

WYZNACZENIE STRAT ENERGII W PRZEPŁYWIE PŁYNU RZECZYWISTEGO.

1. Wprowadzenie.

W czasie przepływu płynu rzeczywistego przez układy hydrauliczne lub pneumatyczne następuje strata energii płynu. Straty te dzielimy na liniowe i miejscowe. Straty liniowe wywołane są siłami tarcia pomiędzy elementami płynu w całej jego masie oraz siłami tarcia o ścianki kanału przepływowego na całej jego długości. Straty miejscowe pochodzą natomiast od lokalnych przeszkód występujących w przepływie (np. kryzy, zawory, kolana itp.) lub spowodowane są gwałtowną zmianą kształtu kanału lub wielkością pola jego przekroju oraz kierunku prędkości przepływającej strugi. Straty te powodują duże koszty eksploatacyjne i stąd wynika potrzeba minimalizowania ich w instalacjach. Aby przetransportować płyn przez instalację, odpowiednia maszyna musi wytworzyć przyrost ciśnienia równoważny stratom. Choć w wielu przypadkach (zwłaszcza w długich instalacjach) straty miejscowe są o rząd wielkości mniejsze od strat liniowych, przez co są często pomijane to w krótkich instalacjach mają jednak one znaczący wpływ na sumaryczną ich wielkość.

W trakcie przepływu płynu przez przewody, na skutek działania sił tarcia następuje nieodwracalna przemiana energii mechanicznej w ciepło. Strumień energii maleje w stronę wzrostu prędkości przepływu. Zjawisko przepływu ze stratami opisuje równanie Bernoulliego. Określa ono bilans energii mechanicznej dla dwóch przekrojów przewodu i wyraża prawo niezniszczalności energii. Można je przedstawić w ujęciu masowym, objętościowym i ciężarowym:

a) masowe;

$$\frac{c_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho_1} + gz_1 = \frac{c_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho_2} + gz_2 + \Delta e_{str\ 1-2} \quad (1)$$

gdzie: c_1^2 - prędkość średnia w przekroju 1, p_1 - ciśnienie w przekroju 1,
 z_1 - wysokość położenia przekroju 1,

ρ_1 - gęstość płynu, $\Delta e_{str\ 1-2}$ - energia stracona pomiędzy przekrojami 1 i 2

g - przyspieszenie ziemskie,

„ 2 ” - przekrój 2

b) objętościowe:

$$\rho_1 \frac{c_1^2}{2} + p_1 + \rho_1 g z_1 = \rho_2 \frac{c_2^2}{2} + p_2 + \rho_2 g z_2 + \Delta p_{str1-2} \quad (1)$$

gdzie: Δp_{str1-2} - ciśnienie stracone między przekrojami 1 i 2

c) ciężarowe :

$$\frac{c_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho_1 g} + z_1 = \frac{c_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho_2 g} + z_2 + \Delta h_{str1-2} \quad (1)$$

gdzie: Δh_{str1-2} - wysokość ciśnienia stracona między przekrojami 1 i 2

W powyższych równaniach (o czym należy pamiętać) występują wartości ciśnienia absolutnego. Można w nich jednak posługiwać się wartościami ciśnień manometrycznych p_m (manometry mierzą ciśnienia względne przez porównanie do ciśnienia otoczenia) czyli nadciśnieniem lub podciśnieniem, gdyż ciśnienie barometryczne w przekrojach 1 i 2 się zredukuje a ciśnienie absolutne wtedy wyniesie:

$$p = p_b \pm p_m$$

Znak plus odpowiada nadciśnieniom, a minus – podciśnieniom

Ostatnie człony w poszczególnych ujęciach równań Bernoulliego stanowią straty energii mechanicznej (zamienianej na energię cieplną)

Bilans całkowitej energii mechanicznej w przekrojach 1 i 2 ma postać :

$$E_1 = E_2 + \Delta E_{str1-2}$$

$$gdzie : \quad E_1 = m e_1 \quad ; \quad \Delta E_{str1-2} = m \Delta e_{str1-2}$$

2. Straty miejscowe.

Straty miejscowe powstają na skutek zakłócenia strugi z powodu zmiany kształtu lub wielkości pola przekroju poprzecznego przewodu, zmiany kierunku przepływu lub wbudowania w przewód urządzeń dławiących przepływ (zawory ,zasuwy itp.). Strata ciśnienia w przeszkodzie miejscowej zależy od rodzaju, kształtu i wymiarów geometrycznych przeszkody oraz od wielkości określających przepływ . Szczególnym przypadkiem są straty występujące przy wyjściu płynu ze zbiornika o znacznie

większym przekroju do przewodu o przekroju mniejszym. Wysokość spadku ciśnienia na przeszkodach lokalnych określamy wzorem :

$$\Delta h_{\zeta} = \zeta \frac{c^2}{2g} \quad (2)$$

gdzie ζ - jest doświadczalnie wyznaczonym współczynnikiem straty miejscowej i dla danego elementu zależy od liczby Reynoldsa. Wartości ζ podano w tablicach [2] dla przepływów o $Re > 10^6$ wartość jego jest stała.

