

Ćwiczenie nr 2

Wyznaczanie współczynnika oporów liniowych i współczynnika strat miejscowych w ruchu turbulentnym.

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z laboratoryjną metodą wyznaczenia wartości współczynników oporów liniowych oraz współczynnika strat miejscowych w ruchu turbulentnym.

1. Część teoretyczna

1.1. Straty wysokości ciśnienia w przewodach prostoosiowych (liniowe).

Straty energii mechanicznej wywołane oporami przy przepływie wzdłuż odcinka przewodu, noszą nazwę oporów liniowych lub oporów na długości. Wysokość strat opisuje równanie *Darcy-Weisbacha*:

$$\Delta h = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad [2.1]$$

gdzie:

- Δh - wysokość straty ciśnienia piezometrycznego; [m H₂O],
- λ - współczynnik oporów liniowych (liniowych oporów tarcia); [-],
- l - długość przewodu; [m],
- d - średnica wewnętrzna przewodu; [m],
- v - średnia prędkość przepływu cieczy w przekroju poprzecznym ; [m/s],
- g - przyspieszenie ziemskie; 9,81 [m/s²].

Współczynnik strat liniowych λ uzależniony jest od dwóch parametrów: liczby *Reynoldsa* Re oraz chropowatości względnej przewodu e , która jest parametrem bezwymiarowym. Chropowatość względna definiowana jest jako:

$$e = \frac{k}{d} \quad [2.2]$$

gdzie:

- k - chropowatość (zastępcza chropowatość piaskowa); [m].

Chropowatość k utożsamiana jest ze średnią wysokością nierówności na wewnętrznej powierzchni rury, precyzyjnie należałoby ją określić jako miarę rzeczywistego "stanu powierzchni" przewodu wynikającego nie tylko z wielkości ale również rozmieszczenia nierówności wynikających z materiału przewodu, nagromadzonych osadów, ale również niedokładności kołowego kształtu przewodu, strat miejscowych na połączeniach rur wynikających z technologii montażu itp.

Liczba *Reynoldsa*:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad [2.3]$$

gdzie:

ν – kinematyczny współczynnik lepkości; $[m^2/s]$.

