i optycznej wiązek w funkcji położenia \vec{r} i pojawienie się prążków interferencyjnych. Ich kierunek jest wyznaczony przez kierunek osi obrotu odchylanego zwierciadła. Dla zdjęcia z przepływem czynnika ściśliwego pojawia się dodatkowy człon wpływający na układ prążków interferencyjnych. Jest on generowany przez różnicę dróg optycznych wynikającą ze zmian współczynnika załamania światła. Zmiany te spowodowane są niejednorodnością gęstości przepływającego powietrza. Na rzeczywistych zdjęciach amplituda jest dodatkowo modulowana przez niejednorodność źródła światła, nieliniowość, światło przenikające z otoczenia oraz szumy. Na fazę sygnału wpływa nie tylko przepływ (co jest korzystne, ponieważ niesie ze sobą użyteczną informację), ale także niedoskonałości elementów układu optycznego. Biorąc to pod uwagę

sygnał można zapisać jako:

$$\begin{aligned}
 i(\vec{r}) = & m(\vec{r}) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \vec{\nu}_0 \cdot \vec{r} + \phi(\vec{r})) + \\
 & + h(\vec{r}) \cdot \cos(2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \vec{\nu}_0 \cdot \vec{r} + \phi(\vec{r})) + \\
 & + b(\vec{r}) + n(\vec{r}).
 \end{aligned} \tag{25}$$

Występującą w równaniu (25) fazę można przedstawić jako sumę wkładu pochodzącego od przepływu oraz niedoskonałości całego układu:

$$\phi(\vec{r}) = \phi_0(\vec{r}) + \phi_1(\vec{r}). \tag{26}$$

W tym miejscu należy zauważyć, że o ile pomiędzy zdjęciami nie zostały zmienione właściwości przyrządów, to człon $\phi_1(\vec{r})$ pochodzący od niedoskonałości elementów optycznych ma stałą wartość tak dla zdjęcia odniesienia bez przepływu, jak i dla zdjęcia z przepływem. Aby obliczyć fazę sygnału wykonywana jest transformacja Fouriera sygnału (25) dająca transformatę postaci:

$$\begin{aligned}
 I(\vec{\nu}) = & \frac{1}{2} M \otimes Q(\vec{\nu} - \vec{\nu}_0) + \frac{1}{2} M \otimes Q^*(-\vec{\nu} - \vec{\nu}_0) + \\
 & + \frac{1}{2} H \otimes Q(\vec{\nu} - 2 \cdot \vec{\nu}_0) + \frac{1}{2} H \otimes Q^*(-\vec{\nu} - 2 \cdot \vec{\nu}_0) + \\
 & + B(\vec{\nu}) + N(\vec{\nu}).
 \end{aligned} \tag{27}$$

Z argumentów funkcji występujących po prawej stronie równania (27) wynika, że różne składowe sygnału są rozdzielone na płaszczyźnie częstotliwości przestrzennej. To rozseparowanie poszczególnych składowych dających wkład do sygnału jest głównym powodem przeprowadzania transformacji Fouriera. Na tym etapie widoczne jest także znaczenie ustawienia możliwie wysokiej częstotliwości przestrzennej nośnej $\vec{\nu}_0$. Uzyskuje się to przez ustawienie zwierciadeł interferometru tak, aby bez przepływu widoczne było możliwie dużo wąskich prążków. Odpowiednio wysoka wartość tej częstotliwości przestrzennej powoduje, że regiony (człony prawej strony równania

(27)) nie nakładają się na siebie i można je rozdzielić aby odzyskać z nich informacje o przesunięciu fazowym. Po wybraniu jednego z członów (obszarów) prawej strony równania (27), na przykład członu

$$G(\vec{\nu}) = \frac{1}{2} M \otimes Q(\vec{\nu} - \vec{\nu}_0) \quad (28)$$

należy wykonać zamianę zmiennych z $\vec{\nu}$ na $\vec{\nu} - \vec{\nu}_0$ i wyznaczyć transformatę odwrotną, otrzymując:

$$g(\vec{r}) = \frac{1}{2} \cdot m(\vec{r}) \cdot \exp(j \cdot \phi(\vec{r})). \quad (29)$$

Po wyznaczeniu funkcji $g(\vec{r})$ należy wyznaczyć jej fazę korzystając z zależności:

$$\phi(\vec{r}) = \arctan\left(\frac{\text{Im}[g(\vec{r})]}{\text{Re}[g(\vec{r})]}\right). \quad (30)$$

Po wyznaczeniu fazy dla zdjęć z przepływem i bez przepływu można wyznaczyć przesunięcie fazowe $\Delta\phi$ pomiędzy tymi przypadkami, które jednocześnie może być wyrażone jako:

$$\Delta\phi(\vec{r}) = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (n_{ref}(\vec{r}) - n_{przep}(\vec{r})) \cdot d. \quad (31)$$

Biorąc pod uwagę prawo Gladstone'a-Dale'a :

$$n = 1 + K \cdot \rho,$$

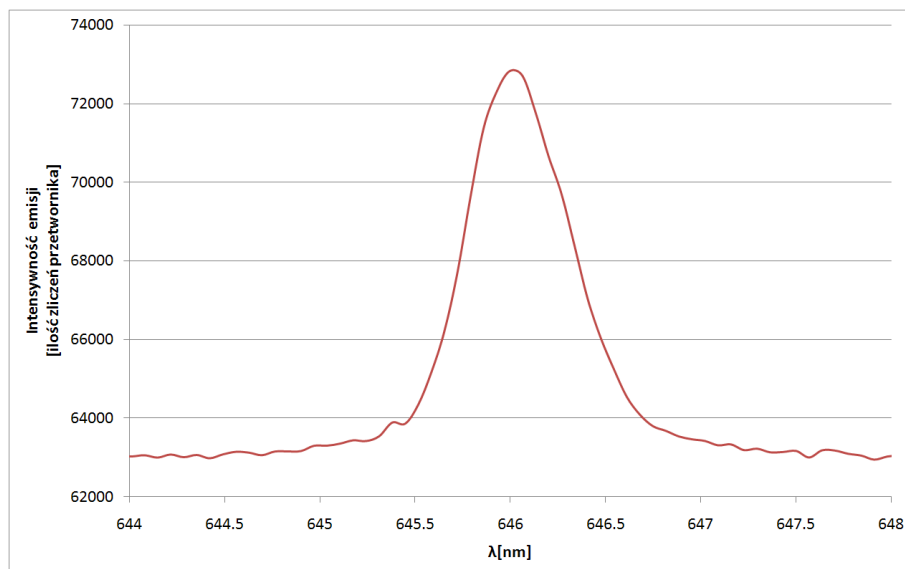
można stwierdzić, że gęstość jest liniową funkcją przesunięcia fazowego. Znając mapę przesunięcia fazowego, oraz wartość gęstości w dowolnym punkcie obejmowanego nią obrazu możemy obliczyć mapę gęstości dla przepływu. W przypadku badań dotyczących na przykład kształtu fali uderzeniowej lub innych struktur wystarczający materiał stanowią zdjęcia interferometryczne, bez znajomości wartości parametrów. Dodatkowo, metoda ta usuwa błędy wynikające z niedoskonałości elementów optycznych, gdyż wpływ członu ϕ_1 zostaje wyzerowany przy obliczaniu różnicy faz $\Delta\phi$.

3.9.2 Niepewność metody

Analizę niepewności metody dogodnie jest przeprowadzić na podstawie równania 31 przekształconego w [26] do postaci:

$$\rho_{flow} - \rho_{ref} = \frac{\rho_s}{2 \cdot \pi \cdot d \cdot \beta} \cdot \lambda \cdot (\phi_{ref} - \phi_{flow}), \quad (32)$$

Korzystając z niego można stwierdzić, że błędy metody wynikają z niepewności wyznaczenia fazy i niepewności wartości długości światła laserowego użytego w przyrządzie. Aby oszacować błąd wprowadzany przez źródło światła laserowego (laser klasy IIIA, Transverse Industries Co., Ltd) przeprowadzono, przy użyciu monochromatora SR-303i oraz kamery spektroskopowej iSTAR DH740, pomiary rozkładu widmowego mocy emitowanej. Rozkład intensywności emisji w interesującym obszarze widma przedstawia wykres na rysunku 3.31.



Rys. 3.31. Rozkład widmowy mocy emitowanej źródła laserowego

Dla jasności rozważań równanie 32 można przedstawić w postaci wyróżniającej parametry stałe:

$$\gamma = A \cdot \phi \cdot \lambda \quad (33)$$

gdzie:

$$\begin{cases} A = \frac{\rho_s}{2 \cdot \pi \cdot d \cdot \beta} \\ \phi = (\phi_{ref} - \phi_{flow}) \\ \gamma = (\rho_{flow} - \rho_{ref}) \cdot \end{cases}$$

Korzystając z równania 33 można wyznaczyć poszukiwaną wielkość z niepewnością wynikającą z niepewności wartości (ϕ, λ) . W celu oszacowania wagi tych dwóch niepewności wyznaczono błąd względny wartości wyznaczonej γ :

$$\frac{\delta\gamma}{\gamma} = \frac{\delta\phi}{\phi} + \frac{\delta\lambda}{\lambda}. \quad (34)$$

Na podstawie [24] i [25] można oszacować błąd wyznaczenia wartości fazy jako:

$$\frac{\delta\phi}{\phi} \approx 0.02. \quad (35)$$

Błąd względny wynikający z rzeczywistych parametrów źródła światła został wyznaczony na podstawie zmierzonego rozkładu, przedstawionego na rysunku 3.31.

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda} \approx 0.0004. \quad (36)$$

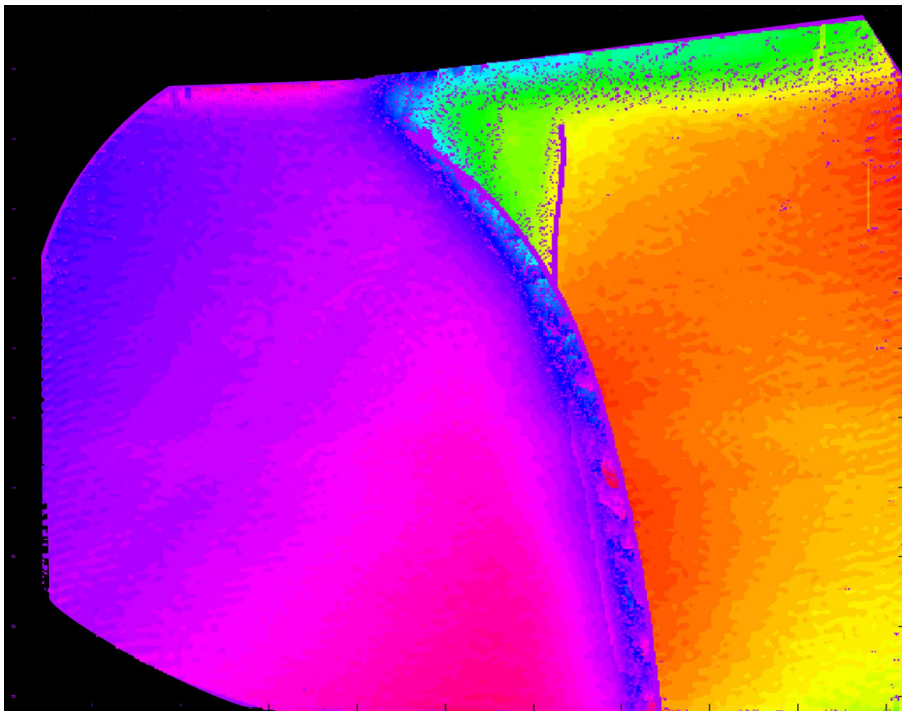
Ze względu na pomijalną wartość błędu wynikającego z niepewności wyznaczenia λ , (jest on o dwa rzędy wielkości mniejszy, niż ten wynikający z błędem wyznaczenia ϕ), w równaniu 33 jako jedyną wielkość zmienną można przyjąć ϕ , i dzięki temu uprościć równanie 34 do postaci:

$$\delta\gamma = A \cdot \lambda \cdot \delta\phi \quad (37)$$

Przy założeniach uzasadnionych powyżej niepewność wyznaczenia znormalizowanej wartości gęstości nie przekracza 0,005[24].

3.9.3 Implementacja numeryczna

Do realizacji metody został napisany program w języku MATLAB. Inaczej niż przy metodzie charakterystyk złożoność metody analitycznej jest dosyć wysoka, realizacja numeryczna bardzo różni się od metody analitycznej oraz pojawiają się pewne kwestie związane tylko z charakterem dyskretnej reprezentacji danych. W związku z wynikającą z powyższych cech wymaganą szczegółowością i objętością opisu zastosowanej implementacji numerycznej opisywanej metody został on przedstawiony w dodatku. Na rysunku 3.32 przedstawiony jest jego działania.



Rys. 3.32. Wynik analizy FTFA

Otrzymany rozkład parametrów w przepływie naddźwiękowym wyraźnie oddaje elementy takie jak falą uderzeniową, punkt potrójny i warstwę przyścienną.

3.10 Pomiar i analiza oscylacji ciśnienia statycznego

Dla wybranej konfiguracji generatorów wirów w przepływie mierzone były przebiegi zmienności w czasie ciśnienia statycznego. Pomiary te prowadzono w czterech punktach umieszczonych w odległości 10 mm od osi płytki w kierunku poprzecznym do kierunku przepływu, o położeniach:

- **czujnik A: X=212,5 mm**, czyli powyżej obszaru fali uderzeniowej,
- **czujnik B: X=237,5 mm**, czyli w obszarze silnej zmiany ciśnienia na fali uderzeniowej,
- **czujnik C: X=262,5 mm**, czyli w obszarze przyłgnięcia,
- **czujnik D: X=289,5 mm**, czyli poniżej obszaru przyłgnięcia,

zaznaczonych na rysunku płytki z generatorami wirów z rysunku 2.6. Pomiary prowadzone były przy użyciu przetworników ciśnienia typu KULITE, XCS-190 umożliwiających pomiar z częstotliwością do 20 kHz. Dodatkowe zalety związane z ich topologią pełnego mostka Wheatstone-a to duża czułość i możliwość zastosowania korzystnego pomiaru różnicowego o wysokim stopniu odporności na zakłócenia [23]. Sygnał z przetwornika kierowany był do wzmacniaczy pomiarowych, a następnie do karty pomiarowej.

Do analizy danych pomiarowych przygotowano autorskie programy w języku MATLAB. Aplikacja prowadzi analizę częstotliwościową sygnału i wyznacza jego widmo mocy. Wyznaczane są także wielkości statystyczne opisujące przebieg ciśnienia takie jak:

- wartość średnia ciśnienia: $\langle p \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N p_i}{N}$,
- wartość minimalna ciśnienia: p_{min} ,

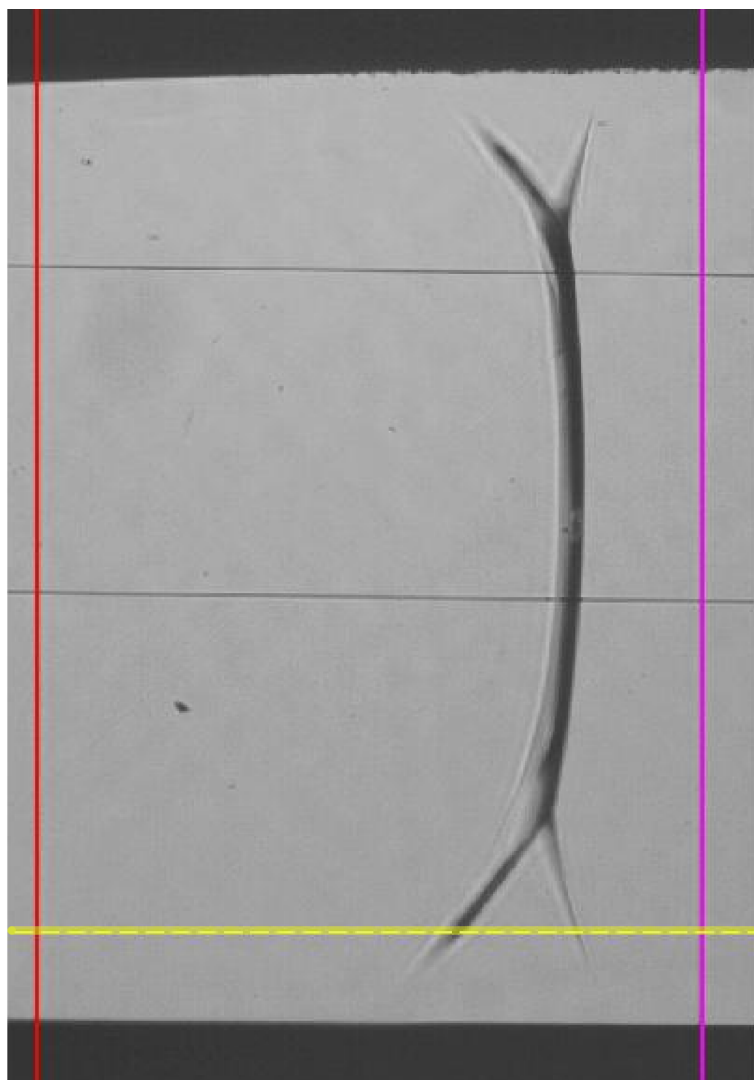
- wartość maksymalna ciśnienia: p_{maks} ,
- średnia oscylacja ciśnienia: $\langle p_{osc} \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N |\langle p \rangle - p_i|}{N}$,
- średnia RMS ciśnienia: $\langle p_{RMS} \rangle = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\langle p \rangle - p_i)^2}{N}}$.

3.11 Pomiar i analiza oscylacji fali uderzeniowej

Jedną z mierzonych cech przepływu była niestacjonarność fali uderzeniowej w dyszy. Przedmiotem pomiaru była ta właśnie oscylacja określana przez amplitudę oraz widmo mocy drgań. Materiału do analizy dostarcza wizualizacja przepływu typu "Schlieren", jak na rysunku 3.8, filmowana przy użyciu szybkiej kamery CCD "FASTEC". Pozwala ona zapisać pełen obraz o rozdzielczości 1280×1024 jak na rysunku 3.8, lub wybrany jego obszar. Przy zapisie pełnej klatki zapis jest możliwy z częstotliwością 506 Hz, przy redukcji obszaru do 1280×512 częstotliwość zapisu wzrasta do 1 kHz. Kolejne redukcje obszaru zapisywanego pozwalają na zapis z częstotliwością 112 kHz obszaru o rozmiarze 128×2 , jednak ze względu na moc zastosowanej lampy zdecydowano się na maksymalną częstotliwość zapisu wynoszącą 10 kHz (przy takich parametrach kontrast pozwala na jednoznaczne określenie położenia fali uderzeniowej).

Wyznaczanie pozycji fali uderzeniowej Do wyznaczania pozycji fali na podstawie zdjęć liniowych została napisana aplikacja w języku MATLAB, która generuje pliki tekstowe oraz graficzne, zawierające położenia fali w kolejnych chwilach czasu. Przed rozpoczęciem analizy należy wpisać do pliku wartość (w milimetrach) odległości pomiędzy liniami siatki w danym eksperymencie (pozwala ona na ustalenie rzeczywistych położenia fali i wynikających z nich wielkości opisujących niestacjonarność). Aby umożliwić analizę wzajemnych ruchów fal, wybierana jest linia pozioma, dla której będzie prowadzona analiza kolejnych zdjęć. Umożliwia to wielokrotną analizę jednej sekwencji zdjęć (przy różnych wysokościach analizowanej linii). Porównując takie rozkłady można wyznaczyć ewolucję kształtu fali w czasie przepływu. Zdjęcie z zaznaczonymi położeniami wybranych linii siatki, oraz położeniem przekroju jest zapisywane jako jeden z plików wyjściowych.

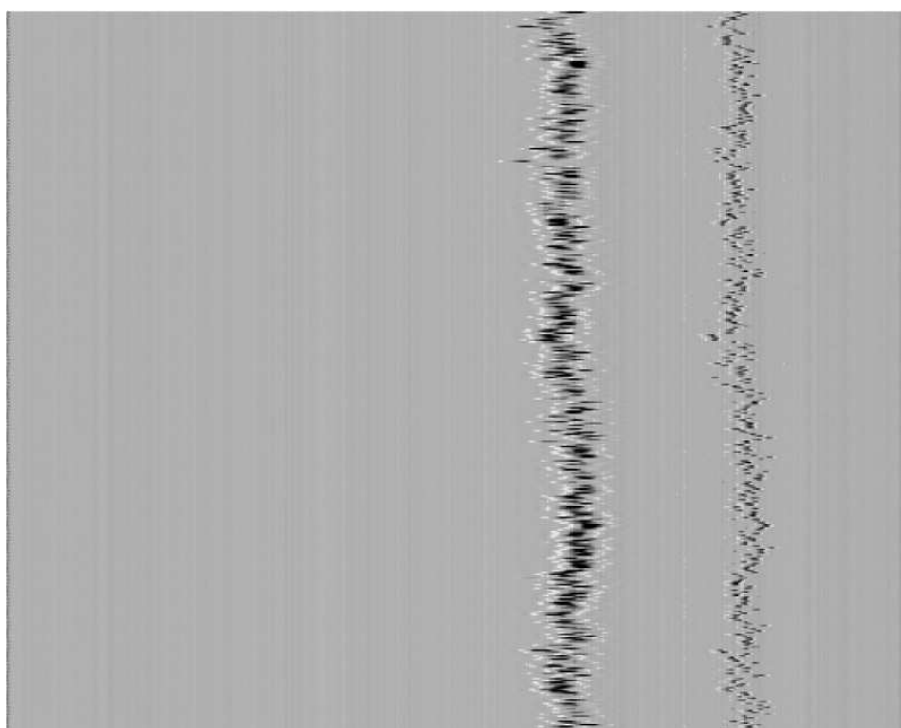
Przykład przedstawia rysunek 3.33, gdzie linia czerwona, purpurowa i żółta to odpowiednio lewa linia siatki, prawa linia siatki i położenie analizowanego fragmentu fali uderzeniowej.



Rys. 3.33. Położenia elementów analizowanych w przepływie

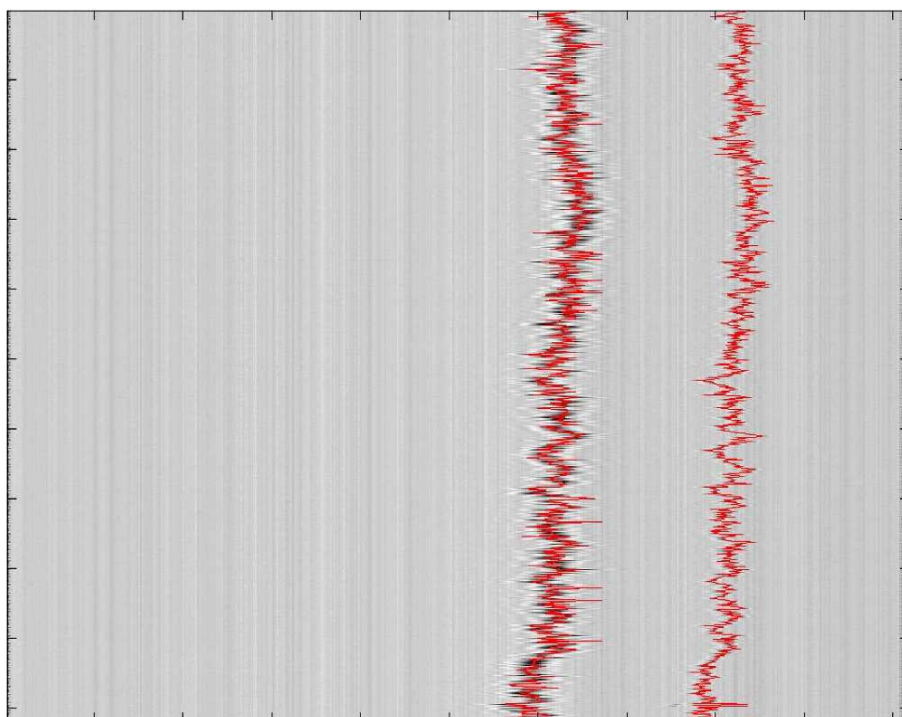
Dodatkowo, aby umożliwić kontrolę prawidłowości działania aplikacji, generowane są dodatkowe dwa pliki graficzne. Pierwszy z nich, przedsta-

wiony na rysunku 3.34, zawiera "zdjęcie liniowe", którego kolejne linie to wybrana linia przekroju kolejnych zdjęć z sekwencji. Widoczne na nim dwa oscylujące ślady (lewy wyraźniejszy od delikatniej zaznaczonego prawego) odpowiadają ruchowi dwóch fal na wysokości nad ścianką dyszy zaznaczoną na rysunku 3.33 żółtą linią.



Rys. 3.34. Zdjęcie liniowe

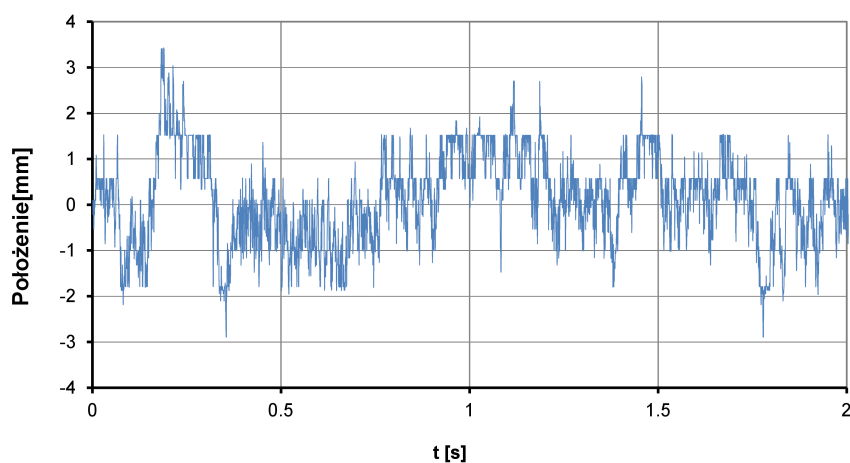
Drugi z generowanych plików pomocniczych zawiera nałożone na zdjęcie z rysunku 3.34 wyznaczone przez program położenia fali które są wykorzystywane przy dalszej analizie; jego zawartość prezentuje rysunek 3.35.



Rys. 3.35. Zdjęcie liniowe z wyznaczonymi położeniami fal

Pliki te pozwalają na bardzo szybką ocenę prawidłowości działania programu są przydatne gdy kontrast danych pomiarowych nie jest optymalny.

Analiza niestacjonarności fali uderzeniowej Dysponując plikami tekstowymi zawierającymi pozycje fal uderzeniowych w czasie dmuchu można prowadzić analizę oscylacji fal uderzeniowych. Wielkości poszukiwane to amplituda oraz widmo mocy drgań; do ich wyznaczenia został napisany program w języku MATLAB. Prowadzi on analizę Fouriera pozycji fali wyznaczonej ze zdjęć liniowych. Raport wyjściowy, zapisywany w sformatowanym pliku "xls" zgodnym z formatem Microsoft Excel, zawiera położenia fal, amplitudy oscylacji, widma mocy oraz wartości średnie. Przykład tak otrzymanego przebiegu ruchu fali uderzeniowej przedstawia wykres na rysunku 3.36.



Rys. 3.36. Położenie fali uderzeniowej względem położenia średniego

Rozdział 4

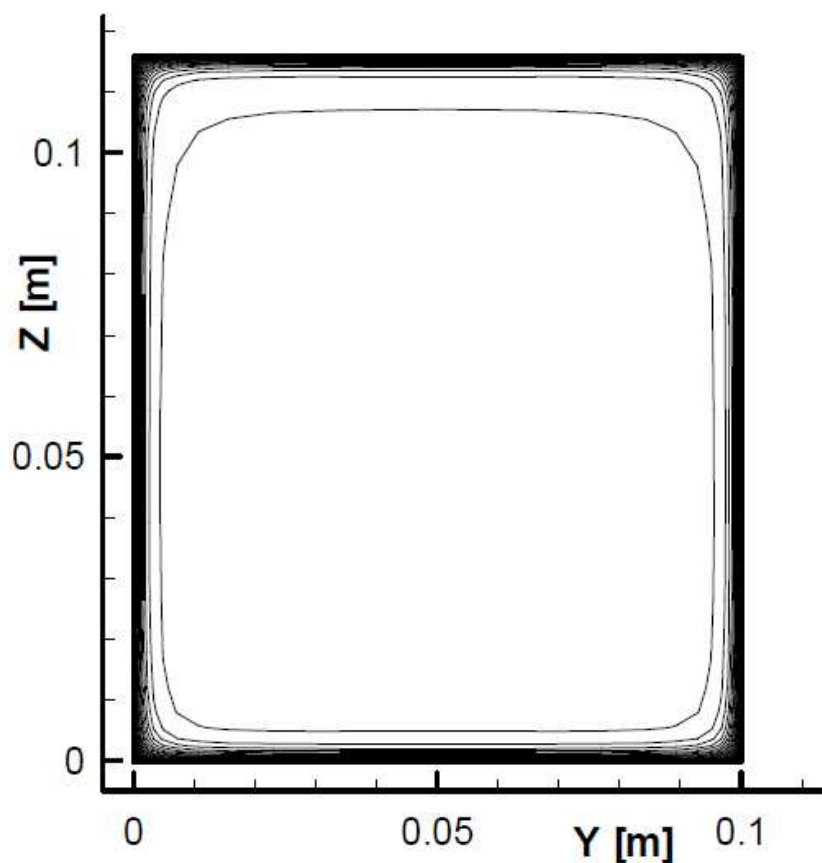
Wyniki badań stacjonarnej struktury przepływu

4.1 Synteza kształtu dyszy

Badanie wykorzystania metod sterowania przepływem na oderwanie wywołane falą uderzeniową nie jest zadaniem prostym. Fala uderzeniowa zazwyczaj powstaje w obszarze rosnącej liczby Macha. Powoduje to, że generatory wirów działają w obszarze innej (niższej) liczby Macha niż fala uderzeniowa. Z tego powodu nigdy nie podaje się informacji o warunkach pracy generatorów wirów. Aby uniknąć tego problemu zdecydowano się na zastosowanie dyszy de Laval'a z dużym obszarem stałej liczby Macha przed falą uderzeniową. Dodatkowo w obszarze stałej liczby Macha w dyszy zwiększa się amplituda naturalnych oscylacji fali uderzeniowej. W odróżnieniu od przypadku fali uderzeniowej w obszarze gradientu liczby Macha, gdzie jej pozycja jest dobrze określona, w obszarze o stałej liczbie Macha pozycja fali uderzeniowej nie jest dobrze określona; nie ma jednego uprzywilejowanego położenia. Oznacza to, że pozycja fali uderzeniowej jest bardziej "chwijna" i wrażliwa na wszelkie wzbudzenia. Dzięki temu wpływ generatorów na niestacjonarność fali uderzeniowej jest wyraźniejszy i łatwiejszy do pomiaru.

Zgodnie z opisem z podrozdziału 3.2 obliczono kształt dyszy dla liczby

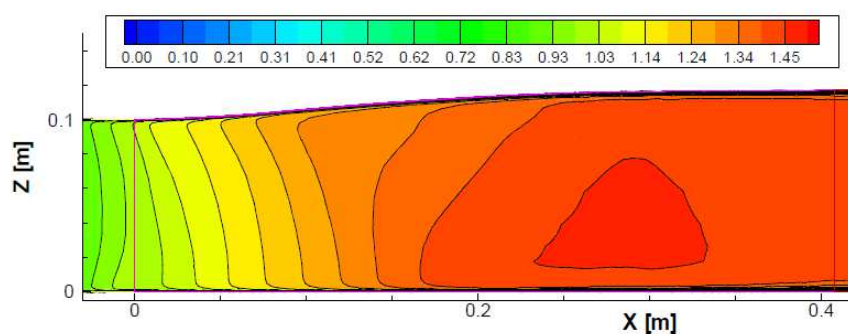
Macha $M = 1,45$. Został on wyznaczony w ramach modelu płynu nielepkiego, zgodnie z wyjściowym układem równań (2). W celu wyznaczenia parametrów przy przepływie gazu rzeczywistego (w ramach projektu badawczego **UFAST** [27]) wykonano pełną trójwymiarową symulację¹ przepływu powietrza przez dyszę otrzymaną metodą charakterystyk. Uzyskane w tych obliczeniach kontury modułu prędkości w przekroju poprzecznym dyszy przedstawia rysunek 4.1.



Rys. 4.1. Kontury modułu prędkości

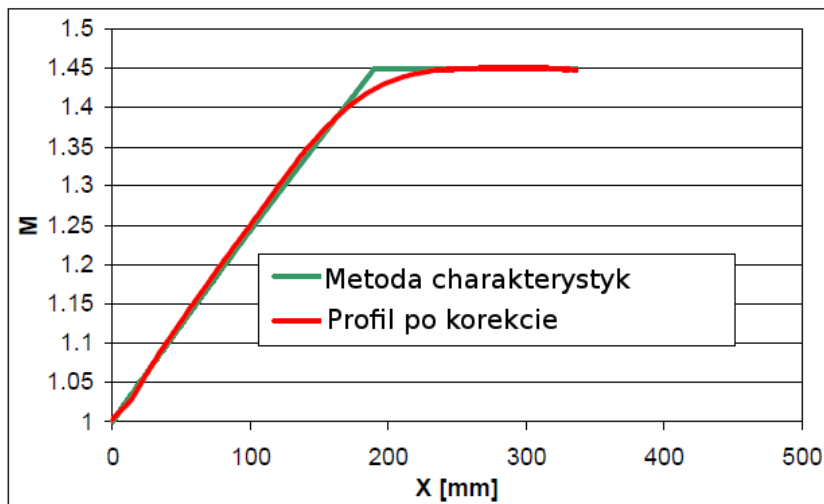
¹Zastosowano kod **SPARC** do rozwiązania przybliżonych równań RANS dla przepływu ściśliwego.

W przedstawionych konturach widoczne jest zmniejszanie się efektywnego przekroju w dół przepływu. Jest to wynik oddziaływania ścianek z rzeczywistym, lepkiem czynnikiem, które powoduje narastanie warstw przyściennych. Aby skompensować wynikające z tego zmniejszenie przekroju wyznaczono grubość straty przekroju na ściankach oraz w narożach, a następnie dokonano korekty kształtu o odpowiednie wielkości. Zdecydowano się na korektę polegającą na modyfikacji tylko górnej ścianki profilu. Dolna, prostoliniowa ścianka nie była modyfikowana. Tak zmodyfikowaną geometrię zweryfikowano numerycznie. Na wykresie 4.2 przedstawione są kontury liczby Macha w płaszczyźnie symetrii tej dyszy, potwierdzające prawidłowość uzyskanego kształtu ścianek.



Rys. 4.2. Rozkład prędkości na płaszczyźnie środkowej dyszy

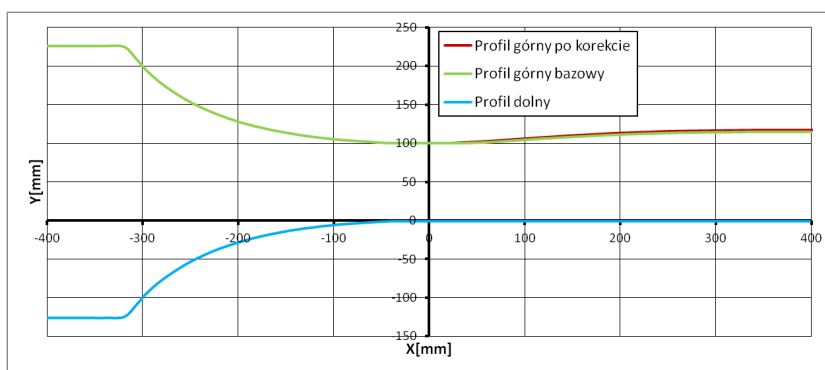
Na wykresie 4.3 przedstawiony jest rozkład liczby Macha na linii przecięcia płaszczyzny symetrii i dolnej, płaskiej ścianki dyszy.



Rys. 4.3. Rozkład liczby Macha w osi dolnej ścianki dyszy

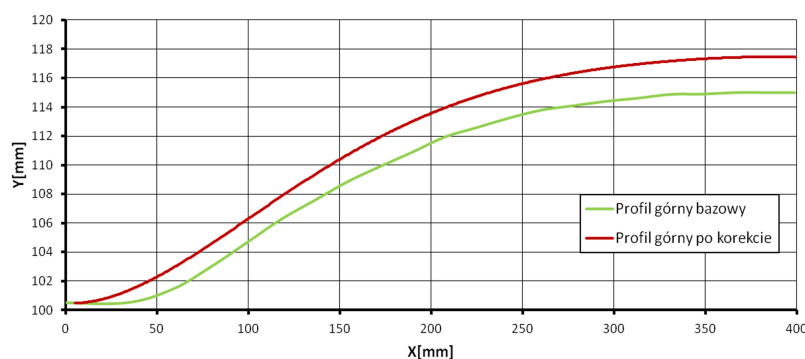
Dla istotnej w prezentowanych tu badaniach części dyszy (położenia pomiędzy 200 mm a 300 mm), w której odbywa się oddziaływanie wirów z falą uderzeniową, uzyskuje się założoną liczbę Macha $M=1.45$.

