Temat nr 1-5:

Przepływ płynów w rurociągach.

Średnia prędkość płynu w rurociągach.

Rodzaje przepływu płynów.

Liczba Reynoldsa.

Równanie ciągłości przepływu.

Wykorzystanie równania Bernoulliego.

Obliczenie spadków ciśnienia na odcinkach prostych oraz strat miejscowych.

www.viega.pl

Literatura

1) Hermann Recknagel, Eberhard Sprenger , Ernst Schramek : „Kompendium wiedzy. Ogrzewnictwo, klimatyzacja, ciepła woda”

2) Ryszard Tytko: „Urządzenia i systemy energetyki odnawialnej”,

3) Albers Joachim „Systemy centralnego ogrzewania i wentylacji. Poradnik dla projektantów i instalatorów”,

4) Halina Koczyk: „Ogrzewnictwo praktyczne”,

5) Katarzyna Weinerowska Politechnika Gdańska „ Laboratorium z mechaniki płynów i hydrauliki”,

6) www.instsani.pl,

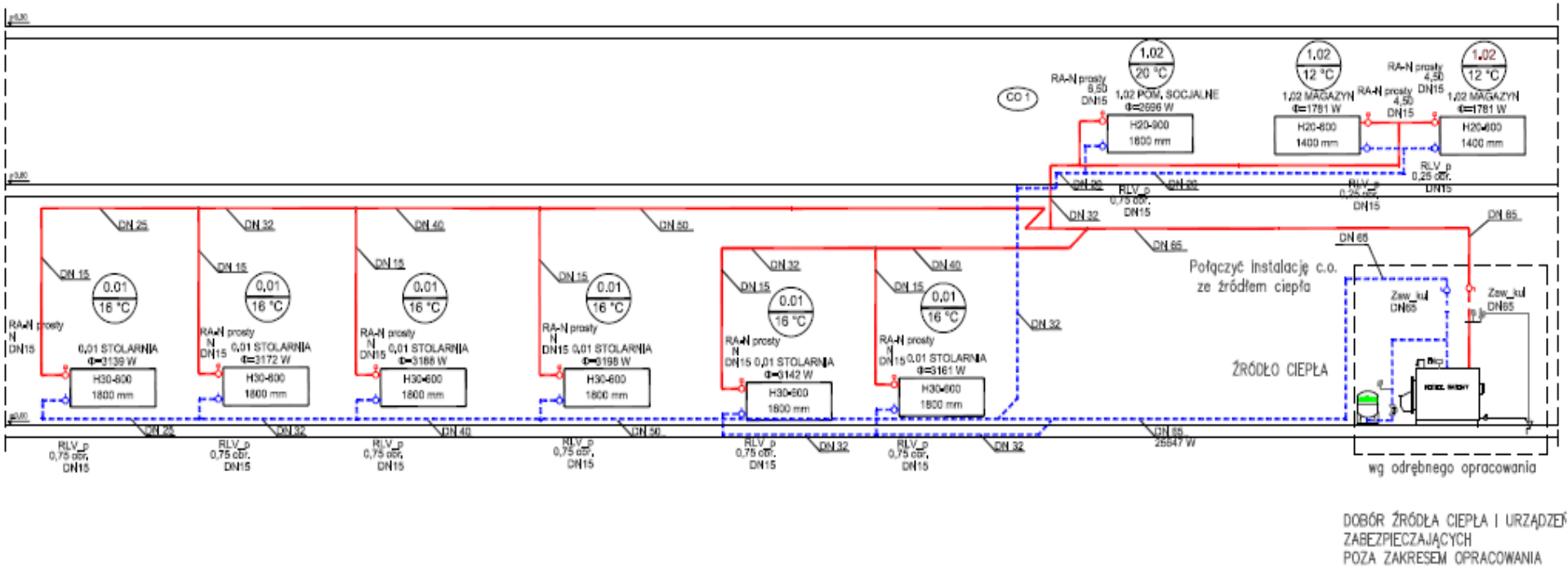
7) www.viessmann.pl,

8) Adam Kisiel, Maciej Mrowiec, Dorota Bielecka- Turek, Politechnika Częstochowska „Tablice, wzory i formuły empiryczne z wybranych zagadnień hydrauliki”

Hydraulika zajmuje się prawidłowościami przepływów cieczy (płynów).

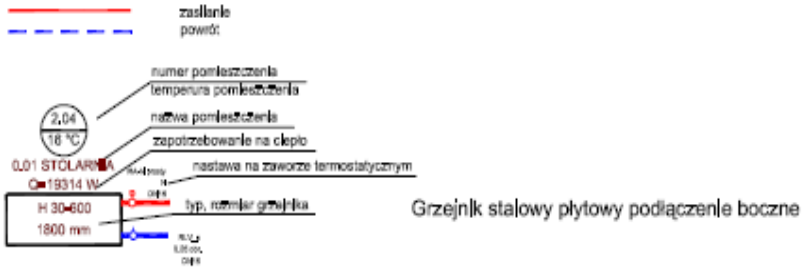
Dla uproszczenia rozważań, przy przedstawieniu warunków ruchu płynów, wprowadzono pojęcie **płynu idealnego**, który jest rozumiany jako nieposiadający tarcia i nieściśliwy.

Przepływ płynów w rurociągach



DOBÓR ŹRÓDŁA CIEPŁA I URZĄDZEŃ ZABEZPIECZAJĄCYCH POZA ZAKRESEM OPRACOWANIA

LEGENDA:



Grzejnik stalowy płytowy podłączenie boczne

Prawie w każdym procesie technologicznym występuje przepływ czynnika (ciecz lub gaz). Ilość przepływającej substancji oraz jej parametry wpływają na przebieg danego procesu technologicznego.

Wielkości te należy tak dobierać aby efekt był najlepszy a koszty najniższe, dobór tych wielkości związany jest często z ich prawidłowym pomiarem.

Prędkość czynnika w rurociągu zależy od odległości od ścianki, największa jest w osi a najmniejsza przy ściance (w warstwie przyściennej równa się zero).

Dlatego prawidłowy pomiar, polega na wyznaczeniu jej wartości średniej.

Natężenie przepływu płynu:

Natężenie masowe Qm,(m, G) - masa płynu przepływająca przez przekrój rurociągu w określonym czasie [kg/s].

.

Natężenie objętościowe (Qv) lub V- stosunek masowego przepływu płynu (Qm) do gęstości tego płynu [m3/s].

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho}$$

Średnia prędkość liniowa (v) - stosunek objętościowego natężenia przepływu do pola przekroju rurociągu (A)

$$v = Qv/A = \dot{V} / A$$

W przemyśle stosujemy prędkość liniową cieczy rzędu 0,5 – 3 m/s, a par i gazów 10 – 25 m/s (dla pary przegrzanej 30 – 50 m/s).

Rodzaje przepływu płynów.

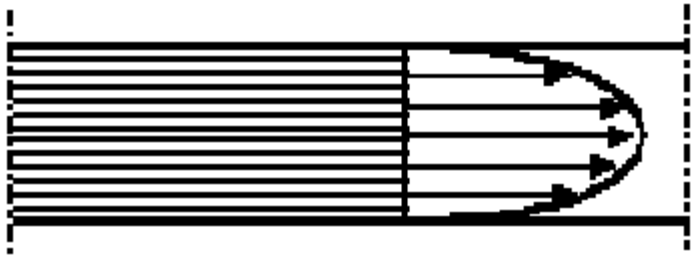
Ruch laminarny (uwarstwiony) – prędkość przepływu jest największa w osi rurociągu, a bliżej ścianek na skutek tarcia maleje. Rozkład prędkości w przekroju podłużnym rury ma kształt paraboli. Występuje przy małej prędkości przepływu.

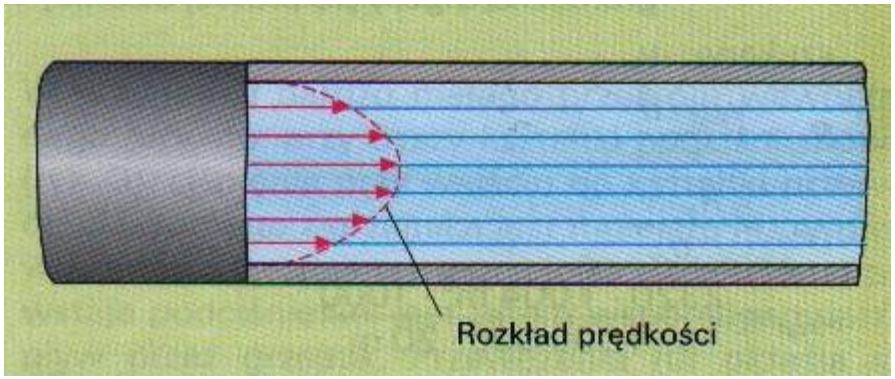
Ruch turbulentny - występuje przy wyższych prędkościach. Rozkład prędkości w przekroju podłużnym rury ma kształt spłaszczonej paraboli.

W pobliżu ścianek występuje ruch warstwowy.

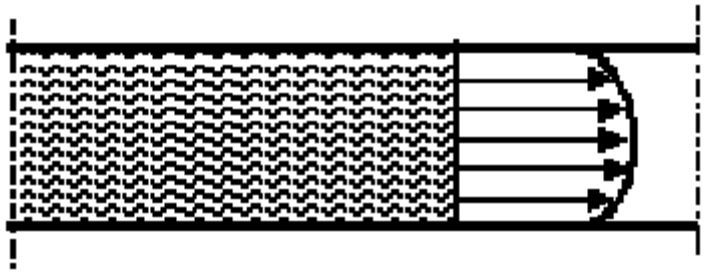
Rodzaje przepływu płynów

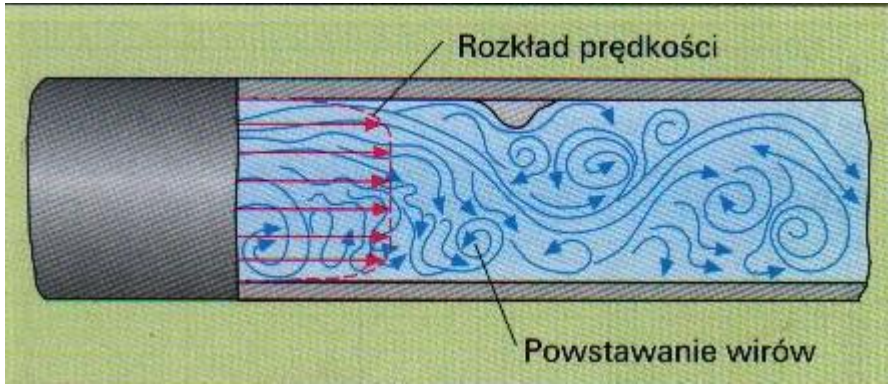
Ruch laminarny (uwarstwiony)





Ruch turbulenty

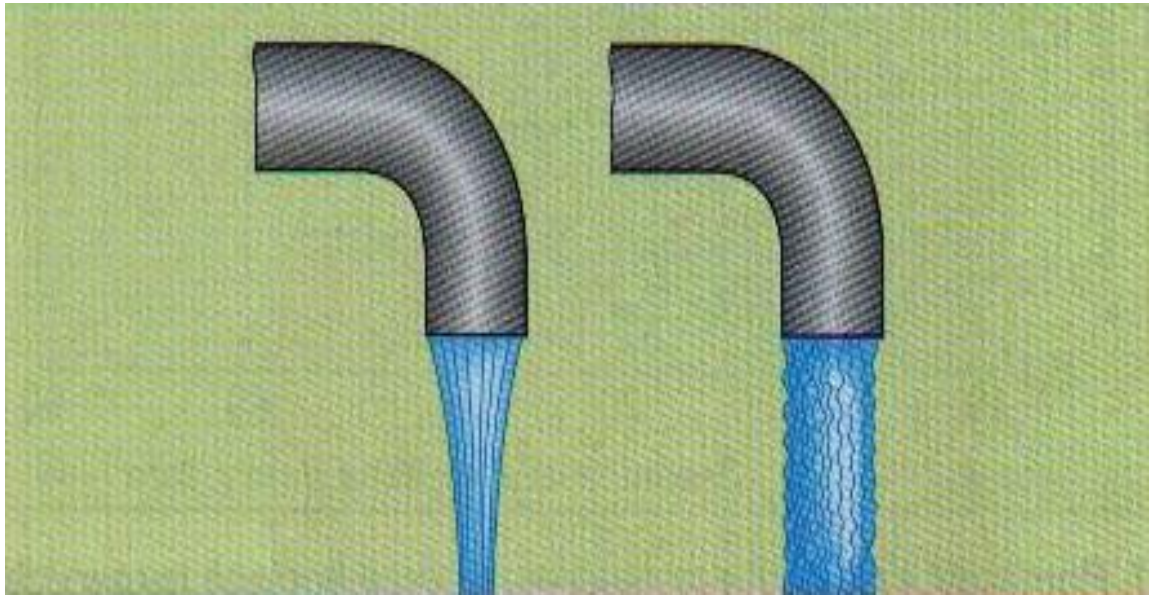




[Źródło 3]

Rodzaje przepływu płynów

Przepływ laminarny i turbulentny przy wypływie przez zawór czerpalny



[Źródło 3]

Rodzaje przepływu płynów

Jeżeli pozwoli się wodzie płynąć bardzo powoli przez długą, prostą, szklaną rurę z małym otworem, do którego, na wlocie rury, wprowadzi się strużkę zabarwionej wody, to woda ta będzie płynąć po linii prostej wzdłuż całej długości rury.
Takie zjawisko nazywamy przepływem laminarnym.
Woda płynie warstwami, przypominającymi szereg cienkościennych koncentrycznych rurek.

