J. Szantyr – Wykład nr 26 – Przepływy w przewodach zamkniętych II

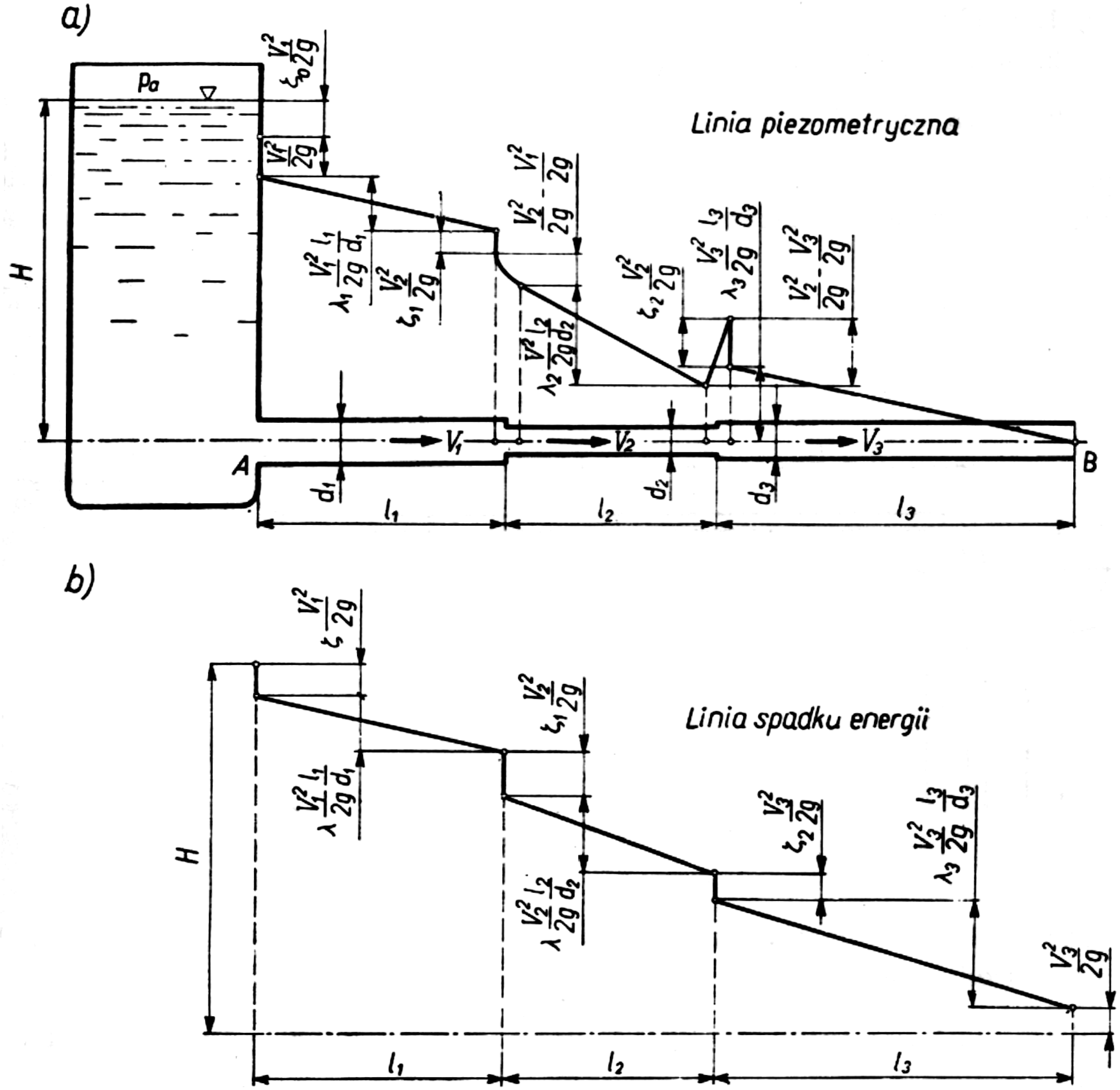
W praktyce mamy do czynienia z mniej lub bardziej złożonymi rurociągami. Jeżeli strumień płynu nie ulega rozgałęzieniu, mówimy o rurociągu prostym. W przeciwnym przypadku mamy do czynienia z siecią rurociągów. Sieci dzielimy na rozgałęzione (gdy sieć nie tworzy obwodów zamkniętych oraz na pierścieniowe (gdy występują obwody zamknięte). Obliczenie hydrauliczne sieci polega na wyznaczeniu parametrów we wszystkich elementach tworzących sieć. Obliczenia hydrauliczne są wykonywane dla sytuacji stacjonarnej jeżeli liczba Strouhala jest mniejsza od jedności:

