

Ćw. 5b WIZUALIZACJA PRZEPLYWÓW ŚCIŚLIWYCH

1. Cel ćwiczenia

Ćwiczenie ma służyć zapoznaniu studentów z niektórymi technikami wizualizacji przepływów ściśliwych oraz podstawami interpretacji obrazów przepływu.

2. Podstawy teoretyczne

Do wizualizacji przepływów ściśliwych ($M > 0.3$) stosuje się głównie metody wykorzystujące zmianę współczynnika załamania światła, gdyż wtedy ich przewaga nad innymi metodami badania przepływu jest wyraźna. W zasadzie jednak metodami tymi można uzyskać zadowalające rezultaty dla każdej prędkości przepływu, gdy występują zmiany gęstości spowodowane zmianami temperatury lub składem gazu. Zaletą metod optycznych polega na tym, że przy badaniu nie wymagają one wprowadzania do przepływu elementów obcych (dodatki barwiące płyn, znaczniki kierunku itp.).

Metody optyczne opierają się na zjawisku, że zmianie gęstości płynu ρ towarzyszy zmiana współczynnika załamania światła wg zależności (zwanej prawem Gladstone'a-Dale'a):

$$\frac{n - 1}{\rho} = \text{const} \quad (1)$$

gdzie: $n = c_0/c$ - współczynnik załamania światła,

c_0 - prędkość światła w próżni,

c - prędkość światła w ośrodku o gęstości ρ .

Zależność ta jest słuszna, gdy współczynnik załamania jest bliski jedności, co dla gazów i par cieczy jest spełnione (np. przy $p = 10^5 \text{ N/m}^2$ i $T = 273 \text{ K}$ wartości współczynników wynoszą: dla powietrza $n = 1,000292$, tlenu $n = 1,000272$, metanu $n = 1,000442$, pary wodnej $n = 1,000257$).

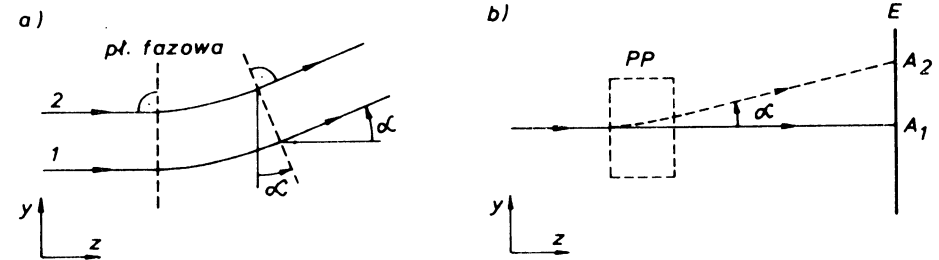
Licznie stosowane metody wizualizacji optycznej dają się podzielić na trzy główne grupy:

a) metoda smug,

b) metoda cieni,

c) metody interferencyjne.

Dwie pierwsze wykorzystują odchylenie promienia świetlnego w wyniku przejścia przez ośrodek o zmiennej gęstości. Rozpatrzmy to na przykładzie rys. 1a.



Rys. 1a Przejście promienia światła przez ośrodek o zmiennej gęstości

Na podstawie zależności (1), zmianie gęstości towarzyszy zmiana współczynnika załamania, a tym samym zmienia się prędkość światła c . Załóżmy, że zmiana gęstości w badanym polu następuje tylko w kierunku y (gęstość wzrasta). Z dwóch sąsiednich promieni 1 i 2, leżących w płaszczyźnie yz i równoległych do z , promień 2 będzie miał mniejszą prędkość. Drogi przebyte przez oba promienie w tym samym czasie będą więc różne. Płaszczyzna fazowa, która na początku obszaru zmiennej gęstości jest równoległa do y będzie na końcu tego obszaru odchylna o pewien kąt α . O taki sam kąt ulega odchyleniu promień światła (płaszczyzna fazowa jest prostopadła do kierunku rozchodzenia się światła). Przy uwzględnieniu, że odchylenia są małe kąt ten wynosi

$$\alpha = \int_L \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (2)$$

gdzie: L - szerokość obszaru zmiany gęstości.