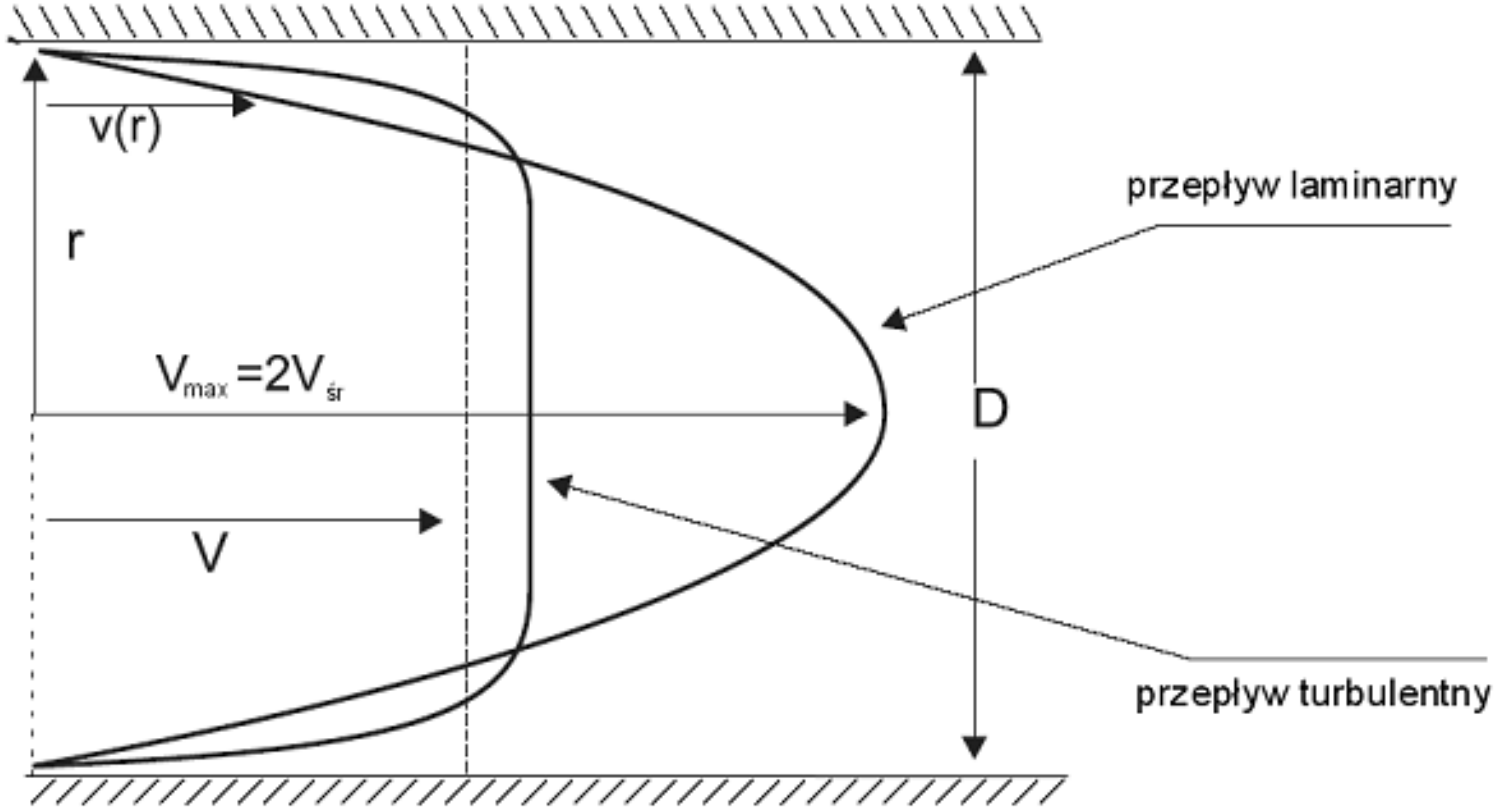
Zewnętrzna rurka wirtualna przylega do ścian prawdziwej rury, podczas gdy każda z kolejnych, wewnętrznych rurek porusza się z nieco większą prędkością, osiągając swoją maksymalną wartość w pobliżu osi rury.

Rozkład prędkości ma kształt paraboli, a średnia prędkości przepływu ma wartość 50 % maksymalnej prędkości w osi rury.

Jeżeli natężenie przepływu będziemy stopniowo zwiększać, to osiąga się punkt, w którym przepływ laminarny nagle ulega zaburzeniu i zaczyna się mieszanie sąsiadujących z sobą warstw.
Cząsteczki znajdujące się bliżej ścianek mieszają się z cząsteczkami ze środka strumienia, o większej prędkości, powodując ich spowolnienie.

W tym momencie przepływ staje się burzliwy (turbulentny), a krzywa rozkładu prędkości zostaje wyraźnie spłaszczona.

Rozkład prędkości w ruchu laminarnym i turbulentnym



www.instsani.pl

Liczba Reynoldsa

Badaniem charakteru ruchu cieczy pod ciśnieniem, w przewodach o przekroju kołowym, zajął się Osborne Reynolds.

Jego doświadczenia (1883r.) nie tylko wykazały istnienie dwóch różnych rodzajów ruchu, ale też pozwoliły stwierdzić że krytyczna liczba Reynoldsa w przewodach o przekroju kołowym nie przyjmuje ściśle określonej wartości, ale wartość z pewnego przedziału, zależnie od warunków w jakich odbywa się przepływ.

Przejście od przepływu laminarnego do turbulentnego zależy nie tylko od prędkości przepływu, ale również od średnicy rury i współczynnika lepkości.

Liczba Reynoldsa

Doświadczenia pokazały, że w przypadku przepływów wody przez rury o przekroju kołowym krytyczna wartość liczby Reynoldsa wynosi około 2320.

W rzeczywistości zmiana charakteru przepływu nie zawsze zachodzi dokładnie przy Re = 2320, lecz zależy od warunków eksperymentalnych.

Dlatego też należy mówić raczej o obszarze przejścia laminarno - turbulentnego niż o punkcie przejścia.

Liczba Reynoldsa

Decydujące znaczenie ma stosunek sił bezwładności do sił lepkości. Stosunek ten znany jest jako **liczba Reynoldsa**.

W przypadku rury o przekroju kołowym wyraża się on równaniem:

$$Re = \frac{d * w}{v}$$

gdzie:
- d jest wewnętrzną średnicą rury [m],
- w jest średnią prędkością płynu [m/s],
- v (ni) jest kinematycznym współczynnikiem lepkości płynu [m^2/s]

Liczba Reynoldsa

T [°C]	Lepkość kinematyczna ν [m²/s]	
	woda	powietrze
0	1,79*10⁻⁶	13,3*10⁻⁶
10	1,31*10⁻⁶	13,9*10⁻⁶
20	1,01*10⁻⁶	15,1*10⁻⁶
40	0,658*10⁻⁶	16,9*10⁻⁶
50	0,560*10⁻⁶	18,2*10⁻⁶
60	0,478*10⁻⁶	18,9*10⁻⁶
80	0,366*10⁻⁶	20,9*10⁻⁶
100	0,295*10⁻⁶	23,1*10⁻⁶
200	0,160*10⁻⁶	35,0*10⁻⁶

Temperatura θ, °C	Lepkość dynamiczna η, 10^{-6} kg/(m · s)	Lepkość kinematyczna ν, 10^{-6} m²/s
0	1791,7	1,771
10	1307,3	1,304
20	1002,3	1,004
30	797,3	0,801
40	652,2	0,658
50	546,3	0,553
60	465,8	0,474
70	404,1	0,413
80	355,0	0,365
90	314,8	0,362
100	282,4	0,295

1 Lepkość wody w zależności od temperatury w warunkach ciśnienia p ≈ 1 bar

[Źródło 3]

Liczba Reynoldsa

Obserwacje zachowania barwnika wprowadzonego do cieczy przepływającej przez przewód o przekroju kołowym wykazały, że przy niewielkich liczbach Reynoldsa (czyli przy odpowiednio małych prędkościach przepływu), barwnik tworzy wyraźną cienką strużkę o przepływie laminarnym.

Przy stopniowym zwiększeniu prędkości przez pewien czas można zaobserwować jeszcze ruch laminarny, aż po osiągnięciu pewnej wartości granicznej następuje przejście z ruchu laminarnego na turbulentny, rozmycie strugi barwnika w całej objętości przewodu

Najmniejsza liczbą Reynoldsa, przy której można zaobserwować to przejście jest wartość 2320.

Jest to **dolna krytyczna liczba Reynoldsa (Re_{krd}).**
Poniżej tej wartości zawsze obserwujemy ruch laminarny.

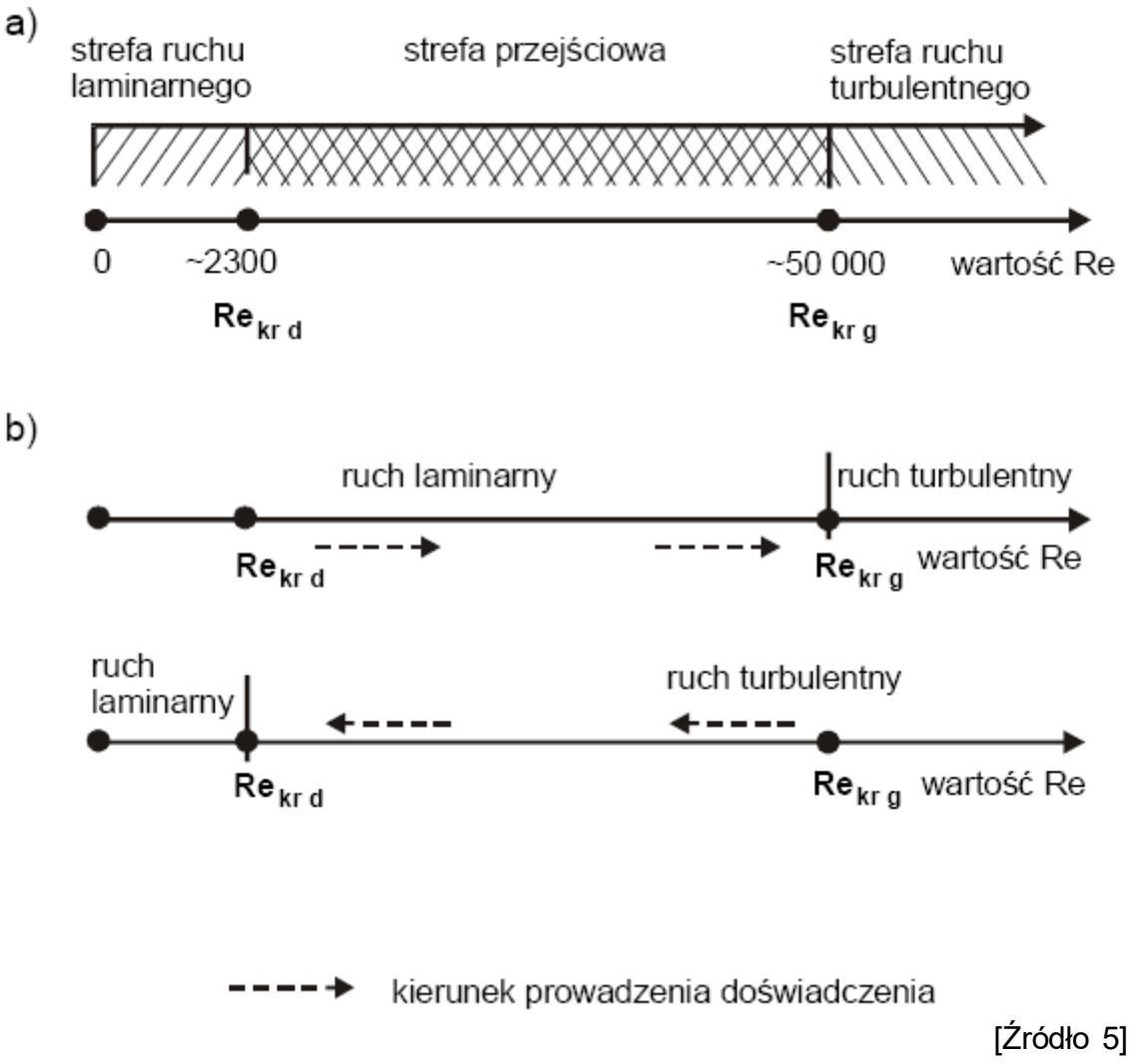
Liczba Reynoldsa

Maksymalna wartość liczby Reynoldsa, przy której możne nastąpić przejście z ruchu laminarnego na turbulentny nosi nazwę **górnej krytycznej liczby Reynoldsa Re_{krg}**

Teoretycznie ruch laminarny można obserwować nawet przy wartościach liczby Re rzędu kilkudziesięciu tysięcy, jednak w praktyce trudno to zrealizować. Niewielkie zakłócenie zewnętrzne powoduje utratę laminarnego charakteru przepływu, a raz utworzony ruch turbulentny przy liczbach Reynoldsa większych niż 2320 utrzymuje się w sposób trwały.

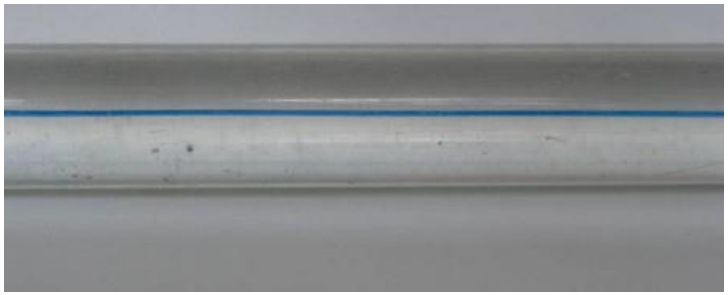
Za górną krytyczną liczbę Reynoldsa, powyżej której zawsze występuje ruch turbulentny, przyjmuje się zazwyczaj wartość 5000, ale dla celów praktycznych można przyjąć, że powyżej wartości 2320 występuje ruch turbulentny.

Liczba Reynoldsa

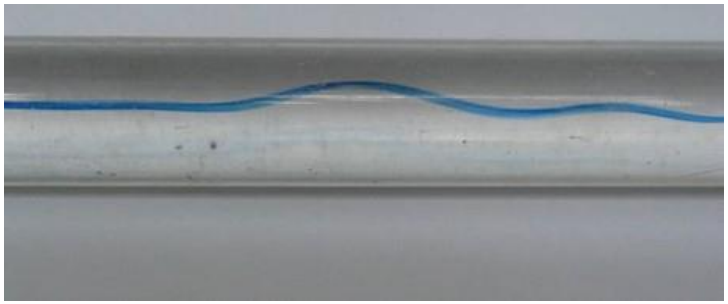


[Źródło 5]

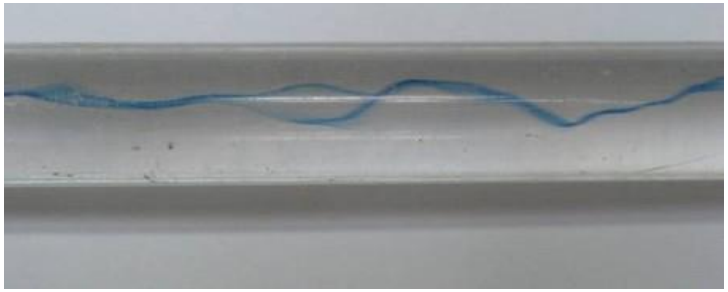
Liczba Reynoldsa



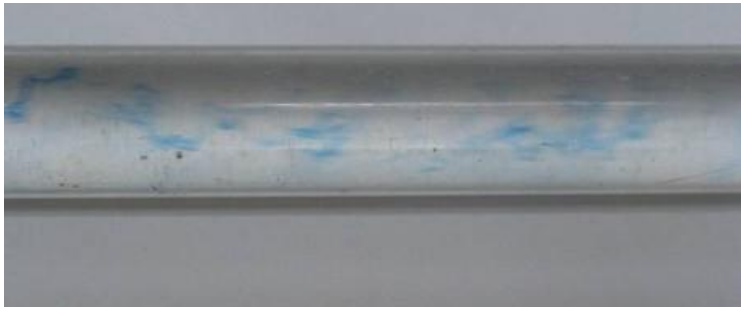
Re = 141 ruch laminarny



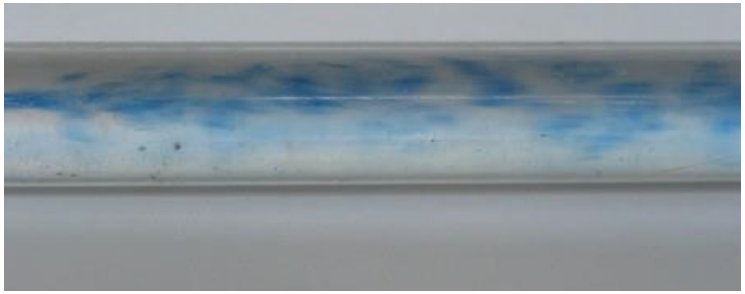
Re = 421 ruch laminarny



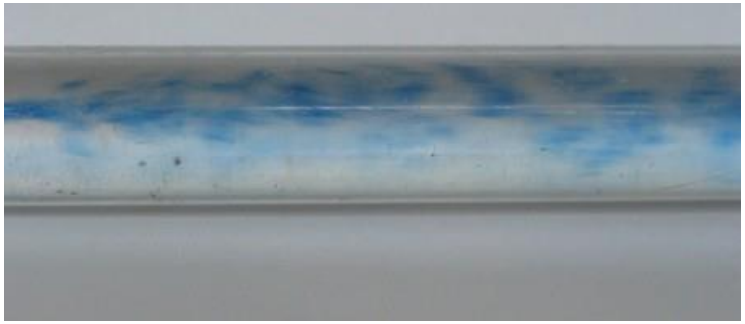
Re = 1381 ruch laminarny



Re = 3289 ruch burzliwy

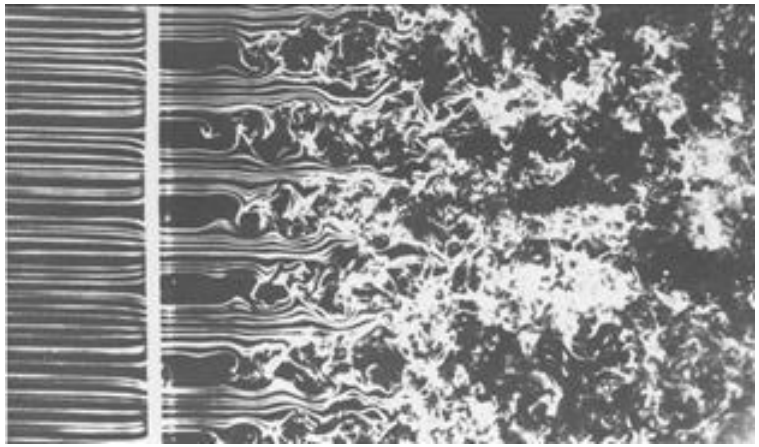


Re = 5078 ruch burzliwy



Re = 8989 ruch burzliwy

Ruchu laminarny i turbulentny



Lepkość

Przy przepływie wszystkich cieczy rzeczywistych występują siły tarcia. Właściwość tą nazywamy **lepkością** (tarciem wewnętrznym).

