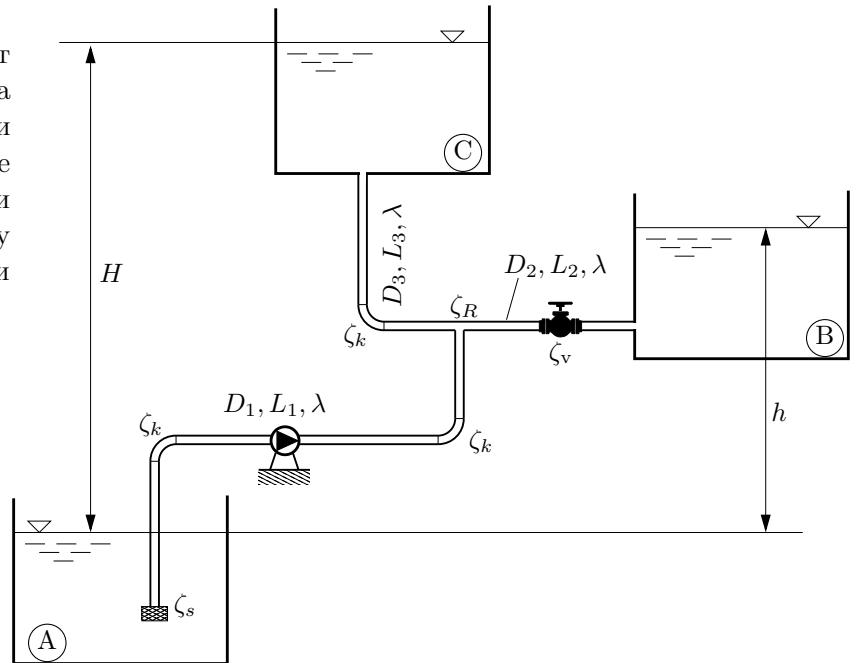


# Једнодимензијски прорачун сложеног цевовода

1. Пумпа, приказана на слици 1, црпи воду из резервоара А и шаље је ка резервоарима В и С. Резервоари су отворени ка атмосфери и нивои воде у њима су непроменљиви. Познати су следећи подаци: висине  $H = 25\text{ m}$ ,  $h = 20\text{ m}$ , пречници и дужине деоница  $D_1 = 75\text{ mm}$ ,  $D_2 = 50\text{ mm}$ ,  $D_3 = 60\text{ mm}$ ,  $L_1 = 100\text{ m}$  (деоница 1 се пружа од усисне корпе до рачве),  $L_2 = 50\text{ m}$ ,  $L_3 = 55\text{ m}$ , коефицијент трења за све деонице износи  $\lambda = 0,02$ , коефицијенти локалних отпора усисне корпе, колена и рачве редом износе  $\zeta_s = 0,15$ ,  $\zeta_k = 0,2$ ,  $\zeta_R = 1,5$ .

Колико треба да износи вредност коефицијента локалног отпора вентила смештеног у деоници 2 ( $\zeta_v = ?$ ), да би протоци који доспевају у резервоаре В и С били једнаки и износили  $\dot{V}_B = \dot{V}_C = 4\text{ lit/s}$ ? Одредити снагу пумпе ако је њен степен корисности  $\eta = 0,8$ .

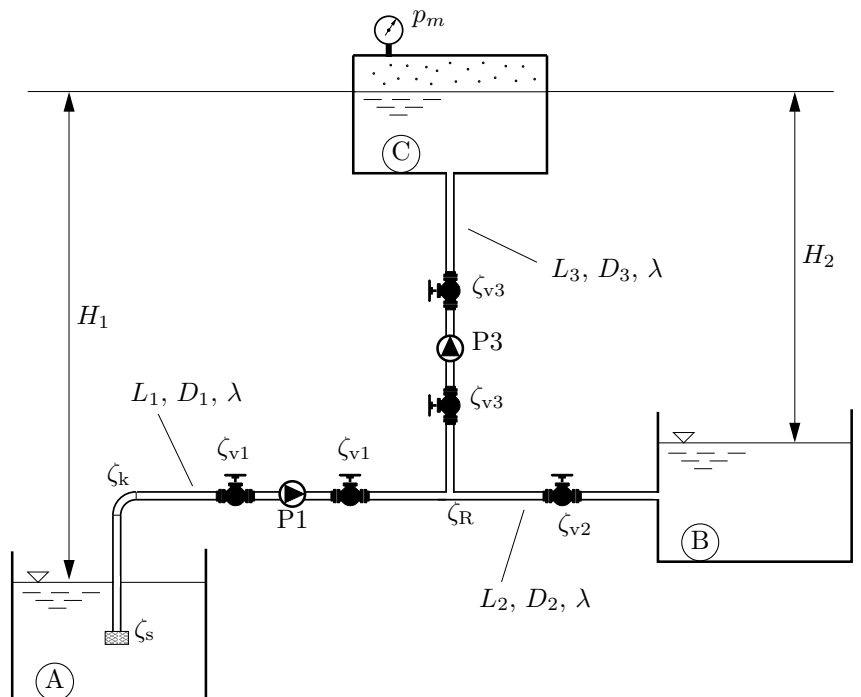


Решење:
$P_p = 3109,2\text{ W}$
$\zeta_v = 11,28$

Слика 1. Задатак 1.

2. У систему приказаном на слици 2 пумпе P1 и P3 транспортују воду ( $\rho = 1000\text{ kg/m}^3$ ) из резервоара А у резервоаре В и С. Одредити снаге потребне за погон пумпи. Нивои воде у резервоарима се не мењају. Познати су следећи подаци: висине  $H_1 = 10\text{ m}$ ,  $H_2 = 8\text{ m}$ , дужине деоница  $L_1 = 8\text{ m}$ ,  $L_2 = 3\text{ m}$ ,  $L_3 = 6\text{ m}$ , пречници цеви  $D_1 = 160\text{ mm}$ ,  $D_2 = D_3 = 120\text{ mm}$ , коефицијент трења је исти за све деонице и износи  $\lambda = 0,03$ .

Коефицијенти локалних отпора имају следеће вредности:  $\zeta_s = 0,2$ ,  $\zeta_k = 0,3$ ,  $\zeta_{v1} = \zeta_{v2} = 0,5$ ,  $\zeta_{v3} = 0,6$  и  $\zeta_R = 0,4$ . Натпритисак у резервоару С износи  $p_m = 0,4\text{ bar}$ , а степен корисности за обе пумпе је  $\eta = 0,8$ . Познате су средње брзине струјања у деоницама 1 и 2:  $U_1 = 1\text{ m/s}$ ,  $U_2 = 0,95\text{ m/s}$ .