Na wykresie 4.4 przedstawione jest porównanie kształtu dyszy wyznaczonego na podstawie metody charakterystyk oraz po uwzględnieniu wyników symulacji przepływu gazu lepkiego.



Rys. 4.4. Porównanie kształtu dyszy dla płynu nielepkiego i lepkiego

Ponieważ w stosunku do rozmiarów całej dyszy korekty są niewielkie, to na wykresie 4.5 przedstawiono wybrany obszar, pozwalający ocenić wielkość wpływu lepkości na kształt dyszy.

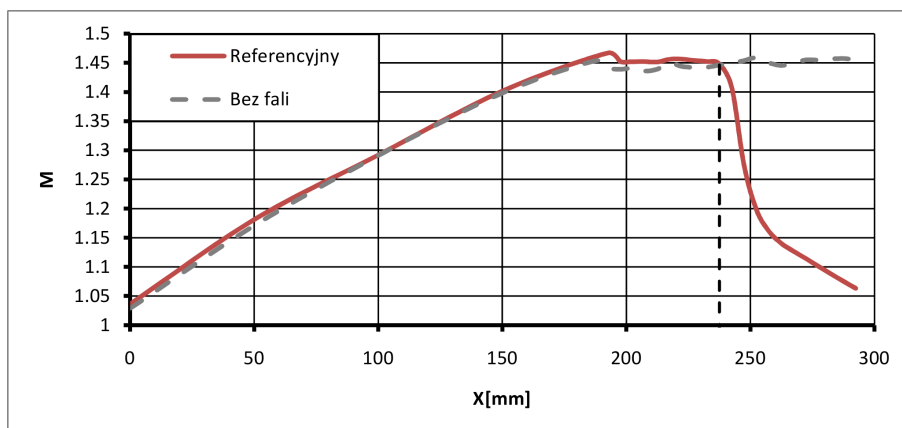


Rys. 4.5. Porównanie kształtu dyszy dla płynu nielepkiego i lepkiego

Dysza dla przepływu rzeczywistego ma większą wysokość niż dysza wyznaczona dla gazu nielepkiego. Różnica ta rośnie w kierunku wylotu dyszy i jest rzędu 2 mm, co stanowi 1,7% wysokości dyszy.

4.2 Rozkład liczby Macha wzdłuż osi dyszy

Dla weryfikacji prawidłowości montażu oraz geometrii dyszy zainstalowanej w komorze pomiarowej pierwsze pomiary, przed rozpoczęciem eksperymentów dotyczących przepływów z generatorami wirów, zostały przeprowadzone w przepływie naddźwiękowym bez fali uderzeniowej. Poprzez otworzenie drugiego gardła dyszy regulacyjnej, znajdującej się w przepływie poniżej komory pomiarowej, ciśnienie na wylocie z dyszy pomiarowej zostało zmniejszone w takim stopniu, że fala uderzeniowa formowała się na jej wylocie. Po stwierdzeniu prawidłowych parametrów w takim przepływie wykonano pomiary dla przypadku referencyjnego przy ustawieniu fali uderzeniowej w pozycji $x = 237,5$ mm, nadal przy wyłączonych generatorach wirów. Zestawienie rozkładów liczby Macha dla tych dwóch przypadków przedstawia wykres na rysunku 4.6².



Rys. 4.6. Liczba Macha, przypadki bez generatorów wirów

Widoczne jest, że uzyskano założony przy projektowaniu obszar stałej liczby Macha o wartości dokładnie 1,45 na wylocie z dyszy. W obszarze od wlotu do dyszy do fali uderzeniowej obydwa przebiegi są bardzo podobne.

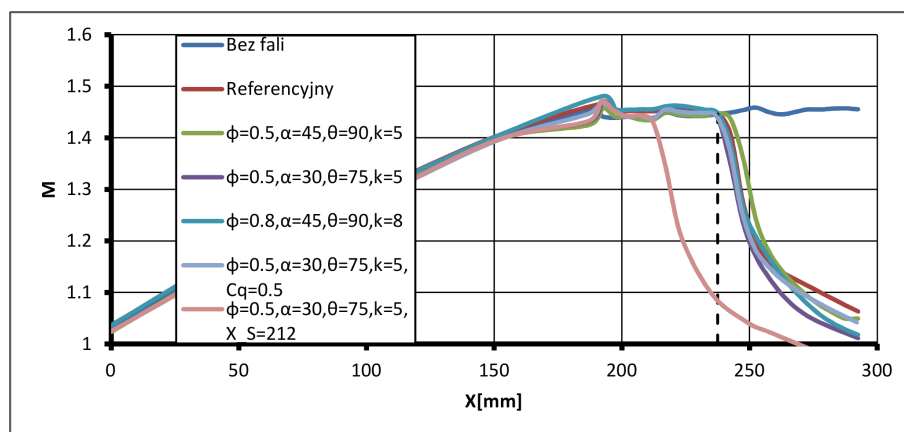
²Na wykresach w tym rozdziale zaznaczona jest także pozycja fali uderzeniowej (pionową, przerywaną linią) w położeniu $X_{Shock} = 237,5$ mm albo $X_{Shock} = 212,5$ mm.

Widoczna jest różnica pomiędzy nimi w punkcie $X = 190$ mm w postaci "uskoku" na krzywej opisującej przepływ z falą uderzeniową. Jest to zaburzenie generowane przez wyłączone generatory wirów. Dla przepływu bez fali uderzeniowej nie były one obecne w dyszy, nie zmieniały geometrii dyszy i nie wprowadzały zaburzenia przepływu. Dla przypadku z falą uderzeniową generatory wirów nie były aktywne (nie doprowadzały masy do przepływu), ale były obecne w dyszy. Był to rząd otworów w dolnej ścianie dyszy, które niestety wprowadzały pewne zaburzenie do przepływu.

Zgodnie z przedstawionym w rozdziale 1.2 zakresem, badane przypadki to:

- **A)**Przypadek referencyjny, bez generatorów wirów.
- **B)**Standardowe generatory wirów:
 $\phi=0,5$ mm, $\alpha = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $C_q = 1,0$, $X_{Shock} = 237,5$ mm, $k=5$ mm.
- **C)**Optymalne generatory wirów:
 $\phi=0,5$ mm, $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 75^\circ$, $C_q = 1,0$, $X_{Shock} = 237,5$ mm, $k=5$ mm.
- **D)**Standardowe generatory wirów o powiększonej średnicy:
z $\phi=0,8$ mm, $\alpha = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $C_q = 1,0$, $X_{Shock} = 237,5$ mm, $k=8$ mm.
- **E)**Optymalne generatory wirów ze zmniejszonym o połowę wydatkiem:
 $\phi=0,5$ mm, $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 75^\circ$, $C_q = 0,5$, $X_{Shock} = 237,5$ mm, $k=5$ mm.
- **F)**Optymalne generatory wirów ze zmniejszoną odległością od fali uderzeniowej:
 $\phi=0,5$ mm, $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 75^\circ$, $C_q = 1,0$, $X_{Shock} = 212,5$ mm, $k=5$ mm.

Zestawienie rozkładów liczby Macha dla wszystkich przypadków pomiarowych przedstawione jest na wykresie na rysunku 4.7.

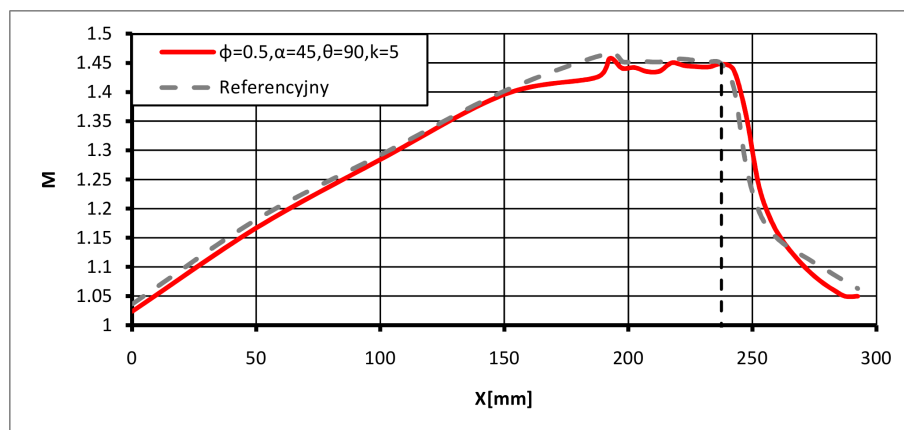


Rys. 4.7. Wykres zbiorczy rozkładów liczby Macha

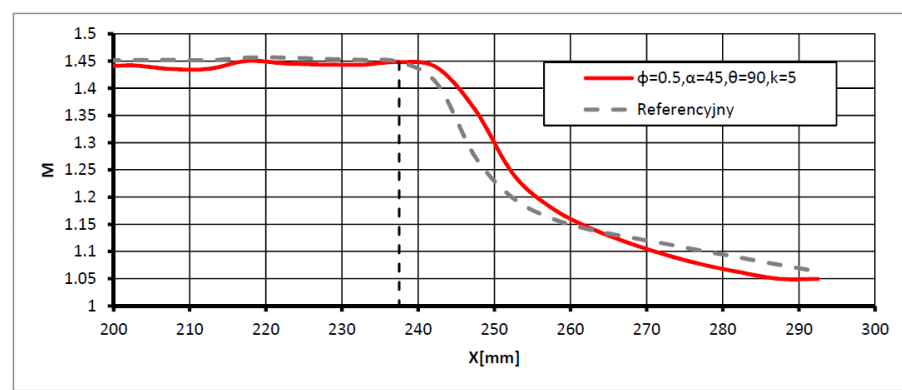
Widoczne jest przyspieszanie przepływu od $X=0$ mm do około $X=190$ mm, następnie występuje obszar przepływu o stałej liczbie Macha od $X=190$ mm do położenia fali uderzeniowej, czyli $X=237,5$ mm albo $X=212,5$ mm dla przypadku z przesuniętą falą. Dalej w dół przepływu od $X=237$ mm do około $X=250$ mm ma miejsce bardzo gwałtowny spadek liczby Macha związany z falą uderzeniową, a za nim następuje łagodniejsze już zmniejszanie prędkości związane ze wzrostem przekroju aż do wylotu z dyszy.

Ze względu na dużą ilość krzywych w dużym stopniu nakładających się na siebie, poniżej zamieszczone są wykresy (od Rys. 4.8 do Rys. 4.17) zestawiające rozkłady liczby Macha dla przypadku referencyjnego i kolejnych przypadków aktywnej kontroli przepływu. Dla każdego przypadku przygotowane są dwa wykresy. Jeden ilustruje cały mierzony rozkład, a drugi najbardziej interesujący z punktu widzenia opisywanych badań zakres od $X = 200\text{mm}$ do $X = 300\text{mm}$.

- Podstawowa konfiguracja generatorów wirów jest przedstawiona na rysunkach Rys.4.8 i Rys.4.9.

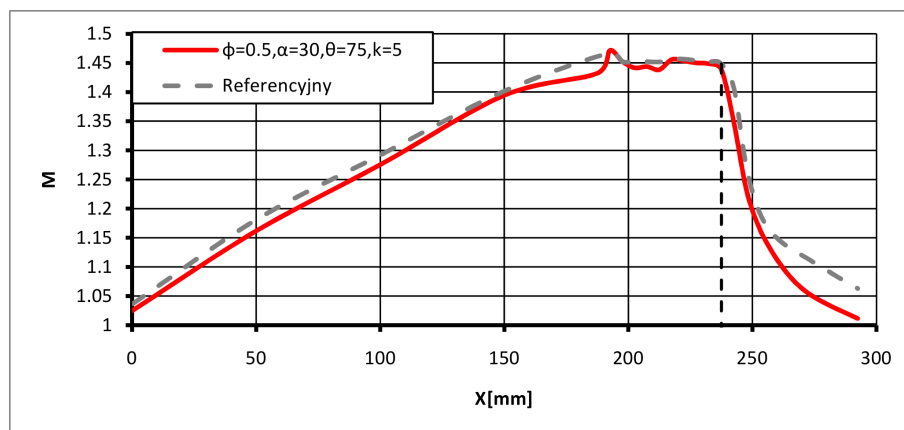


Rys. 4.8. Liczba Macha, przypadek **B** $\{\phi = 0.5\text{mm}, \alpha = 45, \theta = 90, k = 5\}$

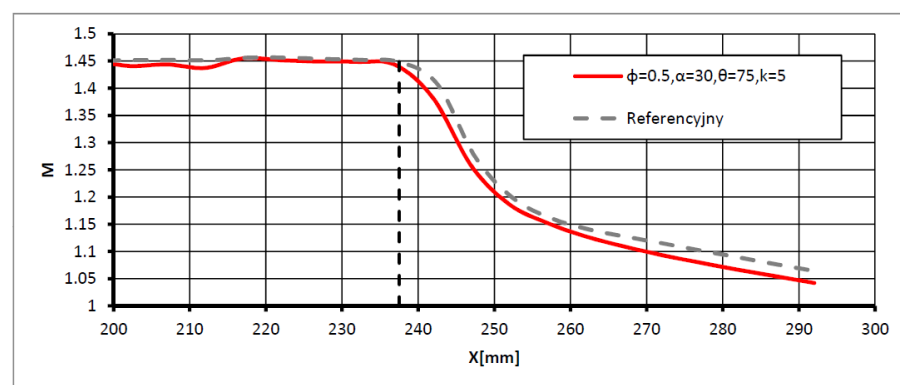


Rys. 4.9. Liczba Macha, przypadek **B** $\{\phi = 0.5\text{mm}, \alpha = 45, \theta = 90, k = 5\}$, zmniejszony zakres położeń

- Optymalna konfiguracja generatorów wirów jest zilustrowana na rysunkach Rys.4.10 i Rys.4.11.

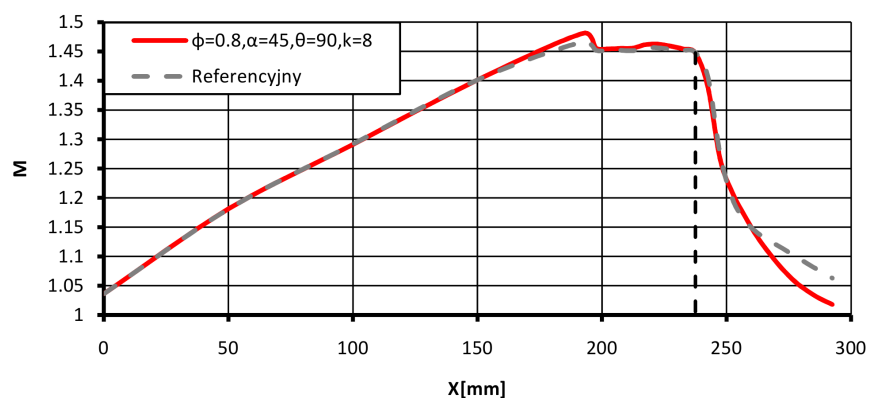


Rys. 4.10. Liczba Macha, przypadek **C** $\{\phi = 0.5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5\}$

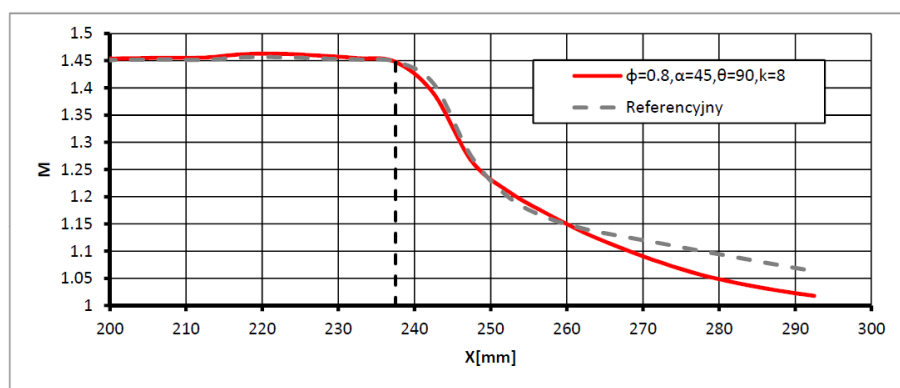


Rys. 4.11. Liczba Macha, przypadek **C** $\{\phi = 0.5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5\}$

- Podstawowa konfiguracja generatorów wirów z powiększoną średnicą daje przebieg jak na rysunkach Rys.4.12 i Rys.4.13.

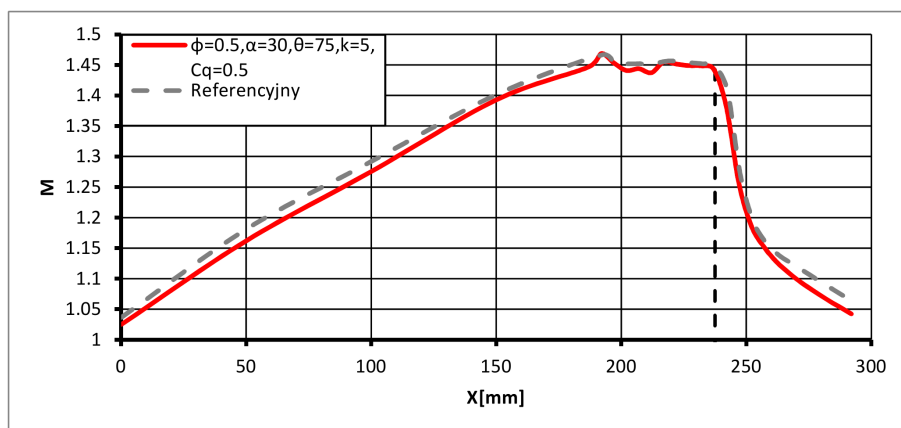


Rys. 4.12. Liczba Macha, przypadek **D** $\{\phi = 0.8mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 8\}$

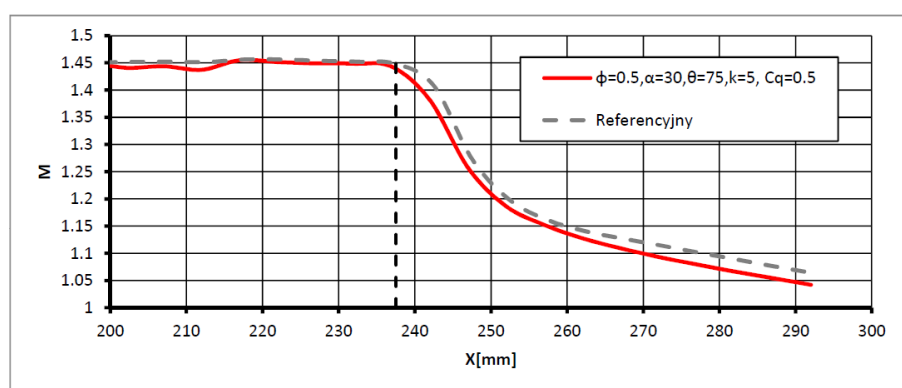


Rys. 4.13. Liczba Macha, przypadek **D** $\{\phi = 0.8mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 8\}$, zmniejszony zakres osi X

- Optymalna konfiguracja generatorów wirów, zmniejszony o połowę wydatek masowy jest przedstawiona na rysunkach Rys.4.14 i Rys.4.15.

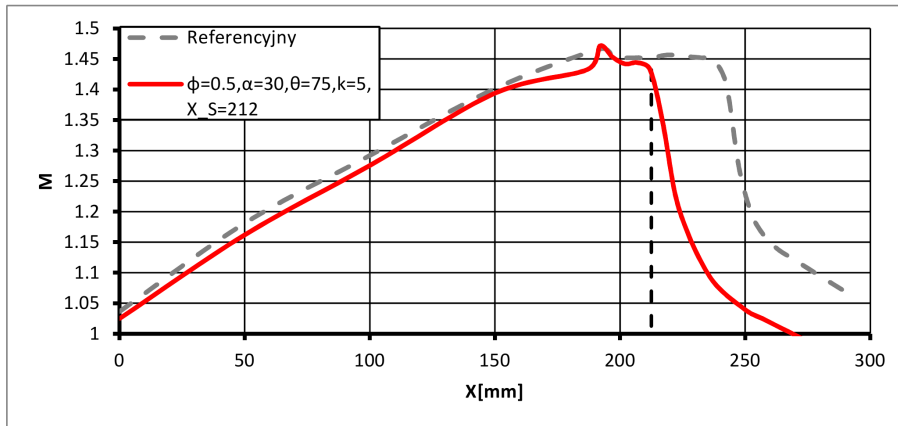


Rys. 4.14. Liczba Macha, przypadek **E** $\{\phi = 0.5\text{mm}, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 0.5\}$

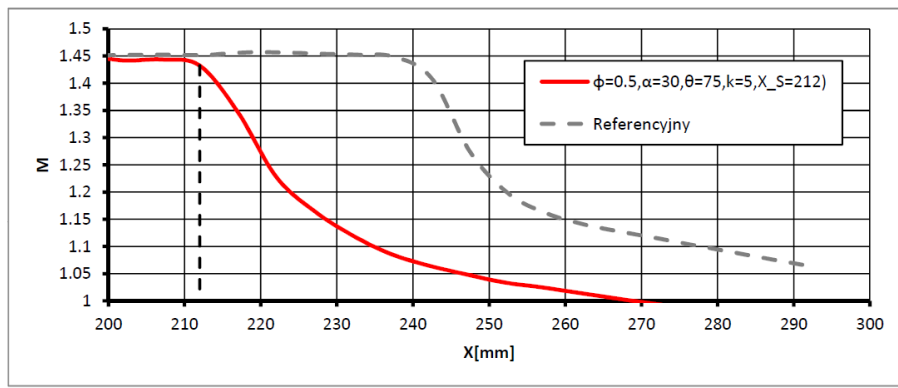


Rys. 4.15. Liczba Macha, przypadek **E** $\{\phi = 0.5\text{mm}, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 0.5\}$, zmniejszony zakres osi X

- Optymalna konfiguracja generatorów wirów, pełen wydatek masowy, fala uderzeniowa przysunięta o 25 mm do generatorów skutkuje rozkładem z rysunków Rys. 4.16 i Rys. 4.17.



Rys. 4.16. Liczba Macha, przypadek **F** $\{\phi = 0.5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, X_{Shock} = 212.5mm\}$



Rys. 4.17. Liczba Macha, przypadek **F** $\{\phi = 0.5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, X_{Shock} = 212.5mm\}$, zmniejszony zakres osi X

Widoczna na wykresie różnica pomiędzy krzywymi jest pozorna i związana z óżnym położeniem fali uderzeniowej. Jest to zilustrowane na wykresie na rysunku 4.19 i 4.20, gdzie te przebiegi, przy uzgodnieniu pozycji

fali uderzeniowej, są bardzo zbliżone. Zgodnie z oczekiwaniami, w obszarze pomiędzy gardłem dyszy i falą uderzeniową kształt wszystkich rozkładów jest bardzo podobny. Potwierdza to stałą liczbę Macha w obszarze oddziaływania wirów z przepływem rozciągającym się od położenia generatorów wirów do fali uderzeniowej. Szczególnie wyraźnie jest to widoczne na wykresie z rysunku 4.16, gdzie aż do położenia fali uderzeniowej w obydwóch przypadkach przebiegi są praktycznie identyczne.

Na podstawie zbiorczego wykresu z rysunku 4.7 można zauważyć, że we wszystkich przypadkach o wspólnym położeniu fali uderzeniowej liczba Macha w ostatnim punkcie pomiarowym leżącym 55 mm poniżej fali uderzeniowej jest większa niż jeden, ale różni się dla kolejnych przypadków. Wartości te zostały zebrane w tabeli 1.

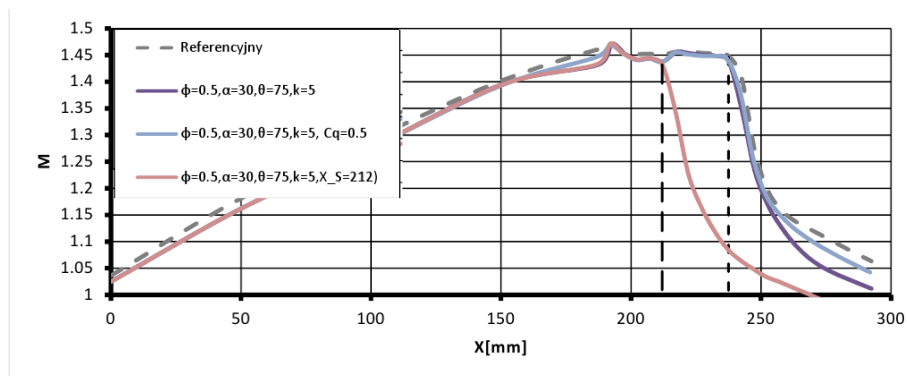
Przypadek	Liczba Macha
{Bez fali}	1.455
A {Referencyjny}	1.063
B $\{\phi = 0.5mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 5\}$	1.049
D $\{\phi = 0.8mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 8\}$	1.017
C $\{\phi = 0.5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5\}$	1.011

Tabela 1. Liczba Macha na końcu płytki pomiarowej

Zmniejszanie się liczby Macha w tym przekroju świadczy o zwiększaniu się efektywnego przekroju dyszy przez obecność wirów w przepływie, co oznacza zmniejszenie oderwania wywołwanego przez falę uderzeniową. Biorąc to pod uwagę można zauważyć, że najefektywniej ze względu na konfigurację geometryczną generatora działają zoptymalizowane generatory wirów ($\phi = 0,5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5$), następnie konfiguracja podstawowa z powiększoną średnicą ($\phi = 0,8mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 8$) i konfiguracja podstawowa ($\phi = 0,5mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 5$).

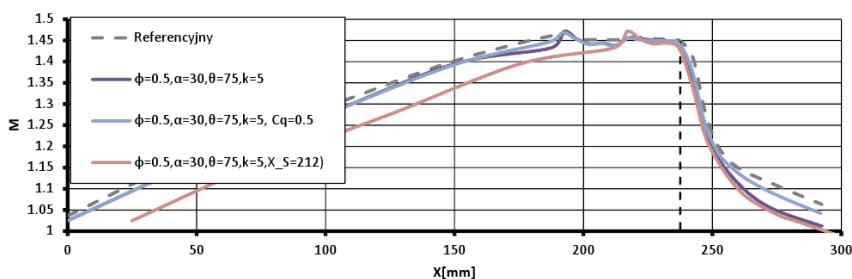
Poza badaniem wpływu geometrii generatorów na ich efektywność, dla konfiguracji optymalnej badano także wpływ ich wydatku masowego i od-

ległości do fali uderzeniowej. Otrzymane wyniki wykres przedstawia wykres na rysunku 4.18.



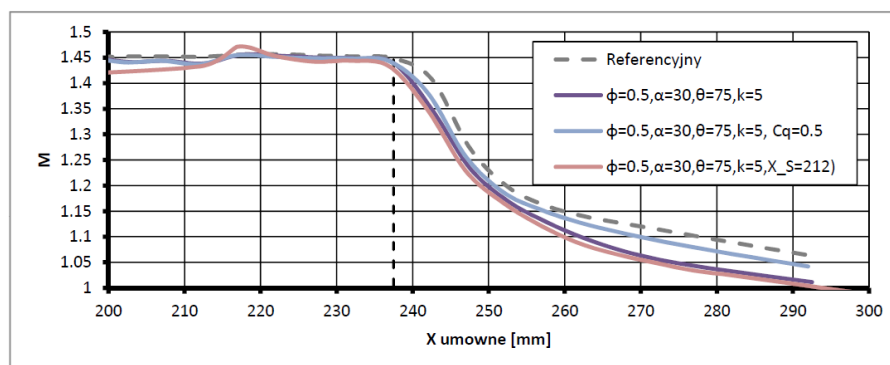
Rys. 4.18. Zestawienie pomiarów dotyczących optymalnych generatorów wirów $\{\phi = 0.5\text{mm}, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = \text{var}, X_{Shock} = \text{var}\}$

Wpływ tych parametrów łatwiej analizować korzystając z wykresu na rysunku 4.19. Przedstawia on krzywe z wykresu 4.18 przesunięte w taki sposób, aby nałożyć na siebie położenia fali uderzeniowej.



Rys. 4.19. Zestawienie pomiarów dotyczących optymalnych generatorów wirów przy uzgodnionej pozycji fali uderzeniowej $\{\phi = 0.5\text{mm}, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = \text{var}, X_{Shock} = \text{var}\}$

Na rysunku 4.20 przedstawiony jest wykres uzyskany przy przesunięciu krzywych do wspólnego położenia fali uderzeniowej.



Rys. 4.20. Zestawienie pomiarów dotyczących optymalnych generatorów wirów przy uzgodnionej pozycji fali uderzeniowej $\{\phi = 0.5\text{mm}, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = \text{var}, X_{Shock} = \text{var}\}$, zmniejszony zakres położzeń

Przebieg obydwóch krzywych odpowiadających pełnemu wydatkowi generatorów wirów jest bardzo zbliżony. Oznacza to, że odległość generatora wirów od fali uderzeniowej nie ma zasadniczego wpływu na jego efektywność. Istotnie różny przebieg ciśnienia pojawia się w przypadku zmniejszonego do połowy wydatku masowego przepływu przez generatory wirów. W tym przypadku krzywa zbliża się do tej dotyczącej przepływu referencyjnego. Zgodnie z oczekiwaniami, zmniejszaniu impulsu (ilości przepływającego przez generatory powietrza) wprowadzanego do przepływu towarzyszy zmniejszanie się wpływu wirów na przepływ.

4.3 Geometria stopy lambda

Parametry geometryczne stopy lambda, wyznaczone zgodnie z opisem z podrozdziału 3.7, dla wszystkich przypadków pomiarowych zawiera tabela 2.

Tabela 2. Parametry geometryczne stopy lambda

Przypadek	Parametry geometryczne układu falowego		
	h[mm]	α_p [°]	α_l [°]
Przepływ referencyjny	25,34	39,60	15,56
Standardowy generator wirów $\{\phi=0.5, \alpha=45, \theta=90, k=5\}$	21,91	34,79	14,04
Zoptymalizowany generator wirów $\{\phi=0.5, \alpha=30, \theta=75, k=5\}$	16,42	40,55	16,33
Powiększony, standardowy generator wirów $\{\phi=0.8, \alpha=45, \theta=90, k=8\}$	20,32	41,00	17,53
Zoptymalizowany generator wirów, zmniejszony wydatek $\{\phi=0.5, \alpha=30, \theta=75, k=5; (Cq=0.5, XSh=237.5)\}$	22,81	34,11	21,77
Zoptymalizowany generator wirów, przybliżona fala $\{\phi=0.5, \alpha=30, \theta=75, k=5; (Cq=1, XSh=212.5)\}$	19,42	41,53	7,28

Z danych zebranych w tabeli 2 wynikają następujące wnioski dotyczące wpływu generatorów wirów na geometrię układu falowego.

- Zastosowanie wirów w każdym przypadku powoduje zmniejszenie wysokości stopy lambda. Przy stałej geometrii kanału i liczbie Macha przed falą uderzeniową wskazuje to na zmniejszanie bąbla oderwania.
- Standardowy generator wirów zmniejsza wysokość stopy lambda o 14%.
- Zoptymalizowany generator wirów powoduje największą redukcję wysokości stopy lambda, wynoszącą 35% .
- Powiększony, standardowy generator wirów obniża stopę o 20%.

- Zoptymalizowany generator wirów przy zmniejszonym wydatku masowym daje redukcję tylko o 10%.
- Zoptymalizowany generator z przybliżoną falą uderzeniową wywołuje zmniejszenie wysokości stopy lambda o 23%.

4.4 Warstwy przyścienne

Dla każdego z przypadków pomiarowych warstwy przyścienne były badane w trzech trawersach:

- 25 mm powyżej fali uderzeniowej ³,
- 30 mm poniżej fali uderzeniowej,
- 55 mm poniżej fali uderzeniowej.

Wykresy dotyczące wszystkich przypadków zamieszczone są w dodatku (rysunki od 7.2 do 7.7). W tym rozdziale przedstawione są natomiast wykresy porównawcze dotyczące wszystkich przypadków w ramach kolejnych trawersów oraz tabele zawierające parametry całkowite i prędkość na granicy warstwy przyściennej. W tym miejscu należy podkreślić, że chociaż wykresy porównawcze przedstawiane są we wspólnym układzie współrzędnych $(\frac{u}{u_\delta}, y)$, to jednak dla każdego rozkładu parametr u_δ przyjmuje różne wartości zawarte w odpowiedniej tabeli ⁴.

³Dla fali przesuniętej do pozycji 212,5 mm, jak już wyjaśniono poprzednio, ten trawers z powodu konstrukcji dyszy znajdował się 10 mm przed falą uderzeniową

⁴Wykresy zestawieniowe w ramach poszczególnych przypadków zamieszczone są w dodatku 7.3

Poza wykresami porównującymi rozkłady prędkości, wyznaczano także parametry całkowite określające profil warstwy przyściennej, czyli grubość warstwy przyściennej, grubość straty przekroju i grubość straty pędu. Wyprowadzenie zależności użytych do wyznaczenia tych wartości znajduje się w dodatku ???. W tym rozdziale zostaną one tylko przytoczone.

- Grubość warstwy przyściennej δ to odległość od ścianki punktu, w którym rzeczywista prędkość wynosi 0.995 maksymalnej prędkości ponad ścianką⁵. Jest ona wyznaczana na podstawie profilu prędkości wynikającego z pomiaru ciśnienia. W literaturze można spotkać także wartości 0.99 i 0.999; jest to kwestia arbitralna; w tej pracy przyjęto wartość 0.995.
- Grubość straty profilu δ_1 to parametr całkowity, którego wartość przy ustalonej grubości warstwy przyściennej δ może przybierać różne wartości, ponieważ zależy ona od kształtu profilu prędkości. Wielkość ta opisuje defekt prędkości w odniesieniu do profilu idealnego. Grubość ta odpowiada hipotetycznej wielkości "pogrubienia profilu", która spowodowałaby uzyskanie przy przepływie nielepkiem takiego samego wydatku masowego, jak przy przepływie rzeczywistym i "niepogrubionym" profilu. Wyraża ona wielkość strat w przepływie masy spowodowaną efektami lepkościowymi na ściankach w stosunku do przepływu nielepkiego. Ścisłe określa ją poniższe równanie.

$$\delta_1 = \int_0^\delta \left(\frac{\rho_i(y)u_i(y) - \rho(y)u(y)}{\rho_w u_w} \right). \quad (1)$$

W przypadku przepływu nieściśliwego równanie 1 upraszcza się do postaci równania 2.

$$\delta_1 = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u(y)}{u_w} \right). \quad (2)$$

⁵Definicja sformułowana na podstawie definicji przedstawionej w [22]

- Grubość straty pędu to parametr całkowity, który analogicznie do poprzedniego określa grubość hipotetycznej warstwy tworzącej się na opływanych elementach, która nie uczestniczy w transporcie ilości ruchu przy przepływie idealnym z taką samą ilością transportowanego pędu. Jego zależność od parametrów przepływu jest określona równaniem 3 .

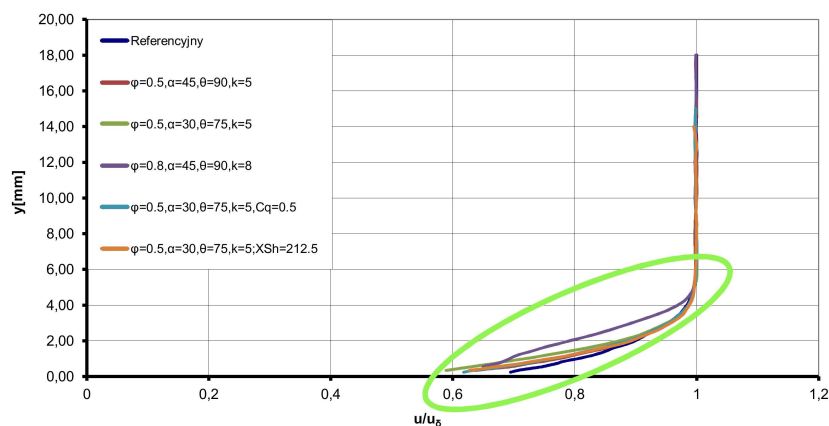
$$\delta_2 = \int_0^\delta \frac{\rho_i(y)u_i^2(y) - \rho(y)u^2(y)}{\rho_w u_w^2} dy - \delta_1. \quad (3)$$

Dla przypadku płynu niściśliwego upraszcza się ono do postaci równania 4

$$\delta_2 = \int_0^\delta \frac{u(y)}{u_w} \left(1 - \frac{u(y)}{u_w} \right) dy. \quad (4)$$

4.4.1 Trawers 25 mm powyżej fali uderzeniowej

Trawers $X=212$ mm⁶ znajduje się on w obszarze naddźwiękowym przed falą uderzeniową ustawioną w położeniu $X=237$ mm. Położenie generatorów wirów jest stałe dla każdego z przypadków i wynosi ono $X=190$ mm, a więc odległość trawersu pomiarowego do generatorów wirów to 22 mm. Zestawienie wyników obliczonych na podstawie pomiarów dla tego trawersu przedstawia wykres 4.21.

