Wykład 3

Przepływy płynów

Przepływy płynów

Płyny są to ciecze lub gazy

Cechy płynów:

- Łatwość zmiany wzajemnego położenia elementów płynu względem siebie. W ciałach stałych jest to możliwe jedynie pod działaniem dużych sił zewnętrznych.
- Płyny przybierają kształt zbiornika, w którym się znajdują. Ciecze tworzą w zbiorniku powierzchnię swobodną, natomiast gazy wypełniają całkowicie jego objętość.
- Gazy, w porównaniu z cieczami, mają znacznie większą ściśliwość, tj. zdolność do zmiany objętości pod wpływem sił zewnętrznych.

Przepływy płynów

Najważniejszymi właściwościami płynów są **gęstość i lepkość**.

Rozpatrując gęstość, płyny można podzielić na **płyny ściśliwe (gazy)** i **płyny nieściśliwe (ciecze)**.

Siły działające w płynach:

1. Masowe (objętościowe): siły grawitacji, siły bezwładności (d'Alemberta). Siły te, odniesione do jednostki masy, mają wymiar przyspieszenia.

2. Powierzchniowe, które mogą być normalne lub styczne do rozpatrywanych powierzchni. W zagadnieniach statyki znaczenie mają tylko siły normalne. Płyny mają znikomą zdolność do przenoszenia naprężeń rozciągających, stąd praktyczne znaczenie mają tylko siły ściskające. Siły powierzchniowe, odniesione do jednostki powierzchni, mają wymiar ciśnienia.

Przepływy płynów

Przez **gaz doskonały** rozumie się zbiór cząsteczek doskonale sprężystych, które można traktować jako punkty materialne, pomiędzy którymi nie występują żadne siły międzycząsteczkowe. Gazy doskonałe spełniają prawo Boyle'a-Mariotte'a, Gay-Lussaca, Cherlesa i Clapeyrona.

Ciecz doskonała jest pozbawiona lepkości, nieściśliwa i nie zmienia swej objętości wraz ze zmianą temperatury – ma stałą objętość. W cieczy doskonałej także nie ma oddziaływań międzycząsteczkowych.

W przyrodzie nie ma płynów doskonałych...

Przepływy płynów

Gęstość płynu jak wiadomo jest ilorazem masy i objętości płynu…

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

Gęstość cieczy jest stała w stałej temperaturze, gdyż ciecze są praktycznie nieściśliwe. Ściśliwość dla wody można zilustrować za pomocą zależności (należy uwzględniać dla procesów nieustalonych):

$$\frac{\Delta V}{V} = -5 \cdot 10^{-5} \frac{\Delta p}{p}$$

Przepływy płynów

Zależność gęstości od ciśnienia i temperatury

Dla gazów doskonałych

$$p\,V = n\,RT$$

$$p\,V = \frac{m}{M}\,RT$$

$$\boxed{\rho = \frac{p\,M}{RT}}$$

Dla gazów rzeczywistych

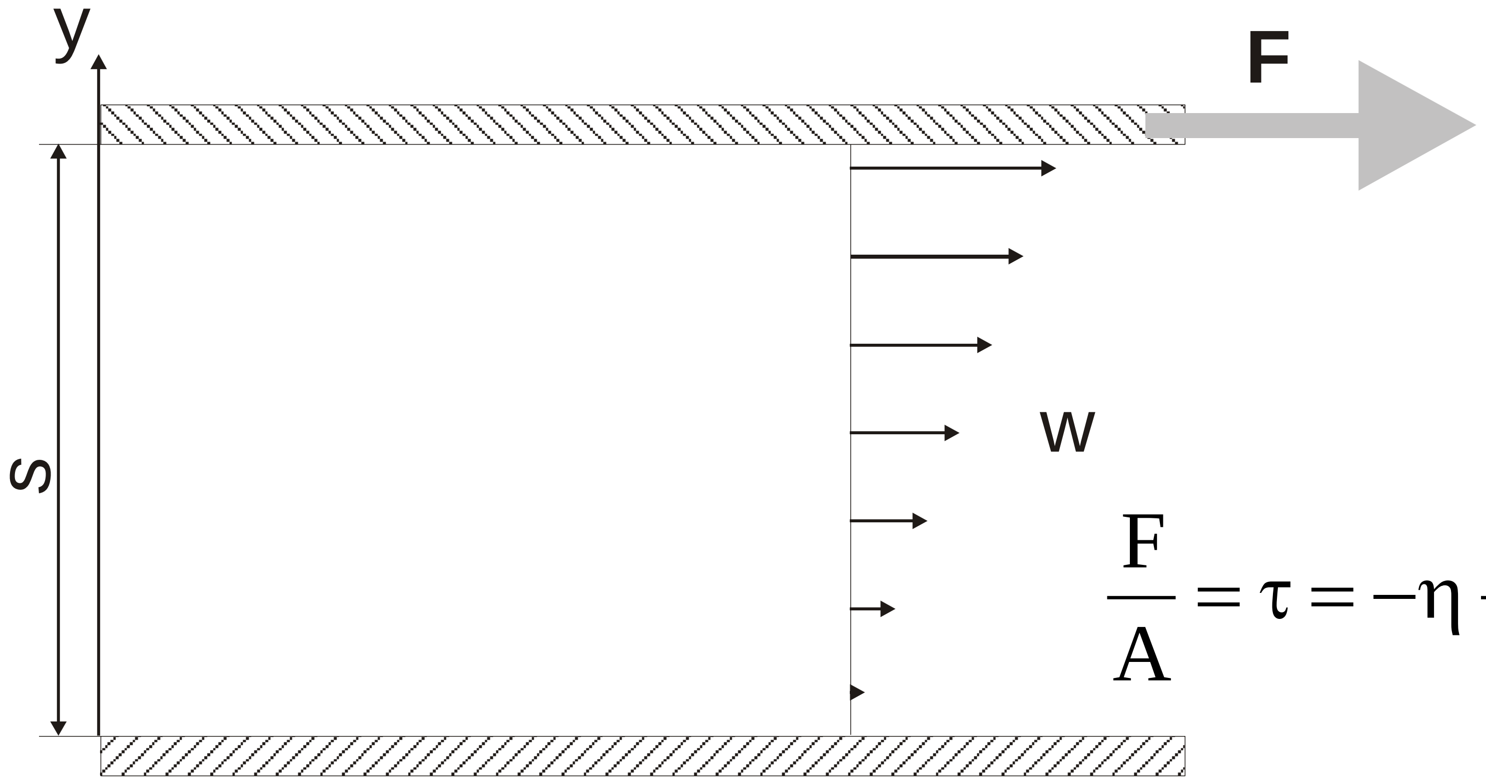
$$\rho = \frac{p\,M}{z\,RT}$$

z – współczynnik ściśliwości

Przepływy płynów

W przepływach cieczy rzeczywistych występują siły ścinające:

Doświadczenie Newtona



$$\frac{F}{A} = \tau = -\eta \frac{dw}{dy}$$

Nieruchoma powierzchnia

Przepływy płynów

Wymiar współczynnika lepkości dynamicznej wynika oczywiście z równania Newtona:

$$\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2} = [\eta] \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s\ m}}$$

$$[\eta] = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2}\mathrm{s} = \mathrm{Pa} \cdot \mathrm{s}$$

Wśród płynów „nienewtonowskich” czyli takich, które nie stosują się do prawa Newtona można wymienić galarety, pasty, farby olejne, szlamy, zawiesiny, kleje itp.

Średnia prędkość płynu

Przepływ płynu przez rurociąg może zaistnieć wtedy, gdy w rozpatrywanym wycinku rurociągu wystąpi gradient ciśnienia.

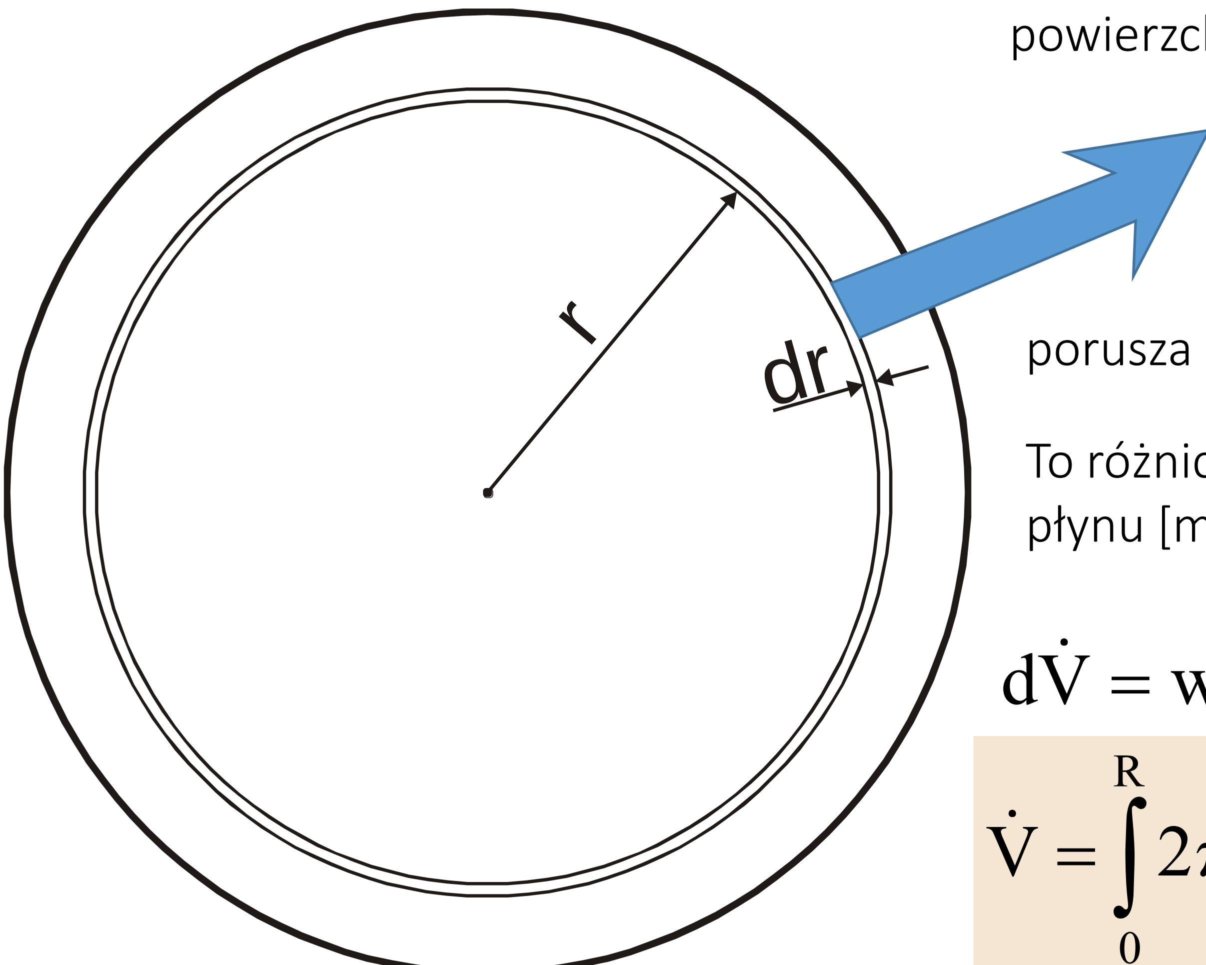
Można to powiedzieć inaczej: gradient ciśnienia $\Delta p > 0$