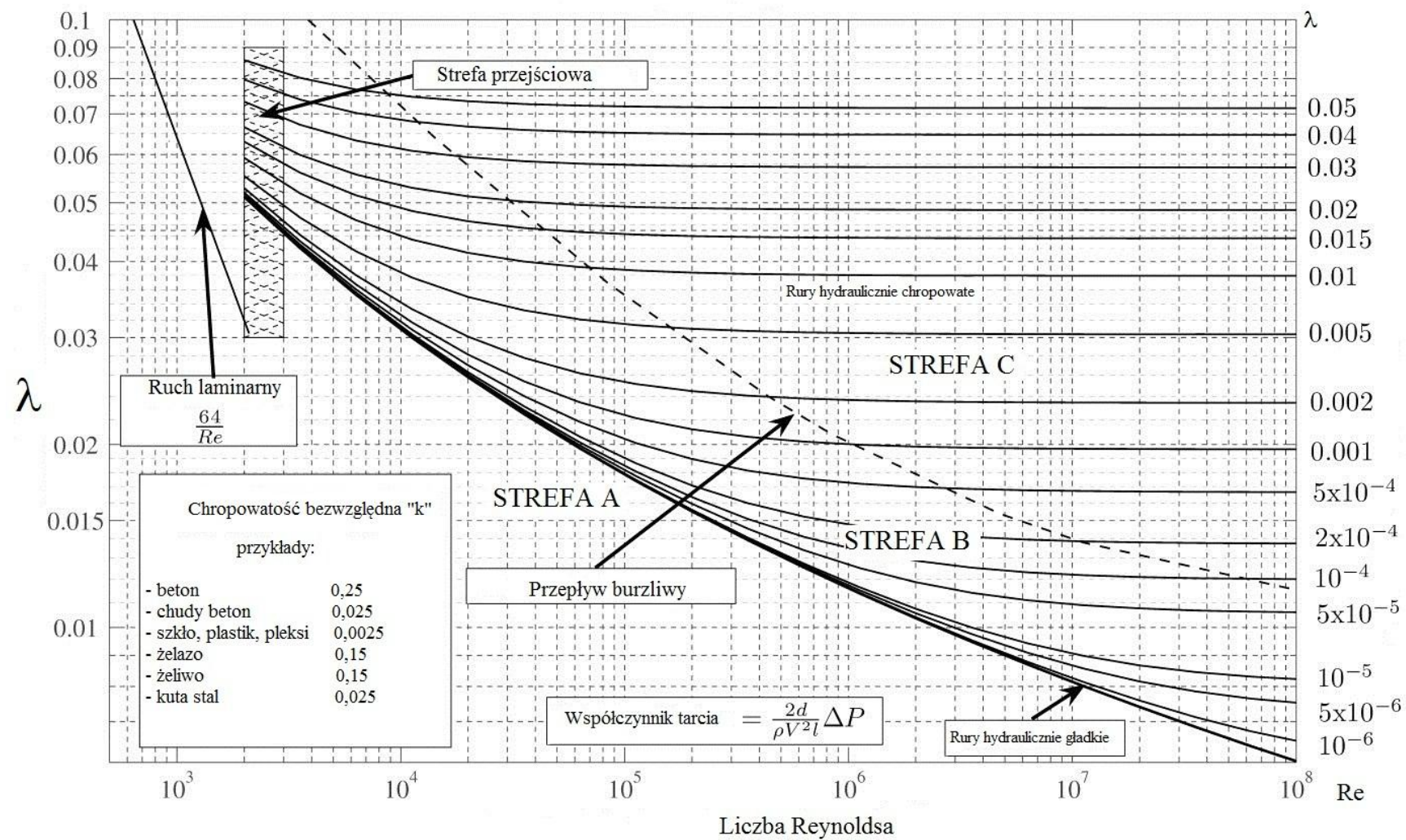
Dla izotermicznych przepływów turbulentnych mających praktyczne znaczenie w przewodach wodociągowych (dla $Re > 4000$) przepływ może odbywać się w trzech strefach:

A - strefie przewodów hydraulicznie gładkich, $\lambda = f(Re)$,

B - strefie przejściowej (o zmiennej chropowatości), $\lambda = f(Re, e)$,

C - strefie kwadratowej zależności oporów, $\lambda = f(e)$.

Zależność $\lambda = f(Re, e)$ obrazuje rysunek 2, będący wygodną metodą wyznaczania współczynnika oporów liniowych.



Rys.2 Zależność współczynnika oporów liniowych λ od liczby Reynoldsa i chropowatości względnej

PN-76/M-34034 Rurociągi. Zasady obliczeń strat ciśnienia. Zaleca dla wszystkich stref wyznaczanie współczynnika oporów liniowych λ ze wzoru *Colebrooka-White'a*:

$$\lambda = \left[-2 \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{e}{3,72} \right) \right]^{-2} \quad [2.4]$$

1.2. Obliczanie strat miejscowych

Miejscowe straty energii mechanicznej w rurociągach, są to straty wywołane różnego rodzaju przeszkodami umieszczonymi w przewodach. Wysokość strat miejscowych opisuje równanie:

$$\Delta h = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad [2.5]$$

gdzie:

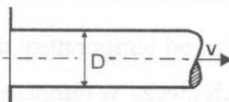
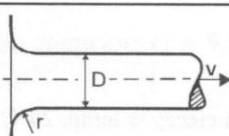
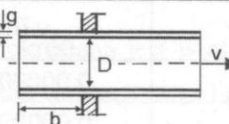
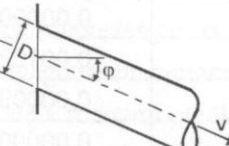
Δh - wysokość strat energii mechanicznej; [m],

ζ - współczynnik strat miejscowych, obliczany dla prędkości za stratą miejscową; [-],