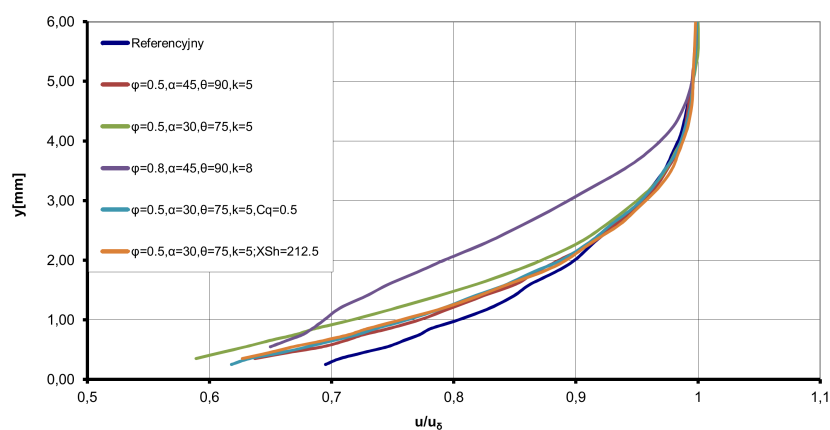


Rys. 4.21. Zestawienie prędkości w warstwie przyściennej dla położenia 25 mm powyżej pozycji fali uderzeniowej

Wykres ten przedstawia całość zebranych wyników.

⁶Za wyjątkiem przypadku **F**, dla którego $X=202$ mm

Interesujący ze względu na profil warstwy przyściennej obszar zaznaczony zieloną elipsą w powiększeniu przedstawia wykres 4.22.



Rys. 4.22. Szczegółowe przedstawienie prędkości w warstwie przyściennej dla położenia 25 mm powyżej pozycji fali uderzeniowej

Obliczone na podstawie tych rozkładów prędkości parametry całkowite warstwy przyściennej zawiera tabela 3.

Tabela 3. Parametry warstwy przyściennej 25 mm powyżej fali uderzeniowej

			Przypadek referencyjny	Przypadek ($\phi=0.5, \alpha=45, \theta=90, k=5$)	Przypadek ($\phi=0.5, \alpha=30, \theta=75, k=5$)	Przypadek ($\phi=0.8, \alpha=45, \theta=90, k=8$)	Przypadek ($\phi=0.5, \alpha=30, \theta=75, k=5, Cq=0.5, X_{sh}=237.5$)	Przypadek ($\phi=0.5, \alpha=30, \theta=75, k=5, Cq=1, X_{sh}=212.5$)
			X=212,5	X=212,5	X=212,5	X=212,5	X=212,5	X=202,5
Grubość straty przekroju	δ_1 [mm]	Płyn ściśliwy	0.8682	0.967	1.0677	1.2693	0.9638	0.9624
		Płyn nieściśliwy	0.5928	0.6872	0.7698	0.895	0.6736	0.6888
Grubość straty pędu	δ_2 [mm]	Płyn ściśliwy	0.3616	0.3787	0.4067	0.5104	0.3908	0.3686
		Płyn nieściśliwy	0.4069	0.433	0.4727	0.5974	0.4473	0.4257
Parametr kształtu	$H_{12} = \frac{\delta_1}{\delta_2}$	Płyn ściśliwy	2.401	2.5531	2.6253	2.487	2.4661	2.6106
		Płyn nieściśliwy	1.4571	1.587	1.6286	1.4983	1.5058	1.6182
Grubość warstwy przyściennej		δ_{990} [mm]	4.44	4.25	4.16	4.67	4.26	4.13
		δ_{995} [mm]	4.94	5.02	4.75	5.04	4.79	4.63
		δ_{999} [mm]	6.86	9.43	5.39	6.01	5.8	7.48
Parametry warstwy przyściennej	Grubość warstwy	δ [mm]	4.94	5.02	4.75	5.04	4.79	4.63
	Prędkość graniczna	u_8 [m/s]	407.9	409.8	404.7	406.8	408.8	407.7
	Lepkość właściwa	ν [m ² /s]	2.72E-05	2.82E-05	2.58E-05	2.69E-05	2.74E-05	2.74E-05
	Liczba Reynoldsa	Re	70000	70000	70000	70000	70000	70000

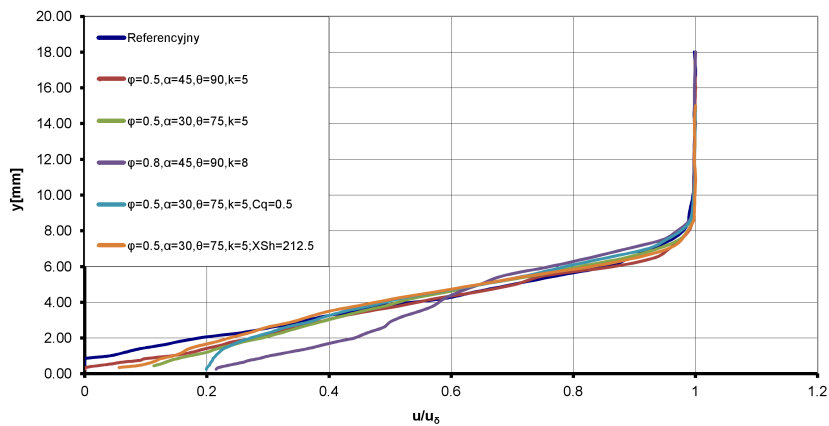
Przebiegi z wykresów na rysunkach Rys. 4.21 i Rys. 4.22 oraz wartości z tabeli 3 pozwalają sformułować pewne wnioski dotyczące wpływu generatorów wirów na warstwę przyścienną formującą się przed falą uderzeniową.

- W tym położeniu wpływ wprowadzenia wirów na grubość warstwy przyściennej δ_{995} nie jest jednoznaczny. Zależy on od rozważanego przypadku; widoczne jest zwiększenie, bądź zmniejszenie wartości tego parametru w stosunku do przypadku referencyjnego. Należy pamiętać, że ten trawers znajduje się bardzo blisko fali uderzeniowej. Można podejrzewać, że droga wirów w przepływie może nie być wystarczająco długa do wywołania właściwego efektu, jednak nie jest to jeszcze wyjaśnione.

- Dla każdego z przypadków z aktywnymi generatorami wirów następuje wyraźne zwiększenie zarówno grubości straty przekroju, jak i grubości straty pędu. Tendencja ta jest wyraźnie widoczna na wykresach na rysunku Rys. 4.22, gdzie linia opisująca przypadek referencyjny w większej części zakresu prędkości leży poniżej pozostałych krzywych.
- Najsilniejszy przyrost tak grubości straty przekroju, jak i grubości straty pędu ma miejsce przy powiększonej średnicy generatorów wirów (przypadek **D** $\{\phi = 0,8mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 8, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5\}$). Przejawia się to w wartościach parametrów z tabeli 3, a także w przebiegu dotyczącej tego przypadku krzywej, która leży powyżej pozostałych na wykresie 4.22
- Uaktywnienie generatorów wirów daje różne efekty w różnych przypadkach pomiarowych. W przypadkach **B** i **D**, czyli geometria generatorów bez optymalizacji, aktywność generatorów wywołuje powiększenie się grubości warstwy przyściennej, grubości straty przekroju i grubości straty pędu. W pozostałych przypadkach **C**, **E** oraz **F** efekt jest pozytywny; redukcji ulegają wszystkie wyżej wymienione parametry warstwy. Należy pamiętać, że nawet w przypadku powiększenia grubości warstwy przyściennej, nie oznacza to negatywnego wpływu obecności wirów na przepływ. Temu pogrubieniu warstwy towarzyszy wprowadzenie do warstwy porządkującej ją okresowej struktury wirów, co w kontekście kontroli oderwania daje globalnie pozytywne efekty. Jest to wyraźnie widoczne w wynikach przedstawionych w kolejnych rozdziałach.

4.4.2 Trawers 30 mm poniżej fali uderzeniowej

Ten trawers znajdował się za falą uderzeniową, w obszarze oderwania przepływu referencyjnego, w odległości 52 mm od generatorów wirów. Zestawienie uzyskanych w tym trawersie rozkładów prędkości przedstawia wykres 4.23.



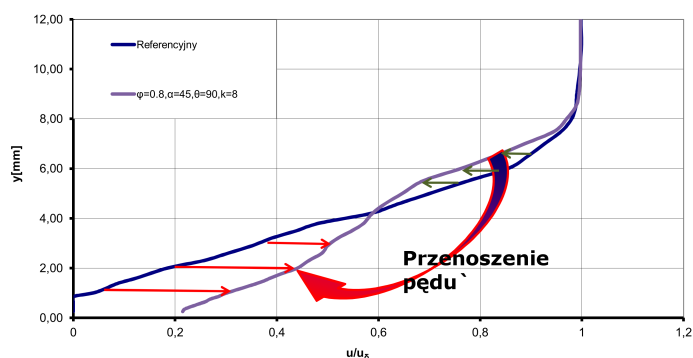
Rys. 4.23. Zestawienie prędkości w warstwie przyściennej dla położenia 30 mm poniżej pozycji fali uderzeniowej

Wyznaczone na podstawie przedstawionych wyników pomiarów parametry całkowite warstwy przyściennej zebrane są w tabeli 4.

Tabela 4. Parametry warstwy przyściennej 30 mm poniżej fali uderzeniowej

			Przypadek referencyjny	Przypadek ($\phi=0.5, \alpha=45, \theta=90, k=5$)	Przypadek ($\phi=0.5, \alpha=30, \theta=75, k=5$)	Przypadek ($\phi=0.8, \alpha=45, \theta=90, k=8$)	Przypadek ($\phi=0.5, \alpha=30, \theta=75, k=5, Cq=0.5, X_{sn}=237.5$)	Przypadek ($\phi=0.5, \alpha=30, \theta=75, k=5, Cq=1, X_{sn}=212.5$)
			X=267,5	X=267,5	X=267,5	X=267,5	X=267,5	X=242,5
Grubość straty przekroju	δ_1 [mm]	Płyn ściśliwy	4.2841	4.0225	4.1052	3.9245	4.1978	4.2164
		Płyn nieściśliwy	3.9301	3.6503	3.7083	3.4349	3.7506	3.8696
Grubość straty pędu	δ_2 [mm]	Płyn ściśliwy	0.9144	1.0014	1.1434	1.3251	1.2099	1.0362
		Płyn nieściśliwy	1.065	1.1698	1.326	1.5363	1.4168	1.2053
Parametr kształtu	$H_{12} = \frac{\delta_1}{\delta_2}$	Płyn ściśliwy	4.685	4.0168	3.5904	2.9617	3.4696	4.0692
		Płyn nieściśliwy	3.6902	3.1205	2.7966	2.2359	2.6473	3.2104
Grubość warstwy przyściennej		δ_{990} [mm]	8.87	8.04	8.15	8.57	8.52	7.95
		δ_{995} [mm]	9.35	8.58	8.61	9.11	9.07	8.27
		δ_{999} [mm]	15.84	13.46	13.39	13.81	12.87	10.04
Parametry warstwy przyściennej	Grubość warstwy	δ [mm]	9.35	8.58	8.61	9.11	9.07	8.27
	Prędkość graniczna	u_δ [m/s]	335.7	338	325.1	327.9	333.8	322.5
	Lepkość właściwa	ν [m ² /s]	2.23E-05	2.29E-05	2.14E-05	2.12E-05	2.16E-05	2.15E-05
	Liczba Reynoldsa	Re	140000	130000	130000	140000	140000	120000

Mechanizm transportu pędu przedstawiony jest na rysunku 4.23.



Rys. 4.24. Ilustracja transportu pędu wewnątrz warstwy przyściennej dla położenia trawersu pomiarowego 30 mm poniżej pozycji fali uderzeniowej

Biorąc pod uwagę przebiegi z wykresu 4.23 i dane z tabeli 4 można zauważyć pewne zmiany przepływu związane z aktywnością generatorów wirów.

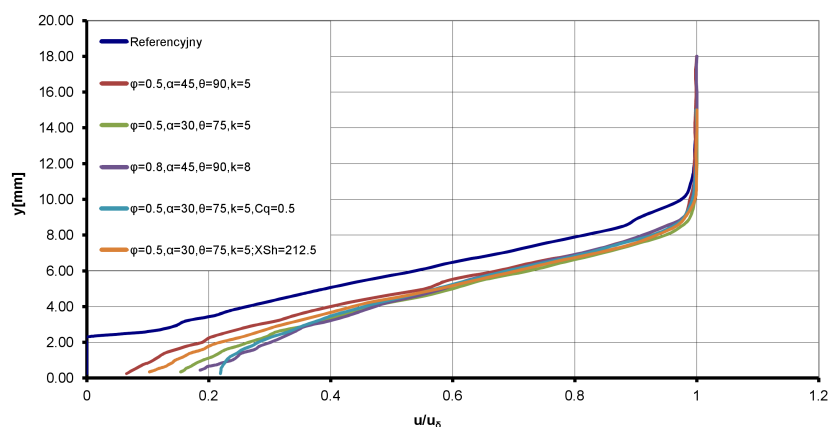
- We wszystkich przypadkach grubość warstwy przyściennej δ ulega znacznemu (blisko dwukrotnemu) pogrubieniu wskutek obecności fali uderzeniowej powyżej trawersu pomiarowego.
- Dla przepływu referencyjnego i standardowego generatora wirów widoczne są obszary zerowej prędkości świadczące o obecności bąbla oderwania.
- Uaktywnienie generatorów wirów powoduje we wszystkich przypadkach zmniejszenie grubości straty przekroju δ_1 .
- Uaktywnienie generatorów wirów powoduje we wszystkich przypadkach zwiększenie grubości straty pędu δ_2 .
- Uaktywnienie generatorów wirów powoduje we wszystkich przypadkach zmniejszenie wartości współczynnika kształtu H_{12} , co wraz z przyspieszeniem w pobliżu ściaki oznacza pełniejszy profil warstwy.
- Widoczny jest transport pędu z wyższych warstw do niższych. Porównując krzywe dla przypadku referencyjnego i powiększonych generatorów wirów ($\phi = 0,8mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 8$) widoczne jest, że dla aktywnych wirów krzywa w zakresie $\frac{u}{u_\delta} \in \langle 0, 0,6 \rangle$ leży poniżej krzywej opisującej przypadek referencyjny, a w pozostałej części warstwy krzywa dotycząca aktywnych wirów leży powyżej krzywej referencyjnej. Oznacza to przyspieszenie w dolnej części warstwy, kosztem górnej części. Ilustruje to wykres 4.24 na którym wykreślono przebieg dla przepływu referencyjnego i z aktywnymi generatorami wirów ($\phi = 0,8mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 8$). Prostymi poziomymi strzałkami (oliwkowe i czerwone) szematycznie zaznaczono relacje prędkości

tych przypadków, a zaokrąglona, niebiesko-czerwona strzałka ilustruje kierunek przenoszenia pędu wskutek aktywności generatorów wirów ($\phi = 0, 8mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 8$).

- Uaktywnienie generatora wirów powoduje we wszystkich przypadkach przyspieszenie przepływu w dolnym obszarze warstwy.
- Zastosowanie wirów powoduje znaczącą redukcję wielkości bąbla ode-
rwanego, w większości przypadków zupełne jego wyeliminowanie.
- Widoczna jest zwiększona efektywność generatora zoptymalizowanego ($\phi = 0, 5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5$) w stosunku do standardowego ($\phi = 0, 5mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 5$).

4.4.3 Trawers 55 mm poniżej fali uderzeniowej

Ten trawers znajdował się w największej odległości za falą uderzeniową (na-
dal w obszarze oderwania przepływu referencyjnego), w odległości 77 mm od
generatorów wirów. Odpowiadające wynikom pomiarów rozkłady prędkości
w warstwie przyściennej przedstawia wykres 4.25.



Rys. 4.25. Zestawienie rozkładów prędkości w warstwie przyściennej dla
położenia trawersu pomiarowego 55 mm poniżej pozycji fali uderzeniowej

Tak jak w poprzednich przypadkach, wyznaczone na podstawie wyników
pomiarów parametry całkowite warstwy przyściennej zebrane są w tabeli 5.

Na podstawie analizy wykresu 4.25 oraz danych z tabeli 5 można wskazać
wymienione poniżej właściwości przepływu widoczne w tym położeniu.

- We wszystkich przypadkach wiry powodują znaczące zmniejszenie gru-
bości warstwy oraz grubości straty przekroju.
- We wszystkich przypadkach uruchomienie generatora wirów powoduje
zwiększenie grubości straty pędu, oraz zmniejszenie wartości paramete-
ru kształtu , w połączeniu z przyspieszeniem w pobliżu ściaki oznacza
to pełniejszy profil warstwy.

Tabela 5. Parametry warstwy przyściennej 55 mm poniżej fali uderzeniowej

			Przypadek referencyjny	Przypadek $\{\phi=0.5, \alpha=45, \theta=90, k=5\}$	Przypadek $\{\phi=0.5, \alpha=30, \theta=75, k=5\}$	Przypadek $\{\phi=0.5, \alpha=45, \theta=90, k=8\}$	Przypadek $\{\phi=0.5, \alpha=30, \theta=75, k=5, C_c=0.5, X_{31}=237.5\}$	Przypadek $\{\phi=0.5, \alpha=30, \theta=75, k=5, C_q=1, X_{31}=212.5\}$
			X=292,5	X=292,5	X=292,5	X=292,5	X=292,5	X=267,5
Grubość straty przekroju	δ_1 [mm]	Płyn ściśliwy	6.0892	4.9824	4.4718	4.5052	4.5593	4.692
		Płyn nieściśliwy	5.7364	4.5807	4.0665	4.0702	4.1025	4.304
Grubość straty pędu	δ_2 [mm]	Płyn ściśliwy	1.0581	1.2598	1.3154	1.4166	1.4019	1.2838
		Płyn nieściśliwy	1.226	1.4488	1.5029	1.6216	1.6165	1.4634
Parametr kształtu $H_{12} = \frac{\delta_1}{\delta_2}$		Płyn ściśliwy	5.7549	3.955	3.3996	3.1804	3.2523	3.6548
		Płyn nieściśliwy	4.6789	3.1618	2.7057	2.5099	2.538	2.9411
Grubość warstwy przyściennej	δ_{990} [mm]		10.55	10.16	9.03	9.38	9.53	9.45
	δ_{995} [mm]		11.52	10.87	9.32	10.36	10.2	9.81
	δ_{999} [mm]		13.85	15.84	10.48	12.89	11.75	10.32
Parametry warstwy przyściennej	Grubość warstwy	δ [mm]	11.52	10.87	9.32	10.36	10.2	9.81
	Prędkość graniczna	u_δ [m/s]	319.5	317.6	310.2	307	316.1	308.7
	Lepkość właściwa	ν [m ² /s]	2.16E-05	2.15E-05	2.07E-05	2.03E-05	2.07E-05	2.07E-05
	Liczba Reynoldsa	Re	170000	160000	140000	160000	160000	150000

- W tym położeniu dla wszystkich przypadków aktywne generatory wirów powodują całkowitą eliminację oderwania.
- Widoczny jest dalszy przyrost prędkości w pobliżu ścianki w stosunku do przedstawianych już wyników pomiarów 30 mm poniżej fali uderzeniowej.

4.5 Wizualizacja olejowa

Zapisane obrazy wizualizacji olejowej analizowano pod kątem jakościowej struktury przepływu oraz wyznaczano na ich podstawie długość oderwania dla każdego z przypadków pomiarowych. Podsumowanie otrzymanych wyników zebrano w tabeli 6.

Tabela 6. Długości oderwania

Przypadek	Długość oderwania [mm]	Uwagi
Referencyjny	65	Brak
Standardowe generatory wirów $\phi=0.5, \alpha=45, \theta=90, k=5(B)$	35	Brak
Zoptymalizowane generatory wirów $\phi=0.5, \alpha=30, \theta=75, k=5$	30	Brak
Powiększone, standardowe generatory wirów $\phi=0.8, \alpha=45, \theta=90, k=8$	32	Odmienny charakter oderwania, struktura pęcherza oderwania przechodząca w podzieloną strukturę klastrową.
Zoptymalizowane generatory wirów, zmniejszony wydatek $\phi=0.5, \alpha=30, \theta=75, k=5, C_q=0.5$	46	Brak
Zoptymalizowane generatory wirów, przybliżona fala uderzeniowa $\phi=0.5, \alpha=30, \theta=75, k=5, X_S=212$	38	Brak

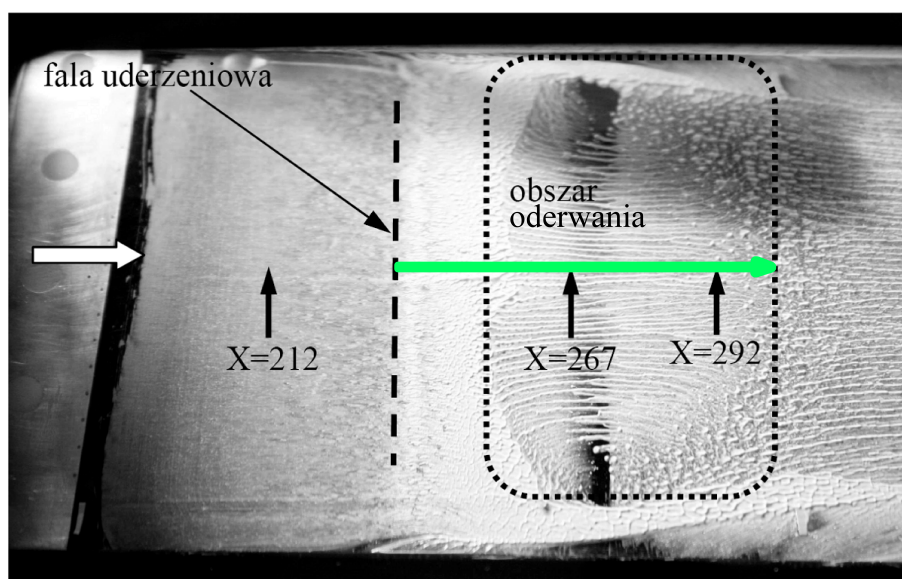
Fotografie wizualizacji dla wszystkich przypadków pomiarowych umieszczone są w dodatku 7.3.

W tym rozdziale przedstawione zostały wizualizacje dla przypadku referencyjnego i dwóch wybranych przypadków z aktywnymi generatorami wirów:

- zoptymalizowane generatory wirów (przypadek **C** $\{\phi = 0,5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5, M = 1.45\}$), rysunek 4.27,
- generatory bez optymalizacji, o powiększonej średnicy (przypadek **D** $\{\phi = 0,8mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 8, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5, M = 1.45\}$), rysunek 4.28).

Przypadki te wybrano ponieważ pomimo zbliżonej długości oderwania, cechuje je zupełnie odmienny charakter obszaru oderwania.

Wizualizacja olejowa przepływu dla przypadku referencyjnego przedstawiona jest na rysunku 4.26.

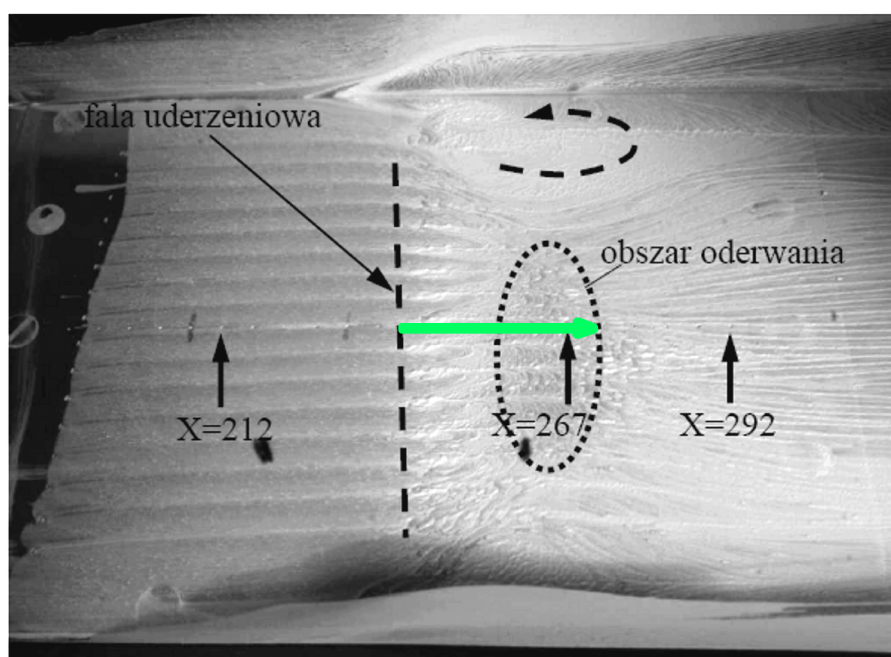


Rys. 4.26. Wizualizacja olejowa, przypadek referencyjny

Zieloną strzałką zaznaczona jest długość obszaru oderania. Zgodnie z opisanym w rozdziale 4.5 podejściem, jako długość obszaru oderwania w tej

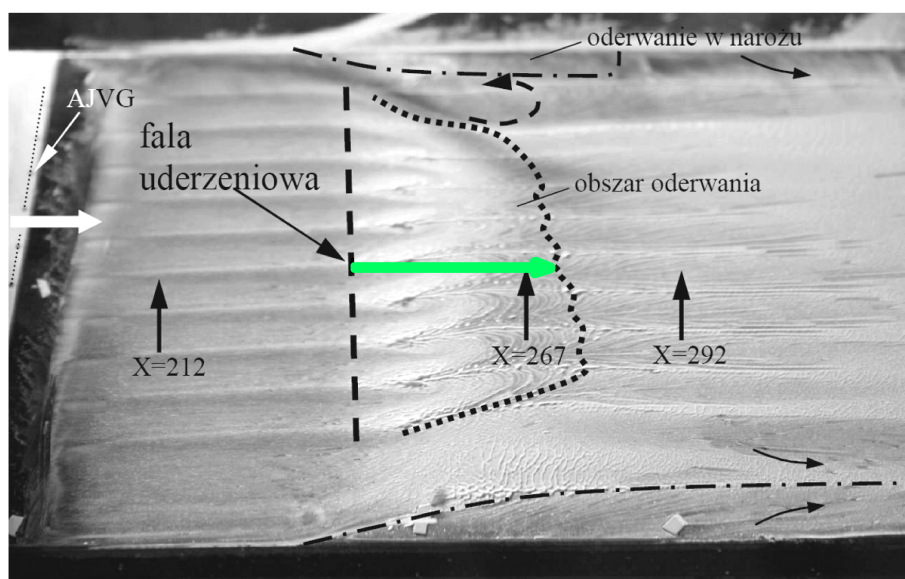
pracy przyjmuje się odległość od fali uderzeniowej do linii przyłączenia.

Pierwszy z przypadków z aktywnymi generatorami wirów to przypadek zoptymalizowanych generatorów wirów (czyli przypadek **C** $\{\phi = 0,5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5, M = 1.45\}$). Uzyskaną wizualizację olejową prezentuje rysunek 4.27.



Rys. 4.27. Wizualizacja olejowa, przypadek $\{\phi = 0,5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5\}$

Drugi przypadek z aktywnymi generatorami wirów to przypadek generatorów wirów o powiększonej średnicy (czyli przypadek **D** $\{\phi = 0,8mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 8, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5, M = 1.45\}$). Uzyskaną wizualizację olejową prezentuje rysunek 4.28.



Rys. 4.28. Wizualizacja olejowa, przypadek $\{\phi = 0,8mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 8, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5\}$

Widać, że dla obydwóch przypadków z aktywnymi generatorami wirów mają one duży wpływ na obraz przepływu. Dla przypadku zoptymalizowanych generatorów wirów (rysunek 4.27) widoczna jest redukcja wielkości bąbla oderwania, przy zachowaniu jego symetrycznego kształtu. Dla powiększonych generatorów (rysunek 4.28) także występuje redukcja długości oderwania, ale towarzyszy jej wyraźna zmiana jakościowa obszaru oderwania. Przestaje on przypominać symetryczny, jednorodny "bąbel", a zmienia się w poprzecinaną, oscylującą strukturę klastrową.

Na podstawie analizy wizualizacji przeprowadzonej dla wszystkich przypadków pomiarowych można zauważyć, że:

- Największa długość oderwania występuje w przepływie referencyjnym (przy braku aktywności generatorów wirów).
- Zastosowanie generatorów w podstawowej konfiguracji ($\{\phi = 0,5mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 5, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5\}$) zmniejsza długość

oderwania o około 45%.

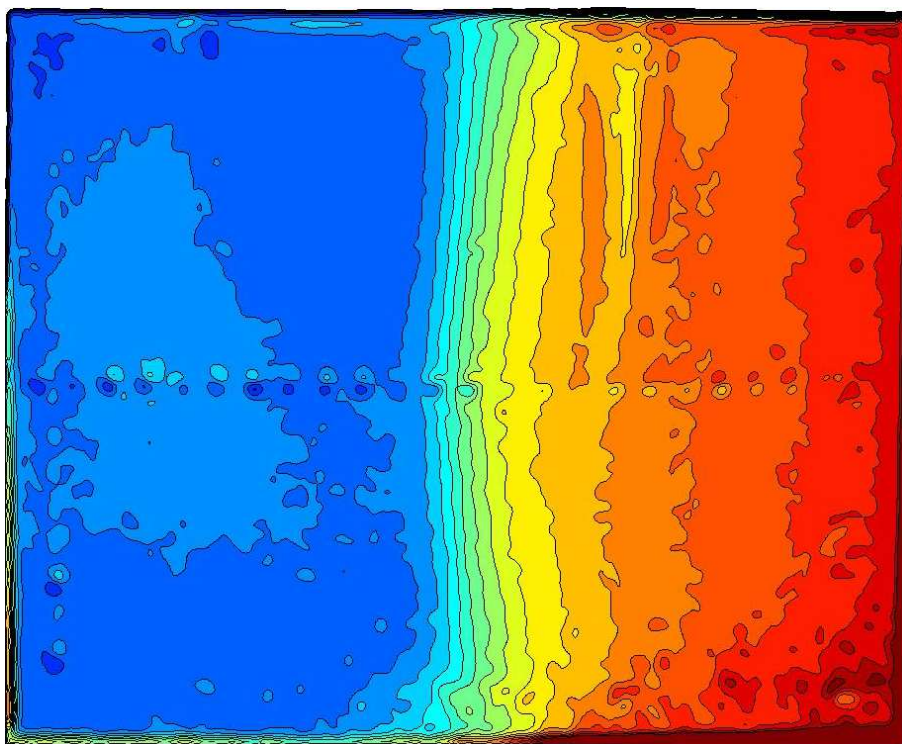
- Przy zoptymalizowanej geometrii ($\{\phi = 0,5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5\}$) redukcja długości oderwania wynosi około 55%.
- Przy optymalnej geometrii, zmniejszenie odległości od generatorów wirów do fali uderzeniowej o 25mm ($\{\phi = 0,5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 1, X_{Shock} = 212,5\}$) daje zmniejszenie oderwania o około 40%. Jest to wielkość redukcji zbliżona do tej uzyskanej przy standardowej geometrii i pełnej odległości generatorów do fali uderzeniowej.
- Jeżeli przy optymalnej geometrii i pełnej odległości od generatorów wirów do fali uderzeniowej zmniejszony o połowę zostanie wydatek masowy ($\{\phi = 0,5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 0.5, X_{Shock} = 237,5\}$), to redukcja wielkości oderwania wyniesie tylko około 30%.
- Standardowa geometria, przy powiększonej średnicy generatorów ($\{\phi = 0,8mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 8, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5\}$) powoduje zmniejszenie długości oderwania o około 50%. Jest to wielkość zbliżona do tej uzyskanej przy zoptymalizowanej geometrii, jednakże przy tej konfiguracji jakościowo zmienia się charakter pęcherza oderwania. Skutki czego są widoczne we wzroście oscylacji w tym przypadku ⁷.

Podsumowując można stwierdzić, że efektywność działania wirów zależy od odległości pomiędzy generatorem a falą uderzeniową i bardzo silnie zależy od ich wydatku masowego.

⁷Odpowiednie dane zawiera podrozdział 5.1.

4.6 Wizualizacja metodą PSP

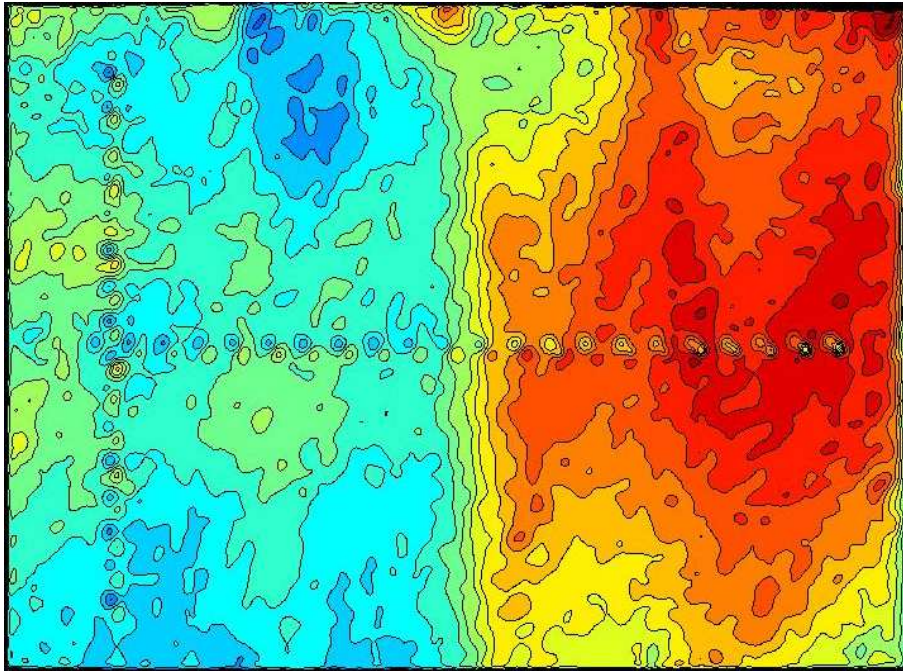
Wizualizacja metodą PSP została przeprowadzona dla przypadku referencyjnego, oraz dla zoptymalizowanych generatorów wirów (przypadek pełnego wydatku masowego i pełnej odległości do fali uderzeniowej, czyli $\{\phi = 0,5 \text{ mm}, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5\}$). Na rysunku 4.29 przedstawiona jest wizualizacja przypadku referencyjnego.



Rys. 4.29. Wizualizacja PSP, przypadek referencyjny

Z rozkładu widać, że struktura przepływu jest symetryczna. Fala uderzeniowa w osi kanału jest prostopadła do kierunku przepływu. Widoczne jest oddziaływanie w górę przepływu "pod falą uderzeniową" realizowane w warstwie przyściennej w narożach tunelu.

Rysunek 4.30 przedstawia rozkład uzyskany dla zoptymalizowanych generatorów wirów.



Rys. 4.30. Wizualizacja PSP, przypadek $\{\phi = 0,5 \text{ mm}, \alpha = 30, \theta = 75,$
 $k = 5, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5\}$

W tym przypadku widoczna jest asymetria przepływu. Skok ciśnienia pod falą uderzeniową staje się skośny.

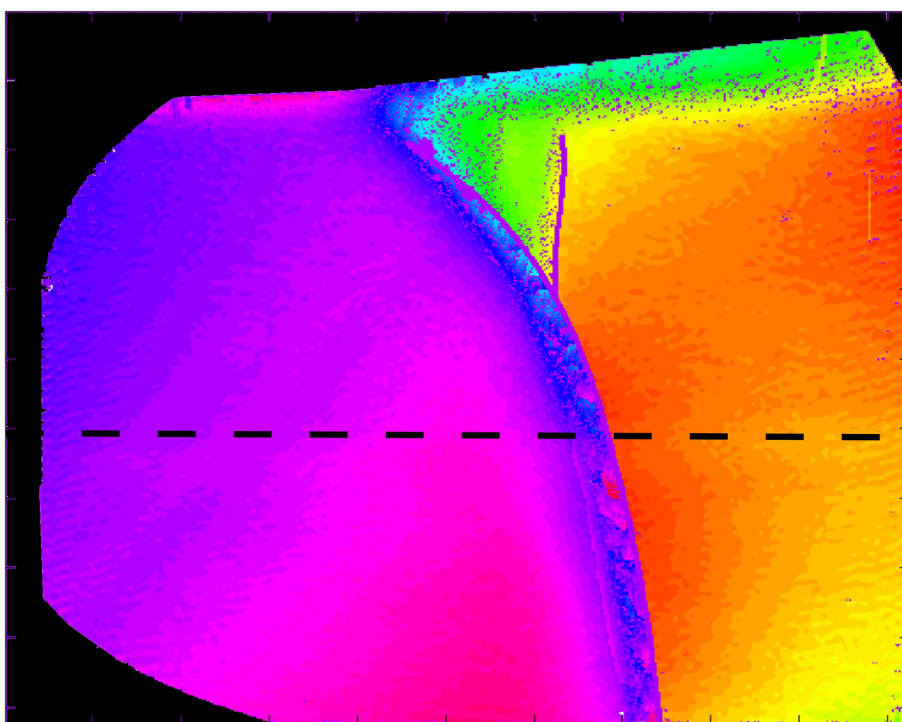
Porównanie tych dwóch rozkładów ukazuje znaczący wpływ wirów na przepływ. W przypadku referencyjnym struktura przepływu jest symetryczna. Widoczne jest oddziaływanie w górę przepływu "pod falą uderzeniową" realizowane w warstwie przyściennej. W przypadku zoptymalizowanych generatorów wirów pojawia się asymetria przepływu. Obrazy te i wynikające z nich wnioski są spójne z wizualizacją olejową (odpowiednio z rysunku 7.8 i z rysunku 7.10). Przywołana wizualizacja olejowa potwierdza obecność cech takich jak utrata prostopadłości skoku ciśnienia na fali i pojawienie się bardzo dużych struktur wirowych w narożach w przepływie z aktywnymi generatorami wirów w odróżnieniu od przepływu referencyjnego z symetrycznym rozkładem parametrów.

