



Politechnika Wrocławska

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Ćwiczenie L12

WYKRES ANCONY

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest sporządzenie wykresu Ancony – szeregowego systemu hydraulicznego oraz porównanie zmierzonych wysokości ciśnień piezometrycznych z wartościami obliczonymi.

2. Wstęp teoretyczny

Wykres Ancony, to graficzne przedstawienie uogólnionego równania Bernouliego, czyli prawa zachowania energii przepływającego płynu.

Wysokość energii rozporządzalnej w dowolnym przekroju można zapisać jako sumę trzech członów odpowiadających za energię kinetyczną, energię potencjalną ciśnienia i energię potencjalną położenia

$$e = \alpha \frac{v_{sr}^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z. \quad (1)$$

Jeśli w przepływającej strudze płynu wybierzemy dwa dowolne przekroje 1 i 2 i założymy, że kierunek przepływu jest od przekroju 1 do 2, to wysokość energii rozporządzalnej w przekroju 1 będzie większą od wysokości energii rozporządzalnej w przekroju 2 o straty występujące pomiędzy tymi przekrojami. Bilans wysokości energii rozporządzalnych dla przekroju 1 i 2 wygląda następująco

$$e_1 = e_2 + \Delta h^s, \quad (2)$$

gdzie: e_1 to wysokość energii rozporządzalnej w przekroju 1, e_2 to wysokość energii rozporządzalnej w przekroju 2, Δh^s a wysokość strat hydraulicznych.

Podstawiając wysokość energii rozporządzalnej (1), odpowiednio w przekroju 1 i 2 do równania (2) otrzymamy uogólnione równanie Bernouliego, czyli równanie przepływu płynu lepkiego

$$\alpha_1 \frac{v_{1sr}^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \alpha_2 \frac{v_{2sr}^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \Delta h_{12}^s, \quad (3)$$

w którym $\alpha \frac{v_{sr}^2}{2g}$ to wysokość prędkości, $\frac{p}{\rho g}$ to wysokość ciśnienia bezwzględnego (absolutnego), z to wysokość położenia przekroju nad poziomem odniesienia (wysokość niwelacyjna). Ciśnienie bezwzględne to suma ciśnienia barometrycznego $\frac{p_b}{\rho g}$ i ciśnienia

względne. Ciśnienie względne może być to nadciśnienie, które dodajemy do ciśnienia barometrycznego lub podciśnienie, które odejmujemy od ciśnienia barometrycznego.

Wykres Ancony składa się z trzech linii. Najwyżej położona linia na wykresie nazywa się linią energii. Linia ta przedstawia wysokość energii rozporządzalnej (1) w dowolnym przekroju układu. Jej cechą charakterystyczną jest to, że opada zgodnie z kierunkiem przepływu, co spowodowane jest występowaniem strat hydraulicznych. Wyjątek stanowią elementy czynne tzn. takie, które dostarczają energię do układu np. pompa, czy wentylator. Dla tych elementów linia energii wznosi się. W przypadku przepływu płynu idealnego linia energii zawsze przebiega poziomo, co wynika z braku strat hydraulicznych.

Druga linia to linia ciśnień bezwzględnych (absolutnych). Linie ciśnień bezwzględnych otrzymujemy odejmując od linii energii rozporządzalnej wysokość prędkości. Jeśli wysokość prędkości jest stała (stałe pole przekroju) to linia energii jest równoległa do linii ciśnienia. Jeśli wysokość prędkości maleje (pole przekroju zwiększa się) to linia ciśnienia wznosi się natomiast jeśli wysokość prędkości rośnie (pole przekroju maleje) to linia ciśnienia opada.

Rzędna linii ciśnień H przedstawia równanie

$$H = e - \alpha \frac{v_{sr}^2}{2g} = \frac{p}{\rho g} + z, \quad (4)$$

które jest sumą ciśnienia bezwzględnego i wysokości położenia.