wywołuje ruch płynu $\dot{m} > 0$

(**strumień masy** płynu [kg/s] jest większy od zera).

Prędkość płynu w rurociągu nie jest stała, **największa jest w osi rury**, a **najmniejsza w pobliżu ścianki**.

Średnia prędkość płynu



Pierścień o grubości dr i polu powierzchni przekroju:

$$dA = 2\pi\, r\, dr$$

porusza się z prędkością w_r

To różniczkowy **strumień objętości** płynu [m^3/s]

$$d\dot{V} = w_r\, dA = 2\pi\, r\, w_r\, dr$$

$$\dot{V} = \int_0^R 2\pi\, r\, w_r\, dr$$

.

Średnia prędkość płynu

$$\dot{V} = \int_0^R 2\pi\, r\, w_r\, dr$$

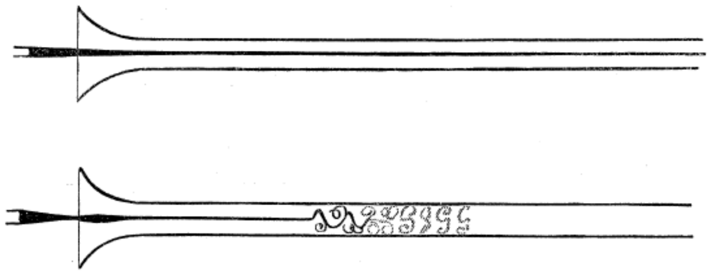
Prędkość średnia - stosunek całkowitego strumienia objętości do całego pola przekroju poprzecznego

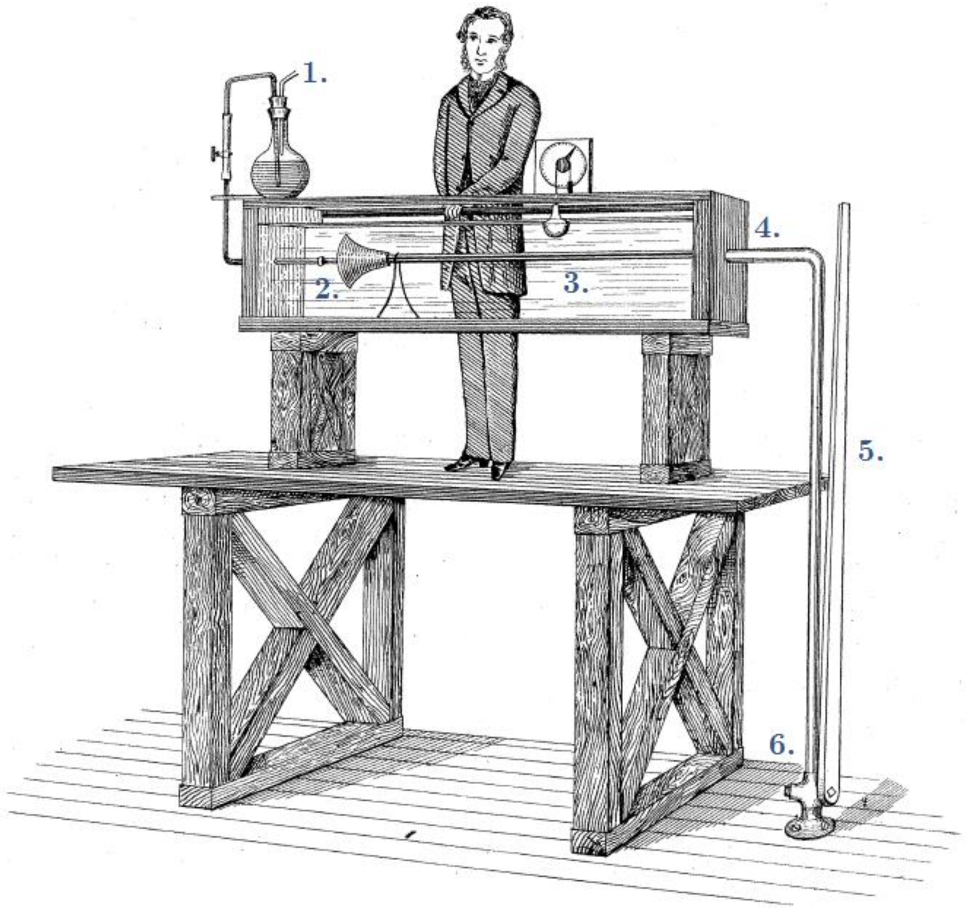
$$w_{śr} = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{1}{A}\int_0^R 2\pi\, r\, w_r\, dr$$

Aby obliczyć prędkość średnią płynu w rurociągu za pomocą powyższego wzoru należy poznać (zmierzyć) rozkład prędkości lokalnych wzdłuż całego przekroju poprzecznego lub mówiąc inaczej wyznaczyć funkcję

$$w = f(r)$$

Doświadczenie Reynoldsa



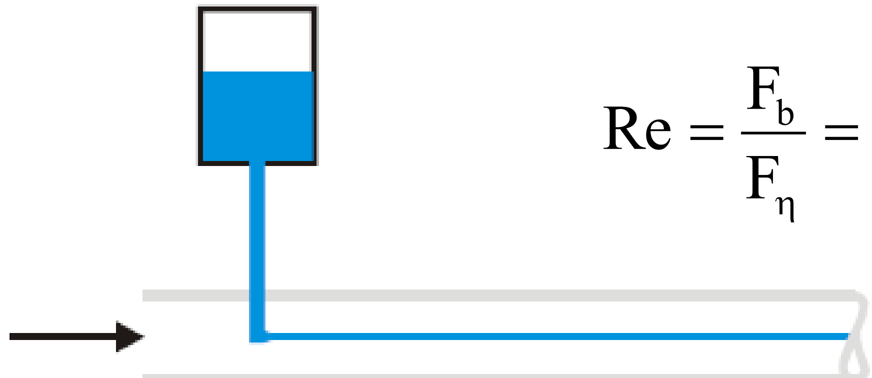


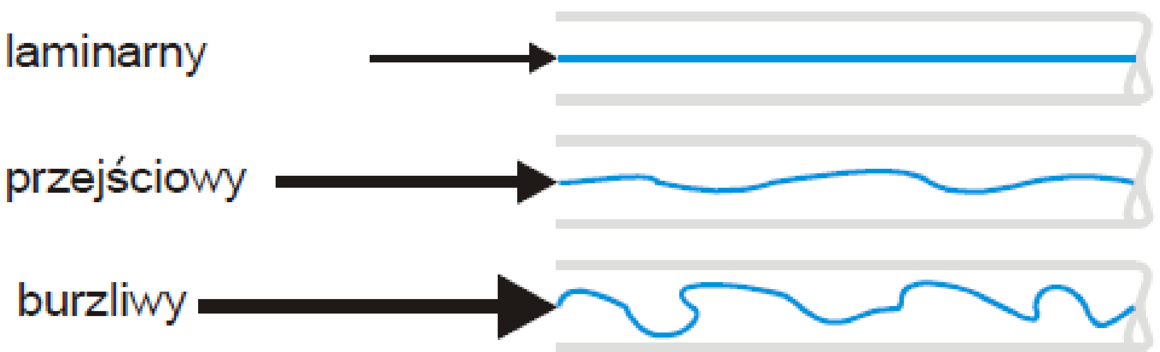
An Experimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinuous, and of the Law of Resistance in Parallel Channels

Rodzaje przepływów

Liczba Reynoldsa - dla rurociągu o przekroju kołowym można zapisać:

$$Re = \frac{F_b}{F_\eta} = \frac{d^2\ w^2\ \rho}{w\ d\ \eta} = \frac{w\ d\ \rho}{\eta}$$