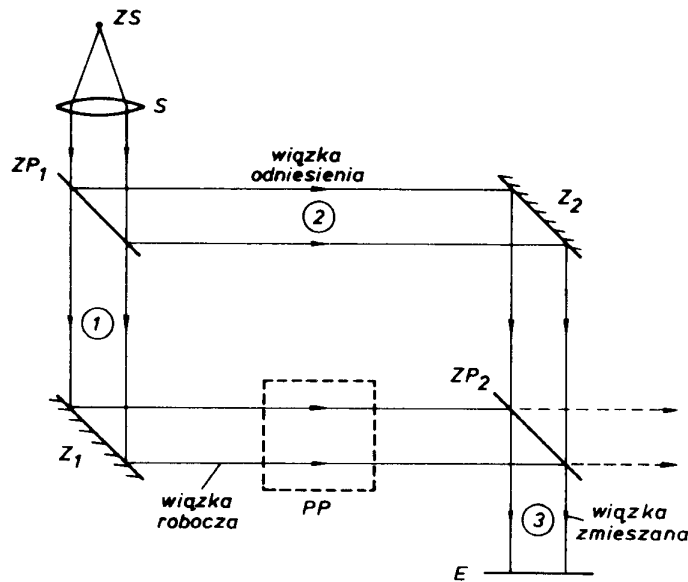
Zrozumienie różnicy między metodą smug i cieni ułatwia rys. 1b. Przez przestrzeń pomiarową PP , w której może zachodzić zmiana gęstości, przechodzi promień światła. Jeśli takiej zmiany nie ma, to promień pada na ekran w punkcie A_1 . W przypadku istnienia zmiany gęstości odchylny o kąt α promień (linia przerywana) pada na ekran w punkcie A_2 . Wykorzystanie przesunięcia $A_1 A_2$ leży u podstaw metody cieni, podczas gdy zmianę kąta α

wykorzystuje się w metodzie smug. Można wykazać z zależności (1) i (2), że kąt α jest proporcjonalny do pierwszej pochodnej gęstości w kierunku prostopadłym do promienia (tutaj y), a odcinek $\overline{A_1 A_2}$ do drugiej pochodnej w tym samym kierunku.

Z kolei metody interferencyjne wykorzystują różnicę dróg optycznych między promieniem światła przechodzącym przez obszar zaburzony, a tzw. promieniem odniesienia, prowadzące do interferencji światła. Wielkości mierzone w tej metodzie są funkcjami współczynnika załamania światła, a zatem gęstości. Tym samym, wszystkie trzy grupy metod wizualizacyjnych uzupełniają się nawzajem, dostarczając każda z nich, innych informacji o przepływie. Poniżej omówimy krótko każdą z tych metod.

Metoda interferencyjna

W badaniach aerodynamicznych często stosowanym urządzeniem jest interferometr systemu Macha-Zehndera. Jego główną zaletą jest rozdzielenie wiązki roboczej od wiązki odniesienia, która w całości przechodzi przez pole niezaburzone optycznie. Schemat takiego interferometru pokazano na rys. 2.



Rys. 2 Schemat interferometru Macha-Zehndera

Do otrzymania równoległej wiązki światła używa się monochromatycznego źródła (ZS) umieszczonego w ognisku soczewki S . Tym źródłem może być lampa rtęciowa z filtrem, laser lub dioda (LED) o odpowiedniej mocy i długości fali świetlnej. Wiązka równoległa pada na zwierciadło półprzepuszczalne ZP_1 , które rozdziela ją na wiązkę roboczą 1 i wiązkę odniesienia 2. Zwierciadło półprzepuszczalne przepuszcza około połowy padającego światła a resztę odbija. Zwierciadło Z_1 kieruje z kolei wiązkę roboczą przez przestrzeń pomiarową PP w stronę zwierciadła półprzepuszczalnego ZP_2 . Światło odbite od ZP_1 (wiązka odniesienia) pada na zwierciadło Z_2 a po odbiciu na ZP_2 . W wyniku tego powstają dwie zmieszane wiązki światła, z których jedna 3 pada na ekran a druga (zaznaczona liniami przerywanymi) pozostaje nie wykorzystana. Dla uzyskania jednakowych dróg optycznych wiązki roboczej i odniesienia, zwierciadła umieszcza się w rogach prostokąta, pod kątem 45° względem początkowej wiązki równoległej.