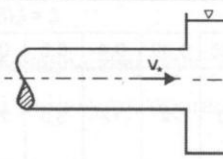
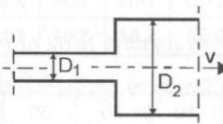
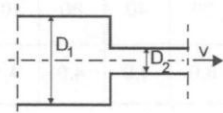
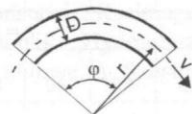
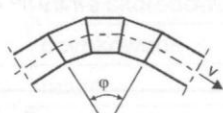
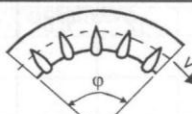
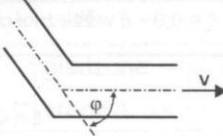
v - średnia prędkość przepływu w przewodzie; [m/s]

Wartości współczynników miejscowych powinny być określone doświadczalnie na podstawie pomiarów. W tabeli 1 przedstawiono orientacyjne wartości współczynników oporów miejscowych.

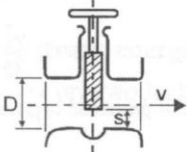
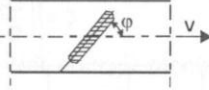
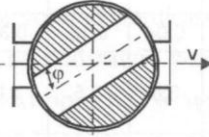
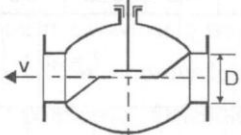
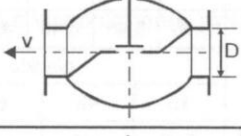
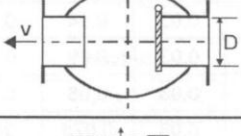
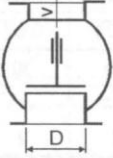
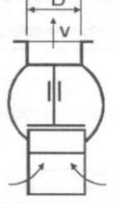
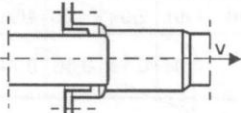
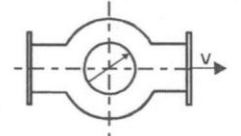
Tabela 1. Współczynniki oporów lokalnych

Lp.	Nazwa przeszkody	Kształt	Współczynnik oporów miejscowych ζ							
1	2	3	4							
1	Wlot o ostrych krawędziach		0,5							
2	Wlot prosty zaokrąglony		$\frac{r}{D}$	0	0,01	0,02	0,05	0,10	0,16	0,20
			ζ	0,5	0,43	0,36	0,22	0,12	0,06	0,03
3	Wlot w rurę wsuniętą przez otwór w ścianie do wnętrza zbiornika		$0,5 \leq \zeta = \zeta\left(\frac{b}{D}, \frac{g}{D}\right) \leq 1,0$							
4	Wlot do rury pod kątem (ze zbiornika)		$\zeta = 0,5 + 0,3 \cdot \sin \varphi + 0,2 \cdot \sin^2 \varphi$							
			°	10	20	30	45	60	70	80
			Rd	$\pi/18$	$\pi/9$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$7\pi/18$	$4\pi/9$
			ζ	0,558	0,626	0,7	0,812	0,91	0,959	0,99

