

# POMIARY WIELKOŚCI NIEELEKTRYCZNYCH

**Dr inż. Eligiusz PAWŁOWSKI**  
**Politechnika Lubelska**  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki

*Prezentacja do wykładu dla EMST*

Semestr letni

Wykład nr 8, 9



# Prawo autorskie

Niniejsze materiały podlegają ochronie zgodnie z **Ustawą o prawie autorskim i prawach pokrewnych** (Dz.U. 1994 nr 24 poz. 83 z późniejszymi zmianami).

Materiał ten udostępniam **do celów dydaktycznych** jako materiały pomocnicze do wykładu z przedmiotu Pomiar Wielkości Nielektrycznych prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Mogą z nich również korzystać inne osoby zainteresowane tą tematyką. Do tego celu materiały te można **bez ograniczeń przeglądać, drukować i kopiować wyłącznie w całości**.

Wykorzystywanie tych materiałów bez zgody autora w inny sposób i do innych celów niż te, do których zostały udostępnione, **jest zabronione**.

W szczególności **niedopuszczalne jest**: usuwanie nazwiska autora, edytowanie treści, kopiowanie fragmentów i wykorzystywanie w całości lub w części do własnych publikacji.

Eligiusz Pawłowski

## Uwagi dydaktyczne

Niniejsza prezentacja stanowi **tylko i wyłącznie materiały pomocnicze** do wykładu z przedmiotu Pomiary Wielkości Nielektrycznych prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Udostępnienie studentom tej prezentacji nie zwalnia ich z konieczności samodzielnego sporządzania **notatek z wykładów** ani też nie zastępuje studiowania obowiązujących podręczników.

Tym samym zawartość niniejszej prezentacji w szczególności **nie może być** traktowana jako zakres materiału obowiązujący na kolokwium zaliczeniowym.

Obowiązujący jest **zakres materiału wyłożony podczas wykładu** oraz zawarty w odpowiadających mu fragmentach **podręczników** podanych w wykazie literatury do wykładu.

Eligiusz Pawłowski

# Tematyka wykładu

**Płyny i ich właściwości**

**Podstawowe prawa mechaniki płynów**

**Pomiary **prędkości** przepływu płynów**

**Pomiary **natężenia** przepływu masowego i objętościowego**

**Pomiary **ilości** płynów**

**Pomiary parametrów przepływu w kanałach otwartych**

## Płyn i płynięcie

**Płyn** – ośrodek fizyczny (ciecz lub gaz) nie mający, w odróżnieniu od ciała stałego, ustalonej postaci (kształtu). Płyn przyjmuje kształt zbiornika, do którego został wprowadzony, przy czym **ciecz** tworzy powierzchnię swobodną, natomiast **gaz** wypełnia cały zbiornik. W stanie spoczynku lub w warunkach równowagi statycznej **płyn nie przenosi naprężeń** statycznych.

**Płynięcie** – zjawisko występujące w płynach polegające na ciągłym wzroście nieodwracalnych odkształceń przy stałym naprężeniu (dla ciał stałych obowiązuje prawo Hooke'a).

$$\sigma = E_Y \varepsilon$$

W płynie rzeczywistym płynięciu zawsze towarzyszy dyssypacja energii mechanicznej.

## Płyn idealny

**Płyn idealny** (płyn doskonały) (ang. *ideal fluid*) – płyn nie posiadający lepkości, w którym nie występują naprężenia ścinające i transport ciepła. Własności płynu idealnego zależą jedynie od jego gęstości i ciśnienia. Model płynu doskonałego można w niektórych sytuacjach stosować do przybliżonego opisu powolnego przepływu **cieczy o małej lepkości i gazów.**

W płynie idealnym **nie występuje tarcie** wewnętrzne między sąsiadującymi ze sobą warstwami płynu poruszającymi się z różnymi prędkościami, a przejawiające się w postaci lepkości. Między takimi warstwami występuje poślizg doskonały nie pociągający za sobą żadnej dyssypacji energii.

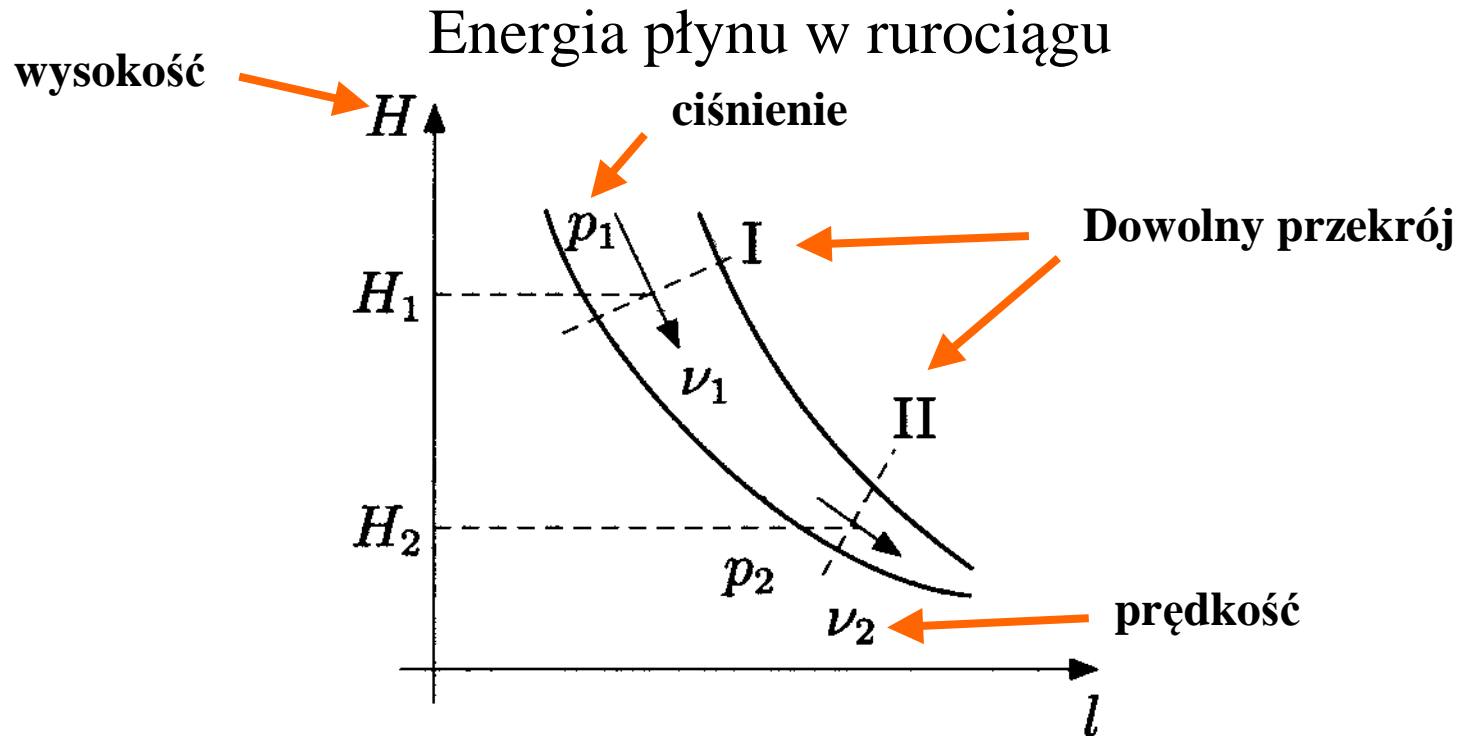
## Prawo Bernoulliego

Prawo Bernoulliego stwierdza, że w ruchu ustalonym nieściśliwego płynu idealnego odbywającym się w polu sił ciężkości, całkowita **energia płynu** składająca się z: energii kinetycznej  $E_k$ , energii potencjalnej ciśnienia (objętości)  $E_v$  i energii potencjalnej położenia  $E_p$  **jest stała** wzdłuż danej linii prądu.

Prawo to wyraża zatem **zasadę zachowania energii mechanicznej**.

$$E_k + E_v + E_p = const$$

**Linia prądu** jest to linia styczna w każdym punkcie do kierunku prędkości cząstki płynu. Linie prądu są liniami wektorowego pola prędkości płynu.



$$E_{k1} + E_{v1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{v2} + E_{p2}$$

Energie składowe odniesione do jednostki masy płynu wynoszą:

$$\frac{E_k}{m} = \frac{v^2}{2}$$

$$\frac{E_v}{m} = \frac{p}{\rho}$$

$$\frac{E_p}{m} = H \cdot g$$



## Równanie Bernoulliego

Równanie Bernoulliego (obustronne dzielenie przez masę  $m$ ):

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + Hg = const$$

Po przemnożeniu przez gęstość  $\rho$  otrzymuje się równanie ciśnień:

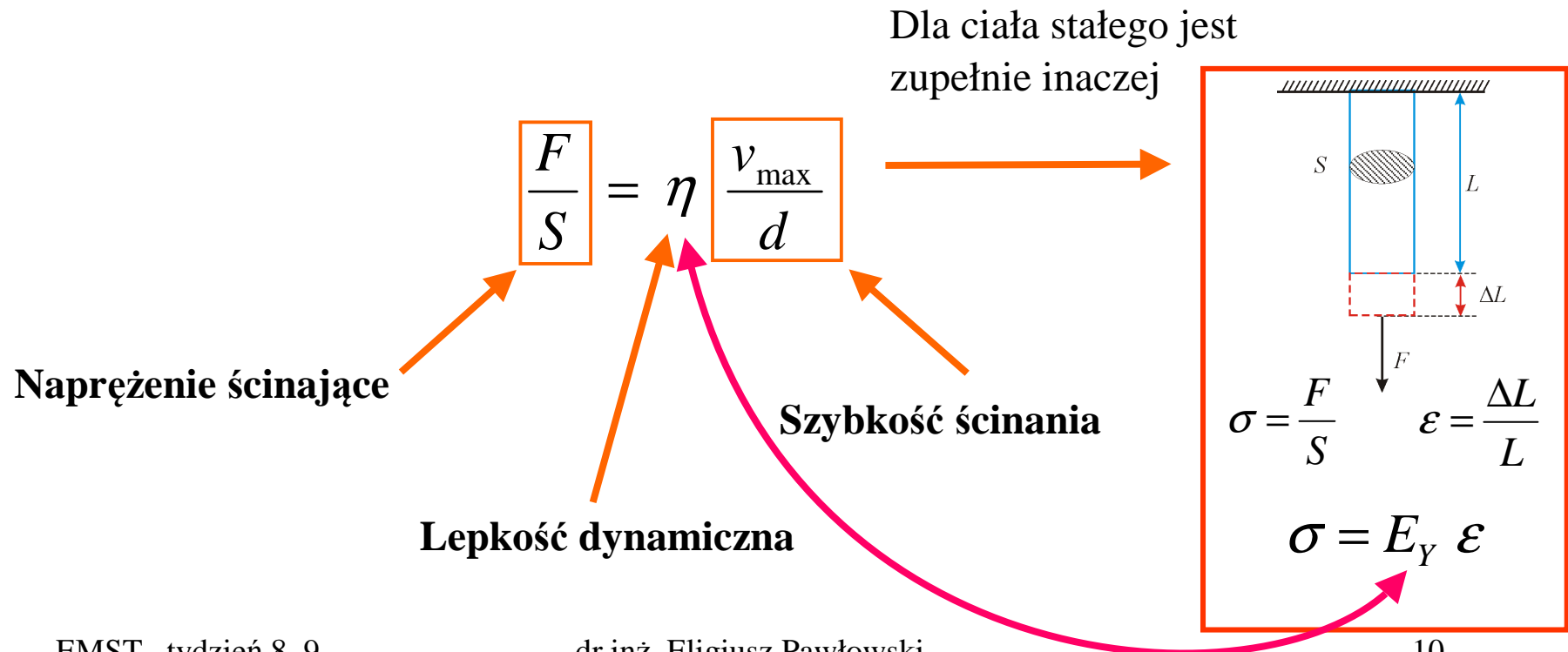
$$\frac{v^2 \rho}{2} + p + Hg\rho = const$$

**Suma ciśnień:** dynamicznego, statycznego i niwelacyjnego w każdym przekroju rurociągu **jest stała.**

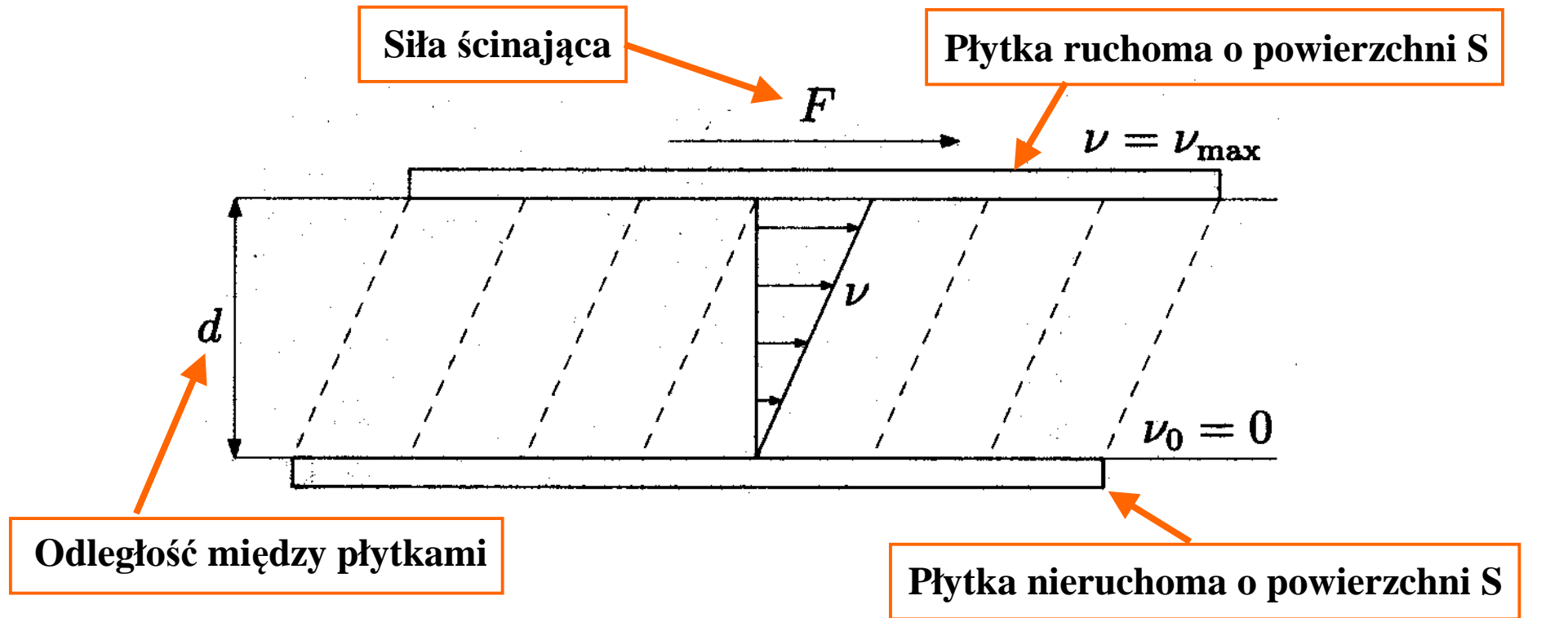
$$p_d + p + p_p = const$$

# Płyn newtonowski

**Płyn newtonowski** (doskonale lepki) jest to płyn, w którym występuje wprost proporcjonalna zależność pomiędzy naprężeniem ścinającym a szybkością ścinania. Współczynnik proporcjonalności nazywany jest **lepkością dynamiczną**.

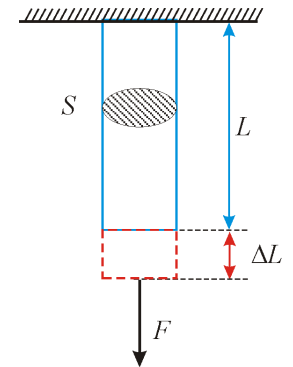


# Naprężenie ścinające i szybkość ścinania w płynach



$$\frac{F}{S} = \eta \frac{v_{\max}}{d}$$

$$[\eta] = \text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2} = \text{Pa} \cdot \text{s}$$

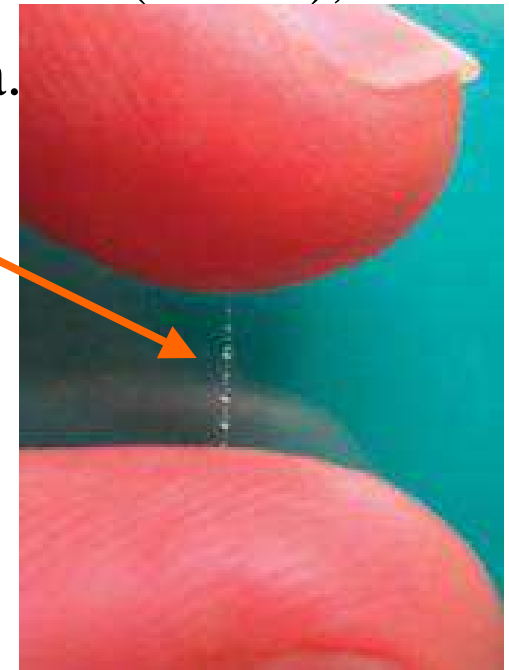


## Płyny nienewtonowskie

W płynach **nienewtonowskich** zależność pomiędzy naprężeniami ścinającymi i prędkościami nie są liniowe. Takimi płynami są np.:

1. wodne zawiesiny klejów,
2. roztwory polimerów, emulsje,
3. wodne zawiesiny niektórych tlenków, węglowodanów (skrobi),
4. niektóre płyny fizjologiczne, np. ślina, nić pajęcza.

Pomiary parametrów przepływu płynów **nienewtonowskich** wymagają **specjalnych** metod, zazwyczaj innych od omawianych na tym wykładzie.



## Liczba Reynoldsa

Zachowanie się płynu w rurociągu zależy od bezwymiarowego współczynnika nazywanego liczbą Reynoldsa  $Re$

$$Re = \frac{v_{\acute{s}r} D \rho}{\eta}$$

gdzie:

$v_{\acute{s}r}$  – średnia prędkość płynu w rurociągu,

$D$  – średnica rurociągu,

$\rho$  – gęstość płynu

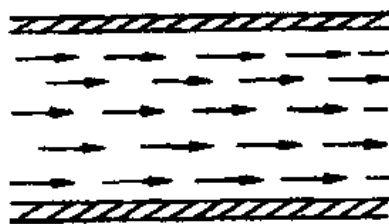
$\eta$  – lepkość dynamiczna płynu

## Przepływ laminarny i burzliwy

Dla małych wartości liczby Reynoldsa  $Re < 2300$  przepływ płynu jest **laminarny**, dla dużych wartości liczby Reynoldsa  $Re > 10000$  przepływ jest **burzliwy** (turbulentny). Pomędzy tymi wartościami występuje stan przejściowy.

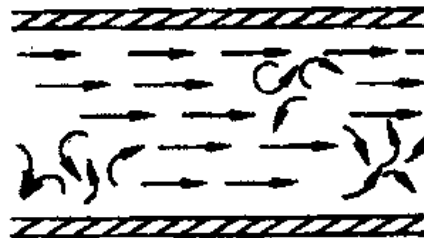
Podane wartości graniczne są **przybliżone**.

### Przepływ płynu w rurociągu



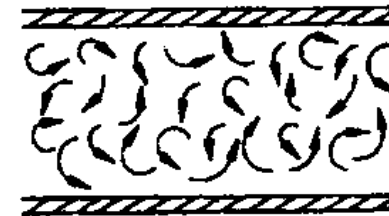
laminarny

$$Re < 2300$$



stan przejściowy

$$2300 < Re < 10000$$



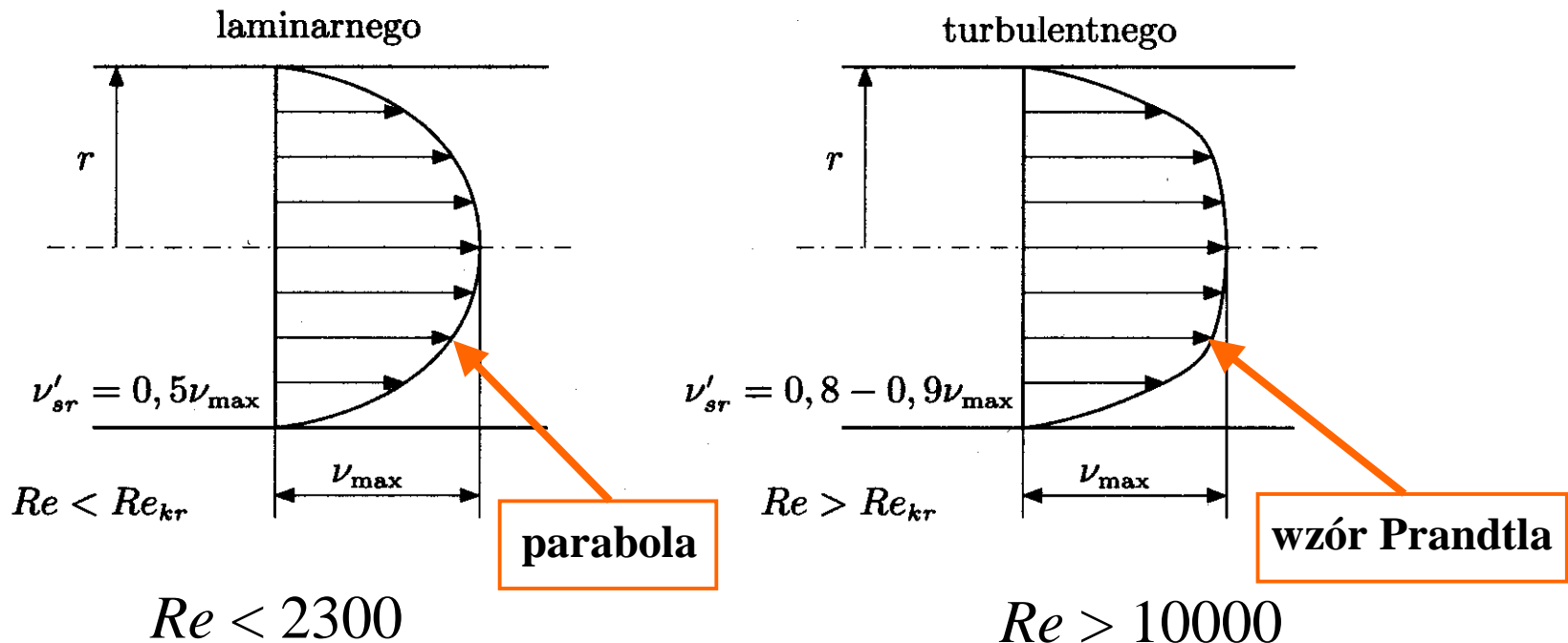
burzliwy

$$Re > 10000$$

# Rozkład prędkości w przepływie laminarnym i burzliwym

Zależnie od rodzaju przepływu w rurociągu występuje różny rozkład prędkości płynu wzdłuż promienia przekroju  $r$ .