Jeśli wszystkie cztery zwierciadła są idealnie równoległe, a warunki optyczne w wiązce roboczej i odniesienia takie same, to obie wiązki tworzące wiązkę zmieszana będą równoległe, ponieważ pochodzą z tego samego źródła, są koherentne i mogą interferować ze sobą. Typ interferencji zależy od różnicy długości dróg optycznych $\overline{\Delta D L}$, która zapisana w formie bezwymiarowej dla wiązek 1 i 3 wynosi

$$\varepsilon = \frac{\overline{\Delta D L}}{\lambda_o} = \frac{1}{\lambda_o} \int (n_r - n_{od}) dz \quad (3)$$

gdzie: λ_o - długość fali świetlnej w próżni,

n_r - wartość współczynnika załamania światła w wiązce roboczej,

n_{od} - wartość współczynnika załamania światła w wiązce odniesienia.

Gdy w obu wiązkach nie występują niejednorodności optyczne, a interferometr ustawiony jest tak, że ε równe jest zeru lub liczbie całkowitej, to ekran E jest równomiernie rozjaśniony. Jeśli w pewnym miejscu przestrzeni pomiarowej wystąpi zmiana gęstości, powodująca zmianę n_r , to $\overline{\Delta D L}$ staje się różne od zera, co powoduje zmianę oświetlenia pewnej części ekranu (przy ε równym $1/2$ lub liczbie całkowitej plus $1/2$ - następuje całkowite wygaszenie). W rezultacie mamy do czynienia z szeregiem jasnych i ciemnych obszarów (prążków interferencyjnych), z których każdy reprezentuje określoną wartość ε . Różnica wartości ε między sąsiednimi prążkami równa się jedności.

W przypadku, gdy badane pole wewnątrz przestrzeni pomiarowej jest dwuwymiarowe, a gęstość zmienia się tylko wewnątrz tej powierzchni, różnica dróg optycznych wynosi

$$\varepsilon = \frac{n_r - n_{od}}{\lambda_o} L \quad (4)$$

gdzie L jest szerokością przestrzeni pomiarowej.

Za pomocą zależności (4) i (1) można wyznaczyć różnicę gęstości odpowiadającą dwóm sąsiednim prążkom ($\varepsilon=1$) w postaci

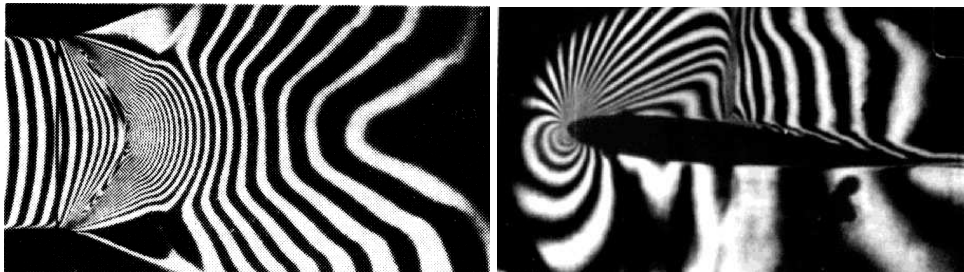
$$\Delta\rho = \frac{\lambda_o}{L \cdot \text{const}} \quad (5)$$

gdzie: $\text{const} = \frac{n - 1}{\rho}$ stała Gladstone-Dale'a (jej wartość zależy od długości fali światła i rodzaju ośrodka).

Jeśli ciśnienie w przestrzeni pomiarowej jest stałe, to wykorzystując równanie stanu $p = \rho RT$ można na podstawie zależności (5) określić różnicę temperatur między dwoma sąsiednimi prążkami (k oraz $k+1$)

$$T = T_{k+1} - T_k = \frac{\lambda}{\text{const} \cdot L} \frac{R}{p} T_k \cdot T_{k+1} \quad (6)$$

Przykłady interferogramów pokazano na rys. 3.