Ostatnią linię ciśnienia piezometrycznego otrzymujemy odejmując od linii ciśnienia bezwzględnego wysokość ciśnienia barometrycznego. Ponieważ w danych warunkach wysokość ciśnienia barometrycznego jest stała to linie ciśnienia bezwzględnego i ciśnienia piezometrycznego są zawsze do siebie równoległe oraz przesunięte względem siebie o wartość $\frac{p_b}{\rho g}$. Stąd rzędna linii ciśnienia piezometrycznego przedstawia się

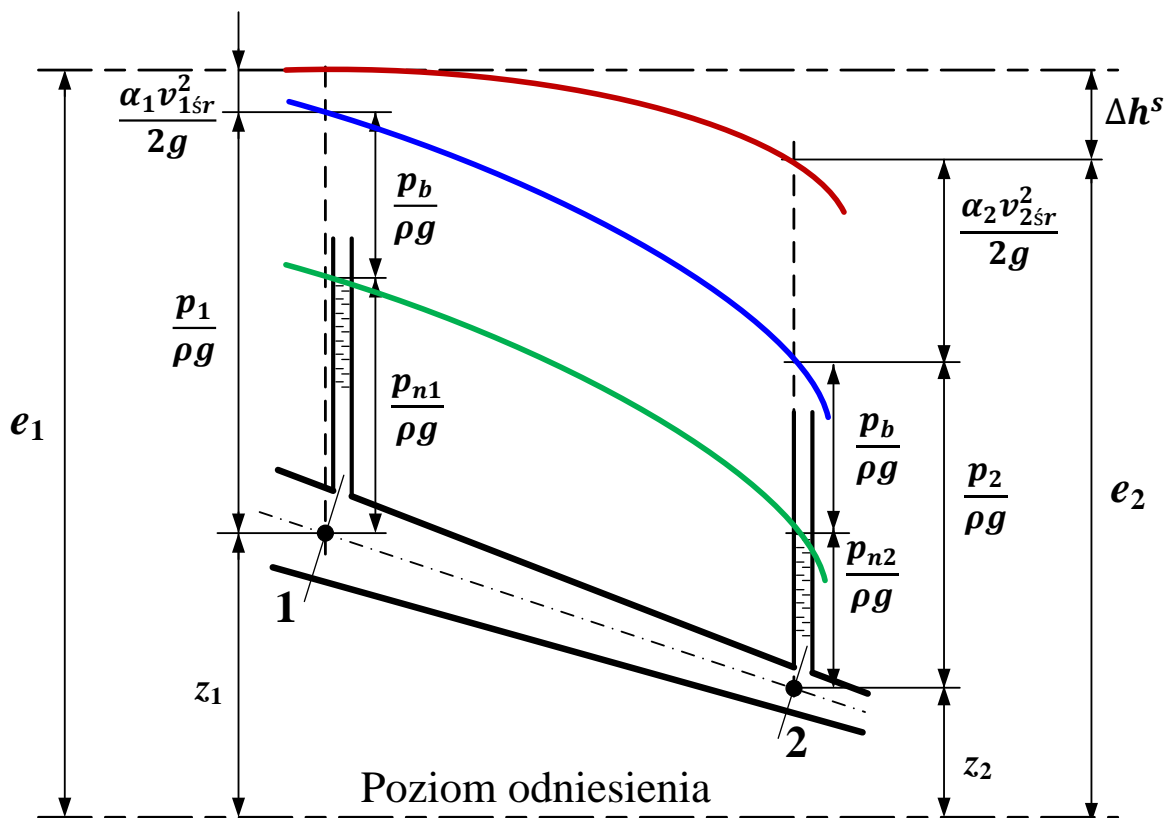
następującym równaniem

$$h = H - \frac{p_b}{\rho g} = \frac{p - p_b}{\rho g} + z = h_p + z, \quad (5)$$

w którym h_p jest wysokością ciśnienia piezometrycznego. Stąd wysokość h jest sumą wysokości ciśnienia piezometrycznego h_p (wysokości nadciśnienia lub podciśnienia) i wysokości położenia z . Jeżeli do dowolnego przekroju w układzie zostanie podłączony piezometr to wychyli się do wysokości linii ciśnienia piezometrycznego. Czyli wychylenia