Rozkłady prędkości dla przepływów:



## Spadek ciśnienia na rurociągu przy przepływie laminarnym

Na rurociągu o długości  $L$  i średnicy  $D$  występuje **spadek ciśnienia**  $\Delta p$  zależny od współczynnika oporu  $\lambda$ , gęstości  $\rho$  oraz średniej prędkości  $v_{\acute{s}r}$  :

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho v_{\acute{s}r}^2}{2}$$

Dla przepływu laminarnego ( $Re < 2300$ ) **współczynnik oporu  $\lambda$**  zależy tylko od liczby Reynoldsa :

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad \leftarrow \quad Re = \frac{v_{\acute{s}r} D \rho}{\eta}$$

Wtedy spadek ciśnienia  $\Delta p$  jest **proporcjonalny do prędkości  $v_{\acute{s}r}$**  :

$$\Delta p = \frac{32L\eta}{D^2} v_{\acute{s}r}$$



## Spadek ciśnienia na rurociągu przy przepływie burzliwym

Dla przepływu burzliwego ( $Re > 10000$ ) współczynnik oporu  $\lambda$  jest stały, niezależny od prędkości płynu  $v_{śr}$ , zależy natomiast od **współczynnika chropowatości** ścianek rurociągu:

$$\frac{D}{2k}$$

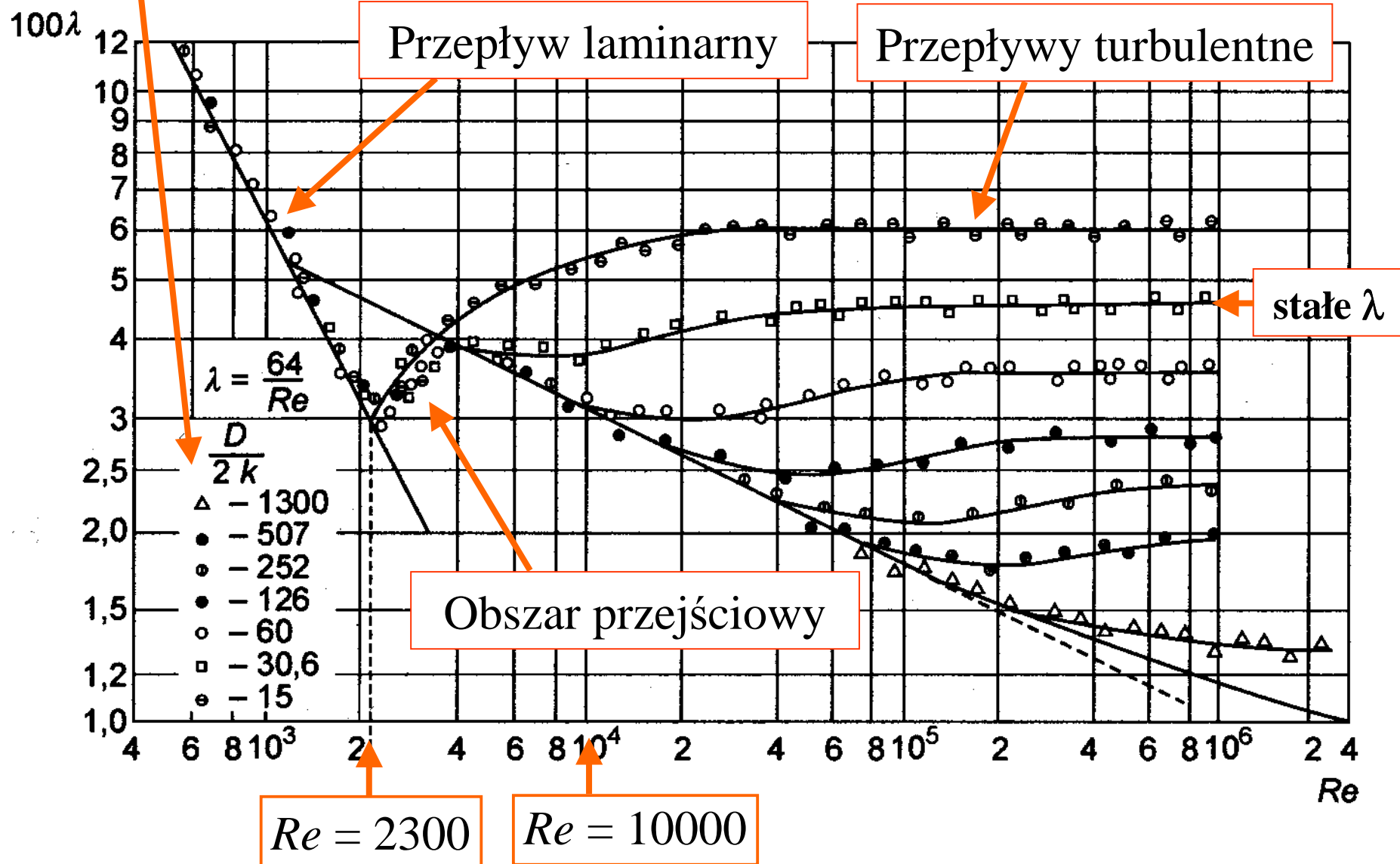
gdzie:  $D$  – średnica rurociągu,

$k$  – średnica umownych ziaren piasku odpowiadająca wysokości chropowatość ścian rurociągu.

Uzyskane na drodze doświadczałnej zależności przedstawia wykres opracowany przez **Nikuradse**.

Współczynniki chropowatości

# Wykres Nikuradse



## Rodzaje płynów

W praktyce w pomiarach przepływów wyróżnia się:

**1. Płyny jednorodne** – gazy pod różnym ciśnieniem i ciecze,

**2. Płyny niejednorodne** – mieszaniny różnych cieczy, zawiesiny ciał stałych w gazach i cieczach, płyny dwufazowe (para wilgotna, mieszanka betonowa, zawiesina pyłu węglowego w powietrzu, transport pneumatyczny i hydrauliczny).

## W jakim celu mierzy się przepływy ?

Pomiary parametrów przepływu płynów są konieczne do:

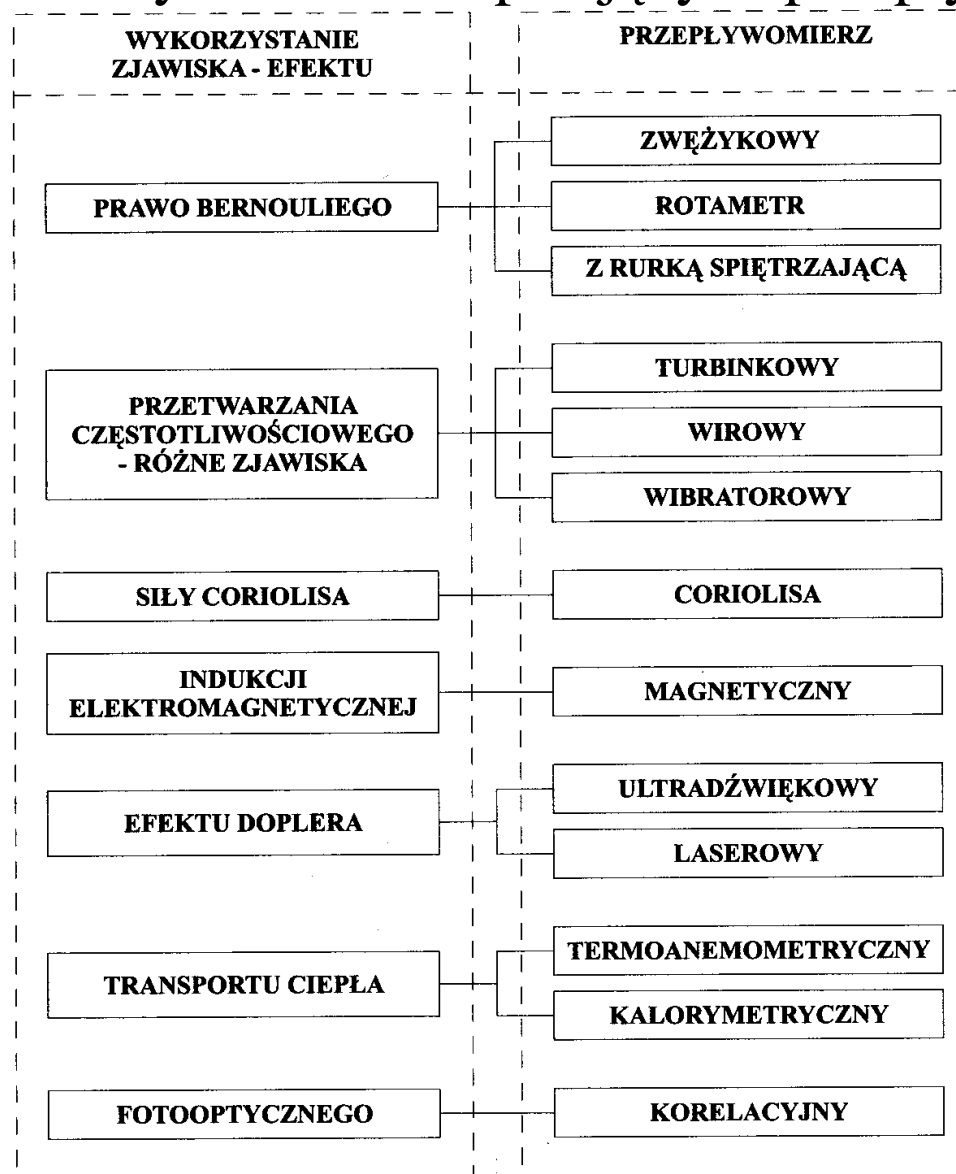
1. Wyznaczania zużycia mediów i ustalenia wysokości opłaty – pomiary zużycia wody, gazu, ciepła, paliw itp.,
2. Kontroli procesów technologicznych – pomiary ilości substratów i produktów reakcji chemicznych,
3. Nadzoru parametrów życiowych w medycynie – pomiar przepływu powietrza, krwi itp.  
i w wielu innych zastosowaniach ...

## Anemometry, przepływomierze i liczniki

Mierniki do pomiaru parametrów przepływu płynów:

1. Przyrządy mierzące **prędkość** płynów – **anemometry**: rurki spiętrzające, prędkościomierze turbinkowe, termoanemometry, prędkościomierze dopplerowskie.
2. Przyrządy mierzące **natężenie** przepływu masowego lub objętościowego – **przepływomierze**: zwężki, rotametry, turbinkowe, wirowe (Karmana), Coriolisa, elektromagnetyczne, ultradźwiękowe, kalorymetryczne, korelacyjne i inne
3. Przyrządy mierzące **ilość** (masę lub objętość) płynu – **liczniki** ilości płynu: liczniki wody (wodomierze), liczniki gazu (gazomierze), liczniki do paliw płynnych (dystrybutory paliw).

# Pomiary wielkości opisujących przepływy



## Pomiary prędkości płynów

**Pomiary prędkości płynów** umożliwiają wyznaczenie prędkości w małym obszarze, zarówno w przestrzeni otwartej, jak i w rurociągach.

Mają one zastosowanie między innymi do:

- Wyznaczania rozkładu przestrzennego prędkości płynu,
- Wyznaczania prędkości wiatru,
- Pomiaru szybkości samolotów i samochodów (wyścigowych) względem otaczającej atmosfery,
- Pomiaru natężenia przepływu po uwzględnieniu wymiarów rurociągu.

## Rurka spiętrzająca

**Rurka spiętrzająca** umieszczona odpowiednio w ruchomym płynie umożliwia pomiar ciśnienia dynamicznego  $p_d$  :

$$p_d = \frac{v^2 \rho}{2}$$

czyli że:

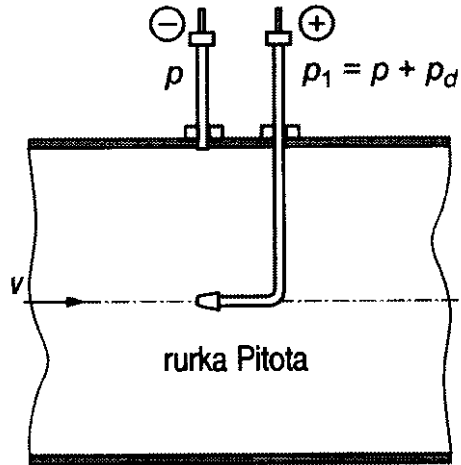
$$v = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}}$$

Pojedyncza rurka spiętrzająca mierzy sumę ciśnienia dynamicznego  $p_d$  i ciśnienia statycznego  $p$ . Należy więc niezależnie zmierzyć ciśnienie statyczne  $p$  i obliczyć różnicę ciśnień  $\Delta p = p_d$ .

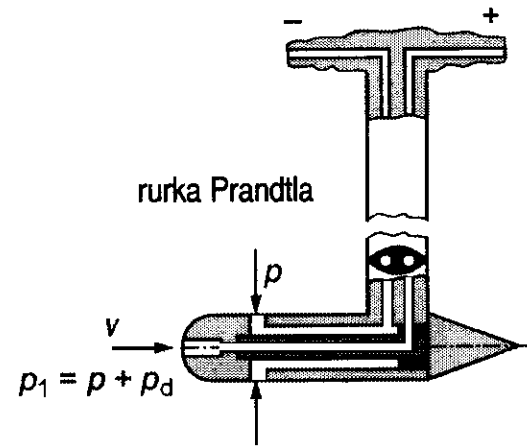


# Rurka spiętrzająca - konstrukcje

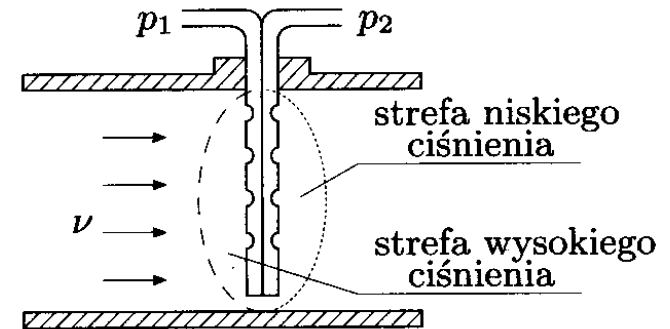
Rurka Pitota



Rurka Prandtla



Rurka uśredniająca



$$\Delta p = p_1 - p = p + p_d - p = p_d$$

$k$  - współczynnik uwzględniający konstrukcję rurki

$$v = k \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

# Rurka Pitota i Prandtla do pomiaru prędkości samolotu

## Rurka Prandtla w samolocie Mirage



## Rurka spiętrzająca - parametry

### **Parametry rurek spiętrzających:**

- błędy pomiaru:  $1 \div 2 \%$
- zakres temperatur pracy: do ok.  $400 \div 500^{\circ}\text{C}$
- liczba Reynoldsa:  $Re > 200$
- średnica rurociągów:  $50\text{mm} \div 2 \text{ m}$

## Anemometr turbinowy

**Anemometry turbinowe** znajdują zastosowanie w pomiarach prędkości wiatru, prędkości przepływu powietrza w kanałach wentylacyjnych, punktowych pomiarów prędkości wody w rzekach itp.

Zasada działania anemometrów turbinowych polega na zmianie **energii kinetycznej** przepływającego płynu **na ruch obrotowy** wirnika pomiarowego. Sygnał z wirnika jest przetwarzany na impulsy elektryczne za pomocą czujników prędkości obrotowej (indukcyjnych, optycznych, hallotronowych lub innych), które są następnie formowane i przetwarzane na wskazanie.

## Anemometry turbinowe



Anemometr czasowy (Robinsona)

Anemometr skrzydełkowy (Staffela)

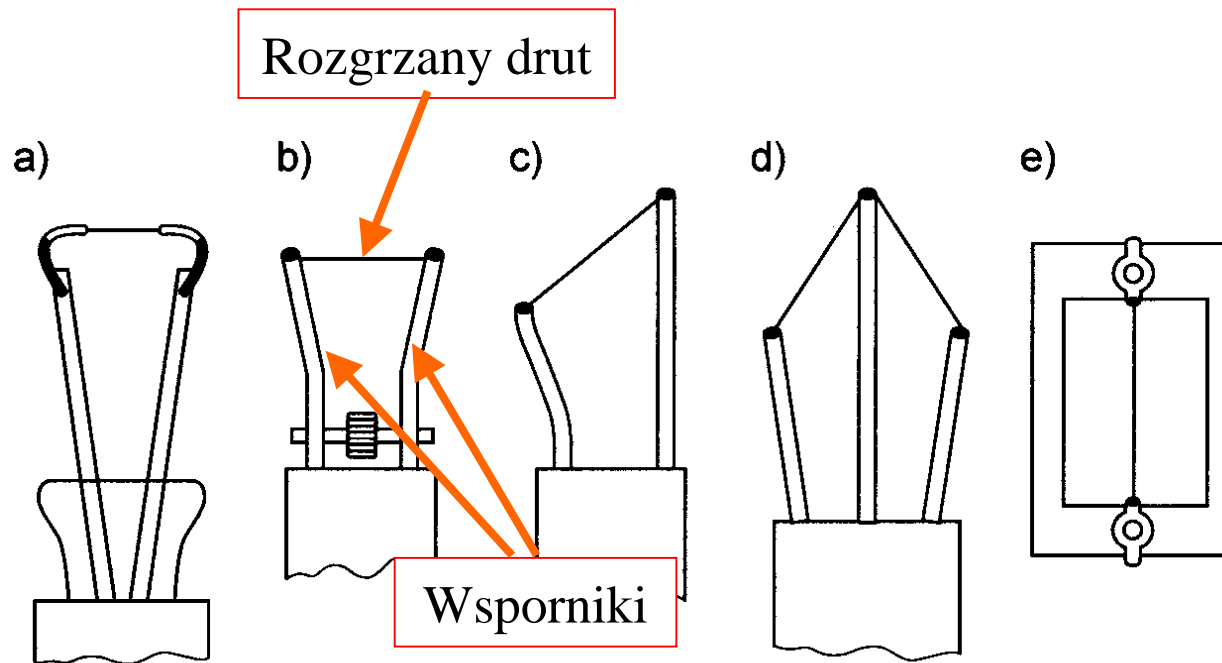
## Zapora wodna w Solinie



Anemometr czasowy Robinsona zainstalowany  
na zaporze wodnej w Solinie

## Termoanemometr

**Termoanemometr** działa na zasadzie odbioru ciepła z grzejnika przez przepływający płyn. Miarą prędkości płynu jest zmiana ilości ciepła oddawanego oddawanego przez rozgrzany drut do poruszającego się płynu. Termoanemometr składa się z sondy termoanemometrycznej i układu pomiarowego.

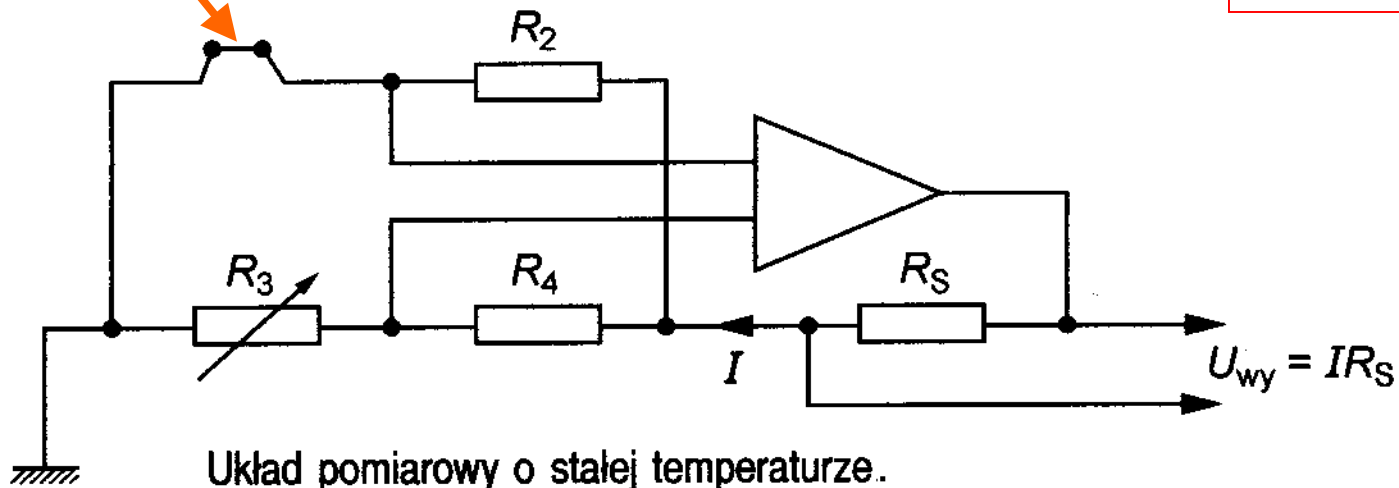


Konstrukcje sond termoanemometrów  
dr inż. Eligiusz Pawłowski

## Termoanemometr o stałej temperaturze

Rozgrzany drut

$V > 2 \text{ m/s}$



Układ pomiarowy o stałej temperaturze.

Rezystorem  $R_3$  zadaje się żadaną temperaturę.

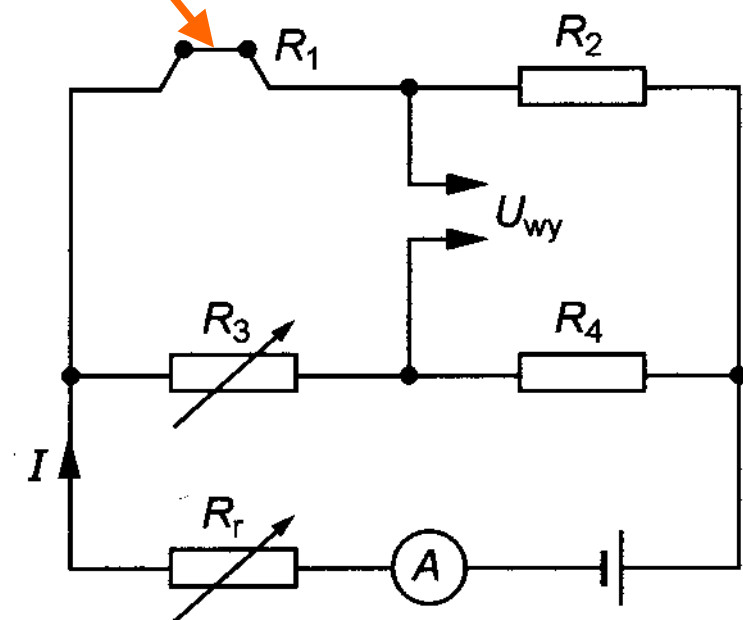
Miarą prędkości płynu jest **zmiana prądu  $I$**  (mocy) grzania konieczna do utrzymania **stałej temperatury** (rezystancji) drutu. Układ sprzężenia zwrotnego utrzymuje stan równowagi mostka, czyli stałą rezystancję (temperaturę) drutu.