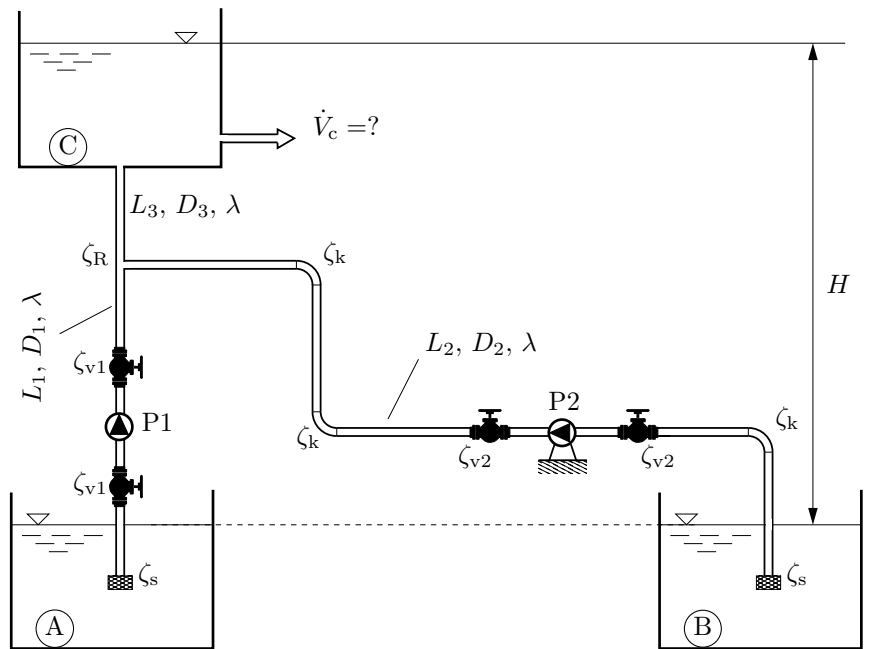


Решење:
$P_{p1} = 560,9\text{ W}$
$P_{p2} = 1388,9\text{ W}$

Слика 2. Задатак 2.

3. У систему приказаном на слици 3 пумпа P1 црпи воду из резервоара А и шаље је ка резервоару С. Средња брзина струјања у деоници 1 износи  $U_1 = 1 \text{ m/s}$ . Пумпа P2 истим запреминским протоком ( $\dot{V}_1 = \dot{V}_2$ ) транспортује воду из резервоара В у резервоар С. Одредити снаге пумпи P1 и P2. Колико износи запремински проток воде  $\dot{V}_C$  који се одводи из резервоара С, ако је ниво воде у њему непроменљив?

Познати су следећи подаци: густина воде  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ , пречници деоница  $D_1 = 150 \text{ mm}$ ,  $D_2 = 100 \text{ mm}$ ,  $D_3 = 200 \text{ mm}$ , дужине деоница  $L_1 = 10 \text{ m}$ ,  $L_2 = 18 \text{ m}$ ,  $L_3 = 4 \text{ m}$ , висина  $H = 12 \text{ m}$ , коефицијенти локалних губитака  $\zeta_{v1} = 0,8$ ,  $\zeta_{v2} = 1$ ,  $\zeta_s = 0,5$ ,  $\zeta_k = 0,2$ ,  $\zeta_R = 0,6$ . Коефицијент трења у свим деоницама има исту вредности и износи  $\lambda = 0,02$ , а степен корисности пумпи је  $\eta = 0,8$ .

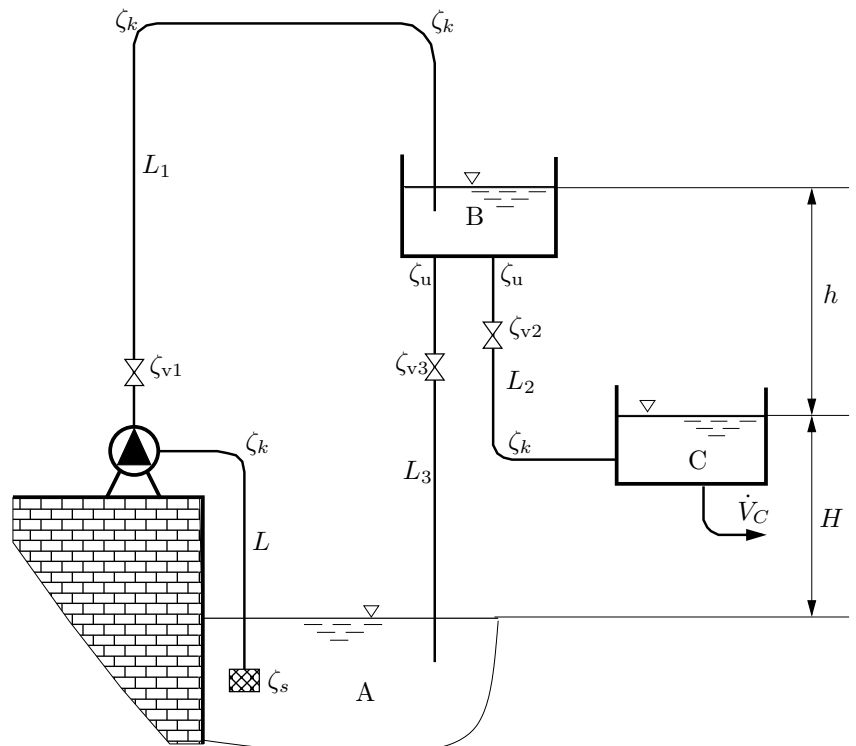


Слика 3. Задатак 3.