$$Sh = \frac{t_{char}}{t_{zm}} < 1$$

t_{char} - czas przepływu przez odcinek rurociągu

t_{zm} - czas zmiany warunków na wlocie do odcinka

Obliczenie rurociągu prostego



Linia piezometryczna pokazuje zmiany ciśnienia wzdłuż osi przewodu. Takie ciśnienie pokazałyby manometry w odpowiednich punktach rurociągu.

Linia spadku energii pokazuje liniowe i lokalne straty energii wzdłuż osi przewodu.

Komentarze do linii piezometrycznej

Przyjmujemy oś rurociągu jako poziom odniesienia wysokości ciśnienia $p_a/\rho g$ czyli na wlocie ciśnienie wynosi $p_a + \rho g H$

Tuż za wlotem do rurociągu wysokość ciśnienia jest jest mniejsza o:

stratę na wlocie $\varsigma \frac{V_1^2}{2g}$

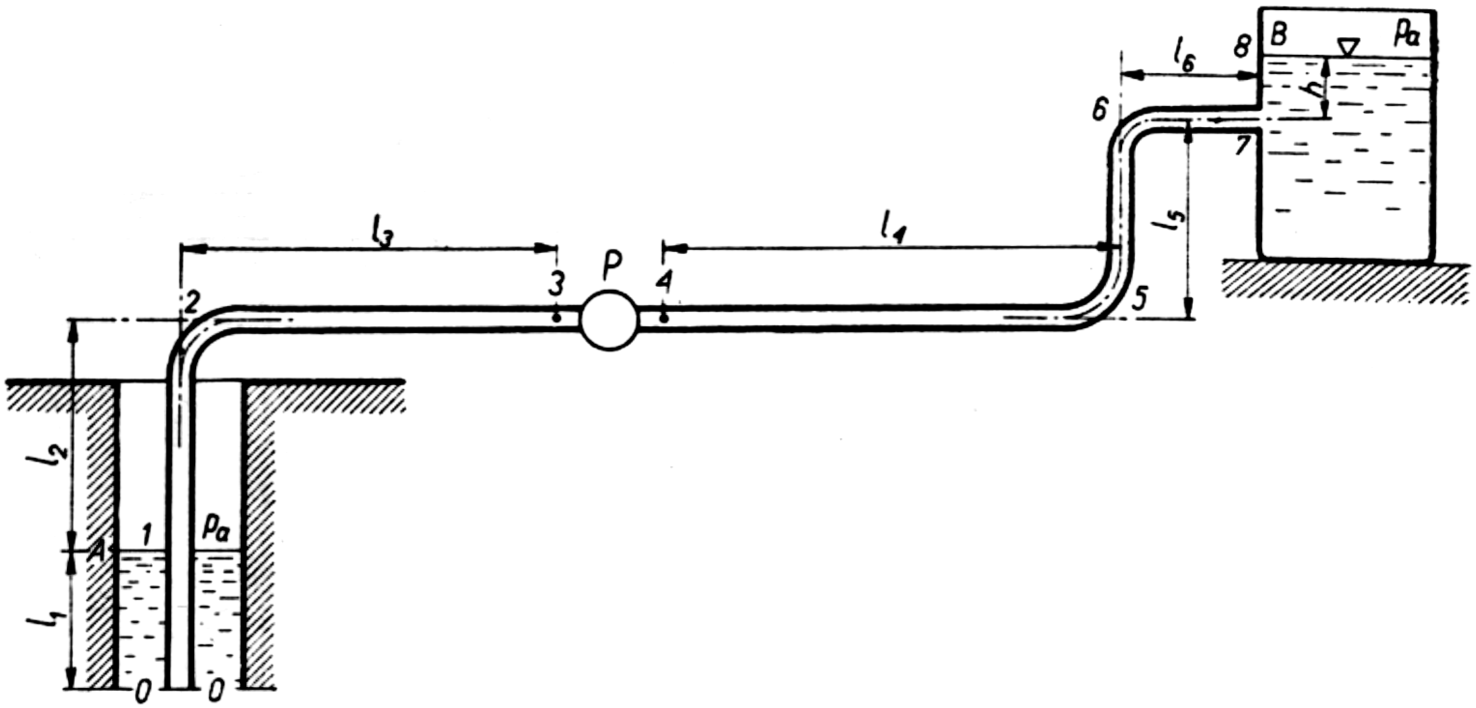
część zamienioną na energię kinetyczną płynącej cieczy $\frac{V_1^2}{2g}$