Rozgrzany drut

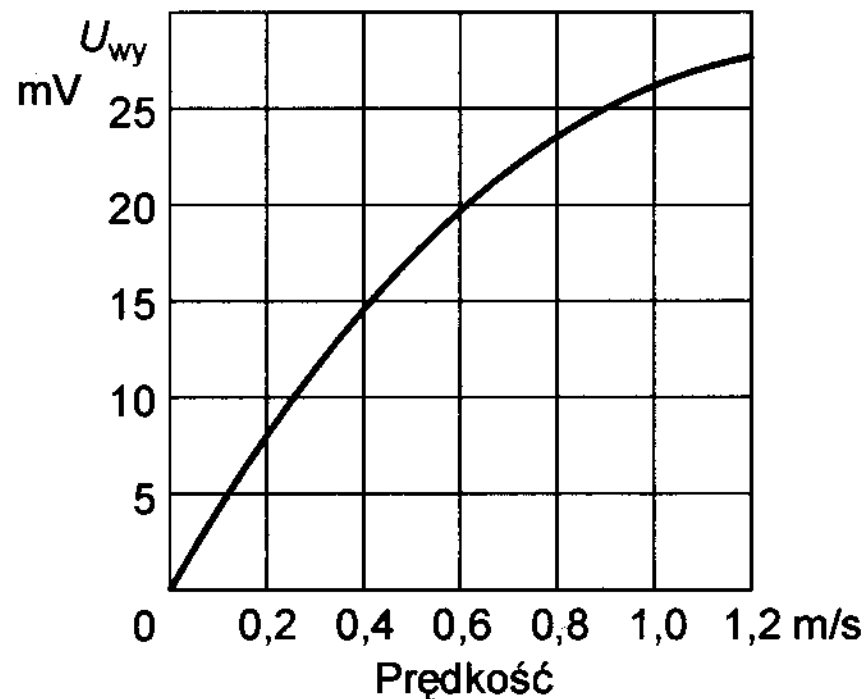
## Termoanemometr o stałym prądzie

$V < 2 \text{ m/s}$



Układ pomiarowy anemometru stałoprądowego

charakterystyka anemometru stałoprądowego



Miarą prędkości płynu jest **zmiana rezystancji  $R_1$**  drutu grzanego stałym prądem, spowodowana zmniejszeniem jego temperatury przez przepływający płyn. Sygnałem wyjściowym napięcie  $U_{wy}$  na przekątnej niezrównoważonego mostka.

## Termoanemometr - wzory

W nieruchomym ośrodku ( $v=0$ ) ilość ciepła  $Q$  oddawana przez rozgrzany drut do otoczenia zależy od różnicy temperatury drutu  $T$  i temperatury otoczenia  $T_o$  oraz współczynnika oddawania ciepła  $a$ :

$$Q = I^2 R = a(T - T_o), \text{ dla } v = 0$$

W ruchomym ośrodku ( $v>0$ ) ilość ciepła  $Q$  oddawana przez rozgrzany drut do otoczenia zwiększa się:

$$Q = I^2 R = (a + bv^n)(T - T_o), \text{ dla } v > 0$$

Współczynniki  $a$ ,  $b$ ,  $n$  zależą od konstrukcji sondy.

## Termoanemometry - parametry

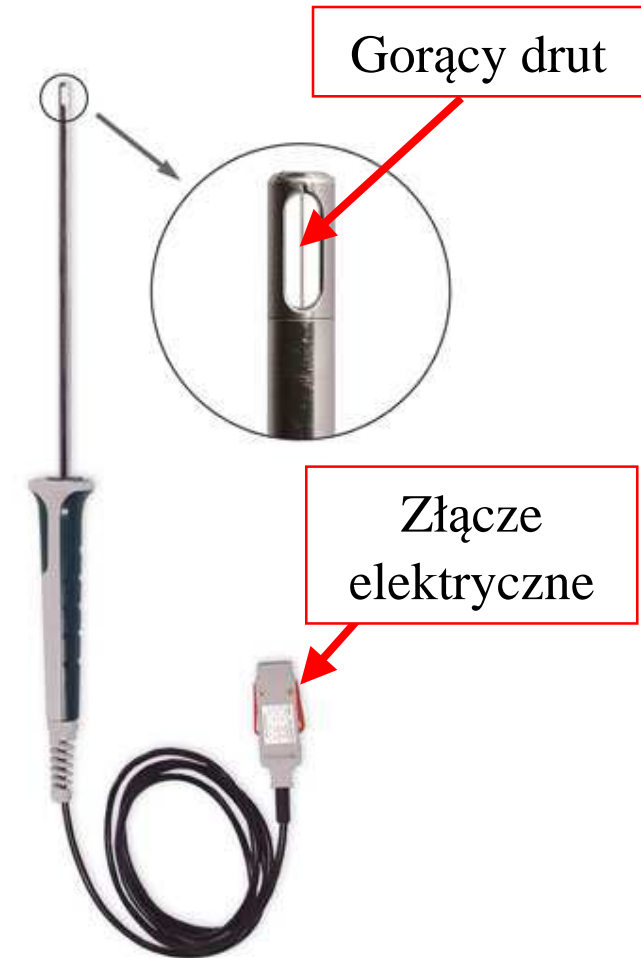
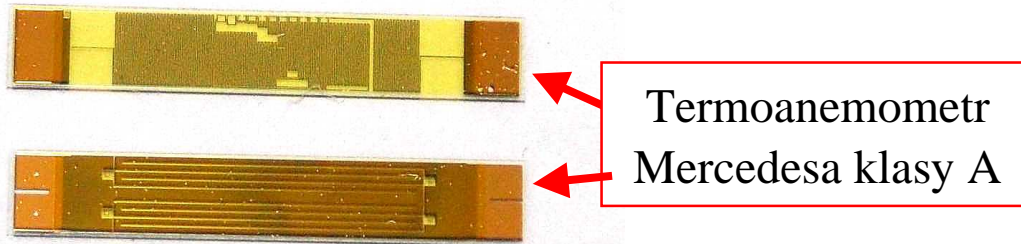
### **Parametry termoanemometrów:**

- średnica drutu sondy:  $1 \div 20\mu\text{m}$
- długość drutu sondy:  $0,1 \div 10\text{mm}$
- rezystancja drutu sondy:  $3 \div 11\Omega$
- błędy pomiaru: do kilkunastu %
- zakres temperatur pracy: do ok.  $750^\circ\text{C}$  (platyna)
- zakres mierzonych prędkości:  $0,15 \div 300\text{m/s}$
- częstotliwość graniczna pomiarów:  $500 \div 1000\text{Hz}$

# Termoanemometry – przykłady wykonania



**Termoanemometr układu ssania w samochodzie**

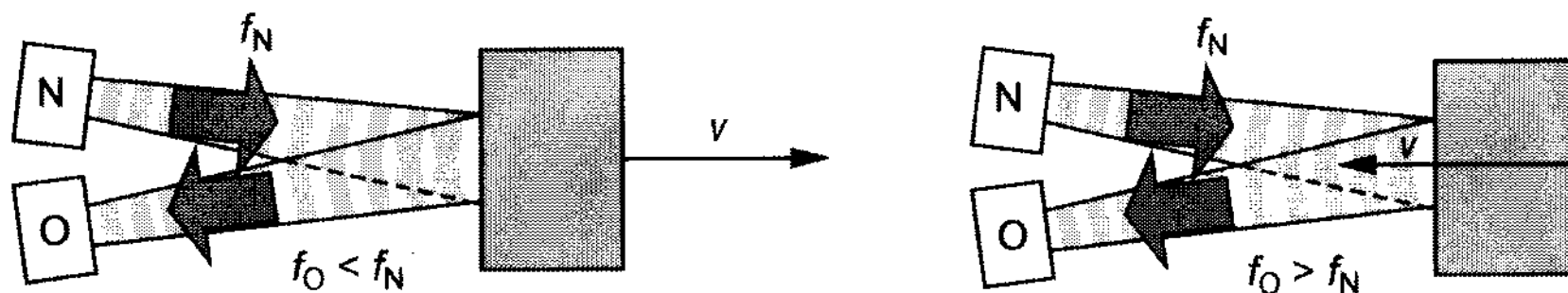


**Termoanemometr laboratoryjny**

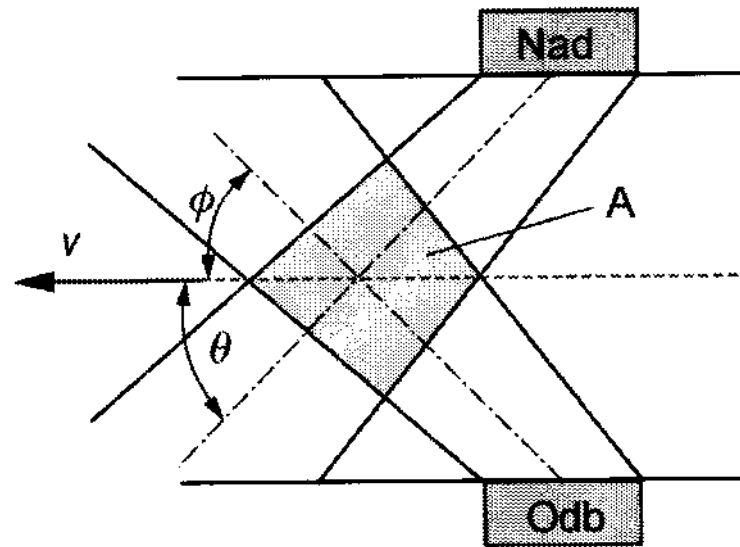
## Prędkościomierz dopplerowski

**Efekt Dopplera** – fala mechaniczna (ultradźwiękowa) odbita przez ciało poruszające się z szybkością  $v$  ma częstotliwość  $f_O$  inną od częstotliwości padającej  $f_N$ . Częstotliwość Dopplera  $f_D$  (różnicowa) wynosi:

$$f_D = f_N - f_O = f_N \frac{2v}{c} = \frac{2v}{\lambda_N}$$



## Prędkościomierz dopplerowski



Stosowany w praktyce układ głowic ultradźwiękowych

$$f_D = f_N \frac{v}{c} (\cos \Theta + \cos \Phi)$$

## Prędkościomierz Dopplerowski - parametry

### **Parametry prędkościomierzy Dopplerowskich :**

- częstotliwość pracy:  $0,2 \div 2\text{MHz}$
- rozmiar obszaru roboczego:  $20 \div 50\text{mm}$
- błędy pomiaru:  $0,2 \div 2\%$

## Pomiary strumienia masy i objętości - definicje

**Strumień masy** (masowe natężenie przepływu)  $q_m$  jest to masa  $m$  płynu, która przepływa przez przekrój poprzeczny rurociągu w jednostce czasu  $t$  (jednostką jest kg/s):

$$q_m = \frac{dm}{dt} \approx \frac{m}{t}$$

**Strumień objętości** (objętościowe natężenie przepływu)  $q_v$  jest to objętość  $V$  płynu, która przepływa przez przekrój poprzeczny rurociągu w jednostce czasu  $t$  (jednostką jest m<sup>3</sup>/s):

$$q_v = \frac{dV}{dt} \approx \frac{V}{t}$$



## Pomiary natężenia przepływu

**Przepływomierze** są przyrządami do pomiaru strumienia masy  $q_m$  lub objętości  $q_V$  płynu jednorodnego w rurociągu o przekroju (zazwyczaj) kołowym, w którym cały przekrój rurociągu jest wypełniony płynem.

Zależnie od zasady działania przepływomierze reagują na strumień masy (przepływomierze Coriolisa i kalorymetryczne) albo na strumień objętości (pozostałe rodzaje przepływomierzy). Znając gęstość płynu  $\rho$  (pamiętając o zależności od temperatury) można dokonać przeliczenia:

$$q_m = q_V \rho$$

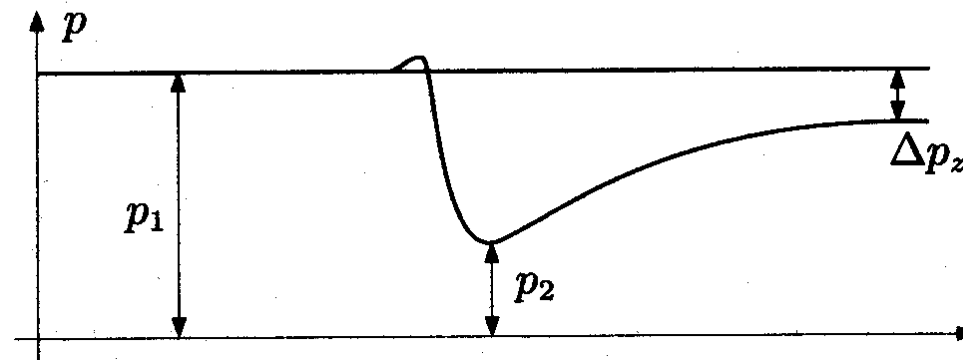
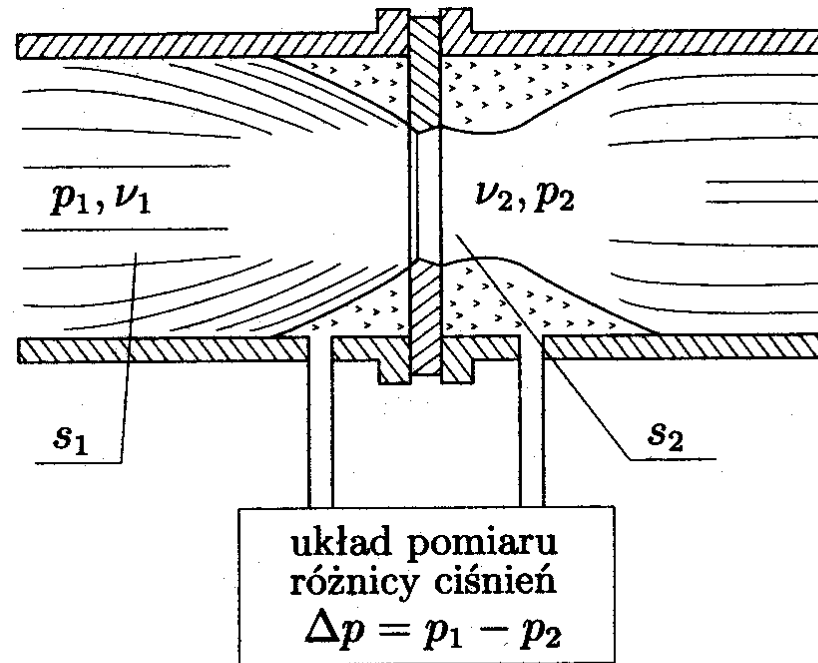
## Przepływomierz zwężkowy

**Zwężka** jest elementem konstrukcyjnym stanowiącym odpowiednio ukształtowaną przegrodę wstawioną do rurociągu, powodującą miejscowe zmniejszenie przekroju rurociągu.

Zmniejszenie przekroju rurociągu powoduje zmianę prędkości i ciśnienia płynu. Miarą objętościowego natężenia przepływu  $q_V$  jest różnica ciśnień  $\Delta p$  (ciśnienie różnicowe) mierzona w odpowiednich punktach rurociągu przed i za zwężką.

Zasada działania zwężki wynika z równania Bernoulliego i warunku ciągłości przepływu w każdym przekroju rurociągu.

# Przepływomierz zwężkowy



## Przepływomierz zwężkowy - wzory

Prawo ciągłości przepływu

$$q_V = v_1 s_1 = v_2 s_2$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{s_2}{s_1}$$

Przekształcone równanie  
Bernoulliego dla  $H = \text{const}$

$$\frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) = p_1 - p_2 = \Delta p$$

Po podstawieniu otrzymamy

$$q_V = v_1 s_1 = \frac{s_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{s_2}{s_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

## Przepływomierz zwężkowy – wzory c.d.

Wprowadzamy pomocnicze oznaczenie  $m$

$$\frac{s_1}{s_2} = m$$

Po podstawieniu otrzymamy wzór na **przepływ objętościowy**

$$q_V = s_1 \frac{m}{\sqrt{1-m^2}} = s_1 \alpha_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

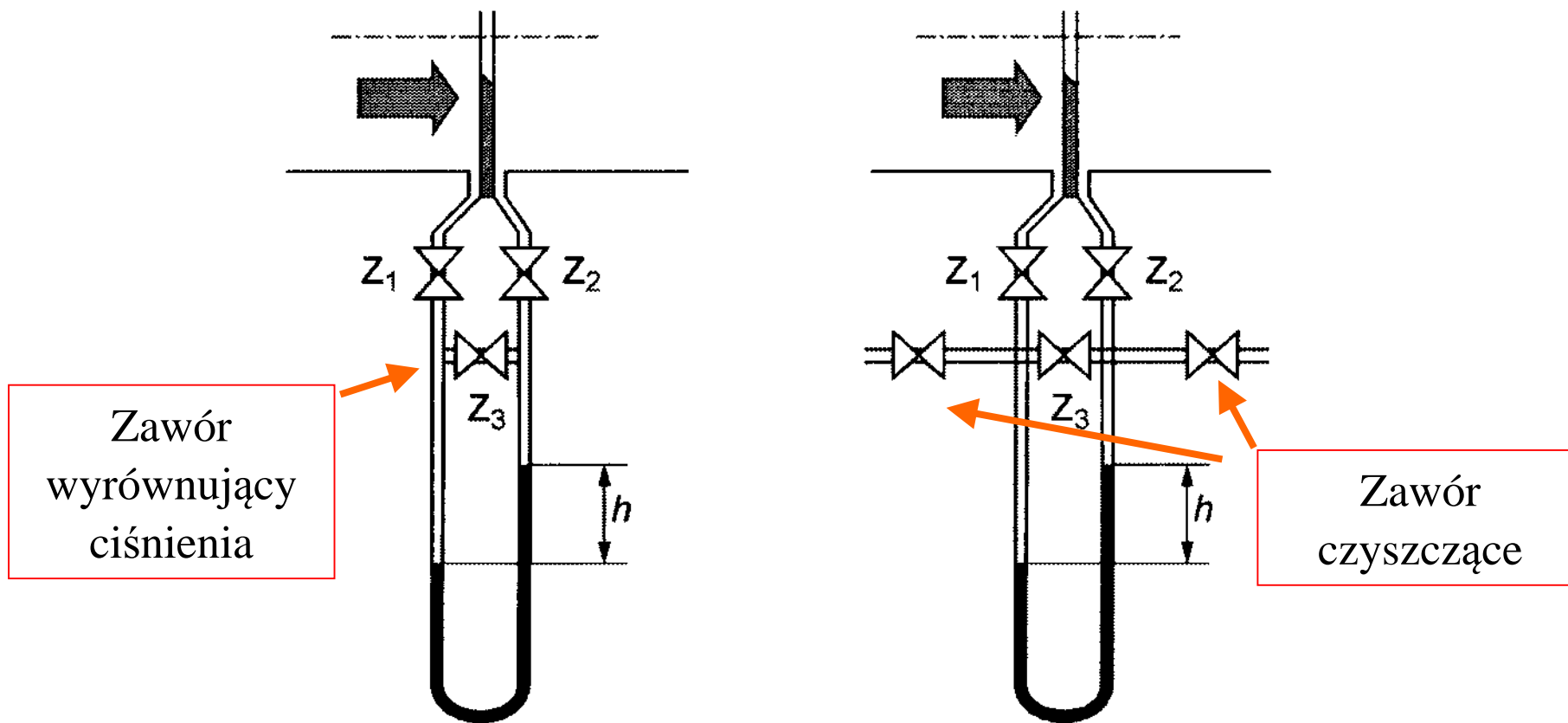
Wprowadzamy  $\alpha_0$ -teoretyczny współczynnik przepływu

$$\alpha_0 = \frac{m}{\sqrt{1-m^2}}$$

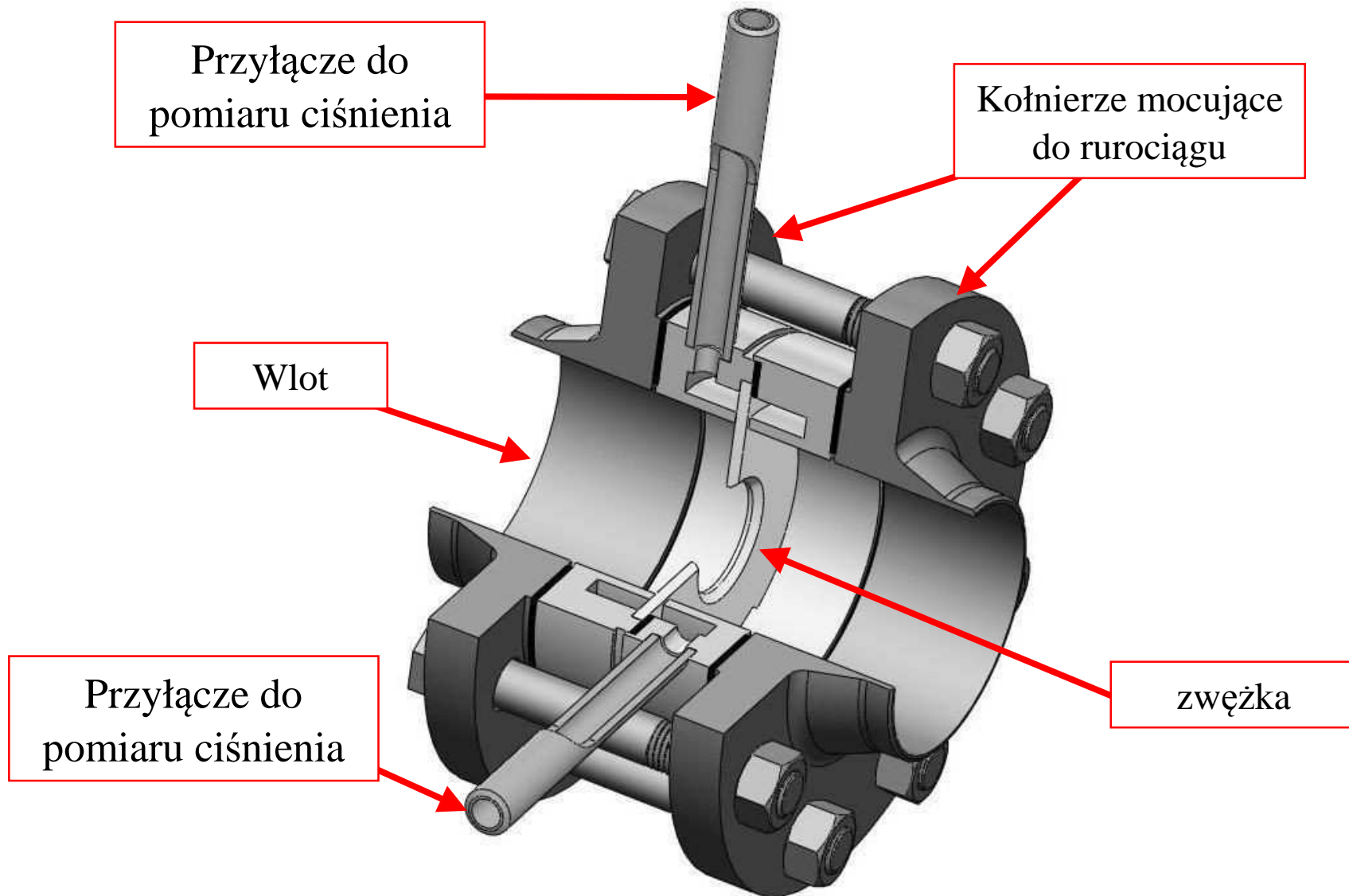
Po podstawieniu gęstości  $\rho$  otrzymamy wzór na **przepływ masowy**

$$q_m = s_1 \alpha_0 \sqrt{2 \rho \Delta p}$$

# Przepływomierz zwężkowy – dołączanie manometru



## Przepływomierz zwężkowy – przykład konstrukcji



## Przepływomierz zwężkowy - parametry

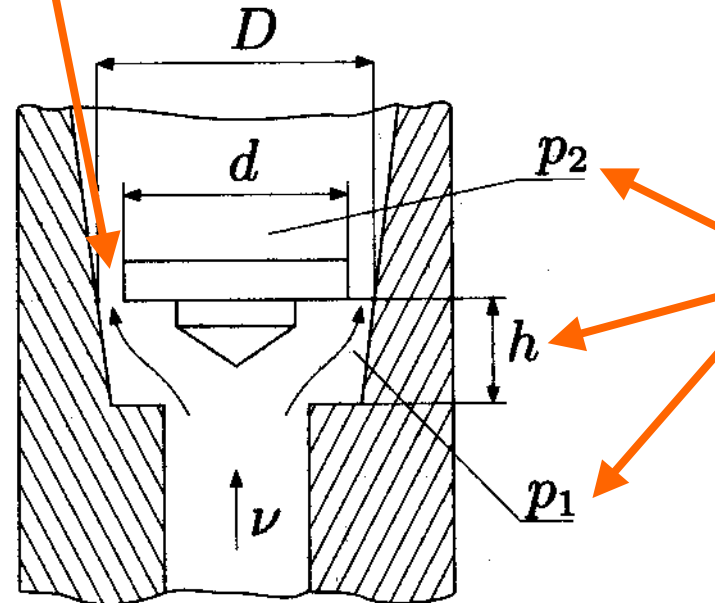
### **Parametry przepływomierzy zwężkowych:**

- średnica rurociągu: 50 ÷ 1000mm
- zakresowość  $q_{Vmax}/q_{Vmin}$  : ok.12:1
- błędy pomiaru: 0,1 ÷ 1 %
- zakres prędkości przepływu gazów: 1 ÷ 60m/s
- zakres prędkości przepływu cieczy: 0,05 ÷ 8m/s



## Rotametr

Powierzchnia szczeliny zależy od położenia pływaka  $h$



Położenie pływaka  $h$  jest miarą różnicy ciśnień  $\Delta p$

Zwiększająca się średnica rurki zapewnia osiągnięcie punktu równowagi sił działających na pływak na wysokości  $h$ . Siła ciężkości  $mg$  zrównoważy różnicę ciśnień  $\Delta p$  pod i nad pływakiem.