Jeżeli w miejscu stanowiącym źródło straty, następuje zmiana średniej prędkości przepływu w rurociągu, to współczynnik straty powinien być ściśle określony do której prędkości za , czy przed przeszkodą jest odniesiony. Wartość współczynnika ζ zazwyczaj jest wyznaczana eksperymentalnie i dla danego elementu zostały ztabelaryzowane. Jedynie w nielicznych, prostych przypadkach udało się opracować wzór analityczny (PN-76/M-34034). Źródłem strat miejscowych jest oczywiście lepkość, dlatego wartość współczynników ζ zależy od liczby Reynoldsa.

- w zakresie przepływu laminarnego, współczynnik ζ maleje ze wzrostem Re
- w zakresie przejściowym ζ może maleć lub rosnać, w zależności od kształtu przeszkody
- w zakresie przepływu turbulentnego, dla dostatecznie dużych liczb Reynoldsa, $Re > 10^6$, współczynnik ζ ma wartość stałą.

Aby obliczyć wartość straty miejscowej na danej przeszkodzie (np. kolano, zawór, przepustnica, zasuwa, itp.) należy z odpowiedniej tabeli odczytać właściwą wartość współczynnika lub wyliczyć ją ze wzoru (podawane w literaturze np. dla nagłego rozszerzenia, zwężenia, konfuzora, dyfuzora itp.) a następnie obliczyć wysokość straty na tym elemencie wg. wzoru (2).

3. Straty liniowe (tarcia).

Straty liniowe w rurociągu opisuje się równaniem Darcy' ego – Weisbacha:

$$\Delta h_{\lambda} = \lambda \frac{l}{d} \frac{c^2}{2g}, \quad (3)$$

gdzie: l, d - długość i średnica rozważanego odcinka rurociągu

c – prędkość przepływu czynnika

λ - współczynnik strat tarcia

Ogólnie współczynniki strat w kanale zależą od jego geometrii oraz od liczby Reynoldsa. Ponieważ stosunek l/d określa podobieństwo geometryczne wszystkich rurociągów, zatem współczynnik λ będzie funkcją tylko liczby Reynoldsa oraz

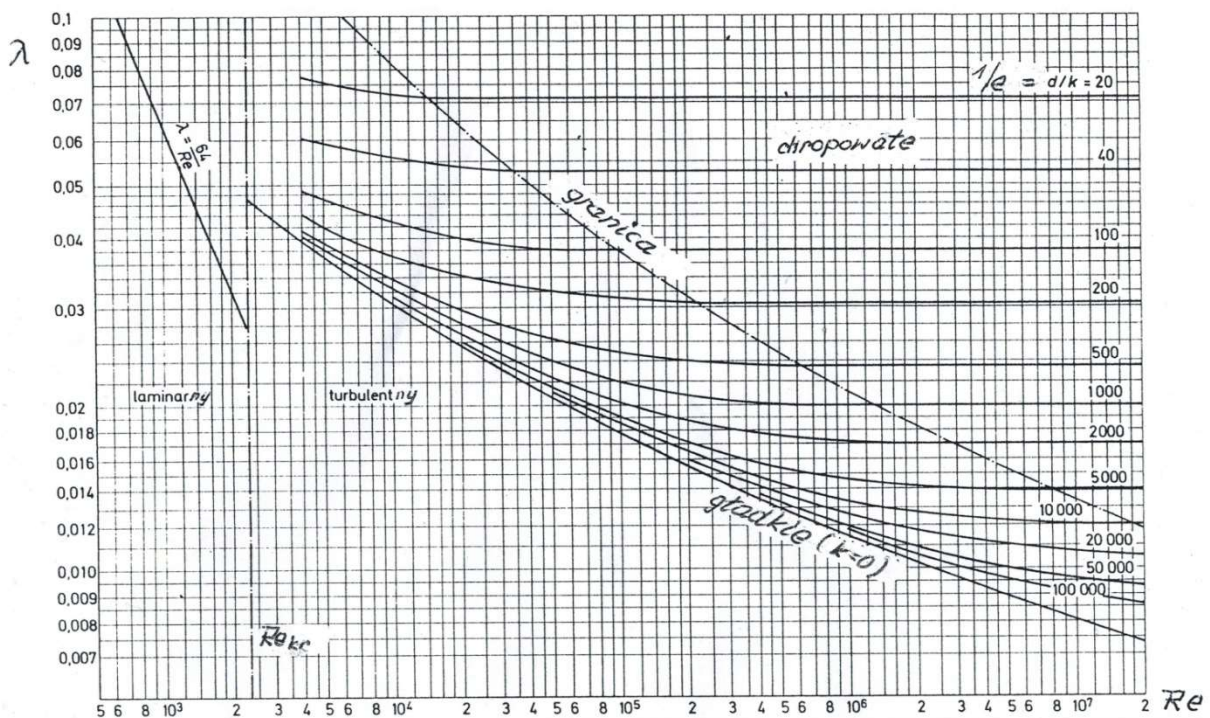
chropowatości względnej ścianek, definiowanej jako stosunek wysokości lokalnych nierówności k do średnicy rurociągu d . Badania Nikuradsego dowiodły niezależności współczynnika λ od chropowatości dla przepływów **laminarnych**. Mówi o tym prawo Hagen'a i Poiseuille'a, dla rur gładkich i chropowatych wynosi :