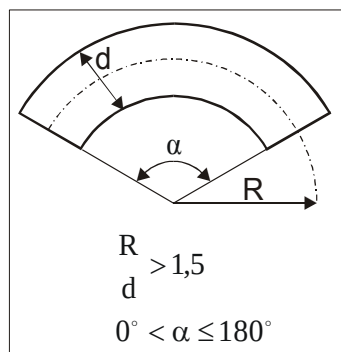
cd. tabeli 1

1	2	3	4																																																						
5	Wlot z przewodu do zbiornika		$h_{str} = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad \zeta = 1$ v – prędkość w przewodzie (przed przeszkodą)																																																						
6	Nagłe rozszerzenie przekroju $Re \geq 3500$		$\zeta = \left[\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 - 1 \right]^2$ <table><tr><td>$\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$</td><td>1,2</td><td>1,4</td><td>1,6</td><td>1,8</td><td>2,0</td><td>2,5</td></tr><tr><td>ζ</td><td>0,04</td><td>0,16</td><td>0,36</td><td>0,64</td><td>1,0</td><td>2,25</td></tr><tr><td>$\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$</td><td>3,0</td><td>3,5</td><td>4,0</td><td>5,0</td><td>6,0</td><td></td></tr><tr><td>ζ</td><td>4,0</td><td>6,25</td><td>9,0</td><td>16,0</td><td>25,0</td><td></td></tr></table>	$\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	ζ	0,04	0,16	0,36	0,64	1,0	2,25	$\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0		ζ	4,0	6,25	9,0	16,0	25,0																											
$\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5																																																			
ζ	0,04	0,16	0,36	0,64	1,0	2,25																																																			
$\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0																																																				
ζ	4,0	6,25	9,0	16,0	25,0																																																				
7	Nagłe zmniejszenie przekroju		$\zeta = 0,5 \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right]$ <table><tr><td>$\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$</td><td>0,01</td><td>0,1</td><td>0,2</td><td>0,25</td><td>0,3</td><td>0,4</td><td>0,6</td><td>0,8</td></tr><tr><td>ζ</td><td>0,50</td><td>0,45</td><td>0,40</td><td>0,38</td><td>0,35</td><td>0,30</td><td>0,20</td><td>0,10</td></tr></table>	$\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$	0,01	0,1	0,2	0,25	0,3	0,4	0,6	0,8	ζ	0,50	0,45	0,40	0,38	0,35	0,30	0,20	0,10																																				
$\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$	0,01	0,1	0,2	0,25	0,3	0,4	0,6	0,8																																																	
ζ	0,50	0,45	0,40	0,38	0,35	0,30	0,20	0,10																																																	
8	Kolana gięte		<table><tr><th rowspan="2">$\frac{r}{D}$</th><th rowspan="2">ϕ °</th><th colspan="4">gładkie</th><th>chropowate</th></tr><tr><th>15</th><th>45</th><th>60</th><th>90</th><th>90</th></tr><tr><td>rd</td><td></td><td>$5\pi/6$</td><td>$\pi/4$</td><td>$\pi/3$</td><td>$\pi/2$</td><td>$\pi/2$</td></tr><tr><td>1</td><td></td><td>0,03</td><td>0,14</td><td>0,19</td><td>0,21</td><td>0,51</td></tr><tr><td>2</td><td></td><td>0,03</td><td>0,09</td><td>0,12</td><td>0,14</td><td>0,30</td></tr><tr><td>4</td><td></td><td>0,03</td><td>0,08</td><td>0,10</td><td>0,11</td><td>0,23</td></tr><tr><td>6</td><td></td><td>0,03</td><td>0,075</td><td>0,09</td><td>0,09</td><td>0,18</td></tr><tr><td>10</td><td></td><td>0,03</td><td>0,07</td><td>0,07</td><td>0,11</td><td>0,20</td></tr></table>	$\frac{r}{D}$	ϕ °	gładkie				chropowate	15	45	60	90	90	rd		$5\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$	$\pi/2$	1		0,03	0,14	0,19	0,21	0,51	2		0,03	0,09	0,12	0,14	0,30	4		0,03	0,08	0,10	0,11	0,23	6		0,03	0,075	0,09	0,09	0,18	10		0,03	0,07	0,07	0,11	0,20
$\frac{r}{D}$	ϕ °	gładkie				chropowate																																																			
		15	45	60	90	90																																																			
rd		$5\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$	$\pi/2$																																																			
1		0,03	0,14	0,19	0,21	0,51																																																			
2		0,03	0,09	0,12	0,14	0,30																																																			
4		0,03	0,08	0,10	0,11	0,23																																																			
6		0,03	0,075	0,09	0,09	0,18																																																			
10		0,03	0,07	0,07	0,11	0,20																																																			
9	Kolana segmentowe		<table><tr><th rowspan="2">ϕ</th><th>°</th><th>15</th><th>30</th><th>45</th><th>60</th><th>90</th></tr><tr><th>rd</th><td>$5\pi/6$</td><td>$\pi/6$</td><td>$\pi/4$</td><td>$\pi/3$</td><td>$\pi/2$</td></tr><tr><td>S</td><td></td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>3</td><td>3</td></tr><tr><td>ζ</td><td></td><td>0,06</td><td>0,10</td><td>0,15</td><td>0,20</td><td>0,25</td></tr></table> S - liczba segmentów w kolanie	ϕ	°	15	30	45	60	90	rd	$5\pi/6$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$	S		1	2	2	3	3	ζ		0,06	0,10	0,15	0,20	0,25																											
ϕ	°	15	30		45	60	90																																																		
	rd	$5\pi/6$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$																																																			
S		1	2	2	3	3																																																			
ζ		0,06	0,10	0,15	0,20	0,25																																																			
10	Kolana półfaliste		$\phi = \frac{\pi}{2} \text{ rd} \quad \zeta = 0,4$																																																						
11	Załamanie przewodu		$\zeta = \zeta(\phi)$ <table><tr><th rowspan="2">ϕ</th><th>°</th><th>20</th><th>40</th><th>60</th><th>80</th><th>90</th><th>100</th><th>120</th><th>140</th><th>160</th></tr><tr><th>rd</th><td>$1/9\pi$</td><td>$2/9\pi$</td><td>$\pi/3$</td><td>$4/9\pi$</td><td>$\pi/2$</td><td>$5/9\pi$</td><td>$2/3\pi$</td><td>$7/9\pi$</td><td>$8/9\pi$</td></tr><tr><td>ζ</td><td></td><td>0,04</td><td>0,14</td><td>0,36</td><td>0,74</td><td>0,98</td><td>1,26</td><td>1,86</td><td>2,43</td><td>2,85</td></tr></table>	ϕ	°	20	40	60	80	90	100	120	140	160	rd	$1/9\pi$	$2/9\pi$	$\pi/3$	$4/9\pi$	$\pi/2$	$5/9\pi$	$2/3\pi$	$7/9\pi$	$8/9\pi$	ζ		0,04	0,14	0,36	0,74	0,98	1,26	1,86	2,43	2,85																						
ϕ	°	20	40		60	80	90	100	120	140	160																																														
	rd	$1/9\pi$	$2/9\pi$	$\pi/3$	$4/9\pi$	$\pi/2$	$5/9\pi$	$2/3\pi$	$7/9\pi$	$8/9\pi$																																															
ζ		0,04	0,14	0,36	0,74	0,98	1,26	1,86	2,43	2,85																																															