Решење:
$P_{p1} = 2666,2 \text{ W}$
$P_{p2} = 3002,9 \text{ W}$
$\dot{V}_C = 35,3 \text{ lit/s}$

4. Из језера А (слика 4) пумпа црпи воду ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) и транспортује је ка резервоару В, из ког се део воде враћа у језеро кроз деоницу 3, а део воде, под дејством силе гравитације, кроз деоницу 2 одлази у резервоар С. Нивои воде у резервоарима и језеру су непроменљиви. Одредити брзине струјања воде у свим деоницама и снагу пумпе. Ако је потребно испитати да ли у систему долази до појаве кавитације, означити на слици критична места на којима би требало извршити проверу. Познати су следећи подаци:

- дужина цевовода од усисне корпе до пумпе  $L = 5 \text{ m}$ , дужина цевовода од пумпе до резервоара В  $L_1 = 15 \text{ m}$ , дужина цевовода од резервоара В до језера А  $L_3 = 5 \text{ m}$ , и од резервоара В до резервоара С  $L_2 = 5 \text{ m}$ ,
- вредност коефицијента трења, као и вредности пречника цеви су исте за све деонице и изnose:  $\lambda = 0,03$ ,  $D = 70 \text{ mm}$ ,
- висине  $H = 2 \text{ m}$ ,  $h = 4 \text{ m}$ ,
- вредности коефицијената локалних отпора: усисне корпе  $\zeta_s = 2,5$ , колена  $\zeta_k = 0,2$ , улаза у цевовод  $\zeta_u = 0,3$ , вентила  $\zeta_{v1} = 1,5$ ,  $\zeta_{v2} = 100$ ,  $\zeta_{v3} = 80$ ,
- степен корисности пумпе  $\eta = 0,8$ .

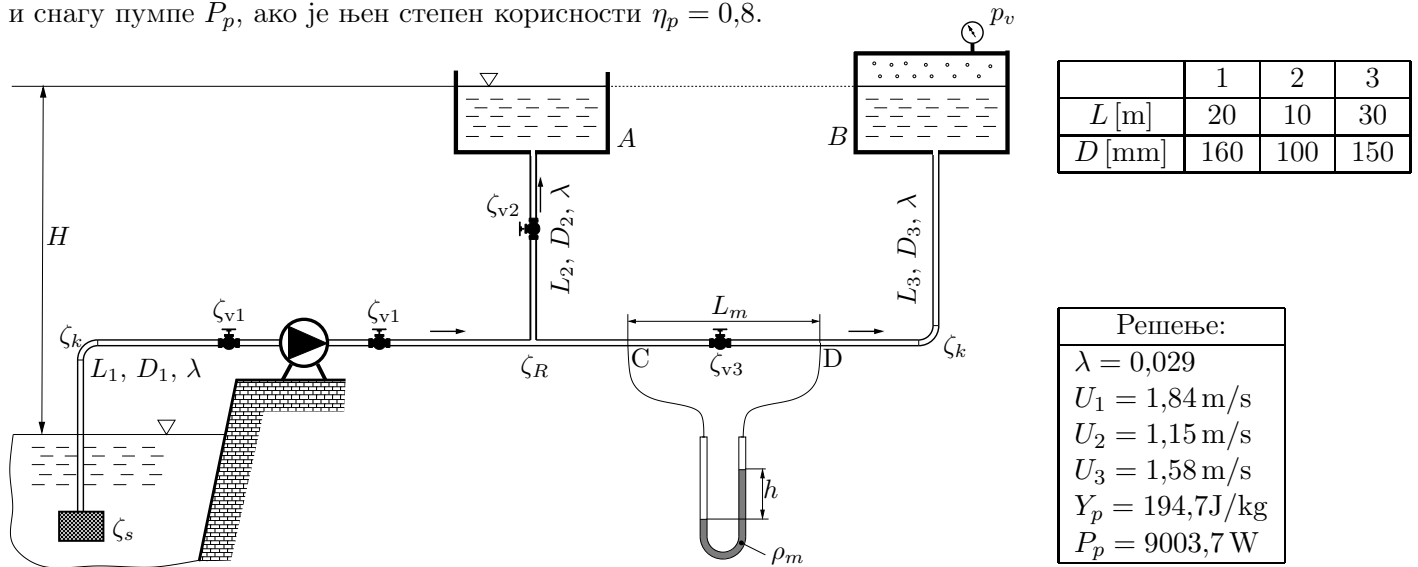


Слика 4. Задатак 4.

Решење:  $U_3 = 1,188 \text{ m/s}$ ,  $U_2 = 0,87 \text{ m/s}$ ,  $U_1 = 2,058 \text{ m/s}$ ,  $P_p = 879,8 \text{ W}$

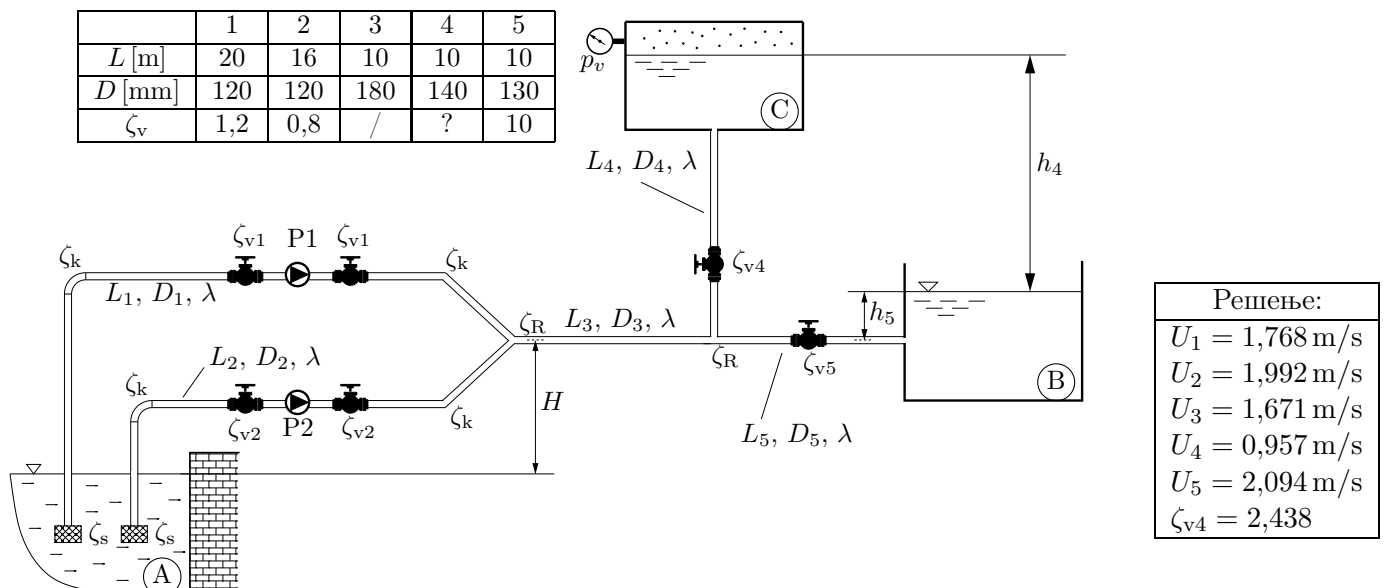
5. У систему приказаном на слици 5 пумпа црпи воду ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) из језера и потискује је у отворени резервоар А и затворени резервоар В у коме влада потпритисак  $p_v = 5 \text{ kPa}$ . Нивои воде у резервоарима су једнаки и налазе се  $H = 18 \text{ m}$  изнад нивоа језера. Систем се састоји од три деонице чије су дужине и пречници дати у табели. Запремински проток кроз деоницу 3 износи  $\dot{V}_3 = 28 \text{ lit/s}$ . Коефицијенти локалних отпора имају следеће вредности: усисна корпа  $\zeta_s = 0,8$ , колена  $\zeta_k = 0,5$ , рачва  $\zeta_R = 0,8$ , вентили  $\zeta_{v1} = 1$ ,  $\zeta_{v2} = 5$ ,  $\zeta_{v3} = 1$ . Коефицијент трења је једнак у свим деоницама, а одређује се на основу показивања U-цеви ( $h = 20 \text{ mm}$ ) која је постављена у деоници 3 и мери пад притиска од тачке С до тачке D (слика 5). Као манометарска течност се користи жива чија је густина  $\rho_m = 13600 \text{ kg/m}^3$ . Растојање тачке D од тачке С износи  $L_m = 5 \text{ m}$ .