Na pierwszym odcinku rurociągu wysokość ciśnienia spada liniowo zgodnie z wielkością strat liniowych: $\lambda_1 \frac{V_1^2}{2g}$

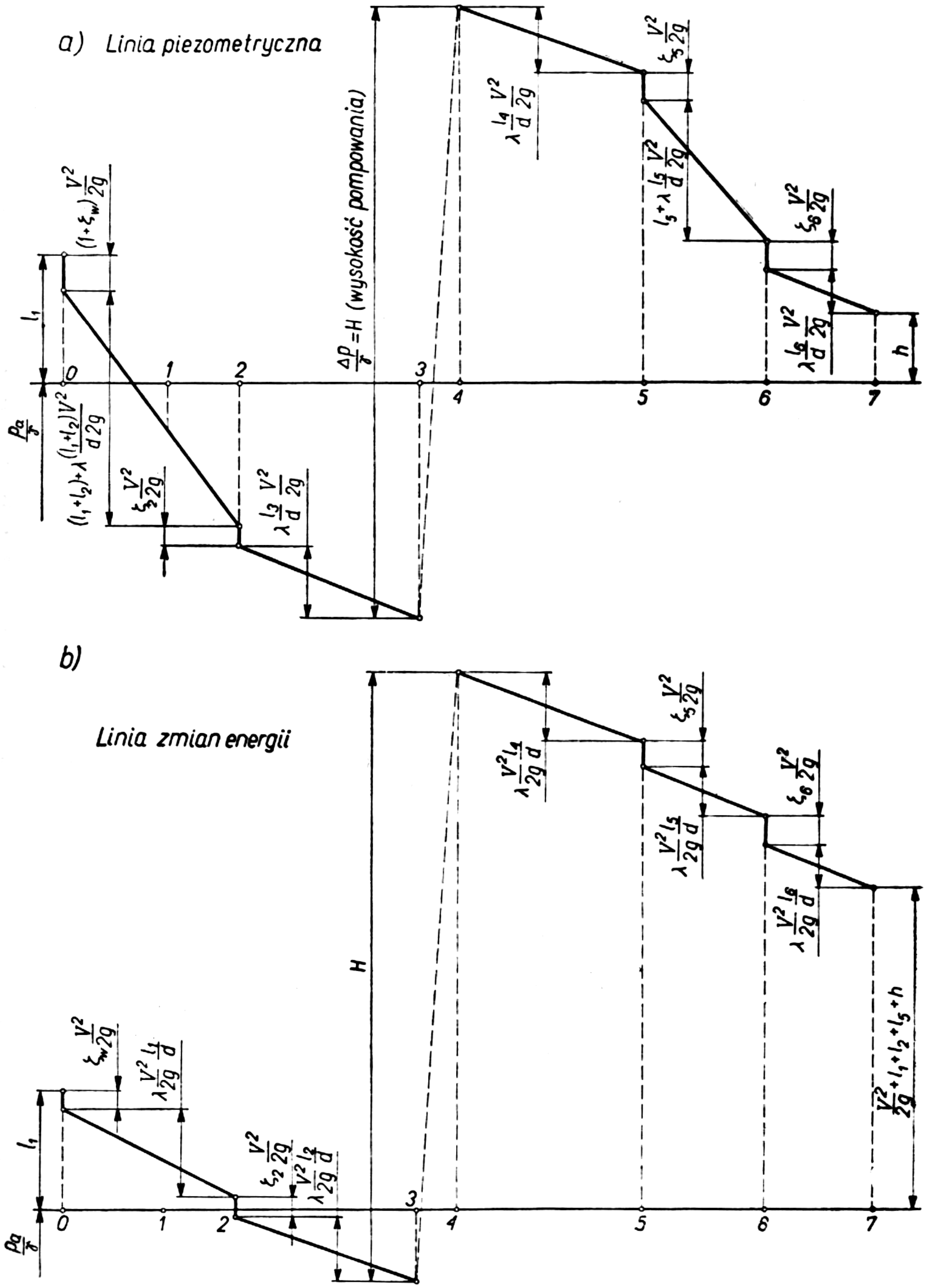
Komentarze do linii spadku energii

Linia ta pokazuje tylko wysokości liniowych i lokalnych strat energii, nie uwzględniając energii kinetycznej płynącej cieczy, czyli leży ona wyżej od linii piezometrycznej o wielkość: $\frac{V_i^2}{2g}$

Obliczenie rurociągu prostego z pompą



Rurociąg czerpie wodę ze studni A i tłoczy ją do zbiornika B. Energia dostarczona przez pompę w jednostce czasu jest zużywana na podniesienie wody od poziomu A do poziomu B oraz na pokonanie strat liniowych wzdłuż przewodu oraz strat lokalnych. Na odcinku 3-4 oznaczamy tylko przyrost ciśnienia wywołany pracą pompy bez uwzględniania strat na odcinkach rurociągu należących do pompy.



Wysokość podnoszenia pompy:

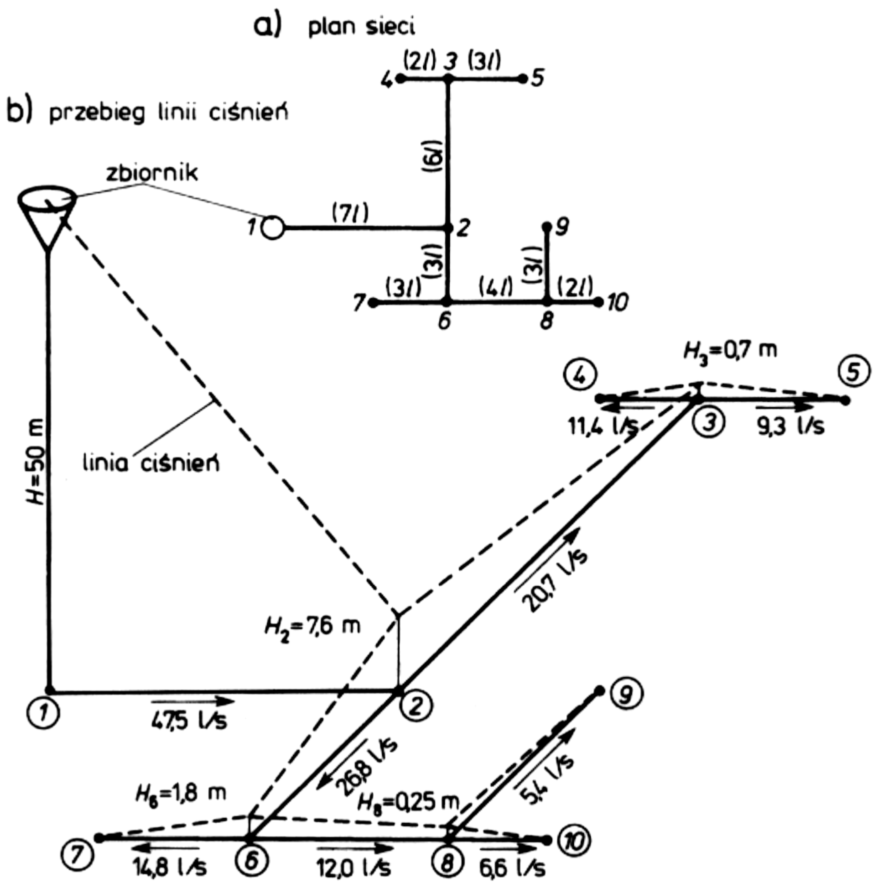
$$H = \frac{\Delta p}{\rho g}$$

Poziom odniesienia na wysokości wlotu do rurociągu. Wysokość ciśnienia wynosi tam:

$$l_1 + \frac{p_a}{\rho g}$$

Rurociąg ma stały przekrój, wobec czego prędkość przepływu jest stała w całym rurociągu.

Obliczenie sieci rozgałęzionej



Dana jest sieć rozgałęziona zasilana ze zbiornika o stałym nadciśnieniu H=50 [m]. W punktach 4, 5, 7, 9, 10 następuje wypływ wody do atmosfery. Obliczyć natężenia przepływu w odcinkach sieci oraz wyznaczyć linie piezometryczne. Pominąć straty lokalne.

Sieć składa się z 9 odcinków, 4 węzłów oraz 6 punktów końcowych (1 zasilający i 5 zasilanych). Niewiadome to 9 wydatków na odcinkach oraz 4 wartości nadciśnienia w węzłach. Mamy do dyspozycji 9 równań Bernoulliego i 4 równania ciągłości przepływu w węzłach.

Zastosujemy inną postać wzoru na straty liniowe w odcinkach sieci:

$$\Delta h_{li} = l_i \frac{Q_i^2}{K_i^2} \quad \text{gdzie:} \quad K = 0{,}061\left[m^3/s\right] \quad \text{charakterystyka przewodu}$$

Na podstawie równania Bernoulliego otrzymujemy następujące równania:

$$\frac{H_1 - H_2}{7 \cdot l} = \frac{Q_{12}^2}{K^2} \qquad \frac{H_2 - H_3}{6 \cdot l} = \frac{Q_{23}^2}{K^2} \qquad \frac{H_2 - H_6}{3 \cdot l} = \frac{Q_{26}^2}{K^2} \qquad \frac{H_6 - H_8}{4 \cdot l} = \frac{Q_{68}^2}{K^2}$$