cd. tabeli 1

1	2	3	4									
12	Zawór zasuwowy równoprzelotowy		$\zeta = \zeta(S/D)$									
			S/D	0,25	0,30	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
			ζ	30	22	12	5,3	2,8	1,5	0,8	0,3	0,15
13	Zawór motylkowy (kłapowy, dławiący)		$\zeta = \zeta(\varphi)$									
			φ	°	10	20	30	40	50	60	70	90
			rd		$1/18\pi$	$1/9\pi$	$1/6\pi$	$2/9\pi$	$5/18\pi$	$1/3\pi$	$7/18\pi$	$1/2\pi$
14	Zawór kurkowy (kurek gazowy)		$\zeta = \zeta(\varphi)$									
			φ	°	10	20	30	40	50	55	67	
			rd		$1/18\pi$	$1/9\pi$	$1/6\pi$	$2/9\pi$	$5/10\pi$	0,96	1,17	
15	Zawór grzybkowy normalny		$\zeta = \zeta(D)$									
			D [mm]		20	40	80	100	150	200	250	300
			ζ		8,0	4,9	4,0	4,1	4,4	4,7	5,1	5,4
16	Zawór zwrotny grzybkowy normalny		$\zeta = \zeta(D)$									
			D [mm]		25	32	40	50	80	100	150	200
			ζ		4,5	4,8	5,3	6,0	7,4	7,6	6,0	4,5
17	Zawór zwrotny kłapowy		$\zeta = \zeta(D)$									
			D [mm]		25	32	40	50	80	100	150	200
			ζ		1,9	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	0,9	0,8
18	Zawór zwrotny grzybkowy osiowy		$\zeta = \zeta(D) = 2,2 \div 2,5$									
19	Kosz z zaworem zwrotnym		$\zeta = \zeta(D)$									
			D[mm]		40	70	100	200	300	500		
			ζ		12	8,5	7,0	4,7	3,7	2,5		
20	Kosz bez zaworu zwrotnego		$\zeta = 0,9 \div 6$ w zależności od konstrukcji kosza									
21	Kompensator dławi-kowy		$\zeta \approx 0,2$									
22	Wodomierz		Tłoczkowy $\zeta = 12$ Płytkowy $\zeta = 8$ Skrętowy $\zeta = 6$									