Polega ona na działaniu siły F pomiędzy dwoma płaskimi elementami równoległych warstw cieczy o polach powierzchni S i odległymi o l. Warstwy poruszają się z niewielkimi prędkościami różnymi o Δw. Współczynnik proporcjonalności w podanym przez Newtona wzorze to współczynnik lepkości η (eta)

$F/S = \eta * \Delta w / l$

Jednostką η (eta) jest Pa *s

Współczynnik lepkości η

Współczynnik lepkości zależy od **rodzaju cieczy** i w dużym stopniu od **temperatury**.

W cieczach wzajemnemu przesuwaniu się sąsiednich warstw przeciwdziałają siły spójności i ruchy takie są możliwe głównie dzięki ruchliwości cząsteczek przenikających z jednej warstwy do drugiej.

Nasilająca się wraz ze wzrostem temperatury wymiana cząsteczek między warstwami powoduje zmniejszanie lepkości wraz ze wzrostem temperatury

Lepkość

Lepkość jest miarą wewnętrznego oporu ośrodka podczas przepływu.

Wyższa lepkość oznacza, że ośrodek jest gęsty - niższa lepkość, że jest rzadki.

Ruch obiektów w płynach (pod tym wspólnym mianem będziemy rozumieli zarówno ciecze, jak i gazy) podlega dość złożonym regułom.

W szczególności bardzo skomplikowane jest zjawisko burzliwych (wirowych) przepływów płynu.

Stosunkowo najprostsze dla badań są przepływy laminarne (spokojne, bez wirów).

Lepkość kinematyczna, wielkość fizyczna wyrażona wzorem:

$$\nu = \eta/\rho \quad [\text{m2/s}]$$

gdzie: η – (eta) współczynnik lepkości dynamicznej [Pa *s]

ρ - gęstość cieczy [kg/m3]

Lepkość kinematyczna jest wprost proporcjonalna do stopnia laminarności przepływ, wyraża się ją w Stokesach, w SI w m^2/s.

Lepkość dynamiczna wyraża stosunek naprężeń ścinających do szybkości ścinania.

Im większa jest wartość lepkości dynamicznej, tym większe jest wzajemne przyciąganie cząsteczek cieczy i tym większy jest opór, który przeciwstawia się przemieszczeniu sąsiednich cząsteczek lub warstw cieczy.

$$\eta = Pa * s = kg/m*s$$

Jednostką lepkości dynamicznej w układzie SI jest Paskal razy sekunda.

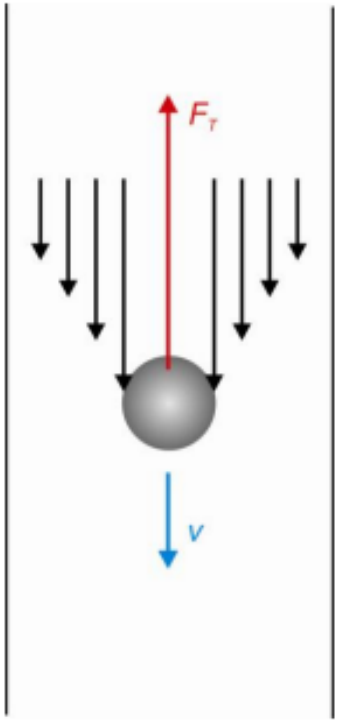
Ruch kulki w płynie z małą prędkością.

Ciecz zwilżająca pokrywa cienką warstwą ciała w niej zanurzone.

Załóżmy, że ciałem tym jest metalowa kulka.

Gdy kulka jest w ruchu, unosi ze sobą warstwę płynu przylegającego do niej, a także na skutek tarcia wewnątrz samego płynu wprawia w ruch następne warstwy. Siła oporu jaką działa płyn na poruszającą się kulkę jest proporcjonalna do prędkości poruszającej się kulki.

Wyraża się ona wzorem Stokesa



Obowiązuje prawo Stokesa:

$$F_T = 6 \cdot \pi \cdot R \cdot \eta \cdot v$$

Gdzie:

F_T – siła oporu płynu [N]

R – promień kulki [m]

η - lepkość dynamiczna płynu - grecka litera "eta" [kg/ms]

v - prędkość kulki [m/s]

Natężenie przepływu cieczy

Jedną z najczęściej stosowanych metod określania natężenia przepływu cieczy jest metoda objętościowa (wolumetryczna), polegająca na pomiarze czasu przepływu określonej objętości cieczy.

Objętość ta najczęściej jest określana za pomocą wodomierza zamontowanego w przewodzie.

W przypadku przepływu cieczy pod ciśnieniem do pomiaru natężenia przepływu stosuje się również zwężki pomiarowe.

Natężenie przepływu cieczy

Zwężką pomiarową nazywamy odcinek przewodu, montowany w rozpatrywanym rurociągu, na którym występuje lokalne zmniejszenie powierzchni przekroju poprzecznego przewodu.

W zależności od konstrukcji rozróżniamy:

- kryzy,

- dysze,

- zwężki Venturiego.

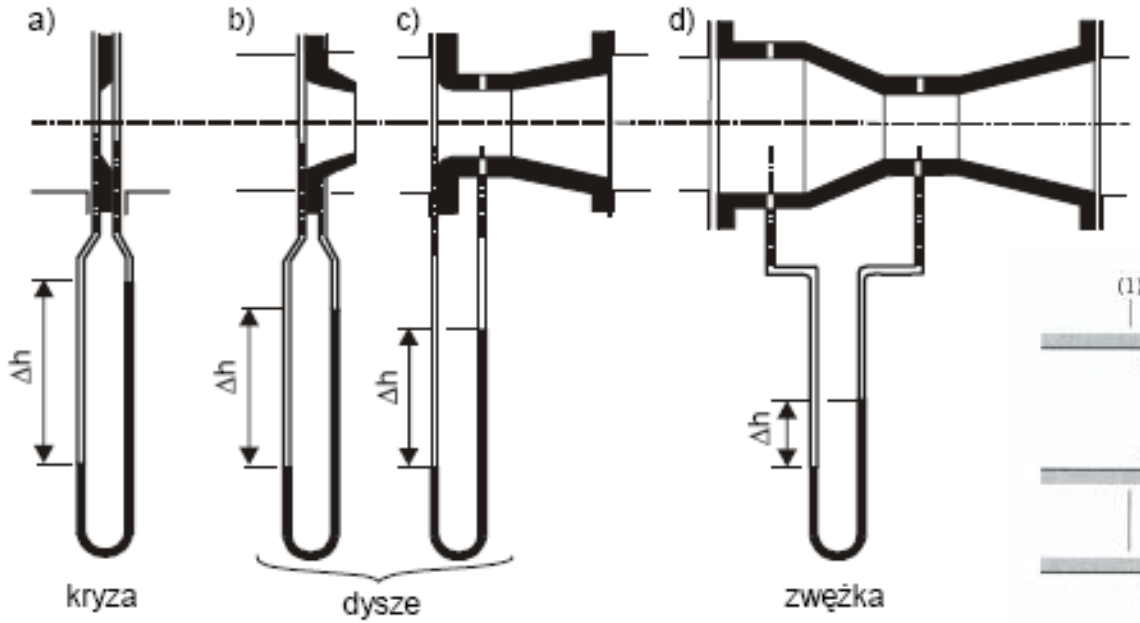
W zwężce Venturiego wyodrębniamy trzy elementy konstrukcyjne:

- odcinek stopniowego zmniejszania przekroju przewodu (konfuzor),

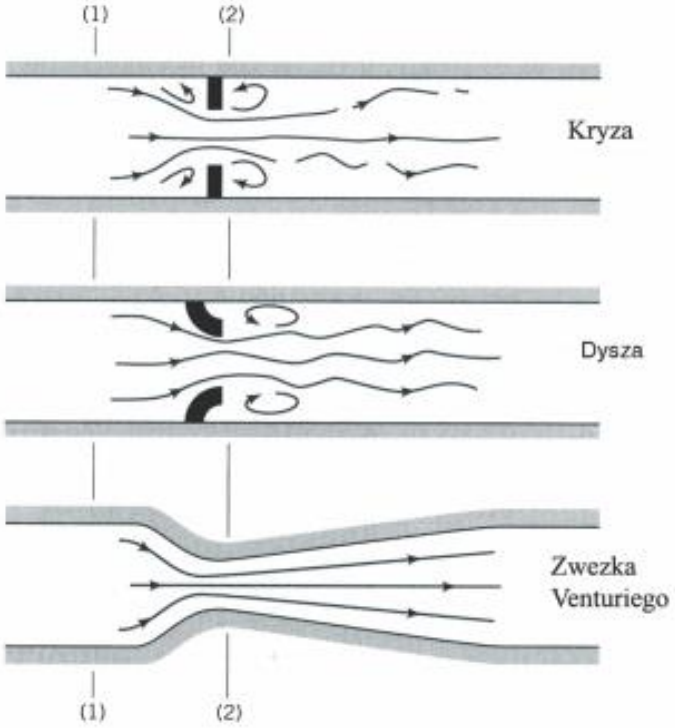
- fragment przewodu o stałym zmniejszonym przekroju,

- rozszerzenie przekroju poprzecznego do poprzednich wymiarów (dyfuzor).

Natężenie przepływu cieczy



[Źródło 5]



Natężenie przepływu cieczy

Konstrukcja zwężki pomiarowej umożliwia określenie wydatku w sposób pośredni, na podstawie analizy zmian parametrów przepływu (ciśnienia i prędkości) przy przejściu cieczy przez zwężenie.

Wykorzystano zjawisko zmiany energii potencjalnej na kinetyczną i związane z tym łatwy do zaobserwowania spadek ciśnienia w zwężonym odcinku. Na podstawie pomiaru różnicy ciśnienia przed i w zwężeniu, możliwe jest określenie prędkości przepływu i wydatku przewodu.

Zależność pomiędzy natężeniem przepływu Q a różnicą ciśnienia Δp może być określona na podstawie równania Bernoulliego

Relacja Q(Δp) określana jest przy założeniu, że przepływ przez zwężkę odbywa się bez strat energii mechanicznej (równanie Bernoulliego dla cieczy nielepkiej)

Natężenie przepływu cieczy

W pierwszej kolejności wyznaczany jest wydatek teoretyczny Q teor, który następnie zostaje poprawiony przez współczynnik korygujący:

$$Q_{rzecz} = m^* Q_{teor}$$

Współczynnik m nazywamy współczynnikiem wydatku, który uwzględnia:

- stratę ciśnienia spowodowaną zawirowaniami w obrębie zwężki,
- nierównomierny rozkład prędkości w przekroju strumienia,
- niedokładność pomiaru różnicy ciśnienia.

Ciśnienie statyczne P_{stat} jest to ciśnienie wywierane przez ciecz na ściankę rury.

Największe ciśnienie statyczne występuje w stanie spoczynku instalacji.

Ciśnienie to określa się mianem : **ciśnienia spoczynkowego.**

Ciśnienie spoczynkowe: jest ciśnieniem statycznym cieczy w przypadku, gdy nie występuje przepływ.

Ciśnienie dynamiczne i statyczne

Aby cieczy nadać ruch, część ciśnienia statycznego musi być do tego celu spożytkowana. Tę część ciśnienia statycznego określa się mianem ciśnienia **dynamicznego p_{dyn}**

Ciśnienie dynamiczne jest niezbędne do wprawienia cieczy w ruch.

Ciśnienie dynamiczne zależy od gęstości przepływającego czynnika i jego prędkości przepływu

$$p_{dyn} = \frac{\rho}{2} v^2 \quad N/m2$$

Gdzie:
ρ – gęstość czynnika [kg/m3],
v – prędkość przepływu czynnika [m/s]

Ciśnienie statyczne jest mniejsze o wartość równą wzrostowi ciśnienia dynamicznego. Pozostała część ciśnienia statycznego jest nazywana ciśnieniem hydraulicznym.

Ciśnienie hydrauliczne jest ciśnieniem przepływających cieczy.

Przykład obliczeniowy

Przewodem rurowym płynie woda z prędkością v = 0,8 m/s, gęstość wody ρ = 1000 kg/m3. Określ ciśnienie dynamiczne w Pa.

$$\mathbf{p}\ \text{dyn} = \frac{\rho}{2}\ \mathbf{v}^{\mathbf{2}} = \frac{\mathbf{1000\ kg * 0{,}8^{\,2}\ m^2}}{\mathbf{m^3 * s^2 * 2}}$$

p dyn = 320 N/m2 = 320 Pa

Zgodnie z równaniem **Bernoulliego** ciśnienie całkowite płynącej cieczy składa się z ciśnienia statycznego i dynamicznego (pominięte straty ciśnienia):

$$p_{cał} = p_{stat} + p_{dyn}$$

Gdy ciecz płynie w przewodzie rurowym o stałym przekroju wewnętrznym, maleje ciśnienie statyczne na skutek oporów tarcia.

Gdy przekrój wewnętrzny się zmniejsza, obniża się bardzo szybko ciśnienie statyczne, ponieważ dla dużych prędkości przepływu jest wymagane wysokie ciśnienie dynamiczne.

Wysokość energii hydraulicznej wody płynącej pod pewnym ciśnieniem w zamkniętym przewodzie, może być opisane równaniem Bernoulliego:

$$H_1 = h_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g}$$

gdzie:

H_1 – całkowita wysokość energii hydraulicznej,

h_1 – wzniesienie nad pewien określony poziom odniesienia,

P_1 – ciśnienie statyczne,

γ – ciężar właściwy wody,

V_1 – prędkość wody,

g – przyspieszenie grawitacyjne

Równanie Bernoulliego

Prawo Bernoulliego jest podstawowym prawem hydrodynamiki, sformułowanym w 1738 roku przez szwajcarskiego matematyka - Daniela Bernoulliego.