Ze względu na początkowy etap poznawania metody i związany z tym szeroki zakres prac obejmujący zarówno naukę prowadzenia eksperymentu, przygotowania farby, jak i napisanie oprogramowania do analizy wyników pomiaru PSP przeprowadzono tylko dla tych dwóch przypadków i potraktowano je jako jakościowe. Należy jednak zauważyć, że pokazują one intensywność efektów trójwymiarowych w strukturze przepływu. Otrzymane wyniki wykazują zgodność z "klasycznymi", dobrze znanymi metodami wizualizacji i dowodzą prawidłowości aplikacji i przydatności tej metody pomiarowej. Uzyskiwane wyniki to ciągła mapa ciśnienia, zmierzonego na całej powierzchni badanej. Otrzymanie takich wyników przy użyciu klasycznych metod opartych na wielokanałowych przetwornikach jest niemożliwe. W metodzie PSP ilość punktów pomiaru ciśnienia wyznacza rozdzielczość kamery, i współcześnie są to wartości znacznie przekraczające milion punktów. Funkcjonalnie odpowiada to wykorzystaniu miliona przetworników ciśnienia podłączonych do modelu. Dalsze analizy ⁸ i nabyte podczas prowadzonych w IMP PAN prac doświadczenia pozwalają uzyskiwać z pomiarów ilościowe wyniki i generować na ich podstawie ilościowe mapy ciśnienia.

⁸Przedstawione w opisie metody.

4.7 Wizualizacja metodą FTFA

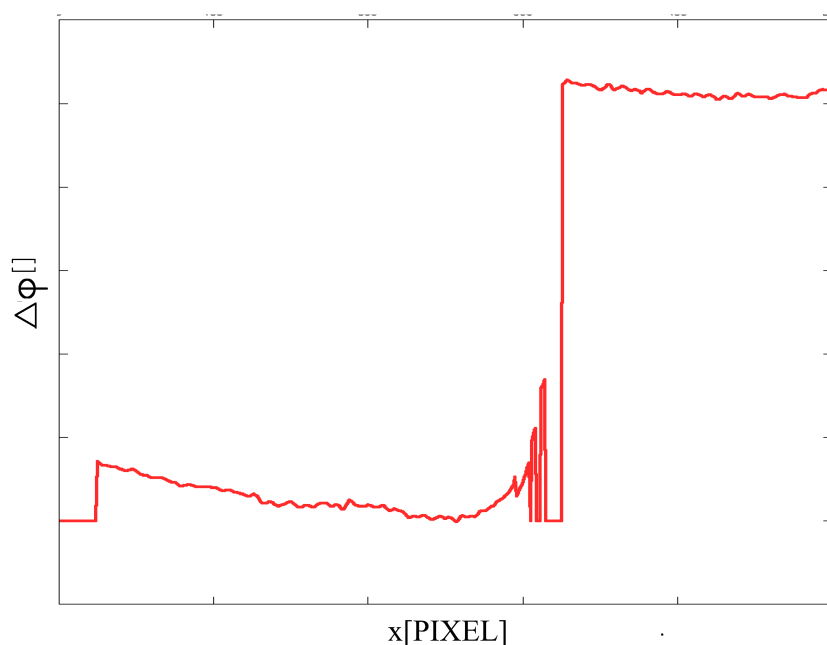
Przedstawione w tym rozdziale wyniki uzyskano z pomiarów przeprowadzonych dla przypadku referencyjnego. Ze względu na szeroki charakter prac obejmujących zarówno poznanie metody jak przygotowanie oprogramowania i przeprowadzenie pomiaru, zdecydowano się na przeprowadzenie pomiarów tylko dla tego przypadku. Wyznaczoną wizualizację gęstości gazu w przepływie przedstawia rysunek 4.31.



Rys. 4.31. Analiza FTFA, przykładowy obraz gęstości .

Na obrazie widoczne są charakterystyczne cechy analizowanego przepływu takie jak fala uderzeniowa wraz ze stopą λ , warstwa przyścienna. Uzyskiwany wynik daje informację o parametrach gazu we wszystkich punktach widocznych w kadrze. Ważną zaletą jest to, że wartości są pozyskane w dokładnie tym samym momencie, w czasie jednego pomiaru. Pomiar tą

metodą nie wiąże się z potrzebą wprowadzania jakichkolwiek elementów mechanicznych takich jak rurki bądź otworki w interesującym obszarze. Jest to szczególnie korzystne przy pomiarach przepływów z falami uderzeniowymi, gdzie wprowadzenie sondy na przykład w okolicę punktu potrójnego znacząco zmienia przepływ i pomiarowo jest to zagadnienie trudne. Przekrój wzdłuż czarnej, przerywanej linii poziomej obrazu wyznaczonej tablicy zamieszczony jest na rysunku 4.32.



Rys. 4.32. Analiza FTFA, przykładowy przebieg parametru .

Widać, że uzyskany przebieg dobrze oddaje charakter zmian parametrów w przepływie z falą uderzeniową.

Uzyskane wyniki potraktowano jako materiał do porównania tymi uzyskanymi z pomiarów innymi metodami wynikami i weryfikacji wypracowanego podejścia. Otrzymane wyniki wykazują zgodność z "klasyczną" w tym przypadku wizualizacją typu "Schlieren" oraz oczekiwanymi przebiegami

gęstości, co można uznać za potwierdzenie prawidłowości wykonania całości prac związanych z implementacją tej metody. Oznacza to, że stanowi ona cenne uzupełnienie dotychczas stosowanych metod; uzupełnia je o wspomniane poprzednio zalety takie jak:

- zapis rozkładu parametrów jednocześnie w całym polu przepływu, bez wprowadzania żadnych zaburzeń mechanicznych towarzyszących typowym przetwornikom ciśnienia,
- możliwości badania zjawisk szybkozmiennych (z górną częstotliwością wynikającą tylko z ilości światła i szybkości użytej kamery, co pozwala na uzyskanie bardzo dużych częstotliwości pomiaru).

Rozdział 5

Wyniki badań efektów niestacjonarnych

Bazując na opisanych w rozdziale 4.5 wynikach uzyskanych metodą wizualizacji olejowej do badania efektów niestacjonarnych wybrano standardowe generatory wirów o powiększonej średnicy¹. Ten generator wirów wywołuje jakościową zmianę obszaru oderwania; uaktywnienie go skutkuje przejściem obszaru "bąbla oderwania" w periodyczną, podzieloną ścieżkami wirów oscylującą klastrową strukturę oderwaniową. W związku z tym uznano, że w tym przypadku wpływ wirów na niestacjonarność obszaru oderwania będzie najwyraźniej zaznaczony. Przeprowadzone pomiary efektów związanych z niestacjonarnością obejmowały :

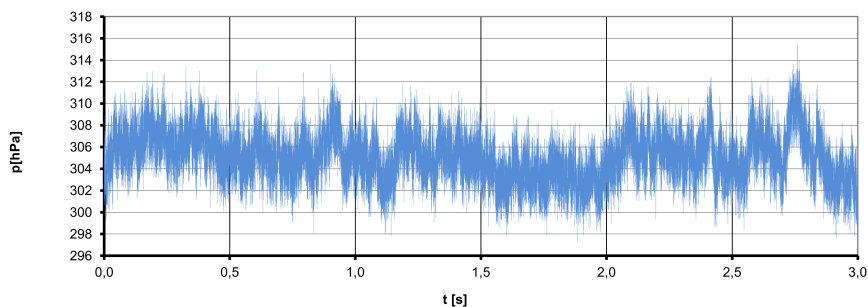
- analiza oscylacji ciśnienia statycznego na ścianie dyszy przy użyciu szybkich przetworników ciśnienia,
- analiza oscylacji fali uderzeniowej wraz ze stopą lambda przy użyciu szybkiej kamery,
- analiza kształtu stopy lambda podczas ruchu fali na bazie wyników pomiarów optycznych.

¹Przypadek **D** $\{\phi=0,8 \text{ mm}, \alpha = 45^\circ, \theta = 90^\circ, C_q = 1,0, X_{Shock} = 237,5 \text{ mm}, k=8 \text{ mm}\}$

5.1 Oscylacje ciśnienia statycznego

Dla przepływu z nieaktywnymi i aktywnymi generatorami wirów prowadzono, w położeniach zaznaczonych na rysunku 2.6, pomiar ciśnienia statycznego w czasie 5 sekund z częstotliwością próbkowania 102 Hz, 512 Hz, 2 kHz, 5 kHz, 10 kHz oraz w czasie 3 sekund w przypadku próbkowania z częstotliwością 20 kHz. Każdy przypadek był mierzony pięciokrotnie w kolejnych przepływach.

Na podstawie każdego z pomiarów sporządzono wykres przebiegu ciśnienia statycznego taki jak na rysunku 5.1.



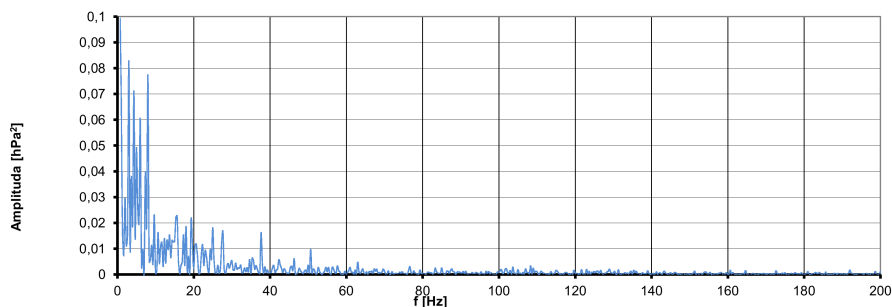
Rys. 5.1. Przebieg ciśnienia statycznego

Na podstawie takich wyników wyznaczono wielkości statystyczne opisujące ten przebieg; przedstawia je tabela 1.

Tabela 1. Cechy statystyczne przebiegu ciśnienia

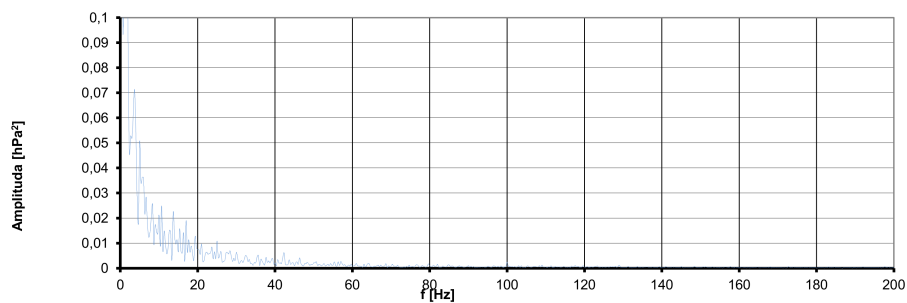
Średnie ciśnienie[hPa]	Minimalne ciśnienie [hPa]	Maksymalne ciśnienie [hPa]	Średnia oscylacja [hPa]	RMS[hPa]
306,324	297,61	315,57	1,7105	2,1407

Następnie, dla każdego z przebiegów wyznaczono widmo mocy takie jak na wykresie z rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Widmo mocy przebiegu ciśnienia

W wyniku porównania widm mocy z kolejnych pomiarów dla danego przypadku pomiarowego stwierdzono, że nie można wyróżnić częstotliwości charakterystycznych². Dlatego dla każdej z konfiguracji (generatory wirów wyłączone albo włączone) wyznaczono wielkości średnie oraz uśrednione widmo mocy. Uśrednione widmo mocy dla częstotliwości próbkowania 20 kHz przedstawia wykres na rysunku 5.3.



Rys. 5.3. Uśrednione widmo mocy przebiegów ciśnienia

²Weryfikacja prawidłowości analizy częstotliwościowej umieszczona jest w dodatku 7.6.4

Obliczone wielkości statystyk tego sygnału zebrano w tabeli 2.

Tabela 2. Cechy statystyczne uśrednionego przebiegu ciśnienia

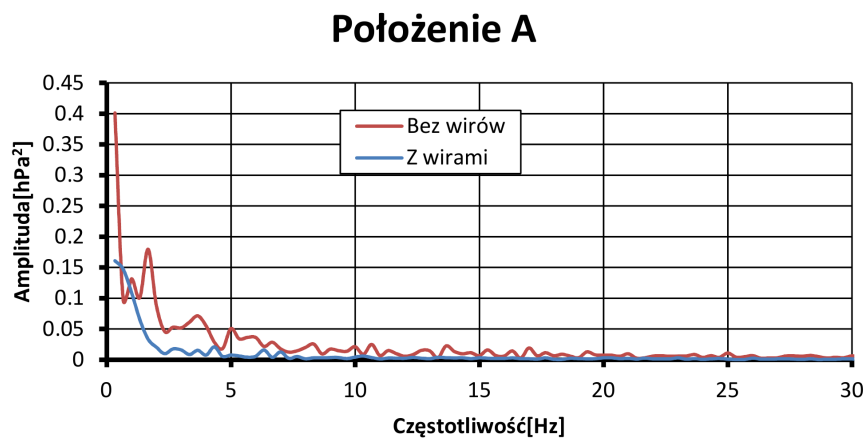
	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Pomiar 4	Pomiar 5	Przebieg uśredniony
Średnie ciśnienie[hPa]	306,324	305,196	304,9207	305,064	305,5421	305,40936
Minimalne ciśnienie[hPa]	297,61	296,9	297,3	297,326	297,72	297,372
Maksymalne ciśnienie [hPa]	315,57	314,13	314,05	315,42	314,49	314,732
Średnia oscylacja [hPa]	1,7105	1,714	1,6841	1,7341	1,7566	1,71986
RMS[hPa]	2,1407	2,1494	2,0953	2,1702	2,1832	2,14776

Ze względu na brak wyraźnych dominujących składowych w widmie sygnału dalsza analiza dotyczyła porównywania amplitud wartości uśrednionych w zależności od położenia przetwornika oraz obecności wirów. Wykresy takie jak na rysunku 5.3 sporządzono dla wszystkich częstotliwości pomiaru i położenia czujnika. Ze względu na zbliżony charakter uzyskanych krzywych, w tej części pracy przedstawione są tylko wyniki uzyskane na podstawie pomiaru z częstotliwością 20 kHz ³. W każdym z przypadków uzyskano dane obejmujące zakres od składowej stałej, do częstotliwości Nyquista wynoszącej w tym przypadku 10 kHz. Ponieważ dla częstotliwości powyżej około 30 Hz amplitudy są bardzo małe, to na wykresach zakres częstotliwości to $< 0,30 >$ Hz.

Kolejne wykresy (rysunek 5.4, rysunek 5.5, rysunek 5.6, rysunek 5.7) przedstawiają zestawienia uśrednionego widma mocy przy przepływie bez wirów, oraz przy przepływie z wirami dla wszystkich położenia przetworników.

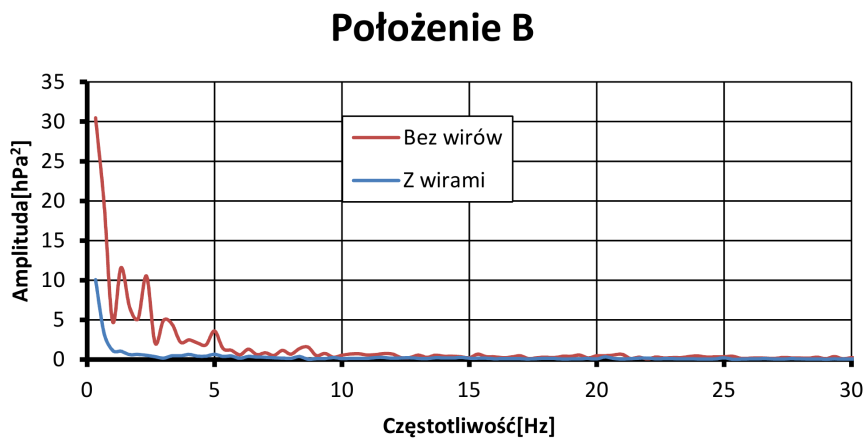
³Kompletne wyniki obejmujące wszystkie przeprowadzone pomiary są przedstawione w zbiorczej tabeli 3

Wykres na rysunku 5.4 przedstawia uśrednione widma mocy w położeniu **A**.



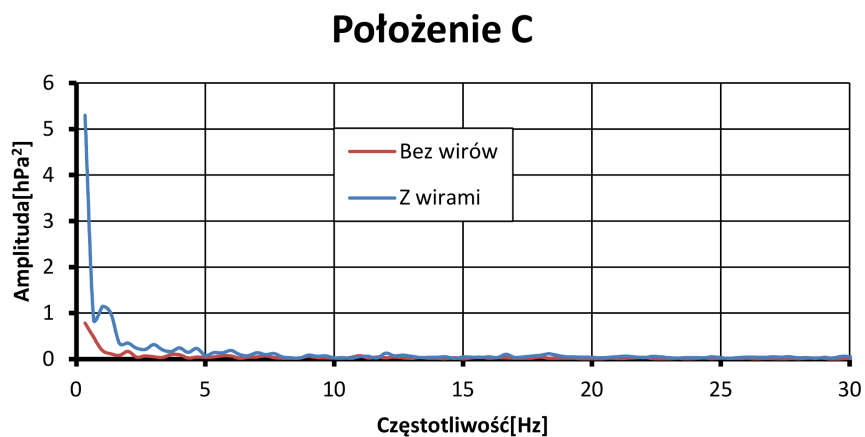
Rys. 5.4. Zestawienie uśrednionych widm mocy oscylacji w położeniu **A**

Wykres z rysunku 5.5 przedstawia uśrednione widma mocy w położeniu **B**.



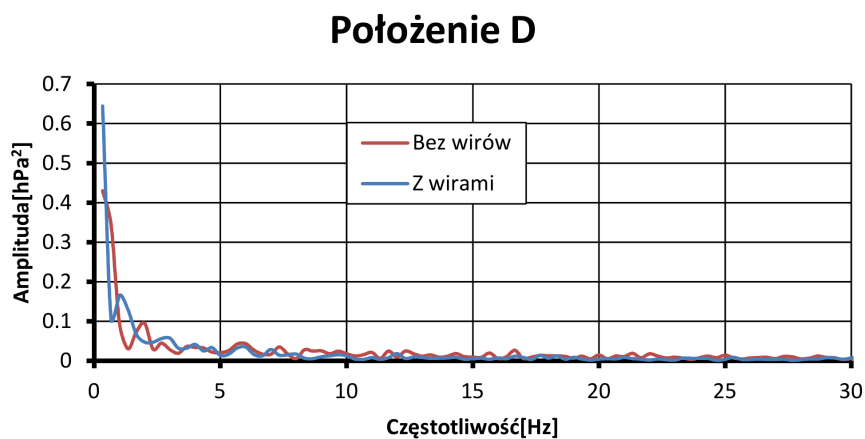
Rys. 5.5. Zestawienie uśrednionych widm mocy oscylacji w położeniu **B**

Zamieszczony na rysunku 5.6 wykres przedstawia uśrednione widma mocy w położeniu C.



Rys. 5.6. Zestawienie uśrednionych widm mocy oscylacji w położeniu C

W ostatnim z punktów pomiarowych (położenie D) uzyskano uśrednione widma mocy przedstawione na rysunku 5.7).



Rys. 5.7. Zestawienie uśrednionych widm mocy oscylacji w położeniu D

Tabela 3 zawiera zestawienie wielkości średniej oscylacji dla przypad-

ków, których dotyczą powyższe widma mocy (rysunek 5.4, rysunek 5.5, rysunek 5.6, rysunek 5.7), oraz dodatkowo dla częstotliwości pomiaru 10 kHz, 5 kHz, 2 kHz, 512 Hz i 102 Hz. Dla każdego przypadku wyznaczona została także procentowa, względna zmiana średniej oscylacji spowodowana aktywnością generatorów wirów.

Tabela 3. Wpływ obecności wirów na średnią oscylację ciśnienia

	Polozenie A			Polozenie B			Polozenie C			Polozenie D		
	Bez wirów	Z wirami	Zmiana średniej oscylacji ciśnienia	Bez wirów	Z wirami	Zmiana średniej oscylacji ciśnienia	Bez wirów	Z wirami	Zmiana średniej oscylacji ciśnienia	Bez wirów	Z wirami	Zmiana średniej oscylacji ciśnienia
20kHz	1,72	1,46	-14,82%	12	6,65	-44,53%	5,32	5,87	10,28%	5,54	5,28	-4,69%
10kHz	1,77	1,34	-24,67%	13	6,28	-51,72%	5,38	5,8	7,77%	5,53	5,26	-5,00%
5kHz	1,68	1,31	-22,39%	12,7	6,76	-46,76%	5,33	5,53	3,67%	5,46	5,28	-3,36%
2kHz	1,61	1,27	-21,27%	13,1	6,39	-51,31%	5,35	6,17	15,31%	5,6	5,32	-4,93%
512Hz	1,59	1,24	-21,88%	11,9	6,07	-48,97%	5,41	5,99	10,83%	5,56	5,31	-4,36%
102Hz	1,59	1,26	-21,13%	11,7	6,02	-48,47%	5,38	6,01	11,82%	5,62	5,55	-1,17%

Na podstawie przedstawionych wyników analizy przebiegów uśrednionych można stwierdzić, że:

- We wszystkich punktach poza punktem oderwania zastosowanie generatorów wirów powoduje zmniejszenie średniej oscylacji ciśnienia. Oznacza to, że wprowadzenie dominującej struktury wirowej do warstwy przyściennej zmniejsza oscylacje ciśnienia statycznego.
- W punkcie C (oderwanie) użycie generatorów wirów powoduje wzrost oscylacji o 10%. Tendencję tą można wiązać z widocznym na wizualizacji olejowej (podrozdział 4.5) wpływem wirów na ten obszar przepływu. Przejawia się on widoczną zmianą struktury oderwania z "bąbla oderwania" na "poprzecinaną" ścieżkami wirowymi, oscylującą strukturę komórkową o znacznie zredukowanej wielkości w stosunku do przepływu bez wirów.

- Najsilniejsze oscylacje występują w punkcie odpowiadającym położeniu fali uderzeniowej. Średnia oscylacja w tym położeniu jest o co najmniej 100% większa niż w pozostałych położeniach.
- Najsilniejszy efekt wywierają generatory wirów w punkcie **B** odpowiadającym położeniu fali uderzeniowej, gdzie następuje redukcja oscylacji o 50%.
- W punkcie **A** położonym powyżej fali redukcja oscylacji po uruchomieniu generatorów wirów wynosi około 20%.
- W punkcie **D**, czyli poniżej fali i przyłgnięcia redukcja oscylacji związana z aktywnością generatorów wirów wynosi około 4%. Nie jest to duża wartość, została uzyskana na podstawie porównywania danych uśrednianych, dotyczy punktu za falą i obszarem oderwania. Należy traktować ją z dużą ostrożnością, jednak wskazuje ona na zmniejszenie oscylacji także w tym położeniu.

5.2 Oscylacje fali uderzeniowej

Pomiary optyczne oscylacji fali uderzeniowej prowadzono przy częstotliwościach zapisu 102 Hz, 512 Hz, 2 kHz, 5 kHz oraz 10 kHz. Częstotliwości te korespondują z częstotliwościami pomiarów oscylacji ciśnienia statycznego z rozdziału 5.1, dotyczą także tej samej geometrii generatorów, czyli standardowych generatorów wirów o powiększonej średnicy⁴

Aby uzyskać wyniki komplementarne tych wyników, także tutaj do badań wybrano przypadek powiększonych, nieoptymalizowanych generatorów wirów. W tabeli 4 przedstawiona jest macierz wykonanych pomiarów.

Tabela 4. Wykonane szybkie filmy wizualizacji "Schlieren"

Bez wirów		Stopa lambda dolna	Fala główna	"Górna stopa lambda"	Z wirami		Stopa lambda dolna	Fala główna	"Górna stopa lambda"
102Hz	I.1	✓	✓	✓	102Hz	II.1	✓	✓	✓
	I.2	✓	✓	✓		II.2	✓	✓	✓
	I.3	✓	✓	✓		II.3	✓	✓	✓
	I.4	✓	✓	✓		II.4	✓	✓	✓
	I.5	✓	✓	✓		II.5	✓	✓	✓
512Hz	I.6	✓	✓	✓	512Hz	II.6	✓	✓	✓
	I.7	✓	✓	✓		II.7	✓	✓	✓
	I.8	✓	✓	✓		II.8	✓	✓	✓
	I.9	✓	✓	✓		II.9	✓	✓	✓
	I.10	✓	✓	✓		II.10	✓	✓	✓
2000Hz	I.11	✓	✓	✗	2000Hz	II.11	✓	✓	✗
	I.12	✓	✓	✗		II.12	✓	✓	✗
	I.13	✓	✓	✗		II.13	✓	✓	✗
	I.14	✓	✓	✗	5000Hz	II.14	✓	✗	✗
	I.15	✓	✓	✗		II.15	✓	✗	✗
5000Hz	I.16	✓	✗	✗	II.16	✓	✗	✗	
	I.17	✓	✗	✗	II.19	✗	✓	✗	
	I.18	✓	✗	✗	II.20	✗	✓	✗	
	I.20	✗	✓	✗	II.21	✗	✓	✗	
	I.21	✗	✓	✗	10000Hz	II.17	✓	✗	✗
	I.22	✗	✓	✗		II.22	✗	✓	✗
10000Hz	I.19	✓	✗	✗					
	I.23	✗	✓	✗					

⁴Przypadek **D** $\{\phi=0,8 \text{ mm}, \alpha = 45^\circ, \theta = 90^\circ, C_q = 1,0, X_{Shock} = 237,5 \text{ mm}, k=8 \text{ mm}\}$

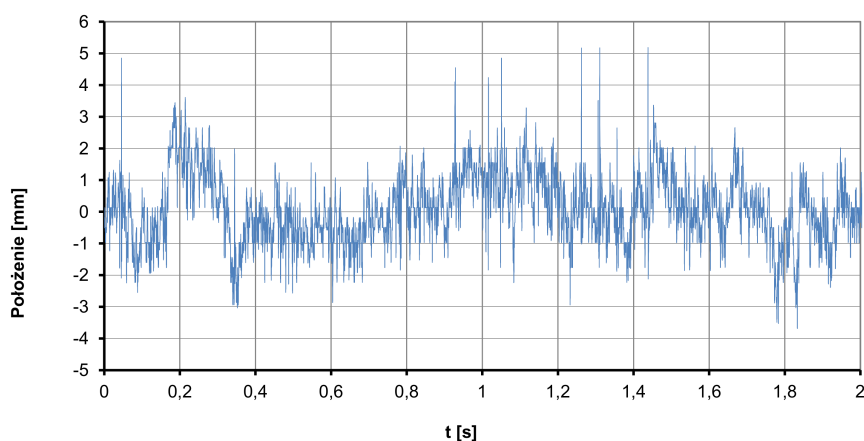
Zgodnie z przedstawionym wcześniej opisem⁵ przy wysokich częstotliwościach zapisu konieczne jest zmniejszenie zapisywanego przez kamerę obszaru. Skutkiem tego zapis obrazu obejmującego jednocześnie wszystkie badane elementy (główną falę uderzeniową i stopę λ) był możliwy z częstotliwością do 2 kHz. Pomiarów dla większych prędkości zapisu umożliwiały zapis albo stopy λ , albo fali głównej. Dlatego dla częstotliwości zapisu większej niż 2 kHz nie była możliwa analiza wzajemnych ruchów tych elementów podczas przepływu, jako że zapis ich położenia nie odbywał się jednocześnie, ale w kolejnych przepływach. Przedstawione w tej części wykresy dotyczą pomiarów z najwyższą dostępną częstotliwością wynoszącą 2 kHz oraz przepływu bez aktywnych generatorów wirów. Dla lepszej ilustracji wpływu generatorów wirów na badane parametry, wyniki są przedstawione na wykresach i w tabelach porównawczych zestawiających odpowiadające sobie pomiary z aktywnymi i nieaktywnymi generatorami wirów. Do opisu niestacjonarności fali uderzeniowej zastosowano analizę Fouriera, podobnie, jak przy analizie oscylacji ciśnienia statycznego⁶.

⁵Opis ten zawiera podrozdział ??.

⁶Opisywanej w podrozdziale 5.1

5.2.1 Przednia fala

Na podstawie każdego z pomiarów wyznaczano przebieg położenia fali uderzeniowej w czasie. Przykładowy wykres dla przedniej fali stopy lambda dla przypadku I.11 ⁷ przedstawia rysunek 5.8.

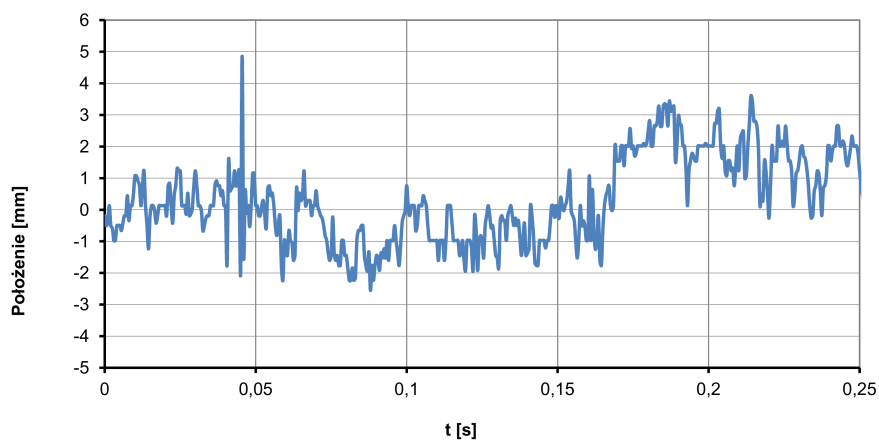


Rys. 5.8. Przebieg położenia przedniej fali, wybrane 2 sekundy

Ze względu na częstotliwość zapisu wynoszącą 2 kHz, przedstawiony na wykresie okres czasu obejmujący 2 sekundy jest relatywnie długi i z tego powodu nie są widoczne szczegóły.

⁷Stosowane w tym podrozdziale nazewnictwo jest zgodne z tabelą 4; opisywany pomiar dotyczył przepływu bez generatorów wirów przy częstotliwości zapisu kamery 2 kHz.

Aby wyraźnie przedstawić charakter ruchu fali przygotowano wykres obejmujący tylko 0,25 sekundy, przedstawiony na rysunku 5.9.



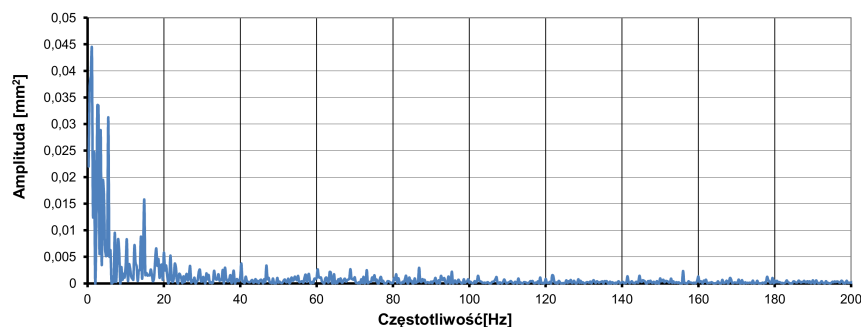
Rys. 5.9. Szczegółowy przebieg położenia przedniej fali, wybrane 0,25 skundy

Opisujące ten sygnał wielkości statystyczne zebrane są w tabeli 5.

Tabela 5. Statystyka ruchu przedniej fali

Średnie położenie [mm]	Położenie minimalne[mm]	Położenie maksymalne [mm]	Średnia oscylacja[mm]	RMS[mm]
47,745	44,0945	52,9134	0,78429	1,0164

Na podstawie analizowanego przebiegu wyznaczono widmo mocy zilustrowane na rysunku 5.10.

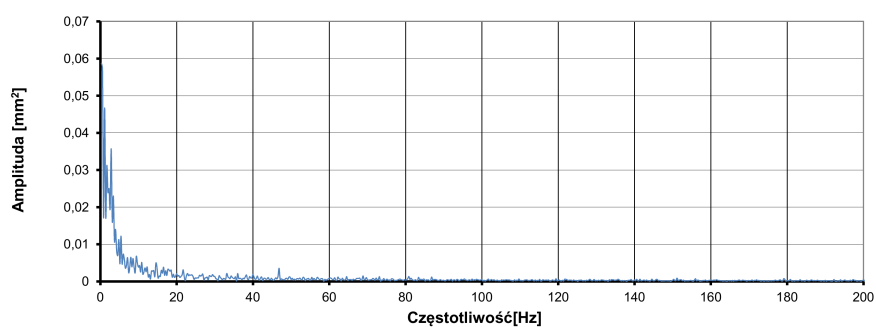


Rys. 5.10. Widmo mocy ruchu przedniej fali

Tak, jak przy badaniu oscylacji ciśnienia statycznego⁸, po wykonaniu tej analizy dla wszystkich wyników dotyczących danego przypadku nie zauważono częstotliwości charakterystycznych. Dlatego, analogicznie do wyżej przywoływanego podrozdziału, dalsze rozważania bazowały na wielkościach uśrednionych obliczanych na bazie wyników dla pięciu pomiarów wykonanych dla każdego z przypadków z tabeli 4 oraz na parametrach statystycznych.

⁸Podrozdział 5.1

Uśrednione widmo mocy dla rozważanego przypadku przedstawia rysunek 5.11.



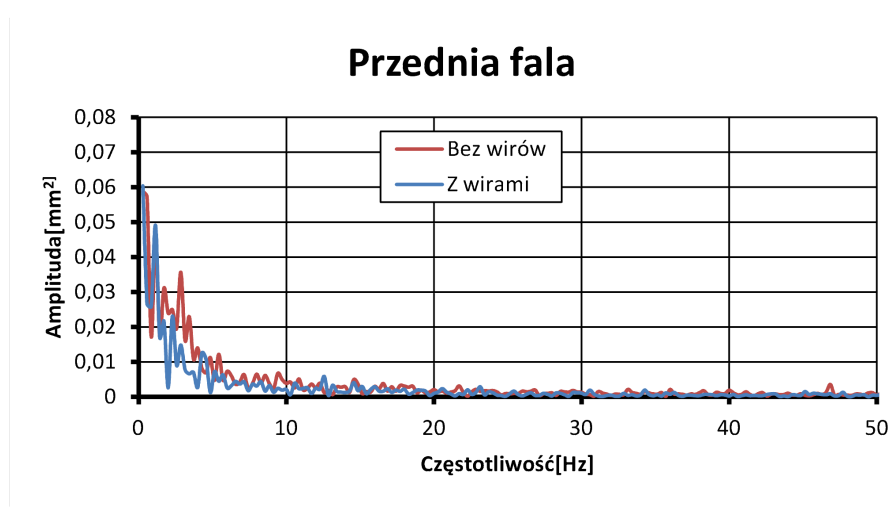
Rys. 5.11. Uśrednione widmo mocy przedniej fali

Parametry statystyczne uzyskane na podstawie pięciu pomiarów dla tego przypadku pomiarowego przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Uśredniona statystyka ruchu przedniej fali

	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Pomiar 4	Pomiar 5	Przebieg uśredniony
Średnie położenie[mm]	47,745	48,5413	49,9245	47,9594	48,1432	48,46268
Położenie minimalne[mm]	44,0945	45,0493	45,6693	44,4181	44,2604	44,69832
Położenie maksymalne [mm]	52,9134	52,86	54,9606	51,4398	53,8067	53,1961
Średnia oscylacja[mm]	0,78429	0,88945	0,86425	0,7073	0,88277	0,825612
RMS[mm]	1,0164	1,1121	1,093	0,8806	1,1563	1,05168

Podobnie jak przy wynikach pomiarów oscylacji ciśnienia statycznego⁹, składowe o częstotliwościach powyżej pewnej wartości (tutaj przyjęto 50 Hz) są bardzo niewielkie. Dlatego wykresy prównawcze przypadków różniących się aktywnością generatorów wirów będą obejmowały obszar od składowej stałej do 50 Hz. Zwiększy to ich czytelność, a nie wiąże się z pominięciem istotnych składowych. Taki wykres dla omawianego przypadku przedniej fali stopy lambda umieszczony jest na rysunku 5.12.