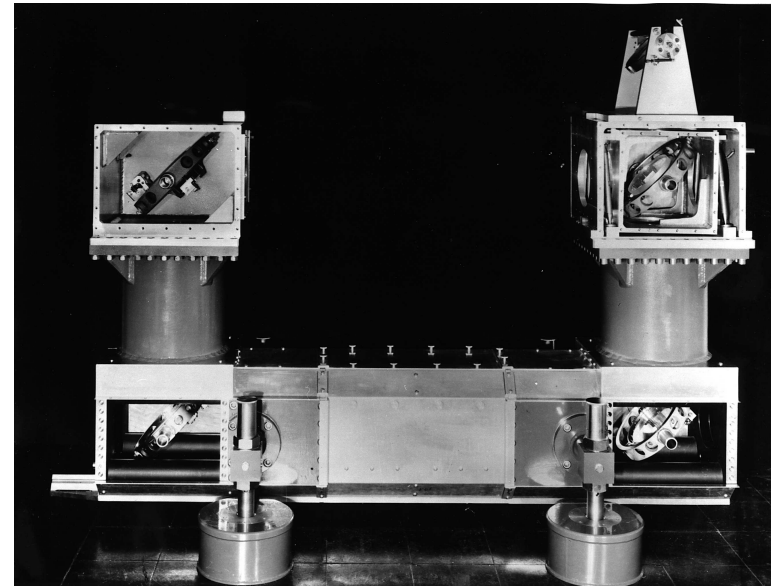


Rys. 3 Obraz prążków interferencyjnych: (a) w dyszy Laval'a i (b) podczas opływu transonicznego profilu z falą uderzeniową

Przedstawiony powyżej sposób ustawienia interferometru, w którym wiązki 1 i 2 po zmieszaniu są początkowo równoległe, daje tzw. nieskończenie dużą odległość prążków. Metoda ta nadaje się do wizualizacji pól małych zmian gęstości.

Podczas wizualizacji przepływów, w których występują bardzo duże zmiany gęstości (np. fale uderzeniowe), korzystniejsze jest ustawienie interferometru tak, aby wiązki 1 i 2 po zmieszaniu nie były równoległe. Wtedy na ekranie pojawia się od razu szereg prążków interferencyjnych. Niejednorodność optyczna w postaci fali wywołuje zniekształcenie (przesunięcie) tych prążków, które jest miarą zmiany gęstości w fali. Wymaga to jednak użycia źródła światła o szerszym widmie, dla rozróżnienia kolorów poszczególnych prążków.

Widok interferometru Macha-Zehndera znajdującego się w Zakładzie Aerodynamiki pokazano na rys. 4 (w celu pokazania zwierciadeł osłony zostały częściowo zdemontowane).

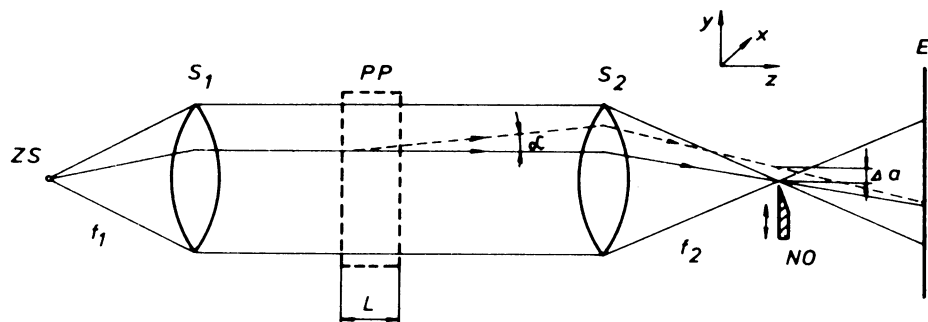


Rys. 4 Interferometr Macha-Zehndera

Należy zaznaczyć, że interferometr Macha-Zehndera jest urządzeniem bardzo kosztownym, z uwagi na wymagania konstrukcyjne (skomplikowane mechanizmy obrotu zwierciadeł, sztywność całej konstrukcji) oraz wymaganą jakość obróbki optycznej zwierciadeł. Dlatego też opracowano szereg prostszych systemów, także opartych o interferencję światła. Do nich należy tzw. interferometr smugowy, wykorzystujący pryzmaty Wollastona do uzyskania prążków interferencyjnych.

Metoda smug

Schemat układu optycznego, wykorzystywanego najczęściej w metodzie smug, pokazano na rys. 5.