Dotyczy ono prawidłowości rządzącej przepływem stacjonarnym wyidealizowanej cieczy (nielepkiej, nieściśliwej).
Przepływ stacjonarny to taki, podczas którego w każdym miejscu w cieczy prędkość ruchu pozostaje stała.

Treść prawa Bernoulliego jest następująca: w czasie przepływu cieczy, suma ciśnienia statycznego i dynamicznego jest stała wzdłuż każdej linii przepływu.

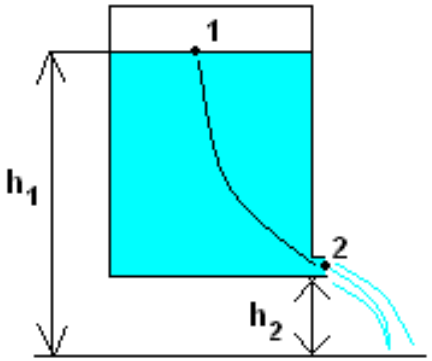
$$p + \rho g h + \tfrac{1}{2}\rho v^2 = const$$

Pierwsze dwa człony możemy ująć ogólną nazwą:

ciśnienie statyczne $P_s = p + \rho gh$, natomiast trzeci człon to ciśnienie dynamiczne $P_d = ½\rho v^2$.

Załóżmy, że przy powierzchni (punkt 1) woda nie porusza się w ogóle. A więc ma tylko ciśnienie statyczne równe: $p + \rho gh_1$.
Tuż u wylotu (w punkcie 2) ciecz ma ciśnienie statyczne równe: $p + \rho gh_2$ i ciśnienie dynamiczne: $½\rho v_{wyp}^2$.

$$\mathbf{p + \rho gh_1 = p + \rho gh_2 + ½\rho v_{wyp}^2}$$



Równanie Bernoulliego jest podstawowym równaniem mechaniki płynów.

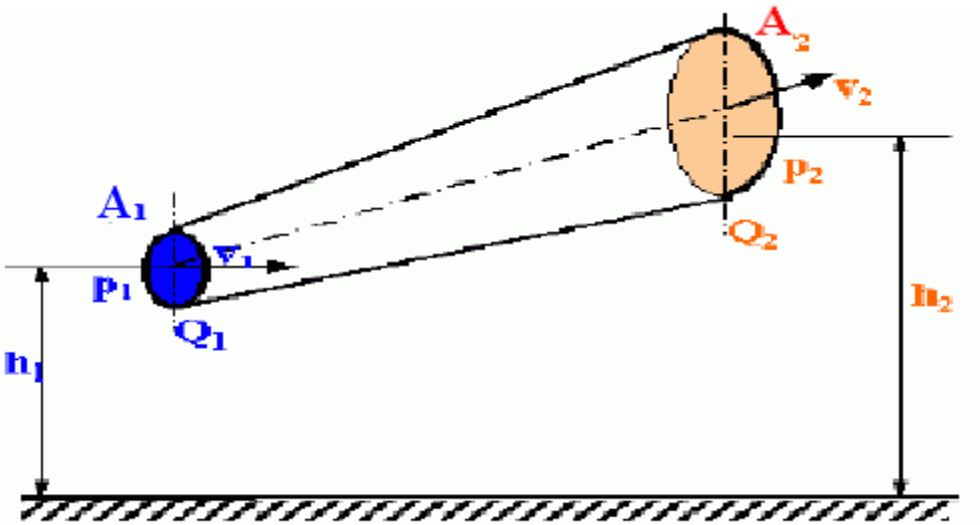
Zastosowania: np. wyznaczenie prędkości przepływu płynu na podstawie pomiarów ciśnienia, obliczenie spadku ciśnienia na określonej wysokości itd.

Dla przepływu ustalonego, nielepkiego i nieściśliwego przedstawia się:

$$p_1 + \frac{\rho \cdot {v_1}^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_1 = p_2 + \frac{\rho \cdot {v_2}^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_2$$

$$p + \frac{\rho \cdot v^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h = const$$

Równanie Bernoulliego



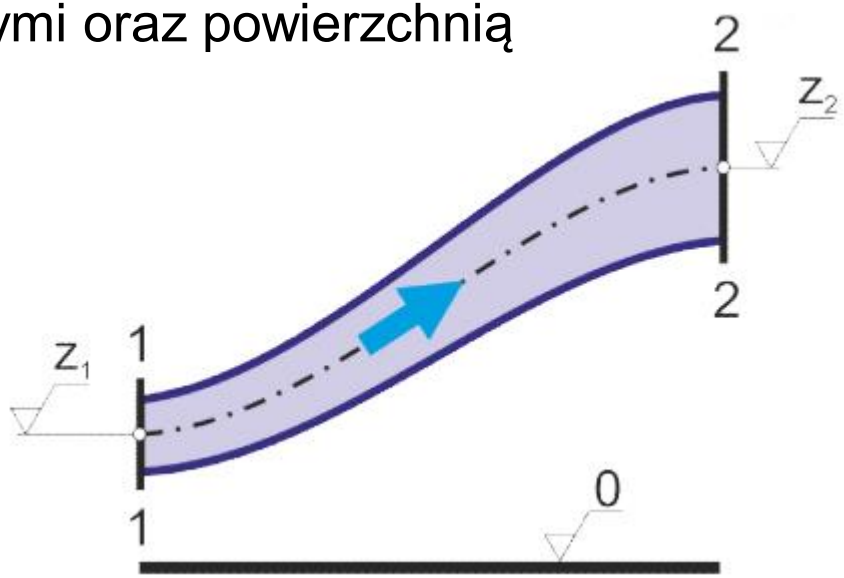
$$p_1 + \frac{\rho \cdot {v_1}^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_1 = p_2 + \frac{\rho \cdot {v_2}^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_2$$

$$p + \frac{\rho \cdot v^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h = const$$

Równanie Bernoulliego

Obliczanie przewodów, w których płynie ciecz opiera się na równaniach, które w hydraulice wyprowadzane są z zastosowania prawa zachowania energii oraz prawa zachowania masy dla strumienia – dowolnie ukształtowanego ścianami przewodu.

Strumień usytuowany jest względem dowolnie przyjętego poziomu porównawczego. W celu zastosowania praw zachowania przyjmuje się tzw. powierzchnię kontrolną, wyznaczoną dowolnie zlokalizowanymi poprzecznymi przekrojami czynnymi oraz powierzchnią boczną strumienia.



Równanie Bernoulliego

Do opisu ruchu cieczy przyjmuje się następujące założenia:

1. strumień jest ustalony, czyli wszystkie parametry fizyczne strumienia – takie jak: ciśnienie p, prędkość v, gęstość ρ, temperatura T – są stałe w czasie (*constans*);
2. strumień jest ciągły, czyli nie wydatkuje ani nie zbiera cieczy po drodze;
3. gęstość cieczy – jako płynu nieściśliwego – jest niezależna od ciśnienia, czyli na rozważanej długości strumienia jest jednakowa (taka sama, czyli *idem*);
4. strumień jest izotermiczny, czyli temperatura w rozważanym odcinku strumienia jest jednakowa (*idem*);
5. przepływająca ciecz jest lepka, w konsekwencji czego na powierzchni bocznej – ograniczającej strumień ścianami przewodu – powstają siły tarcia wewnętrznego oraz siły tarcia, w konsekwencji czego w każdym przekroju poprzecznym strumienia rozkład prędkości jest nierównomierny.

Równanie Bernoulliego

Z prawa zachowania energii przy spełnieniu założeń wynika równanie:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{1-2}$$

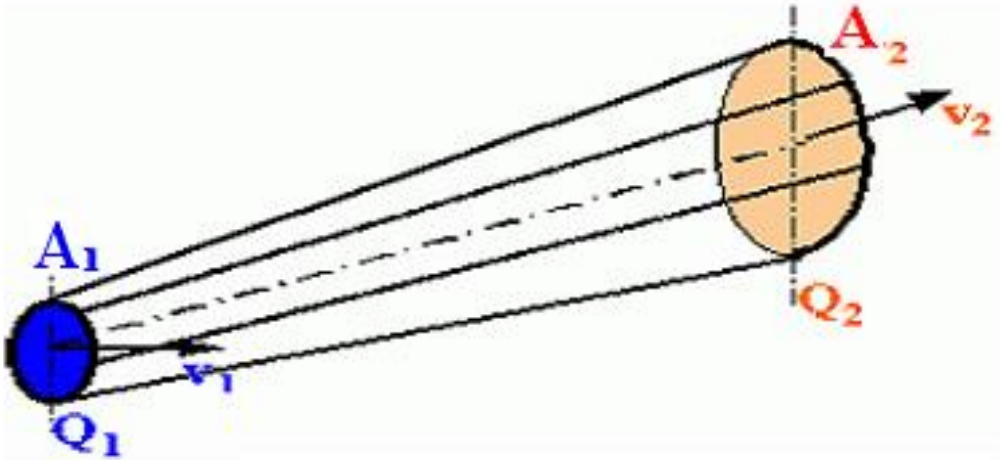
Z prawa zachowania masy przy spełnieniu założeń wynika równanie:

$$v1*A1 = v2 * A2$$

z_1, z_2 – *rzędne środków przekroju poprzecznego 1-1 i 2-2 względem poziomu porównawczego,*
p_1, p_2 – *średnia wartość ciśnienia w przekrojach 1-1 i 2-2,*
v_1, v_2 – *średnia wartość prędkości strumienia w przekrojach 1-1 i 2-2,*
A_1, A_2 – *pola powierzchni przekrojów poprzecznych 1-1 i 2-2,*
h_{1-2} – *tzw.* ***wysokość strat hydraulicznych,*** *czyli wysokość strat energii, powstających podczas przepływu cieczy od przekroju 1-1 do 2-2, powodowanych lepkością cieczy oraz przepływem przez ewentualne przeszkody (np. armaturę),*
γ – *ciężar właściwy cieczy (jednakowy pomiędzy przekrojami 1-1 i 2-2,*

Równanie ciągłości strumienia.

W przypadku przepływu płynu poruszającego się ruchem ustalonym, tzn. takim, gdzie prędkość miejscowa i ciśnienie w każdym punkcie płynu nie zmieniają się w czasie, masy płynu przepływające przez przekroje A1 i A2 są sobie równe.



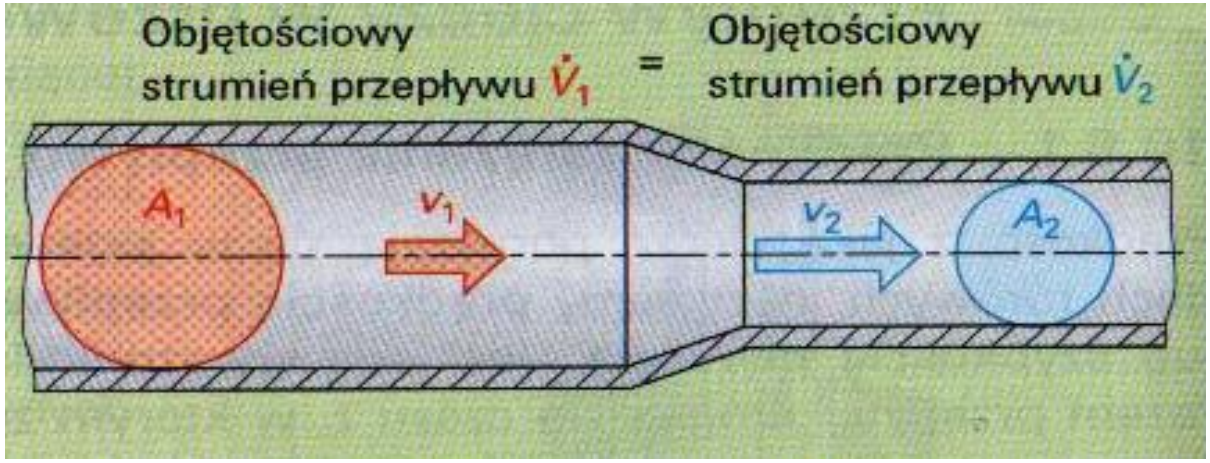
Q1 = Q2

stąd A1*v1 = A2*v2

Równanie ciągłości przepływu

W przewodzie rurowym o zmiennym przekroju wewnętrznym zależność prędkości przepływu w stosunku do przekroju wewnętrznego rury jest odwrotnie proporcjonalna.

Zmniejszenie przekroju w świetle rury powoduje zwiększenie prędkości przepływu, zwiększenie przekroju zaś zmniejszenie prędkości przepływu



[Źródło 3]

Prędkość przepływu jest tym większa, im mniejszy jest przekrój poprzeczny rury, a tym mniejsza, im większy jest przekrój wewnętrzny

Przykład obliczeniowy

Przewodem miedzianym o średnicy 22x1,0 płynie woda z prędkością 0,5 m/s. Jaka będzie prędkość przepływu wyrażona w m/s, po redukcji na 18x1,0.

Dane:
d1= 20 mm
d2= 16 mm
v1=0,5 m/s

$$A1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = 3{,}14*20^2/4 = 314\ mm^2$$

$$A2 = \frac{\pi d_2^2}{4} = 3{,}14*16^2/4 = 201 mm^2$$

Przykład obliczeniowy

$$A_1 * v_1 = A_2 * v_2$$

$$v_2 = \frac{A_1 * v1}{A_2} = \frac{314\ mm^2 * 0{,}5\ m}{201\ mm^2 * s} = 0{,}78\ m/s$$

Dla płynu nieściśliwego gęstość ρ1 = ρ2 i wtedy dla izotermicznego przepływu cieczy równanie przyjmie postać:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

Z równania wynika, że średnia prędkość przepływu płynu nieściśliwego (v) przy ustalonym przepływie w różnych przekrojach jest odwrotnie proporcjonalna do pola tych przekroju (A).

Straty energii hydraulicznej wskutek tarcia

Darcy i Weisbach zastosowali zasadę zachowania masy do objętości płynu pomiędzy dwoma przekrojami prostopadłymi do osi rury, co pozwoliło im na wyprowadzenie następującego równania dla ustalonych przepływów nieściśliwych:

$$h_f = \lambda \cdot \left(\frac{L}{D}\right) \cdot \frac{V^2}{2g}$$

λ - współczynnik tarcia – wartość bezwymiarowa,
L – długość rury w [m],
D - średnica rury w [m],
V- prędkość średnia w [m/s],
g - przyspieszenie ziemskie [9,81 m/s^2].

W przypadku przepływu laminarnego wartość λ może zostać wyliczona bezpośrednio z równania

$$\lambda = \frac{64 \cdot \nu}{V \cdot D} = \frac{64}{Re}$$

Z równania powyższego wynika, że dla przepływu laminarnego współczynnik tarcia "λ" jest niezależny od chropowatości ścianek oraz odwrotnie proporcjonalny do liczby Reynoldsa (Re).

Fakt, że wzrost liczby Reynoldsa powoduje spadek współczynnika tarcia, nie oznacza jednak, iż zwiększając prędkość przepływu zmniejszamy straty tarcia.

Podstawiając za λ w równaniu wartość współczynnika tarcia z równania , otrzymujemy:

$$h_f = \frac{64 \cdot \nu}{V \cdot D} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = \frac{32 \cdot \nu \cdot L \cdot V}{g \cdot D^2}$$

w przypadku przepływu laminarnego strata jednostkowej energii hydraulicznej jest wprost proporcjonalna do v (w) i odwrotnie proporcjonalna do D^2.

