



PIOTR PAWEŁKO

NAPĘD I STEROWANIE HYDRAULICZNE
PODSTAWY
ĆWICZENIA LABORATORYJNE

Wprowadzenie

Materiały przeznaczone są dla studentów Wydziału Inżynierii Mechanicznej i
Mechatroniki

kopiowanie, powielanie, rozpowszechnianie bez wiedzy autora zabronione

SZCZECIN 2020

1. Wprowadzenie

Hydraulika – dziedzina techniki zajmująca się elementami napędowymi, sterującymi i regulującymi maszyn, w których za pośrednictwem cieczy pod ciśnieniem wytwarza lub przenosi siły oraz momenty sił.

Napęd – urządzenie służące do przekazywania energii ruchu z miejsca jej wytwarzania(silnik) do urządzenia zużytkowującej energię. W napędach hydraulicznych czynnikiem przenoszącym energię jest ciecz pod ciśnieniem.

Napęd hydrostatyczny – napęd hydrauliczny wykorzystujący do przenoszenia ruchu przede wszystkim energię **ciśnienia** cieczy.

Napęd hydrokinetyczny – napęd hydrauliczny wykorzystujący do przenoszenia ruchu przede wszystkim energię **kinetyczną** cieczy.

Kawitacja – powstawanie w płynącej cieczy obszarów nieciągłości, wypełnionych gazem lub parą, w skutek miejscowego obniżenia się ciśnienia, zachodzi w miejscach znacznego wzrostu prędkości przepływu.

Cechy układów hydraulicznych:

- 1) lekkie i małogabarytowe elementy mogące realizować znaczne wymuszenia siłowe,
- 2) szybka i bezstopniowa zmiana prędkości silników i siłowników,
- 3) proste zabezpieczenie przed przeciążeniem zaworami ograniczającymi ciśnienie,
- 4) lepkość olejów hydraulicznych zależy od temperatury,
- 5) przecieki oleju powodują straty mocy,
- 6) straty związane z przepływem zmieniają się w ciepło,
- 7) występują drgania i hałas.

Tab. 1. Wybrane jednostki miary stosowane w hydraulice

Nazwa jednostki	Symbol	Jednostka miary
Masa	m	[kg]
Czas	t	[s] (sekunda)
Droga	s	[m] (metr)
Pole powierzchni	A	[m ² , cm ²]
Prędkość	v	[m/s]
Przyspieszenie	a, g	[m/s ²]
Siła	F	[N] (niuton)
Ciśnienie	p	[Pa] (Paskal) [bar = kg*m/s ²]
Praca	W	[J = W *s = N*m] (dżul)
Energia:		
-potencjalna	E_p	[J]
-kinetyczna	E_k	
Moc	P	[W=J/s] (Watt)
Lepkość		
dynamiczna	μ	[Pa*s], [P] (puaz)
kinematyczna	ν	[m ² /s], [St] (Stokes)
Ciężar właściwy	γ	[N/m ³]
Gęstość	ρ	[kg/m ³]
Natężenie przepływu	Q	[m ³ /s] [l/min]

PODSTAWOWE PARAMETRY CIECZY.

1. **Ciężar właściwy** γ jest to stosunek ciężaru cieczy G do jej objętości V

$$\gamma = \frac{G}{V} \left[\frac{N}{m^3} \right]$$

Zwykle w układach hydraulicznych stosowane są ciecze o ciężarach właściwych wynoszących $\gamma = 7900 \div 8800$ [N/m³].

2. **Gęstość** ρ jest to stosunek masy ciała m do jego objętości V

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

Gęstość cieczy hydraulicznych wynosi $\rho = 840 \div 900$ [kg/m³].