Dla kolan giętych wykonanych z rur chropowatych wg PN-76/M-34034 wartość współczynnika wynosi:



$$\zeta = \zeta_T + C\zeta_M \quad [2.6]$$

gdzie:

$$\zeta_T = 0,0175\lambda \frac{R}{d} \alpha \quad [2.7]$$

$$\zeta_M = 0,21A \sqrt{\frac{d}{R}} \quad [2.8]$$

A – wg zestawienia:

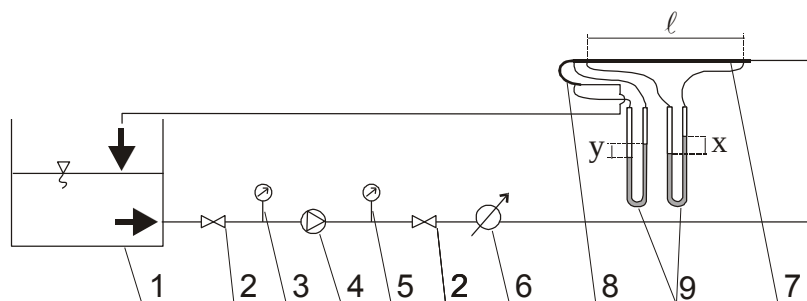
α	$\leq 70^\circ$	90°	$\geq 100^\circ$
A	$0,9 \sin \alpha$	1,0	$0,7 + 0,35\alpha/90$

C – wg zestawienia:

Re	$3 \cdot 10^3 < Re < 4 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4 < Re < 2 \cdot 10^5$	$Re \geq 2 \cdot 10^5$
$e \leq 0,001$	$64\lambda_{\text{gładkie}}$	$64\lambda_{\text{gładkie}} \cdot (1 + e^2 \cdot 10^6)$	$1 + e^2 \cdot 10^6$
$e > 0,001$	$64\lambda_{\text{gładkie}}$	$\approx 128 \lambda_{\text{gładkie}}$	$2 \approx$

2. Opis stanowiska badawczego

2.1. Zestaw do badań



Oznaczenia: 1 – zbiornik, 2 – zawór, 3 – wakuometr, 4 – pompa, 5 – manometr, 6 – miernik natężenia przepływu, 7 – odcinek badanego przewodu, 8 – badane kolano (poziome), 9 – U-rurki.

W skład stanowiska pomiarowego wchodzi dodatkowo:

- rurociąg pomiarowy, złożony z odcinków przewodów wykonanych z PCV (Polichlorek winylu) oraz PLEXI, połączonych szeregiem różnorodnych kształtek (kolanek, zmian średnic rury, złączy),
- zestaw 9 U-rurek pomiarowych, podłączonych w charakterystycznych punktach przewodu i umieszczonych na zbiorczej tablicy ułatwiającej odczyt,
- przepływomierz, umożliwiający pomiar objętości przepływającej cieczy,
- zawór regulacyjny, pozwalający na regulację natężenia przepływu przez rurociąg,
- pompa z falownikiem, umożliwiająca regulację ilości obrotów oraz pracę systemu w układzie zamkniętym.

