

## Ćw. 5a WIZUALIZACJA PRZEPLYWÓW NIEŚCIŚLIWYCH

### 1. Cel ćwiczenia

Ćwiczenie służy zapoznaniu studentów z niektórymi technikami wizualizacji przepływów nieściśliwych oraz podstawami interpretacji uzyskiwanych tą metodą obrazów przepływu.

### 2. Podstawy teoretyczne

Wizualizacje są historycznie najstarszą metodą analizy przepływów. Odegrały one znaczną rolę w zrozumieniu złożonych zjawisk przepływowych i weryfikacji modeli matematycznych, służących do opisu tych zjawisk. Ogólny obraz przepływu pozwala znacznie ograniczyć lub niejednokrotnie wyeliminować bardzo pracochłonne pomiary ilościowe oraz stwierdzić, czy zostały one poprawnie wykonane.

Możliwość wykorzystania jednej z wielu znanych metod wizualizacji zależy w zasadniczy sposób od prędkości przepływu. Dlatego też wykształciły się osobne techniki dla przepływów nieściśliwych i ściśliwych. W przypadku tych pierwszych z reguły wprowadza się do przepływu elementy „znaczone”. W przepływach ściśliwych wykorzystuje się przede wszystkim metody optyczne, jako nie ingerujące w sam przepływ. Z uwagi na te różnice, sposoby wizualizacji przepływów nieściśliwych i ściśliwych zostaną przedstawione osobno.

Jak zaznaczono wyżej, wizualizacja przepływów nieściśliwych polega najogólniej na wprowadzeniu do jednorodnego, przezroczystego ośrodka lub na powierzchnię ciała opływającego elementów „znaczonych”, których tory można bezpośrednio obserwować bądź też rejestrować za pomocą mniej lub bardziej wyrafinowanej techniki fotograficznej. Elementy znaczone powinny mieć gęstość zbliżoną do gęstości płynu, którego przepływ chcemy badać, a wymiary cząsteczek wtrącenia muszą być dostosowane do skali interesującego nas zjawiska. (Dla przykładu: prędkość przepływu w rzece można określić obserwując łódkę, natomiast turbulencję w przepływie powietrza - obserwując ruchy wtrąceń o wymiarze poniżej 1  $\mu\text{m}$ ).

Do analizy przepływów powietrza i innych gazów używamy zwykle rozmaitych rodzajów dymów lub małych banieczek wypełnionych helem, a do

wizualizacji przepływów cieczy - rozmaitych barwników i farb, pęcherzyków wodoru wytworzonych w cieczy metodą elektrolityczną, kulek polistyrenu o gęstości bliskiej cieczy oraz innych wtrąceń.

Obrazy przepływu otrzymywane podczas jego wizualizacji, zachwycające niejednokrotnie harmonią kształtów i proporcji estetycznych, mają za zadanie dostarczyć informacji o wielkościach charakteryzujących wektorowe pole przepływu.

Przed przystąpieniem do interpretacji takiego obrazu należy więc przypomnieć podstawowe pojęcia z kinematyki przepływów.

Linia prądu - linia w każdym swoim punkcie styczna do wektora prędkości w tym punkcie. Równanie linii prądu ma postać:

$$\frac{dx}{V_x} = \frac{dy}{V_y} = \frac{dz}{V_z}.$$

Tor - jest to linia zakreślona w przestrzeni przez dany element płynu. Równanie toru ma postać:

$$\frac{dx}{V_x} = \frac{dy}{V_y} = \frac{dz}{V_z} = dt.$$

Linia wysnuta - linia uformowana przez elementy płynu przechodzące kolejno przez pewien stały punkt w przestrzeni.

W przypadku przepływu nieustalonego linie prądu są tworami chwilowymi, tzn. można znaleźć w przepływie takie linie, że wektory prędkości wszystkich położonych wzdłuż nich punktów będą do tej linii styczne. W następnej chwili w każdym punkcie przestrzeni może nastąpić lokalna zmiana prędkości i w związku z tym można zdefiniować nowe chwilowe linie prądu.

Tory poszczególnych elementów płynu w ruchu nieustalonym są obwiednią chwilowych linii prądu przechodzących przez kolejne położenia rozpatrywanego elementu.