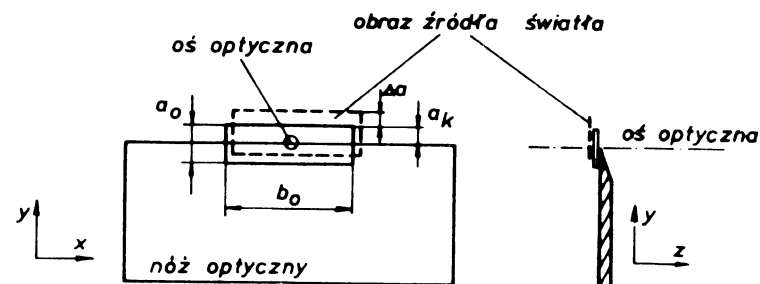


Rys. 5 Schemat wizualizacji metodą smug

Źródło światła ZS (prostokątne o wymiarach $a_z \cdot b_b$) ustawione w ognisku soczewki S_1 daje równoległą wiązkę przechodzącą przez przestrzeń pomiarową PP . Światło jest z kolei ogniskowane przez soczewkę S_2 (o ogniskowej f_2) a następnie pada na ekran E ustawiony tak, aby dał ostry obraz przestrzeni pomiarowej. W ognisku soczewki S_2 ustawiona jest przesłona, tzw. nóż optyczny NO , który może być przemieszczany w płaszczyźnie prostopadłej do osi optycznej układu. Przebieg dowolnego promienia światła w przypadku, gdy w przestrzeni pomiarowej nie występują zmiany gęstości zaznaczono linią ciągłą, a promienia odchylnego o kąt α (gdy takie zmiany występują) - linią przerywaną. Odległość odchylnego promienia od osi optycznej w ognisku soczewki S_2 jest równa

$$\Delta a = f_2 \alpha \quad (7)$$

W celu uzyskania odpowiedniej czułości układu, obraz źródła światła, który powstaje w ognisku soczewki S_2 (i ma wymiary $a_o \cdot b_o$) musi być częściowo przesłonięty nożem optycznym na wielkość a_k - rys. 6.



Rys. 6 Zasada działania noża optycznego

W rezultacie, promienie odchylone od osi mogą zwiększać oświetlenie ekranu. Jeśli $\Delta\alpha$ jest dodatnie lub zatrzymywają się na nożu ($\Delta\alpha$ ujemne), co powoduje jego lokalne zaciemnienie. Kontrast w danym punkcie ekranu wyraża się zależnością

$$\frac{\Delta I}{I_k} = \frac{f_2}{a_k n_a} \int_L \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (8)$$

gdzie: I_k - natężenie światła na ekranie w przypadku braku zmian gęstości w PP oraz przesłonięcia obrazu źródła światła o wielkość a_k ;

$\Delta I = I - I_k$ - różnica natężenia światła w danym punkcie ekranu względem I_k ;

n_a - współczynnik załamania światła poza PP .

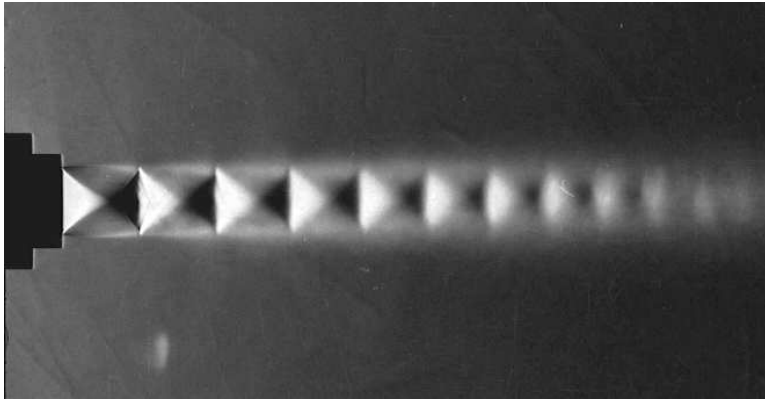
Mierząc natężenie światła w różnych miejscach ekranu (np. fotoelementem) można wyznaczyć pochodną współczynnika załamania światła w odpowiednich punktach przestrzeni pomiarowej, a następnie na podstawie zależności (1) obliczyć pochodną gęstości

$$\frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{\rho}{n - 1} \frac{\partial n}{\partial y} = \frac{I}{\text{const}} \frac{\partial n}{\partial y} \quad (9)$$

W większości przypadków metodę smug wykorzystujemy raczej do analizy jakościowej niż ilościowej. Należy przy tym pamiętać, że uzyskany obraz pola przepływu zależy od ustawienia źródła światła i noża optycznego. Jeśli krawędź noża jest równoległa do osi x (porównaj rys. 5), to układ wykazuje zmianę gradientu współczynnika załamania światła w kierunku y (źródło światła musi