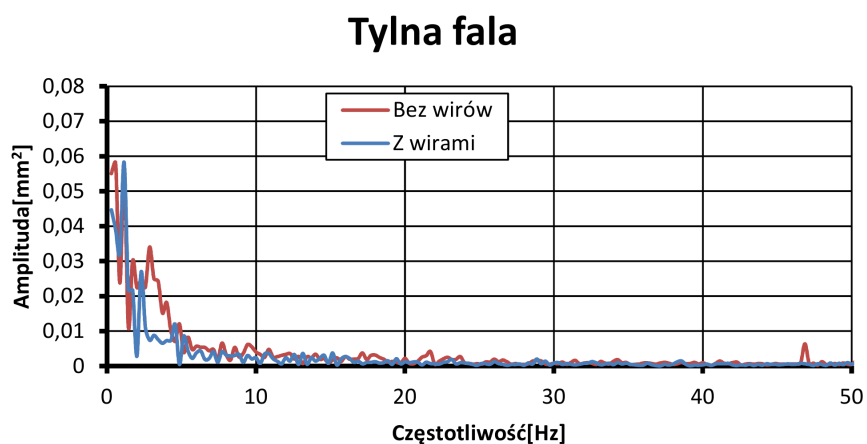
Rys. 5.12. Zestawienie uśrednionych widm mocy fali przedniej

⁹Podrozdział 5.1

5.2.2 Tylina fala

W części dotyczącej zarówno głównej, jak i tylnej fali zamieszczono tylko końcowe wyniki analizy, która przebiegała tak jak dla przedniej fali. Wyniki te są podstawą wniosków formułowanych w tym rozdziale, stąd ich obecność w tej części pracy. Wyniki etapów pośrednich nie są bezpośrednio analizowane ani interpretowane, co więcej charakter oscylacji tych fal jest taki sam jak fali przedniej. Dla zachowania kompletności jednak wszystkie wyniki pośrednich etapów analizy zamieszczono w dodatku 7.6.

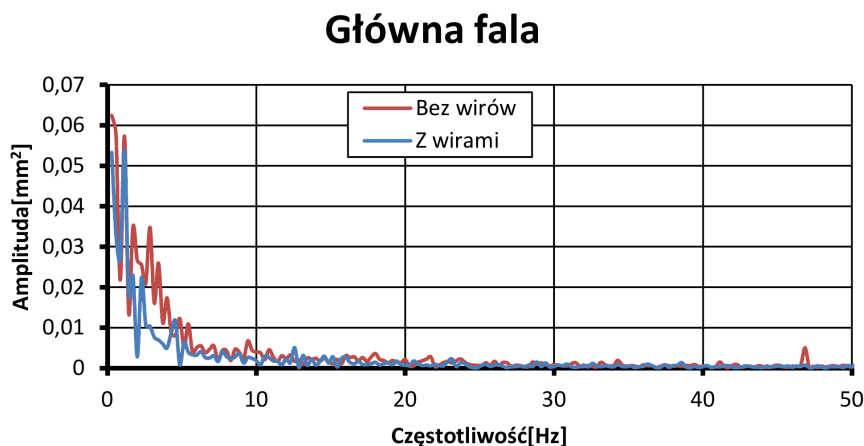
Zestawienie uśrednionych widm oscylacji przy aktywnych i wyłączonych generatorach wirów ilustruje wykres na rysunku 5.13.



Rys. 5.13. Zestawienie uśrednionych widm mocy fali tylnej

5.2.3 Główna fala

Stosując już opisane podejście wyznaczono uśrednione widma mocy oscylacji dla przypadku z i bez aktywnych generatorów wirów. Ich porównanie przedstawia wykres na rysunku 5.14.



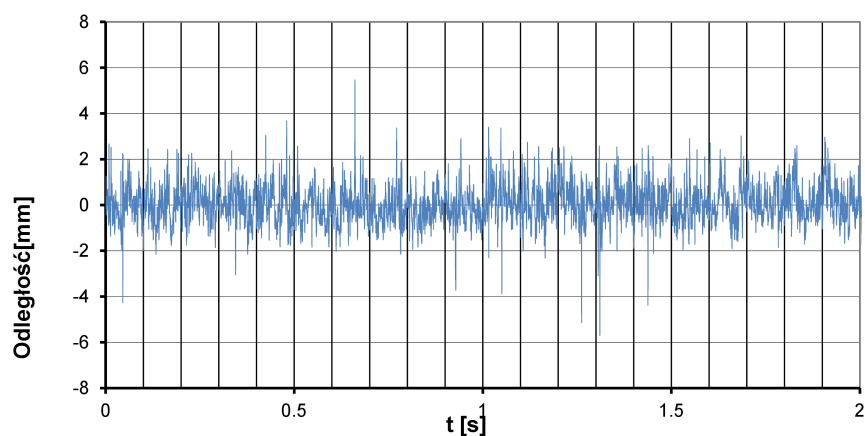
Rys. 5.14. Zestawienie uśrednionych widm mocy fali głównej

Na podstawie wyników dotyczących fali przedniej, tylnej i głównej można sformułować pewne wspólne dla nich wnioski.

- Oscylacje wszystkich fal są jakościowo podobne. Widma mocy mają podobny przebieg, tego samego rzędu amplitudy i przyjmują niezerowe wartości do częstotliwości około 50 Hz.
- W przebiegach nie są widoczne częstotliwości charakterystyczne.
- Uruchomienie generatorów wirów powoduje obniżenie się przebiegu widma mocy. Świadczy to o "uspokojeniu przepływu" i zmniejszeniu intensywności oscylacji.
- Aktywność generatorów wirów powoduje zmniejszenie średniej oscylacji.

5.2.4 Odległość pomiędzy falami

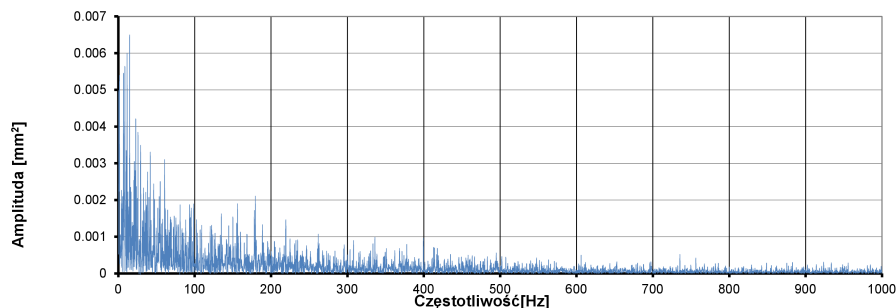
Na podstawie zarejestrowanych jednocześnie przebiegów położenia fali przedniej i tylnej została wyznaczona ewolucja odległości pomiędzy falami tworzącymi stopę lambda podczas trwania przepływu. Przedstawia ją w formie wartości wychylenia z pozycji średniej wykres na rysunku 5.15.



Rys. 5.15. Przebieg odległości pomiędzy falami, wybrane 2 sekundy

Przebieg tej odległości w czasie został poddany takiej samej analizie, jak pojedyncze fale.

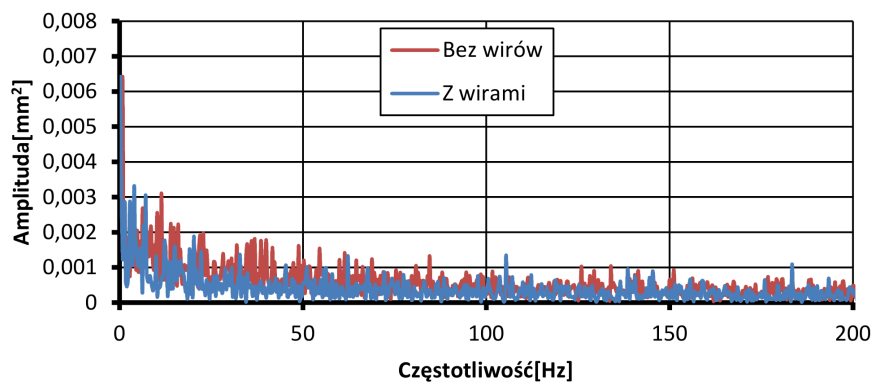
Przeprowadzono analizę Fouriera uzyskanego przebiegu i wyznaczono jego widmo mocy; ilustruje je rysunek 5.16.



Rys. 5.16. Widmo mocy odległości pomiędzy falami

Charakter uzyskanego widma mocy jest wyraźnie inny niż w przypadku pojedynczych fal tworzących stopę lambda. Porównanie uśrednionych widm dla przepływu bez wirów i z wirami ilustruje rysunek 5.17.

Odległość pomiędzy falami



Rys. 5.17. Zestawienie uśrednionych widm mocy odległości pomiędzy falami

Ilościowy wpływ wirów na średnią oscylację wszystkich badanych elementów, czyli fali głównej, przedniej, tylnej oraz odległości pomiędzy przed-

nią i tylną falą stopy lambda ilustrują dane zebrane w Tabeli 7.

Tabela 7. Wpływ wirów na oscylacje elementów układu falowego

Przednia fala			Odległość pomiędzy falami			Tylna fala			Główna fala		
Bez wirów	Z wirami	Zmiana średniej oscylacji	Bez wirów	Z wirami	Zmiana średniej oscylacji	Bez wirów	Z wirami	Zmiana średniej oscylacji	Bez wirów	Z wirami	Zmiana średniej oscylacji
0.83	0.7	-14.65%	0.66	0.58	-11.77%	0.76	0.72	-5.88%	0.76	0.63	-16.80%

Na podstawie przedstawionych w tym rozdziale wyników i ich analizy można uzasadnić poniższe wnioski dotyczące wpływu aktywności generatorów wirów na oscylację elementów fali uderzeniowej.

- W przebiegach nie są widoczne częstotliwości charakterystyczne.
- Oscylacje fali przedniej, tylnej i głównej są podobne pod względem widm mocy, które mają podobny przebieg, tego samego rzędu amplitudy i przyjmują niezerowe wartości do częstotliwości około 50 Hz.
- Zupełnie odmienny jest charakter oscylacji odległości pomiędzy przednią a tylną falą stopy lambda. Dla tej wielkości widmo mocy ma inny kształt obwiedni, mniejszą o rząd wielkości amplitudę i bardzo szerokie pasmo, widoczna jest znacząca zawartość wszystkich, możliwych do zidentyfikowania składowych wysokoczęstotliwościowych¹⁰.
- Uruchomienie generatorów wirów powoduje obniżenie się przebiegu widma mocy. Oznacza to "uspokojenie przepływu" i zmniejszenie intensywności oscylacji.

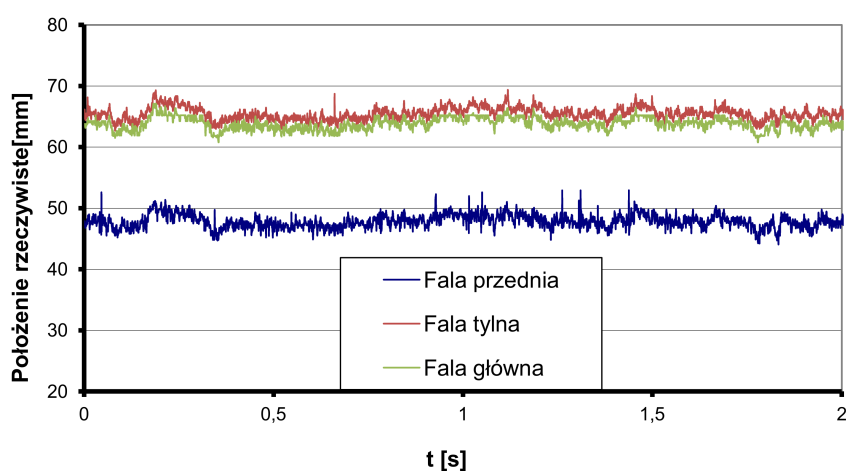
¹⁰Dokładna analiza ewolucji odległości elementów stopy lambda jest przedstawiona w rozdziale 5.3.

- Aktywność generatorów wirów powoduje zmniejszenie średniej oscylacji. Ta obserwacja w połączeniu z wynikami dotyczącymi oscylacji ciśnienia statycznego pozwalają stwierdzić, że znaczącym źródłem niestacjonarności fali oderzeniowej jest niestacjonarność warstwy przyściennej i obszaru oderwania.

5.3 Kształt fali podczas oscylacji

Analiza kształtu była prowadzona na podstawie danych prezentowanych w podrozdziale 5.2, uzyskanych z pomiarów optycznych prowadzonych z częstotliwością 2 kHz. Jak wskazano wcześniej, jest to najwyższa częstotliwość, przy której możliwy był zapis obszaru z widoczną falą główną i stopą lambda. Rejestracja takiego obszaru umożliwia równoczesne wyznaczenie położenia wszystkich trzech fal składowych w czasie przepływu i pozwala na prześledzenie ewolucji kształtu stopy lambda.

Na wykresie z rysunku 5.18 zestawione są położenia fali przedniej, tylnej i głównej w czasie pomiaru dla tego samego przypadku¹¹, który był analizowany w rozdziale 5.2.

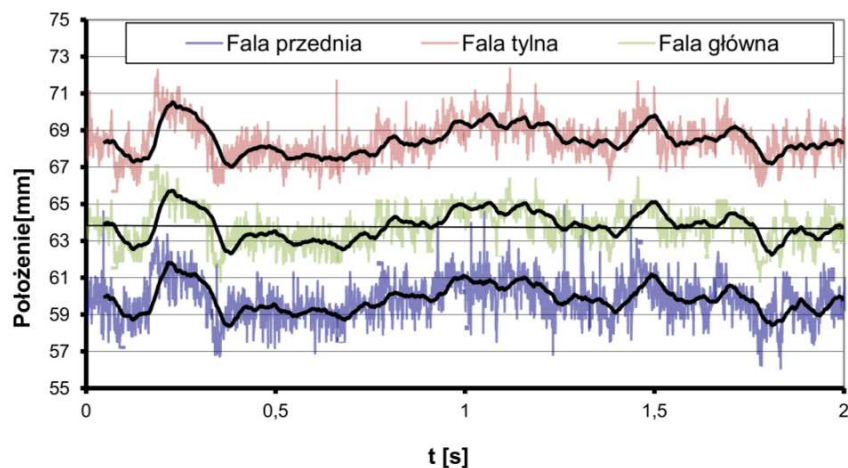


Rys. 5.18. Przebiegi położenia fal

Widoczne jest, że wszystkie fale (przednia, główna i tylna) poruszają się w sposób bardzo skorelowany. Dla wyraźniejszego przedstawienia tej zgodności na wykresie z rysunku 5.19 przedstawione są przebiegi uzyskane przez dodanie do przebiegów zarejestrowanych (umieszczonych na rysunku 5.18)

¹¹Przypadek I.11 zgodnie z tabelą 4.

wybranych arbitralnie stałych wartości. Wartości te dobrano tak, aby "odsunąć" nakładające się na siebie przebiegi; stąd wykres ten ma wartość tylko poglądową.¹²

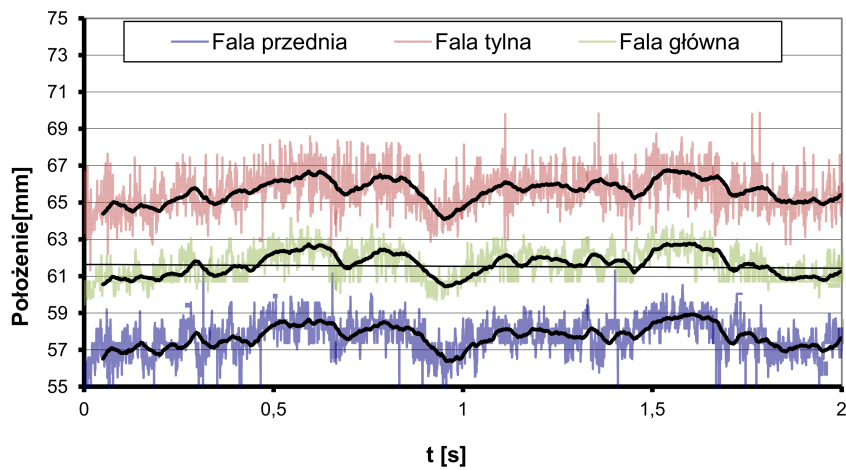


Rys. 5.19. Uśrednione, przesunięte przebiegi położenia fal

Dodatkowo ciągłą czarną linią zaznaczono średnią kroczącą wyznaczaną na podstawie 100 poprzedzających wartości dla każdego z przebiegów. Wyraźnie widoczne jest, że wszystkie wykazują bardzo podobną ścieżkę ruchu w układzie (x,t).

¹²Kształty przebiegów są zgodne z rezultatami pomiarów, jednak celowo zafałszowane jest ich wzajemne położenie dla uzyskania dobrej ilustracji zgodności przebiegów.

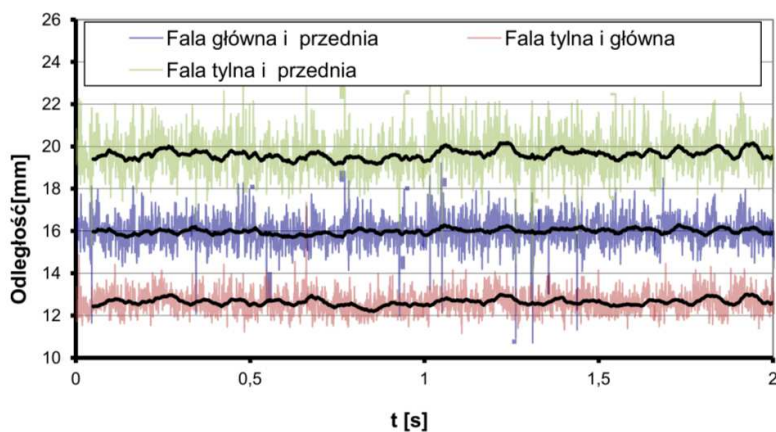
Wykres dla aktywnych generatorów wirów przedstawia rysunek 5.20.



Rys. 5.20. Uśrednione, przesunięte przebiegi położenia fal przy obecności wirów

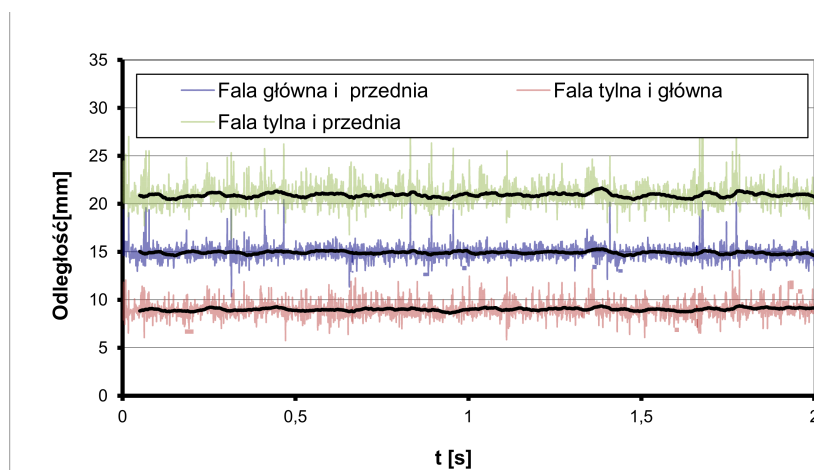
Wyraźnie widoczne jest, że dla aktywnych generatorów wirów występuje silna korelacja w ruchu fal tworzących fałę uderzeniową (fal przednia, fal główna i fala tylna), tak samo jak dla przypadku referencyjnego.

Dalsza analiza dotyczyła wzajemnych odległości pomiędzy falami. Analogicznie do poprzedniego sporządzony wykres dotyczący wzajemnych odległości fal w przypadku referencyjnym przedstawia rysunek 5.21.



Rys. 5.21. Przesunięte przebiegi odległości pomiędzy falami

Komplementarny wykres ilustrujący przypadek z aktywnymi generatorami wirów przedstawia rysunek 5.22.



Rys. 5.22. Uśrednione, przesunięte przebiegi odległości fal przy obecności wirów

Na podstawie analizy powyższych przebiegów¹³ można zauważyć, że:

- Elementy tworzące układ fali ze stopą λ poruszają się w sposób skorelowany.
- Fala główna łącznie ze stopą λ porusza się w sposób zbliżony do ciała sztywnego. Duże przesunięcia występują jednocześnie we wszystkich punktach należących do fali. Można z tego wnioskować, że kąty pomiędzy falami są niezmiennie podczas ruchu całego układu fal.
- Występują niewielkie oscylacje wzajemnego położenia fal, ale wydają się one nie mieć związku z ruchem całego układu.
- Obecność wirów powoduje zmniejszenie niewielkich oscylacji kształtu układu falowego.

¹³Wszystkie wykresy dla komplementarnego przypadku z aktywnymi generatorami wirów (przypadek II_11) zawiera dodatek 7.9.

Rozdział 6

Zakończenie

6.1 Wnioski końcowe

Uogólniając przedstawione w rozdziale 4 i w rozdziale 5 analizy i wnioski dotyczące poszczególnych typów pomiarów, można uzasadnić wnioski które wydają się kluczowe dla projektowania geometrie strumieniowych generatorów wirów wzdłużnych.

- Kluczowe znaczenie dla efektywności oddziaływania generatorów na przepływ ma ich konfiguracja geometryczna. Odpowiedni dobór kątów określających generatory pozwala zmniejszyć zarówno średnicę generatorów, jak i wydatek masowy konieczne do utrzymania poziomu ich działania.
- Drugim w kolejności czynnikiem jest ilość przepływającego przez nie powietrza, czyli impuls wprowadzany przez generatory do przepływu.
- Słabsza, ale nadal wyraźna jest zależność efektywności działania wirów od ich odległości do fali uderzeniowej.
- Powyżej fali uderzeniowej, w obszarze fali uderzeniowej oraz poniżej obszaru przyłgnięcia zastosowanie generatorów wirów powoduje zmniejszenie oscylacji ciśnienia statycznego na dolnej ściance dyszy.

Oznacza to, że poprzez wprowadzenie dominującej struktury wirowej do warstwy przyściennej następuje zmniejszenie poziomu turbulencji, co przekłada się na redukcję oscylacji ciśnienia statycznego. Największa względna redukcja oscylacji występuje w obszarze fali uderzeniowej (występują tam najsilniejsze oscylacje ciśnienia statycznego spośród wszystkich mierzonych punktów). W tym punkcie uruchomienie generatorów wirów powoduje redukcję średniej oscylacji o 50%. W punktach położonych powyżej fali i poniżej obszaru przyłgnięcia obecność wirów także przekłada się na zmniejszenie średniej oscylacji ciśnienia statycznego. Dla punktu powyżej fali jest to redukcja o około 20%, a poniżej punktu przyłgnięcia tylko około 4%. Tak niską zmianę poniżej obszaru przyłgnięcia można wiązać z tym, że w tym obszarze wiry są już bardzo słabe.

Poza powyższymi, w świetle przeprowadzonych pomiarów i uzyskanych wyników, można postawić także następujące wnioski.

- Obecność wirów powoduje, że fala uderzeniowa przestaje być prostopadła do przepływu. Przepływ przestaje być symetryczny, jego obraz na ścianie dyszy nie jest taki sam przy obydwóch narożach tunelu.
- Wpływ wirów jest widoczny także poniżej fali uderzeniowej. Ich aktywność powoduje zmianę profilu warstwy przyściennej; widoczny jest transport pędu z warstw wyższych do niższych i przyspieszenie dolnych obszarów warstwy przyściennej. Łącznie z wynikami wizualizacji olejowej oznacza to, że możliwe jest takie zaprojektowanie generatorów, aby wpływały one na przepływ poza warstwą przyścienną i obszarem oderwania, albo nie. Jest to bardzo pożądana cecha znacznie poszerzająca obszar zastosowań tej metody kontroli przepływu.
- Każda z badanych konfiguracji generatorów wirów powoduje zwiększenie się efektywnego przekroju dyszy daleko (55 mm) poniżej skoku

ciśnienia na fali uderzeniowej.

- W obszarze powyżej fali uderzeniowej obecność wirów przekłada się na pogorszenie parametrów warstwy. Widoczny jest przyrost wartości grubości warstwy, grubości straty przekroju i grubości straty pędu. Ze względu na wprowadzenie do warstwy periodycznej struktury analizy należy poszerzyć o badanie rozkładów parametrów w położeniach pomiędzy otworami tworzącymi generator. Dane literaturowe uwzględniające zmienność w kierunku poprzecznym potwierdzają, że aktywność generatorów wirów powoduje średni przyrost grubości warstwy przyściennej o 10% w tym obszarze.
- W trawersie 30 mm poniżej fali w profilach warstw przyściennych widoczna jest bardzo znacząca redukcja wielkości oderwania oraz przyspieszenia przepływu w bezpośrednim sąsiedztwie ścianki, maleje także grubość straty przekroju.
- W ostatnim z badanych trawersów, czyli 55 mm poniżej fali uderzeniowej (oznacza to nadal obszar oderwania w przepływie referencyjnym) wyraźnie widoczne jest dalsze przyspieszenie przepływu w dolnych obszarach warstwy oraz całkowita eliminacja bąbla oderwania (dla wszystkich badanych konfiguracji generatorów).
- Wszystkie badane generatory wirów powodują znaczącą redukcję długości oderwania w stosunku do przepływu referencyjnego (od 30% do około 50%).
- Oddziaływanie wirów może wywołać jakościową zmianę charakteru obszaru oderwania na mniej korzystną i wywołującą przyrost oscylacji ciśnienia statycznego.
- Wysokość stopy lambda jest redukowana (między 10% a 35%) przez obecność wirów. Relacja wielkości tej redukcji między kolejnymi przy-

padkami odpowiada wielkości redukcji obszaru oderwania. Zgodność ta wynika ze związku wielkości oderwania z wielkością skoku ciśnienia na głównej fali, który determinuje odległość między przednią i tylną falą stopy lambda i przez to jej wysokość.

- Fala łącznie ze stopą lambda porusza się w sposób zbliżony do ciała sztywnego. Duże przesunięcia występują jednocześnie we wszystkich punktach należących do stopy lambda. Można z tego wnioskować, że nie deformuje się ona znacząco podczas ruchu.
- Zupełnie inny charakter wykazuje oscylacja odległości pomiędzy przednią a tylną falą stopy lambda. Widmo mocy ma inny kształt obwiedni, mniejszą o rząd wielkości amplitudę i bardzo szerokie pasmo częstotliwości. Opisywane przez te cechy niewielkie oscylacje kształtu układu (wzajemnego położenia fal) nie są skorelowane z ruchem całego układu. Rozmiar fali zmienia się w zależności od jej chwilowego położenia, ale nie zmienia się jej kształt.
- Uaktywnienie generatorów wirów powoduje zmniejszenie średniej oscylacji zarówno "całego układu falowego", jak i jego kształtu. Ta obserwacja w połączeniu z wynikami dotyczącymi oscylacji ciśnienia statycznego pozwalają stwierdzić, że znaczącym źródłem niestacjonarności fali oderzeniowej jest niestacjonarność warstwy przyściennej i obszaru oderwania.
- W obszarze bąbla oderwania w badanym przypadku, czyli $\mathbf{D} \phi=0,8$ mm, $\alpha = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $C_q = 1,0$, $X_{Shock} = 237,5$ mm, $k=8$ mm) uruchomienie generatorów wirów zwiększa średnią oscylację ciśnienia statycznego. Zachowanie to wyjaśniają wyniki wizualizacji olejowej. Pokazują one, że w tym przypadku następuje zmiana struktury obszaru oderwania z typowego bąbla oderwania w poprzecinaną ścieżkami wirowymi strukturę klastrową.

6.2 Podsumowanie

Praca opisuje cykl badań eksperymentalnych dotyczących wpływu generatorów wirów na niestacjonarne oderwanie wywołane falą uderzeniową, w których autor aktywnie uczestniczył.

Zakres materiału został dobrany taki sposób, że ilustruje on wpływ różnych konfiguracji generatorów wirów na przepływ naddźwiękowy z falą uderzeniową w dyszy de Laval'a. Efekt działania wirów był analizowany na podstawie parametrów takich jak: rozkład liczby Macha, wielkość obszaru oderwania, profil warstwy przyściennej oraz geometria fali uderzeniowej.

Dla konfiguracji generatora wirów, która wywołała najsilniejszą zmianę w obszarze oderwania, wykonano pomiary i analizy wpływu wirów na efekty niestacjonarne występujące w przepływie. Analizowano oscylację ciśnienia statycznego w różnych obszarach przepływu oraz oscylację fal uderzeniowych tworzących stopę lambda i ewolucję kształtu stopy lambda podczas jej ruchu.

Elementem opisywanych prac było także poznanie, opanowanie i wdrożenie przez autora dwóch nowych w skali kraju metod pomiarowych. Są to metody pozwalające na wizualizację ciśnienia statycznego na powierzchni opływanej przez przepływy oraz na wyznaczenie rozkładu parametrów gazu na podstawie zdjęć interferometrycznych. Do obydwóch metod autor przygotował komplet narzędzi numerycznych. Obydwie metody zostały doprowadzone do etapu umożliwiającego wykorzystanie ich w dalszych badaniach, oraz zweryfikowano prawidłowość otrzymywanych przy ich użyciu wyników.

Zgromadzone dane pozwoliły przeprowadzić analizę wpływu konfiguracji wirów na interesujące parametry przepływu oraz postawić i uzasadnić przedstawione w rozdziale 6.1 wnioski z niej wynikające.

Uzyskano nowe informacje dotyczące wpływu wirów na niestacjonarność elementów przepływu. Wskazują one na duży potencjał zastosowania generatorów wirów do redukcji rozmiaru oraz niestacjonarności obszaru oderwa-

nia. Wyniki te mogą być przyczynkiem do dalszych badań nad lepszym zrozumieniem zależności rządzących opisywanymi zjawiskami. Być może odpowiednio dobrane generatory wirów pozwolą na sterowanie nie tylko wielkością obszaru oderwania, ale także umożliwią przewidywanie i kontrolowania częstotliwości charakterystycznych niestacjonarności która zawsze towarzyszy przepływom z falami uderzeniowymi.

Rozdział 7

Dodatki

7.1 Położenia punktów pomiaru ciśnienia statycznego

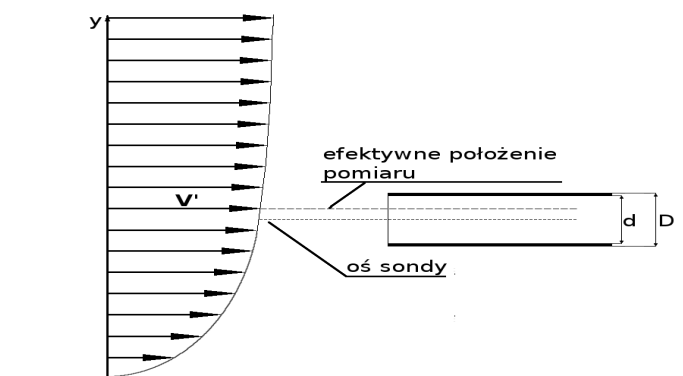
W Tabeli 1 przedstawiono położenia punktów pomiaru ciśnienia statycznego dla wszystkich przypadków pomiarowych.

Tabela 1. Położenia punktów pomiaru ciśnienia statycznego

		Położenia punktów pomiaru ciśnienia statycznego					
		Bez fali uderzeniowej	Referencyjny	$\phi=0.5, \alpha=45, \theta=90, k=5$	$\phi=0.5, \alpha=30, \theta=75, k=5$	$\phi=0.8, \alpha=45, \theta=90, k=8$	$\phi=0.5, \alpha=30, \theta=75, k=5, Cq=0.5$
Punkty przed płytką	0	0	0	0	0	0	0
	50	50	50	50	50	50	50
	100	100	100	100	100	100	100
	150	150	150	150	150	150	150
	187.5	192.5	187.5	187.5	192.5	187.5	187.5
Położenie generatorów wirów to X=190 dla wszystkich przypadków pomiarowych.							
Punkty na płycie pomiarowej	192.5	197.5	192.5	192.5	197.5	192.5	192.5
	197.5	202.5	197.5	197.5	202.5	197.5	197.5
	202.5	207.5	202.5	202.5	207.5	202.5	202.5
	207.5	212.5	207.5	207.5	212.5	207.5	207.5
	212.5	217.5	212.5	212.5	217.5	212.5	212.5
	217.5	222.5	217.5	217.5	222.5	217.5	217.5
	222.5	227.5	222.5	222.5	227.5	222.5	222.5
	227.5	232.5	227.5	227.5	232.5	227.5	227.5
	232.5	237.5	232.5	232.5	237.5	232.5	232.5
	237.5	242.5	237.5	237.5	242.5	237.5	237.5
	242.5	247.5	242.5	242.5	247.5	242.5	242.5
	247.5	252.5	247.5	247.5	252.5	247.5	247.5
	252.5	257.5	252.5	252.5	257.5	252.5	252.5
	257.5	262.5	257.5	257.5	262.5	257.5	257.5
	262.5	267.5	262.5	262.5	267.5	262.5	262.5
	267.5	272.5	267.5	267.5	272.5	267.5	267.5
	272.5	277.5	272.5	272.5	277.5	272.5	272.5
	277.5	282.5	277.5	277.5	282.5	277.5	277.5
	282.5	287.5	282.5	282.5	287.5	282.5	282.5
	287.5	292.5	287.5	287.5	292.5	287.5	287.5
292.5		292.5	292.5		292.5	292.5	

7.2 Analiza wpływu rozmiaru sondy na pomiary warstw przyściennych

Ten rozdział przedstawia analizę wpływu skończonej średnicy sondy użytej do pomiaru ciśnienia w warstwie przyściennej na uzyskiwane wartości. Ze względu na kołowy kształt sondy w obszarze w pobliżu ścianki gdzie występuje silna pionowa niejednorodność prędkości przepływu występuje zjawisko przesunięcia "efektywnego punktu pomiaru" względem geometrycznej osi sondy. Powoduje to, że zmierzona wartość ciśnienia nie odpowiada wartości z geometrycznego środka przekroju wlotowego sondy. Odpowiada ona ciśnieniu w położeniu przesuniętym w kierunku większych wartości prędkości. Wielkość δ tego przesunięcia może być opisana relacją pomiędzy parametrami geometrycznymi sondy, ciśnieniem i składową gradientu ciśnienia prostopadłą do ścianki. Schematycznie powyższe zjawisko przedstawia rysunek 7.1.



Rys. 7.1. Efektywne położenie punktu pomiaru ciśnienia przy skończonej średnicy sondy

Następująca zależność pozwala wyznaczyć wartość parametru δ :

$$\frac{\delta}{D} = 0.131 + 0.082 \frac{d}{D}. \quad (1)$$

Ma on znaczący wpływ na wynik pomiaru w obszarze, w którym:

$$\frac{D}{q} \frac{dq}{dy} = 0.1 \approx 1.2, \quad (2)$$

gdzie

$$q = \frac{\rho V^2}{2}. \quad (3)$$

W celu łatwiejszej interpretacji fizycznej wzór 2 można zapisać w postaci:

$$D = \alpha \left(\frac{dy}{\frac{dq}{q}} \right). \quad (4)$$

Wyraz w nawiasie po prawej stronie jest wyznaczoną w przybliżeniu liniowym odległością, na której względna zmiana q wynosi 1, a α to parametr skalujący. Wybór $\alpha = 0.1$ oznacza wybór sondy o średnicy D , na której ciśnienie zmieni się o 10 %. Przyjęcie większej wartości tego parametru dopuszcza większą zmianę ciśnienia na odległości odpowiadającej średnicy sondy D . Oznacza to większe rozbieżności pomiędzy położeniem geometrycznym osi sondy i efektywnym położeniem odpowiadającym mierzonemu w tym położeniu sondy ciśnieniu. Zgodnie z oczekiwaniem, zależność ta wskazuje na konieczność zmniejszania średnicy użytej sondy przy pomiarach w obszarach silnych gradientów ciśnienia. Na podstawie powyższej argumentacji można przyjąć, że istotny błąd związany z tym zjawiskiem powstaje tylko w obszarze silnych gradientów prędkości, a więc w pobliżu ścianki. Dla kompletności rozważań na podstawie powyższych zależności przeprowadzono analizę wpływu opisywanego zjawiska na obliczane parametry. Do analizy wybrano dwie warstwy przyścienne:

- Przypadek odniesienia, warstwa przed falą uderzeniową,
- Przypadek generatorów wirów o średnicy 0,8 mm, za linią przyłgnięcia.