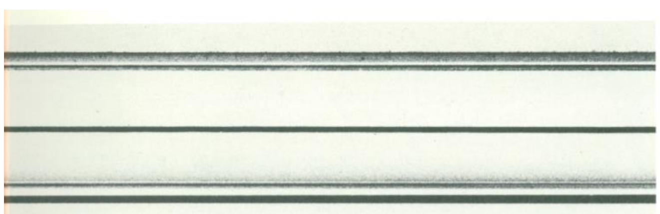


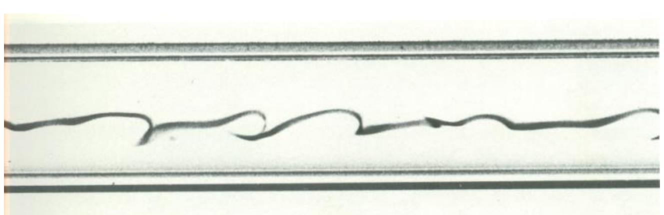
$$Re_{kr} = 2300$$

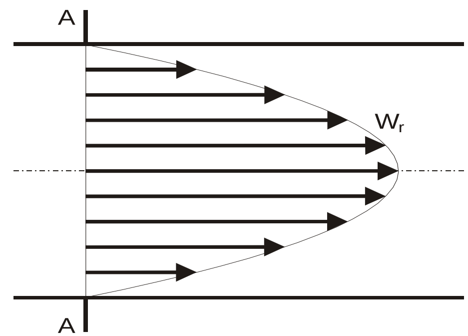
$$2300 \le Re \le 10000$$

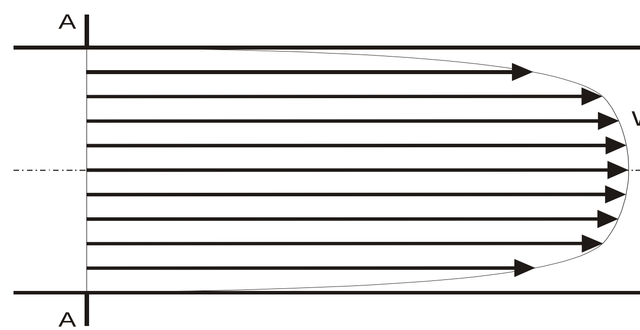
$$Re > 10000$$

Przepływy płynów









Przepływ laminarny

Rozpatrzmy **rozkład ciśnień i naprężeń ścinających** na pewnym elemencie cieczy w kształcie walca.

Aby nastąpił przepływ: $p1 \neq p2$

Równowaga **siły związanej z różnicą ciśnień** i hamującej siły będącej konsekwencją występowania **lepkości**.

$$\tau \, 2\pi \, r \, L = \left(p_1 - p_2\right) \pi \, r^2$$

Z prawa Newtona

$$-\eta \frac{dw_r}{dr} \, 2\pi \, r \, L = \left(p_1 - p_2\right) \pi \, r^2$$

$$\frac{dw_r}{dr} = -\frac{\left(p_1 - p_2\right)}{L \, \eta} \frac{r}{2}$$

Przepływ laminarny

Po scałkowaniu
$$\int_0^{w_r} dw_r = -\frac{(p_1 - p_2)}{L\,\eta}\int_R^r \frac{r}{2}\,dr$$

Prędkość lokalna
$$w_r = \frac{R^2}{4\eta}\frac{\Delta p}{L}\left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right]$$

Strumień objętości płynu
$$\dot{V} = \frac{\pi R^4}{8\,\eta}\frac{\Delta p}{L}$$
równanie Hagena-Poiseuille'a

Przepływ laminarny

Trzy ważne wielkości…

$$w_{śr} = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{R^2}{8\eta}\frac{\Delta p}{L}$$

Dla r=0

$$w_{max} = \frac{R^2}{4\eta}\frac{\Delta p}{L}$$

Dla r=R

$$w_R = 0$$

$$\frac{w_{śr}}{w_{max}} = 0,5 \qquad w_r = w_{max}\left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right]$$

Przepływy płynów

Równanie ciągłości przepływu – strumień masy wzdłuż rurociągu nie zmienia się:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$A_1 \, w_1 \, \rho_1 = A_2 \, w_2 \, \rho_2$$

Dla cieczy:

$$A_1 \, w_1 = A_2 \, w_2$$

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2$$

Wzdłuż rurociągu **strumień objętości cieczy** nie ulega zmianie

Równanie Bernoulliego

Jeżeli w pewnym przewodzie zmierzymy wartość **ciśnienia statycznego i dynamicznego w miejscu przewężenia**, jak i **w miejscu nie przewężonego przekroju**, otrzymamy zależność mówiącą, że **suma ciśnień statycznego i dynamicznego z jednego miejsca pomiaru** (np. z miejsca przewężenia), **będzie równa sumie ciśnień w miejscu nie przewężonym**.

Możemy wtedy napisać równanie:

$$\mathbf{p_{dynamiczne} + p_{statyczne} = p_{dynamiczne}' + p_{statyczne}' = const}$$

Oznacza to, że **energia ta nie zmienia się** i stanowi w obu przypadkach taką samą wartość.

Każdemu **zwiększeniu się prędkości**, a co za tym idzie **ciśnienia dynamicznego**, musi automatycznie towarzyszyć zmniejszenie się **ciśnienia statycznego** i na odwrót, przy każdym **zmniejszeniu prędkości i ciśnienia dynamicznego**, rośnie **ciśnienie statyczne**.

Równanie Bernoulliego

Jeśli w wybranej strudze płynu o **zmiennym przekroju** (zmiennej prędkości) i **zmiennej wysokości położenia** w polu sił grawitacyjnych sporządzi się **bilans energii**, to równanie Bernouliego ma postać:

Bilans energii
(energia jednostki masy płynu)

$$\frac{w^2}{2} + \frac{p}{\rho} + h\,g = \text{const}$$

$\frac{w^2}{2}$ energia kinetyczną płynu, [J/kg]

$\frac{p}{\rho}$ energia statyczna ciśnienia, [J/kg]

$h\,g$ energia potencjalna położenia, [J/kg]

Zatem równanie Bernoulliego stanowi **matematyczny zapis niezniszczalności energii** w ruchu ustalonym płynu doskonałego.

Równanie Bernoulliego

To samo równanie można zapisać w postaci sumy ciśnień i wówczas przybierze ono postać:

$$\frac{w^2 \rho}{2} + p + \rho g h = \text{const} \qquad [\text{Pa}]$$

$$\frac{w^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + h = \text{const} \qquad [\text{m}]$$

Ciśnienie statyczne $P_s = p + \rho gh$

Ciśnienie dynamiczne $P_d = ½w^2\rho$

P_s jest to ciśnienie wywierane prostopadle do kierunku przepływu, a P_d - równolegle

Równanie Bernoulliego

Równanie Bernoulliego jest specyficznym **zapisem twierdzenia o pracy i energii**, które mówią że:

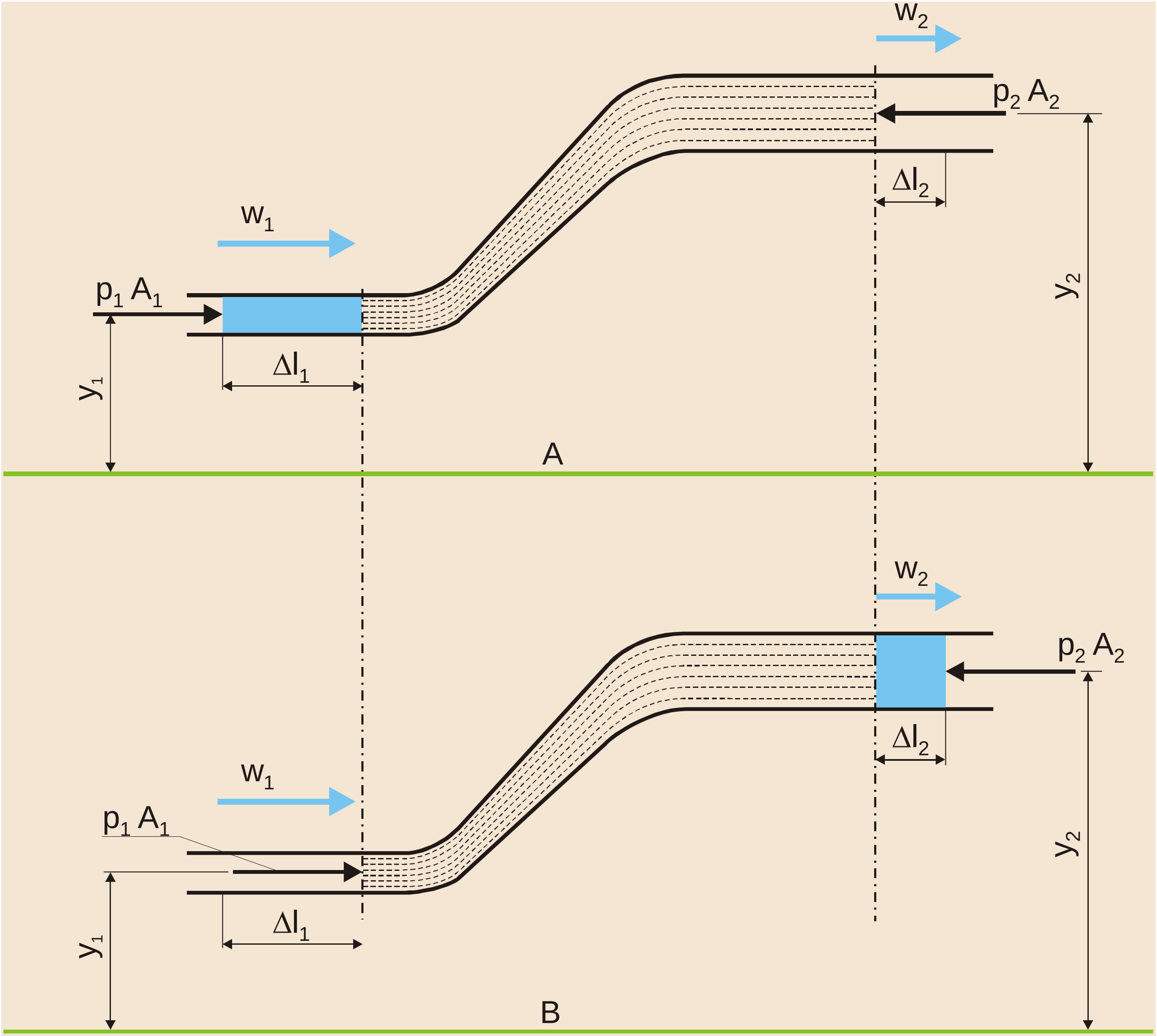
- połowę iloczynu masy ciała i kwadratu jego prędkości nazywa się **energią kinetyczną**,