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (4)$$

Natomiast dla przepływu **turbulentnego** λ określa się doświadczalnie a dobrą zgodność z doświadczeniem dla rur gładkich daje wzór Blasiusa:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (5)$$

Na wartość współczynnika λ decydujący wpływ ma liczba Reynoldsa oraz stosunek k/d (wysokość nierówności do średnicy - szorstkość). Płyne z tego wniosek , że ścianki rurociągów powinny być możliwie jak najbardziej gładkie, tak aby przebiegi współczynnika strat były podobne jak w przypadku rur hydraulicznie gładkich. Istnieje bardzo wiele formuł półempirycznych, opartych na przybliżonych teoriach ruchu turbulentnego oraz na wynikach doświadczeń określających $\lambda (Re, k/d)$, jednak podczas korzystania z nich należy przeprowadzić krytyczną analizę podobieństwa warunków przepływu dla konkretnego przypadku.



Rys. 3. Wykres Nikuradsego. Zależność współczynnika tarcia od liczby Reynoldsa $\lambda = f(Re)$.

| Materiał | Chropowatość bezwzględna k [m] |
|-------------------|---------------------------------------|
| Tworzywo sztuczne | 0,000 002 – 7 |
| Stal nowa | 2 – 15 · 10 ⁻⁵ |
| Stal ocynkowana | 2 – 15 · 10 ⁻⁵ |
| Kanał z blachy | 15 · 10 ⁻⁵ |
| Beton | 3 – 30 · 10 ⁻⁴ |
| Kanał murowany | 3 – 5 · 10 ⁻³ |

Producenci często podają stratę ciśnienia na 1m długości rurociągu o danej średnicy w postaci wykresów

Zgodnie z zasadą superpozycji, łączna wartość wysokości strat hydraulicznych w instalacji jest traktowana jako suma strat tarcia i strat miejscowych na poszczególnych odcinkach rurociągu z pominięciem wzajemnego oddziaływania, co można zapisać równaniem:

$$\Delta h_{s\ 1-2} = \left(\lambda \frac{c^2}{2g} \frac{l}{d} + \zeta \frac{c^2}{2g} \right) \quad (6)$$

Ujęte tym wzorem zagadnienie strat upraszcza obliczenia bez poważniejszych błędów, mające znaczenie praktyczne.

WYKONANIE ĆWICZENIA

1. Cel ćwiczenia.

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z rodzajami strat ciśnienia , występującymi w czasie przepływu przez rurociąg zbudowany z różnego rodzaju kształtek i odcinków prostoliniowych oraz sposobem ich wyznaczenia. Straty wyznaczone na stanowisku laboratoryjnym zostaną porównane z obliczeniami analitycznymi przeprowadzonymi zgodnie z PN -76/M 34034.

h_i - wysokość nadciśnienia lub podciśnienia statycznego w rurociągu [mm_{alk}]

p_i - podciśnienie lub nadciśnienie w danym przekroju w [Pa]

$$p_i = h_i \rho_{alk} g$$

3.2 Obliczenie strumienia objętości \dot{V}

Na stanowisku zamontowana jest zwężka pomiarowa (kryza), więc korzystamy ze wzoru zwężkowego:

$$\dot{V} = \frac{c}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \frac{\pi d^2}{4} \frac{\sqrt{2\Delta p}}{\rho}$$