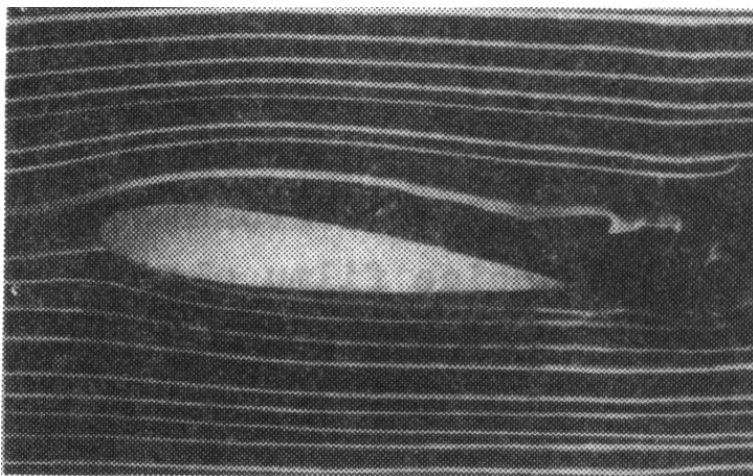
W przypadku przepływu ustalonego - linie prądu, tor oraz linia wysnuta pokrywają się.

Jak widać, analiza zarejestrowanego obrazu przepływu nie jest wcale prosta. Tylko dla ruchu całkowicie (tzn. zarówno w skali makro jak i mikro) ustalonego wszystkie trzy linie pokrywają się.

W przyrodzie i technice mamy zwykle do czynienia z przepływami nieustalonymi w skali całego zjawiska lub tylko lokalnie (np. ustalony opływ walca kołowego jest w obszarze śladu aerodynamicznego przepływem nieustalonym). Zatem odpowiedzi na pytanie, co przedstawia dany obraz przepływu, można udzielić dopiero po zaznajomieniu się z techniką wizualizacji i rejestracji obrazu.

### 2.1 Wizualizacja linii wysnutej

Wykonanie fotografii przepływu w tej technice jest stosunkowo najprostsze, np. w tuneliku dymnym (rys. 1).

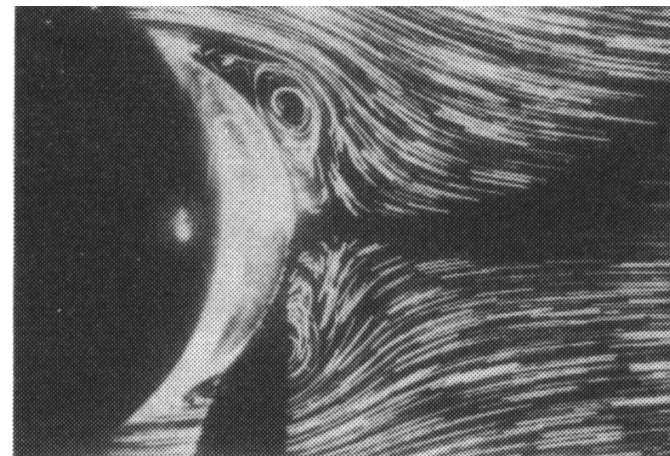


Rys. 1 Opływ profilu - linie wysnute

Warunkiem otrzymania odpowiednio długiego odcinka linii wysnutej jest, aby badany przepływ być przepływem laminarnym (bardzo małe liczby Reynoldsa).

### 2.2 Wizualizacja chwilowego toru

Chwilowe tory elementów płynu można określić fotografując cząstki znaczone w krótkim czasie ekspozycji. Na zdjęciu widoczne są wtedy kierunki ruchu, natomiast prędkość chwilową można wyliczyć z długości drogi, jaką przebyły cząstki w czasie ekspozycji. Przykład wizualizacji podano na rys. 2.