Одредити: вредност коефицијента трења  $\lambda$ , средње брзине струјања воде у деоницама 1, 2 и 3, напор  $Y_p$  и снагу пумпе  $P_p$ , ако је њен степен корисности  $\eta_p = 0,8$ .



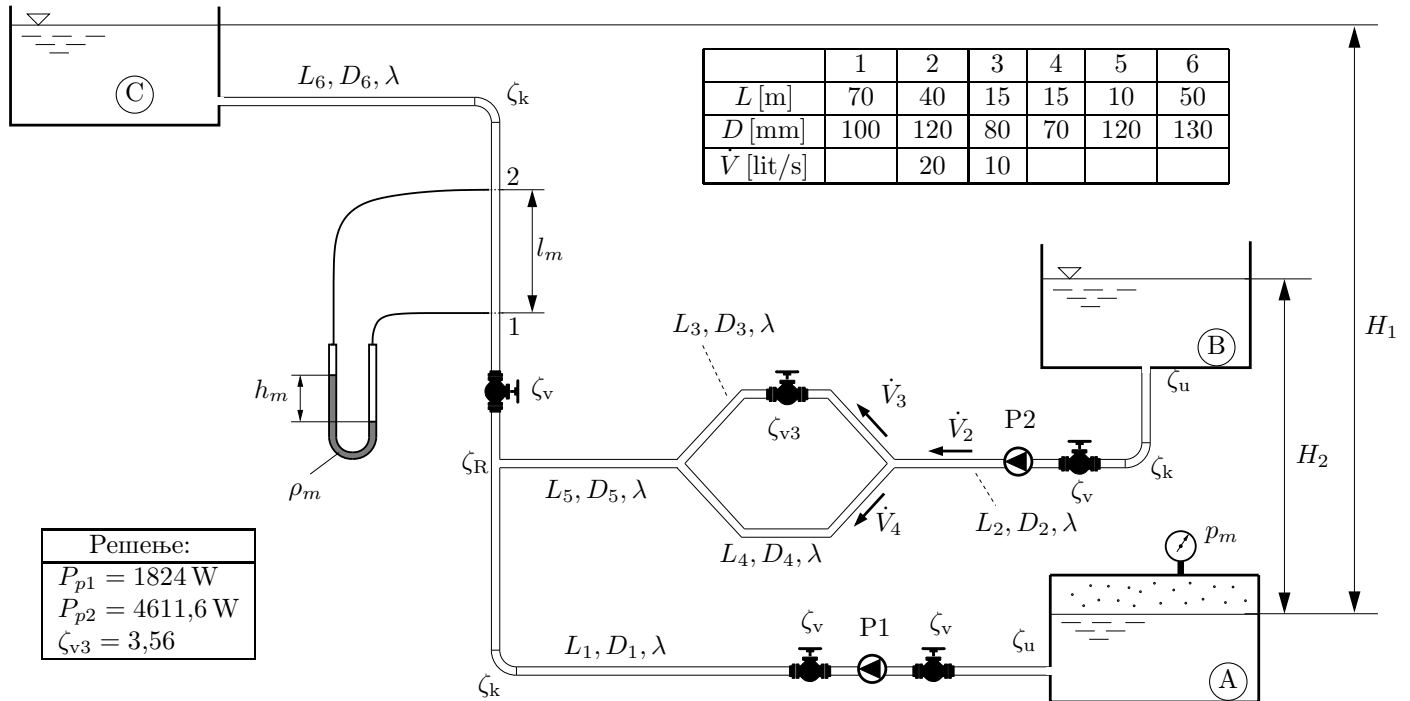
Слика 5. Задатак 5.

6. У систему приказаном на слици 6 пумпе P1 и P2 транспортују воду ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) из језера А у резервоаре В и С. Пумпе раде са напором  $Y_{p1} = Y_{p2} = 110 \text{ J/kg}$ , а запремински проток кроз пумпу у деоници ① износи  $\dot{V}_1 = 20 \text{ lit/s}$ . Одредити средње брзине струјања у свих пет деоница, као и коефицијент отпора вентила у деоници 4 ( $\zeta_{v4} = ?$ ). Вредности коефицијената отпора осталих вентила су дати у табели. Ту се такође налазе вредности дужина и пречника за сваку деоницу. Познате су висине  $H = 5 \text{ m}$ ,  $h_4 = 7 \text{ m}$ ,  $h_5 = 1 \text{ m}$ , вредност потпритиска у резервоару С  $p_v = 40 \text{ kPa}$ , коефицијенти отпора колена  $\zeta_k = 0,3$ , рачве  $\zeta_R = 0,4$  и усисне корпе  $\zeta_s = 0,4$ . Коефицијент трења за све деонице има исту вредност,  $\lambda = 0,04$ .



Слика 6. Задатак 6.