Kiedy przepływ jest praktycznie turbulentny,współczynnik tarcia staje się słabiej zależny od liczby Reynoldsa i bardziej zależny od względnej wysokości chropowatości k/D, gdzie „k" reprezentuje średnią wysokość nieregularności na ściankach rury, a D jest średnicą rury

Wartość chropowatości k dla różnych materiałów rur

Materiał	[mm]
Polietylen	0,003
Włókno szklane z żywicą	0,003
Stal, rura przemysłowa bez szwu bez szwu (nowa)	0,025
Stal, rura bez szwu (lekko skorodowana)	0,250
Stal, rura bez szwu (galwanizowana)	0,150
Stal spawana	0,600
Żeliwo (emaliowane)	0,120
Azbestocement	0,025
Drewno	0,600
Beton (stalowa forma, gładkie łączenia)	0,180

Wartość chropowatości k dla różnych materiałów rur

Wartości chropowatości bezwzględnej k dla przewodów wykonanych z różnych materiałów
(na podstawie: Recknagel i in.: „Poradnik Ogrzewanie + Klimatyzacja"
Z. Kubrak, E. Nachlik: „Hydrauliczne podstawy obliczania przepustowości koryt rzecznych"
H. Radlicz-Rühlowa, A. Szuster: „Hydrologia i hydraulika z elementami hydrologii")

Rodzaj przewodu		Średnia wysokość nierówności k [mm]
rury stalowe:	nowe	0,02 ÷ 0,10
	lekko skorodowane	0,15 ÷ 1,00
	silnie skorodowane	do ~3,00
	ocynkowane	~0,15
rury żeliwne:	nowe	~0,10
	o średnim stopniu zużycia	0,4 ÷ 0,60
	asfaltowe	0,10 ÷ 0,15
rury mosiężne		~0,0015
rury z PCV i PE		~0, 007
rury szklane		~0,003
rury giętkie		0,6 ÷ 0,8, możliwe do 2,00
rury cementowe:	gładzone	0,30 ÷ 0,80
	surowe	1,00 ÷ 2,00
rury żelbetowe, kanały betonowe		0,20 ÷ 3,00
kanały murowane		3,0 ÷ 5,0

Opory przepływu w rurociągach

Zmniejszenie ciśnienia w rurociągach spowodowane jest oporami tarcia płynu podczas przepływu i oporami powstającymi przy zmianie kierunku przepływu lub kształtu geometrycznych rurociągu.

Opory przepływu zależą od:

- długości rurociągu,
- jego średnicy,
- prędkości przepływu,
- gęstości przepływającego czynnika,
- chropowatości ścianek,
- lepkości cieczy.

Podczas transportu płynów rurociągami występują zawsze **straty ciśnienia** płynu. Wartość tych strat rzutuje na zapotrzebowanie energii zużywanej na transport płynów, a tym samym wpływa na wartość kosztów eksploatacyjnych całej instalacji przesyłowej.

Na wartość całkowitej straty ciśnienia płynu w przewodzie o stałym przekroju poprzecznym mają wpływ:

a) straty ciśnienia związane z liniowymi oporami przepływu, Δpl;

b) straty ciśnienia związane z miejscowymi oporami przepływu, Δpm;

c) straty ciśnienia związane z różnicą poziomów pomiędzy położeniem wlotu i wylotu płynu z rurociągu, Δph.

Sumaryczną stratę ciśnienia można zatem przedstawić w postaci

$$\Delta p = \Delta pl + \Delta pm + \Delta ph$$

Starty ciśnienia w prostych odcinkach rur

Dla przepływu w rurociągu o przekroju kołowym opory te wynoszą:

$$\Delta pl = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} w^2 \quad N/m2$$

gdzie: λ – funkcja liczby Reynoldsa (współczynnik oporu)

l – długość rurociągu [m]

d – wewnętrzna średnica rurociągu [m]

w – średnia prędkość przepływu [m/s]

g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2]

ρ – gęstość [kg/m3]

Współczynnik oporów liniowych λ, inaczej współczynnik tarcia, zależy od rodzaju ruchu wody w przewodzie, średnicy przewodu i stanu jego powierzchni wewnętrznej czyli stopnia chropowatości.
Rodzaj ruchu i średnicę przewodu charakteryzuje liczba Reynoldsa Re.
Dla instalacji wodociągowych, tzn. w strefie przejściowej ruchu burzliwego, wartość współczynnika
oporów liniowych λ określana jest wzorem Colebrooka Whitea:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(\frac{2{,}51}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}} + \frac{\frac{K}{d_i}}{3{,}71}\right)$$

gdzie:
K współczynnik chropowatości bezwzględnej

Wzór powyższy jest uniwersalny, daje dokładne wyniki dla całego zakresu Re.

Współczynnik oporu przepływu

$$\lambda = \frac{64}{Re} \qquad Re < 3 \cdot 10^3$$

$$\lambda = \frac{0{,}3164}{Re^{0{,}25}} \qquad 3 \cdot 10^3 < Re < 3 \cdot 10^5$$

$$\lambda = 0{,}0032 + \frac{0{,}221}{Re^{0{,}227}} \qquad 3 \cdot 10^5 < Re < 3 \cdot 10^6$$

Przy przepływie laminarnym współczynnik tarcia λ nie jest zależny od chropowatości ścianek rury i można go przedstawić zależnością:

$$\lambda = 64/Re,$$

a jednostkowy spadek ciśnienia:

$$R = 32 * \nu * \rho * w/d^2$$

λ – współczynnik tarcia,

ν - lepkość kinematyczna $m^2/s = \eta/\rho$,

η – lepkośc dynamiczna kg/ms = Ns/m2 = Pa*s,

ρ – gęstość kg/m^3

Strata ciśnienia jest proporcjonalna do prędkości

Przykład obliczeniowy

Ile wynosi jednostkowy spadek ciśnienia R w temperaturze 20ºC, w przewodzie oleju opałowego o średnicy d= 8x1 mm, przy prędkości przepływu w=0,1 m/s.

Z tabel odczytujemy ρ – gęstość kg/m^3 – 860 kg/m^3

oraz lepkość kinematyczną **v** 10^{-6} * 6 m^2/s

jednostkowy spadek ciśnienia

$$R = 32 * v * \rho * w/d^2 = \frac{32 * 6 * 860 * 0{,}1}{10^6 * 0{,}006^2} = 460 \text{ Pa/m}$$

Gdybyśmy przyjęli, że przewód ma 20 m długości to strata ciśnienia na długości wynosi $\Delta p_l = R * L = 460 * 20 = 9200$ Pa = 9,2 kPa

Opory liniowe

Spadek ciśnienia na 1 mb rury nazywamy także

oporem jednostkowym R

$$\Delta p\ l = R*l\ [N/m2]$$

Wysokość strat opisuje równanie Darcy-Weisbacha:

$$R = \frac{\lambda}{d} \frac{\rho}{2} w^2 \quad Pa/m$$

Strata ciśnienia jest zatem proporcjonalna do prędkości

Opory liniowe

Całkowita strata ciśnienia na długości wynosi:

$$\Delta pl = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} w^2 \quad N/m2$$

λ – współczynnik tarcia,

l – długość odcinka [m],

d –średnica przewodu [m],

w- prędkość średnia [m/s]

ρ – gęstość kg/m^3

Przykład obliczeniowy

Ile wynosi strata ciśnienia przy przepływie oleju opałoweg przez rurę o długości L= 100 m i średnicy d = 50 mm, przy prędkości przepływu w=0,6 m/s.

Z tabel odczytujemy ρ – gęstość kg/m^3 – 960 kg/m^3

oraz lepkość kinematyczną **v** – 10^{-6} * 303 m^2/s z tablic dot. oleju

$$Re = wd/\nu = \frac{0{,}6 * 0{,}05}{303 * 10^{-6}} = 99$$

Współczynnik tarcia λ = 64/Re = 64/99 = 0,65 dla przepływu laminarnego

Strata ciśnienia $\Delta pl = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} w^2$

$$\Delta pl = 0{,}65 \frac{100}{0{,}05} \frac{960 * 0{,}6^2}{2} = 224640 \text{ N/m2} = 225 \text{ kPa} = 2{,}25 \text{ bar}$$

Opory liniowe

Współczynnik strat liniowych uzależniony jest od dwóch parametrów:

- liczby Reynoldsa Re oraz
- chropowatości względnej przewodu e, która jest parametrem bezwymiarowym.

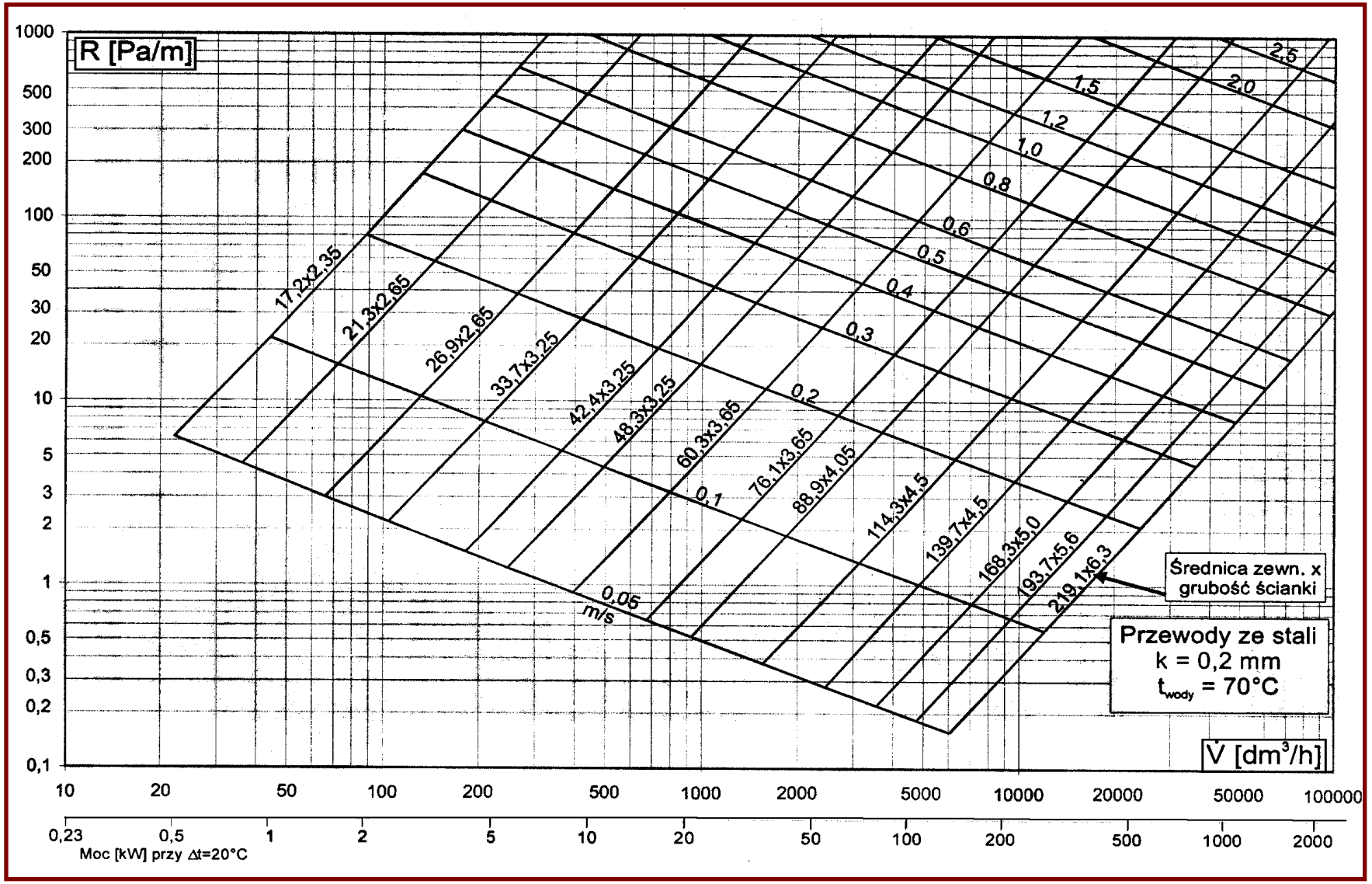
Chropowatość względna definiowana jest jako:

$$e = \frac{k}{d}$$

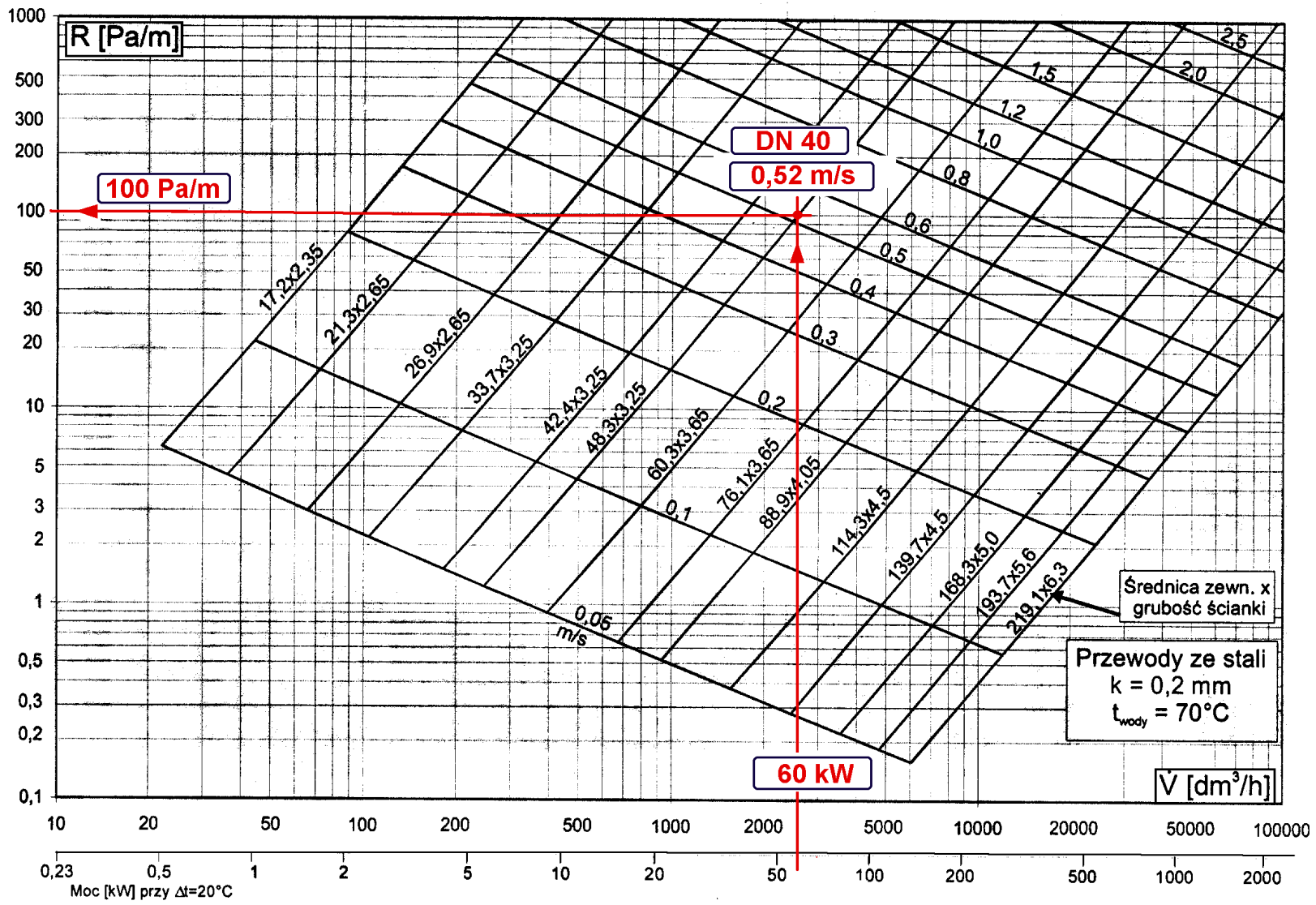
gdzie:

k - chropowatość bezwzględna [mm].