Rys.2 Struktura przepływu za walcem - chwilowe tory

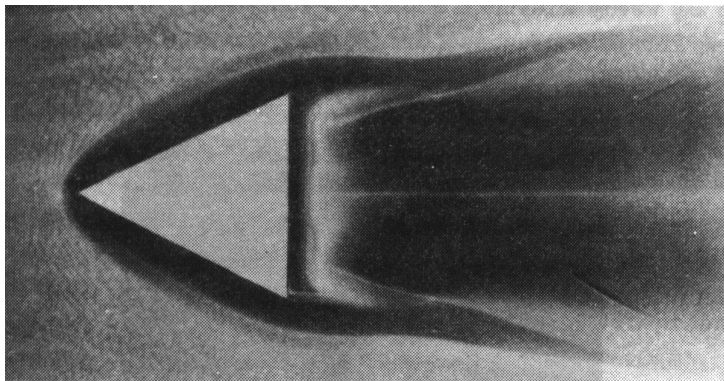
### 2.3 Wizualizacja chwilowej linii prądu

Chwilowe linie prądu można otrzymać tylko drogą filmowania wtrąceń do przepływu, wprowadzanych w sposób przerywany z określoną częstotliwością. Jest to bardzo trudna technika.

### 2.4 Wizualizacja powierzchniowe – metoda filmu olejowego

Wizualizacje powierzchniowe są szeroko rozpowszechnione i dostarczają wielu interesujących informacji. Najczęściej stosowana jest tu metoda filmu olejowego, tzw. „wskaźników kierunku” oraz metoda saltacji piasku.

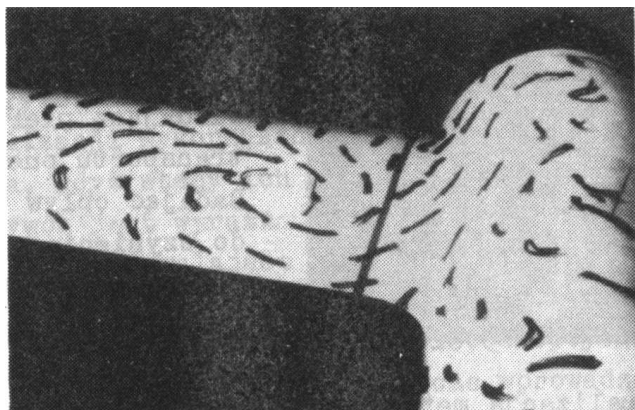
W technice filmu olejowego badaną powierzchnię pokrywa się cienką warstwą oleju z odpowiednim pigmentem (np. sadza angielska lub biel tytanowa). Szybkość spływania oleju zależy od jego lepkości i naprężeń stycznych na powierzchni modelu (zależnych od prędkości przepływu). Dobierając odpowiednio lepkość oleju można film ten utrzymać przez dłuższy czas. Zmywany olej zostawia tym więcej pigmentu na badanej powierzchni, im wolniej z niej spływa tzn. im mniejsze są naprężenia styczne. Otrzymany w taki sposób obraz przedstawia sobą mapę uśrednionych w czasie prędkości i naprężeń stycznych (rys. 3).



Rys. 3 Powierzchniowa wizualizacja przepływu metodą filmu olejowego

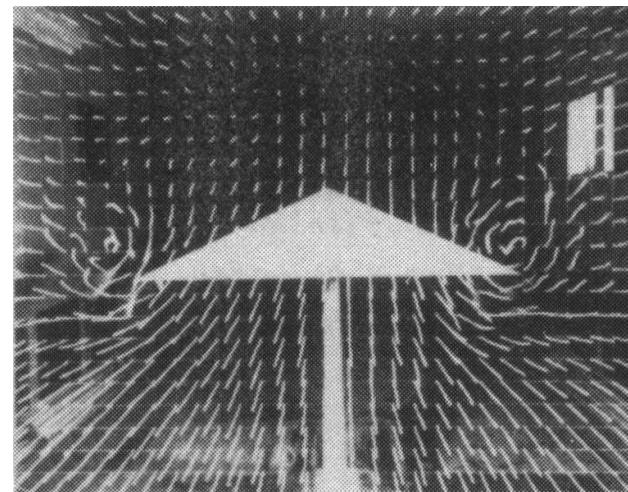
### 2.5 Wizualizacja powierzchniowa – metoda „wskaźników kierunku”

W drugiej ze wspomnianych metod, do badanej powierzchni przykleja się na cienkich nitkach pasemka wełny, tak aby umożliwić im swobodę ruchów we wszystkich kierunkach. Podczas przepływu pasemka układają się wzdłuż przepływu. Dodatkową zaletą tej techniki jest możliwość uzyskania informacji co do charakteru przepływu w warstwie przyściennej. W przypadku warstwy laminarnej, pasemka przylegają ściśle do powierzchni i pozostają nieruchome. W przepływie turbulentnym pasemka podlegają chwilowym ruchom fluktuacyjnym, przez co ich obraz staje się nieostry. W strefie oderwań pasemka wyraźnie „odstają” od badanej powierzchni, wykonując przypadkowe ruchy. Na rys. 4 pokazano przykład takiej wizualizacji zastosowanej na kadłubie i skrzydle szybowca Jantar Standard.