7. У систему приказаном на слици 7 пумпе P1 и P2 потискују воду ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) из великих резервоара А и В у велики резервоар С. Одредити снаге пумпи и коефицијент отпора вентила  $\zeta_{v3}$ . Познати су следећи подаци: натпритисак  $p_m = 2 \text{ bar}$ , висине  $H_1 = 20 \text{ m}$ ,  $H_2 = 10 \text{ m}$ , коефицијент трења  $\lambda = 0,02$  (ова вредност важи за све деонице), коефицијенти локалних отпора  $\zeta_u = 0,5$ ,  $\zeta_k = 1$ ,  $\zeta_v = 3$ ,  $\zeta_R = 1,5$  и степен корисности  $\eta = 0,8$  (за обе пумпе.) Подаци о дужинама деоница, пречницима цеви и запреминским протоцима су дати у табели. На делу деонице 6 мери се пад притиска помоћу диференцијалног манометра са живом:  $\rho_m = 13600 \text{ kg/m}^3$ ,  $h_m = 50 \text{ mm}$ ,  $l_m = 11 \text{ m}$ . Напомена: локалне губитке услед рачвања цевовода узети у обзир само на месту где је то обележено на слици.

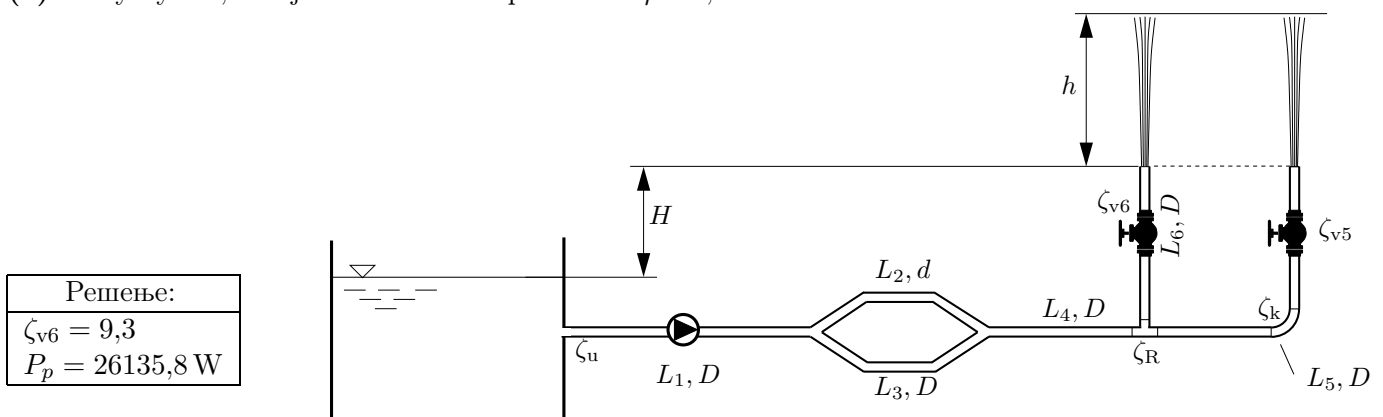


Слика 7. Задатак 7.

8. Пумпа црпи воду из великог резервоара и шаље је кроз цевовод приказан на слици 8. Вода кроз деонице 5 и 6 истиче у атмосферу. Теоријска висина оба млаза (занемарују се сви губици у млазу) је иста и износи  $h = 1 \text{ m}$ . Познати су следећи подаци:  $H = 0,5 \text{ m}$ , пречник деонице 2,  $d = 50 \text{ mm}$  (видети слику 8), пречник свих осталих деоница  $D = 60 \text{ mm}$ , коефицијент трења за све деонице  $\lambda = 0,03$ , густина воде  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ , коефицијенти локалних отпора  $\zeta_u = 0,2$ ,  $\zeta_k = 0,3$ ,  $\zeta_{v5} = 4$ ,  $\zeta_R = 1$  дужине деоница  $L_1 = L_5 = 20 \text{ m}$ ,  $L_2 = L_3 = L_4 = L_6 = 10 \text{ m}$ . Локалне отпоре који нису назначени на слици занемарити.

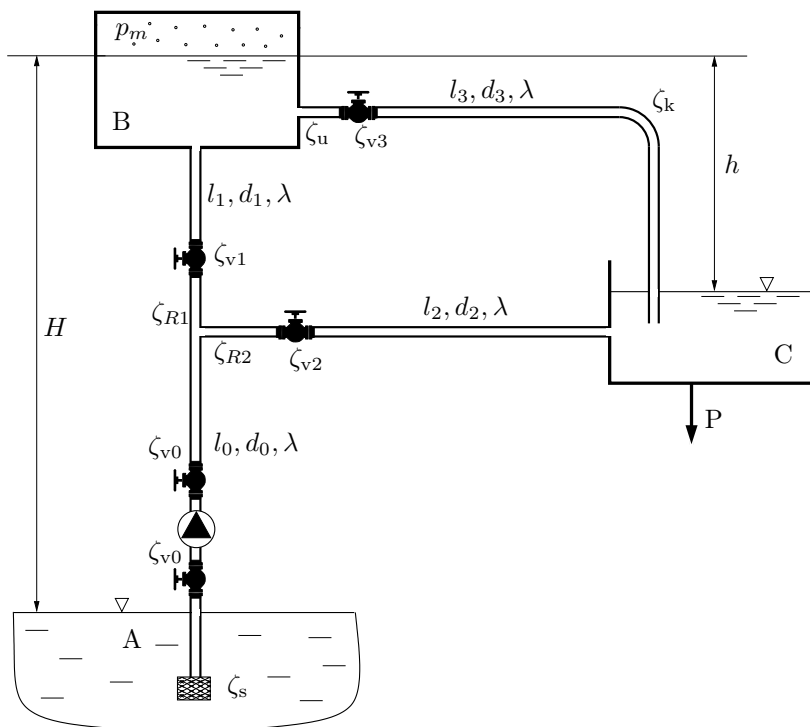
Одредити:

- (а) коефицијент отпора вентила у деоници 6, ( $\zeta_{v6} = ?$ ),  
 (б) снагу пумпе, ако је њен степен корисности  $\eta = 0,8$ .



Слика 8. Задатак 8.