- **praca** wykonana przez siłę działającą na punkt materialny **jest równa zmianie energii kinetycznej tego punktu.**

Energia jest stała dla elementu poruszającego się wzdłuż linii prądu (płyn nieściśliwy i nielepki).
W rozważanym przypadku zapewnia to **stacjonarność i bezwirowość przepływu**.
Istnienie **lepkości lub przepływu wirowego rozprasza energię**, **ściśliwość zmienia** zależność **energii od ciśnienia**.
Niestacjonarność przepływu wiąże się z **dodatkowym ciśnieniem rozpędzającym lub hamującym ciecz**.

Równanie Bernoulliego

Rozpatrujemy element o objętości $V=A_1\,\Delta l_1=A_2\,\Delta l_2$



Równanie Bernoulliego

Pracę wykonaną na układzie przez wypadkową siłę otrzymamy przez zsumowanie następujących składowych:

1. Praca wykonana nad układem przez siłę $p_1 \, A_1$ wynosi $p_1 \, A_1 \, \Delta l_1$

2. Praca wykonana nad układem przez siłę $p_2 \, A_2$ wynosi $p_2 \, A_2 \, \Delta l_2$

i jest to praca ujemna, czyli praca wykonana przez układ.

3. Praca wykonana nad układem przez siłę ciężkości związana ze zmianą położenia elementu o objętości V. Praca ta także jest ujemna (wykonana przeciwko sile ciężkości) i wynosi:

$$-V \rho g \left(y_2 - y_1\right) = -m \, g \left(y_2 - y_1\right)$$

Suma: $W = p_1 \, A_1 \, \Delta l_1 - p_2 \, A_2 \, \Delta l_2 - m \, g \left(y_2 - y_1\right)$

$$W = \left(p_1 - p_2\right) m/\rho - m \, g \left(y_2 - y_1\right)$$

Przy czym zmiana energii kinetycznej $\Delta E_k = \frac{1}{2} m \, w_2^2 - \frac{1}{2} m \, w_1^2$

Równanie Bernoulliego

Z twierdzenia o pracy i energii wiemy, że $W = \Delta E_k$

$$\left(p_1 - p_2\right) m / \rho - m\, g \left(y_2 - y_1\right) = \frac{1}{2} m\, w_2^2 - \frac{1}{2} m\, w_1^2$$

$$p_1 + \frac{1}{2} m\, w_1^2 + \rho\, g\, y_1 = p_2 + \frac{1}{2} m\, w_2^2 + \rho\, g\, y_2$$

Indeksy odnoszą się do dwóch dowolnych przekrojów, czyli…

$$p + \frac{1}{2} m\, w^2 + \rho\, g\, y = \mathrm{const}$$

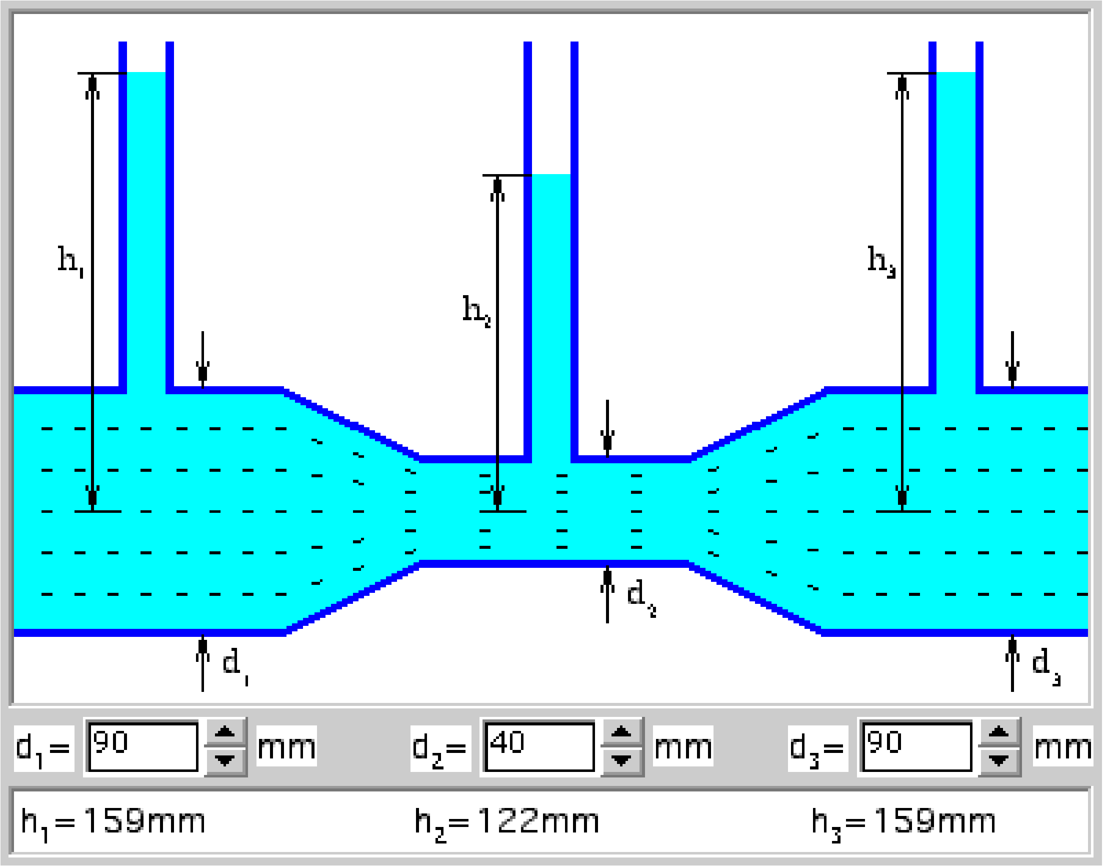
Równanie Bernoulliego

$p + \rho\, g\, y$ ciśnienie statyczne

$\frac{1}{2} m\, w^2$ ciśnienie dynamiczne

Równanie Bernoulliego - zastosowanie

Jeśli przez rurociąg o zmiennym przekroju płynie ciecz, to w przekroju mniejszym, wskutek wzrostu prędkości, maleje ciśnienie (różnica poziomu cieczy w rurkach spiętrzających)

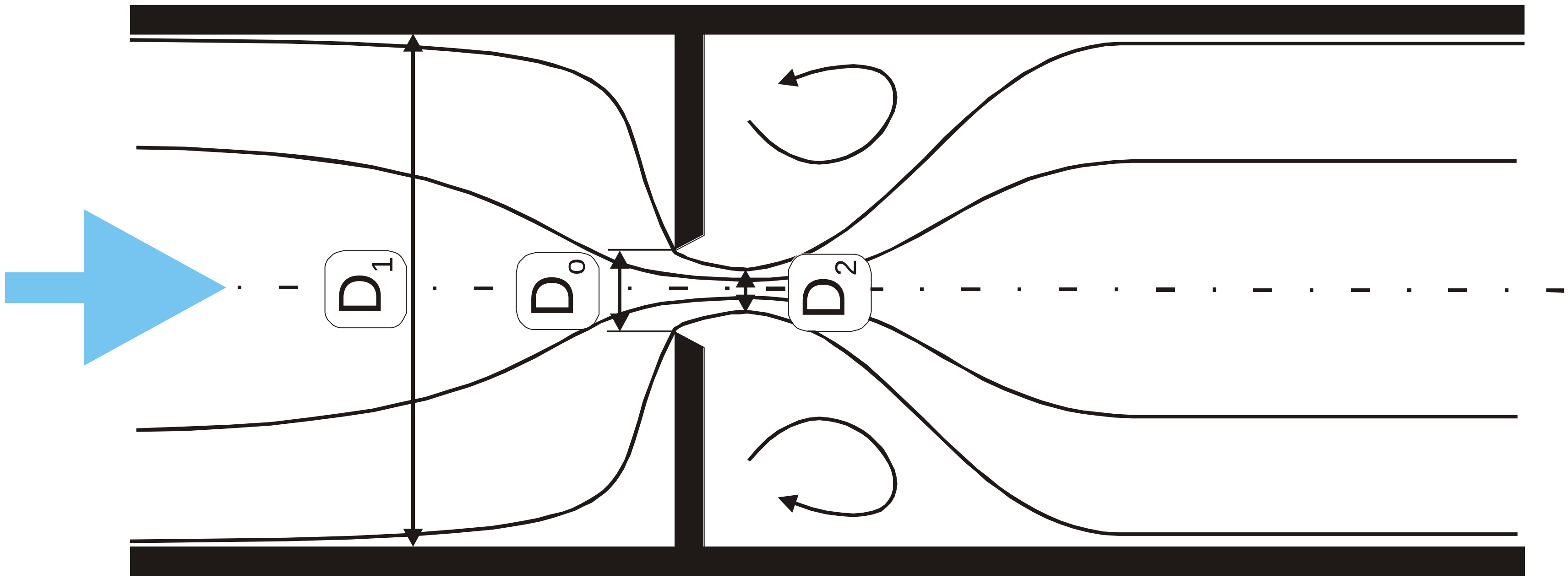


Równanie Bernoulliego - zastosowania

Pomiar średniej prędkości płynu za pomocą kryzy pomiarowej.