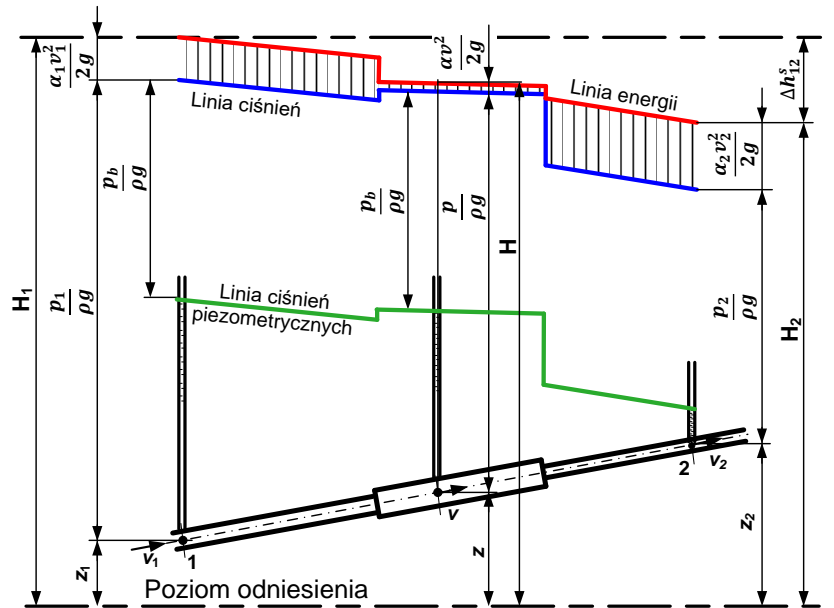
cieczy w nieskończenie dużej liczbie piezometrów podłączonych do układu, wzdłuż drogi przepływu, utworzą linię ciśnienia piezometrycznego.

Na rys. 1 przedstawiono graficzną interpretację uogólnionego równania Bernouiego (3) (wykres Ancony) przykładowego układu, w którym przewód zwęża się w kierunku przepływu i jednocześnie opada.



Rys. 1. Przykładowa graficzna interpretacja uogólnionego równania Bernouiego (3) dla zwężającego i opadającego przewodu zgodnie z kierunkiem przepływu

Na rys. 2 przedstawiono wykres Ancony przykładowego fragmentu układu hydraulicznego z nagłym rozszerzeniem i zwężeniem przewodu.