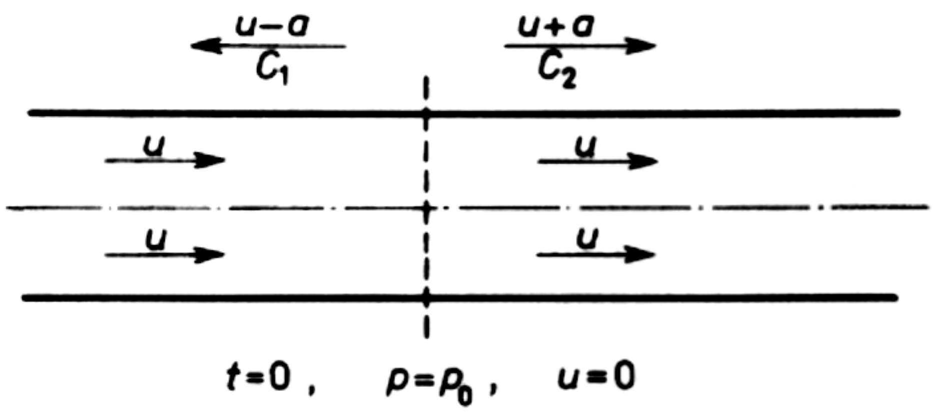
$$\frac{H_3}{2 \cdot l} = \frac{Q_{34}^2}{K^2} \qquad \frac{H_3}{3 \cdot l} = \frac{Q_{35}^2}{K^2} \qquad \frac{H_6}{3 \cdot l} = \frac{Q_{67}^2}{K^2} \qquad \frac{H_8}{3 \cdot l} = \frac{Q_{89}^2}{K^2} \qquad \frac{H_8}{2 \cdot l} = \frac{Q_{8,10}^2}{K^2}$$

Na podstawie równania ciągłości przepływu w węzłach otrzymujemy następujące równania:

$$Q_{68} = Q_{89} + Q_{8,10} \qquad Q_{26} = Q_{67} + Q_{68} \qquad Q_{23} = Q_{34} + Q_{35} \qquad Q_{12} = Q_{23} + Q_{26}$$

Wyniki rozwiązania tego układu równań pokazane są na rysunku.

Uderzenie hydrauliczne



Uderzenie hydrauliczne jest silnie dynamicznym zjawiskiem występującym np. przy nagłym zamknięciu przewodu w trakcie przepływu.

Obliczeniowa analiza uderzenia hydraulicznego wymaga wzięcia pod uwagę elastyczności ścianek przewodu oraz (zwykle pomijanej) ściśliwości cieczy. Nagłe zamknięcie przewodu powoduje powstanie fali obniżonego ciśnienia rozprzestrzeniającej się zgodnie z kierunkiem pierwotnego przepływu oraz fali podwyższonego ciśnienia, rozprzestrzeniającej się pod prąd przepływu pierwotnego.

Prędkość propagacji fali ciśnienia:

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho_0\left(\frac{1}{E_c} + \frac{d}{\delta}\frac{1}{E_s}\right)}}$$

gdzie: δ– grubość ścianki rurociągu

d – średnica rurociągu

ρ_0 - początkowa gęstość cieczy

E_c - moduł sprężystości cieczy

E_s - moduł sprężystości materiału rurociągu

Podwyższone ciśnienie: $p = p_0 + \rho_0 ua$

Obniżone ciśnienie: $p = p_0 - \rho_0 ua$

Fala obniżonego ciśnienia może prowadzić do wystąpienia kawitacji i erozyjnego niszczenia ścianek rurociągu poniżej przegrody, a fala podwyższonego ciśnienia może rozsadzić rurociąg powyżej przegrody.

Przykład

Przewodem stalowym o średnicy d=600 [mm] i grubości ścianek δ=12 [mm] przepływa woda z prędkością u=3,0 [m/s]. Wyznaczyć przyrost ciśnienia w chwili nagłego zamknięcia zaworu, jeżeli

$E_s = 2{,}06 \cdot 10^5 \left[MPa\right]$ oraz $E_c = 0{,}2 \cdot 10^4 \left[MPa\right]$

$$a = \sqrt{\frac{1}{1000{,}0\left(\frac{1}{0{,}2 \cdot 10^{10}} + \frac{0{,}6}{0{,}012}\frac{1}{2{,}06 \cdot 10^{11}}\right)}} = 1160\left[m/s\right]$$

$$\Delta p = \rho_0 u a = 1000{,}0 \cdot 3{,}0 \cdot 1160{,}0 = 3480000\left[Pa\right] = 3{,}48\left[MPa\right]$$