## Rotametr - wzory

Siła ciężkości działająca na pływak (o masie  $m_p$ ) zostanie zrównoważone różnicą ciśnień:

$$m_p g = \frac{\pi d^2}{4} (p_1 - p_2) = \frac{\pi d^2}{4} \Delta p$$

Objętościowe natężenie przepływu jest równe:

Wzór taki sam jak dla  
przepływomierza zwężkowego

$$q_V = \alpha_p s \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

$$s = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

Pole powierzchni szczeliny wokół pływaka, zależne od wysokości  $h$  i kształtu rurki

$\alpha_p$

Współczynnik przepływu, wartość stała

## Rotametr - wzory

Po podstawieniu  $\Delta p$  otrzymamy:

$$q_V = \alpha_p \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \sqrt{2 \frac{4m_p g}{\rho \pi d^2}}$$

Wprowadzając stałą  $\alpha_g$  można zapisać:

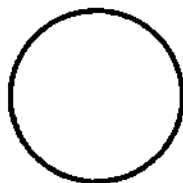
$$q_V = \alpha_g (D^2 - d^2)$$

Liniowe wskazania  $q_V \sim h$  otrzymuje się dla liniowej zależności:

$$h = k_g (D^2 - d^2)$$

## Pływaki rotametrów

a)



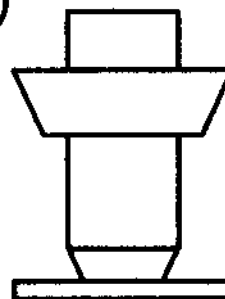
kulka

b)



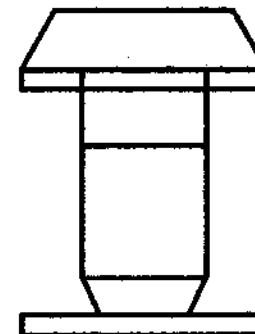
wyrównujący strumień  
pływu

c)



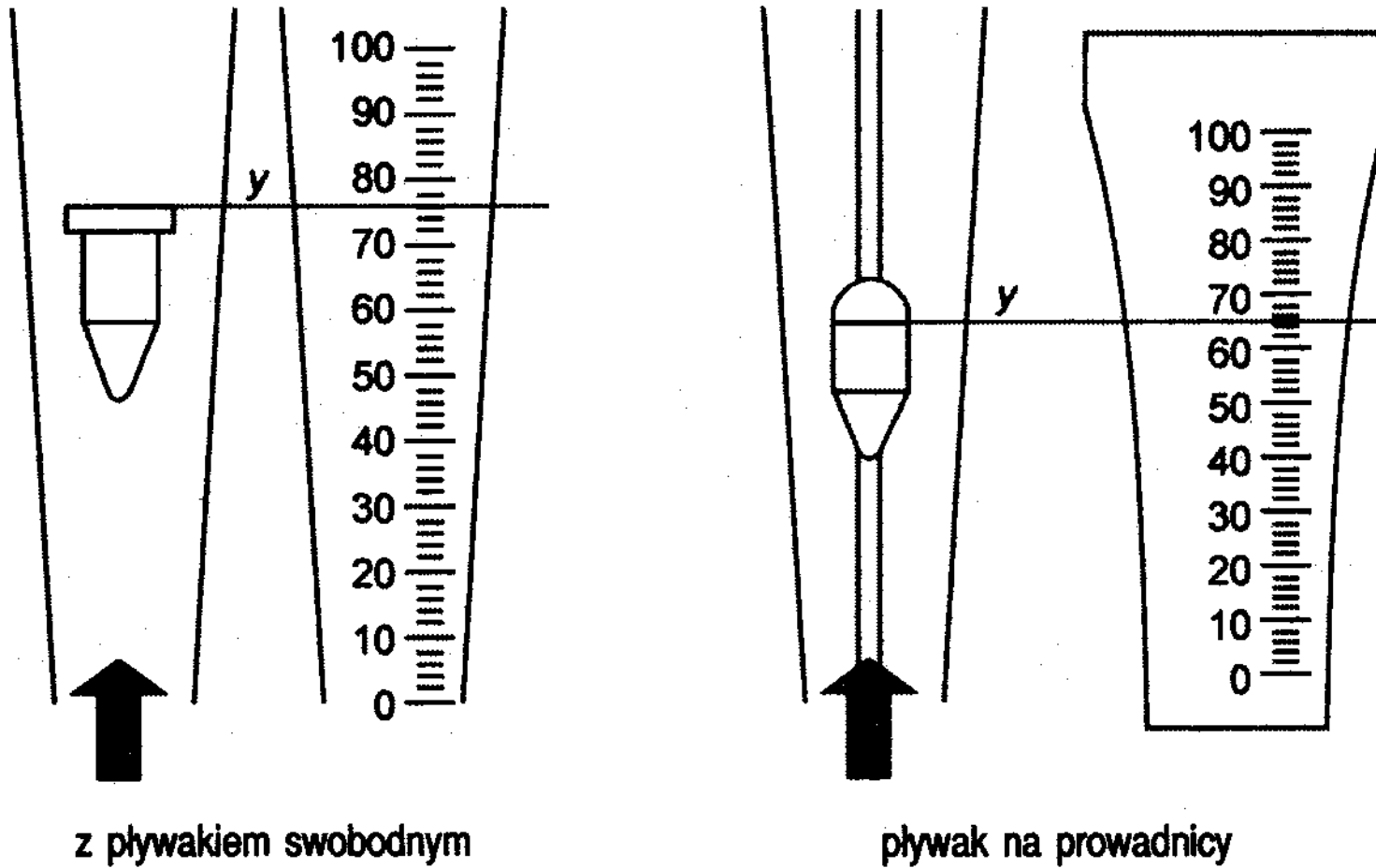
ograniczający wpływ  
lepkości płynu

d)



niewrażliwy na lepkość  
pływu

# Konstrukcje rotametrów

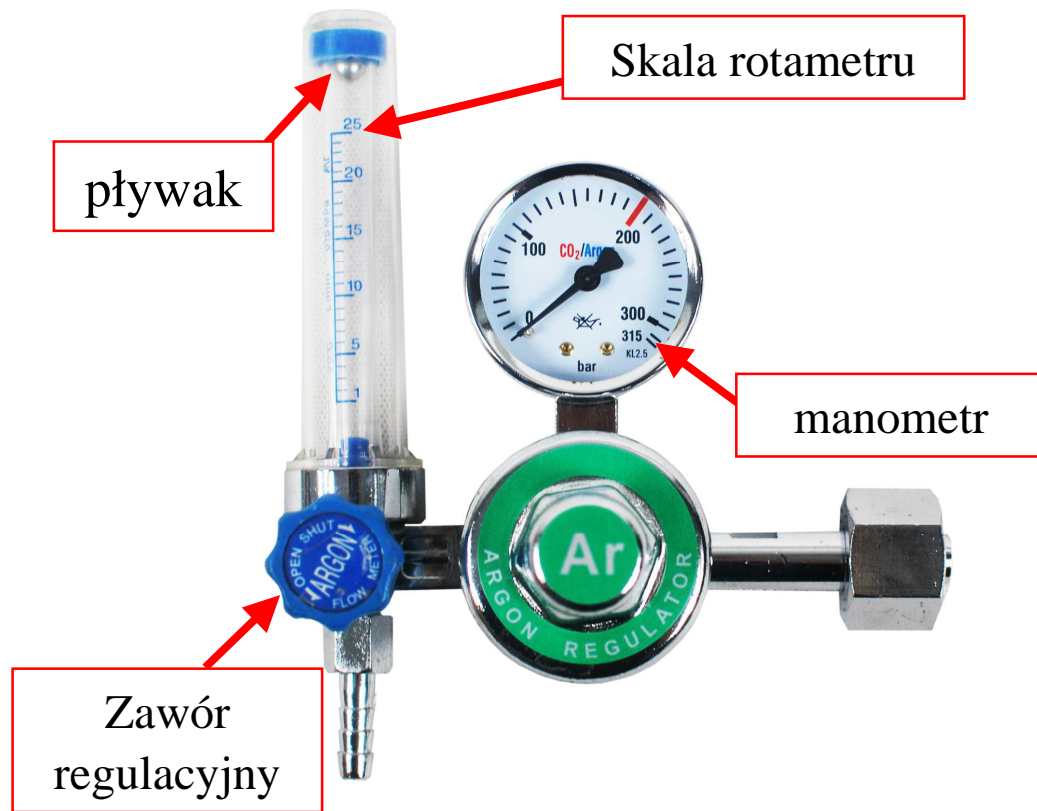


## Rotametry - parametry

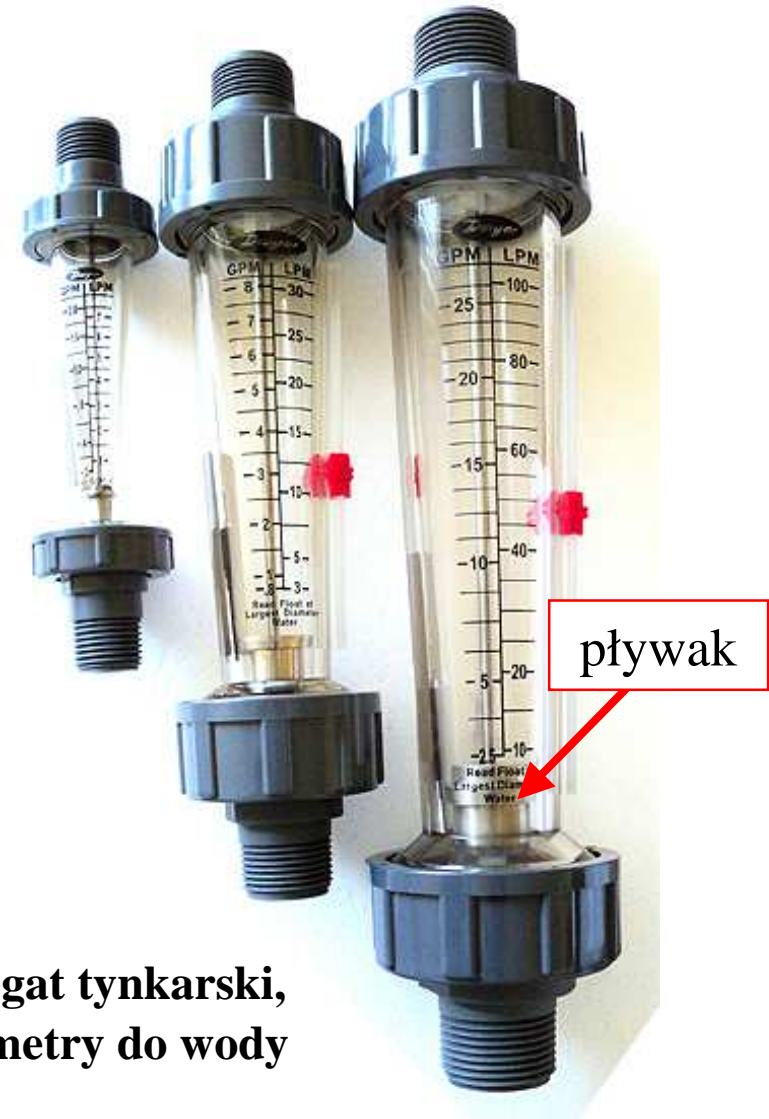
### **Parametry rotametrów:**

- zakresowość  $q_{Vmax} / q_{Vmin} : (8 \div 12):1$
- błędy pomiaru:  $1 \div 2 \%$
- zakres natężenia objętościowego gazów:  $1 \div 2500\text{dm}^3/\text{h}$
- zakres natężenia objętościowego cieczy:  $0,1 \div 80\text{dm}^3/\text{h}$

# Rotametry – przykłady konstrukcji przemysłowych

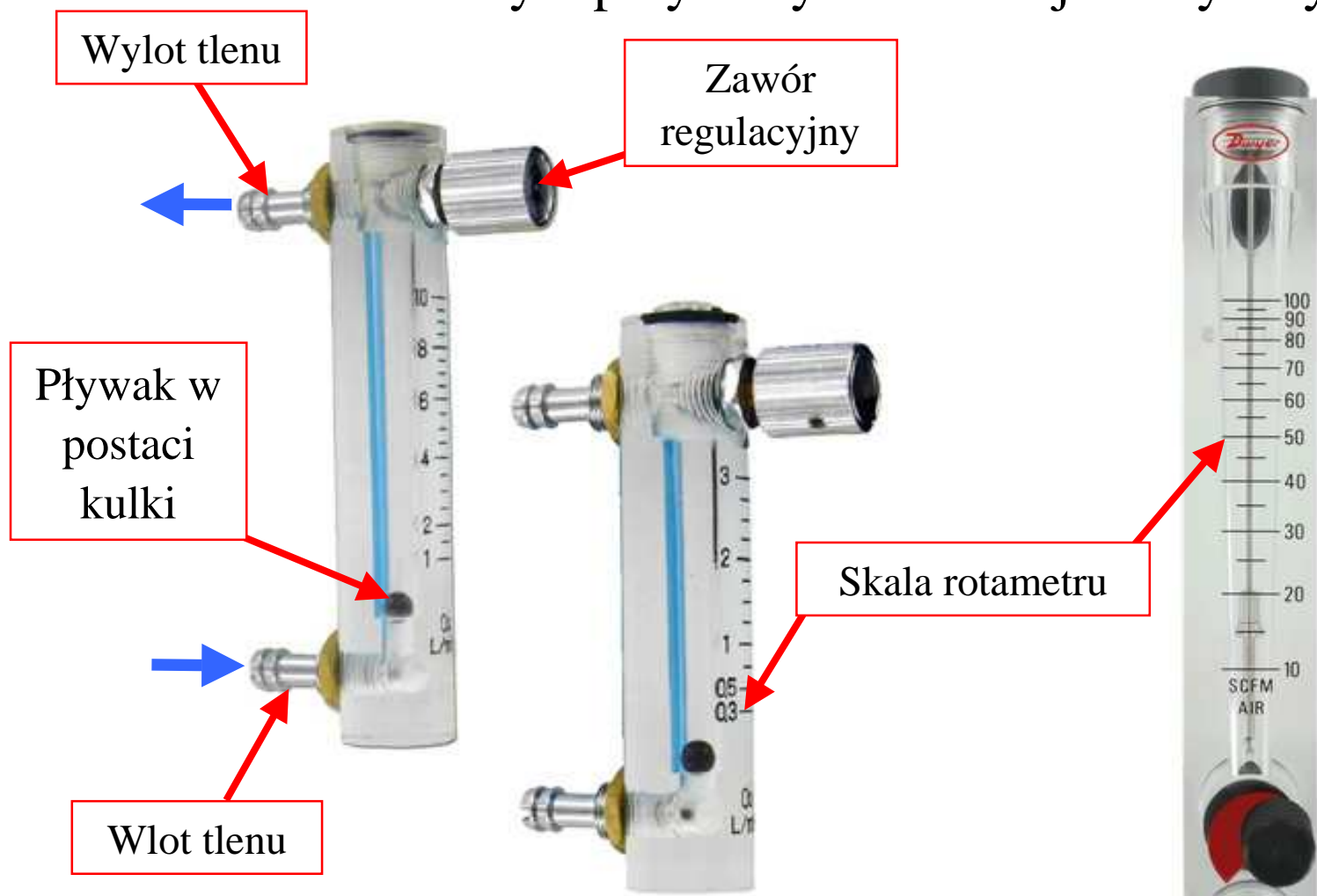


**Spawanie w atmosferze  
ochronnej CO<sub>2</sub>, Argon**



**Agregat tynkarski,  
rotametry do wody**

## Rotametry – przykłady konstrukcji medycznych

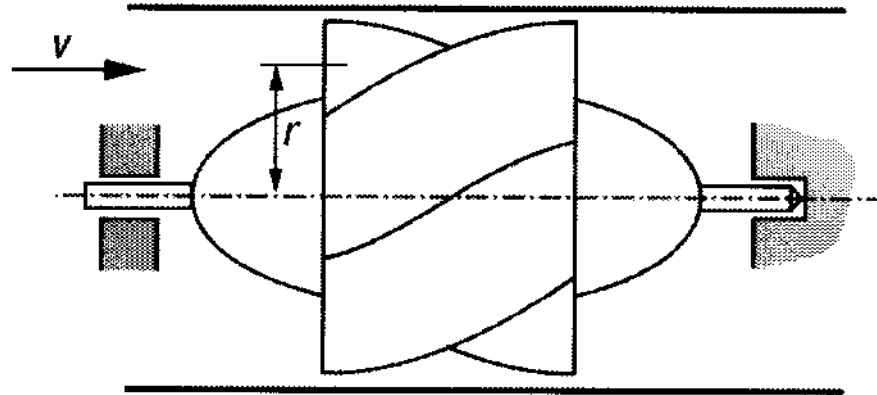


**Rotametry do tlenu**

**Rotametr do powietrza**



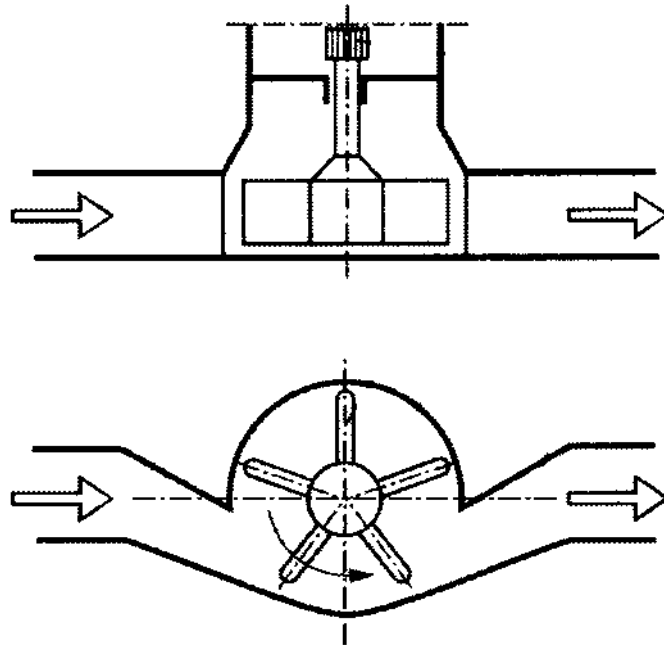
## Przepływomierz turbinowy Woltmana



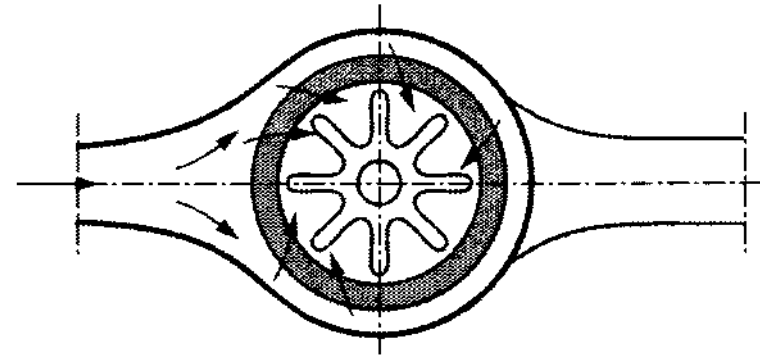
W przepływomierzach turbinowych zachodzi proporcjonalność prędkości obrotowej  $\omega$  wirnika od objętościowego natężenia przepływu:

$$q_v = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{nk} = q f$$

## Przepływomierz turbinowy

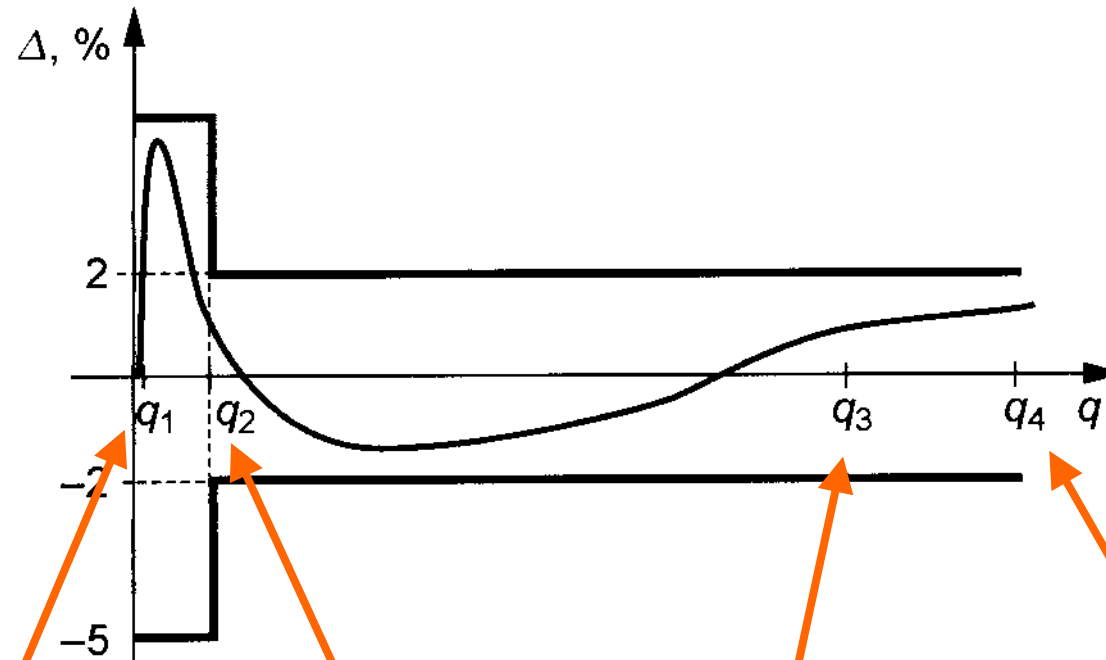


Przepływomierz z turbinką Peltona, **jednostrumieniowy**



Przepływomierz z turbinką Francisa, **wielostrumieniowy**

# Przepływomierz turbinowy – krzywa błędów



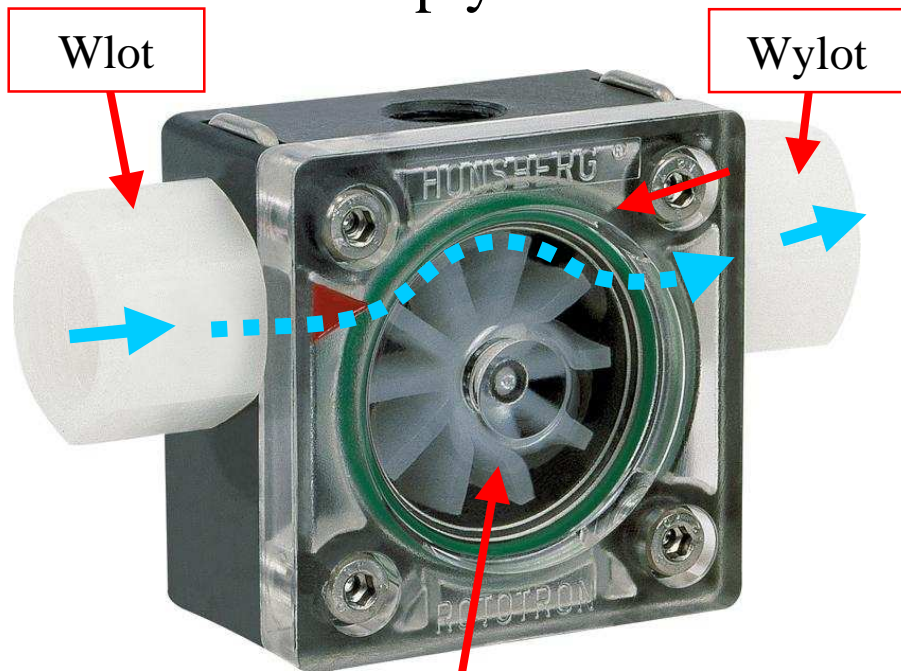
Przepływ minimalny

Przepływ pośredni

Przepływ ciągły

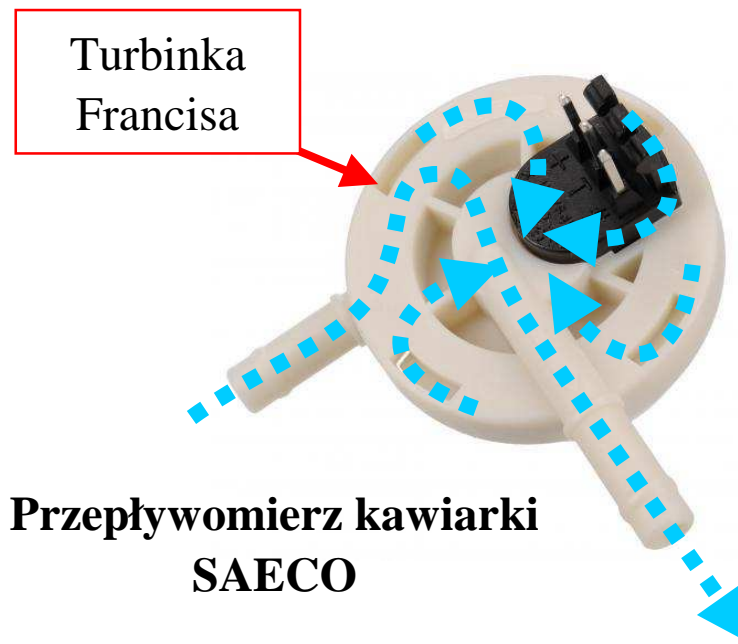
Przepływ maksymalny

# Przepływomierz turbinowy – przykłady konstrukcji

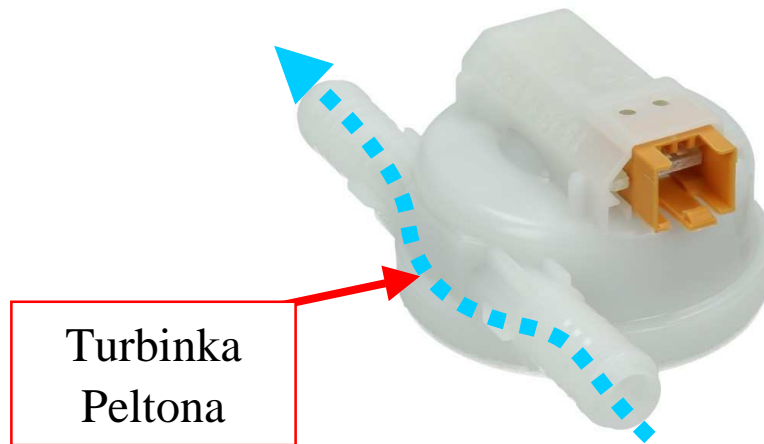


Turbinka Peltona

Przepływomierz przemysłowy jednostrumieniowy



Przepływomierz kawiarki SAECO



Turbinka Peltona

Przepływomierz pralki BOSH

## Przepływomierz wirowy (*ang. Vortex*)

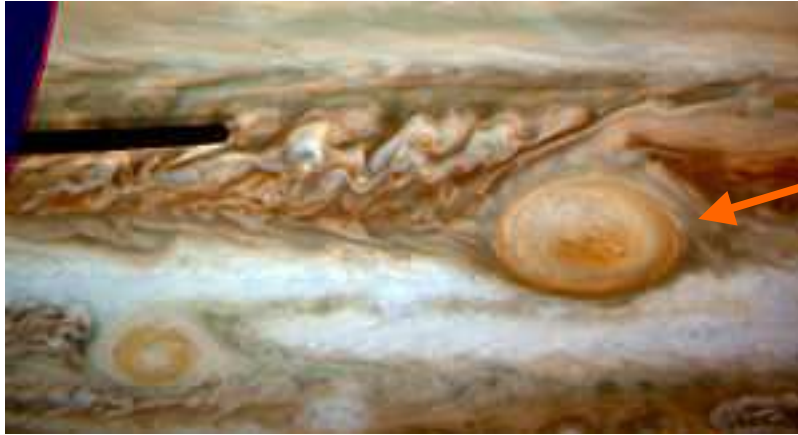
Za przeszkodą umieszczoną w strudze płynu powstają wiry. Zjawisko to badał już Leonardo da Vinci. Wiry takie powstają w środowisku naturalnym: w rzekach, w atmosferze itp.

Szczegółowe badania wykonywał Karman.

Częstotliwość  $f$  generowanych wirów Karmana jest proporcjonalna do prędkości strugi  $v$  i odwrotnie proporcjonalna do wymiaru poprzecznego  $d$  przeszkody:

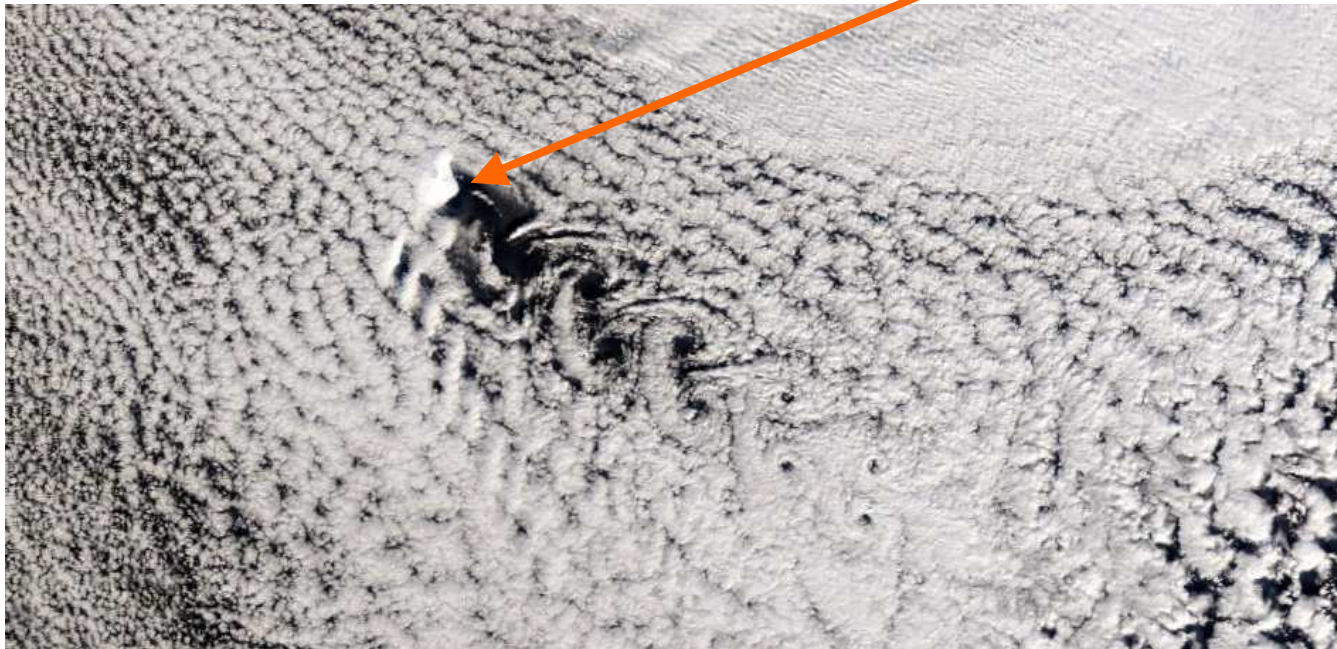
$$f \sim \frac{v}{d}$$

## Wiry Karmana w naturze (*ang. Karman vortex*)

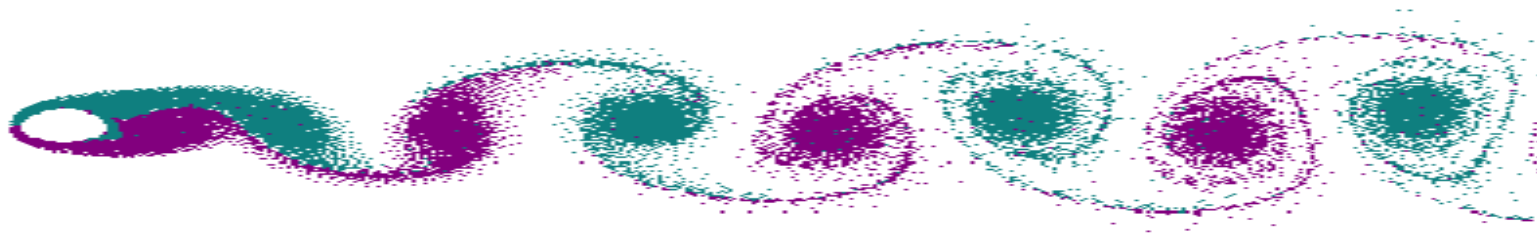
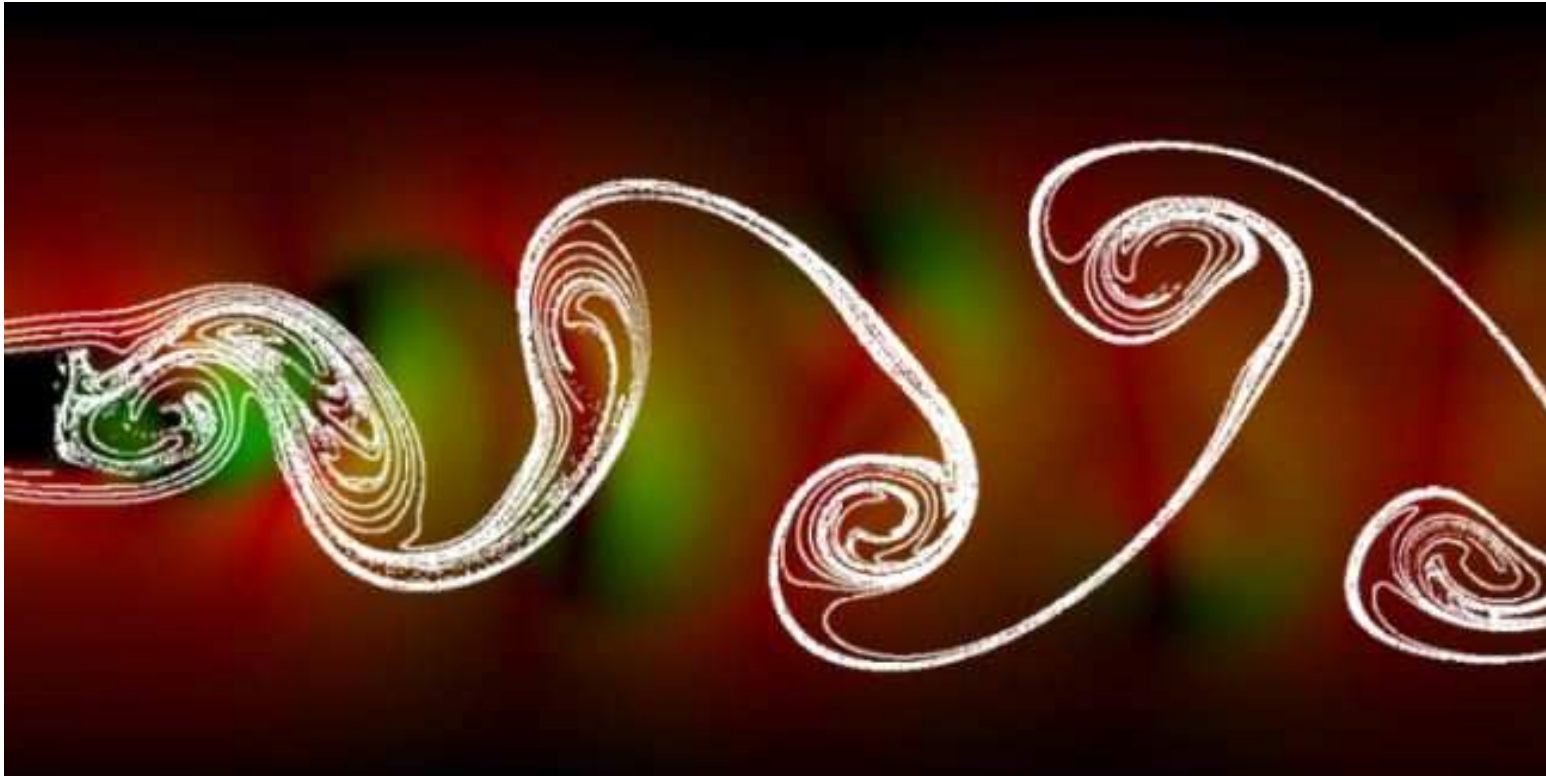


Czerwona Plama w atmosferze Jowisza

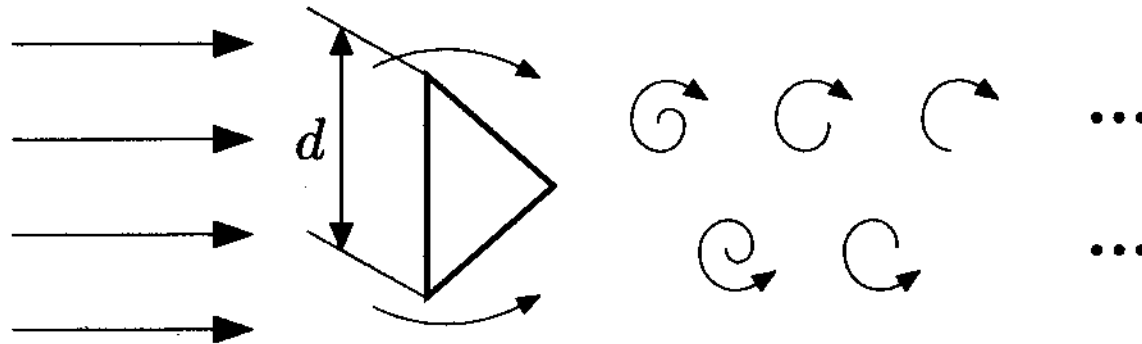
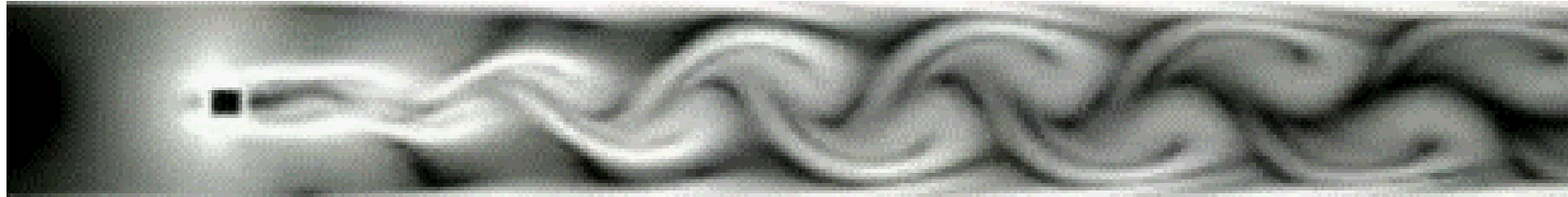
Wiry Karmana w atmosferze Ziemi powstające za wysoką górą



## Wiry Karmana w symulacji



# Ścieżka wirów Karmana

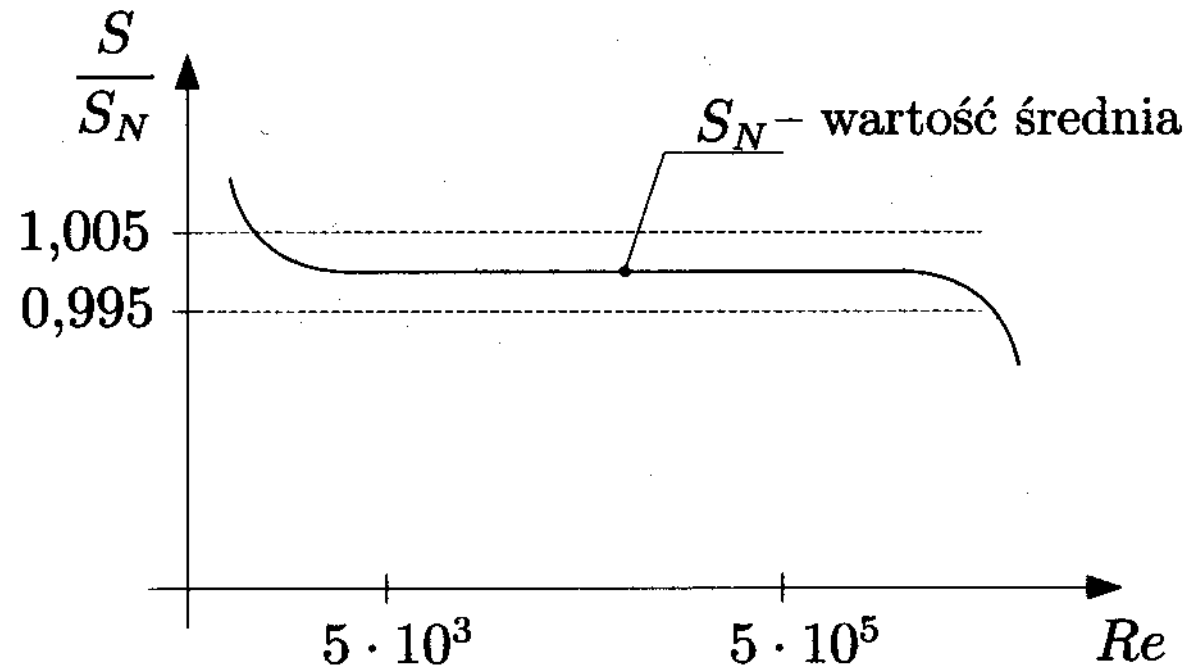


$$f = \frac{v}{d} S_h$$

$S_h$  – liczba Strouhala, współczynnik proporcjonalności

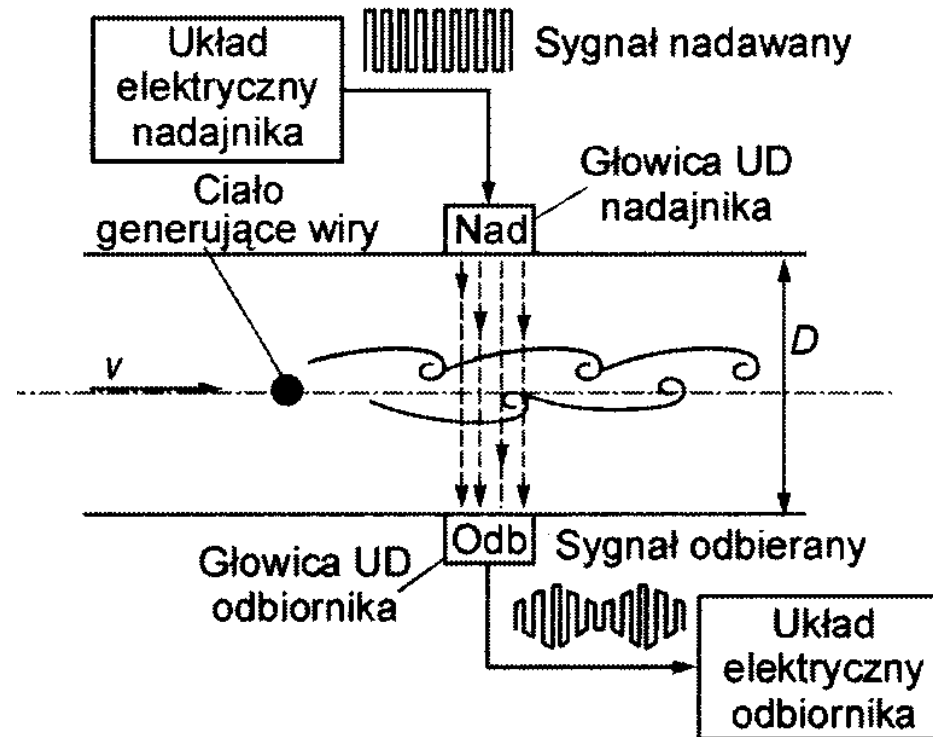


## Liczba Strouhala



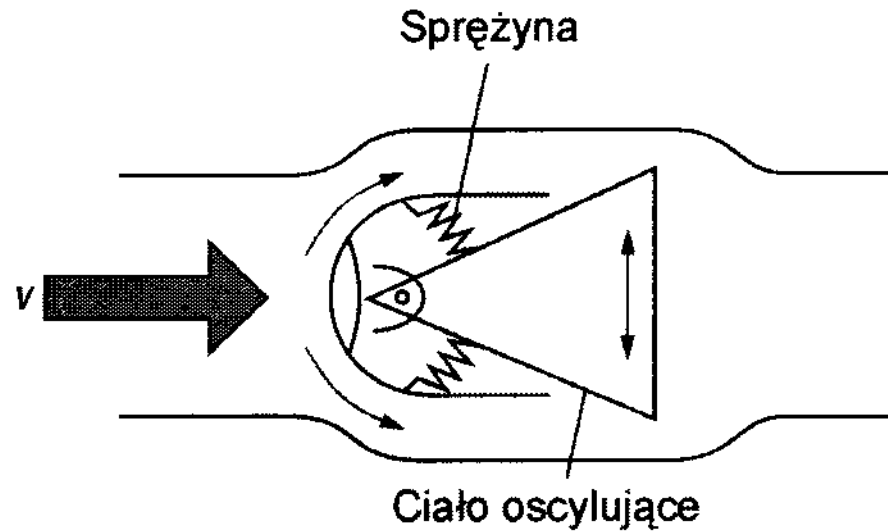
Liczba Strouhala w niewielkim stopniu zależy od liczby Reynoldsa  $Re$