Opory przepływu

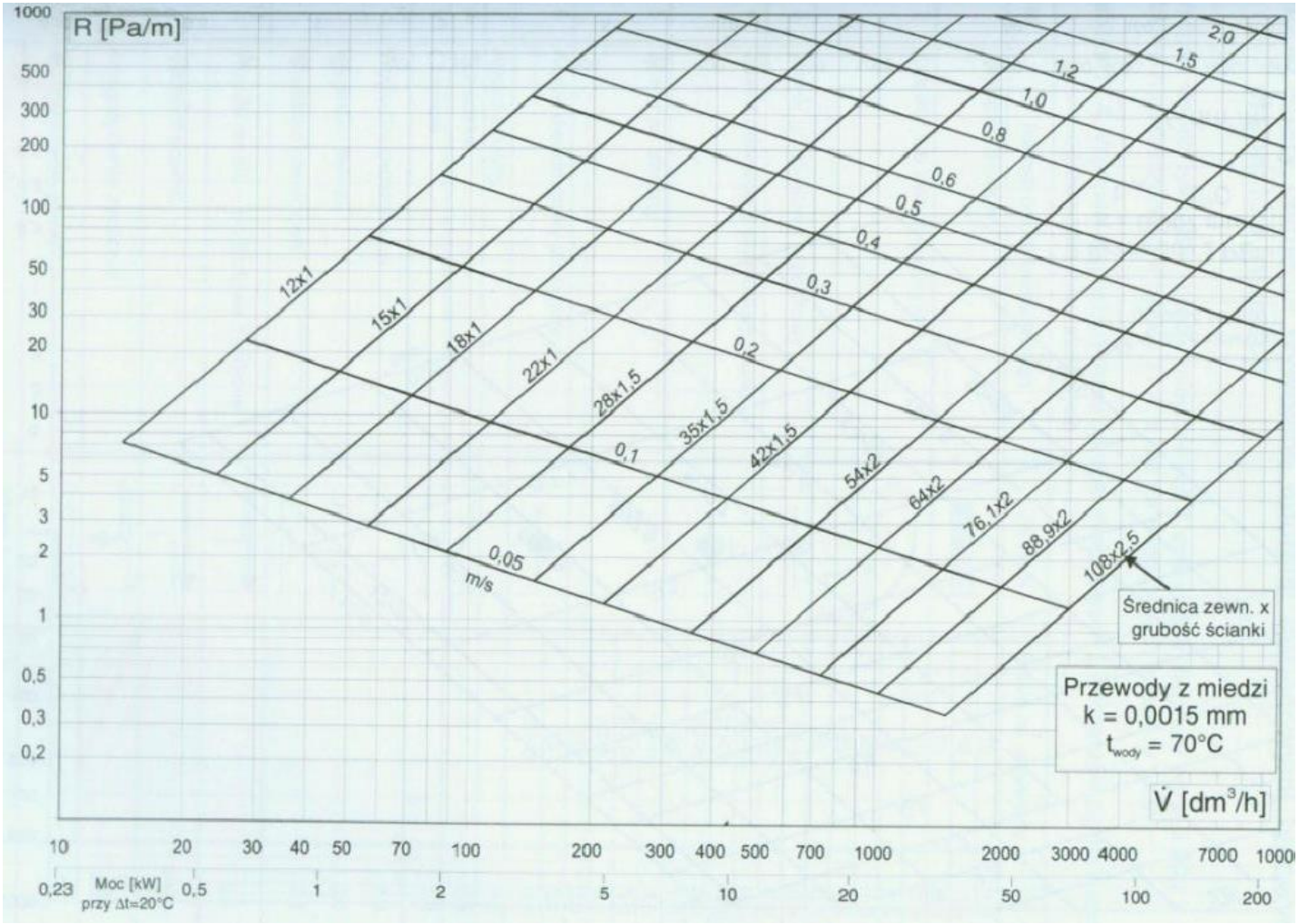


Opory przepływu



Opory przepływu

Nomogram do wyznaczania jednostkowych strat ciśnienia przy przepływie wody o temperaturze 70°C przez przewody miedziane



www.instsani.web.pl

Straty ciśnienia spowodowane występowaniem oporów miejscowych

Opory te występują głównie w miejscach zmiany średnicy przewodu, na kolanach rurociągów i łukach wężownic oraz różnych elementach armatury np. zaworach, zasuwach, kurkach, rozgałęzieniach itp.

Spadek ciśnienia w wyniku oporów miejscowych jest powodowany przez zawirowania, oderwania strugi, przepływy wtórne, wyrażany jest w odniesieniu do ciśnienia dynamicznego przepływającego płynu, zgodnie z równaniem:

$$\Delta p\ m = \xi \frac{\rho}{2} w^2 \quad N/m2$$

ξ - współczynnik oporów miejscowych, wyznaczany doświadczalnie.

Opory miejscowe

Straty spowodowane oporami miejscowymi Z zależą od rodzaju budowy oraz wielkości zainstalowanych komponentów, jak również od ciśnienia dynamicznego p_{dyn} i tym samym od prędkości przepływu w oraz gęstości przepływającego czynnika ρ

$$Z = \Sigma\xi * p_{dyn} = \Sigma\xi \frac{\rho * w^2}{2}$$

gdzie:

Z – straty ciśnienia spowodowane występowaniem oporów miejscowych [Pa],

Σξ – suma współczynników oporów miejscowych,

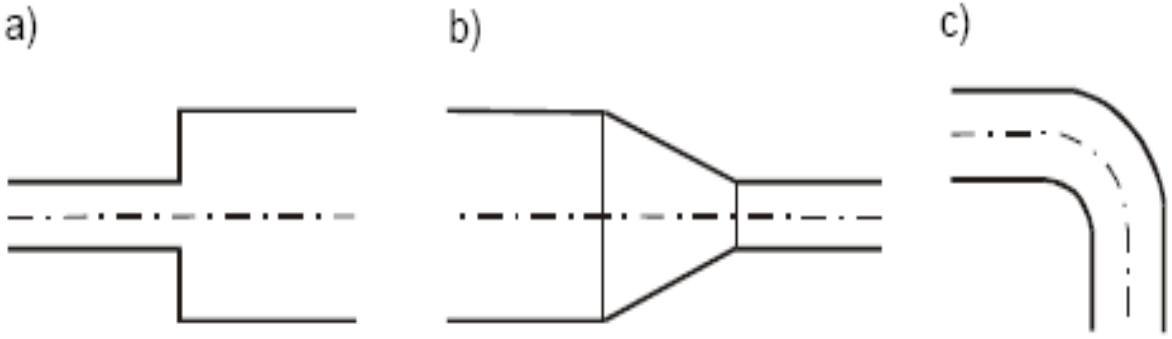
p_{dyn} – ciśnienie dynamiczne [Pa],

ρ – gęstość przepływającego czynnika [kg/m3],

w – prędkość przepływu czynnika [m/s]

Opory miejscowe

Przykłady kształtek powodujących lokalne straty energii mechanicznej:



a) gwałtowne rozszerzenie przewodu,
b) łagodne zwężenie przewodu (konfuzor),
c) kolanko 90º.

Opory przepływu

Opory miejscowe	Współczynniki oporów ζ			
Kurek przelotowy	0,2			
Kurek kątowy	2,0			
Łuk 90°	0,5			
Odsadzka	0,5			
Łuk z odnogą T	1,5			
Trójnik: • przelotowy • odgałęzienie	 0,5 1,0			
Kocioł grzewczy	2,5			
Grzejnik	2,5			
Średnica nominalna DN	10 15	20 25	32 40	50 >50
Zasuwa: ze zwężeniem przekroju bez zwężenia przekroju	1,0 0,4	0,5 0,3	0,3 0,2	0,3 0,2
Zawory: zamykający prosty zamykający skośny kątowy	10,0 3,5 4,0	7,0 3,0 2,0	5,0 2,5 2,0	4,0 2,0 1,5
Zawory grzejnikowe: przelotowy kątowy	8,5 4,0	6,0 2,0	5,0 2,0	4,0 –
Zawór zwrotny	5,0	4,0	4,0	3,5
Zawór klapowy zwrotny	2,0	1,5	1,2	1,0

1 Współczynniki oporów ζ armatury instalacji ogrzewania wodnego i parowego

[Źródło 3]

Przykład obliczeniowy

Jaka jest strata ciśnienia (Pa) zaworu przelotowego grzejnikowego o średnicy DN 20, jeżeli prędkość przepływu wody grzewczej wynosi 0,5 m/s.

Dane:

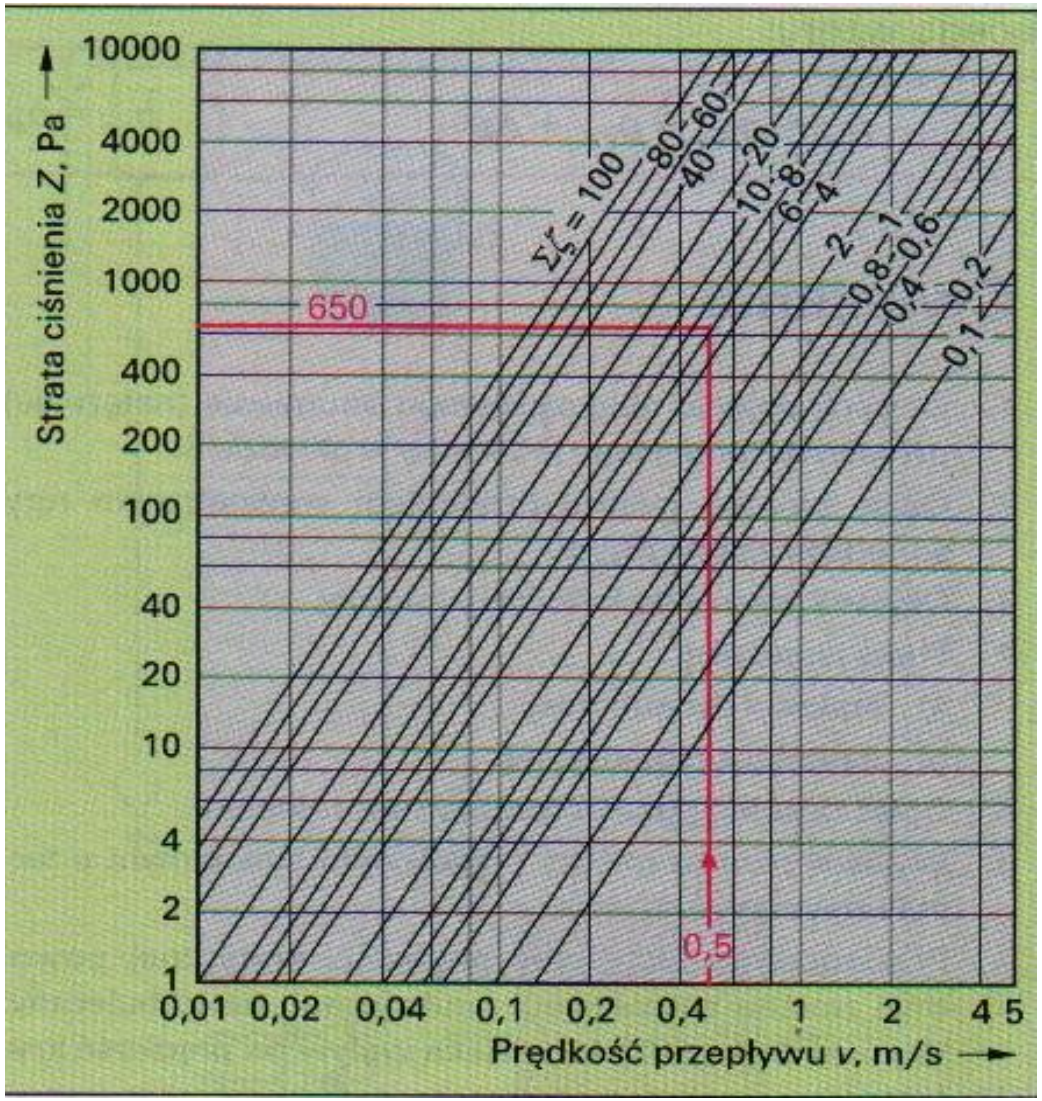
w = 0,5 m/s,

o tabeli odczytujemy Σξ dla zaworu = 6,0

odczytujemy gęstość , dla wody ρ = 1000 kg/m^3

$$Z = \Sigma\xi \frac{\rho * w^2}{2} = \frac{6 * 1000\ kg * 0{,}5^{\,2}\ m^{\,2}}{m^3\ s^2\ 2} = 750\ N/m^2 = 750\ Pa$$

Opory przepływu



Strata ciśnienia „Z” spowodowana oporami miejscowymi w wodnych instalacjach grzewczych o różnych prędkościach przepływu

[Źródło 3]

Opory przepływu

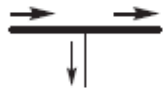
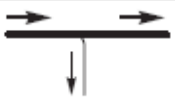
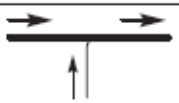
1	2		3	4	5	6
	Odgałęzienie prostokątne	Rozdział strumienia	1,30	×	×	×
		Połączenie strumienia	0,90	×	×	
		Przelot przy rozdziale strumienia	0,30	×	×	×
		Przelot przy połączeniu strumienia	0,60	×	×	
		Przeciwprąd przy połączeniu strumienia	3,00	×	×	
		Przeciwprąd przy rozdziale strumienia	1,50	×	×	×
	Rozgałęzienie łukowe	Rozdział strumienia	0,90	×	×	×
		Połączenie strumienia	0,40	×	×	
		Przelot przy rozdziale strumienia	0,30	×	×	×
		Przelot przy połączeniu strumienia	0,20	×	×	

Tabela strat miejscowych dla instalacji miedzianych

www.instsani.pl

Opory przepływu

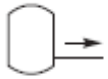
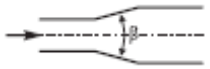
	Rozdzielacz (kolektor)	Wylot z rozdzielacza (kolektora)	0,50	×	×	
		Wlot do rozdzielacza (kolektora)	1,00	×	×	
	Zbiornik	Wylot	0,50	×		
		Wlot	1,00	×		
	Redukcja		0,40	×		×
	Zwężenie ciągłe	β = 30 ° β = 45 ° β = 60 °	0,02 0,04 0,07	× × ×	× × ×	
	Rozszerzenie ciągłe	β = 10 ° β = 20 ° β = 30 ° β = 40 °	0,10 0,15 0,20 0,20	× × × ×	× × × ×	
	Kompensator U-kształtowy		1,00	×	×	
	Kompensator mieszkowy		2,00	×	×	
1	2		3	4	5	6
	Trójnik przeciwprądowy z dwoma łukami		1,30			×
	Podłączenie gazomierza	DN 25	2,00			×
		> DN 25	4,00			×

Tabela strat miejscowych dla instalacji miedzianych

www.instsani.pl

Opory przepływu

	Zawory odcinające	proste	DN 15 DN 20 DN 25 DN 32 DN 40 do DN 100	10,0 8,5 7,0 6,0 5,0	× × × × ×	× × × × ×	
		skośne	DN 15 DN 20 DN 25 do DN 50 DN 65	3,5 2,5 2,0 0,7	× × × ×	× × × ×	
		kątowe	DN 10 DN 15 DN 20 DN 25 do DN 50 DN 65 do DN 100	7,0 4,0 2,0 3,5 4,0	× × × × ×	× × × × ×	
	Zawory membranowe		DN 15 DN 20 DN 25 DN 32 DN 40 do DN 100	10,0 8,5 7,0 6,0 5,0	× × × × ×		
	Zawory odcinające	suwakowe tłokowe, kulowe	DN 10 do DN 15 DN 20 do DN 25 DN 32 do DN 150	1,0 0,5 0,3	× × ×	× × ×	×
	Zawór grzejnikowy	prosty		4,0		×	
		kątowy		2,0		×	
	Kurek odcinający	kulowy	przelotowy	2,0			×
		kulowy	kątowy	5,0			×
			przelotowy	0,5			×
			kątowy	1,3			×

Tabela strat miejscowych dla instalacji miedzianych

www.instsani.pl

Tabela strat miejscowych dla instalacji miedzianych

	Zawór zwrotny	DN 15 do DN 20 DN 25 do DN 40 DN 50 DN 65 do DN 100	7,7 4,3 3,8 2,5	× × × ×		
	Zawór przelotowy z zaworem zwrotnym	DN 20 DN 25 do DN 50	6,0 5,0	× ×		
	Nawiertka rurowa DN 25 do DN 80		5,0	×		
1	2		3	4	5	6
	Reduktor ciśnienia całkowicie otwarty		30,0	×		
	Kocioł grzejny		2,5		×	
	Grzejnik, radiator		2,5		×	
	Grzejnik płytowy		3,0		×	

www.instsani.pl

Maksymalne dopuszczalne prędkości przepływu dla przewodów różnych średnic ze stali podano w tabeli

Tabela: Maksymalne dopuszczalne prędkości przepływu wody w przewodach stalowych dla ogrzewań wodnych

dn [mm]	10	15	20	25	32	40	ponad 50
v_{dop} [m/s]	0,30	0,50	0,65	0,80	1,00	1,20	1,50

W instalacjach c.o. nigdy nie należy przekraczać prędkości 1 m/s ze względu na szumy.
Prędkość przepływu wody w przewodach miedzianych małych średnic tzn. do 22 mm nie powinna przekroczyć 0,3 m/s, natomiast w większych od 28 mm nie powinna przekroczyć 0,5 m/s.