Równanie Bernoulliego - zastosowania



Równanie Bernoulliego dla płynu doskonałego dla przekrojów 1 i 2 można zapisać jako:

$$p_1 + \rho\, g\, h_1 + \frac{w_1^2\, \rho}{2} = p_2 + \rho\, g\, h_2 + \frac{w_2^2\, \rho}{2}$$

Równanie Bernoulliego - zastosowania

Rurociąg jest poziomy a gęstość cieczy stała, zatem:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}$$

A zgodnie z równaniem ciągłości przepływu:

$$w_1 = w_2 \frac{A_2}{A_1}$$

Współczynnik rozwarcia kryzy

Współczynnik kontrakcji

$$\frac{A_0}{A_1} = m \qquad \frac{A_2}{A_0} = \mu$$

Zatem równanie ciągłości:

$$w_1 = w_2 \, m \, \mu$$

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{w_2^2 - w_2^2 \, m^2 \, \mu^2}{2}$$

$$w_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2 \mu^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Równanie Bernoulliego - zastosowania

Prędkość cieczy w otworze kryzy $$w_0 = w_2 \frac{A_2}{A_0} = w_2 \mu$$

$$w_0 = \frac{\mu}{\sqrt{1 - m^2 \mu^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} = \alpha \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$$

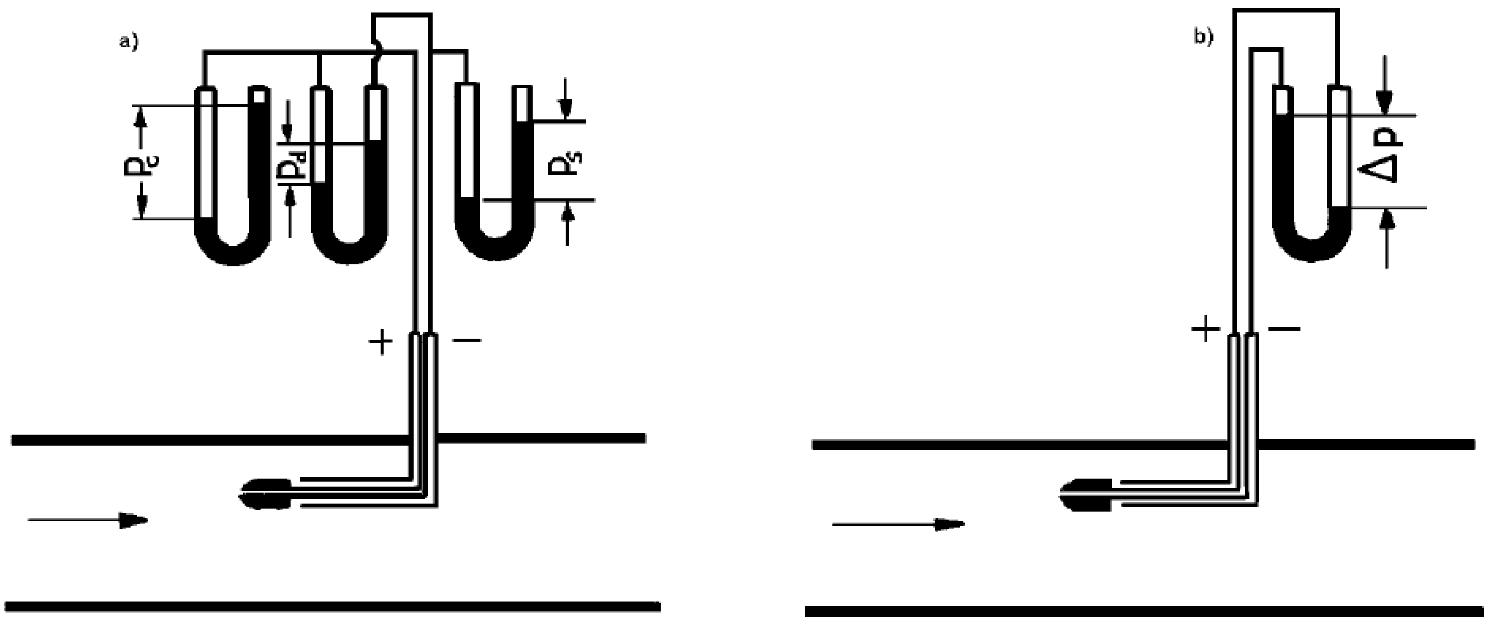
α - współczynnik przepływu

Strumień masy cieczy, który mierzy kryza pomiarowa, oblicza się zatem z zależności (znając doświadczalną wartość Δp):

$$\dot{m} = A_0 w_0 \rho = \alpha A_0 \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$$

Równanie Bernoulliego - zastosowania

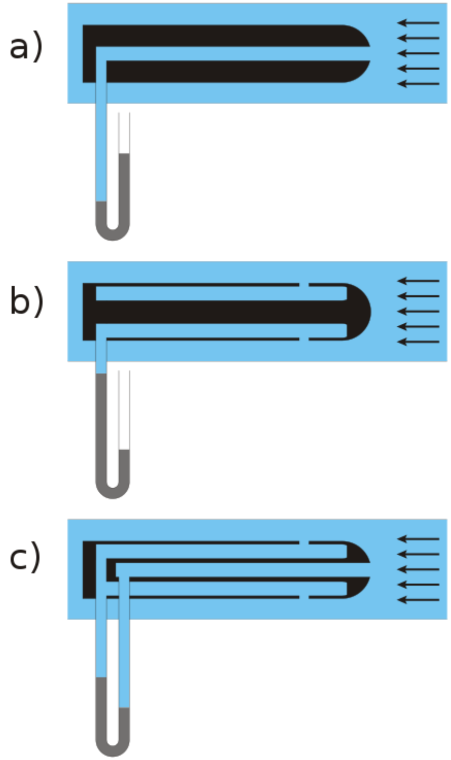
Rurka Pitota (Prandtla) - mierzy prędkość lokalną w rurociągu



a) Pomiar ciśnienia całkowitego, statycznego i dynamicznego, b) pomiar ciśnienia dynamicznego za pomocą rurki Prandla

$P_d = P_c - P_s = \Delta P$ gdzie: P_c - ciśnienie całkowite, Pa,

Równanie Bernoulliego - zastosowania

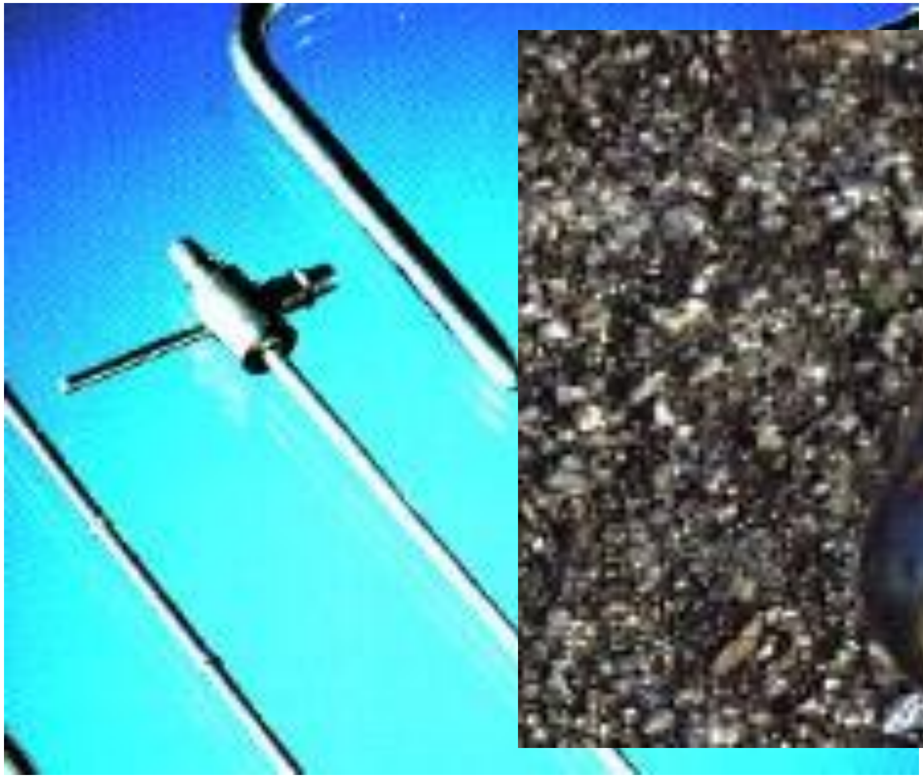


W polskim nazewnictwie **rurka Pitota** posiada tylko wlot powietrza na **ciśnienie całkowite**, a **ciśnienie statyczne** mierzy się oddzielnie, np. na bocznej ścianie rury, natomiast **rurka Prandtla posiada oba otwory** na swojej powierzchni.