3. **Lepkość** – jest to właściwość cieczy pozwalająca na przenoszenie sił stycznych. Miarą lepkości jest współczynnik μ zwany współczynnikiem lepkości dynamicznej. Średnia lepkość dynamiczna cieczy hydraulicznych wynosi: $\mu = 9 \cdot 10^{-3} \div 32 \cdot 10^{-3}$ [Pa*s]. Często zamiast lepkości dynamicznej używa się pojęcia lepkości kinematycznej:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

Średnia lepkość kinematyczna cieczy hydraulicznych wynosi: $\nu = 10 \div 40 \cdot 10^{-6}$ [m²/s]

Oprócz wyżej wymienionych jednostek określających lepkość są przez producentów sprzętu i cieczy hydraulicznych stosowane jednostki nie należące do Międzynarodowego Układu Jednostek Miar SI (fr. *Système international d'unités*), a mianowicie:

lepkość dynamiczna 1 puaz ; $1P = 10^{-1} \text{ [N}\cdot\text{s/m}^2\text{]}$

lepkość kinematyczna 1 stokes; $1St = 1 \text{ [cm}^2\text{/s]} = 10^{-4} \text{ [m}^2\text{/s]}$ lub 1 centystokes = $1 \text{ cSt} = 10^{-2} \text{ St} = 10^{-6} \text{ [m}^2\text{/s]} = 1 \text{ [mm}^2\text{/s]}$

Niezależnie od tych jednostek używa się też pojęcia **lepkości względnej** - lepkości określonej przez porównanie danej cieczy, np. z wodą, wyrażana jest w stopniach Englera [⁰E].

Lepkość cieczy maleje wraz z jej temperaturą. Wpływ temperatury na lepkość cieczy określa tzw. wskaźnik lepkości zwany indeksem wiskozowym.

4. **Ścisłość** – jest to własność cieczy polegająca na zmianie objętości pod wpływem zmian ciśnienia. Ciecze hydrauliczne podobnie jak wszystkie inne ciecze są mało ścisłe.

5. **Rozszerzalność cieplna** – jest to zjawisko polegające na zmianie objętości na skutek zmian temperatury. W przypadku cieczy hydraulicznych zmiany te są stosunkowo niewielkie.

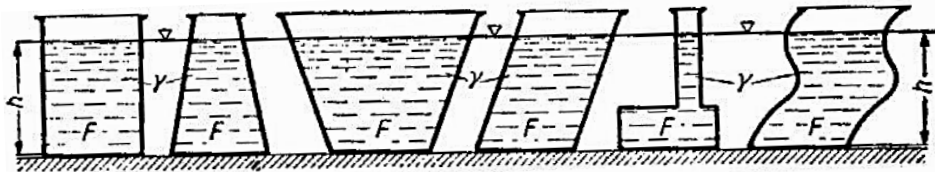
6. **Ciężnienie cieczy** – jest to siła, z jaką ciecz naciska na jednostkę powierzchni ścianek naczynia. Jednostką ciśnienia jest Pascal, Pascal jest niewielką jednostką, dlatego w praktyce stosuje się jego wielokrotności np. $1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar}$

$$p = \frac{F}{A} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

Do opisu jakościowego i ilościowego zjawisk dotyczących zachowania się cieczy w układach hydraulicznych wykorzystywane są prawa i metody hydromechaniki (zwłaszcza hydrostatyki oraz hydrokinetyki). Hydrostatyka zajmuje się opisem zjawisk zachodzących w cieczy pozostającej w spoczynku, natomiast hydrokinetyka opisuje zjawiska zachodzące w cieczy będącej w ruchu. Dla zrozumienia działania układów hydraulicznych konieczna jest znajomość następujących zjawisk i praw dotyczących statyki cieczy:

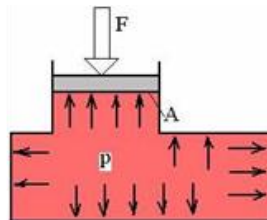
Paradoks hydrostatyczny

Napór oraz środek naporu na dno naczyń napełnionych tą samą cieczą (lub cieczami o tym samym ciężarze właściwym) będzie taki sam, jeżeli dna naczyń będą miały taką samą powierzchnię, a wysokości napełnienia każdego naczynia cieczą będą jednakowe.



Prawo Pascala.

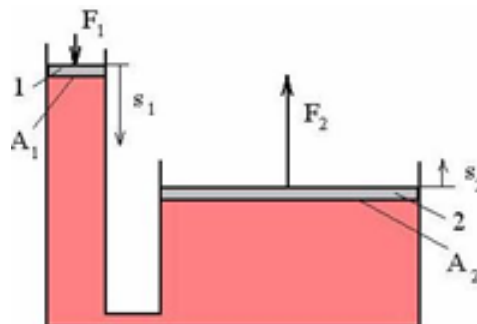
Jeżeli na ciecz nieściśliwą działają tylko siły powierzchniowe, to w każdym jej punkcie panuje jednakowe ciśnienie.