Maksymalne dopuszczalne prędkości przepływu w przewodach miedzianych

Maksymalne prędkości przepływu

Rodzaj instalacji	Rodzaj przewodu	Prędkość maksymalna m/s
Instalacja wodociągowa	Przewody rozdzielcze i piony	1,0
	Połączenia od pionów do punktów czerpalnych	2,0
	Przewody cyrkulacyjne	0,5
Instalacja ogrzewania	Przewody o średnicy do 28mm	0,3
	Przewody o średnicy powyżej 28mm	0,5
Instalacja gazowa na paliwo gazowe	Wszystkie przewody	6,0

Tabela strat miejscowych dla instalacji gazowych

Tabela 1. Długości zastępcze rurociągów gazowych stalowych równoważne oporom miejscowym.

Rodzaj oporu miejscowego	Średnice nominalne, mm								
	15	20	25	32	40	50	65	80	100
Kurek – K	0,10	0,15	0,15	0,20	0,20	0,25	0,40	0,40	0,55
Kolano – KI	0,20	0,50	0,70	0,90	1,70	1,70	2,70	2,70	3,30
Zwężka	0,10	0,30	0,40	0,50	0,60	0,90	1,40	1,40	1,60
Trójnik – przelot Tp	0,20	0,60	0,80	1,00	1,20	1,90	2,80	2,80	3,70
Trójnik – odnoga To	0,30	0,90	1,20	1,50	1,85	2,80	4,20	4,20	5,50

www.instsani.pl

Dobór średnicy rury gazowej powinien uwzględniać warunek dopuszczalnej prędkości przepływu gazu w przewodach gazowych rzędu 6m/s.

Opory miejscowe można zastąpić w obliczeniach równoważnymi im oporami tarcia zastępczych odcinków rurociągu prostego zgodnie z tabelą

Tabela strat miejscowych dla instalacji gazowych

Tabela 2. Długości zastępcze j.w. ale dla rur miedzianych

Średnica zewnętrzna (nominalna)	Długość zastępcza elementu instalacj					
	kurek kulowy	kurek kątowy	kolanko	zwężka	trójnik z głównym przepływem gazu pod kątem	
					0 °C	90 °C
mm	m	m	m	m	m	m
1	2	3	4	5	6	7
12	0,10	0,30	0,40	0,10	0,10	0,25
15	0,15	0,40	0,55	0,10	0,15	0,40
18	0,30	0,70	1,30	0,10	0,40	0,90
22	0,30	0,70	1,30	0,15	0,40	1,10
28	0,30	0,80	1,30	0,20	0,50	1,40
35	0,40	1,10	1,80	0,25	0,70	1,90
42	0,50	1,70	1,90	0,30	1,00	2,70
54	0,60	2,10	2,10	0,50	1,30	3,20
76,1	0,90	3,00	2,90	0,70	1,80	4,50
88,9	1,00	4,20	3,30	0,80	2,10	5,20
108	1,25	5,40	3,70	0,90	2,50	6,20

www.instsani.pl

Tabela strat miejscowych dla sieci cieplnych

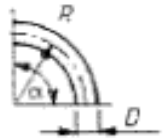
Współczynniki oporów miejscowych ζ												
dn	Kolano		Trójnik przelot		Trójnik odgałęzienie		Trójnik zbieżny		Zwężka		Rozszerzenie	
	R=1,5D	R=3,5D	zasilanie	powrót	zasilanie	powrót	zasilanie	powrót	o 1xdn	o 2xdn	o 1xdn	o 2xdn
[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
20	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	3,0	3,0	1,5	1,0	0,2	1,0
25	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	3,0	3,0	1,5	1,0	0,2	1,0
32	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	3,0	3,0	1,5	1,0	0,2	1,0
40	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	3,0	3,0	1,5	1,0	0,2	1,0
50	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	3,0	3,0	1,5	1,0	0,2	1,0
65	0,5	0,4	0,5	1,0	1,5	1,0	3,0	3,0	1,5	1,0	0,2	1,0
80	0,5	0,4	0,5	1,0	1,5	1,0	3,0	3,0	1,5	1,0	0,2	1,0
100	0,5	0,4	0,5	1,0	1,5	1,0	3,0	3,0	1,5	1,0	0,2	1,0
125	0,5	0,3	0,5	1,0	1,5	1,0	3,0	3,0	1,5	1,0	0,2	1,0
150	0,5	0,3	0,5	1,0	1,5	1,0	3,0	3,0	1,5	1,0	0,2	1,0
200	0,5	0,3	0,5	1,0	1,5	1,0	3,0	3,0	1,5	1,0	0,2	1,0
250	0,4	0,3	0,5	1,0	1,5	1,0	3,0	3,0	1,5	1,0	0,2	1,0
300	0,4	0,3	0,5	1,0	1,5	1,0	3,0	3,0	1,5	1,0	0,2	1,0

www.instsani.pl

Obliczając prędkość przepływu czynnika cieplnego należy przyjmować maksymalne prędkości przepływu:

- 2,0-3,0 m/s dla przewodów magistralnych
- 1,0-2,0 m/s dla odgałęzień od przewodu głównego
- 1,0 /s dla przyłączy do budynku

Tabela strat miejscowych dla sieci cieplnych

Lp.	Nazwa oporu miejscowego / Średnica rury $D_z \times g$		38×2,9	44,5×2,9	57×2,9	76×3	89×3,5	108×4	133×4	159×4,5	219×6	273×7,1	323,9×8	355,6×8	406,4×8,8	508×11
1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Zasuwa lub zawór kulowy (dane orient.)		–	0,2	0,3	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	2,8	3,4	4,5
2	Zawór grzybkowy		5,4	6,3	7,8	9,5	11,5	16,9	22,1	28,0	46,9	67,8	90,2	104	–	–
3	Zawór kątowy		3,2	3,9	5,7	7,9	10,6	16,1	19,5	21,0	26,9	26,6	–	–	–	–
4	Zawór zwrotny grzybkowy		5,1	6,9	10,4	14,9	21,2	31,3	36,9	38,2	44,9	–	–	–	–	–
5	Odmulnik min		7,4	9,1	12,1	15,8	20,1	28,8	35,9	44,6	69,9	93,1	117	132	158	211
6	Odmulnik max		10,5	12,9	17,3	22,5	28,7	41,2	51,3	63,7	99,8	133,0	167	189	226	301
7	Wydłużka mieszkowa		–	–	–	–	–	0,4	0,5	0,6	1,0	1,3	1,7	1,9	2,3	3,0
8	Wydłużka U-kształtowa		Przyjmować jak 4 łuki 90° o odpowiednim R/D													
9	 Łuk gładki	$\alpha = 30°$	$R/D = 3$	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,6	0,7	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,9
10			$R/D = 4$	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,9	1,0	1,1	1,2	1,4	1,7
11		$\alpha = 45°$	$R/D = 3$	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	1,7	1,9	2,0	2,2	2,7
12			$R/D = 4$	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	0,9	1,3	1,5	1,6	1,7	1,9	2,4
13		$\alpha = 60°$	$R/D = 3$	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,8	1,0	1,2	1,9	2,1	2,3	2,4	2,7	3,3
14			$R/D = 4$	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,6	1,8	2,0	2,1	2,4	2,9
15		$\alpha = 90°$	$R/D = 3$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	1,2	1,5	2,4	2,6	2,9	3,1	3,5	4,3
16			$R/D = 4$	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,9	1,1	1,3	2,1	2,3	2,5	2,7	3,0	3,7
17	Łuk segmentowy	$\alpha = 45°$	$R/D = 3$	–	–	–	–	–	–	–	–	2,2	2,6	3,1	3,3	3,8	4,7
18		$\alpha = 60°$	$R/D = 2$	–	–	–	–	–	–	–	–	3,0	3,5	4,2	4,5	5,2	6,4
19		$\alpha = 60°$	$R/D = 3$	–	–	–	–	–	–	–	–	2,2	2,6	3,1	3,3	3,8	4,7
20		$\alpha = 90°$	$R/D = 2$	–	–	–	–	–	–	–	–	6,0	7,2	8,3	9,1	10,3	12,8
21		$\alpha = 90°$	$R/D = 3$	–	–	–	–	–	–	–	–	4,2	5,0	5,8	6,3	7,2	8,9

www.instsani.pl

Straty ciśnienia związane z różnicą położenia wlotu i wylotu rurociągu Δph

W przypadku rurociągu którego wlot i wylot różnią się poziomem położenia, różnica ciśnienia płynu na obu jego końcach jest związana również z jego ciśnieniem hydrostatycznym. Można zatem napisać:

$$\Delta ph = \rho * g * h$$

gdzie:

ρ - gęstość płynu, kg/m3

g - przyśpieszenie ziemskie, m/s2

h - różnica poziomów między wlotem a wylotem z przewodu, m

Strata ciśnienia, która jest spowodowana różnicą poziomów, wynikającą z różnicy gęstości gazu i powietrza jest wyznaczana ze wzoru.

$$\Delta p_{H_i} = g \times \Delta H_i \times (\rho - \rho_p)$$

gdzie:
g - 9,81 m/s^2; przyspieszenie ziemskie,
ΔH_i -różnica wysokości na i-tym odcinku, w metrach; wielkość ta ma znak (+) przy przepływie
gazu do góry oraz znak (-) przy przepływie gazu w dół,
ρ - gęstość gazu, w kilogramach na metr sześcienny,
ρ_p -1,293 kg/m3; gęstość powietrza.

Współczynnik przepływu kv

Alternatywnie straty ciśnienia, wywołane oporem miejscowym można określić na podstawie współczynnika przepływu kv.

Współczynnik przepływu kv – przepływ wody przez zawór, wyrażony w metrach sześciennych na godzinę, przy spadku ciśnienia na zaworze równym 1 bar. Znając współczynnik przepływu kv, straty ciśnienia oblicza się w następujący sposób:

$$\Delta p = 100\,000 \cdot \left(\frac{Q}{k_v}\right)^2, \text{Pa}$$

gdzie: Q – strumień objętościowy, m3 /h,
kv – współczynnik przepływu, m3 /h.

Współczynnik przepływu kv

Korzystając z równania należy zwrócić uwagę na jednostki.
Ponieważ współczynnik przepływu kv wyrażony jest w m3 /h, to również strumień należy podstawiać w tych jednostkach.
Mnożnik 100 000 przelicza otrzymany wynik z barów, które występują w definicji współczynnika przepływu kv, na paskale.

Im większą wartość przyjmuje współczynnik przepływu kv, tym mniejszy jest opór. Jest to zależność odwrotna niż w przypadku współczynnika oporu miejscoweg. Mimo, że współczynnik przepływu kv został oryginalnie zdefiniowany dla zaworów, można go zastosować dla dowolnego oporu miejscowego, np. dla grzejnika.

Współczynnik przepływu kv

Współczynnik przepływu określa charakterystykę hydrauliczną armatury regulacyjnej i oznacza strumień objętościowy wody (w m3/h) przepływający przez zawór przy różnicy ciśnień 1 bar.

Określa się go z zależności:

$$k_v = m/\sqrt{\Delta p}, \; m^3/h$$

m - strumień objętościowy wody, m3/h

Δp – opór przepływu zaworu, bar

Miejscowe opory przepływu

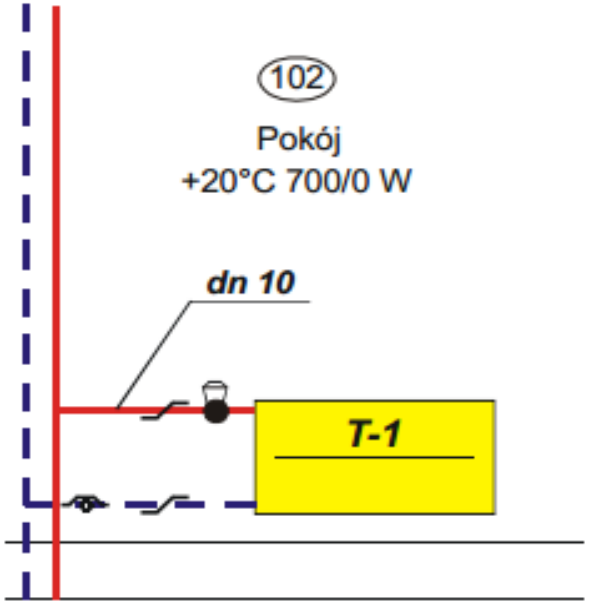
Przykład.

Określić **opory miejscowe** w działce z grzejnikiem, bez uwzględniania zaworu grzejnikowego.Opór grzejnika uwzględnić w sposób orientacyjny na podstawie współczynnika oporu miejscowego. Instalacja z rur stalowych w układzie pionowym. Prędkość wody w działce 0,070 m/s. Średnia temperatura wody: 70ºC.

Gęstość wody dla temperatury 70ºC wynosi 977,8 kg/m3 .