## Ultradźwiękowa detekcja wirów Karmana

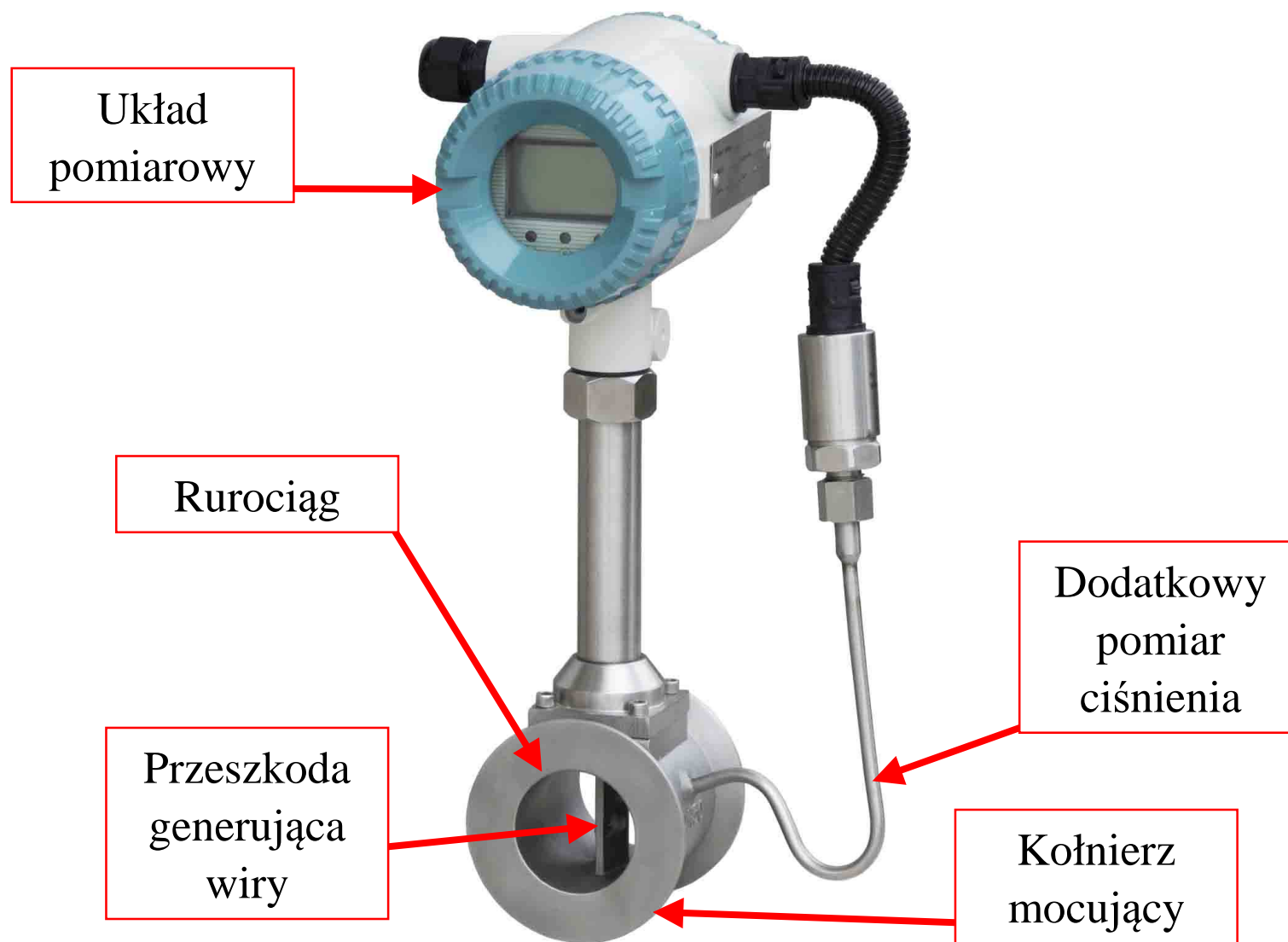


Inne metody detekcji wirów: mechaniczna, termiczna, optyczna.

# Przepływomierz wirowy z oscylatorem mechanicznym



## Przepływomierz wirowy *Vortex* – przykładowe wykonanie



## Zjawisko Coriolisa

Siła Coriolisa  $F_c$  powstaje podczas poruszania się ciała o masie  $m$  jednocześnie ruchem liniowym z prędkością  $v$  i obrotowym z prędkością  $\omega$ :

$$F_c = 2m(\omega \times v)$$

Siła Coriolisa  $F_c$  w warunkach naturalnych oddziałuje na wiele zjawisk: meandrowanie rzek, bieg fal morskich, zjawiska w atmosferze itp.

Przepływomierze Coriolisa reagują na przepływ masy (jako jedno z nielicznych rodzajów przepływomierzy).

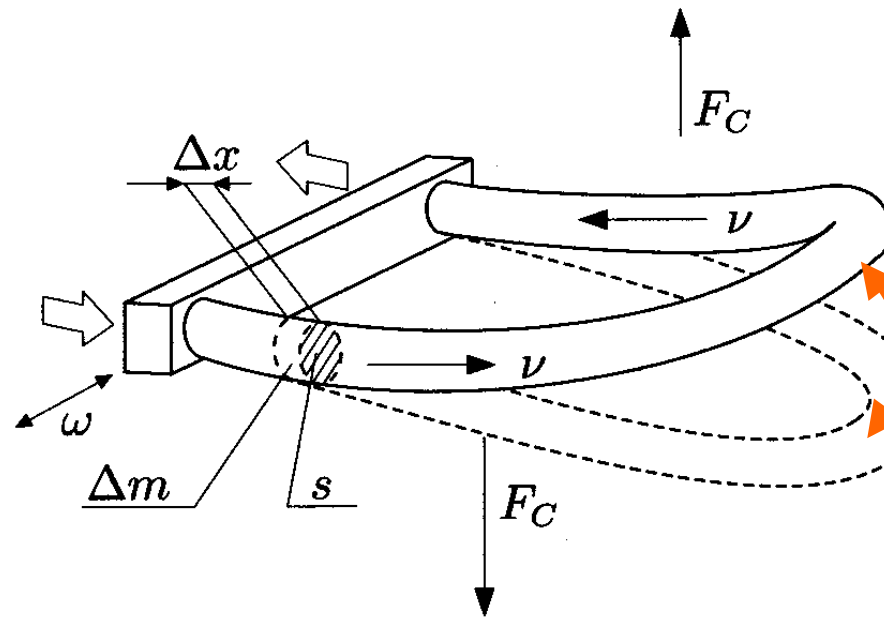
# Przeptywomierz Coriolisa

$$\Delta F_c = 2 \Delta m \omega v$$

$$q_m = v \rho s$$

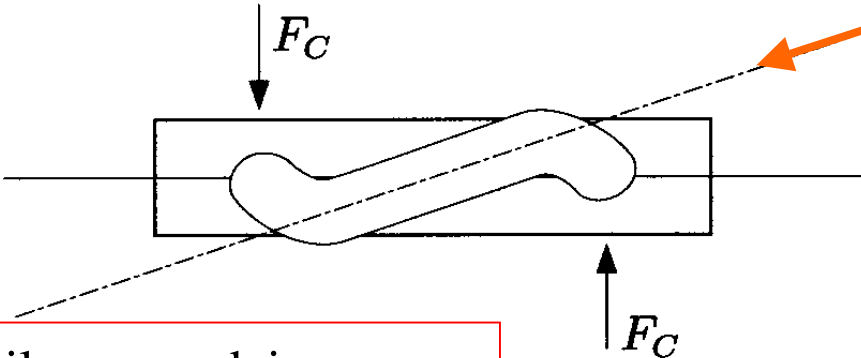
$$\rho = \frac{\Delta m}{s \Delta x}$$

$$\frac{\Delta F_c}{\Delta x} = 2 \omega q_m$$



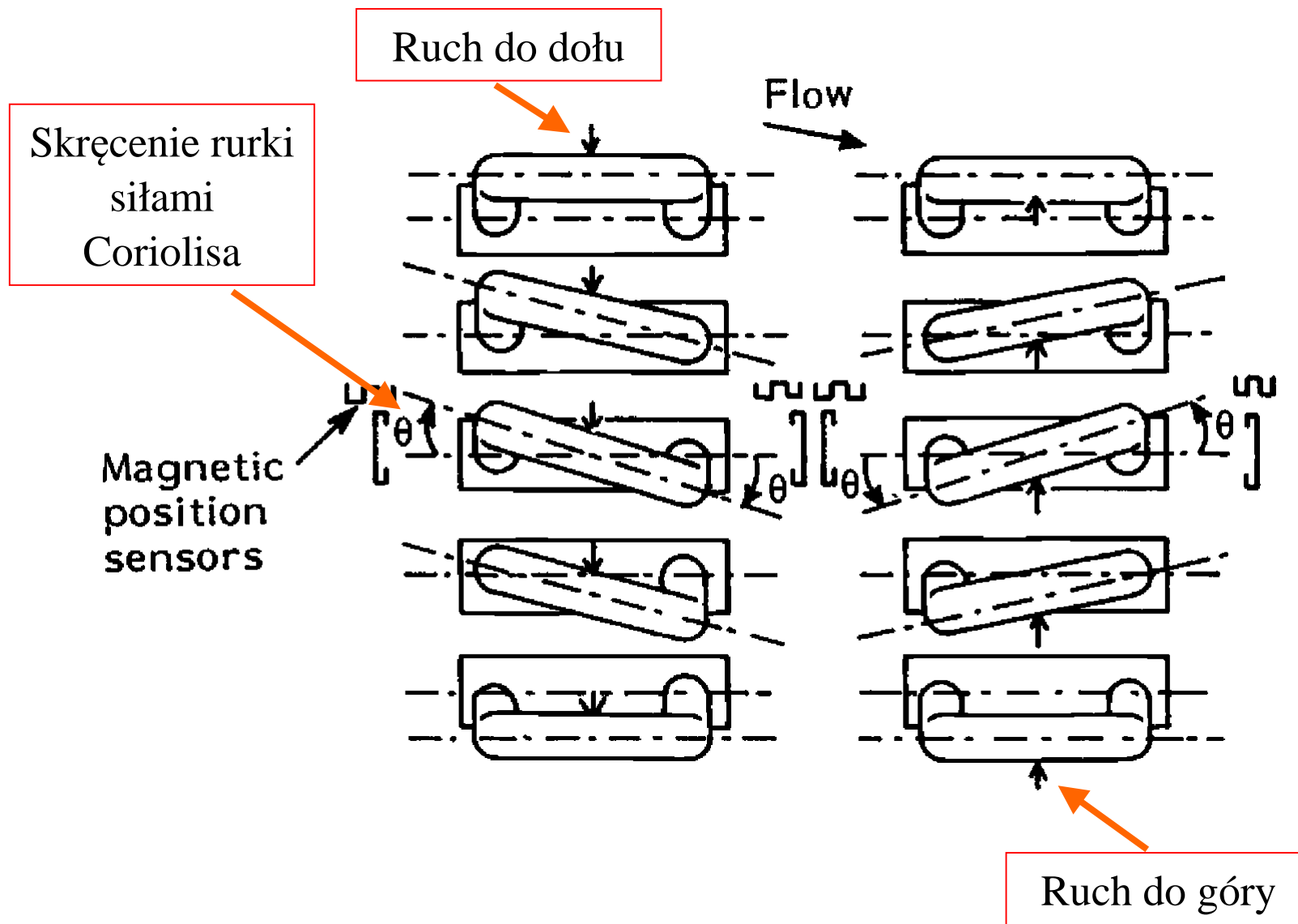
Wymuszone drgania rurki

Skrećenie rurki siłami Coriolisa

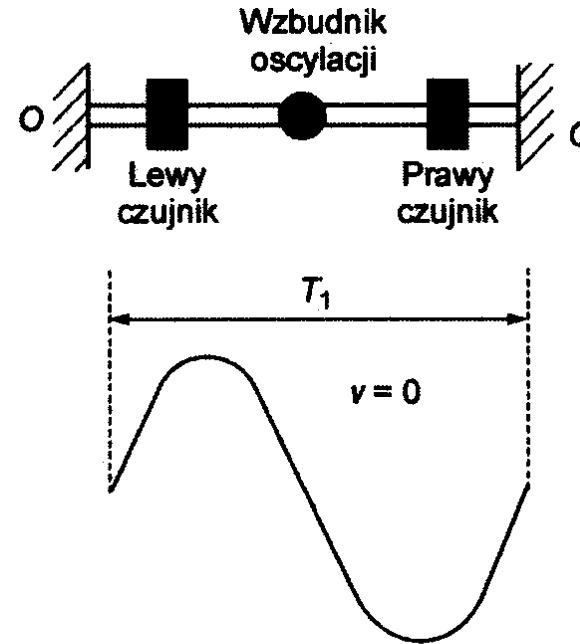
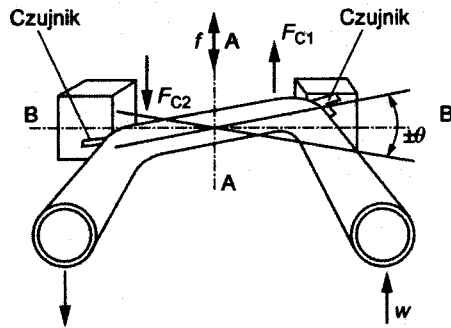


Siła przypadająca na jednostkę długości rurki

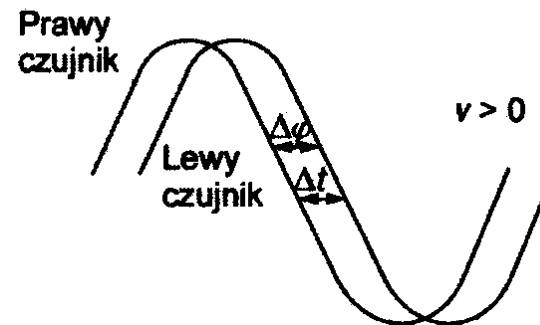
# Przeptywomierz Coriolisa – drgania U-rurki



# Przepływomierz Coriolisa – wzбудnik i czujniki

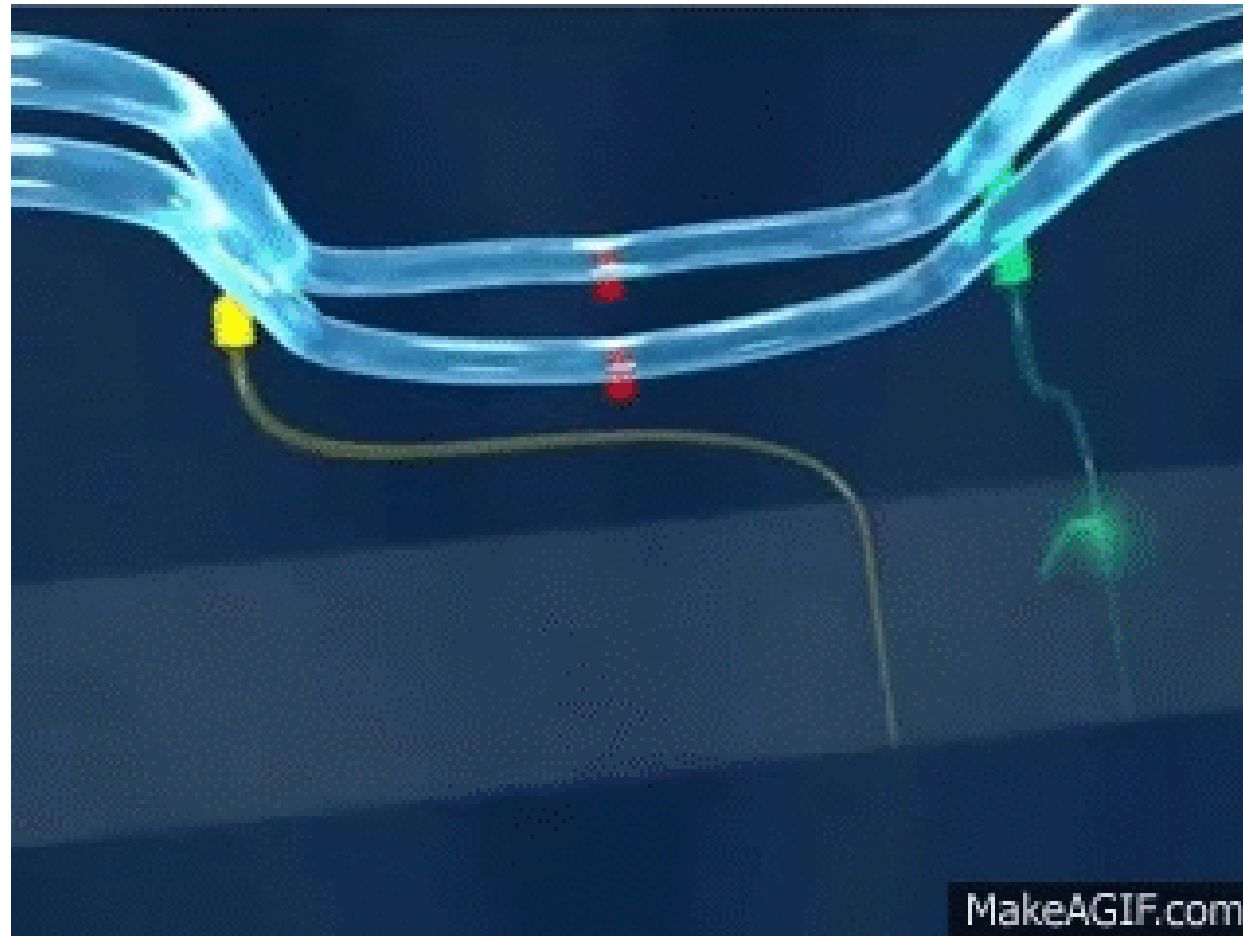


Rozmieszczenie układów  
wzbudzania oscylacji i  
czujników drgań.



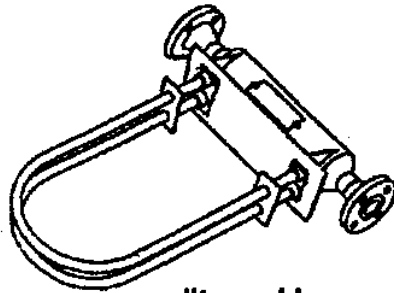


## Przepływomierz Coriolisa - animacja

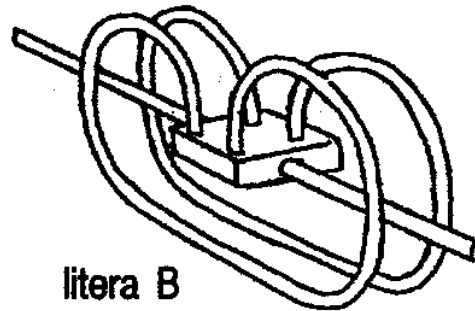


<https://youtu.be/PvXgaDoZr1E>

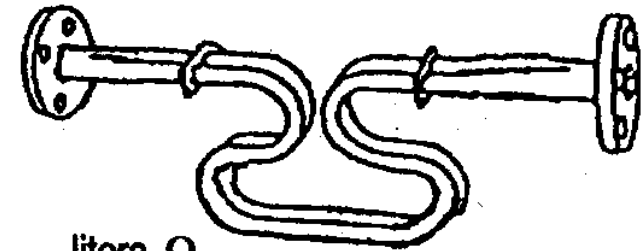
# Przepływomierz Coriolisa, różne konstrukcje