Przekazywanie siły

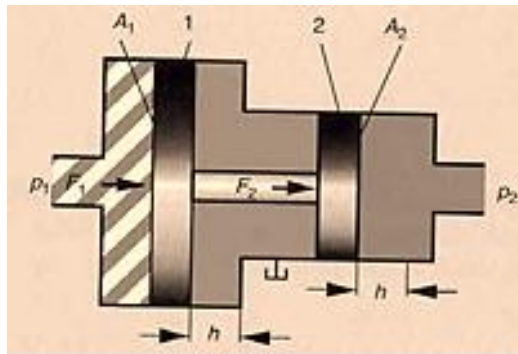
Istotę zjawiska przekazywania siły sprowadzić można do dwóch sformułowań:

1. Siły działające na powierzchnie nurników są proporcjonalne do ich przekrojów.
2. Mała siła działająca na dużym przemieszczeniu, może być przyczyną wytworzenia dużej siły działającej na małym przemieszczeniu



Przekazywanie ciśnienia

Podczas przekazywania ciśnienia wartości ciśnień są odwrotnie proporcjonalne do powierzchni, na które działają.



Równanie ciągłości strugi.

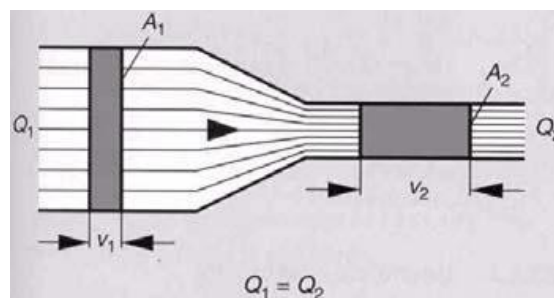
Przepływ cieczy przez rurociąg w postaci strugi charakteryzują następujące parametry:

- prędkość - v [m/s],
 - ciśnienie - p [Pa],
 - natężenie przepływu (strumień objętości) - $Q = v \cdot A$,
- gdzie: Q - natężenie przepływu [m^3/s],

A – pole powierzchni przekroju strugi [m^2].

Średnie prędkości przepływu cieczy nieściśliwej w ruchu ustalonym są odwrotnie proporcjonalne do odpowiednich przekrojów strugi. $Q = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 = \text{const}$.

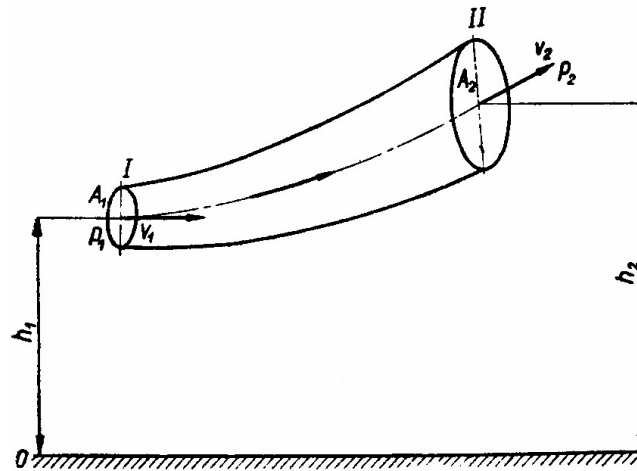
W miejscach węższych rury lub koryta ciecż płynie z większą prędkością, a w miejscach szerszych z mniejszą prędkością.



Prawo zachowania energii (prawo Bernoulliego)

W ruchu ustalonym ciecży doskonałej całkowita energia 1 kg ciecży, która stanowi sumę energii kinetycznej, energii ciśnienia i energii położenia jest jednakowa w każdym punkcie tej samej strugi.