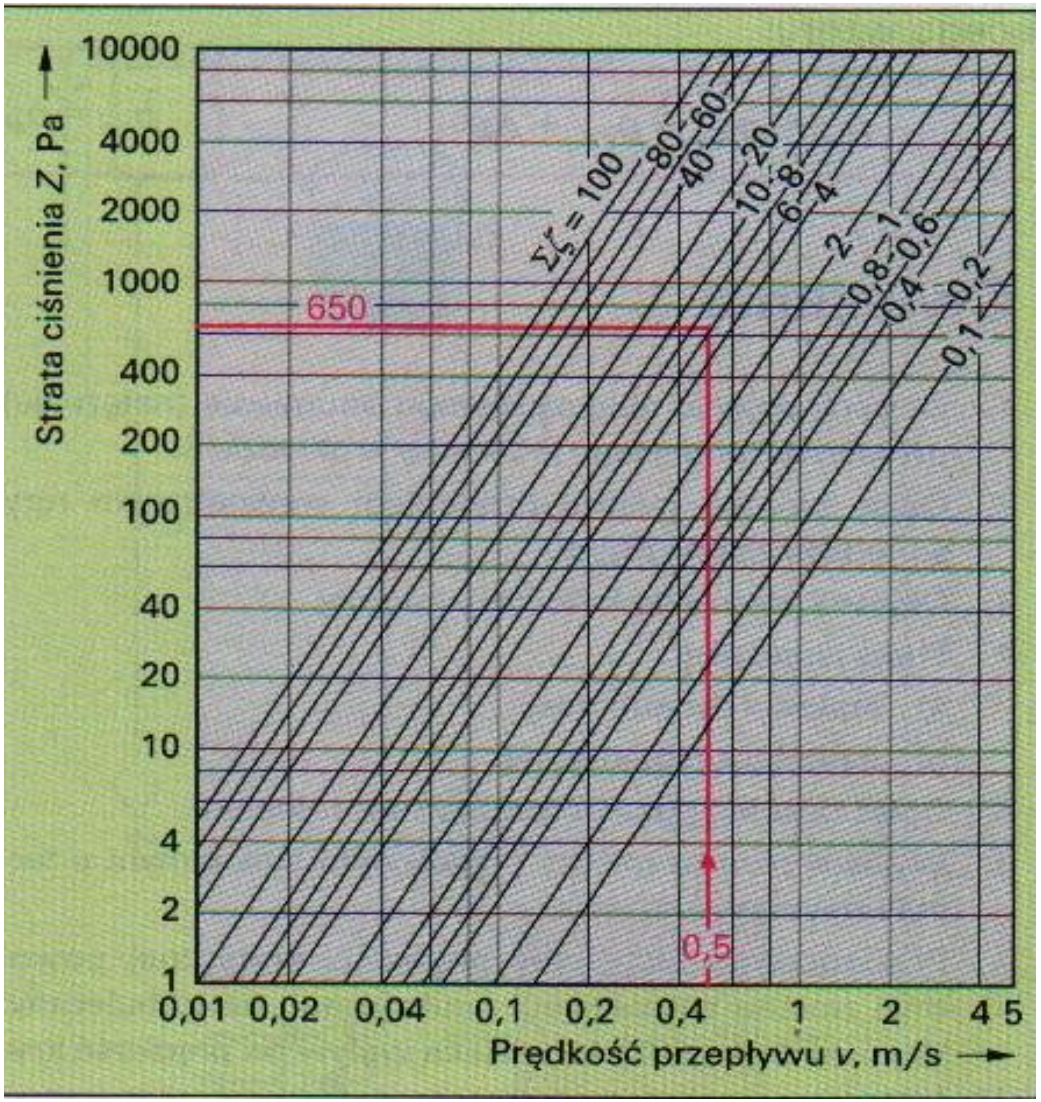
Obliczenie sumy współczynników oporów miejscowych występujących w działce:

Opór	Współczynnik oporu miejscowego ζ
trójnik odgałęzienie zasilanie	1,5
trójnik odgałęzienie powrót	1,0
odsadzka	2 × 0,5
obejście	1,0
grzejnik członowy	3,0
RAZEM	7,5



$$Z = \sum \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 7{,}5 \cdot \frac{0{,}07^2}{2} \cdot 977{,}8 = 18 \text{ Pa}$$

[Źródło 9]


Strata ciśnienia Z, Pa
10000
4000
2000
1000
400
200
100
40
20
10
4
2
1
650
0,5
$\Sigma\zeta = 100$
80
60
40
20
10
8
6
4
2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0,1
0,01
0,02
0,04
0,1
0,2
0,4
1
2
4
5
Prędkość przepływu v, m/s

Opór hydrauliczny obiegu

Opór hydrauliczny obiegu jest równy sumie oporów działek wchodzących w jego skład:

$$\Delta p_{obj} = \sum_{i=1}^{n} \left(R_i \cdot L_i + Z_i \right) = \sum_{i=1}^{n} \Delta p_{dzi}, \text{ Pa}$$

gdzie:

- n – ilość działek w obiegu,
- R_i – jednostkowa liniowa strata ciśnienia w i-tej działce, Pa/m,
- L_i – długość i-tej działki, m,
- Z_i – straty ciśnienia wywołane przez opory miejscowe w i-tej działce, Pa,
- Δp_{dzi} – straty ciśnienia w i-tej działce, Pa.

Zasady równoważenia hydraulicznego

Podstawową zasadą równoważenia hydraulicznego obiegu jest wyrównanie strat ciśnienia (przy obliczeniowych strumieniach wody) z działającym w tym obiegu ciśnieniem czynnym.

$$\Delta p_{cz} \approx \Delta p_{obj}$$

gdzie: Δpcz – ciśnienie czynne w obiegu, Pa,
Δpobj – starty ciśnienia w obiegu przy obliczeniowych strumieniach wody, Pa.

Dopuszcza się błąd w zrównoważeniu obiegu do 10%:

$$\delta = \frac{\left|\Delta p_{cz} - \Delta p_{obj}\right|}{\Delta p_{cz}} \leq 10\%$$

Zasady równoważenia hydraulicznego instalacji c.o.

1. Wartości oporu hydraulicznego i ciśnienia czynnego powinny być do siebie zbliżone. Błąd nie powinien przekraczać 10%.
2. W przypadku ręcznych zaworów grzejnikowych, opór działki z grzejnikiem powinien być większy lub równy minimalnemu oporowi działki z grzejnikiem.
3. Autorytet zewnętrzny zaworu termostatycznego powinien wynosić przynajmniej 30%.

Autorytet zewnętrzny zaworu – stosunek straty ciśnienia na zaworze do całkowitego oporu hydraulicznego w obiegu lub tej jego części, w której różnica ciśnienia jest stabilizowana.

$$Av >= 0,3$$

Dławienie nadmiaru ciśnienia

Do dławienia nadmiaru ciśnienia w obiegu stosuje się armaturę do regulacji wstępnej (zawory grzejnikowe i zawory odcinające z regulacją wstępną). Wcześniej nadmiary ciśnienia w obiegach były dławione poprzez kryzy dławiące.

Określanie średnicy kryzy

W instalacjach grawitacyjnych dla zrównoważenia ciśnienia w obiegach stosuje się kryzy. Średnicę kryzy dławiącej nadwyżkę ciśnienia określić można wykorzystując wzór:

$$d_{kr} = 3{,}56 \sqrt[4]{m^2/\Delta p}\ , mm$$

m – strumień czynnika grzejnego, kg/h

Δp – spadek ciśnienia na kryzie, Pa

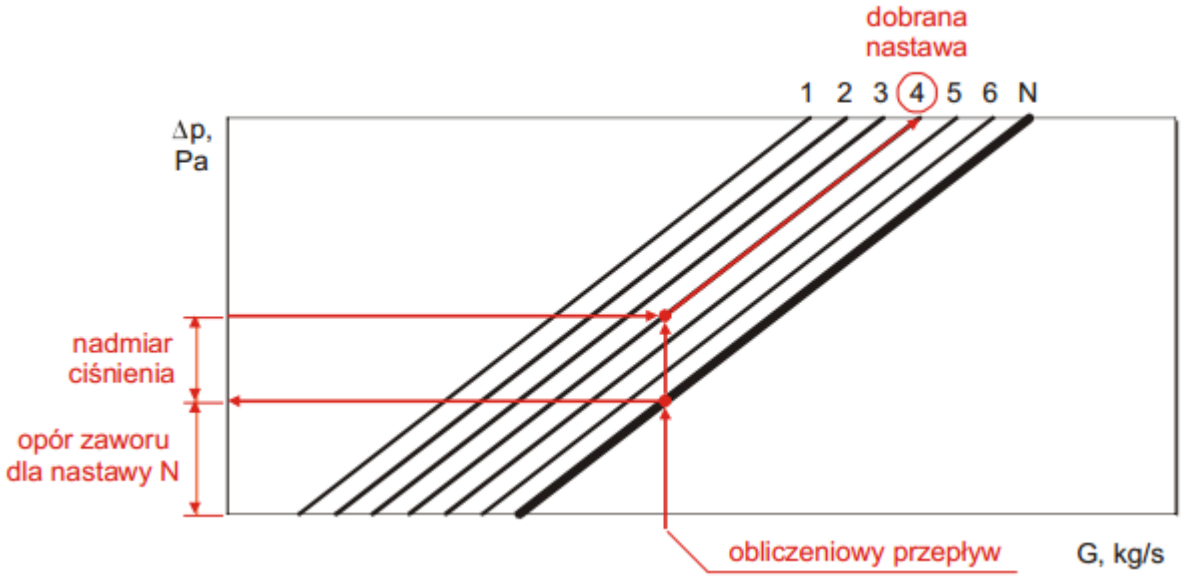
Zawory z nastawą wstępną

W przypadku doboru zaworów z nastawą wstępną istnieją dwa sposoby:

- sposób podstawowy,
- sposób uproszczony.

Sposób podstawowy

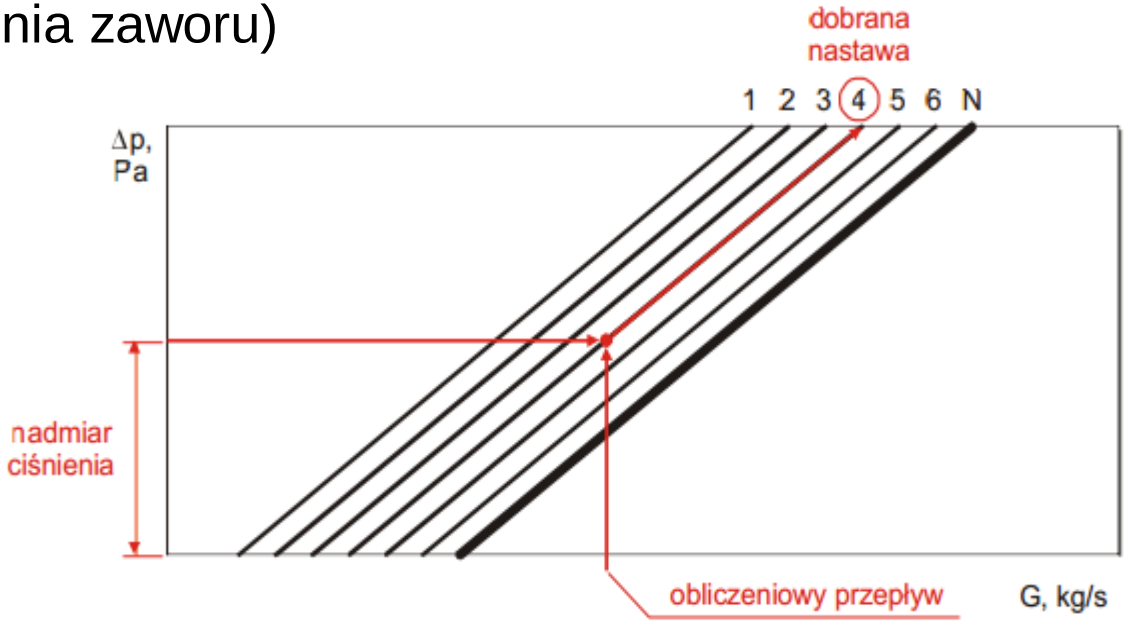
1. Najpierw oblicza się straty ciśnienia w obiegu. Opór zaworu z regulacją wstępną uwzględnia się dla maksymalnej nastawy (nastawy „N”).
2. Jeżeli spełniony jest warunek na wyrównanie ciśnień to obieg uważa się za zrównoważony.
3. Jeżeli nie, oblicza się nadmiar ciśnienia w obiegu i dobiera się tak nastawę na zaworze, aby zawór dodatkowo zdławił obliczony nadmiar ciśnienia.



[Źródło 9].

Sposób uproszczony

1. Najpierw oblicza się straty ciśnienia w obiegu. Nie uwzględnia się oporu zaworu z regulacją wstępną. (W przypadku grzejników zaworowych nie uwzględnia się oporu grzejnika, ponieważ charakterystykę hydrauliczną dla tego typu grzejników określa się dla kompletu grzejnika z zaworem).
2. Dobiera się nastawę na zaworze, tak aby jego całkowity opór był w przybliżeniu równy nadmiarowi ciśnienia w obiegu (obliczonemu bez uwzględnienia zaworu)



[Źródło 9].

Projektowanie sieci przewodów polega na dobraniu średnic przewodów i elementów regulacyjnych w celu:

- zapewnienia odpowiedniego rozdziału czynnika grzejnego do poszczególnych grzejników,
- zapewnienia stateczności cieplnej i hydraulicznej instalacji,
- optymalizacji kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych.

Tok postępowania przy obliczaniu instalacji grzewczej

1. Założenie parametrów obliczeniowych, temperatury zasilania i powrotu
2. Obliczenie strat ciepła pomieszczeń, dobór grzejników, rozmieszczenie grzejników, dobór źródła ciepła
3. Rozmieszczenie na rzutach kondygnacji pionów
4. Rozmieszczenie pionów na rzucie piwnicy i zaprojektowanie rozprowadzenia przewodów w piwnicy oraz podłączenia instalacji do źródła ciepła (kotła).
5. Wykonanie rysunku rozwinięcia instalacji c.o.
6. Sprawdzenie warunku rozruchu instalacji (grawitacyjna)

7. Podział instalacji na działki obliczeniowe.
8. Obliczenie ciśnienia czynnego.
9. Określenie obiegu najbardziej niekorzystnego.
10. Określenie oporu orientacyjnego i strumieni przepływu na działkach.
11. Dobór średnic.
12. Dobór kryz grzejnikowych, nastaw na zaworach termostatycznych

Prędkość czynnika w przewodzie

$$w = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\dot{m}}{A * \rho}$$

Prędkość wody dla przekroju kołowego można obliczyć w następujący sposób

$$w = \frac{4 \cdot G}{\Pi \cdot d_w^2 \cdot \rho}, \text{m/s}$$

G, m– strumień masowy wody płynącej w działce, kg/s.

Jak obliczyć strumień czynnika w warunkach obliczeniowych c.o. ?`

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{c_p * (t_z - t_p)}$$

Obciążenie cieplne działki, [W]

t_z- temp. czynnika zasilającego c.o.
t_p- temp. czynnika powrotnego c.o.

Ciepło właściwe wody, 4190 [J/kgK]

Działka – odcinek instalacji o jednakowej średnicy i jednakowym przepływie, wraz z zamontowanymi na nim urządzeniami.

Obieg – zespół przewodów, którymi woda przepływa od źródła ciepła do grzejnika i z powrotem wraz z zamontowanymi urządzeniami.
W skład obiegu wchodzą :
− źródło ciepła (kocioł, wymiennik ciepła),
− grzejnik,
− przewody łączące źródło ciepła z grzejnikiem

Obieg najbardziej niekorzystny – jako **najniekorzystniej usytuowany grzejnik**

- najniżej (instalacja grawitacyjna) /najwyżej położony (instalacja pompowa)
- najdalej położony od źródła – największa długość poziomych przewodów rozprowadzających,
- o większym obciążeniu cieplnym – większy strumień przepływu czynnika grzejnego

Dziękuję za uwagę

Zapraszam na kolejny wykład

mgr inż. Alina Jeszke-Tymkowska