Rys. 2. Przykład wykresu Ancony fragmentu układu hydraulicznego

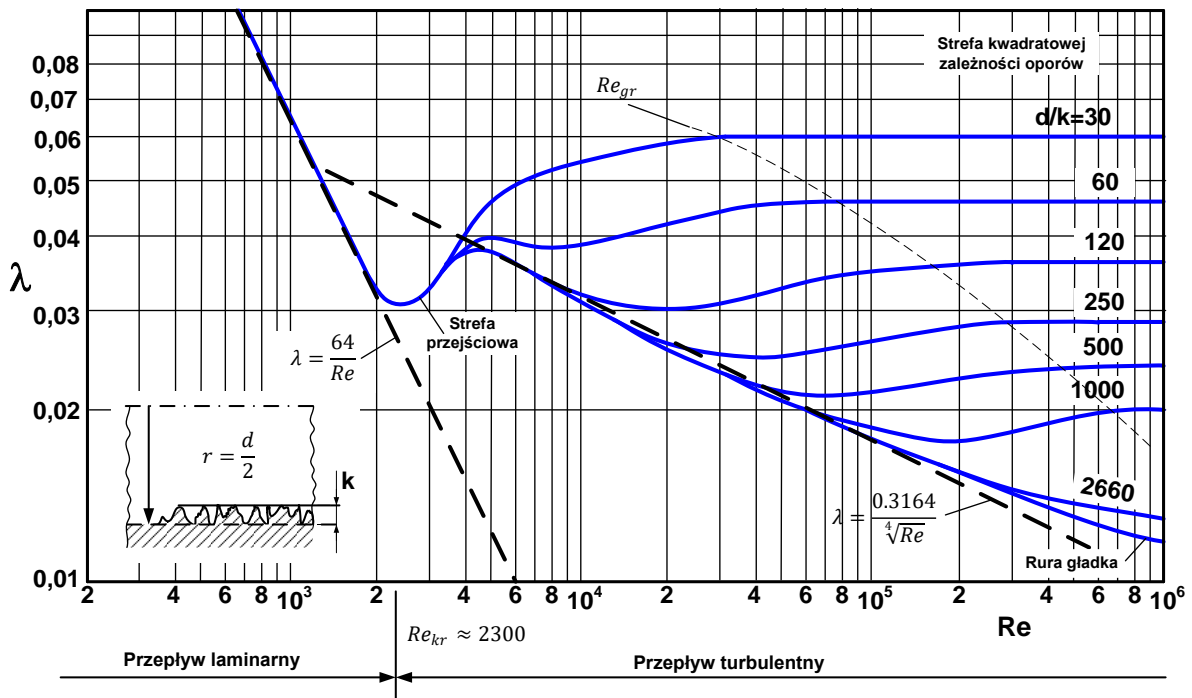
We wzorach (2 i 3) wysokość strat ciśnienia Δh_{12}^s jest sumą wysokości strat liniowych wywołanych tarciem na długości przewodu Δh_{12}^{sl} oraz strat miejscowych Δh_{12}^{sm} .

Wysokość straty liniowej określa wzór Darcy'ego-Weisbacha

$$\Delta h^{sl} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v_{sr}^2}{2g}, \quad (6)$$

gdzie: λ – współczynnik strat liniowych, l – długość przewodu, d – średnica przewodu, v_{sr} – średnia prędkość przepływu.

Współczynnik strat liniowych λ jest funkcją liczby Reynoldsa Re oraz chropowatości (k – chropowatości bezwzględna przewodu, k/d – chropowatość względna przewodu). W obliczeniach praktycznych wartości współczynnika λ odczytywane są np. z wykresu Nikuradsego (rys. 3) lub obliczane są ze wzorów empirycznych.



Rys. 3. Zależność współczynnika strat liniowych λ od liczby Re i chropowatości na wykresie Nikuradsego

W zakresie przepływów laminarnych ($Re < 2300$) do obliczenia współczynnika λ obowiązuje jedno równanie

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (7)$$

Natomiast do najczęściej stosowanych zależności empirycznych w zakresie przepływów turbulentnych należą

wzór Colebrooka-Whitea
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,5}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,7d} \right), \quad (8)$$

wzór Altšula
$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (9)$$

wzór Blasiusa dla przewodów hydraulicznie gładkich

$$\lambda = (100 Re)^{-0,25} \approx \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}, \text{ dla } Re \leq 10^5. \quad (10)$$

Z rysunku 3 wynika, że w przypadku przepływu turbulentnego można wyodrębnić trzy strefy przepływu: rur hydraulicznie gładkich, w której $\lambda = f(Re)$, częściowego wpływu chropowatości na opory przepływu, w którym $\lambda = f(Re, k)$ oraz w pełni rozwiniętego wpływu chropowatości, w której $\lambda = f(k)$.

Wysokość straty miejscowej określa wzór

$$\Delta h^{sm} = \zeta \frac{v_{sr}^2}{2g}, \quad (11)$$

w którym ζ oznacza współczynnik straty miejscowej zależny od rodzaju przeszkody, jej geometrii i od liczby Reynoldsa, odniesiony do średniej prędkości za przeszkodą (z pewnymi wyjątkami). Wartość współczynnika strat miejscowych zazwyczaj dobiera się z tablic, w których podane są rodzaje przeszkód oraz odpowiadające im wartości współczynników ζ . Dla $Re > 10^4$ współczynnik ζ zazwyczaj nie zależy od Re .