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



Równanie Bernoulliego dla przepływu cieczy doskonałej

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + gh_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + gh_2$$

v_1, v_2 – prędkości w przekrojach I, II [m/s]

p_1, p_2 – ciśnienie w przekrojach I, II w [Pa]

ρ - gęstość cieczy [kg/m³],

h_1, h_2 – wysokość środków przekroju względem dowolnie obranego poziomego wyrównawczego [m]

Ciśnienie dynamiczne

Jeżeli struga cieczy ma kierunek poziomy to wysokość położenia jest stała i równanie Bernoulliego można zapisać w postaci:

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

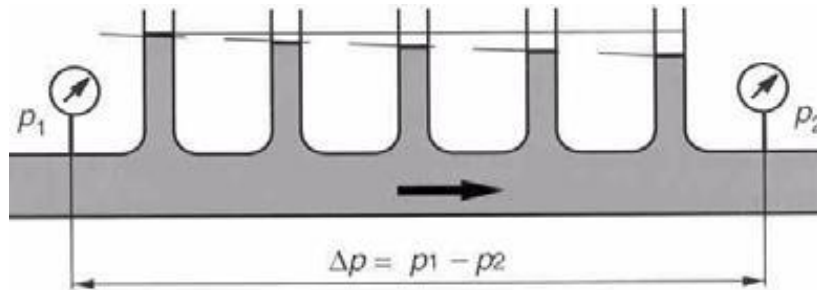
$$\frac{\rho v^2}{2} - \text{ciśnienie dynamiczne}$$

$$p - \text{ciśnienie statyczne}$$

W poziomym ruchu ustalonym cieczy doskonałej suma ciśnienia dynamicznego i statycznego jest wielkością stałą. W szerokich miejscach poziomej rury, gdzie prędkość cieczy jest mała, ciśnienie dynamiczne jest też małe, a statyczne duże. Odwrotnie jest w wąskich miejscach rury. Bezpośrednio przejawia się i oddziałuje na ścianki rury tylko ciśnienie statyczne.

Tarcie i straty przepływu

Przepływ cieczy hydraulicznej w przewodzie nie może odbywać się bez strat. Straty wynikają z tarcia cieczy o powierzchnię przewodu, tarcia wewnętrznego cieczy oraz lepkości. *Tarciu towarzyszy wydzielanie się ciepła.* Efektem tarcia jest spadek ciśnienia.



Straty wynikające z tarcia podczas przepływu cieczy hydraulicznej w przewodzie zależą od:

- 1) długości przewodu,
- 2) przekroju poprzecznego przewodu,
- 3) chropowatości powierzchni przewodu,
- 4) ilości zagięć przewodu,
- 5) lepkości cieczy.

Straty przepływu występujące w układach hydraulicznych dzieli się na dwa rodzaje:

– **straty miejscowe** występujące w miejscach lokalnych zaburzeń przepływu, takich jak: zawory, dysze, złączki, kolanka, rozgałęzienia, nagłe zmiany przekroju przepływu itp.

Straty miejscowe przepływu

$$\Delta P = P_{str} = \zeta \frac{\rho}{2} V^2 = \zeta \frac{\rho Q^2}{2A^2}$$

ζ – tzw. współczynnik strat przepływu,

Q – objętościowe natężenie przepływu,

A – pole przekroju przepływu.

– **straty liniowe**, występujące w przewodach, których długość jest wielokrotnie większa od średnicy.

$$\Delta P = P_{str} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} V^2 = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho Q^2}{2A^2}$$

λ – współczynnik strat liniowych,

l – długość przewodu,

d – średnica przewodu.

Wartość współczynnika strat liniowych można obliczyć ze wzoru:

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}$$

lecz najczęściej przy zastosowaniu przewodów hydraulicznych z rur ciągnionych, gdzie gładkość powierzchni jest dobra przyjmuje się $\lambda = 0.025$.

Zależnie od zmian w czasie prędkości miejscowej i ciśnienia rozróżniamy:

- **przepływ zmienny** (prędkość miejscowa i ciśnienie w każdym punkcie cieczy zmieniają się w czasie, zmienia się też strumień objętości),
- **przepływ ustalony** (prędkość miejscowa i ciśnienie w każdym punkcie cieczy nie zmieniają się w czasie, strumień objętości nie zmienia się).

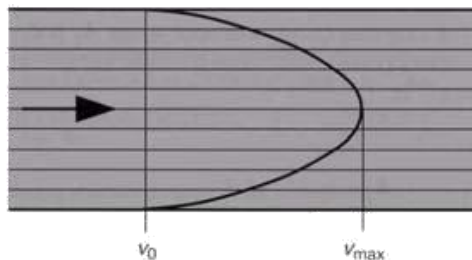
W zależności od rodzaju sił wywołujących ruch cieczy:

- **przepływ swobodny** (występuje, gdy struga cieczy nie zwilża całego obwodu przewodu, w którym płynie, a więc gdy w przewodzie istnieje zwierciadło cieczy),
- **przepływ wymuszony** cieczy (mamy z nim do czynienia, gdy struga całkowicie wypełnia przewód).