Ze względu na trudności związane z dokładnym pomiarem rzeczywistej średnicy wewnętrznej otworu wlotowego analizę przeprowadzono dla dwóch

przyjętych wartości średnicy wewnętrznej: $d=0,4$ mm i $d=0,3$ mm. Wyniki obliczeń przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Wpływ rozmiarów sondy na wyniki pomiarów

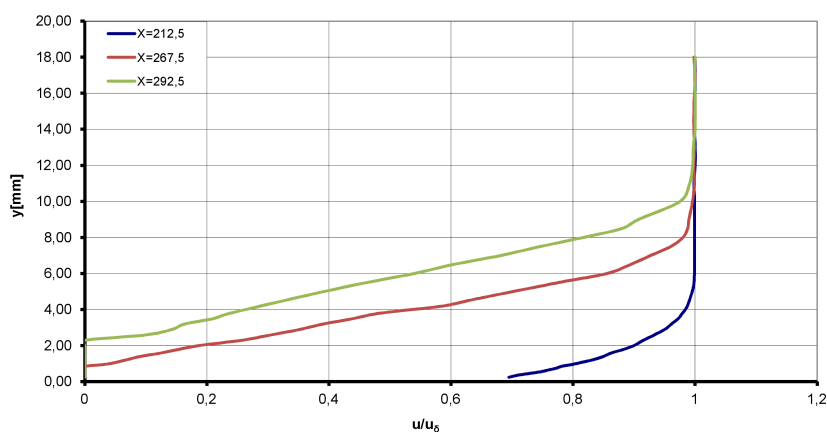
		Przypadek referencyjny			Generatory 0.8mm			
		geometryczne	d=0.4 mm	d=0.3 mm	geometryczne	d=0.4 mm	d=0.3 mm	
	Przesunięcie środka geometrycznego i efektywnego punktu	[mm]	0	0.098	0.098	0	0.098	0.09
	Zakres istotności korekty	[mm]	1.8			7.5		
Parametry warstwy przyściennej	δ	[mm]	4.94	4.94	4.94	10.36	10.36	10.36
	δ_1	[mm]	0.8682	0.912	0.909	4.5052	4.574	4.568
	δ_2	[mm]	0.3616	0.364	0.364	1.4166	1.419	1.419
	H_{12}		2.401	2.508	2.499	3.1804	3.223	3.22
Błąd względny	$\Delta(\delta)$	[%]	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	$\Delta(\delta_1)$	[%]	0.00%	5.02%	4.73%	0.00%	1.53%	1.40%
	$\Delta(\delta_2)$	[%]	0.00%	0.55%	0.61%	0.00%	0.17%	0.16%
	$\Delta(H_{12})$	[%]	0.00%	4.44%	4.08%	0.00%	1.35%	1.25%

Obliczone wartości wskazują, że zastosowana sonda nie powoduje znaczących błędów w wyznaczaniu grubości warstwy przyściennej. Wpływ tego błędu na parametry opisujące warstwę przyścienną nie jest większy niż 5%, a w większości przypadków jest zdecydowanie mniejszy. Zgodnie z oczekiwaniami, przy mniejszym przekroju wlotowym sondy wynikające z niego przesunięcie jest mniej znaczące (pomiar zbliża się do pomiaru punktowego w osi sondy). Przedstawione w tabeli wyniki dotyczą analizy przy $\alpha = 0.1$, czyli bardzo silnego kryterium prawidłowości pomiaru. Przy osłabieniu tego kryterium do $\alpha = 0.35$, czyli około 30% opisywane zjawisko nie ma żadnego wpływu na pomiary w warstwie przed falą uderzeniową, a w warstwie za falą jego wpływ sięga do wysokości 1 mm. W rozważanych przypadkach błąd powodowany pomiarem sondą o skończonej średnicy przekroju wlotowego nie ma istotnego znaczenia.

7.3 Warstwy przyścienne, kompletne wyniki

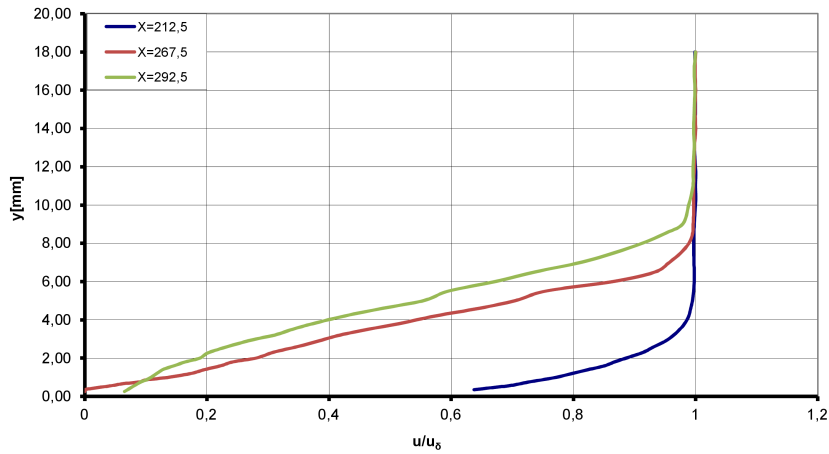
W tym rozdziale przedstawione są wykresy porównawcze profili prędkości w warstwie przyściennej dla wszystkich przypadków pomiarowych. Sporządzone wykresy przedstawiają zestawienia profili prędkości w warstwie przyściennej w kolejnych trawersach dla każdej z konfiguracji generatora wirów. Są one dodatkiem do rozdziału 4.4, gdzie skupiono się na wykresach porównujących profile w ramach kolejnych trawersów.

Wykres 7.2 dotyczy przypadku referencyjnego, z widocznym oderwaniem rozciągającym się powyżej 30 mm i 55 mm poniżej fali uderzeniowej.



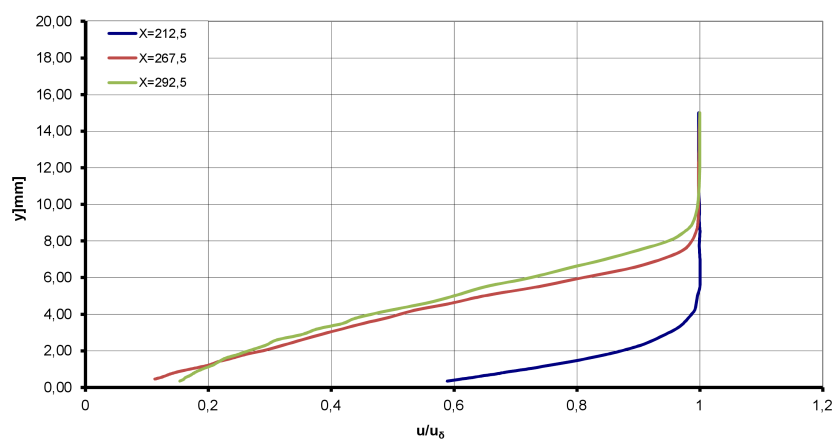
Rys. 7.2. Zestawienie rozkładów prędkości w warstwie przyściennej dla przypadku odniesienia $\{X_{Shock} = 237,5\}$

Wykres 7.3 dotyczy standardowego generatora wirów (przypadek **B** $\{\phi = 0,5\text{mm}, \alpha = 45, \theta = 90, k = 5, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5\}$), widoczne jest zlikwidowanie oderwania w trawersie 55 mm poniżej fali uderzeniowej.



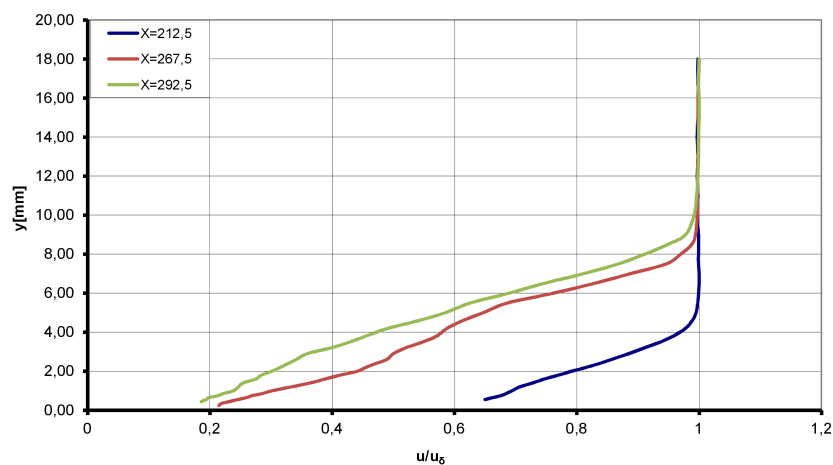
Rys. 7.3. Zestawienie warstw dla przypadku B $\{\phi = 0,5\text{mm}, \alpha = 45, \theta = 90, k = 5, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5\}$

Wykres 7.4 dotyczy zoptymalizowanego generatora wirów (przypadek C $\{\phi = 0,5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5\}$), widoczna jest poprawa efektywności jego działania i zlikwidowanie oderwania w obydwóch trawersach poniżej fali uderzeniowej.



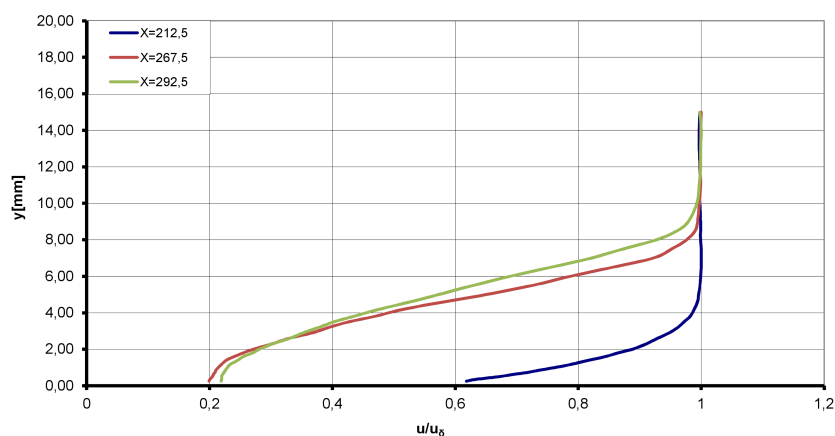
Rys. 7.4. Zestawienie rozkładów prędkości w warstwie przyściennej dla przypadku C $\{\phi = 0,5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5\}$

Wykres 7.5 dotyczy powiększonego generatora wirów (przypadek **D** $\{\phi = 0,8mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 8, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5\}$), widoczna jest poprawa efektywności jego działania, zlikwidowanie oderwania w obydwóch trawersach poniżej fali uderzeniowej.

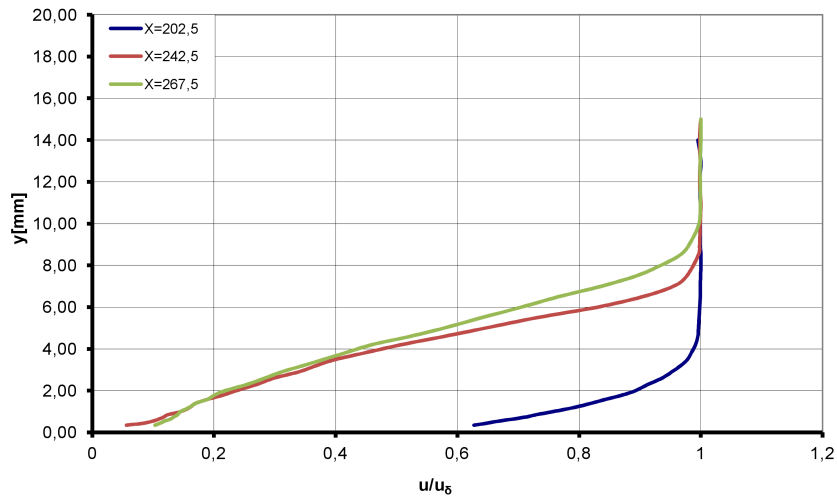


Rys. 7.5. Zestawienie rozkładów prędkości w warstwie przyściennej dla przypadku D $\{\phi = 0,8mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 8, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5\}$

Wykresy 7.6 i 7.7 dotyczą zoptymalizowanego generatora wirów przy połowie wydatku masowego i przy zmniejszonej odległości do fali uderzeniowej (przypadek **E** $\{\phi = 0,5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 0.5, X_{Shock} = 237,5\}$ i **F** $\{\phi = 0,5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 1, X_{Shock} = 212,5\}$).



Rys. 7.6. Zestawienie rozkładów prędkości w warstwie przyściennej dla przypadku E $\{\phi = 0,5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 0.5, X_{Shock} = 237,5\}$



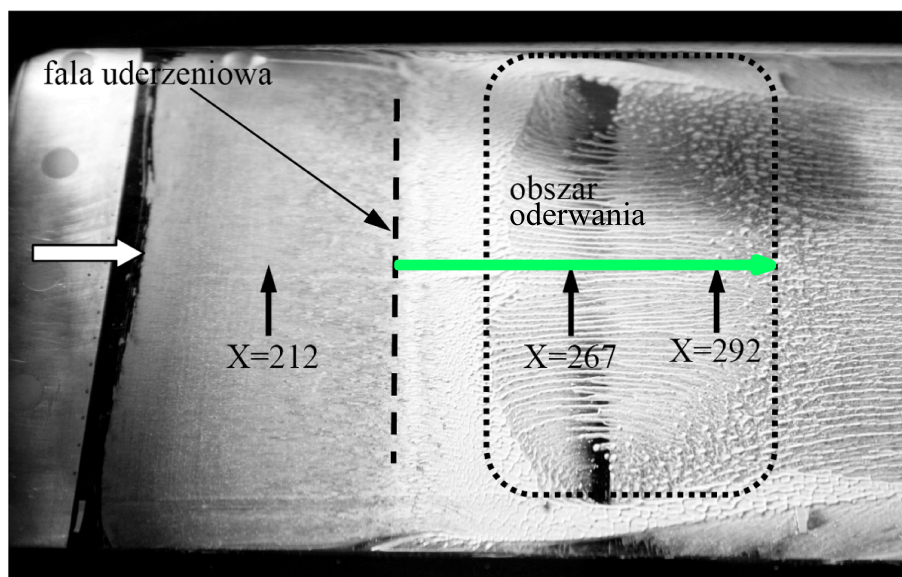
Rys. 7.7. Zestawienie rozkładów prędkości w warstwie przyściennej dla przypadku F $\{\phi = 0,5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 1, X_{Shock} = 212,5\}$

W obydwóch przypadkach nadal zlikwidowane jest oderwanie, wyższe prędkości przepływu w pobliżu ścianki występują przy połowie wydatku.

7.4 Wizualizacja olejowa, kompletne wyniki

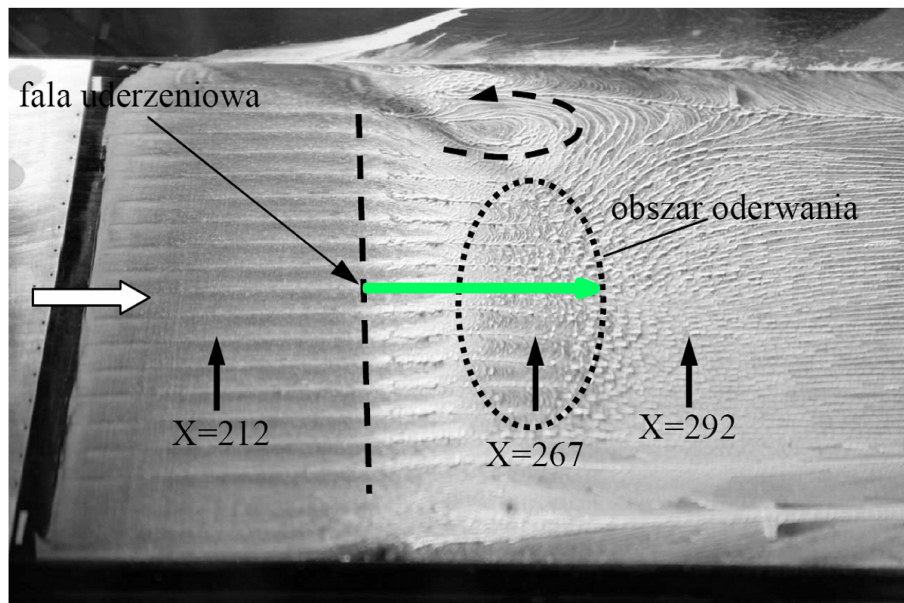
W tym rozdziale zamieszczono wizualizacje olejowe dla wszystkich przypadków pomiarowych. Stanowią one kompletne wyniki pomiarów, na podstawie których przygotowano tabelę 6 ilustrującą długości obszaru oderwania.

Wizualizacja przypadku referencyjnego jest przedstawiona na rysunku 7.8.



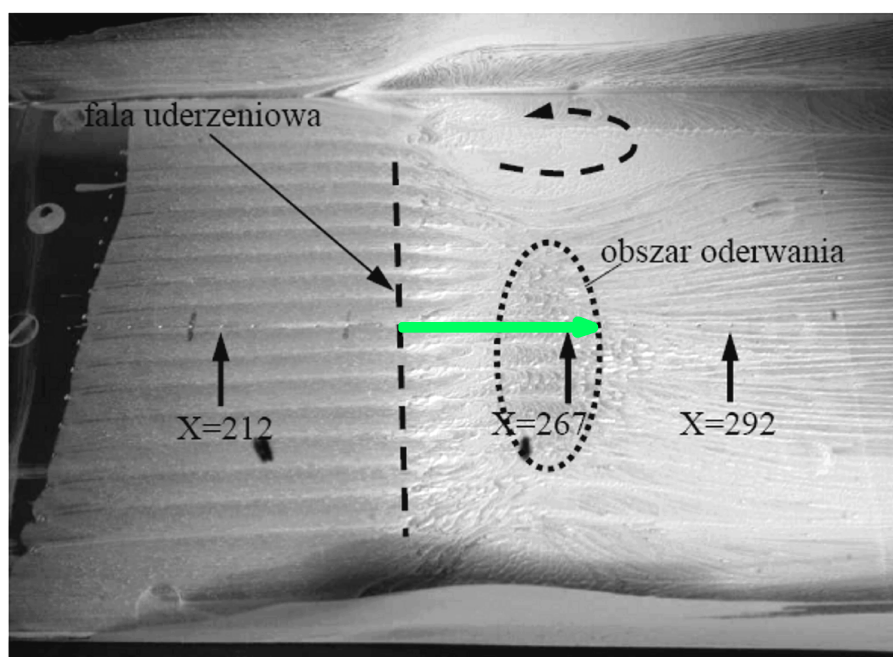
Rys. 7.8. Wizualizacja olejowa, przypadek referencyjny

Wizualizacja ilustrująca przepływ ze standardowymi generatorami wirów, została przedstawiona na rysunku 7.9.



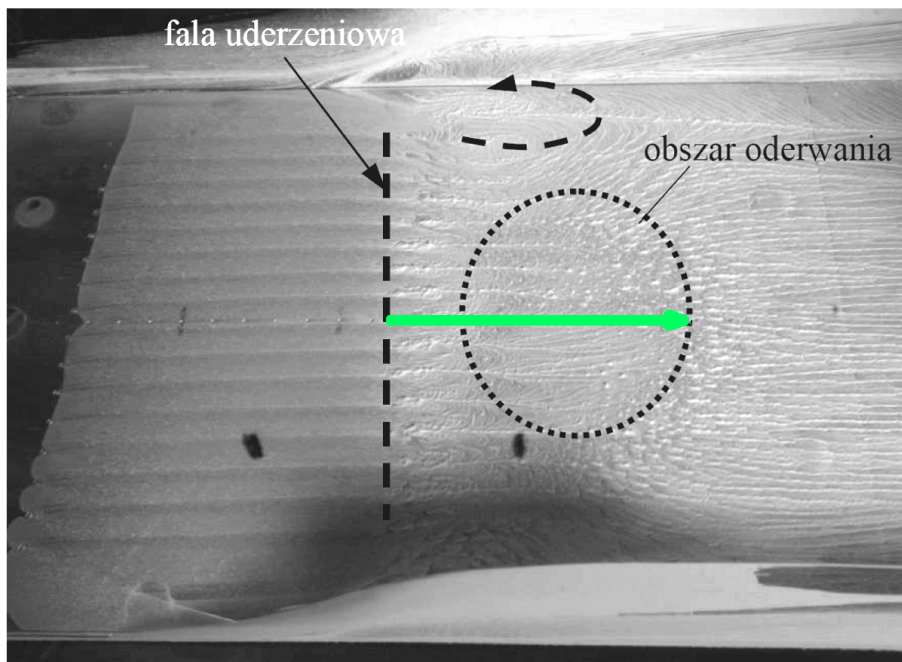
Rys. 7.9. Wizualizacja olejowa, przypadek $\{\phi = 0,5mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 5, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5\}$

Rysunek 7.10 przedstawia przepływ przy aktywności zoptymalizowanych generatorów wirów pracujących z pełnym wydatkiem masowym i przy pełnej odległości od fali uderzeniowej.



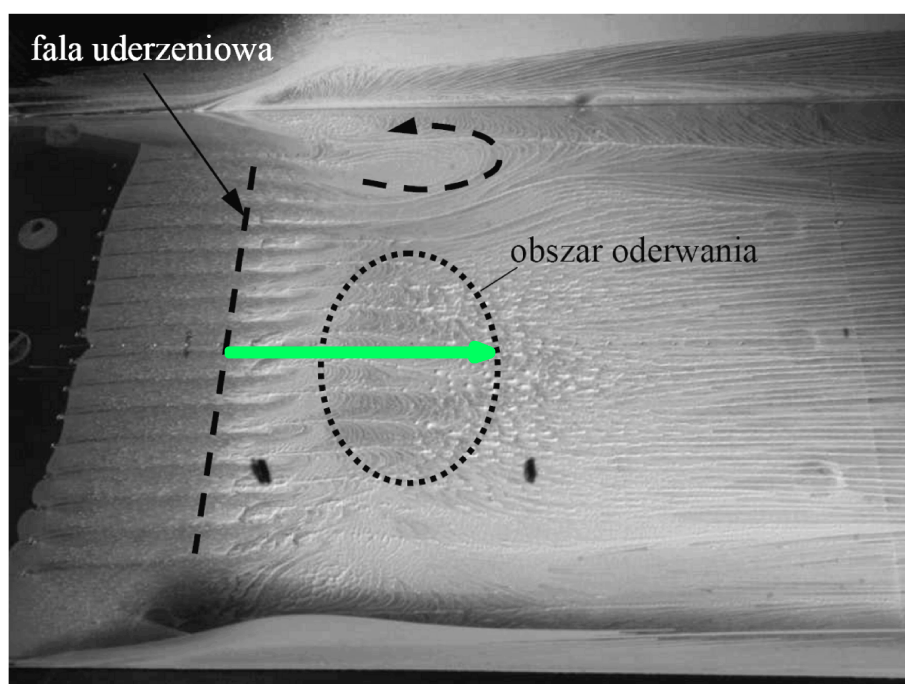
Rys. 7.10. Wizualizacja olejowa, przypadek $\{\phi = 0,5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5\}$

Wizualizację pokrewnego przypadku (ta sama konfiguracja geometryczna generatora i odległość od fali uderzeniowej, ale ze zmniejszonym wydatkiem masowym) przedstawia rysunek 7.11.



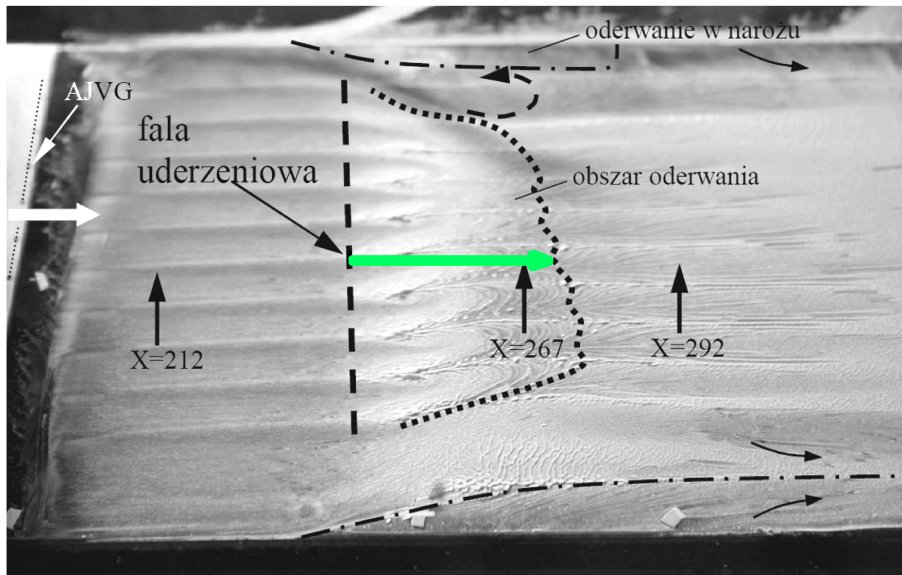
Rys. 7.11. Wizualizacja olejowa, przypadek $\{\phi = 0,5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 0.5, X_{Shock} = 237,5\}$

Ostatni z przypadków dotyczących optymalnej geometrii generatorów wirów (pełny wydatek masowy, ale zmniejszona odległość od fali uderzeniowej) zamieszczono na rysunku 7.12.



Rys. 7.12. Wizualizacja olejowa, przypadek $\{\phi = 0,5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 1, X_{Shock} = 212,5\}$

Wynik dla konfiguracji powiększonych, generatorów wirów, ilustruje rysunek 7.13.



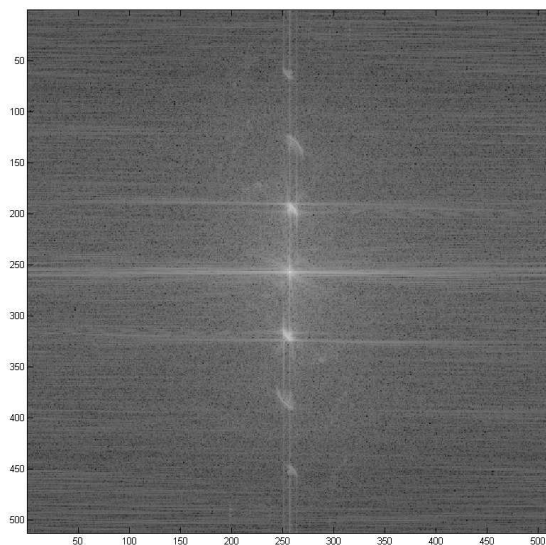
Rys. 7.13. Wizualizacja olejowa, przypadek $\{\phi = 0,8mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 8, C_q = 1, X_{Shock} = 237,5\}$

7.5 Numeryczna implementacja metody FTFA

Poniżej zamieszczono szczegółowy opis zastosowanej implementacji numerycznej metody analizy FTFA przedstawionej w głównej części pracy.

7.5.1 Przygotowanie danych

Początkowy etap działania programu to wczytanie danych wejściowych ¹, następnie obliczenie transformaty oraz widma mocy. Jako że transformaty mają wartości zespolone, na rysunku 7.14 i następnych znajduje się widmo mocy odpowiadające przekształconej transformacie.



Rys. 7.14. Widmo mocy interferogramu

W transformacie widoczne są piki składowej stałej oraz kolejnych wielokrotności częstotliwości podstawowej.

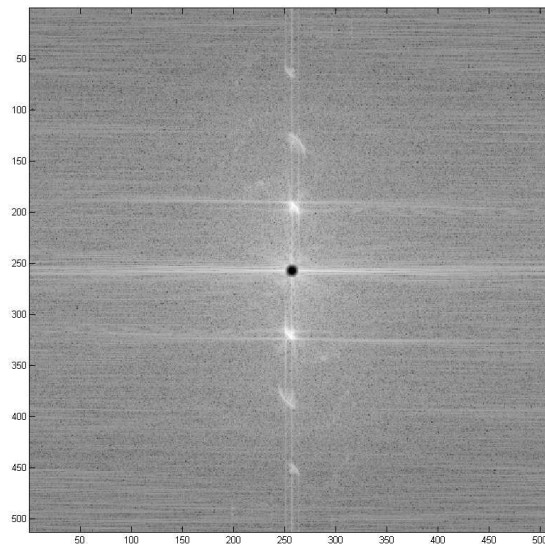
¹Wskazanie plików z interferogramami

7.5.2 Wyznaczenie obszaru zawierającego informacje

Kolejny etap ma na celu wyznaczenie członu $G(\vec{\nu})$ określonego równaniem 28.

Zastosowanie filtra górno-przepustowego

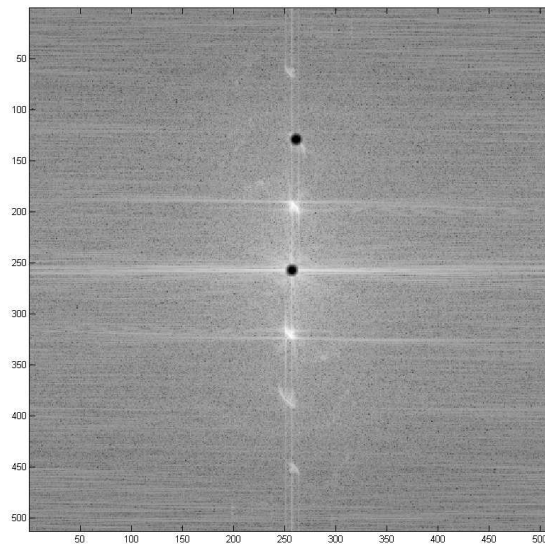
Filtr górno-przepustowy usuwa składowe wynikające z niskoczęstotliwościowej modulacji źródła światła oraz średniej wartości oświetlenia. Przeprowadzono z pozytywnym skutkiem próbę usunięcia składowej stałej obrazu poprzez przesunięcie wartości opisujących intensywności we wszystkich punktach przetwornika kamery CCD w taki sposób, aby wyzerować wartość średnią. To potwierdza przyjętą interpretację fizyczną centralnego piku transformaty. Pozostałe niepożądane składowe niskoczęstotliwościowe usuwa się stosując filtr cyfrowy. Widmo mocy transformaty po filtrowaniu górno-przepustowym przedstawia rysunek 7.15.



Rys. 7.15. Widmo mocy transformaty po filtrowaniu górno-przepustowym

Zastosowanie filtru pasmowo-zaporowego

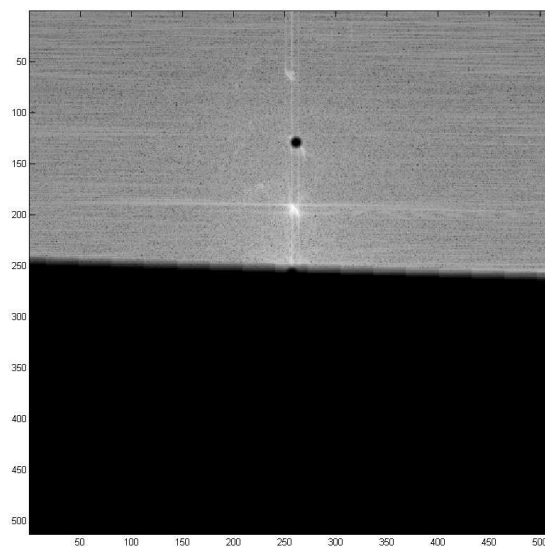
Filtr pasmowo-zaporowy stosuje się, aby usunąć pierwszą harmoniczną z dodatniej części transformaty sygnału. Widmo tak odfiltrowanej transformaty sygnału przedstawia rysunek 7.16.



Rys. 7.16. Widmo mocy transformaty po filtrowaniu pasmowo-zaporowym

Usunięcie nadmiarowej części transformaty

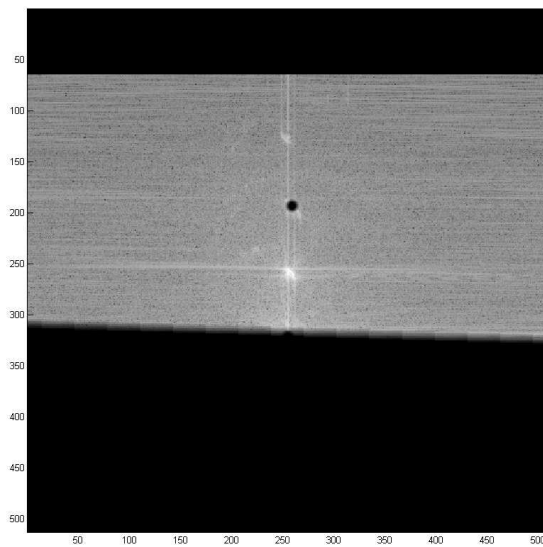
Ze względu na to, że dziedzinę transformaty stanowi cała płaszczyzna (obejmuje współrzędne ujemne i dodatnie) informacja w niej zawarta jest zdublowana, co przejawia się w argumentach członów prawej strony równania 27. Obliczenie transformaty odwrotnej z takiej funkcji spowodowałoby błędne obliczenie fazy. Dlatego należy uwzględnić tylko połowę płaszczyzny. Realizuje się to poprzez kolejne filtrowanie, którego wynik ilustruje rysunek 7.17.



Rys. 7.17. Widmo mocy transformaty po filtrowaniu połowy płaszczyzny

Przesunięcie układu współrzędnych

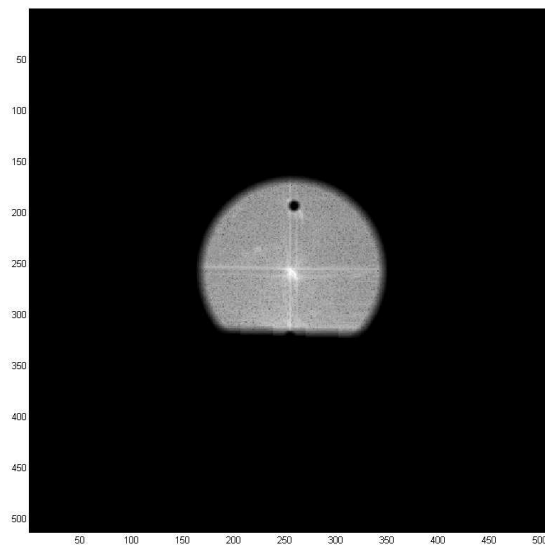
Realizacja zamiany zmiennych z $\vec{\nu}$ na $\vec{\nu} - \vec{\nu}_0$ (równanie 28) polega na przesunięciu transformaty o wektor przeciwny do wektora nośnej $\vec{\nu}_0$. Po takiej transformacji otrzymuje się transformatę o widmie mocy jak na rysunku 7.18.



Rys. 7.18. Widmo mocy transformaty po zamianie zmiennych

Wyznaczenie obszaru zawierającego informacje

Po zastosowaniu kolejnego filtra dolno-przepustowego (w nowym układzie współrzędnych, po zamianie zmiennych) można uzyskać człon $G(\vec{\nu}) = \frac{1}{2}M \otimes Q(\vec{\nu} - \vec{\nu}_0)$. Odpowiada on niezerowemu obszarowi widma mocy na rysunku 7.19.



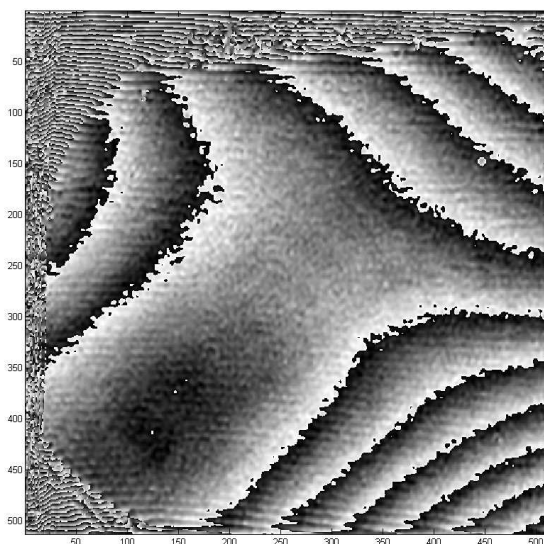
Rys. 7.19. Widmo mocy członu $G(\vec{\nu})$

Program umożliwia niezależne ustawianie parametrów każdego z filtrów.

7.5.3 Wyznaczenie mapy fazowej obrazów

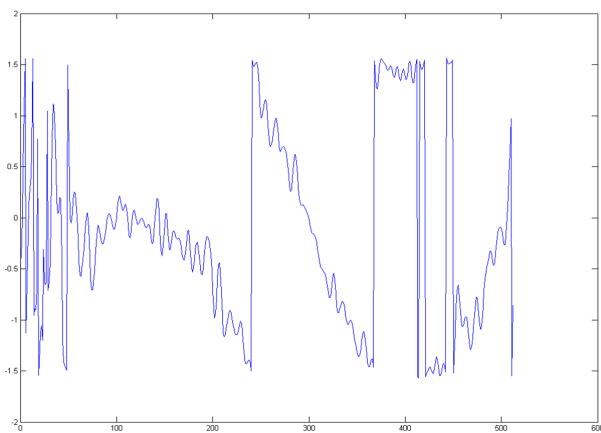
Wyznaczenie fazy obrazu

Z tak przekształconej transformaty wyznacza się zgodnie z równaniem 29 człon $g(\vec{r})$ i z niego na podstawie równania 30 otrzymuje się tablice wartości fazy. W pewnych przypadkach można bezpośrednio na jej podstawie przejść do wyznaczania gęstości. W przypadkach gdzie pojawiają się duże zmiany gęstości, na przykład przy falach uderzeniowych, faza wygląda jak na rysunku 7.20.



Rys. 7.20. Faza

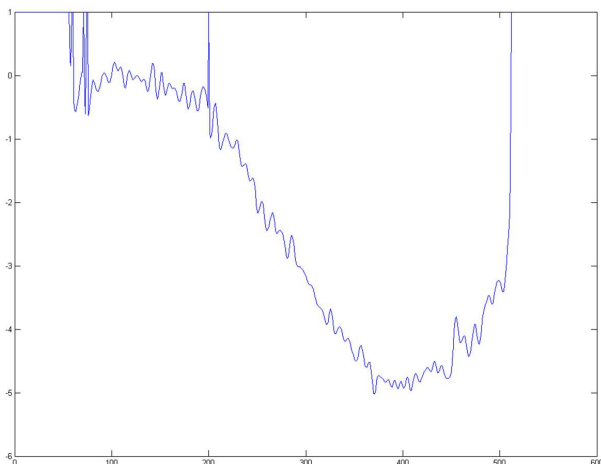
Jej wartości przy przekroju wzdłuż wybranej poziomej linii wyglądają jak na rysunku 7.21.