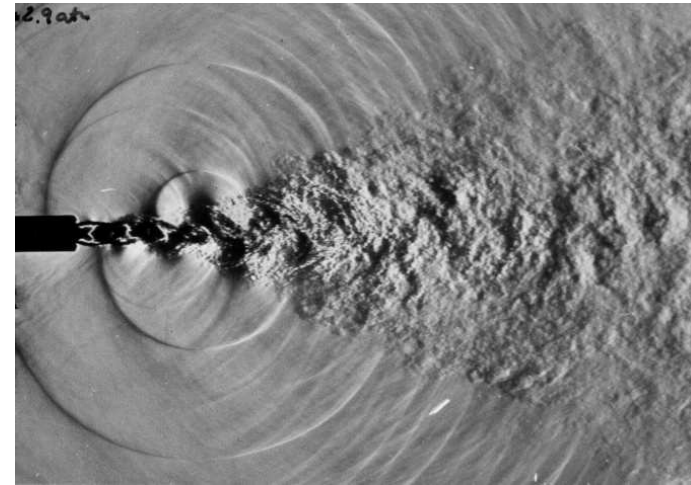
być też równoległe do osi x). Ponieważ promienie światła odchylają się w stronę obszarów o wzrastającej gęstości, to w przypadku, gdy ρ rośnie w kierunku y odchylenia promieni $\Delta\alpha$ będą dodatnie. Jaśniejsze miejsca na ekranie odpowiadają więc wzrostowi gęstości, a ciemniejsze - jej maleniu. Przedstawienie noża optycznego na drugą stronę osi optycznej (czyli odwrotnie niż na rys. 5) spowoduje zmianę obszarów jasných na ciemne i odwrotnie.

Wizualizacja zmian gradientu gęstości w kierunku x wymaga zmiany ustawienia noża optycznego tak, aby jego krawędź była równoległa do osi y . Podobnie trzeba przestawić źródło światła. Przykład wizualizacji metodą smug pokazano na rys. 7.



Rys. 7 Przykład wizualizacji metodą smug. Strumień z dyszy zbieżnej (oświetlenie ciągłe)

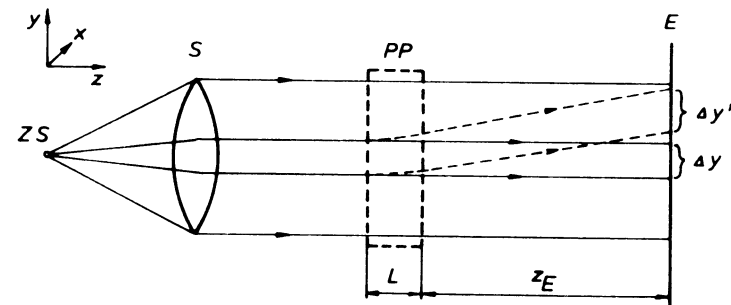
Obrazy wizualizacji otrzymane przy zastosowaniu światła ciągłego pokazują jedynie zjawiska mające charakter ustalony. W celu zwizualizowania zjawisk chwilowych należy zastosować źródło światła typu błyskowego. Ponieważ podczas przepływu gazów osiągane są duże prędkości, (łącznie z naddźwiękowymi), to dla zobrazowania chwilowego stanu przepływu czas oświetlenia musi być rzędu 1 mikrosekundy. Na zdjęciu wizualizacji widoczne są wtedy nie tylko elementy płynu, ale także np. fale dźwiękowe. Taki przykład wizualizacji przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8 Wizualizacja metodą smug - oświetlenie błyskowe. Strumień z dyszy płaskiej (widoczne granice strumienia oraz fale dźwiękowe generowane przez strumień).

Metoda cieni

W odróżnieniu od metody smug, w której kontrast zależy od kąta odchylenia promieni α , w metodzie cieni wykorzystuje się liniowe przesunięcie odchylonych promieni. Najprostszy schemat układu optycznego, wykorzystywanego w tej metodzie, pokazano na rys. 9.



Rys. 9 Schemat wizualizacji metodą cieni

Punktowe źródło światła ZS umieszczone w ognisku soczewki S daje równoległą wiązkę światła, która po przejściu przez przestrzeń pomiarową PP pada na ekran E . Ekran jest umieszczony w odległości z_E od przestrzeni pomiarowej. Rozważmy przypadek, gdy w przestrzeni pomiarowej ma miejsce

wzrost gęstości w kierunku y równoważny wzrostowi współczynnika załamania. Dwa początkowo równoległe promienie światła odległe o Δy ulegają w przestrzeni pomiarowej odchyleniu o różne kąty (odpowiednio α oraz $\alpha+d\alpha$). Ich odległość na ekranie wyniesie

$$\Delta y' = \Delta y + z_E d\alpha > \Delta y \quad (10)$$

co jest równoznaczne ze zmianą oświetlenia ekranu. Kontrast między dwoma sąsiednimi obszarami na ekranie zależy od drugiej pochodnej współczynnika załamania światła i wynosi

$$\frac{\Delta I}{I_p} = \frac{I - I_p}{I_p} = \frac{\Delta y'}{y} - I - z_E \int_L \frac{\partial \alpha}{\partial y} dz = - \frac{z_E}{n_a} \int_L \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} dz \quad (11)$$

gdzie: I - natężenie światła na ekranie,

I_p - natężenie światła.