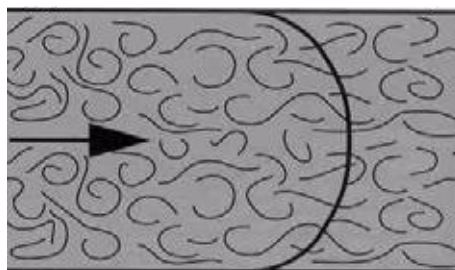
Typy przepływu cieczy hydraulicznej

Zależnie od ułożenia linii prądu strugi cieczy hydraulicznej wyróżnia się:

- **przepływ uwarstwiony (laminarny)** – jeżeli linie prądu cieczy są wzajemnie do siebie równoległe, ten rodzaj ruchu występuje przy niewielkich prędkościach,



- **przepływ burzliwy (turbulentny)** – występuje przy większych prędkościach przepływu, charakteryzują go drobne ruchy poboczne cząstek i wzajemne się ich mieszanie.



Opory ruchu burzliwego są znacznie większe niż przepływu laminarnego. Średnią prędkość przepływu, po której przekroczeniu następuje przejście z ruchu laminarnego do burzliwego nazywamy prędkością krytyczną v_{kr} .

Liczba Reynoldsa .

Ruch cieczy można scharakteryzować bezwymiarowym współczynnikiem Re zwanym liczbą Reynoldsa. Wartość Re dla rury o przekroju kołowym wynosi:

$$Re = \frac{v d \rho}{\mu}$$

v – średnia prędkość przepływu [m/s],

d – średnica wewnętrzna rury w [m],

ρ – gęstość cieczy w [kg/m³],

μ – współczynnik lepkości dynamicznej w [Pa·s].

Dla prędkości krytycznej v_{kr} liczba Reynoldsa przybiera wartość graniczną Re_{gr} . Wartość graniczna liczby Reynoldsa jest w przybliżeniu jednakowa dla wszystkich cieczy. Po przekroczeniu wartości granicznej liczby Reynoldsa ciecz uzyskuje przepływ burzliwy.

Energia, jaką układ hydrauliczny przekazuje, np. na tłok siłownika, jest iloczynem siły na tłoku i jego przemieszczenia. Odpowiada to iloczynowi ciśnienia w siłowniku i wpływającej objętości cieczy:

$$W = F_2 \cdot s_2 = p \cdot A_2 \cdot s_2 = p \cdot V.$$

Moc wyraża się zależnością: $P = Q \cdot p$,

gdzie:

Q – objętościowe natężenie przepływu,

p – ciśnienie cieczy roboczej.

LITERATURA

Książki

- [1] Lewandowski D.i inni.: Pneumatyka i hydraulika urządzeń mechanicznych - laboratorium. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1999
- [2] Świder J., Sterowanie i automatyzacja procesów technologicznych i układów mechatronicznych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006

Normy

- [3] PN - ISO 1219-1 1991 - Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne -- Symbole graficzne i schematy układów -- Symbole graficzne
- [4] PN-ISO 1219-2:1998, Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne -- Symbole graficzne i schematy układów -- Schematy układów
- [5] PN-M-73001:1991 + Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne. Terminologia.
- [6] PN-ISO 2944:2005 - Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne -- Ciśnienia nominalne
- [7] PN-ISO 3320:1998 - Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne -- Średnice cylindrów i średnice tłoczysek -- Szereg metryczny
- [8] PN-ISO 3322:1998 - Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne -- Cylindry (siłowniki) -- Ciśnienia nominalne
- [9] PN-ISO 4393:1998 - Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne -- Cylindry -- Skoki tłoka; szereg podstawowy
- [10] PN-ISO 4397:1994 - Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne -- Łączniki i części współpracujące -- Średnice nominalne zewnętrzne przewodów sztywnych lub półsztywnych i średnice nominalne wewnętrzne przewodów giętkich
- [11] PN-M-73020:1973 - Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne -- Elementy i zespoły hydrauliczne i pneumatyczne -- Ogólny podział i oznaczenie