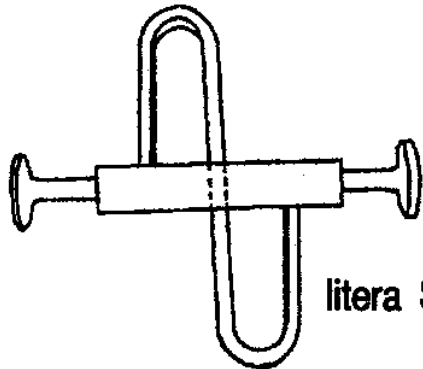
litera U



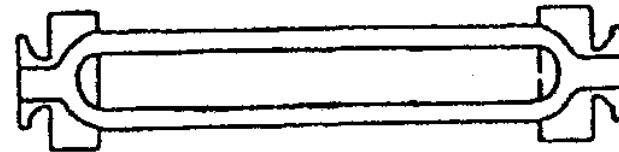
litera B



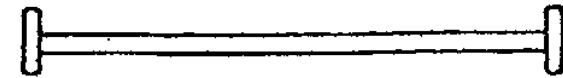
litera  $\Omega$



litera S



prosta rura

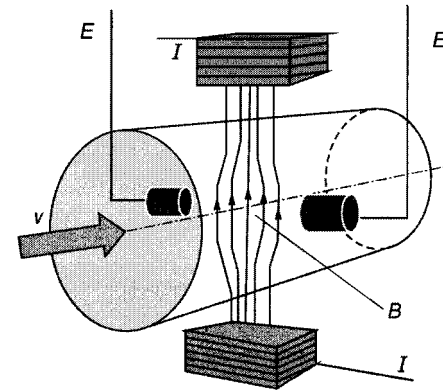
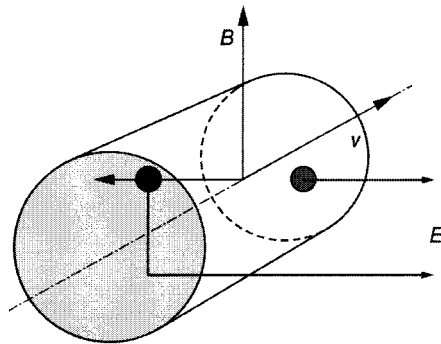


prosta rura

## Przepływomierz Coriolisa, przykład



# Przepływomierz elektromagnetyczny



$$E = B l v$$

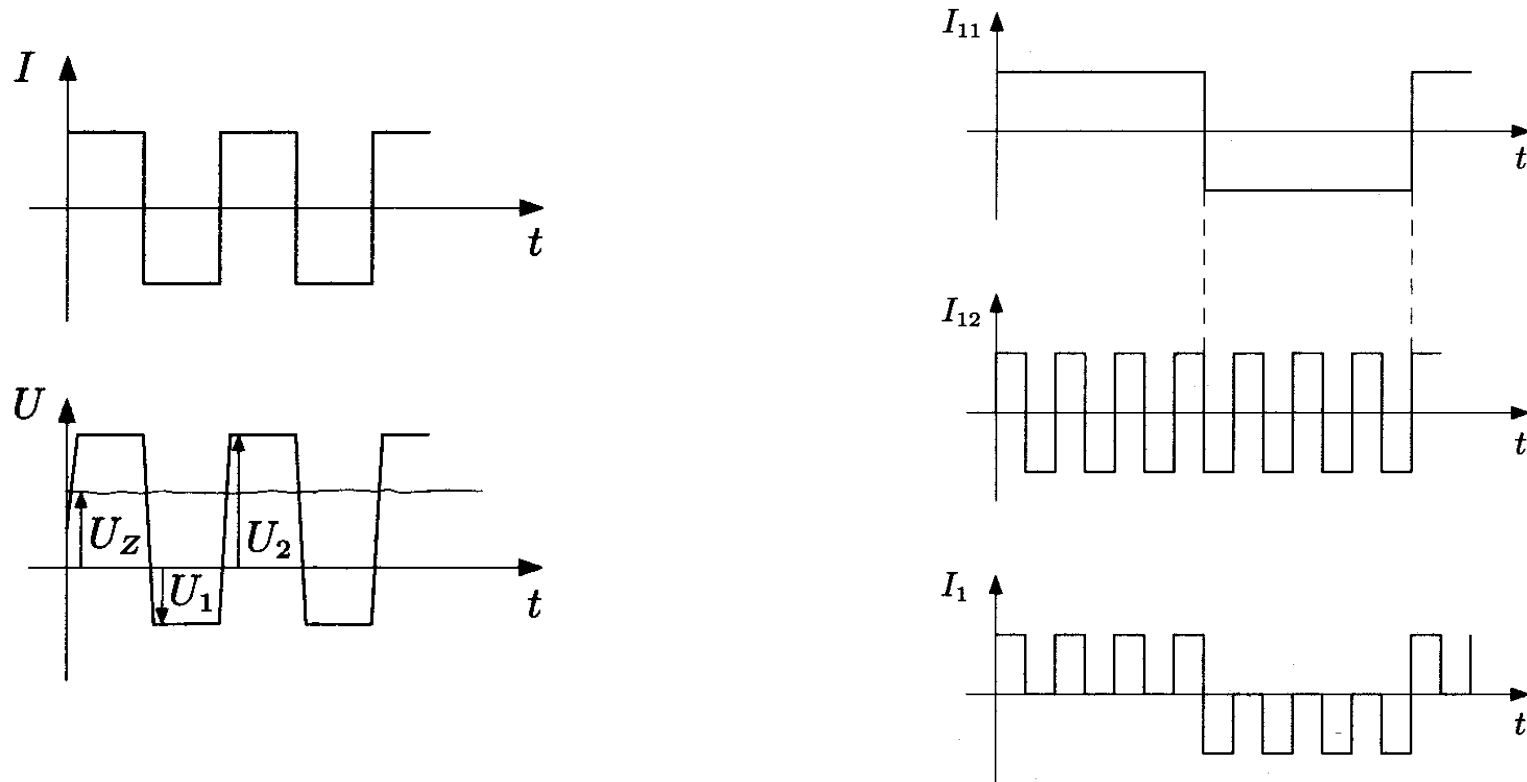
Przepływomierz elektromagnetyczny wykorzystuje zjawisko indukcji napięcia w poruszającym się przewodniku (przewodzącym płynie)

## Przepływomierz elektromagnetyczny

Uwzględniając pole przekroju rurociągu otrzymujemy liniową zależność napięcia indukowanego  $E$  od przepływu objętościowego  $q_V$ . Współczynnik proporcjonalności  $k$  uwzględnia wymiary konstrukcyjne przepływomierza.

$$E = k q_V$$

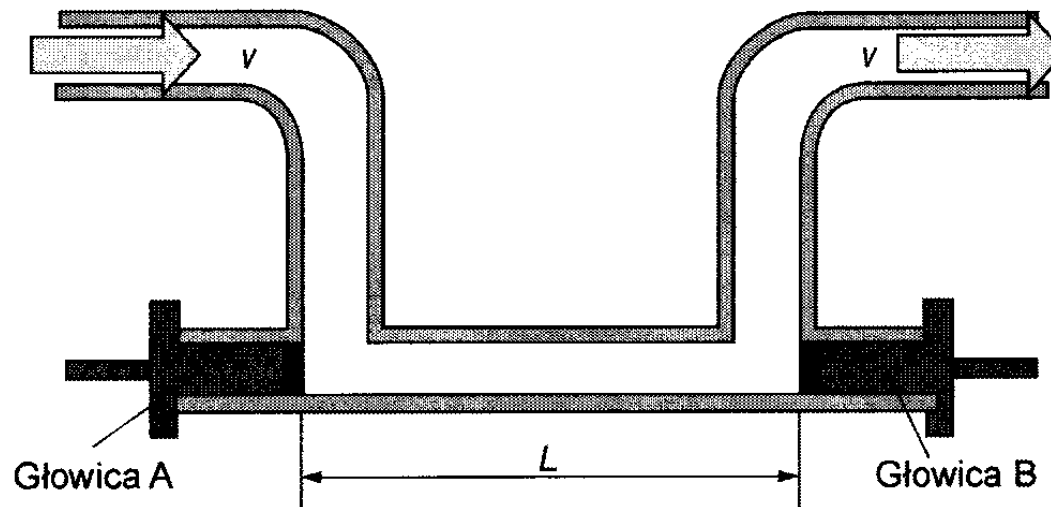
# Przepływomierz elektromagnetyczny



Zasilanie prądem impulsowym cewki elektromagnesu eliminuje zjawiska elektrochemiczne na styku elektrod i płynu (elektrolitu)

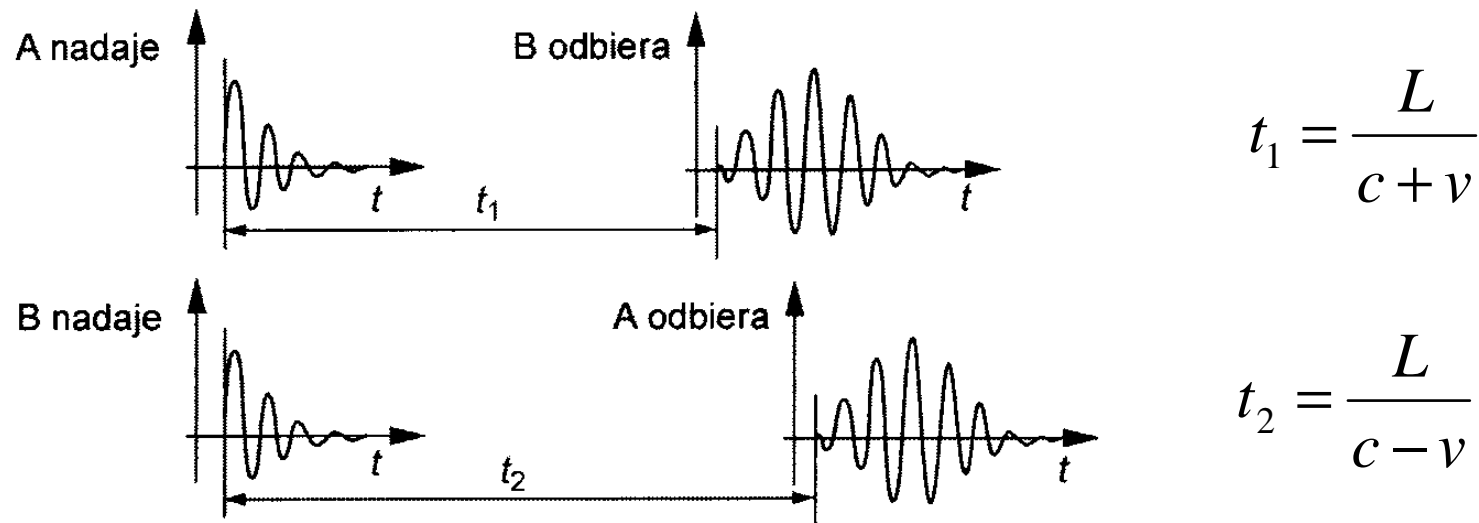
## Przepływomierz ultradźwiękowy

Przepływomierze ultradźwiękowe wykorzystują zależność czasu przejścia fali ultradźwiękowej przez poruszający się ośrodek. W zależności od konfiguracji, prędkość fali ultradźwiękowej (o częstotliwości ok.  $0,6 \div 2\text{MHz}$ ) sumuje się z prędkością ośrodka lub odejmuje się.



## Przepływomierz ultradźwiękowy

Dokonywane są dwa pomiary czasu na drodze  $L$  przy zgodnym i przeciwnym kierunku prędkości  $v$  płynu i prędkości  $c$  fali ultradźwiękowej.





## Przepływomierz ultradźwiękowy

Różnica czasów wyniesie:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2Lv}{c^2 - v^2}$$

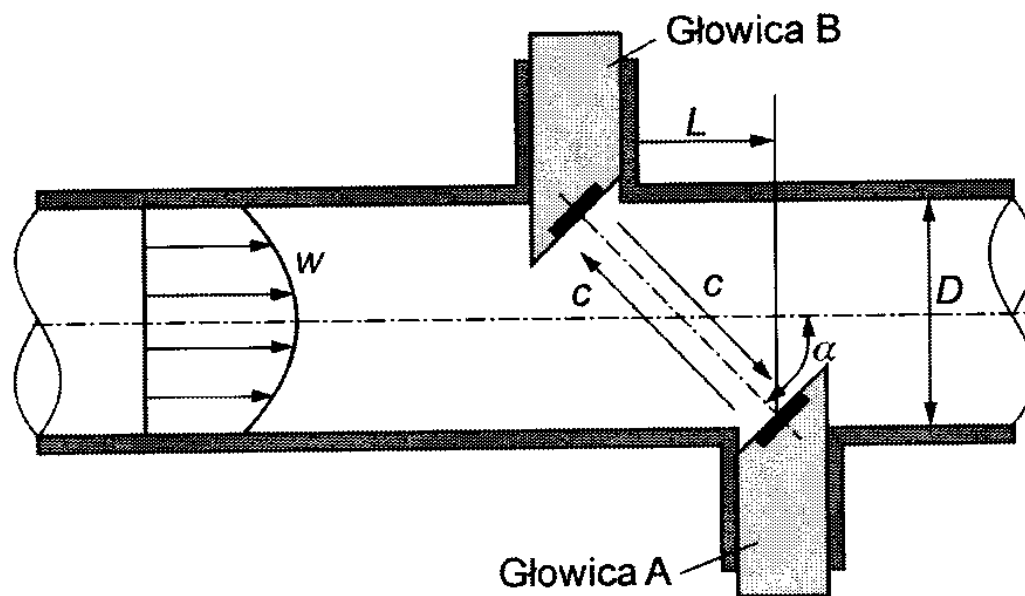
Ponieważ  $c \gg v$  wyrażenie uprości się:

$$\Delta t = t_2 - t_1 \approx \frac{2Lv}{c^2}$$

Wprowadza się pomocniczą zmienną  $y$  (niezależną od  $c$ ):

$$y = \frac{t_2 - t_1}{t_1 t_2} = \frac{2v}{L} \quad \text{czyli:} \quad v = \frac{y \cdot L}{2}$$

## Przepływomierz ultradźwiękowy – duża średnica



Sposób mocowania przetworników ultradźwiękowych w rurociągach o dużych średnicach do 2000mm

## Przepływomierz ultradźwiękowy – duża średnica

Droga fali ultradźwiękowej:

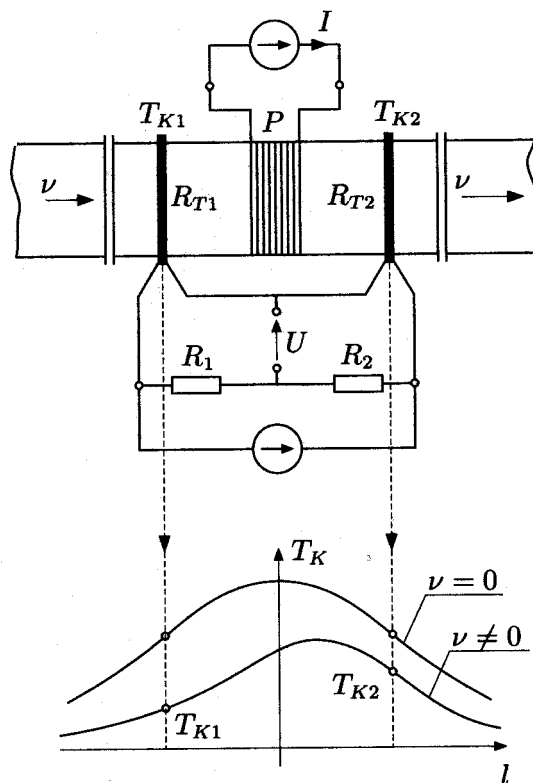
$$\sqrt{L^2 + D^2} = \frac{D}{\sin \alpha}$$

Różnica czasów  $\Delta t$  wyniesie:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2Dv}{\sin \alpha} \frac{\cos \alpha}{c^2 - v^2 \cos^2 \alpha} \approx \frac{2Dc \operatorname{tg} \alpha}{c^2} v$$

I dalej zależności jak poprzednio.

## Przepływomierz kalorymetryczny - budowa

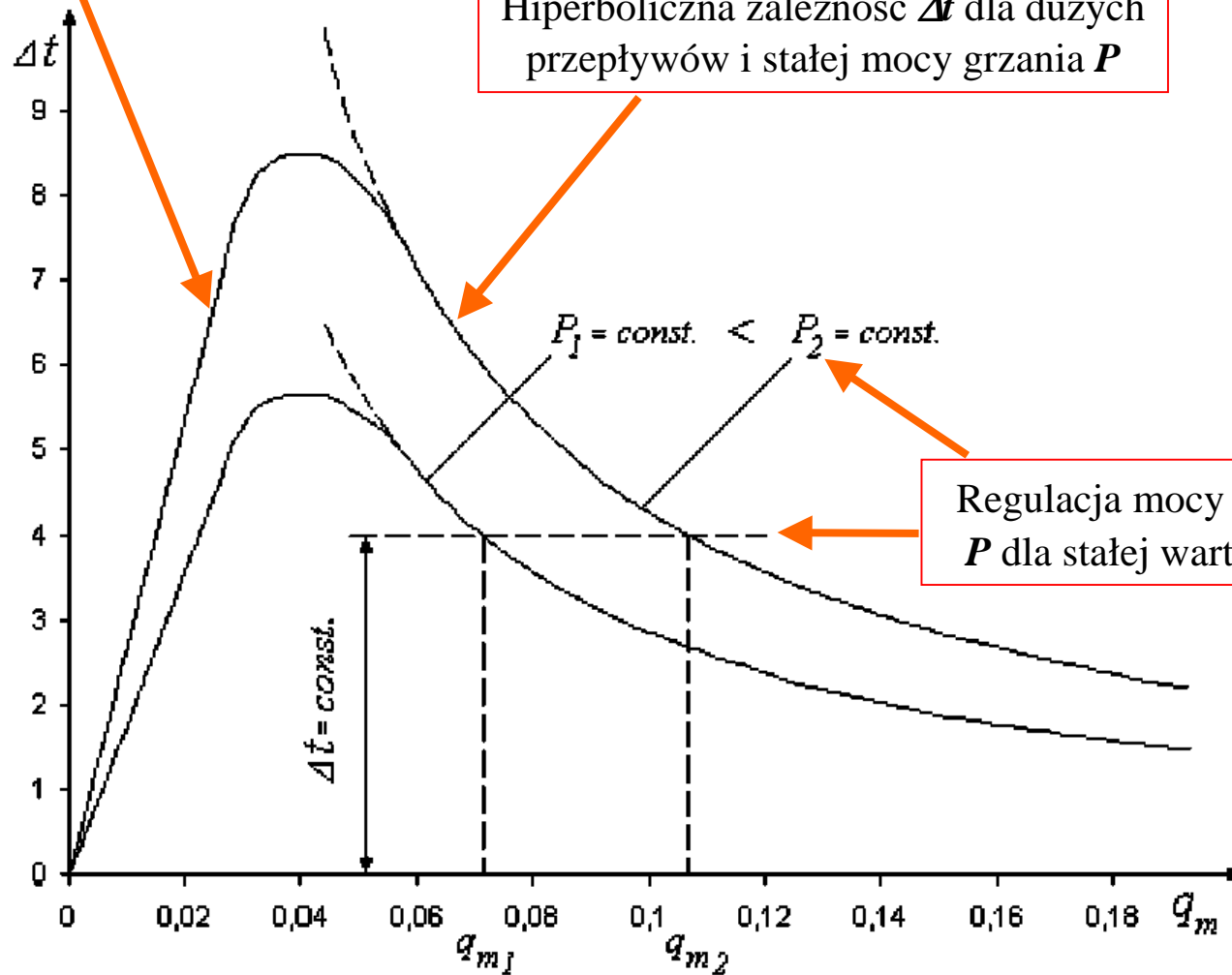


Pomiar prędkości przepływu dokonuje się poprzez pomiar różnicy temperatur po obu stronach grzejnika umieszczonego w rurociągu.

# Przepływomierz kalorymetryczny - wykres

Liniowa zależność  $\Delta t$  dla małych przepływów i stałej mocy grzania  $P$

Hiperboliczna zależność  $\Delta t$  dla dużych przepływów i stałej mocy grzania  $P$



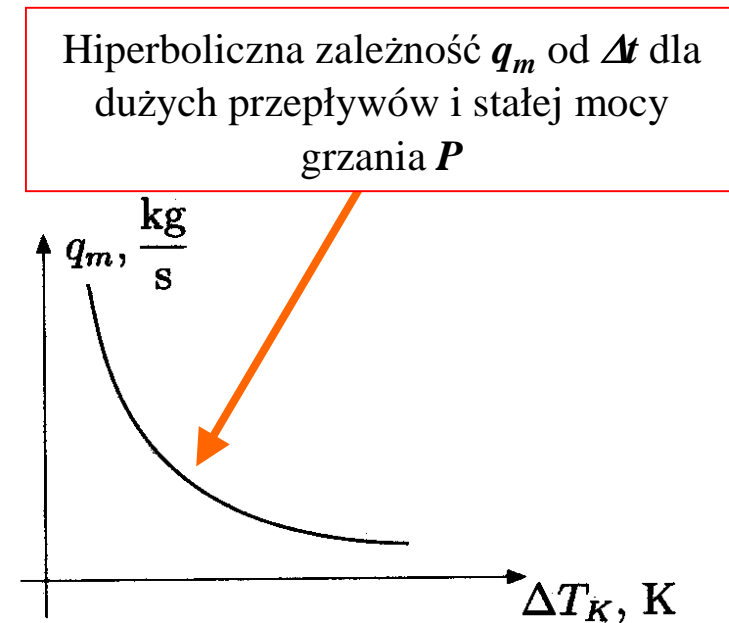
Regulacja mocy grzania  $P$  dla stałej wartości  $\Delta t$

## Przepływomierz kalorymetryczny - wzory

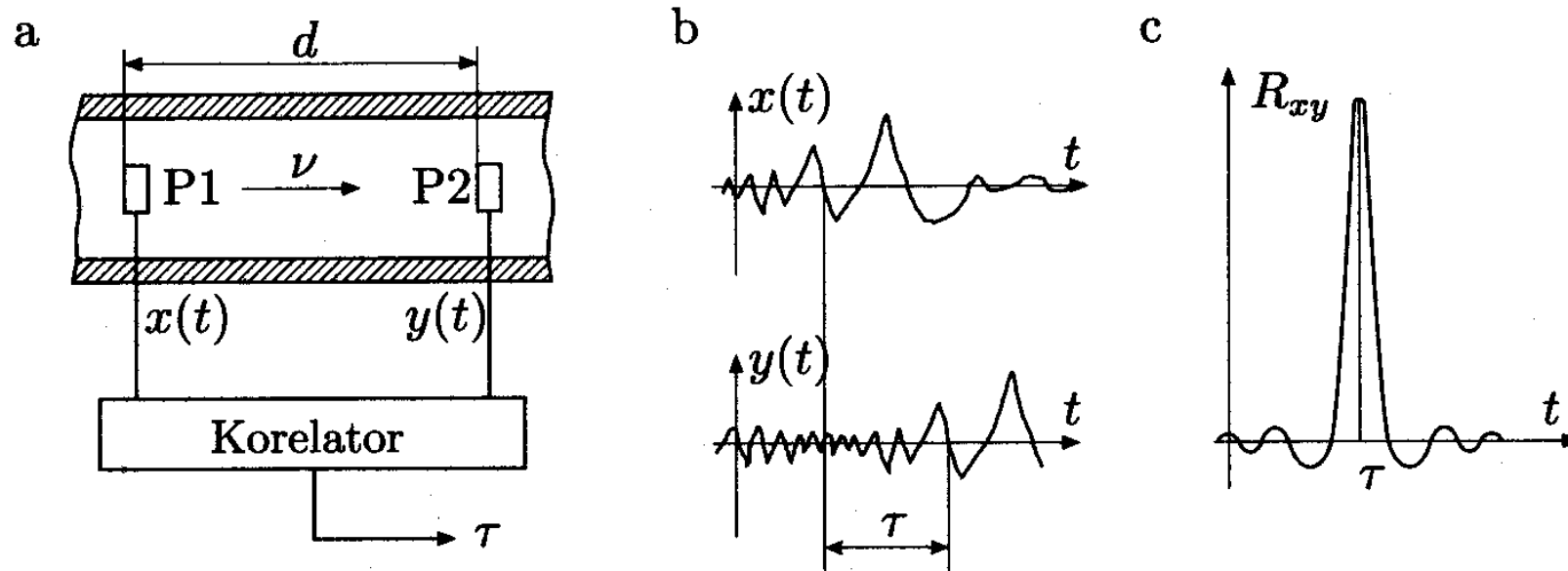
Moc  $P$  dostarczona przez grzejnik do poruszającego się płynu może być wyznaczone na podstawie różnicy temperatur  $\Delta T_K$ , ciepła właściwego  $c_p$  i przepływu masowego  $q_m$ :

$$P = c_p q_m \Delta T_K$$

$$q_m = \frac{P}{c_p \Delta T_K}$$



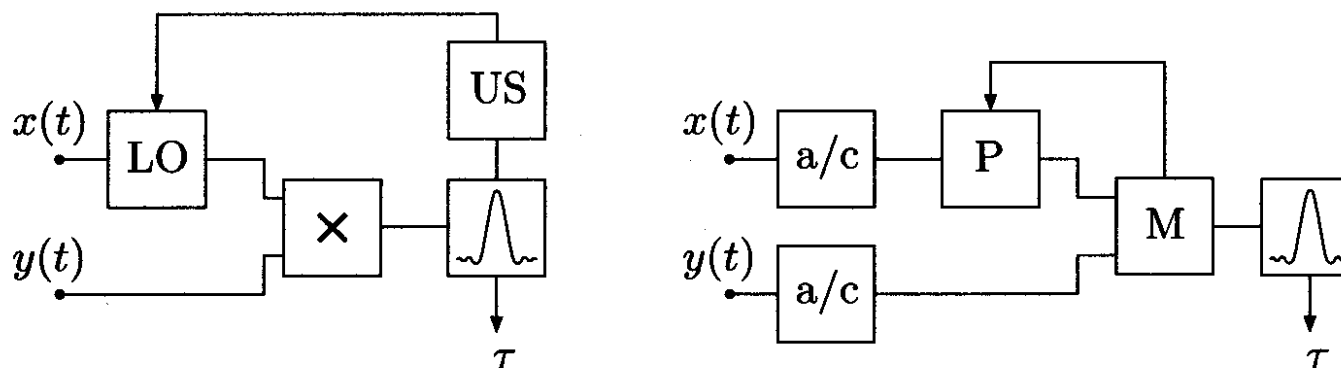
## Przepływomierz korelacyjny



Pomiar przepływu objętościowego  $q_v$  na podstawie korelacji sygnałów z czujników w odległości  $d$  w rurociągu o przekroju  $s$ :

$$q_v = \frac{s d}{\tau}$$

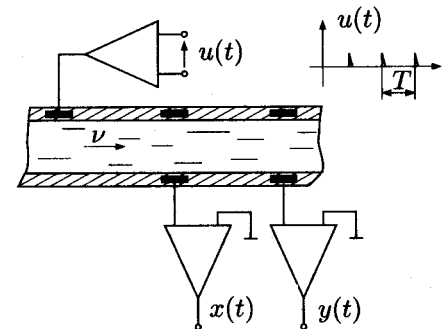
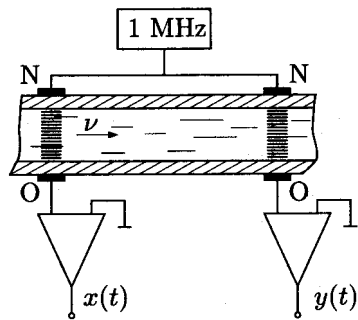
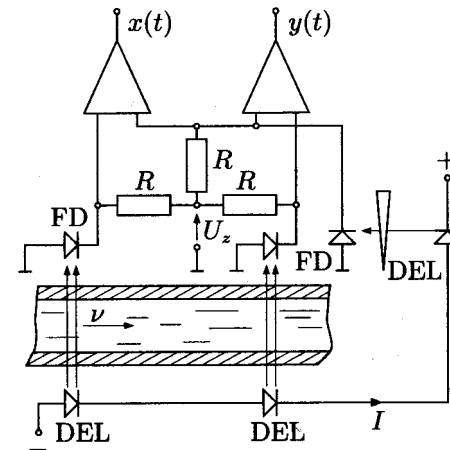
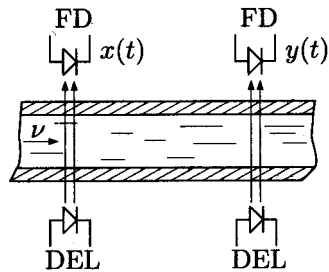
## Przeptywomierz korelacyjny