Po uproszczeniu otrzymujemy :

$$\dot{V} = 0,01208 \cdot \sqrt{\Delta h}$$

3.3 Obliczenie prędkości przepływu strumienia w przekrojach ($d = 100$ i $d = 180$ mm)

$$\dot{V} = c \cdot F \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad \rightarrow \quad c = \frac{\dot{V}}{F} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$c_{100} = \frac{0.01208\sqrt{\Delta h}}{F_1} \quad ; \quad c_{180} = \frac{0.01208\sqrt{\Delta h}}{F_2}$$

4. Obliczenie zmierzonych strat ciśnienia (energii) na podstawie danych w tabeli pomiarowej.

4.1 Strata na nagłym rozszerzeniu (1-3) (NR)

$$\frac{c_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{c_3^2}{2g} + \frac{p_3}{\rho g} + \Delta h_{NR} \quad \Rightarrow \quad \Delta h_{NR} = \frac{c_1^2 - c_3^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_3}{\rho g}$$

$$p_1 = \rho_{alk}gh_1 ; \quad p_3 = \rho_{alk}gh_3 ; \quad \Delta p_{NR} = \rho_{pow}g\Delta h_{NR}$$

4.2 Strata na konfuzorze (3 - 6) (KN)

$$\frac{c_3^2}{2g} + \frac{p_3}{\rho g} = \frac{c_6^2}{2g} + \frac{p_6}{\rho g} + \Delta h_{KN} \quad \Rightarrow \quad \Delta h_{KN} = \frac{c_3^2 - c_6^2}{2g} + \frac{p_3}{\rho g} - \frac{p_6}{\rho g}$$

$$\Delta p_{KN} = \rho_{pow}g\Delta h_{KN}$$

4.3 Strata na kryzie (6A - 11) (KR)

$$\Delta p_{KR} = p_{6A} - p_{11} \quad [Pa]$$

$$\Delta p_{KR} = \rho_{alk}g(h_{6A} - h_{11}) \quad [Pa]$$

4.4 Sumaryczne straty ciśnienia w rurociągu

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{NR} + \Delta p_{KN} + \Delta p_{KR} + \Delta p_{TR}$$

Straty te możemy również obliczyć rozpatrując przekrój 1 oraz przekrój 15 i korzystając z powyższego równania obliczymy wartość strat tarcia (pkt. 4.5).

$$\frac{c_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{c_{15}^2}{2g} + \frac{p_{15}}{\rho g} + \Delta h_{\Sigma} \quad \Rightarrow \quad \Delta h_{\Sigma} = \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_{15}}{\rho g}$$

$$\Delta p_{\Sigma} = \rho_{alk}gh_1 \quad [Pa]$$

4.5 Strata spowodowana tarciami (TR)

$$\Delta p_{TR} = \Delta p_{\Sigma} - (\Delta p_{NR} + \Delta p_K + \Delta p_{KR}) \quad [Pa]$$

5. Obliczenie strat ciśnienia wg. PN-76/M- 34034 oraz PN-EN ISO 5167-1

5.1 Strata ciśnienia na nagłym rozszerzeniu (1-2) PN. - str. 16

$$\Delta p_{NR} = \zeta \rho_{pow} \frac{c_{100}^2}{2}$$

wg. PN dla nagłego rozszerzenia $\rightarrow \zeta = \left(1 - \frac{d_1^2}{D_2^2}\right)^2 = 0,48$

$$\Delta p_{NR} = 0,48 \rho_{pow} \frac{c_{100}^2}{2}$$

5.2 Określenie straty tarcia wg. PN-76/M-34034.

5.2.1 Określenie współczynnika strat liniowych λ .

Aby określić współczynnik λ , należy dla danej średnicy obliczyć liczbę Reynoldsa i wyznaczyć wartość chropowatości względnej a następnie odczytać wartość współczynnika z wykresu zamieszczonego powyżej rys.3.

$$Re = \frac{c \cdot d}{\nu}$$

c – prędkość przepływu czynnika [m/s] d – średnica przewodu (rury) [m]
 ν – kinematyczny współczynnik lepkości [S/m^2]

$$Re_{100} = \frac{c_{100} \cdot d_{100}}{\nu}$$

$$Re_{180} = \frac{c_{180} \cdot d_{180}}{\nu}$$

Dla obliczonych wartości liczby Reynoldsa oraz określonej wartości e (wsp. chropowatości względnej) odczytujemy z wykresu odpowiednie wielkości λ_{100} oraz λ_{180} .