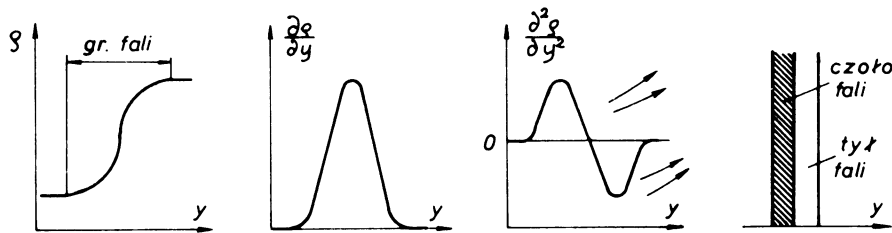
z_E - odległość ekranu od przestrzeni pomiarowej,

L - szerokość przestrzeni pomiarowej.

Z zależności (11) wynika, że kontrast obrazu wzrasta wraz ze wzrostem z_E , chociaż wiąże się to ze zmniejszeniem ostrości obrazu.

Metoda cieni szczególnie nadaje się do wizualizacji takich przepływów, w których druga pochodna gęstości jest duża np. fal uderzeniowych. Nie jest natomiast przydatna do wizualizacji obszarów rozrzedzenia i zgęszczenia, w których ta pochodna jest mała.

Na rys. 10 pokazano w sposób schematyczny charakter zmiany gęstości oraz jej pierwszej i drugiej pochodnej odpowiadającej fali uderzeniowej. Ponadto zaznaczono kierunki odchylenia promieni światła przechodzących przez falę.

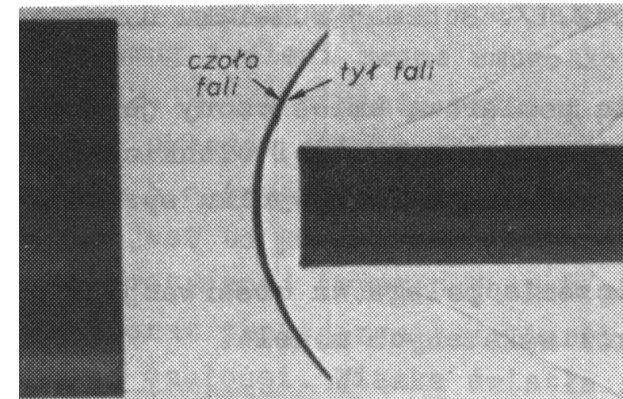


Rys. 10 Zmiany gęstości w fali uderzeniowej

Dla czoła fali mamy $\partial^2 \rho / \partial y^2 > 0$, a zatem także $\partial^2 n / \partial y^2 > 0$, co wynika z zależności 12.1. Początkowo równoległe promienie światła po przejściu przez tę część fali stają się rozbieżne. W tylnej części fali jest $\partial^2 \rho / \partial y^2 < 0$ (czyli też $\partial^2 n / \partial y^2 < 0$) i promienie zbiegają się, a natężenie światła na ekranie wzrasta. Obraz cieniowy fali uderzeniowej charakteryzuje się więc istnieniem dwóch linii (ciemnej i jasnej), z których ciemna oznacza przednią część fali.

Należy zaznaczyć, że w przeciwieństwie do metody smug, która wykazuje zmiany współczynnika załamania tylko w kierunku prostopadłym do noża optycznego, na jednym obrazie cieniowym może być obserwowana zmiana zarówno w kierunku y jak i x .