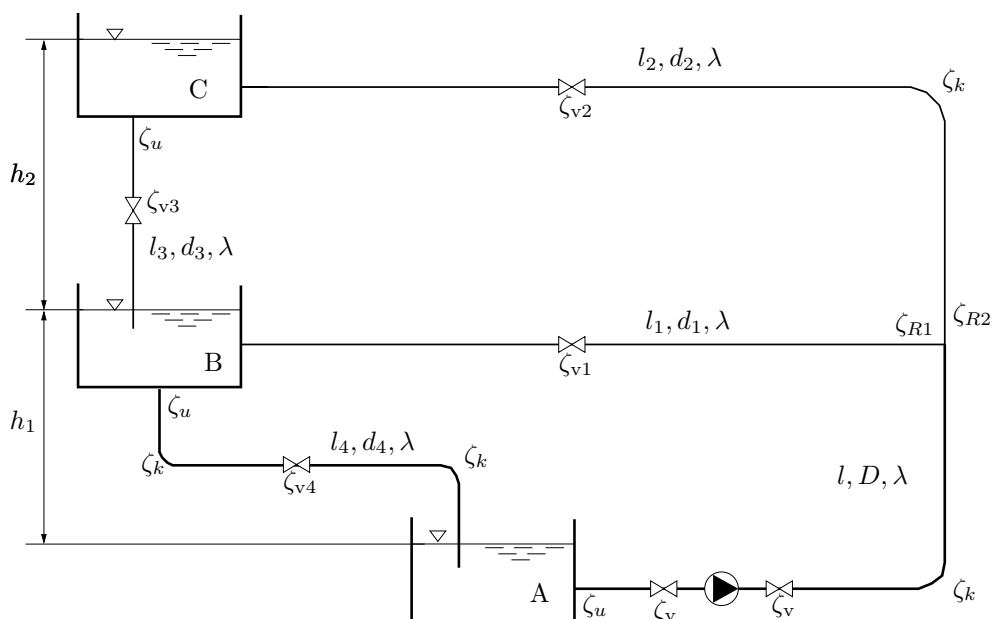
9. Пумпа транспортује воду из резервоара А у резервоаре В и С. Истовремено вода струји из резервоара В у резервоар С, а из њега ка потрошачу Р (слика 9), тако да су нивои воде у резервоарима непроменљиви. Одредити снагу пумпе, ако су познати следећи подаци:  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $h = 1 \text{ m}$ ,  $H = 10 \text{ m}$ ,  $l_0 = 4 \text{ m}$ ,  $l_1 = 5 \text{ m}$ ,  $l_2 = 10 \text{ m}$ ,  $l_3 = 15 \text{ m}$ ,  $d_0 = 80 \text{ mm}$ ,  $d_1 = 45 \text{ mm}$ ,  $d_2 = 50 \text{ mm}$ ,  $d_3 = 40 \text{ mm}$ ,  $\zeta_u = \zeta_k = 0,5$ ,  $\zeta_s = 1$ ,  $\zeta_{v0} = 2$ ,  $\zeta_{v1} = 1,7$ ,  $\zeta_{v2} = 3,4$ ,  $\zeta_{v3} = 4$ ,  $\zeta_{R1} = 0,3$ ,  $\zeta_{R2} = 0,6$ ,  $\eta_p = 0,75$ ,  $p_m = 5 \text{ kPa}$ , за све деонице важи  $\lambda = 0,02$ .



Решење:
$P_p = 860,6 \text{ W}$

Слика 9. Задатак 9.

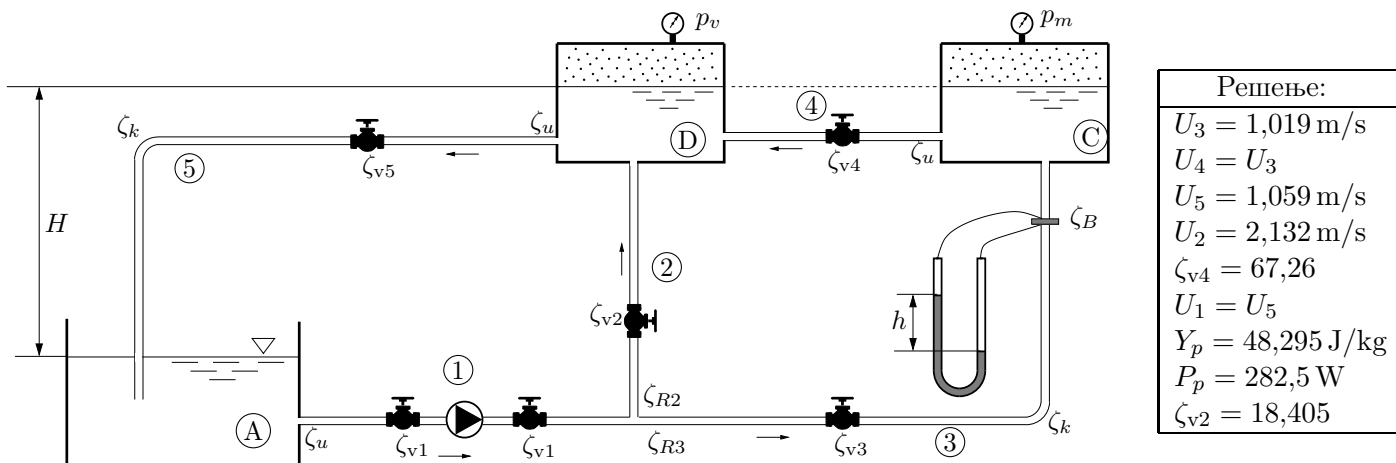
10. Пумпа транспортује воду из резервоара А ка резервоарима В и С (слика 10). При раду пумпе нивои воде у резервоарима се не мењају. Одредити снагу пумпе и коефицијент локалног отпора вентила у деоници 2 ( $\zeta_{v2} = ?$ ). Познати су следећи подаци:  $h_1 = 1,4 \text{ m}$ ,  $h_2 = 1,2 \text{ m}$ ,  $l = 8 \text{ m}$ ,  $l_1 = 4 \text{ m}$ ,  $l_2 = 5 \text{ m}$ ,  $l_3 = 1 \text{ m}$ ,  $l_4 = 6 \text{ m}$ ,  $D = 60 \text{ mm}$ ,  $d_1 = 40 \text{ mm}$ ,  $d_2 = 36 \text{ mm}$ ,  $d_3 = 25 \text{ mm}$ ,  $d_4 = 50 \text{ mm}$ ,  $\zeta_u = \zeta_k = 0,5$ ,  $\zeta_v = \zeta_{v1} = 2$ ,  $\zeta_{v3} = 4$ ,  $\zeta_{v4} = 3$ ,  $\zeta_{R1} = 1$ ,  $\zeta_{R2} = 0,3$ ,  $\lambda = 0,02$ , степен корисности пумпе је  $\eta_p = 0,8$ .