Strata tarcia więc wyniesie

$$\Delta p_{TR_{100}} = \lambda_{100} \cdot \frac{l_{100}}{d_{100}} \cdot \frac{c_{100}^2}{2} \rho_{pow} [Pa] \quad \Delta p_{TR_{180}} = \lambda_{180} \cdot \frac{l_{180}}{d_{180}} \cdot \frac{c_{180}^2}{2} \cdot \rho_{pow}$$

$$\Delta p_{TR} = \Delta p_{TR_{100}} + \Delta p_{TR_{180}}$$

5.3 Strata ciśnienia na konfuzorze wg. PN – str. 14, poz 6

$$\Delta p_{KN} = \zeta \rho_{pow} \frac{c_{180}^2}{2}$$

wg PN dla konfuzora $\rightarrow \zeta = \frac{\lambda l_{KN}}{4 d} \left(1 + \frac{D}{d} + \frac{D^2}{d^2} + \frac{D^3}{d^3} \right)$

$\lambda = 0.024$ – współczynnik tarcia, odczytany z wykresu (str.9 PN) dla liczby Re obliczonej dla mniejszej prędkości w konfuzorze,

$l_{KN} = 500$ mm – długość konfuzora,

$$\zeta = \frac{0,024 \cdot 500}{4 \cdot 100} \left(1 + \frac{180}{100} + \frac{180^2}{100^2} + \frac{180^3}{100^3} \right) = 0,356$$

$$\Delta p_{KN} = 0,356 \rho_{pow} \frac{c_{180}^2}{2}$$

5.4 Strata ciśnienia na kryzie wg. PN – str.15 poz. 17

$$\Delta p_{KR} = \zeta \rho_{pow} \frac{c_{100}^2}{2} [Pa]$$

$$\text{wg. PN dla kryzy} \rightarrow \zeta = \left(1 + 0.707 \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2} - \frac{d^2}{D^2}} \right)^2 \left(\frac{D^2}{d^2} \right)^2$$

$$\text{gdzie : } D = D_{100} = 100 \text{ mm}; \quad d = d_{kryzy} = 75 \text{ m}$$

$$\zeta = 2,589$$

$$\Delta p_{KR} = 2,589 \rho_{pow} \frac{c_{100}^2}{2}$$

- (wzór z normy zwężkowej PN-EN ISO 5167-1 → str.32 poz. 8.4.1 wzór na $\Delta\omega$)

$$\Delta p_{KR} = \frac{\sqrt{1-\beta^4-C\beta^2}}{\sqrt{1-\beta^4+C\beta^2}} \Delta p; \quad C = 0,614$$

$$\beta = \frac{d_{kryzy}}{d} = \frac{75}{100} = 0,75, \quad \Delta p = \rho_{alk} g \Delta h = 825 \cdot 9,81 \cdot \Delta h$$

$$\Delta p_{KR} =$$

5.5 Suma strat ciśnienia obl. wg. PN – 76/M – 34034

$$\sum \Delta p_{PN} = \Delta p_{NR} + \Delta p_K + \Delta p_{KR} + \Delta p_{TR} \quad [Pa]$$

Powyższą wartość, należy porównać z wartością otrzymaną w punkcie 4.4 w celu określenia różnicy w wielkości obliczonych strat, metodą teoretyczną jw. (wg. PN) i doświadczalną. Powyższe różnice, będą miarą poprawności wykonania ćwiczenia oraz dokonanych obliczeń.

Sprawozdanie powinno zawierać schemat stanowiska, obliczenia (wg. punkty 4 do 5.5) , wykres rozkładu ciśnień dynamicznych , statycznych oraz strat w funkcji długości rurociągu oraz dyskusję (wnioski) otrzymanych wyników.

Opracował : S. Fortuna, W. Knapczyk

Literatura :

1. Instrukcja - Wyznaczenie strat energii. Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

AGH.

2. Polska Norma, PN-76 / M- 34034 Zasada obliczeń strat ciśnienia.
3. Bergander M., Fluid Mechanics , Kraków 2011.
4. Bukowski J., Mechanika płynów , Warszawa 1959.
5. Fortuna S., Wentylatory , Kraków 1999.
6. Walczak J., Inżynierska mechanika płynów , Poznań 2006.

Wpisz tutaj równanie.