3. Opis stanowiska

Stanowisko pomiarowe składa się z następujących elementów:

- szeregowego systemu hydraulicznego, złożonego z trzech zbiorników połączonych odcinkami rur o wymiarach

odcinek	$d, \text{ mm}$	l/d
zbiornik (1) – kolano (3-4)	12,3	50
kolano (3-4) – kolano (6-7)	12,3	100
kolano (6-7) – zbiornik 8	12,3	15
zbiornik 8 – zwężenie (10)	12,3	50
zwężenie (10) – zwężenie (11-12)	8,3	30
zwężenie (11-12) – rozszerzenie (13)	7,15	30
rozszerzenie (13) – zbiornik (14)	12,3	48,5

- przelewowego zbiornika zasilającego 1,
- rotametu R z zaworem regulacyjnym Z1,
- baterii piezometrów 2,
- linijki pomiarowej 3 wyposażonej w taśmę mierniczą,
- termometru.

4. Procedura badawcza

Wykonanie badań polega na:

- pomiarze strumienia objętości przepływającej wody q_v , za pomocą rotametu R,

- pomiarze wysokości ciśnienia piezometrycznego w 14 punktach na długości badanego systemu hydraulicznego, za pomocą baterii piezometrów,
- pomiarze temperatury przepływającej wody oraz ciśnienia barometrycznego.

W celu wykonania pomiarów należy:

- zapoznać się z budową stanowiska i sporządzić jego schemat, na którym należy zaznaczyć opisane w pkt. 3 elementy i mierzone wielkości,
- z przyrządów pomiarowych odczytać jednostki i zapisać je w tabeli pomiarowej,
- ustalić dokładność odczytu wielkości mierzonych,
- zgłosić prowadzącemu gotowość do rozpoczęcia badań,
- **stanowisko pomiarowe uruchamia i wyłącza prowadzący zajęcia,**
- przed przystąpieniem do badań należy ustalić z prowadzącym wartości strumieni objętości wody, dla których będą wykonywane pomiary,
- za pomocą zaworu regulacyjnego Z1 ustawić na rotametrze R ustaloną z prowadzącym początkową wartość strumienia objętości wody,
- zaczekać do momentu ustalenia się wysokości słupów wody w rurkach piezometrycznych 2,
- z rotametu R odczytać i zapisać w protokole pomiarowym wartość strumienia objętości wody,
- górną krawędź białej linijki 3 ustawić na poziomie dolnej części menisku w rurce piezometrycznej oznaczonej cyfrą 1,
- na linijce zaznaczono niebieską linię względem, której na taśmie mierniczej należy odczytywać wartość wysokości, zmierzoną wartość zapisać w protokole,
- zgodnie z procedurą opisaną wyżej, należy wykonać pomiary wysokości w rurkach piezometrycznych oznaczonych od 2 do 14, pomiary zapisać w protokole,
- za pomocą zaworu regulacyjnego zmienić wartość strumienia objętości wody do wartości podanej wcześniej przez prowadzącego,
- zaczekać do ustalenia się wysokości ciśnienia w rurkach piezometrycznych, a następnie odczytać wartość strumienia objętości wody oraz 14 wysokości w rurkach piezometrycznych,

- wartości zmierzone zapisać w protokole,
- procedurę pomiarową przeprowadzić dla każdego zadanego przez prowadzącego strumienia objętości wody,
- **do każdej** zapisanej w protokole pomiarowym wartości wysokości ciśnienia piezometrycznego ($h_1 - h_{14}$) dodać wartość $h_0 = 160$ mm. Wysokość h_0 jest wartością korygującą i wynika z różnicy pomiędzy zaznaczoną niebieską linią a górną krawędzią linijki oraz różnicy pomiędzy miejscem montażu początku taśmy mierniczej oraz poziomem odniesienia szeregowego systemu hydraulicznego, którym jest oś rurociągu łączącego zbiorniki 8 i 14,
- odczytać wartość ciśnienia barometrycznego p_b z ekranu komputera znajdującego się obok ćwiczenia L4 i zapisać w protokole pomiarowym,
- zakończenie badań zgłosić prowadzącemu zajęcia,
- przedstawić protokół pomiarowy do akceptacji.