Rys. 4 Opływ w strefie przejścia skrzydło - kadłub

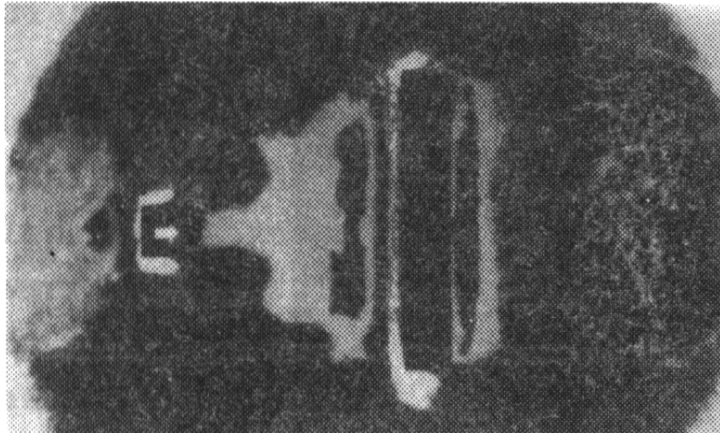
Metodę „wskaźników kierunku przepływu” można stosować nie tylko na powierzchni ciała ale i wewnątrz pola przepływu. Pasemka (wskaźniki) przymocowane są wtedy do drucianej siatki, ustawionej prostopadle do przepływu. W ten sposób istnieje możliwość wizualizowania kierunków prędkości w interesującym nas przekroju. Przykładowa fotografia (rys. 5) przedstawia wiry krawędziowe za skrzydłem „delta”.



Rys. 5 Wizualizacja wirów krawędziowych za skrzydłem "delta"

### 2.6 Wizualizacja powierzchniowa – metoda saltacji

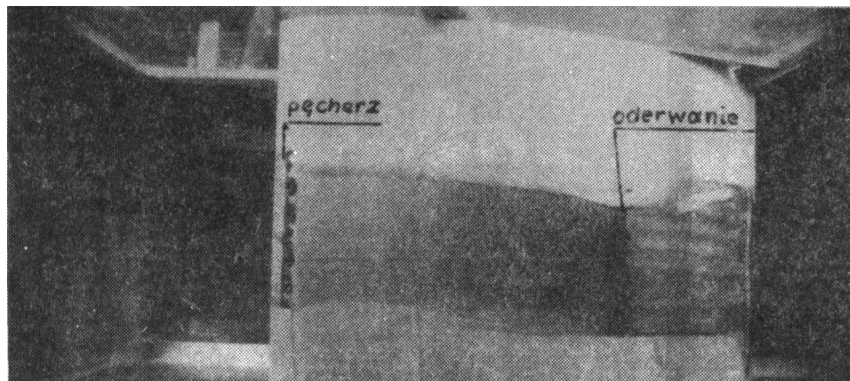
Pewne wnioski ilościowe można wyciągnąć, stosując metodę wizualizacji powierzchniowej zwaną metodą saltacji (erozji) kalibrowanego piasku. Polega ona na wykorzystaniu zjawiska wyrzucania cząstek stałych w postaci ziarenek piasku o odpowiednich wymiarach z chwilą, gdy przepływ osiągnie pewną krytyczną prędkość, odpowiadającą pierwszej fazie transportu pneumatycznego. Badając opływ modelu, mamy do czynienia z niejednorodnym polem prędkości. Saltacja piasku wystąpi tylko na tych obszarach, gdzie lokalna prędkość przepływu jest równa bądź wyższa od krytycznej prędkości zjawiska. Znajac wartość tej prędkości oraz prędkość przepływu niezakłóconego można wyznaczyć linie stałych stosunków tych prędkości. Powtarzając doświadczenie przy różnych prędkościach przepływu niezakłóconego i przy użyciu różnokolorowego piasku otrzymujemy charakterystyczną mapę przepływu, pokazaną na rys. 6.