Решење:
$U_4 = 1,865 \text{ m/s}$
$U = U_4$
$U_3 = 1,933 \text{ m/s}$
$U_1 = 2,159 \text{ m/s}$
$U_2 = 0,932 \text{ m/s}$
$Y_p = 34,15 \text{ J/kg}$
$P_p = 156,3 \text{ W}$
$\zeta_{v2} = 0,517$

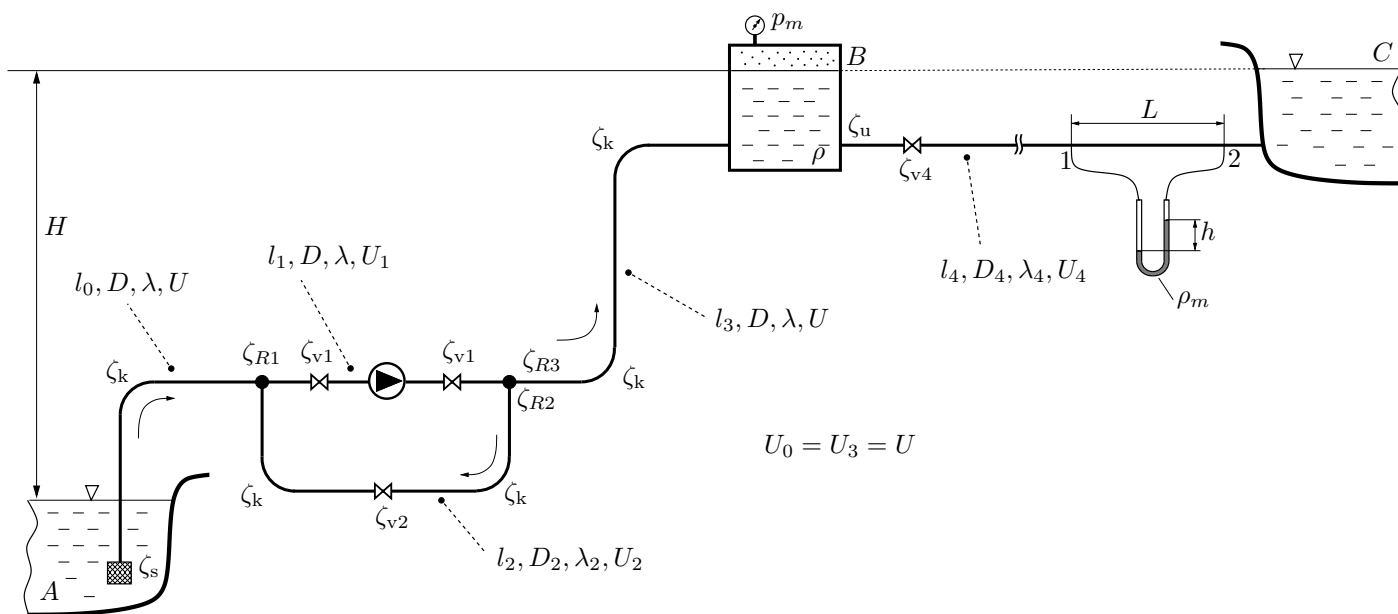
Слика 10. Задатак 10.

11. Пумпа транспортује воду из резервоара А ка резервоарима С и D, а затим се вода из резервоара D кроз деоницу ⑤ враћа у резервоар А (слика 11). Запремински проток у грани ③ се мери помоћу бленде чија је карактеристика  $k = 0,01 \text{ m}^{\frac{5}{2}}/\text{s}$ , а која је повезана на диференцијални манометар са кога се очитава разлика нивоа манометарске течности  $h = 40 \text{ mm}$ . Проток се израчунава према једначини  $\dot{V}_3 = k\sqrt{h}$ . Нивои воде у резервоарима су непроменљиви. Потребно је одредити коефицијенте отпора вентила  $\zeta_{v2}$  и  $\zeta_{v4}$ , као и снагу пумпе. Познати су пречници деоница и њихове дужине  $D_1 = 75 \text{ mm}$ ,  $D_2 = 40 \text{ mm}$ ,  $D_3 = 50 \text{ mm}$ ,  $D_4 = 50 \text{ mm}$ ,  $D_5 = 75 \text{ mm}$ ,  $L_1 = 5 \text{ m}$ ,  $L_2 = 5 \text{ m}$ ,  $L_3 = 10 \text{ m}$ ,  $L_4 = 4 \text{ m}$ ,  $L_5 = 10 \text{ m}$ , вредности релативних притисака у резервоарима  $p_v = 35,5 \text{ kPa}$ ,  $p_m = 1 \text{ kPa}$ , висина  $H = 4 \text{ m}$ , коефицијенти локалних отпора  $\zeta_u = \zeta_k = 0,5$ ,  $\zeta_{v1} = 1,5$ ,  $\zeta_{v3} = 3$ ,  $\zeta_{v5} = 2$ ,  $\zeta_{R2} = 0,6$ ,  $\zeta_{R3} = 0,3$ ,  $\zeta_B = 1,5$ . Радни флуид је вода густине  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ . Коефицијент трења за све деонице износи  $\lambda = 0,02$ , а степен корисности пумпе је  $\eta = 0,8$ .



Слика 11. Задатак 11.

12. Пумпом се црпи вода ( $\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ) из доњег језера А, запреминским протоком  $\dot{V}_0 = 40 \frac{\text{l}}{\text{s}}$  и шаље се ка резервоару В у коме влада натпритисак  $p_m = 15000 \text{ Pa}$ . Ниво воде у резервоару В се не мења. За регулацију протока се користи оптични вод (грана 2) кроз који протиче  $\dot{V}_2 = 12 \frac{\text{l}}{\text{s}}$  воде. Вода даље струји из резервоара В у горње језеро С, кроз праволинијски цевовод. На делу тог цевовода, дужине  $L = 4,5 \text{ m}$  мери се пад притиска помоћу U-цеви чије је показивање  $h = 90 \text{ mm}$ . Густина манометарске течности је  $\rho_m = 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Познати су и следећи подаци:  $D = 200 \text{ mm}$ ,  $D_2 = 80 \text{ mm}$ ,  $D_4 = 170 \text{ mm}$ ,  $l_0 = 5 \text{ m}$ ,  $l_1 = 2 \text{ m}$ ,  $l_2 = 4 \text{ m}$ ,  $l_3 = 15 \text{ m}$ ,  $H = 10 \text{ m}$ ,  $\lambda = 0,03$ ,  $\lambda_2 = 0,035$ . Коефицијенти локалних отпора су:  $\zeta_s = 5$ ,  $\zeta_k = 0,3$ ,  $\zeta_{v1} = 2$ ,  $\zeta_{v4} = 1,5$ ,  $\zeta_u = 0,2$ ,  $\zeta_{R1} = 0,8$ ,  $\zeta_{R2} = 2$ ,  $\zeta_{R3} = 1,2$ .