W przypadku pojawienia się jakichkolwiek problemów w trakcie prowadzenia badań, natychmiast zgłosić je prowadzącemu.

5. Tabela wielkości mierzonych

Tabela wielkości pomiarowych do tego ćwiczenia zamieszczona jest na końcu instrukcji. Tabelę należy uzupełnić o jednostki wielkości mierzonych.

6. Opracowanie wyników pomiarów

Na podstawie otrzymanych wyników badań, należy sporządzić wykres Ancony wykorzystując do tego szablon dołączony do sprawozdania i wydrukowany w formacie A3. Na szablonie narysowano badany szeregowy system hydrauliczny, zaznaczono charakterystyczne przekroje oraz zaznaczono oś wysokości wyrażoną w decymetrach. Obszar rysunku podzielono na dwie części: górną, gdzie należy narysować przebieg linii energii rozporządzałnej oraz ciśnienia bezwzględnego oraz dolną, gdzie należy narysować przebieg linii ciśnienia piezometrycznego i zaznaczyć zmierzone wartości wysokości ciśnienia piezometrycznego. Do rysowania wykresu przystąpić dopiero po obliczeniu wszystkich niezbędnych wielkości omówionych w punkcie 2.

Do wykonania obliczeń należy wykorzystać **zmierzone wartości** strumienia objętości wody q_v oraz sumę wysokości h_1 oraz h_0 . Zmierzyć temperaturę wody w

badanym układzie hydraulicznym oraz ciśnienie barometryczne. Obliczenia wykonać wg. następującej procedury

- wyznaczyć wysokość energii rozporządzalnej w przekroju 1 z równania (1), przyjmując wysokość prędkości w zbiorniku równą 0, stąd wysokość energii rozporządzalnej w zbiorniku 1 obliczyć za pomocą równania:

$$H_1 = h_1 + h_0 + \frac{p_b}{\rho g}. \quad (12)$$

- obliczyć wszystkie wysokości strat liniowych oraz miejscowych na długości badanego systemu hydraulicznego zgodnie z równaniami (6) i (11) opisanymi w rozdziale 2. **Wszystkie obliczane wielkości uzależnić od zmierzonej wartości strumienia objętości q_v oraz średnicy d .** W tym celu wykorzystać równanie ciągłości przepływu płynu w postaci

$$q_v = v_{sr} A, \quad (13)$$

w którym $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ oznacza pole przekroju.

- Dla każdego odcinka rurociągu:
 - wyznaczyć wartości liczby Reynoldsa Re ,
 - określić rodzaj przepływu w instalacji,
 - dobrać formułę i wyznaczyć wartości współczynnika straty liniowej,
 - określić wartość współczynnika Coriolisa
 - obliczyć wartości wysokości prędkości,,
 - obliczyć wartości wysokości strat linowych na poszczególnych odcinkach szeregowego systemu hydraulicznego,
 - obliczyć wartości wysokości strat miejscowych – przyjąć znane z literatury wartości współczynnika ζ wylotu ze zbiornika do przewodu i wlotu z przewodu do zbiornika, w miejscach nagłego rozszerzenia i zwężenia przekroju (punkty 10, 11-12 i 13) współczynniki strat miejscowych obliczyć na podstawie wzorów:

$$\zeta = 0,5 \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right) - \text{dla nagłego zwężenia przekroju, w którym } D \text{ i } d \text{ to}$$

odpowiednio średnice przed i za zwężeniem,

$$\zeta = \left(\left(\frac{D}{d} \right)^2 - 1 \right)^2 - \text{dla nagłego rozszerzenia przekroju, w którym } d \text{ i } D \text{ to}$$

odpowiednio średnice przed i za rozszerzeniem,

dla kolan oznaczonych 3-4 oraz 6-7 przyjąć wartość współczynnika

$\zeta = 0,24$ – została wyznaczona doświadczalnie dla tego stanowiska badawczego.