Rys. 6 Wizualizacja metodą saltacji piasku

Metody filmu olejowego i saltacji są szczególnie przydatne do badań modelowych skomplikowanych przepływów w obszarach zurbanizowanych. Na ich podstawie można określić strefy bardziej lub mniej uciążliwe, z punktu widzenia gromadzenia się zanieczyszczeń czy występowania „przeciągów”.

Stosując metodę filmu olejowego na profilu lotniczym można np. wyznaczyć strefę przejścia, miejsca oderwań oraz strefę występowania tzw. pęcherzy laminarnych - rys. 12.7.

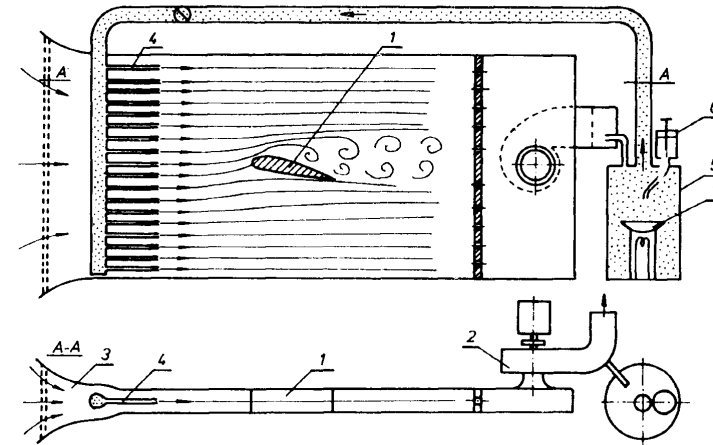


Rys. 7 Wizualizacja olejowa oderwań na profilu (widok z góry)

### 3. Stanowiska pomiarowe i wykonanie ćwiczenia

#### 3.1. Wizualizacja linii wysnutej

Wizualizacji dokonuje się w tunelu dymnym, którego schemat przedstawia rys. 8. Badany model 1 umieszczony jest w prostokątnej przestrzeni pomiarowej. Przepływ w tunelu wymusza wentylator 2, zasysając powietrze z otoczenia poprzez wlot 3. Przed przestrzenią pomiarową umieszczony jest grzebień 4, z którego rurek wypływa dym w postaci cienkich strug. Dym ten wytwarzany jest w wytwornicy 5 w wyniku spalania oleju, podawanego ze zbiornika 6 na grzałkę 7.

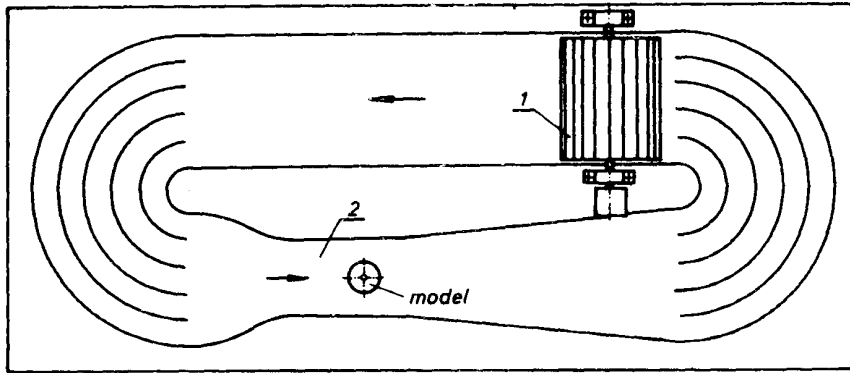


Rys. 8 Schemat tuneliku dymnego

Wykonanie ćwiczenia polega na obserwacji i narysowaniu obrazu opływu wokół wskazanych modeli.

#### 3.2. Wizualizacja toru elementu płynu

Wykonuje się ją w kanale wodnym o zamkniętym obiegu (rys. 9). Napędzany jest on kołem łopatkowym 1. Poprzez regulację jego obrotów możliwe jest uzyskanie różnych prędkości przepływu w części pomiarowej kanału 2. Powierzchnia wody posypana jest nietonącym pyłem umożliwiającym obserwację pola przepływu.



Rys. 9 Schemat kanału wodnego do wizualizacji powierzchniowej

Wykonanie ćwiczenia polega, podobnie jak w p. 3.1, na obserwacji i narysowaniu obrazu opływu wokół wskazanych modeli..