W angielskiej literaturze nie istnieje to rozróżnienie, a stosuje się głównie **nazwę rurka Pitota**.

a) rurka Pitota
b) sonda mierząca ciśnienie statyczne
c) sonda Prandla

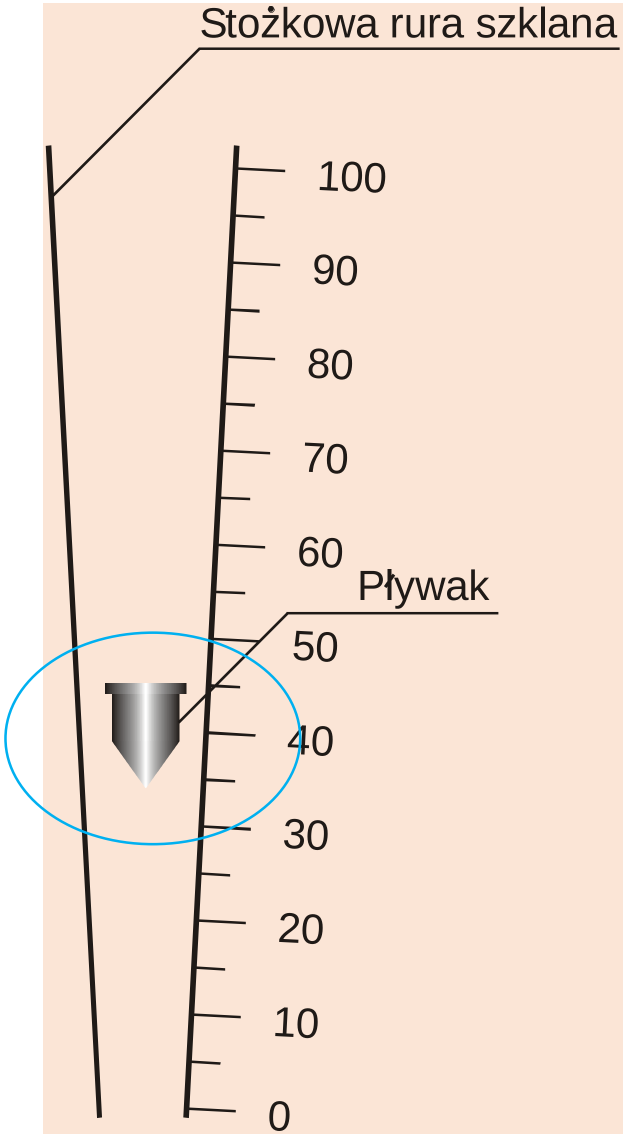
Równanie Bernoulliego - zastosowania



Równanie Bernoulliego - zastosowania

Rotametry

Równanie Bernoulliego - zastosowania



Na pływak o objętości V_p, o polu przekroju A_p i gęstości ρ_p działają siły:

Siła ciężkości $$G = V_p \, \rho_p \, g$$

Siła wyporu $$W = V_p \, \rho \, g$$

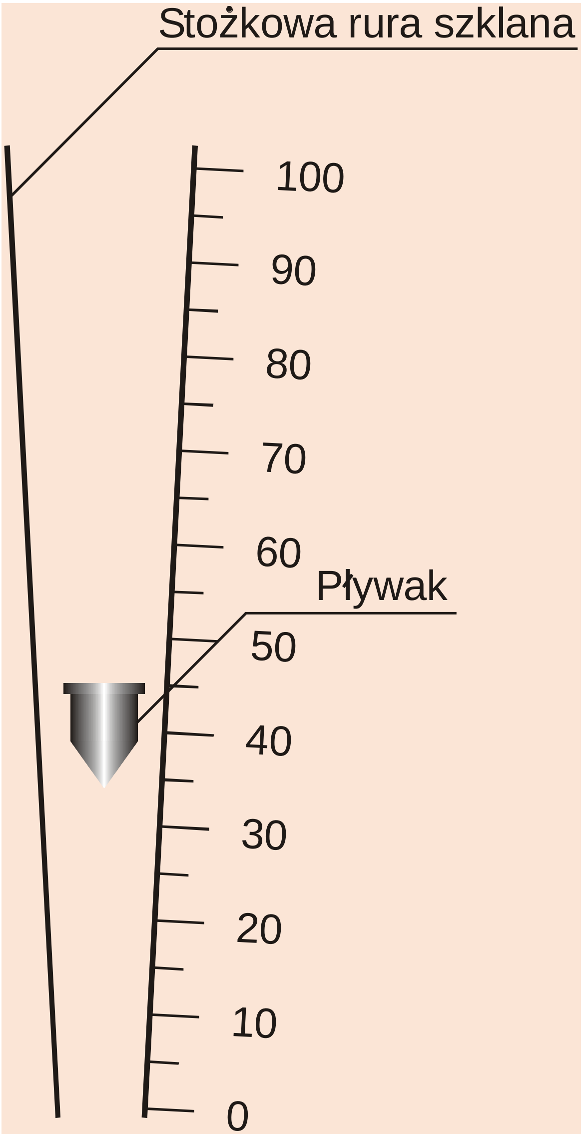
Siła oporu $$O = \xi \, A_p \, \frac{w_2^2 \, \rho}{2} = \xi \, A_p \, \frac{\dot{V}_2^2 \, \rho}{2 \, A_2^2}$$

Po zrównoważeniu sił pływak uniesie się na pewną wysokość w zależności od prędkości płynu w_2 i przekroju rury A_2 wokół największego przekroju pływaka.

Po zbilansowaniu sił:

$$\xi \, A_p \, \frac{\dot{V}_2^2 \, \rho}{2 \, A_2^2} = V_p \left(\rho_p - \rho\right) g$$

Równanie Bernoulliego - zastosowania



Stąd:

$$\dot{V}_2 = \sqrt{\frac{1}{\xi}\ \frac{2\,A_2^2 V_p\left(\rho_p - \rho\right)g}{A_p\ \rho}}$$

lub

$$\boxed{\dot{V}_2 = \alpha_p\ A_2\ \sqrt{\frac{2\,V_p\left(\rho_p - \rho\right)g}{A_p\ \rho}}}$$

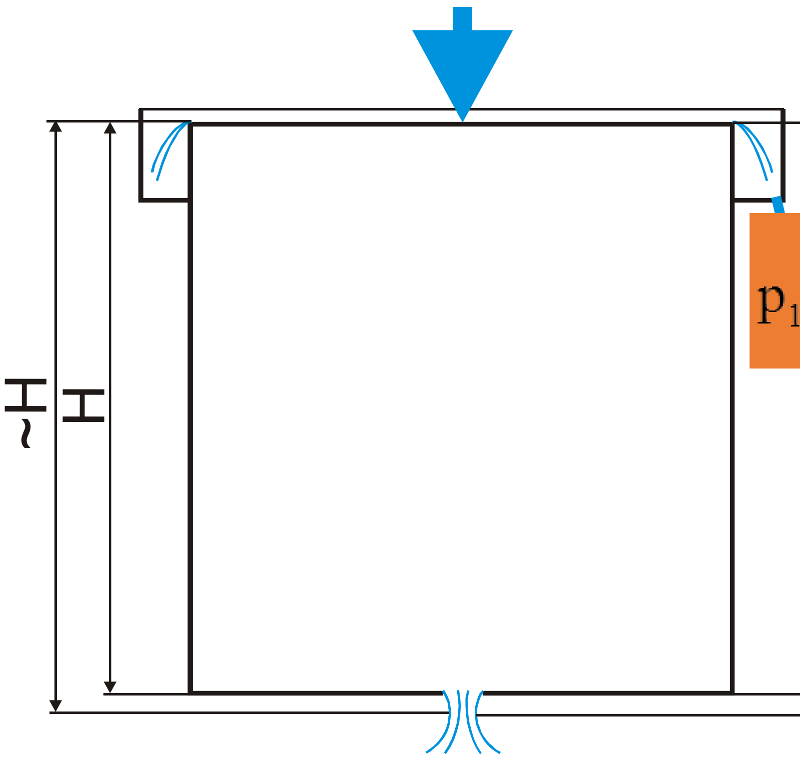
α_p – **współczynnik przepływu** – wielkość charakterystyczna dla pływaka i wyznacza się ja doświadczalnie.

Pole przekroju A_2, przy usytuowaniu pływaka na pewnej wysokości h (wynikające z geometrii stożkowej rury rotametru):

$$A_2 = \frac{\pi}{4}\left(D_0 + 2h\,\mathrm{tg}\frac{\varphi}{2}\right)^2 - A_p$$

Równanie Bernoulliego – zastosowania
płyny rzeczywiste

Wypływ cieczy ze zbiorników



$$p_1 + \rho\, g\, h_1 + \frac{w_1^2\, \rho}{2} = p_2 + \rho\, g\, h_2 + \frac{w_2^2\, \rho}{2} + \Delta p_{strat}$$

Przyjmując, że: $\Delta p_{strat} \approx 0$

oraz $h_1 - h_2 = H$

to $w_2 = \sqrt{2\, g\, H}$

Współczynnik kontrakcji

$$\frac{A_2}{A_0} = \mu \qquad \Delta p_{strat} \neq 0$$

Tak więc strumień objętości cieczy wypływającej z otworu:

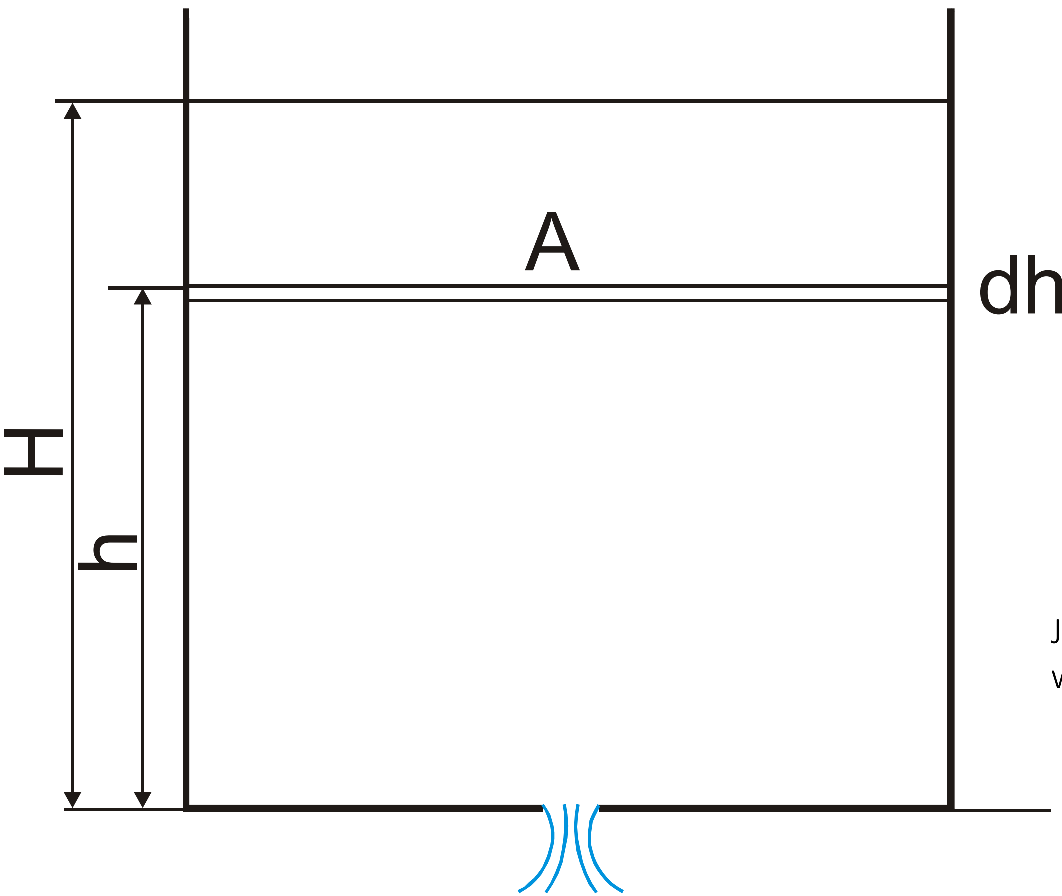
Współczynnik wypływu

$$\dot{V}_{rzecz} = \varphi\, A_0\, \sqrt{2\, g\, H}$$

Równanie Bernoulliego – zastosowania płyny rzeczywiste

$d\tau$ $\quad$ dh

Opróżnianie zbiorników



$$-A\,dh = A_0\, w_0\, d\tau$$

$$-A\,dh = A_0\, \varphi \sqrt{2\,g\,h}\,d\tau$$

Po rozdzieleniu zmiennych i scałkowaniu w granicach:

$$0 \rightarrow \tau \qquad H \rightarrow H = 0$$

$$\tau = \frac{1}{A_0\,\varphi\sqrt{2\,g}}\int_{H=0}^{H}\frac{A(h)}{\sqrt{h}}dh$$

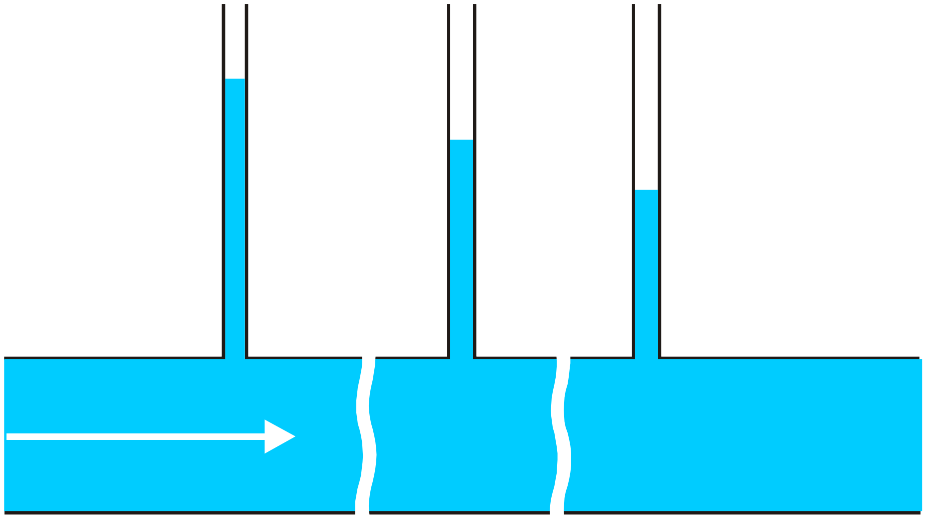
Jeśli pole powierzchni lustra cieczy jest stałe na każdej wysokości, to całkowity czas opróżniania zbiornika:

$0, A_0,$

$$\tau = \frac{A}{A_0}\,\frac{2}{\varphi\sqrt{2\,g}}\sqrt{H}$$

Równanie Bernoulliego – zastosowania
płyny rzeczywiste

Jeśli wykonać urządzenie pokazane na rysunku, to przy przepływie **cieczy rzeczywistej** obserwuje się **różny poziom cieczy w rurkach spiętrzających** wzdłuż drogi przepływu (wynik straty ciśnienia spowodowanej tarciem o ścianki rury).



równanie Bernouliego
dla cieczy rzeczywistej

$$p_1 + \rho\, g\, h_1 + \frac{w_1^2\, \rho}{2} = p_2 + \rho\, g\, h_2 + \frac{w_2^2\, \rho}{2} + \Delta p_{strat}$$

Równanie Bernoulliego – zastosowania
płyny rzeczywiste

Stratę ciśnienia na prostych odcinkach rurociągów oblicza się z **równania Darcy-Weisbacha**

$$\Delta p_{strat} = \lambda \frac{L}{d} \frac{w^2}{2} \rho$$

Współczynnik oporu przepływu (zależny od liczny Reynoldsa)

Rury o gładkiej powierzchni wewnętrznej

ruch laminarny

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

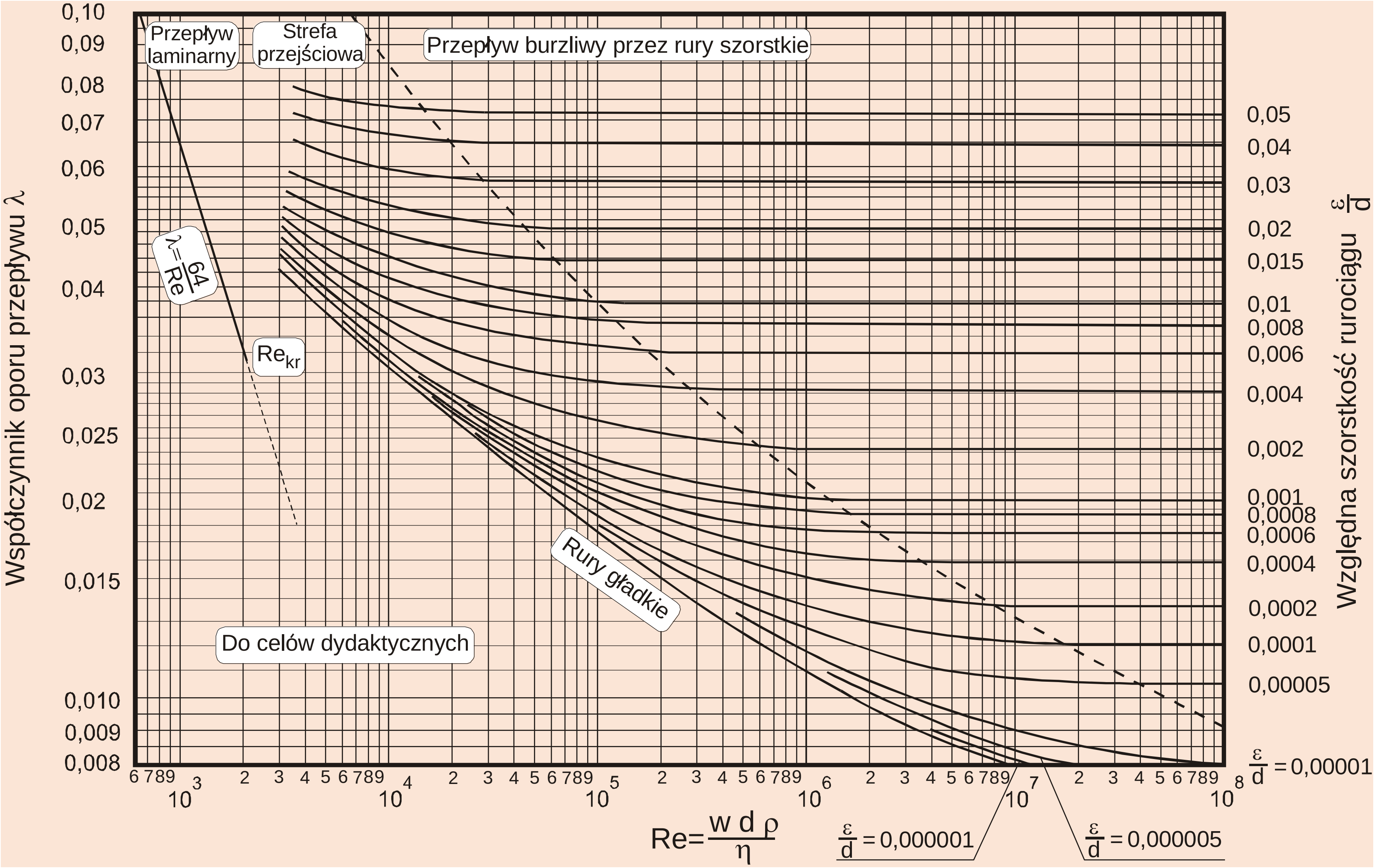
ruch burzliwy - wzór Blasiusa

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$$

Jeśli przepływ odbywa się w rurze o szorstkiej powierzchni wewnętrznej, powoduje to dodatkowy opór. Współczynnik oporu można wyliczyć np. z zależności graficznej…