Rys. 7.21. Faza wzdłuż poziomej linii obrazu

Widoczne nieciągłości fazy wynikają z właściwości funkcji \arctg , które powodują iż faza obliczana z równania 26 jest niejednoznaczna. Jest ona obliczona modulo_{π} . W celu wyznaczenia rzeczywistego przebiegu fazy należy przeprowadzić proces rozwijania fazy, powszechnie określany angielskim terminem ”*phase unwrapping*”. W tym celu wybiera się pewien punkt początkowy i w tym punkcie przyjmujemy wartość fazy za prawidłową. Rozpoczynając od tego punktu bada się zmianę wartości fazy przy przejściu do punktu sąsiedniego. Jeżeli ta zmiana jest rzędu π , to uznaje się, że nie odpowiada to gwałtownej zmianie gęstości, ale nastąpiło zawinięcie. Do wartości w takich punktach jest dodawana odpowiednia wielokrotność π tak, aby uzyskać zmianę mniejszą niż π pomiędzy sąsiednimi punktami obrazu.

Po przeprowadzeniu takiej operacji dla linii przedstawionej na rysunku 7.21 otrzymuje się przebieg jak na rysunku 7.22.

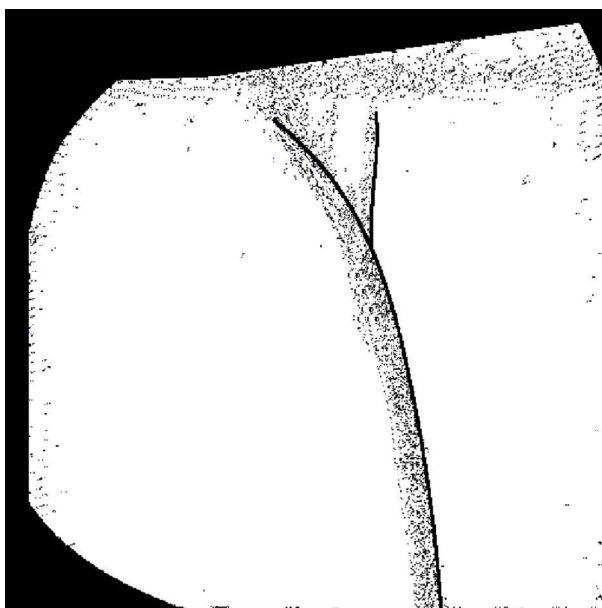


Rys. 7.22. Rzeczywisty przebieg fazy w pojedynczej linii obrazu

Takie podejście jednak nie jest wystarczające dla przepływów z falami uderzeniowymi i obszarami bez oświetlenia (uszkodzone punkty w przetworniku kamery, ściany boczne dyszy, niedoskonałości elementów optycznych). Fala uderzeniowa może wytworzyć gradient parametrów gazu, który powoduje zmianę fazy większą niż π . Próba sprowadzenia wartości fazy w tym punkcie do wartości różniącej się od fazy sąsiedniego punktu o mniej niż π powoduje utracenie informacji o fali uderzeniowej. Co więcej błąd ten nie jest lokalny, ale propaguje razem z algorytmem rozwijającym i wartości fazy we wszystkich punktach powyżej są przesunięte. Także obszary zbyt słabego i zbyt silnego oświetlenia prowadzą do słabego kontrastu prążków, co także może przekładać się na błędy w obliczanej fazie.

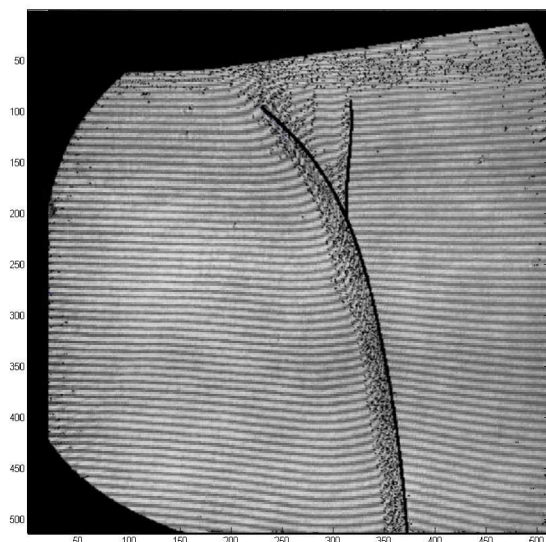
W celu uniknięcia takich błędów został zaimplementowany algorytm maskujący. Bada on amplitudę transformaty odwrotnej i na tej podstawie maskuje obszary w których jej wartość jest niższa od wybranej przez użytkownika.

Poza algorytmem maskującym w program został wbudowany edytor graficzny pozwalający uzupełniać maskę. Tak uzupełnioną maskę prezentuje rysunek 7.23.



Rys. 7.23. Pełna maska.

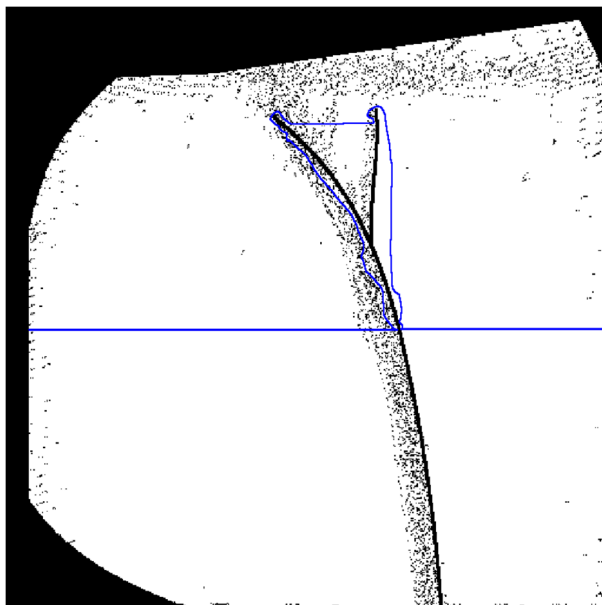
Na rysunku 7.24 dobrze widoczne jest odpowiadanie sobie obszarów zamaskowanych automatycznie z pozycją fali uderzeniowej.



Rys. 7.24. Zestawienie maski z obrazem interferometrycznym .

Obszary zamaskowane wskazują punkty w których wartość fazy prawdopodobnie wynika z błędów optycznych. Punkty te nie mogą być brane pod uwagę w procesie rozwijania fazy . Dlatego wykonujący to algorytm został zaimplementowany z użyciem mechanizmu ”*flood-fill*”, przez co propaguje on od punktu początkowego tylko przez punkty które nie zostały zamaskowane.

Przykładowy początek ścieżki wzdłuż której program rozwija fazę przedstawia rysunek 7.25 .



Rys. 7.25. Początek ścieżki algorytmu typu "flood-fill" .

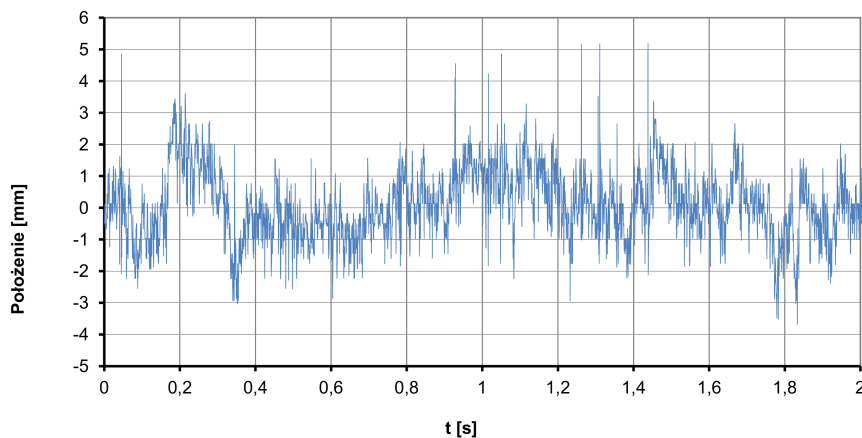
Jak widać dzięki obecności warszy przyściennej (czyli obszaru o zmianach parametrów odpowiadających zmianie fazy mniejszej niż π , który zawsze jest obecny w przepływie w tunelu) algorytm może analizować punkty po obydwóch stronach fali uderzeniowej. Następnym, końcowym krokiem analizy jest zastosowanie równania 31 i prawa Gladstone'a-Dale'a które pozwala wyznaczyć mapę prezentowaną w rozdziale 4.7.

7.6 Oscylacje fali uderzeniowej, kompletne wyniki

Ten rozdział zawiera wszystkie wykresy ilustrujące kolejne etapy analizy oscylacji fal uderzeniowych tworzących stopę lambda dla przypadku standardowych generatorów wirów o powiększonej średnicy: ($\phi=0,8$ mm, $\alpha = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $C_q = 1,0$, $X_{Shock} = 237,5$ mm, $k=8$ mm). Jest uzupełnieniem rozdziału 5.2, gdzie dla zachowania jasności przedstawiono tylko ich część i całość wyników końcowych.

7.6.1 Przednia fala

Przebieg położenia przedniej fali stopy lambda dla przypadku I.11² przedstawia rysunek 7.26.

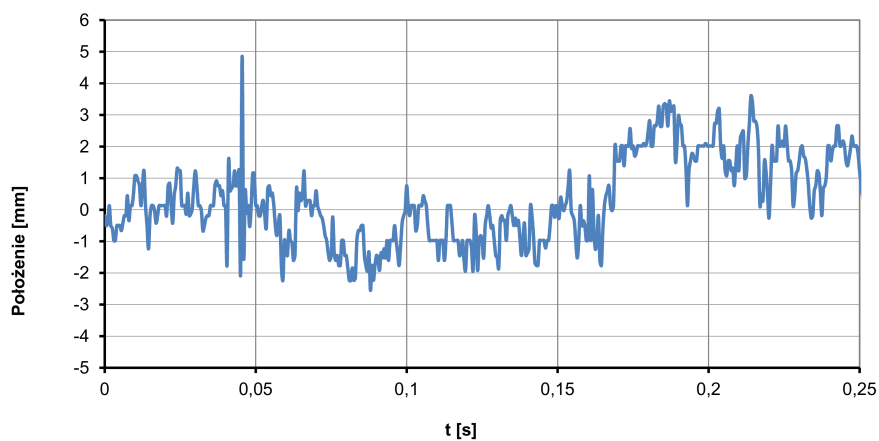


Rys. 7.26. Przebieg położenia przedniej fali, wybrane 2 sekundy

Ze względu na częstotliwość zapisu wynoszącą 2 kHz, przedstawiony na wykresie okres czasu obejmujący 2 sekundy jest relatywnie długi. Aby

²Stosowane w tym podrozdziale nazewnictwo jest zgodne z tabelą 4; opisywany pomiar dotyczył przepływu bez generatorów wirów przy częstotliwości zapisu kamery 2 kHz.

wyraźnie przedstawić charakter ruchu fali przygotowano wykres obejmujący tylko 0,25 sekundy, przedstawiony na rysunku 7.27.



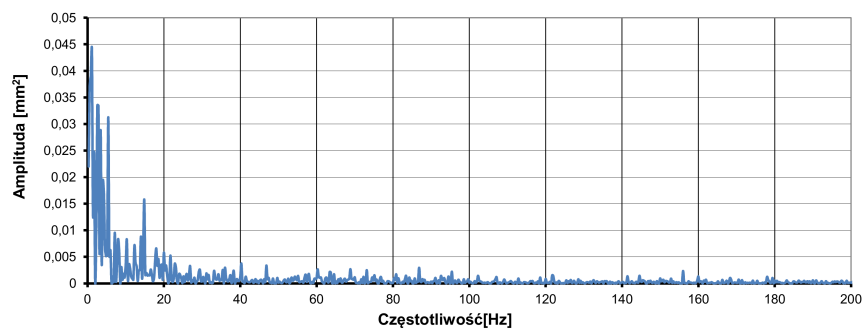
Rys. 7.27. Szczegółowy przebieg położenia przedniej fali, wybrane 0,25 skundy

Opisujące ten sygnał wielkości statystyczne zebrane są w tabeli 3.

Tabela 3. Statystyka ruchu przedniej fali

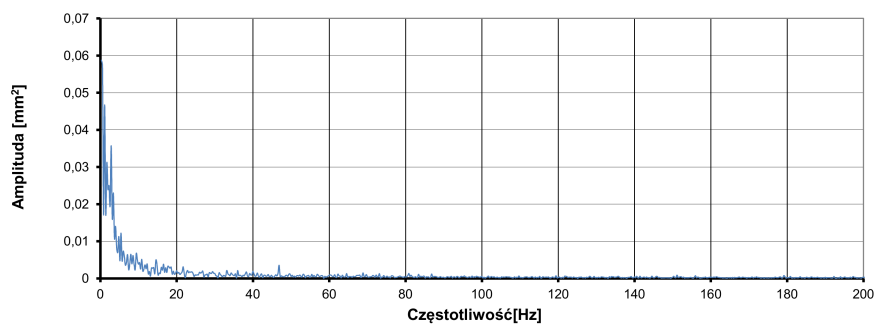
Średnie położenie [mm]	Położenie minimalne[mm]	Położenie maksymalne [mm]	Średnia oscylacja[mm]	RMS[mm]
47,745	44,0945	52,9134	0,78429	1,0164

Na podstawie analizowanego przebiegu wyznaczono widmo mocy zilustrowane na rysunku 7.28.



Rys. 7.28. Widmo mocy ruchu fali przedniej podczas pomiaru

Uśrednione widmo mocy dla rozważanego przypadku przedstawia rysunek 7.29.



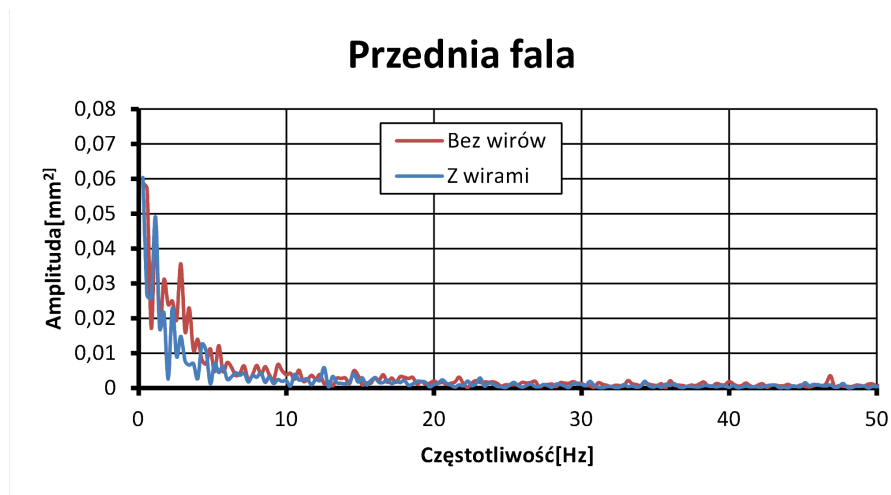
Rys. 7.29. Uśrednione widmo mocy fali przedniej

Parametry statystyczne uzyskane na podstawie pięciu pomiarów dla tego przypadku pomiarowego przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Uśredniona statystyka ruchu przedniej fali

	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Pomiar 4	Pomiar 5	Przebieg uśredniony
Średnie położenie[mm]	47,745	48,5413	49,9245	47,9594	48,1432	48,46268
Położenie minimalne[mm]	44,0945	45,0493	45,6693	44,4181	44,2604	44,69832
Położenie maksymalne [mm]	52,9134	52,86	54,9606	51,4398	53,8067	53,1961
Średnia oscylacja[mm]	0,78429	0,88945	0,86425	0,7073	0,88277	0,825612
RMS[mm]	1,0164	1,1121	1,093	0,8806	1,1563	1,05168

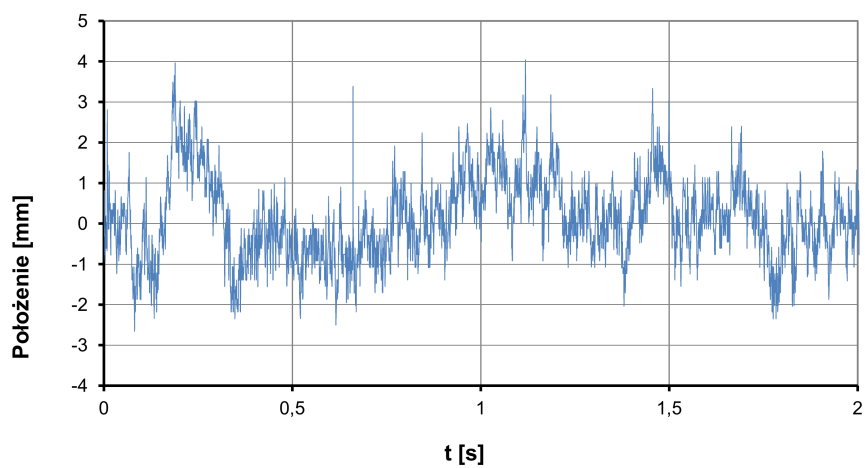
Wykres prównawczy widma mocy dla przypadków różniących się aktywnością generatorów umieszczony jest na rysunku 7.30.



Rys. 7.30. Zestawienie uśrednionych widm mocy fali przedniej

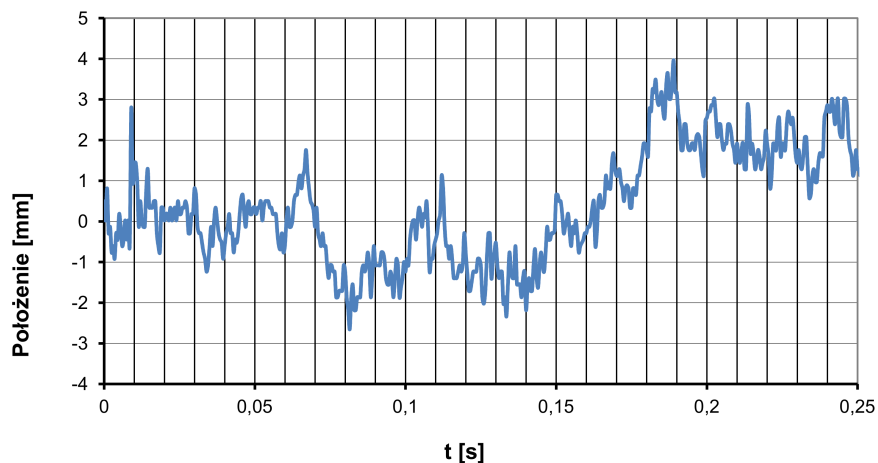
7.6.2 Tylna fala

Dla tylnej fali otrzymano przebieg położenia w czasie przedstawiony na wykresie z rysunku 7.31.



Rys. 7.31. Przebieg położenia tylnej fali, wybrane 2 sekundy

Dla zwiększenia czytelności przygotowano wykres obejmujący krótszy odcinek czasu; przedstawia go rysunek 7.32.



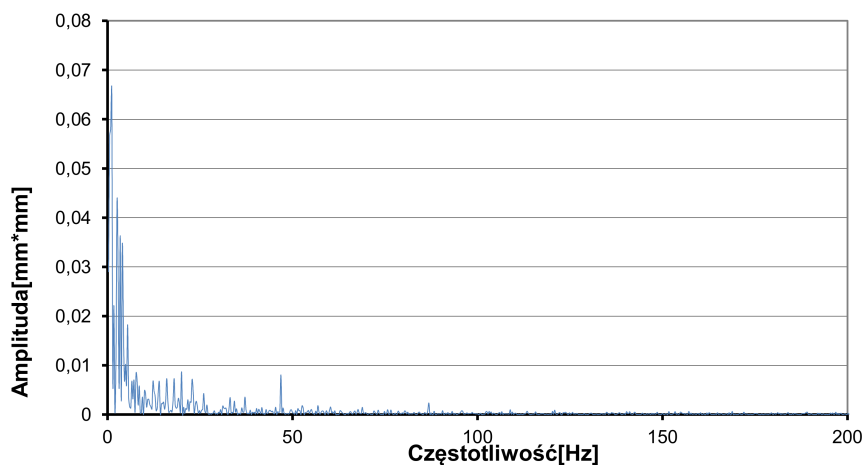
Rys. 7.32. Szczegółowy przebieg położenia tylnej fali, wybrane 0,25 sekundy

Na podstawie analizowanego przebiegu z rysunku 7.31 wyznaczono opisujące go wielkości statystyczne, zawiera je Tabela 5.

Tabela 5. Statystyka ruchu tylnej fali

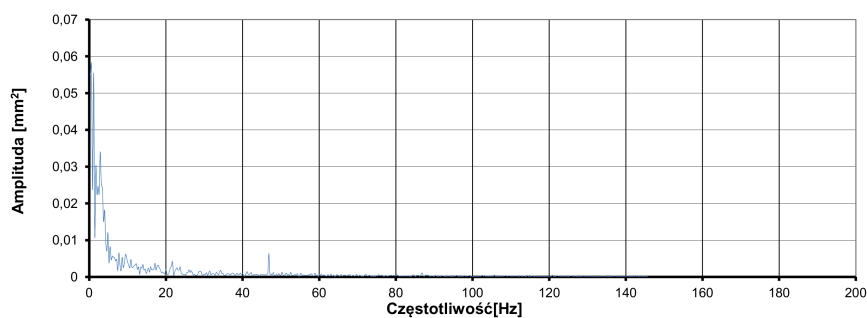
Średnie położenie[mm]	Położenie minimalne[mm]	Położenie maksymalne [mm]	Średnia oscylacja[mm]	RMS[mm]
65,3297	62,5197	69,3701	0,7607	0,96142

Obliczone widmo mocy tego sygnału przedstawiono na wykresie z rysunku 7.33.



Rys. 7.33. Widmo mocy ruchu fali tylnej

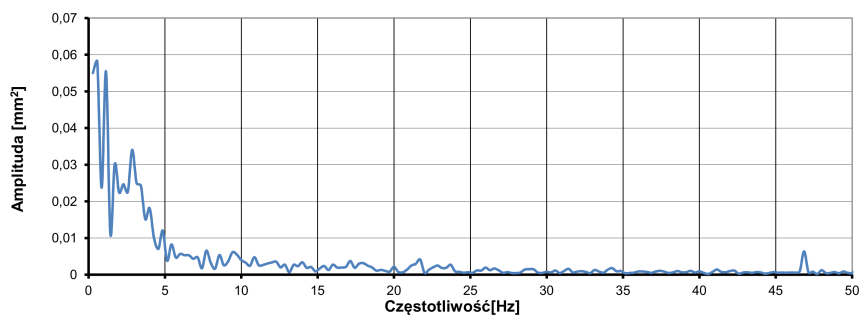
Postępowanie to przeprowadzono dla wszystkich przypadków, następnie na bazie opisanych poprzednio przesłanek wyznaczono uśrednione widmo mocy oscylacji; zawiera je wykres na rysunku 7.34.



Rys. 7.34. Uśrednione widmo mocy fali tylnej

Podobnie jak dla fali przedniej widmo mocy wskazuje na bardzo małą zawartość składowych o częstotliwościach wyższych niż 50 Hz. Wykres na

rysunku 7.35 przedstawia zawartość składowych do częstotliwości 50 Hz.



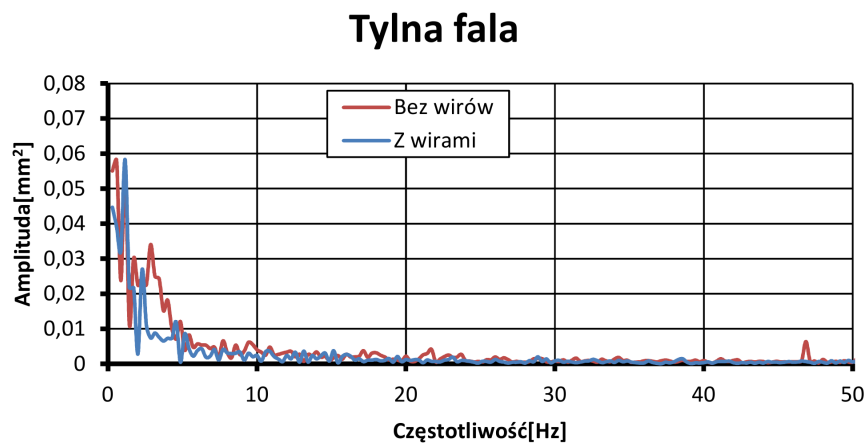
Rys. 7.35. Uśrednione widmo mocy fali tylnej (szczegółowe)

Uśrednione statystyki oscylacji podsumowuje Tabela 6.

Tabela 6. Uśredniona statystyka ruchu tylnej fali

	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Pomiar 4	Pomiar 5	Przebieg uśredniony
Średnie położenie[mm]	65,3297	64,2815	66,3048	66,9534	65,9337	65,76062
Położenie minimalne[mm]	62,5197	61,5385	63,4646	63,5897	63,1164	62,84578
Położenie maksymalne [mm]	69,3701	68,1657	69,6063	70,3748	71,9527	69,89392
Średnia oscylacja[mm]	0,7607	0,73743	0,76256	0,73676	0,80499	0,760488
RMS[mm]	0,96142	0,91654	0,94876	0,93842	1,0721	0,967448

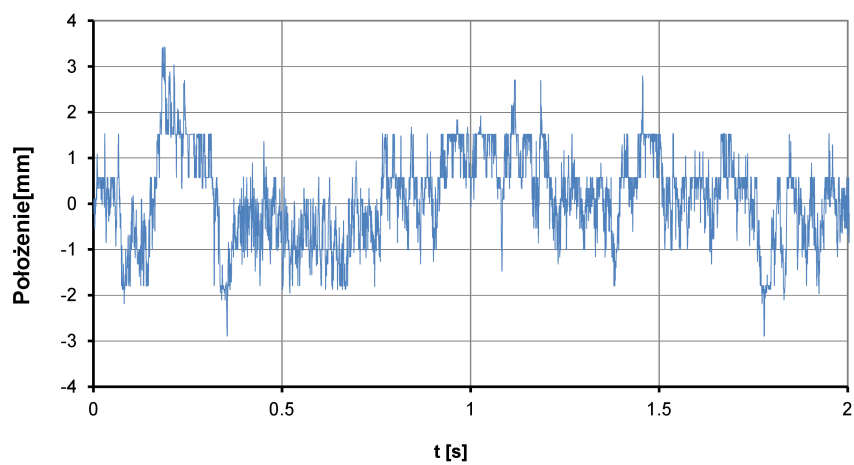
Tak wyznaczone wielkości zestawiono z odpowiadającymi im wartościami dotyczącymi przepływu z obecnymi wirami, otrzymując wykres z rysunku 7.36 .



Rys. 7.36. Zestawienie uśrednionych widm mocy fali tylnej

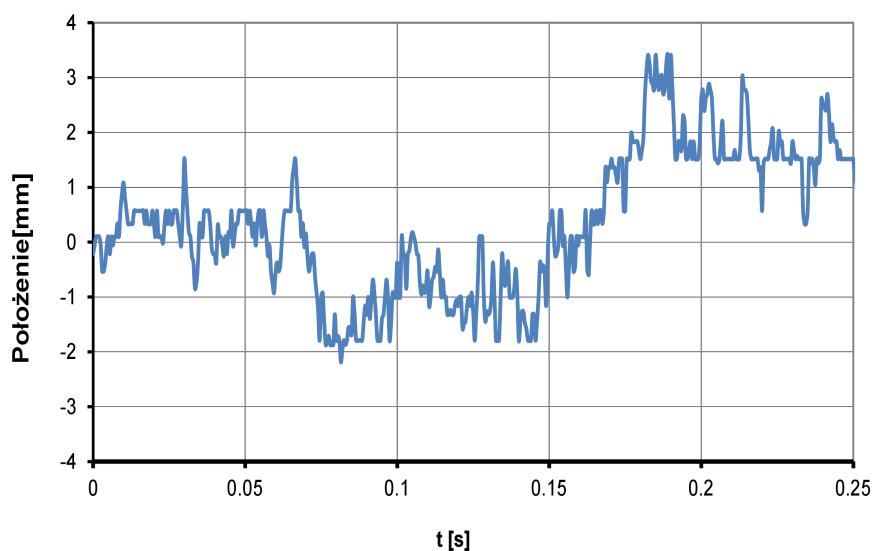
7.6.3 Główna fala

Ewolucję położenia głównej fali ilustruje wykres na rysunku 7.37.



Rys. 7.37. Przebieg położenia głównej fali

Dla lepszego przedstawienia charakteru ruchu fali przygotowano wykres dotyczący krótszego odcinka czasu, przedstawia go rysunek 7.38.



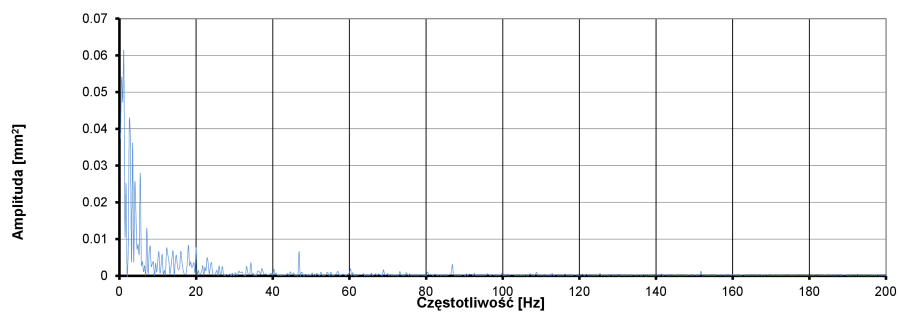
Rys. 7.38. Przebieg położenia głównej fali (szczegółowy)

Wielkości statystyczne charakteryzujące oscylacje fali prezentuje Tabela 7.

Tabela 7. Statystyka ruchu głównej fali

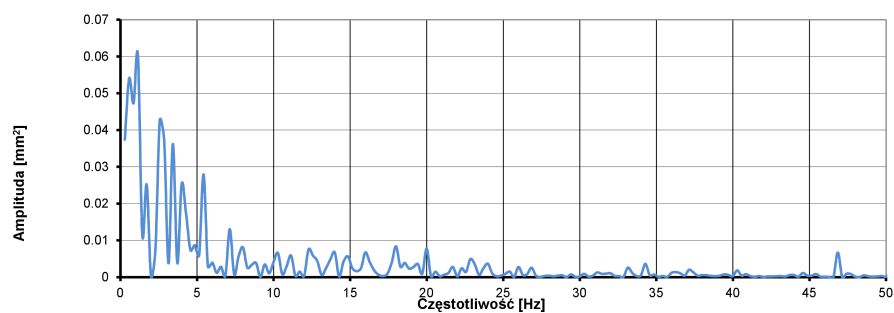
Średnie położenie[mm]	Położenie minimalne[mm]	Położenie maksymalne [mm]	Średnia oscylacja[mm]	RMS[mm]
63,6805	60,7874	67,0866	0,76138	0,9463

Obliczone widmo mocy tego ruchu przedstawia wykres z rysunku 7.39.



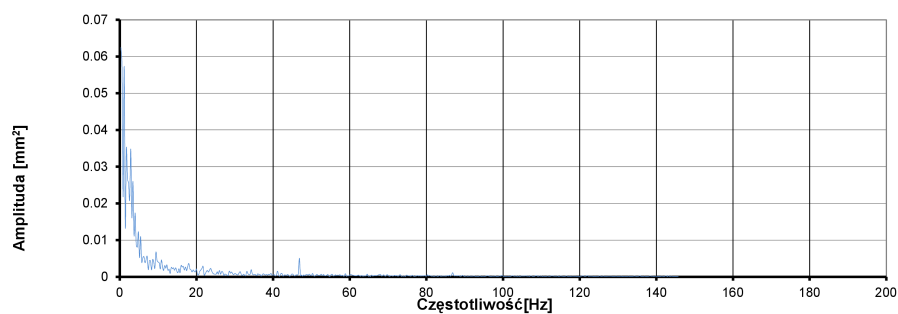
Rys. 7.39. Widmo mocy ruchu fali głównej

Widmo mocy w wybranym do dalszej analizy paśmie częstotliwości przedstawione jest na rysunku 7.40.



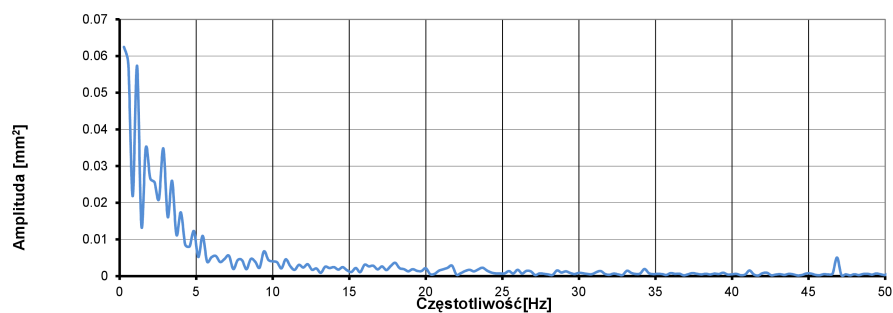
Rys. 7.40. Szczegółowe widmo mocy ruchu fali głównej

Podobnie jak dla fali przedniej i tylnej, wobec braku występowania w nim częstotliwości charakterystycznych, obliczone zostało uśrednione widmo mocy oscylacji. Na jego podstawie sporządzono wykres z rysunku 7.41.



Rys. 7.41. Uśrednione widmo mocy fali głównej

Uśrednione widmo mocy w wybranym paśmie częstotliwości przedstawia wykres na rysunku 7.42.



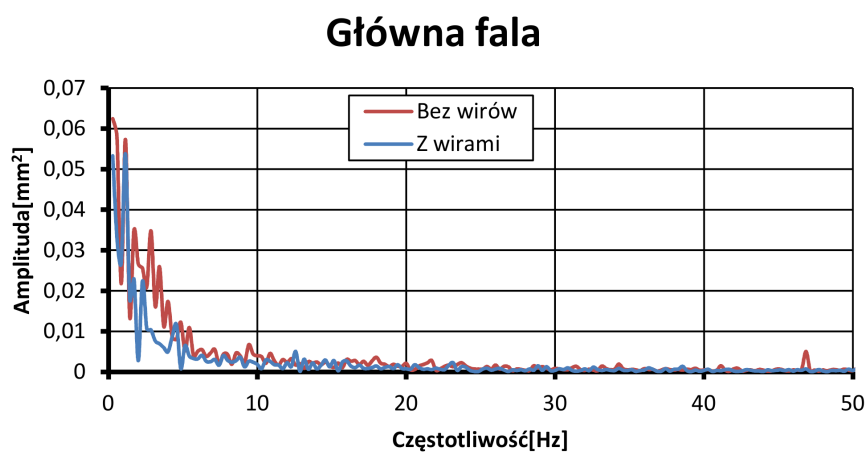
Rys. 7.42. Szczegółowe uśrednione widmo mocy fali głównej

Uśrednione statystyki oscylacji zawiera Tabela 8.

Tabela 8. Uśredniona statystyka ruchu głównej fali

	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Pomiar 4	Pomiar 5	Przebieg uśredniony
Srednie położenie[mm]	63,6805	63,1163	64,8569	64,8809	64,197	64,14632
Położenie minimalne[mm]	60,7874	60,5917	62,2292	62,2012	61,1024	61,38238
Położenie maksymalne [mm]	67,0866	65,641	67,6047	68,4813	68,8976	67,54224
Średnia oscylacja[mm]	0,76138	0,79396	0,70305	0,68325	0,85495	0,759318
RMS[mm]	0,9463	0,95178	0,85218	0,83278	1,0415	0,924908

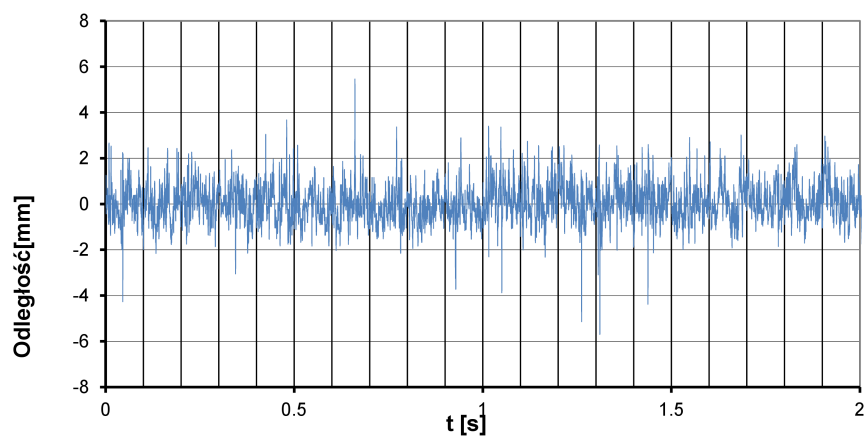
Rezultaty analogicznej analizy przeprowadzonej dla przypadku z aktywnymi generatorami wirów zestawiono z danymi których uzyskanie opisano powyżej. Ich porównanie przedstawia wykres na rysunku 7.43.