Слика 12. Задатак 12.

Одредити:

- средње брзине струјања у свим деоницама,
- вредност коефицијента трења у деоници 4,  $\lambda_4$ ,
- дужину деонице 4, између резервоара В и језера С,  $l_4$ ,
- коефицијент отпора вентила који се налази у оптичком воду (грана 2)  $\zeta_{V2}$ ,
- напор пумпе  $Y_p$  и снагу пумпе  $P_p$ , ако је њен степен корисности  $\eta_p = 0,8$ .

Решење:

Познати су запремински протоци у деоницама 0 и 2. Могуће је на основу једначине континуитета за цев одредити средње брзине струјања у тим деоницама. Протоци и пречници у деоницама 0 и 3 су једнаки, па су и средње брзине струјања:  $U_0 = U_3 = U$ .

$$\dot{V}_0 = U \frac{D^2 \pi}{4} \quad \Rightarrow \quad U = \frac{4\dot{V}_0}{D^2 \pi} = 1,273 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\dot{V}_2 = U_2 \frac{D_2^2 \pi}{4} \quad \Rightarrow \quad U_2 = \frac{4\dot{V}_2}{D_2^2 \pi} = 2,387 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Проток кроз деоницу 1 се може одредити на основу једначине континуитета за рачву:

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_0 + \dot{V}_2 = 52 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

$$\dot{V}_1 = U_1 \frac{D_1^2 \pi}{4} \quad \Rightarrow \quad U_1 = \frac{4\dot{V}_1}{D_1^2 \pi} = 1,655 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ниво воде у резервоару В је непроменљив, тј. нема промене запремине воде у резервоару. Према једначини континуитета за резервоар, следи да је улазни запремински проток једнак излазном:

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_4 \quad \Rightarrow \quad U \frac{D^2 \pi}{4} = U_4 \frac{D_4^2 \pi}{4} \quad \Rightarrow \quad U_4 = U \left( \frac{D}{D_4} \right)^2 = 1,762 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Из Бернулијеве једначине од доњег језера А до резервоара В, могуће је одредити напор пумпе:

$$Y_A + Y_p = Y_B + Y_{gA-B}$$

$$\begin{aligned} \frac{p_a}{\rho} + 0 + 0 + Y_p &= \frac{p_a + p_m}{\rho} + 0 + gH + \underbrace{\left( \zeta_s + \zeta_k + \lambda \frac{l_0}{D} \right)}_{C_0=6,05} \frac{U^2}{2} \\ &+ \underbrace{\left( \zeta_{R1} + 2\zeta_{v1} + \lambda \frac{l_1}{D} \right)}_{C_1=5,1} \frac{U_1^2}{2} + \underbrace{\left( \zeta_{R3} + 2\zeta_k + 1 + \lambda \frac{l_3}{D} \right)}_{C_3=5,05} \frac{U^2}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

$$Y_p = \frac{p_m}{\rho} + gH + C_0 \frac{U^2}{2} + C_1 \frac{U_1^2}{2} + C_3 \frac{U^2}{2}$$

$$Y_p = 129,07 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Снага пумпе се израчунава следећим изразом:

$$P_p = \frac{\rho \dot{V}_1 Y_p}{\eta_p} = 8389,6 \text{ W}$$

За повратни (опточни) вод важи да је напор пумпе једнак суми јединичних губитака енергије. Деонице 1 и 2 чине повратни вод, па следи:

$$Y_p = \sum Y_g$$

$$Y_p = C_1 \frac{U_1^2}{2} + \left( \zeta_{R2} + 2 \zeta_k + \zeta_{v2} + \lambda_2 \frac{l_2}{D_2} \right) \frac{U_2^2}{2}$$

Једина непозната величина у претходној једначини је тражени коефицијент локалног отпора вентила у деоници 2:

$$\zeta_{v2} = \left( Y_p - C_1 \frac{U_1^2}{2} \right) \frac{2}{U_2^2} - \zeta_{R2} - 2 \zeta_k - \lambda_2 \frac{l_2}{D_2}$$

$$\zeta_{v2} = 38,5$$

Коришћењем диференцијалног манометра, U-цеви, одређује се пад притиска у деоници 4 између пресека 1-1 и 2-2. Једначина хидростатичке равнотеже гласи:

$$p_1 + \rho g x + \rho g h = p_2 + \rho g x + \rho_m g h$$

$$p_1 - p_2 = \Delta p_{12} = g h (\rho_m - \rho) \quad (2)$$

Исти пад притиска се може одредити Дарсијевом формулом:

$$\Delta p_{12} = \rho \lambda_4 \frac{L}{D_4} \frac{U_4^2}{2} \quad (3)$$

Изједначавањем израза (2) и (3) добија се једначина у којој је једина непозната величина коефицијент трења у деоници 4  $\lambda_4$ :

$$g h (\rho_m - \rho) = \rho \lambda_4 \frac{L}{D_4} \frac{U_4^2}{2}$$

$$\lambda_4 = \frac{g h (\rho_m - \rho)}{\rho} \frac{2 D_4}{L U_4^2} = 0,032$$

Тражена дужина  $l_4$  се појављује у члану који представља губитак јединичне енергије услед трења, па се користи Бернулијева једначина од резервоара В до горњег језера С:

$$Y_B = Y_C + Y_{gB-C}$$

$$\frac{p_a + p_m}{\rho} + 0 + 0 = \frac{p_a}{\rho} + 0 + 0 + \left( \zeta_u + \zeta_{v4} + 1 + \lambda_4 \frac{l_4}{D_4} \right) \frac{U_4^2}{2}$$

$$l_4 = \frac{D_4}{\lambda_4} \left( \frac{2 p_m}{\rho U_4^2} - \zeta_u - \zeta_{v4} - 1 \right) = 36,99 \text{ m}$$