Równanie Bernoulliego – zastosowania
płyny rzeczywiste

Rury o szorstkiej powierzchni wewnętrznej



Równanie Bernoulliego – zastosowania
płyny rzeczywiste

W przypadku zainstalowania elementów armatury, podczas przepływu płynu przez rurociąg występuje dodatkowa strata ciśnienia (na oporach miejscowych):

$$\Delta p_{\text{strat op m}} = \xi_{\text{op m}} \frac{w^2}{2} \rho$$

Każdy element armatury można zastąpić pewnym prostym odcinkiem rurociągu, który spowoduje taką samą stratę ciśnienia:

$$\Delta p_{\text{strat op m}} = \lambda \frac{L_z}{d} \frac{w^2}{2} \rho$$

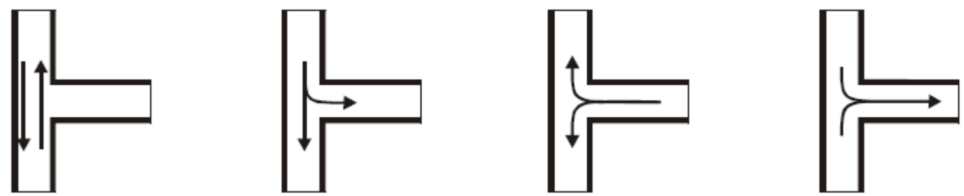
stąd

$$\lambda \frac{L_z}{d} = \xi_{\text{op m}}$$

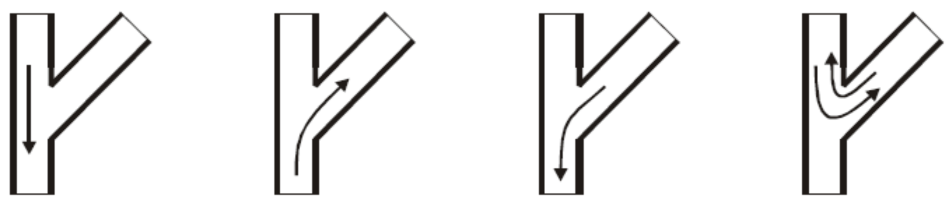
Zatem długość zastępczą obliczymy: $$L_z = \frac{\xi_{\text{op m}}\, d}{\lambda}$$

Równanie Bernoulliego – zastosowania
płyny rzeczywiste

Wartość współczynnika oporów miejscowych:

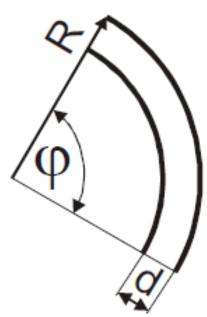


$\xi_{op\,m}=$ 0,1 2,0 1,5 3,0



$\xi_{op\,m}=$ 0,05 1,0 0,5 2,0

Łuk kołowy



$$\xi_{op\,m} = 0{,}131 + 0{,}163\frac{d^{3,5}}{R}\frac{\varphi}{90}$$

dla $R = 3\,d \quad \xi_{op\,m} = 0{,}14$

Równanie Bernoulliego – zastosowania płyny rzeczywiste

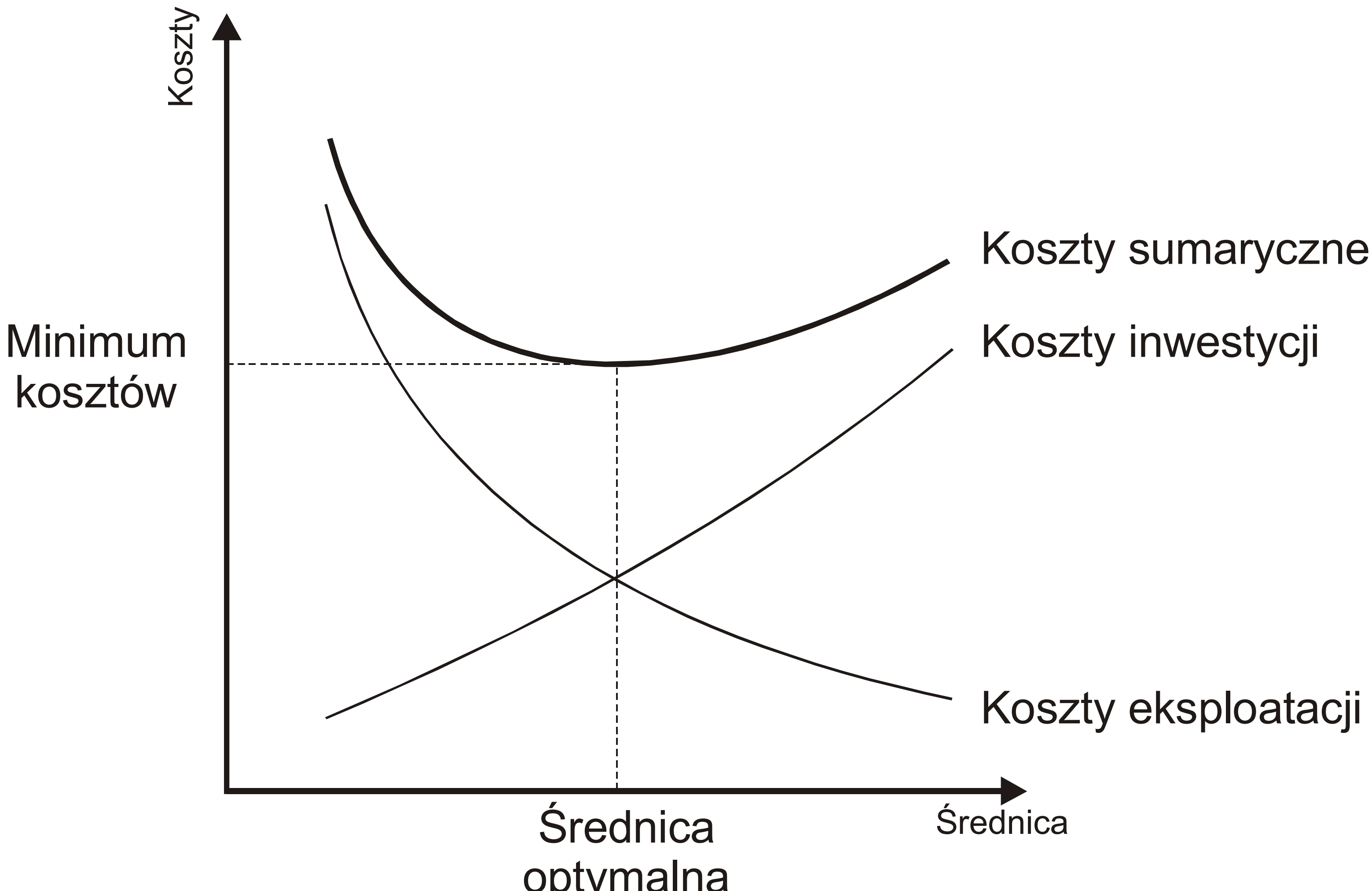
- wlot cieczy ze zbiornika do przewodu $\xi_{op\ m} = 0,5$
- wylot cieczy z przewodu do zbiornika $\xi_{op\ m} = 1$.

Rodzaj zaworu	Współczynnik oporu miejscowego $\xi_{op\ m}$	
	Stopień otwarcia 100 %	Stopień otwarcia 50 %
Kurki	0,05	18
Zawory normalne	3 – 4	10
Zasuwy	0,05	2 – 4

Zastępcze długości przewodów dla armatury kwasoodpornej L_z [m]

Średnica	Zawór odcinający	Zawór trójdrożny	Kolanko (łuk)	Trójnik
∅ 25	6	7	0,8	2
∅ 38	8	9	1	3
∅ 51	8	9	1	3
∅ 63,5	9	10	1	4
∅ 76	10	12	1,5	5
∅ 101,6	10	12	1,5	5

Równanie Bernoulliego – zastosowania
Projektowanie rurociągów dalekobieżnych



Równanie Bernoulliego – zastosowania
Projektowanie rurociągów dalekobieżnych

Przekształcając równanie Darcy-Weissbacha otrzymujemy zależność, z której możemy wyliczyć strumień objętości cieczy:

$$\Delta p_{str} = p_{pocz} - p_k = \lambda \frac{L}{d} \frac{w^2 \rho}{2} = \lambda \frac{L}{d} \frac{\frac{16 \dot{V}^2}{\pi^2 d^4} \rho}{2} = 8 \lambda \frac{L \dot{V}^2 \rho}{\pi^2 d^5}$$

$$\dot{V} = \frac{\pi d^{5/2}}{2 \sqrt{2}} \sqrt{\frac{p_{pocz} - p_k}{\lambda L \rho}}$$

Strumień objętości cieczy przesyłanej rurociągiem o zadanej średnicy d przy zadanym nadciśnieniu na wlocie rurociągu.

Równanie Bernoulliego – zastosowania
Projektowanie rurociągów dalekobieżnych

W praktyce przemysłowej **przeciętne prędkości różnych płynów różnią się między sobą**, co wynika z różnych właściwości i oporów przepływu, które powodują.

Średnie prędkości płynów stosowane w rurociągach przemysłowych:

Ciecze newtonowskie	1 – 3 m/s
Ciecze lepkie	0,3 –2 m/s
Gazy	8 – 25 m/s
Para wodna nasycona	20 – 40 m/s
Para wodna przegrzana	30 – 50 m/s

Są to wartości orientacyjne, a dokładne wartości należy poprzeć analizą ekonomiczną związaną z budową i eksploatacją rurociągu, o czym wspomniano powyżej.