Rys. 7.43. Zestawienie uśrednionych widm mocy fali głównej

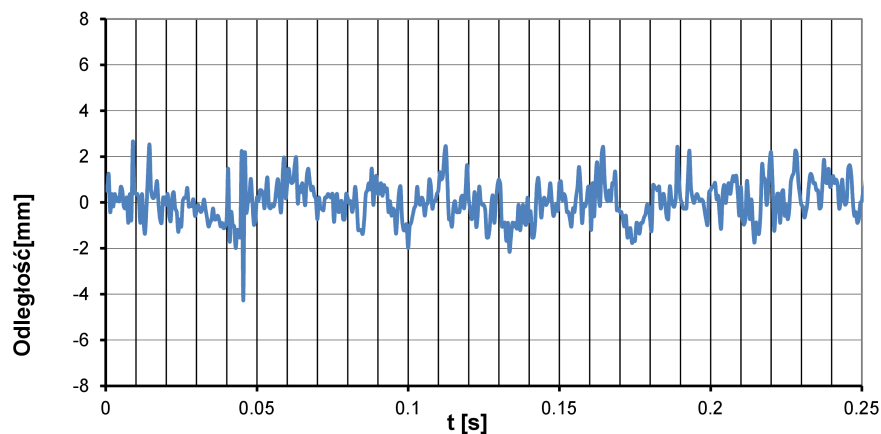
7.6.4 Odległość pomiędzy falami

Ewolucję odległości pomiędzy falami tworzącymi stopę lambda podczas trwania przepływu przedstawia wykres na rysunku 7.44.



Rys. 7.44. Przebieg odległości pomiędzy falami, wybrane 2 sekundy

Dla uzyskania wyraźniejszej ilustracji, przygotowano wykres obejmujący krótszy odcinek czasu, przedstawiony na rysunku 7.45.



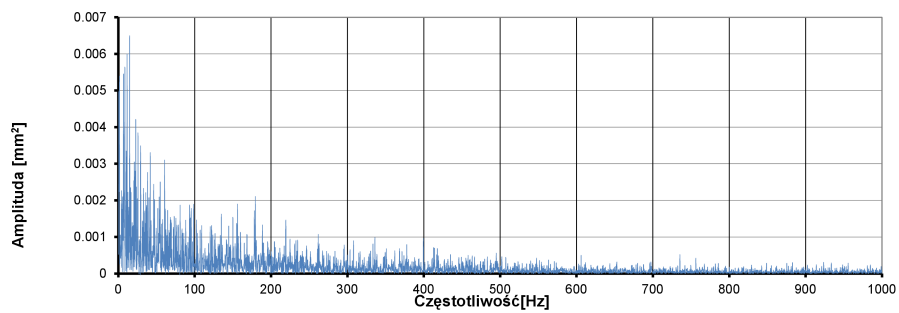
Rys. 7.45. Szczegółowy przebieg odległości pomiędzy falami, wybrane 0,25 sekundy

Na podstawie tego przebiegu zostały wyznaczone opisujące go parametry statystyczne, zebrane w Tabeli 9.

Tabela 9. Statystyka odległości pomiędzy falami

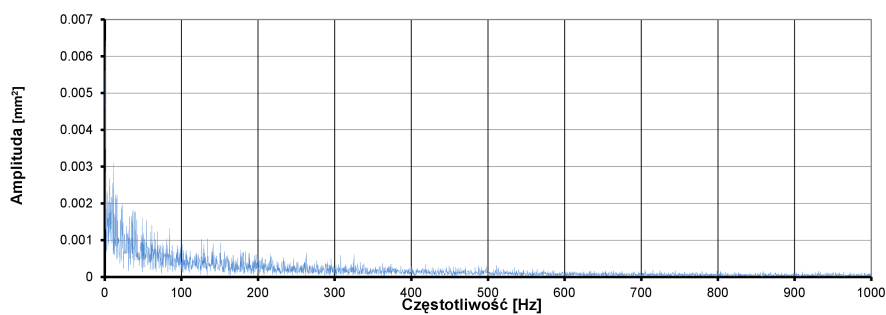
Średnia odległość[mm]	Odległość minimalna[mm]	Odległość maksymalna [mm]	Średnia oscylacja[mm]	RMS[mm]
17,5847	11,8898	23,0446	0,65299	0,84055

Widmo mocy uzyskanego przebiegu ilustruje rysunek 7.46.



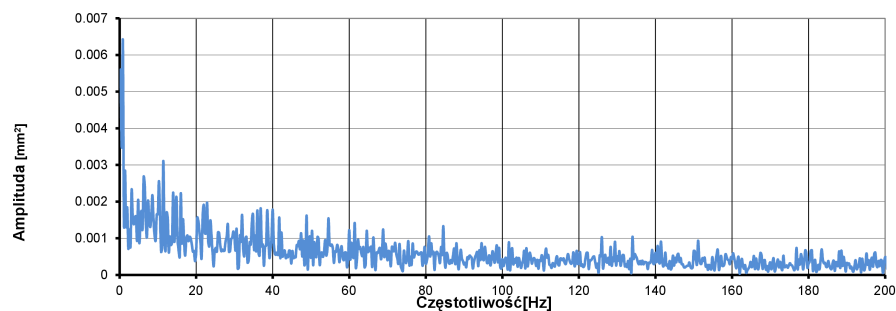
Rys. 7.46. Widmo mocy odległości pomiędzy falami

Uśrednione widmo przebiegu odległości przedstawione jest na rysunku 7.47.



Rys. 7.47. Uśrednione widmo mocy odległości pomiędzy falami

Przebieg widma dla zmniejszonego zakresu częstotliwości przedstawia wykres na rysunku 7.48.



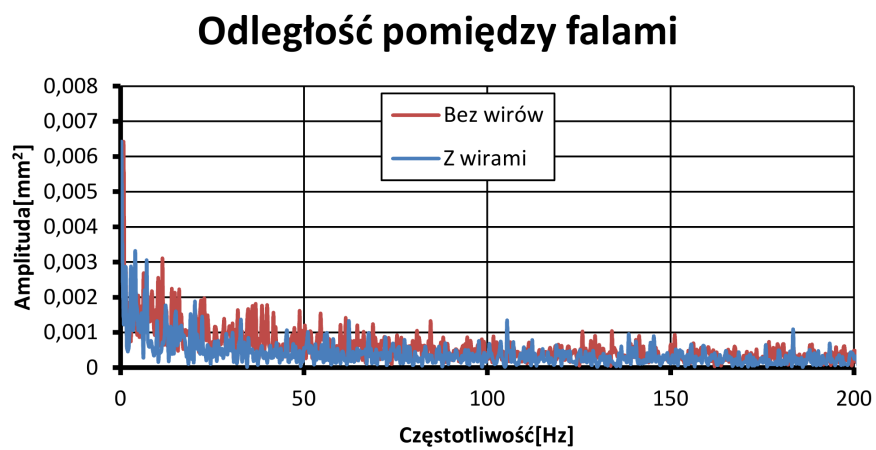
Rys. 7.48. Uśrednione widmo mocy odległości pomiędzy falami

Uśrednione statystyki oscylacji zawiera Tabela 10.

Tabela 10. Uśredniona statystyka odległości pomiędzy falami

	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Pomiar 4	Pomiar 5	Przebieg uśredniony
Średnia odległość[mm]	17,5847	15,7402	16,3803	18,994	17,7905	17,29794
Odległość minimalna[mm]	11,8898	11,3609	10,7087	15,9369	12,1499	12,40924
Odległość maksymalna[mm]	23,0446	19,4872	20,1575	22,9586	27,6923	22,66804
Średnia oscylacja[mm]	0,65299	0,69679	0,65263	0,62933	0,66753	0,659854
RMS[mm]	0,84055	0,89747	0,83848	0,80826	0,86767	0,850486

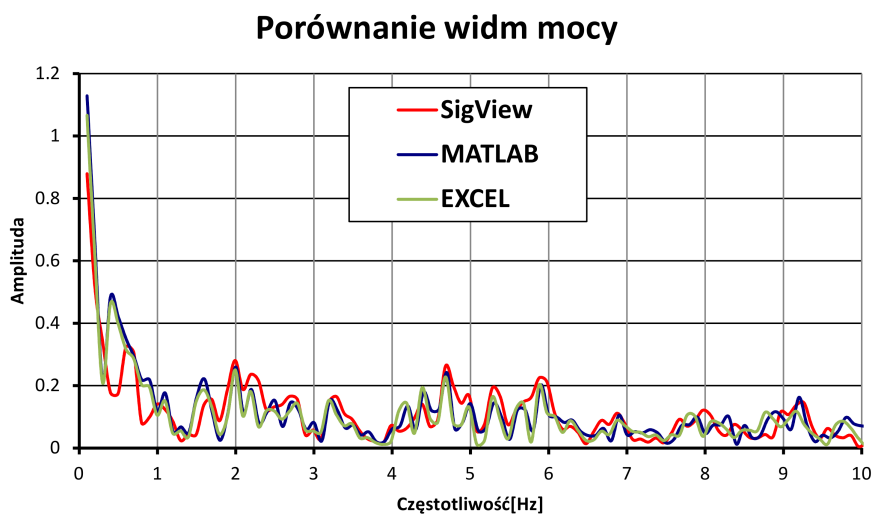
Uzyskany rozkład zestawiony z tym opisującym przepływ z wirami ilustruje rysunek 7.49.



Rys. 7.49. Zestawienie uśrednionych widm mocy odległości pomiędzy falami

7.7 Weryfikacja narzędzia do prowadzenia analizy Fouriera

Przy analizie częstotliwościowej nie zauważono charakterystycznych częstotliwości w oscylacji ciśnienia ani fali. Dla sprawdzenia prawidłowości wyznaczania widma mocy przeprowadzono analizę wybranego sygnału programem autorskim, komercyjną aplikacją "SigView 2.3.0" oraz arkuszem kalkulacyjnym EXCEL, a następnie porównano otrzymane wyniki. Po zastosowaniu odpowiedniej normalizacji wszystkie trzy widma są zgodne. Różnica w normalizacji jest wynikiem stosowaniu różnych konwencji; nie ma żadnego wpływu na wzajemny stosunek wartości składowych, ani ich położenie na osi częstotliwości. Wykres 7.50 przedstawia zestawione widma mocy uzyskane z porównywanych narzędzi, po zastosowaniu wspólnej normalizacji.



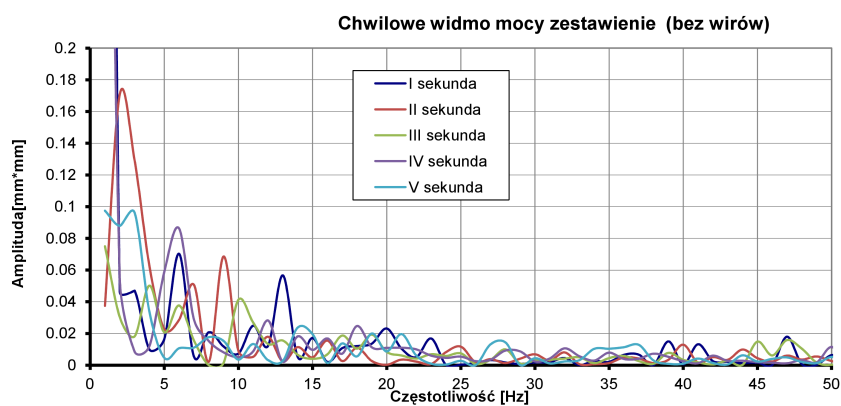
Rys. 7.50. Porównanie widm mocy wyznaczonych różnymi aplikacjami

Dla czytelności wykres przedstawia tylko zakres częstotliwości $\langle 0, 10 \rangle$ Hz. Zgodność wyników uzyskano w pełnym, znacznie szerszym niż ilustrowany na wykresie, zakresie częstotliwości.

7.8 Analiza STFT

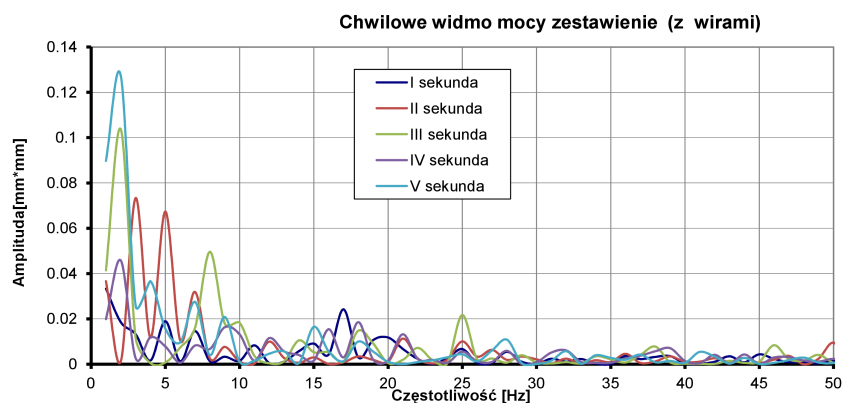
Ze względu na brak widocznych częstotliwości charakterystycznych w widmie, dla jednej z częstotliwości pomiarów (przypadki I_6 i II_6) przeprowadzono analizę STFT (akronim od angielskiego określenia **Short Time Fourier Transform**, albo **Short-Term Fourier Transform**). Zapisany sygnał został podzielony na odcinki jednosekundowe, i na podstawie każdego z nich wyznaczono widmo mocy.

Wykres 7.51 przedstawia zestawienie kolejnych widm mocy dla przypadku bez wirów.



Rys. 7.51. Zestawienie chwilowych widm mocy dla przepływu bez wirów

Wykres 7.52 dotyczy przepływu z wirami.



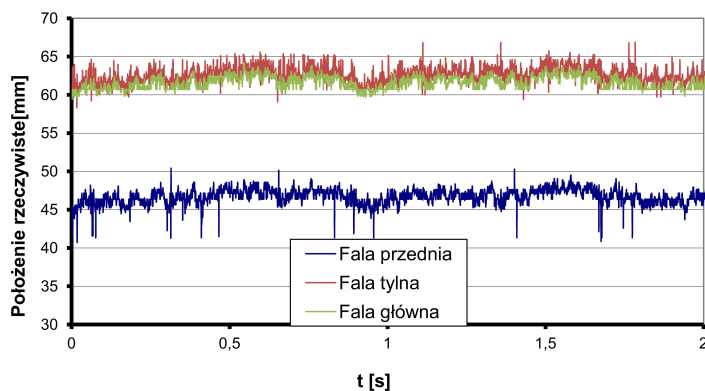
Rys. 7.52. Zestawienie chwilowych widm mocy dla przepływu z wirami

Ta próba miała na celu wykluczenie możliwości rozmywania widma ze względu na relatywnie długi okres pomiaru. Mimo skrócenie analizowanego okresu do 1 sekundy, w obu przypadkach widoczna jest ciągła ewolucja rozkładu składowych w czasie dmuchu. Oznacza to, że nie występuje problem zbyt długiego okresu pomiaru i zmieniających się warunków przepływu. Przemawia to za przyjętym sposobem analizy opartym na wielkościach uśrednionych i ich porównywaniu dla przypadku bez wirów i z wirami.

7.9 Kształt fali podczas oscylacji, dodatkowe wykresy

Wykresy zamieszczone w tym rozdziale (rysunki od 7.53 do 7.55) stanowią uzupełnienie materiału omawianego w rozdziale 5.3. Przedstawiają one kompletne wyniki dla przepływu w obecności wirów³, dla którego w głównej części pracy zostały przytoczone tylko wyniki końcowe.

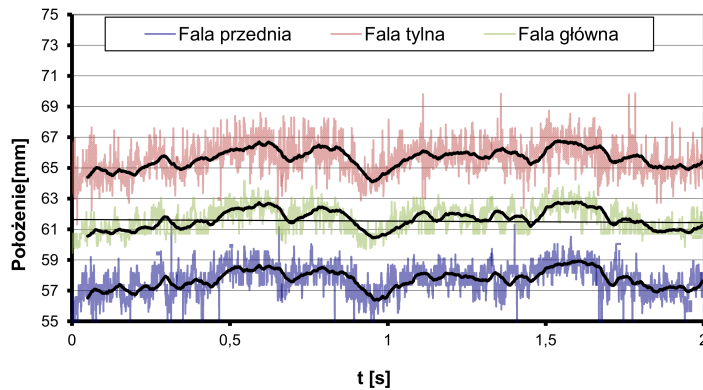
Wykres 7.53 przedstawia ruch elementów układu falowego.



Rys. 7.53. Przebiegi położenia fal przy obecności wirów

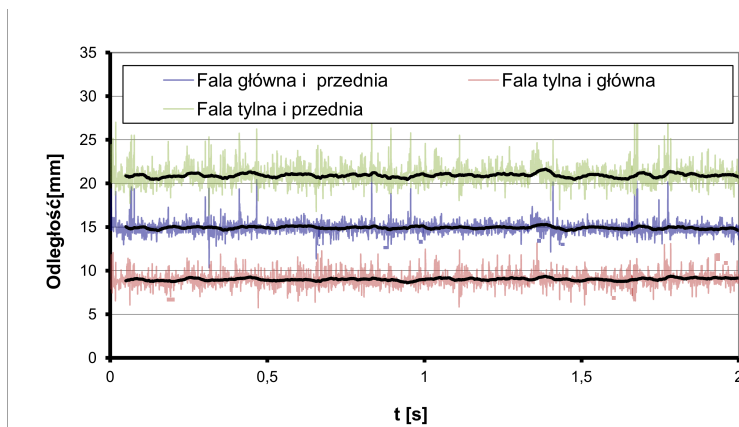
³Przypadek II.11 zgodnie z tabelą 4.

Wykres 7.54 dotyczy położenia przesuniętych o stałe⁴ z naniesioną średnią ruchomą dla wyraźniejszej wizualizacji.



Rys. 7.54. Uśrednione, przesunięte przebiegi położenia fal przy obecności wirów

Rysunek 7.55 przedstawia analogicznie przygotowany wykres ilustrujący ewolucję wzajemnych odległości elementów stopy lambda.



Rys. 7.55. Uśrednione, przesunięte przebiegi odległości fal przy obecności wirów

⁴Tak, jak poprzednio, wartości zostały dobrane tylko pod kątem uzyskania wyraźnej ilustracji zgodności przebiegów na wykresie.

Spis rysunków

1.1	Schemat przepływu z obecnością generatorów stałych	12
1.2	Schemat przepływu z obecnością generatorów i wirów	13
1.3	Schemat generatora wirów	14
1.4	Schemat kanału pomiarowego	16
1.5	Wpływ generatorów wirów na ciśnienie na krawędzi spływu .	17
1.6	Zestawienie wpływu różnych metod sterowania przepływem .	18
1.7	Stanowisko pomiarowe	19
1.8	Generator o regulowanym kącie odchylenia	20
1.9	Konfiguracje generatorów z zaznaczonymi kierunkami wirów	21
1.10	Wpływ wirów na współczynnik tarcia	22
1.11	Profile prędkości w warstwie przyściennej dla $VR=1$	23
1.12	Mechanizm powstawania wiru w warstwie	24
1.13	Położenie punktu przyłgnięcia warstwy	26
1.14	Położenie punktu przyłgnięcia warstwy	26
1.15	Rozkłady wirowości wzdłużnej dla kąta odchylenia $\theta=90^\circ$. .	28
1.16	Maksima wirowości w funkcji odległości od generatorów . . .	29
1.17	Maksima wirowości w funkcji odległości od generatorów . . .	30
1.18	Stanowisko pomiarowe	31
1.19	Wpływ wydatku generatorów na współczynnik ciśnienia . . .	32
1.20	Wpływ kąta wydmuchu na współczynnik ciśnienia	32
1.21	Wpływ kąta odchylenia na współczynnik ciśnienia	33

1.22	Wpływ położenia poprzecznego generatora na współczynnik ciśnienia	34
1.23	Generator	35
1.24	Pole prędkości za dżetem	36
1.25	Pole wirowości za dżetem	37
1.26	Pole naprężeń stycznych $\langle uv \rangle$ za dżetem	38
1.27	"Ostre" i "łagodne" zmiany przekroju generatora	39
1.28	Zależność generowanego układu wirowego od kąta odchylenia	40
1.29	Schemat generowania wiru	41
1.30	Wpływ zastosowania wirów	42
1.31	Wpływ generatorów na ciśnienie na krawędzi spływu	43
1.32	Wpływ generatorów na ciśnienie na krawędzi spływu	44
1.33	Położenie środka wiru w polu rotacji dla $VR=1,0$	45
1.34	Położenie środka wiru w polu wirowości dla $VR=1,5$	46
1.35	Wypukła dolna ściana tunelu	47
1.36	Schemat przepływu z zaznaczeniem pozycji generatora wirów	50
1.37	Wizualizacja "Schlieren" przepływu bez i z wirami	51
1.38	Rozkład prędkości średniej	52
1.39	Składowa wzdłużna prędkości w położeniu $X=260$	53
1.40	Rozkłady prędkości kątowej	54
1.41	Szczegółowy rozkład prędkości kątowej	55
1.42	Szczegóły transportu pędu	56
1.43	Średnia prędkość wzdłużna w obszarze oderwania	57
1.44	Łopatką badaną w projekcie AITEB-2	59
1.45	Liczba Macha na stronie ssącej łopatką, projekt AITEB-2	60
2.1	Schemat stanowiska pomiarowego	67
2.2	Przebieg ciśnienia w czasie pomiaru	70
2.3	Sekcja pomiarowa	72
2.4	Schemat sekcji pomiarowej	73

2.5	Rzeczywista dysza	73
2.6	Wymienna płytko pomiarowa	75
3.1	Interpretacja graficzna równań charakterystyk	80
3.2	Schemat dyszy	83
3.3	Schemat konstruowanej połowy dyszy	85
3.4	Kształt części naddźwiękowej dyszy obliczony na podstawie metody charakterystyk	86
3.5	Sonda do pomiaru ciśnienia spiętrzenia	88
3.6	Wizualizacja olejowa	92
3.7	Schemat układu do wizualizacji typu "Schlieren"	94
3.8	Wizualizacja typu "Schlieren"	95
3.9	Elementy geometrii stopy λ	97
3.10	Możliwe sposoby transferu energii wzbudzonej molekuly farby PSP	100
3.11	Schemat klasycznej farby PSP z pojedynczym luminoforem .	103
3.12	Widmo farby PSP z pojedynczym luminoforem	105
3.13	Widmo binarnej farby PSP	107
3.14	Efekt sedimentacji	108
3.15	Widmo emisyjne lampy wzbudzającej	109
3.16	Zmieniacz filtrów	110
3.17	Komora kalibracyjna	112
3.18	Układ kalibracyjny	112
3.19	Rezultaty kalibracji	113
3.20	Powierzchnia pokryta PSP z otworkami do pomiaru ciśnienia	114
3.21	Sygnal PSP bez kalibracji i przebieg ciśnienia	115
3.22	Sygnal PSP z kalibracją i przebieg ciśnienia	116
3.23	Obraz PSP bez efektu perspektywy	118
3.24	Wygładzony obraz PSP	119
3.25	Schemat interferometru Mach-Zendera	120

3.26 Rzeczywisty interferogram, tryb nieskończonego prążka interferencyjnego	121
3.27 Interferogram przepływu, tryb nieskończonego prążka	122
3.28 Schemat analizy interferogramu, tryb nieskończonego prążka interferencyjnego	123
3.29 Zdjęcie bez przepływu	125
3.30 Zdjęcie z przepływem	126
3.31 Rozkład widmowy mocy emitowanej źródła laserowego	130
3.32 Wynik analizy FTFA	132
3.33 Położenia elementów analizowanych w przepływie	136
3.34 Zdjęcie liniowe	137
3.35 Zdjęcie liniowe z wyznaczonymi położeniami fal	138
3.36 Położenie fali uderzeniowej względem położenia średniego	139
4.1 Kontury modułu prędkości	141
4.2 Rozkład prędkości na płaszczyźnie środkowej dyszy	142
4.3 Rozkład liczby Macha w osi dolnej ścianki dyszy	143
4.4 Porównanie kształtu dyszy dla płynu nielepkiego i lepkiego	144
4.5 Porównanie kształtu dyszy dla płynu nielepkiego i lepkiego	144
4.6 Liczba Macha, przypadki bez generatorów wirów	145
4.7 Wykres zbiorczy rozkładów liczby Macha	147
4.8 Liczba Macha, $\{\phi = 0.5mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 5\}$	148
4.9 Liczba Macha, $\{\phi = 0.5mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 5\}$	148
4.10 Liczba Macha, $\{\phi = 0.5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5\}$	149
4.11 Liczba Macha, $\{\phi = 0.5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5\}$	149
4.12 Liczba Macha, $\{\phi = 0.8mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 8\}$	150
4.13 Liczba Macha, $\{\phi = 0.8mm, \alpha = 45, \theta = 90, k = 8\}$	150
4.14 Liczba Macha, $\{\phi = 0.5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 0.5\}$	151
4.15 Liczba Macha, $\{\phi = 0.5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, C_q = 0.5\}$	151

4.16	Liczba Macha, $\{\phi = 0.5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, X_S = 212.5mm\}$	152
4.17	Liczba Macha, $\{\phi = 0.5mm, \alpha = 30, \theta = 75, k = 5, X_S = 212.5mm\}$	152
4.18	Liczba Macha, optymalne generatory wirów	154
4.19	Liczba Macha, optymalne generatory wirów, przesunięte	154
4.20	Liczba Macha, optymalne generatory wirów, przesunięte	155
4.21	Prędkości w warstwie przyściennej 25 mm powyżej fali uderzeniowej	161
4.22	Szczegóły prędkości w warstwie 25 mm powyżej fali uderzeniowej	162
4.23	Prędkości w warstwie przyściennej 30 mm poniżej fali uderzeniowej	165
4.24	Schemat transportu pędu w warstwie 30 mm poniżej fali	166
4.25	Prędkości w warstwie przyściennej 55 mm poniżej fali uderzeniowej	169
4.26	Wizualizacja olejowa, przypadek referencyjny	172
4.27	Wizualizacja olejowa, generatory optymalne	173
4.28	Wizualizacja olejowa, generatory powiększone	174
4.29	Wizualizacja PSP, przypadek referencyjny	176
4.30	Wizualizacja PSP, przypadek pomiarowy	177
4.31	Analiza FTFA, przykładowy obraz gęstości	179
4.32	Analiza FTFA, przykładowy przebieg parametru	180
5.1	Przebieg ciśnienia statycznego	183
5.2	Widmo mocy przebiegu ciśnienia	184
5.3	Uśrednione widmo mocy przebiegów ciśnienia	184
5.4	Zestawienie uśrednionych widm mocy oscylacji w położeniu A	186
5.5	Zestawienie uśrednionych widm mocy oscylacji w położeniu B	186
5.6	Zestawienie uśrednionych widm mocy oscylacji w położeniu C	187

5.7	Zestawienie uśrednionych widm mocy oscylacji w położeniu D	187
5.8	Przebieg położenia przedniej fali, wybrane 2 sekundy	192
5.9	Szczegółowy przebieg położenia przedniej fali, wybrane 0,25 skundy	193
5.10	Widmo mocy ruchu przedniej fali	194
5.11	Uśrednione widmo mocy przedniej fali	195
5.12	Zestawienie uśrednionych widm mocy fali przedniej	196
5.13	Zestawienie uśrednionych widm mocy fali tylnej	197
5.14	Zestawienie uśrednionych widm mocy fali głównej	198
5.15	Przebieg odległości pomiędzy falami, wybrane 2 sekundy . .	199
5.16	Widmo mocy odległości pomiędzy falami	200
5.17	Zestawienie uśrednionych widm mocy odległości pomiędzy falami	200
5.18	Przebiegi położenia fal	203
5.19	Uśrednione, przesunięte przebiegi położenia fal	204
5.20	Uśrednione, przesunięte położenia fal, pomiar z wirami . . .	205
5.21	Przesunięte przebiegi odległości pomiędzy falami	206
5.22	Uśrednione, przesunięte położenia fal, pomiar bez wirów . .	206
7.1	Efektywne położenie punktu pomiaru ciśnienia rzeczywistej sondy	216
7.2	Prędkość w warstwie przyściennej, przypadek odniesienia . .	219
7.3	Warstwy przyścienne, przypadek B	220
7.4	Warstwy przyścienne, przypadek C	221
7.5	Warstwy przyścienne, przypadek D	222
7.6	Warstwy przyścienne, przypadek C1	223
7.7	Warstwy przyścienne, przypadek C2	224
7.8	Wizualizacja olejowa, przypadek referencyjny	225
7.9	Wizualizacja olejowa, standardowy generator	226
7.10	Wizualizacja olejowa, optymalny generator	227

7.11	Wizualizacja olejowa, optymalny generator, połowa wydatku	228
7.12	Wizualizacja olejowa, optymalny generator, przybliżona fala	229
7.13	Wizualizacja olejowa, powiększony generator	230
7.14	Widmo mocy interferogramu	231
7.15	Widmo mocy transformaty po filtrowaniu górno- przepustowym	232
7.16	Widmo mocy transformaty po filtrowaniu pasmowo- zaporowym	233
7.17	Widmo mocy transformaty po filtrowaniu połowy płaszczy- zny	234
7.18	Widmo mocy transformaty po zamianie zmiennych	235
7.19	Widmo mocy członu $G(\vec{\nu})$	236
7.20	Faza	237
7.21	Faza wzdłuż poziomej linii obrazu	238
7.22	Rzeczywisty przebieg fazy w pojedynczej linii obrazu	239
7.23	Pełna maska.	240
7.24	Zestawienie maski z obrazem interferometrycznym	241
7.25	Początek ścieżki algorytmu typu "flood-fill"	242
7.26	Przebieg położenia przedniej fali, wybrane 2 sekundy	243
7.27	Szczegółowy przebieg położenia przedniej fali, wybrane 0,25 skundy	244
7.28	Widmo mocy ruchu fali przedniej podczas pomiaru	245
7.29	Uśrednione widmo mocy fali przedniej	245
7.30	Zestawienie uśrednionych widm mocy fali przedniej	247
7.31	Przebieg położenia tylnej fali, wybrane 2 sekundy	248
7.32	Szczegółowy przebieg położenia tylnej fali, wybrane 0,25 se- kundy	249
7.33	Widmo mocy ruchu fali tylnej	250
7.34	Uśrednione widmo mocy fali tylnej	250

7.35	Uśrednione widmo mocy fali tylnej (szczegółowe)	251
7.36	Zestawienie uśrednionych widm mocy fali tylnej	252
7.37	Przebieg położenia głównej fali	253
7.38	Przebieg położenia głównej fali (szczegółowy)	254
7.39	Widmo mocy ruchu fali głównej	255
7.40	Szczegółowe widmo mocy ruchu fali głównej	255
7.41	Uśrednione widmo mocy fali głównej	256
7.42	Szczegółowe uśrednione widmo mocy fali głównej	256
7.43	Zestawienie uśrednionych widm mocy fali głównej	258
7.44	Przebieg odległości pomiędzy falami, wybrane 2 sekundy . .	259
7.45	Szczegółowy przebieg odległości pomiędzy falami, wybrane 0,25 sekundy	260
7.46	Widmo mocy odległości pomiędzy falami	261
7.47	Uśrednione widmo mocy odległości pomiędzy falami	261
7.48	Uśrednione widmo mocy odległości pomiędzy falami	262
7.49	Zestawienie uśrednionych widm mocy odległości pomiędzy falami	263
7.50	Porównanie widm mocy wyznaczonych różnymi aplikacjami .	264
7.51	Zestawienie chwilowych widm mocy dla przepływu bez wirów	265
7.52	Zestawienie chwilowych widm mocy dla przepływu z wirami	266
7.53	Przebiegi położenia fal przy obecności wirów	267
7.54	Uśrednione, przesunięte położenia fal, pomiar z wirami . . .	268
7.55	Uśrednione, przesunięte położenia fal, pomiar bez wirów . .	268

Spis tabel

1	Liczba Macha na końcu płytki pomiarowej	153
2	Parametry geometryczne stopy lambda	156
3	Parametry warstwy przyściennej 25 mm powyżej fali uderzeniowej	163
4	Parametry warstwy przyściennej 30 mm poniżej fali uderzeniowej	166
5	Parametry warstwy przyściennej 55 mm poniżej fali uderzeniowej	170
6	Długości oderwania	171
1	Cechy statystyczne przebiegu ciśnienia	183
2	Cechy statystyczne uśrednionego przebiegu ciśnienia	185
3	Wpływ obecności wirów na średnią oscylację ciśnienia	188
4	Wykonane szybkie filmy wizualizacji "Schlieren"	190
5	Statystyka ruchu przedniej fali	193
6	Uśredniona statystyka ruchu przedniej fali	195
7	Wpływ wirów na oscylacje elementów układu falowego	201
1	Położenia punktów pomiaru ciśnienia statycznego	215
2	Wpływ rozmiarów sondy na wyniki pomiarów	218
3	Statystyka ruchu przedniej fali	244
4	Uśredniona statystyka ruchu przedniej fali	246

5	Statystyka ruchu tylnej fali	249
6	Uśredniona statystyka ruchu tylnej fali	251
7	Statystyka ruchu głównej fali	254
8	Uśredniona statystyka ruchu głównej fali	257
9	Statystyka odległości pomiędzy falami	260
10	Uśredniona statystyka odległości pomiędzy falami	262

Bibliografia

- [1] R. A. Wallis. The use of air jets for boundary layer control. *A.R.L. Aeronote*, 1952.
- [2] R. A. Wallis. A preliminary note on a modified type of air jet for boundary layer control. *Aeronautical Research Council-A.R.C. C.P.513*, 1956.
- [3] R. A. Wallis, Sturat C. M. On the control of shock-induced boundary-layer separation with discrete air jets. *Aeronautical Research Council-A.R.C., Rep. 19865*, 1956.
- [4] C. M. Velte, M. O. L. Hansen, D. Cavar. Flow analysis of vortex generators on wing sections by stereoscopic particle image velocimetry measurements. *Enviromental Research Letters*, 2008.
- [5] H. Pearcy. Shock induced separation and its prevention by design and boundary layer control. *Pergamon Press, Vol.2*, strony 1166–1344, 1961.
- [6] N. C. Freeman, R. F. Cash. Experiments with slot blowing and discrete air jets to suppress shock-induced separation. *Unpublished N.P.L. (National Phisical Laboratory) work*, 1958.
- [7] A. B. Haines, T. E. Bateman. Report draft. *Unpublished N.P.L. (National Phisical Laboratory) work*, 1959.

- [8] J. P. Johnston, M. Nishi. Vortex generator jets – a means for flow separation control. *AIAA Journal*, Vol. 28, No.6, strony 989–994, 1990.
- [9] D. A. Compton, J. P. Johnston. Streamwise vortex production by pitched and skewed jets in a turbulent boundary layer. *AIAA Journal*, Vol. 30, No. 3, strony 640–647, 1992.
- [10] Z. U. Khan, J. P. Johnston. On vortex generating jets. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 21, strony 506–511, 2000.
- [11] Z. U. Khan, J. P. Johnston. On the dominant vortex produced by a pitched and skewed jet in crossflow. *Thermoscience Division, Mechanical Engineering Department, Stanford University*, 1999.
- [12] J. P. Johnston, B. P. Mosier, Z. U. Khan. Vortex generating jets; effects of jet-hole inlet geometry. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, strony 744–749, 2002.
- [13] G. V. Selby, J. C. Lin, F.G. Howard. Control of low-speed turbulent separated flow using jet vortex generators. *Experiments in Fluids* 12, strony 394–400, 1992.
- [14] M. K. Rao. An experimental investigation of the use of air-jet vortex generators to control shock-induced boundary layer separation. *PhD Thesis, City University, London*, 1988.
- [15] H. H. Pearcey, M. K. Rao, D. M. Sykes. Inclined air-jets used as vortex generators to suppress shock-induced separation. *AGARD Meeting on Computational and Experimental Assessment of Jets in Cross Flow*, 1993.
- [16] X. Zhang, M. W. Collins. Nearfield evaluation of a longitudinal vortex generated by an inclined jet in a turbulent boundary layer. *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 119, strony 934–939, 1997.

- [17] X. Zhang. Turbulence measurements of longitudinal vortex generated by an inclined jet in a turbulent boundary layer. *ASME Journal of Fluids Engineering, Vol.120*, strony 765–771, 1998.
- [18] X. Zhang. An inclined rectangular jet in a turbulent boundary layer-vortex flow. *Experiments in Fluids, Vol. 28*, strony 344–354, 2000.
- [19] X. Zhang. Turbulence measurements of an inclined rectangular jet in a turbulent boundary layer. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, strony 292–296, 2000.
- [20] I. M. Milanowic, K. B. Zaman. Pitched and yawed circular jet in cross-flow. *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*, strony 292–296, 2002.
- [21] L. J. Souverein, J. F. Debieve. Effect of air-jet vortex generators on a shock wave boundary layer interaction. *Exp. Fluids 49*, strony 1053–1064, 2010.
- [22] W. J. Prosnak. *Mechanika Płynów, Tom I i II*. Wydawnictwo Naukowe PWN, wydanie 1, 1970.
- [23] S. Discetti, A. Ianiro. *Experimental Aerodynamics*. CRC Press, Taylor & Francis Group, wydanie 1, 2017.
- [24] A.F.P. Houwing, K.Takayama, Z.Jiang, M.Sun, K.Yada, H.Mitobe. Interferometric measurement of density in nonstationary shock wave reflection flow and comparison with cfd. *Shock Waves*, 2005.
- [25] D.J. Bone. Fourier fringe analysis-the two-dimensional phase unwrapping problem. *Applied Optics*, 1991.
- [26] H. Liepmann, W. Roshko. *Elements of Gas Dynamics*. John Wiley and Sons, New York, 1957.

- [27] R. Szwaba, K. Namieśnik. Design of a nozzle for the flow control for ufast wp-3 project. *Opracowanie wewnętrzne Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, nr arch. 5146/05*, 2005.