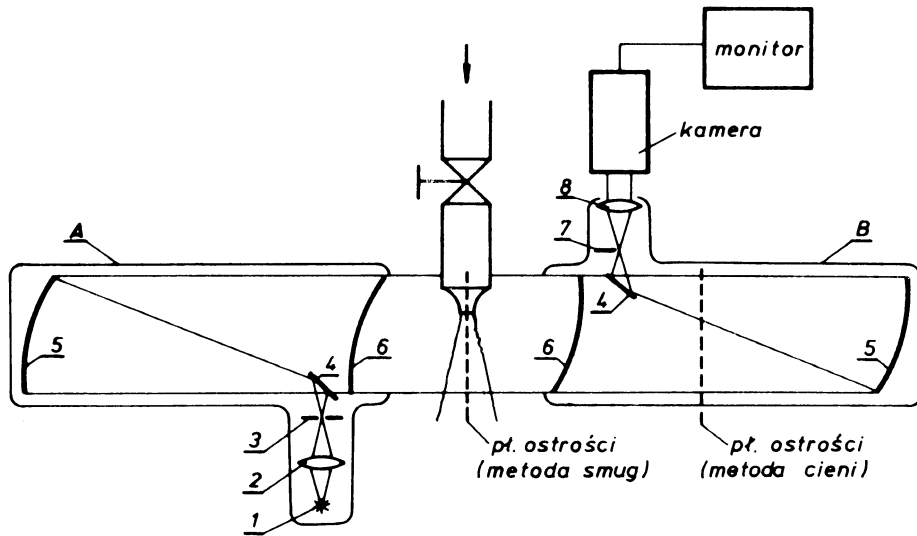
Przykładowe zdjęcie wykonane metodą cieni pokazano na rys. 11.



Rys. 11 Przykład wizualizacji metodą cieni - odsunięta fala uderzeniowa

3. Stanowiska pomiarowe i wykonanie ćwiczenia

W ćwiczeniu zostanie wykorzystane specjalne urządzenie do wizualizacji metodą smug i cieni zwane smugoskopem. Jego schemat pokazano na rys. 12.



Rys. 12 Schemat smugoskopu

Zasadniczą różnicą w stosunku do omawianych poprzednio układów optycznych jest użycie dużych zwierciadeł wklęsłych 5 o średnicy 230 mm i ogniskowej 1917 mm. Spowodowane jest to koniecznością uniknięcia aberracji sferycznej i chromatycznej (występujących przy dużych średnicach soczewek) oraz zmniejszenia wymiarów przyrządu przy zachowaniu dużej czułości. Wiązka światła ze źródła 1 przechodzi przez soczewkę 2. W ognisku tej soczewki ustawiona jest przesłona 3 z otworkami o różnej średnicy (źródło punktowe dla metody cieni) lub wycięciami szczelinowymi (źródło prostokątne w metodzie smug). Lusterko 4 kieruje wiązkę światła na zwierciadło 5, która po przejściu przez soczewkę korekcyjną 6 oświetla przestrzeń pomiarową.

W części odbiorczej B, która jest zbudowana symetrycznie, światło przechodzi przez soczewkę korekcyjną 6 i po odbiciu od zwierciadła 5 oraz lusterka 4 kierowane jest przez soczewkę 8 na kamerę telewizyjną. Wynik wizualizacji oglądamy na monitorze.

W przypadku metody smug, w ognisku wiązki odbitej ustawia się ruchomy nóż optyczny 7. Za pomocą soczewki 8 ostrość obrazu ustawia się na przestrzeń pomiarową.

Przy wizualizacji metodą cieni nóż optyczny demontuje się, a płaszczyznę ostrości przesuwają poza przestrzeń pomiarową (porównaj rys. 12). Przy dużym odsunięciu należy liczyć się ze zmniejszeniem ostrości obrazu.

4. Wykonanie ćwiczenia

Należy wykonać następujące czynności (rozpoczynamy od metody smug):

1. Włączyć źródło światła.
2. Sprawdzić, czy nóż optyczny jest zamontowany.
3. Ustawić ostrość obrazu na wylot z dyszy (przy odsuniętym nożu).
4. Dosunąć nóż optyczny dla uzyskania odpowiedniej czułości.
5. Za pomocą zaworu ustawić krytyczny dławiony wypływ gazu z dyszy. Wskazać obszary o wzrastającej i malejącej gęstości.
6. Zmieniając położenie noża optycznego zaobserwować zmianę czułości układu.
7. Zamknąć przepływ i zdemontować nóż optyczny.
8. Ustawić ostrość obrazu poza przestrzenią pomiarową.
9. Przy tych samych warunkach wypływu porównać uzyskany obraz z poprzednim.
10. Regulując położenie płaszczyzny ostrości soczewką 8 zaobserwować zmianę czułości metody oraz ostrość obrazu.
11. Zamknąć zawór odcinający i wyłączyć źródło światła.