Analogowa i cyfrowa realizacja układu korelatora



# Przeptywomierz korelacyjny



## Układy czujników przepływomierza korelacyjnego

## Liczniki objętości gazów i cieczy

Licznikami objętości nazywa się przepływomierze, w których w sposób ciągły sumuje się objętość przepływającego płynu.

$$V = \int_{t_1}^{t_2} q_v(t) dt$$

Większość współczesnych elektronicznych mierników natężenia przepływu posiada wbudowaną funkcję licznika objętości.

Liczniki objętości do wody nazywane są wodomierzami. Do pomiarów zużycia wody w mieszkaniach powszechnie stosowane są wodomierze turbinowe, jedno lub wielostrumieniowe.

## Pomiar przepływu w kanale otwartym

**Z punktu widzenia pomiarów, przez kanały otwarte rozumiemy:**

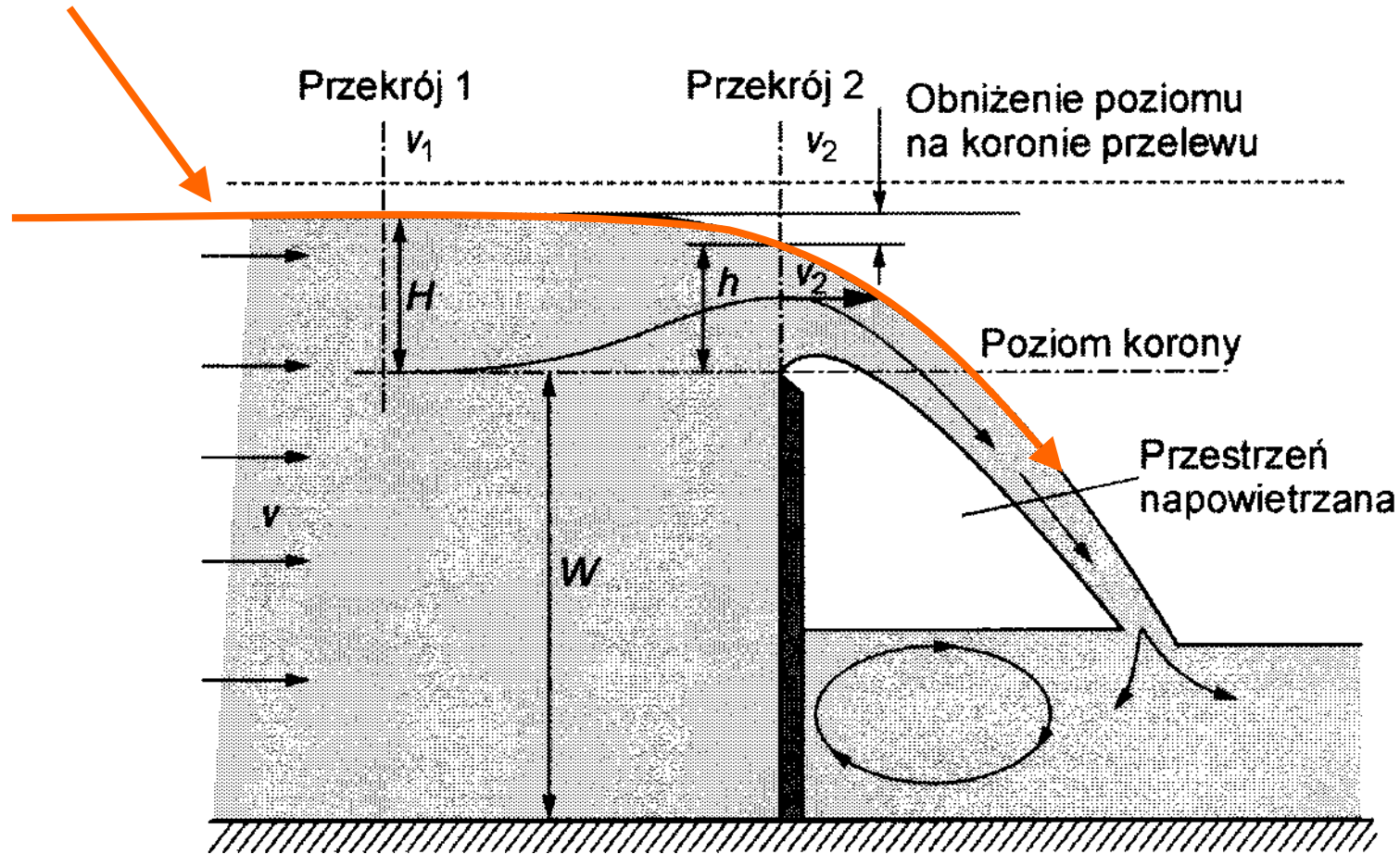
- rzeki,
- kanały żeglowne, kanały ściekowe,
- otwarte instalacje technologiczne.

**Najczęściej stosowane sposoby pomiaru :**

- przelew,
- zastawka,
- korytko pomiarowe Venturiego.

## Pomiar w kanale otwartym - przelew

Rozpatrujemy linię prądu o prędkości  $v_2$  na wysokości  $h$  powyżej korony



## Pomiar w kanale otwartym - przelew

Na podstawie prawa Bernoulliego można zapisać dla linii prądu:

$$\boxed{\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + Hg = \text{const}} \rightarrow H + \frac{v_1^2}{2g} = h + \frac{v_2^2}{2g}$$

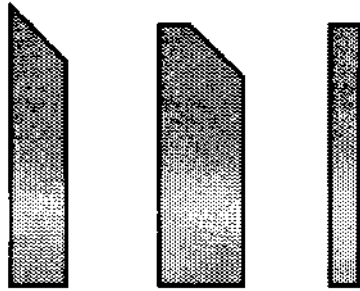
Zakładając w przekroju 1 prędkość  $v_1=0$ , wyznaczamy prędkość  $v_2$  w przekroju 2. Całkujemy prędkość nad koroną  $v_2$  dla całego przekroju przelewu  $S=bh$ , otrzymujemy:

$$q_v = \int_S v_2 dS = b \int_0^h v_2 dh = \frac{2}{3} b H^{3/2} \sqrt{2g}$$

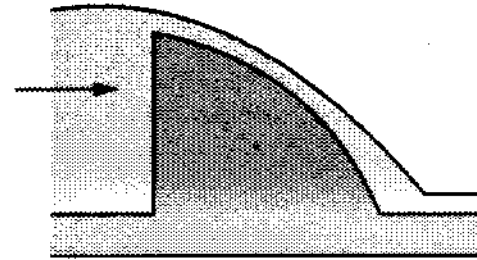
Miarą strumienia objętości  $q_v$  jest poziom wody  $H$  przed przelewem.

# Przelewy – kształty korony

cienkościenne

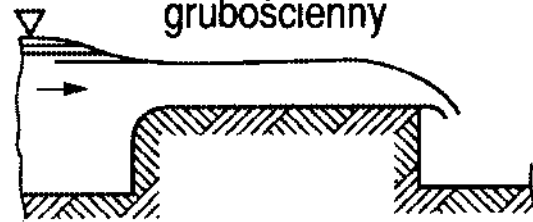


grubościenne



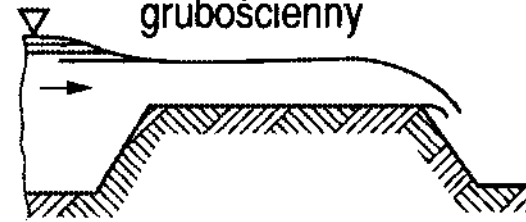
z zaokrągloną koroną odpływową

grubościenne



z zaokrągloną krawędzią wlotową

grubościenne

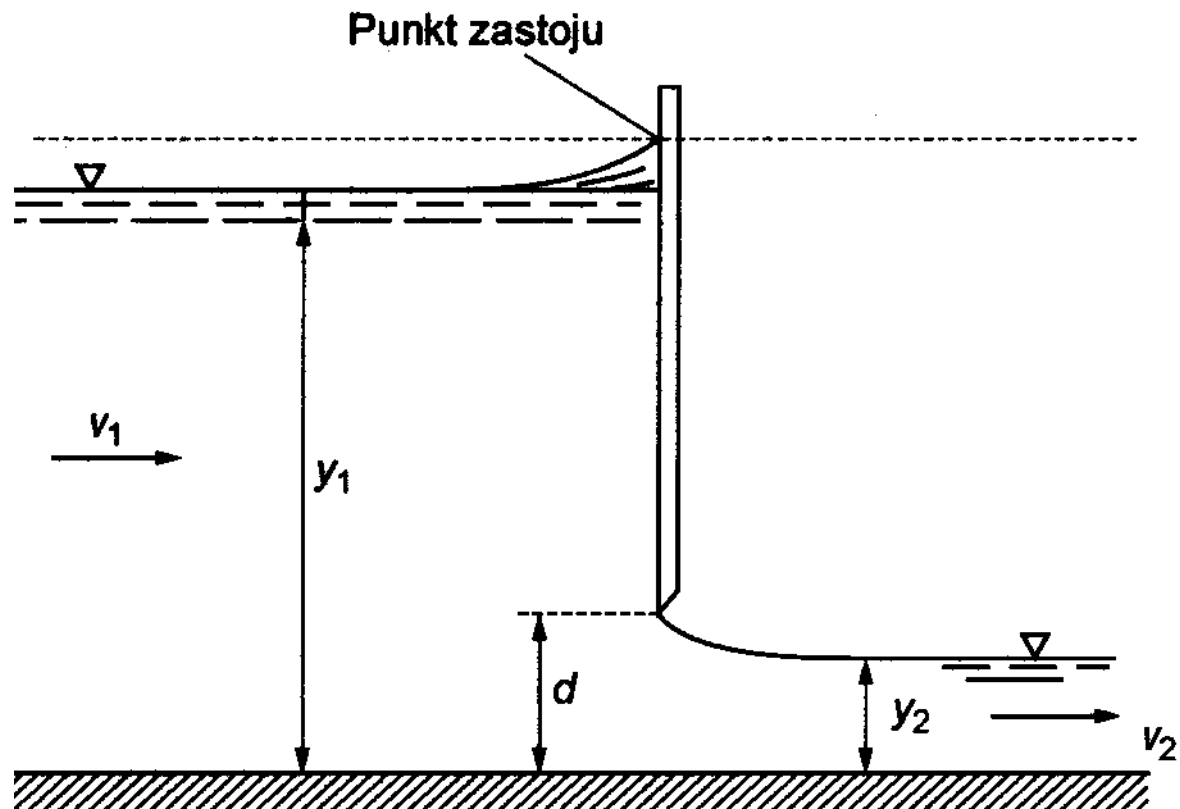


trapezowy

## Przelew – przykład realizacji



## Pomiar w kanale otwartym - zastawka



$$q_v = cbd \sqrt{2gy_1}$$



## Pomiar w kanale otwartym - zastawka

Miarą strumienia objętości  $q_v$  jest poziom wody  $y_1$  przed zastawką:

$$q_v = cbd\sqrt{2gy_1}$$

$c$  – współczynnik przepływu  $0,55 \div 0,60$

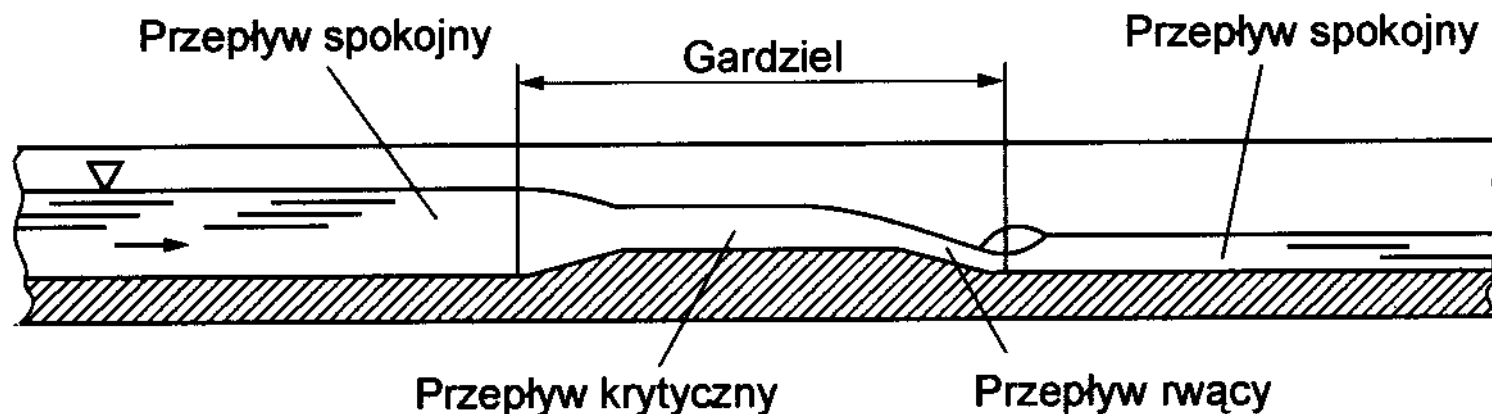
$b$  – szerokość zastawki

$d$  – wysokość upustu

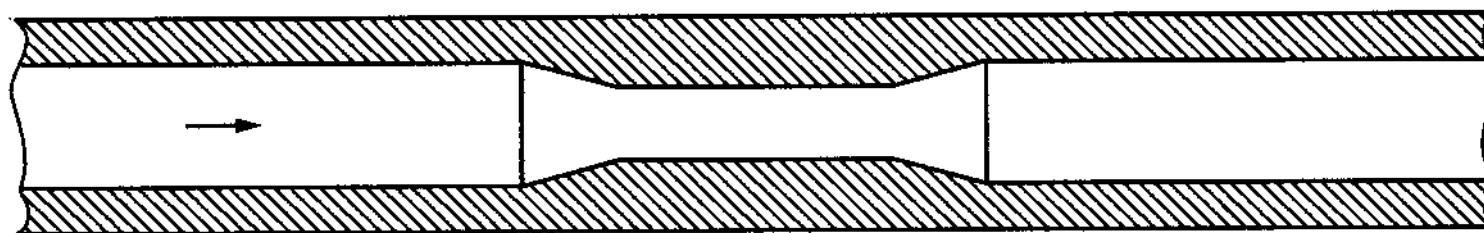
## Przykład - zastawka na kanale melioracyjnym



# Pomiar w kanale otwartym - korytko pomiarowe Venturiego



Profil podłużny – przekrój pionowy



Plan – przekrój poziomy

## Pomiar w kanale otwartym - korytka pomiarowe Venturiego

Miarą strumienia objętości  $q_v$  jest różnica poziomów wody  $h_1$  przed przewężeniem i  $h_2$  w przewężeniu:

$$q_v = cb_2 h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

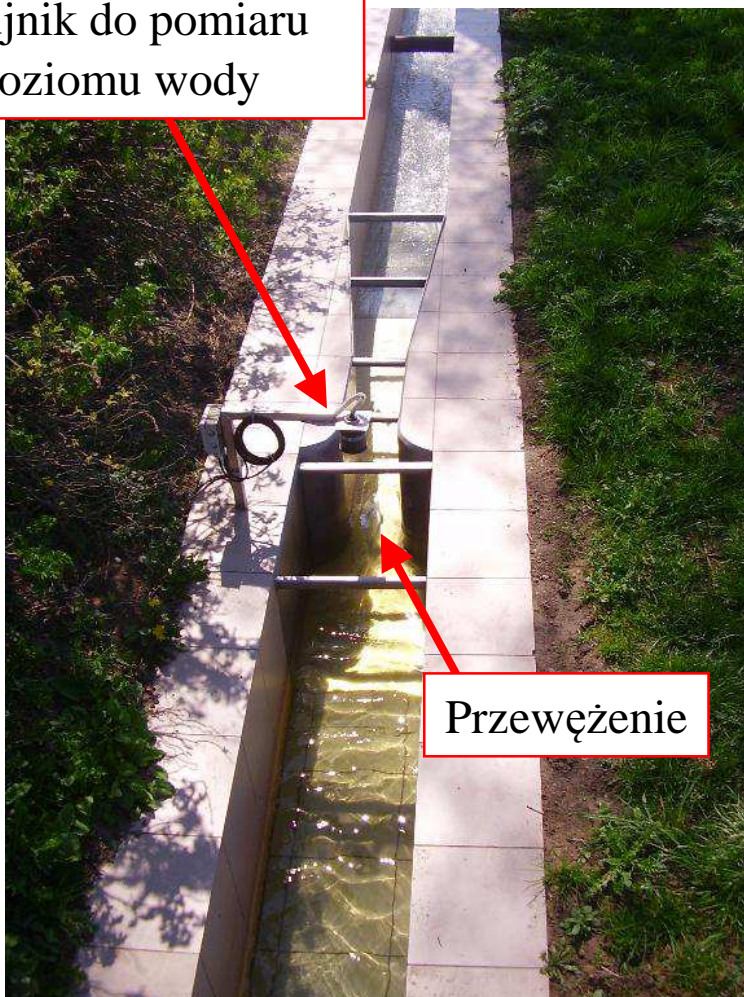
$c$  – współczynnik przepływu  $0,97 \div 1,00$

$b_2$  – szerokość korytka w gardzieli

$g$  – przyspieszenie ziemskie

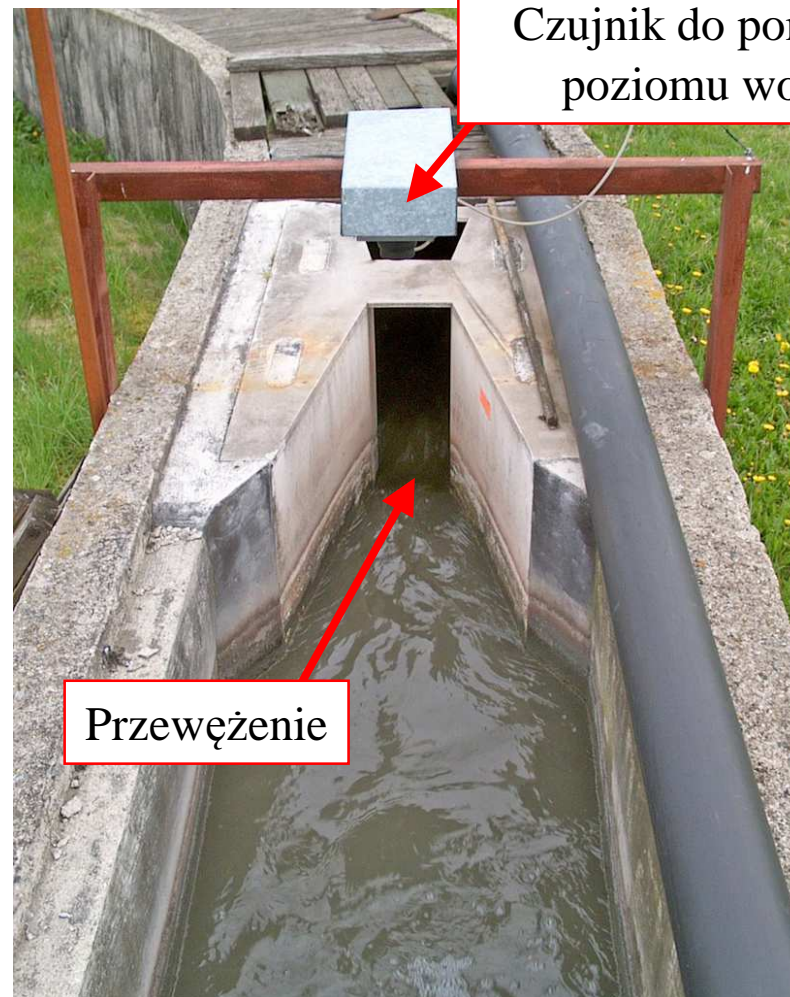
## Korytko pomiarowe Venturiego – przykłady wykonania

Czujnik do pomiaru  
poziomu wody



Przewężenie

Czujnik do pomiaru  
poziomu wody



Przewężenie

## Korytka pomiarowe Venturiego w instalacjach oczyszczalni ścieków

## Korytko pomiarowe Venturiego – przykłady wykonania



### **Korytko pomiarowe Venturiego na naturalnym cieku wodnym**