3. Część doświadczalna

3.1 Przebieg ćwiczenia

Wykonać pomiar długości l badanego odcinka przewodu i geometrii badanego kolana. Uruchomić pompę, regulując natężenie przepływu Q zaworem 2 i dokonać odczytu różnicy poziomów x i y w ramionach u-rurek. U-rurki wypełnione są czterochlorkiem węgla CCl_4 o gęstości 1630 kg/m^3 . Obliczone wartości współczynnika oporów liniowych i współczynnika strat miejscowej porównać z wartościami wg PN-76/M-34034. W tym celu należy wykonać pomiar temperatury wody niezbędny do określenia gęstości wody oraz kinematycznego współczynnika lepkości, chropowatość bezwzględną przyjąć $k = 0,05 \text{ mm}$.

3.2 Czynności do wykonania

1. Uruchomić pompę oraz otworzyć zawór regulacyjny na końcu rurociągu i ustalić minimalny przepływ, przy którym możliwe jest odczytanie różnic poziomów zwierciadeł czterochlorku węgla CCl_4 zabarwionego jodem w U-rurkach.
2. Zwiększać stopniowo przepływ na zaworze regulacyjnym (otwarty obieg cyrkulacyjny pompy).
3. Wartość różnicy poziomów w U-rurkach odczytywać każdorazowo dla danego, ustalonego przepływu.
4. Dokonywać odczytów z przepływomierza.
5. Gdy zawór regulacyjny zostanie maksymalnie otwarty, zwiększenie przepływu uzyskać poprzez zamykanie zasuwy na obiegu cyrkulacyjnym pompy.
6. Charakterystykę pompy (ilość obrotów) ustala prowadzący zajęcia, tak aby uniknąć sytuacji, w której wypłukany zostanie CCl_4 z U-rurek.
7. Zmierzyć temperaturę wody w celu wyznaczenia kinematycznego współczynnika lepkości, dynamicznego współczynnika lepkości oraz liczby Reynoldsa.

3.3 Obliczenia

Dla zmierzonej temperatury wody wartości $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ i ν odczytać z tabel otrzymanych od prowadzącego ćwiczenia. Wartości λ obliczyć na podstawie przekształconego równania (2.1), gdzie na podstawie równania *Bernoulliego*:

$$\Delta h = \frac{\Delta p_1}{\gamma_{\text{H}_2\text{O}}} \quad [2.9]$$

Δp_1 – różnica ciśnień na początku i końcu odcinka przewodu o długości l wyznaczyć z równania:

$$\Delta p_1 = x \cdot (\gamma_{\text{CCl}_4} - \gamma_{\text{H}_2\text{O}}) \quad [2.10]$$

Wartości ζ obliczyć z równania (2.5), przy czym:

$$\Delta h = \frac{\Delta p_2}{\gamma_{\text{H}_2\text{O}}} \quad [2.11]$$

Δp_2 – różnica ciśnień na początku i końcu kolana:

$$\Delta p_2 = y \cdot (\gamma_{\text{CCl}_4} - \gamma_{\text{H}_2\text{O}}) \quad [2.12]$$

4. Zawartość sprawozdania

1. Cel i zakres ćwiczenia.
2. Opis doświadczenia.
3. Schemat stanowiska pomiarowego.
4. Wyniki pomiarów i obliczeń.
5. Przykład obliczeniowy z przeliczeniem jednostek.
6. Zestawienie tabelaryczne wyników w tabeli wg schematu

Lp.	T [°C]	$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ [kg/m ³]	v [m ² /s]	Q [dm ³ /s]	x [mm]	Δp_1 [Pa]	λ [-]	λ_{teor} [-]	y [mm]	ζ [-]	ζ_{teor} [-]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.											
2.											
...											

7. Wnioski dotyczące uzyskanych wartości współczynników oporów liniowych oraz lokalnych na tle wartości teoretycznych współczynników oporu, poprawności wykonania ćwiczenia, czynników wpływających na wynik ćwiczenia, spostrzeżeń własnych studenta.