- Wszystkie obliczone wartości zamieścić w tabeli wyników obliczeń.
- Po wykonaniu wszystkich obliczeń przystąpić do sporządzenia wykresu Ancony:
 - przebieg linii energii rozporządzalnej – rozpocząć od zaznaczenia obliczonej na podstawie (12) wysokości energii rozporządzalnej w zbiorniku 1, następnie od tej wysokości odjąć wysokość straty miejscowej na wylocie ze zbiornika 1. Każdą następną stratę wysokości energii, odejmować jako sumę wszystkich obliczonych wartości wysokości strat linowych i miejscowych do danego przekroju. Należy zwracać uwagę na kolejność i miejsce występowania straty w rozpatrywanym szeregowym systemie hydraulicznym. Przebieg linii energii prowadzić cały czas zgodnie z kierunkiem przepływu płynu w rurociągu;
 - przebieg linii wysokości ciśnienia bezwzględnego – od wysokości energii rozporządzalnej należy odjąć obliczone wartości wysokości prędkości w odpowiednich odcinkach systemu hydraulicznego;
 - przebieg linii wysokości ciśnienia piezometrycznego – od wysokości ciśnienia bezwzględnego należy odjąć przyjętą stałą wartość wysokości ciśnienia barometrycznego, przebieg linii wysokości ciśnienia piezometrycznego musi być identyczny z przebiegiem linii ciśnienia bezwzględnego;
 - po narysowaniu przebiegu wszystkich linii, na wykres Ancony należy nanieść zmierzone wysokości ciśnienia piezometrycznego (h_1-h_{14}) uwzględniające wysokość h_0 , wyniki zaznaczyć w postaci punktów w odpowiednich miejscach,
 - porównać otrzymany na podstawie obliczeń przebieg linii ciśnienia piezometrycznego z wysokościami zmierzonymi, zapisać wnioski.

7. Pytania kontrolne

- 1) Co to jest i z jakich linii składa się wykres Ancony?
- 2) Podać uogólnione równanie Bernouliego z opisem wszystkich członów?
- 3) Jak oblicza się wysokość energii rozporządzalnej w dowolnym przekroju?
- 4) Jak oblicza się straty liniowe i od czego one zależą?
- 5) Jak oblicza się straty miejscowe i od czego one zależą?
- 6) Od czego zależy współczynnik strat liniowych?
- 7) Od czego zależy współczynnik strat miejscowych?
- 8) Jak oblicza się wysokość prędkości w przewodzie?
- 9) Jakie strefy przepływu można wyróżnić na wykresie Nikuradsego?
- 10) Co i w jaki sposób odczytuje się z linii energii?
- 11) Co i w jaki sposób odczytuje się z linii ciśnień bezwzględnych?
- 12) Co i w jaki sposób odczytuje się z linii ciśnień piezometrycznych?

Tabela pomiarowa do L12

Data wykonania pomiarów:.....

L.p.	Wielkości mierzone														
	q_v	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	h_9	h_{10}	h_{11}	h_{12}	h_{13}	h_{14}
	Jednostki														
1.															
2.															
3.															

Warunki pomiaru i wielkości stałe

Symbol	Jednostka	Wartość
T	$^{\circ}\text{C}$	
p_b	hPa	
h_0	mm	160

Sekcja nr			
Lp.	Nazwisko	Imię	Nr albumu
1.			
2.			
3.			

Data, podpis prowadzącego

Szablon do wykonania wykresu

