



МЕХАНИКА ФЛУИДА Б

Лабораторијска вежба

Име и презиме:

Број индекса:

Смена:

Датум и време одржавања
лабораторијске вежбе:

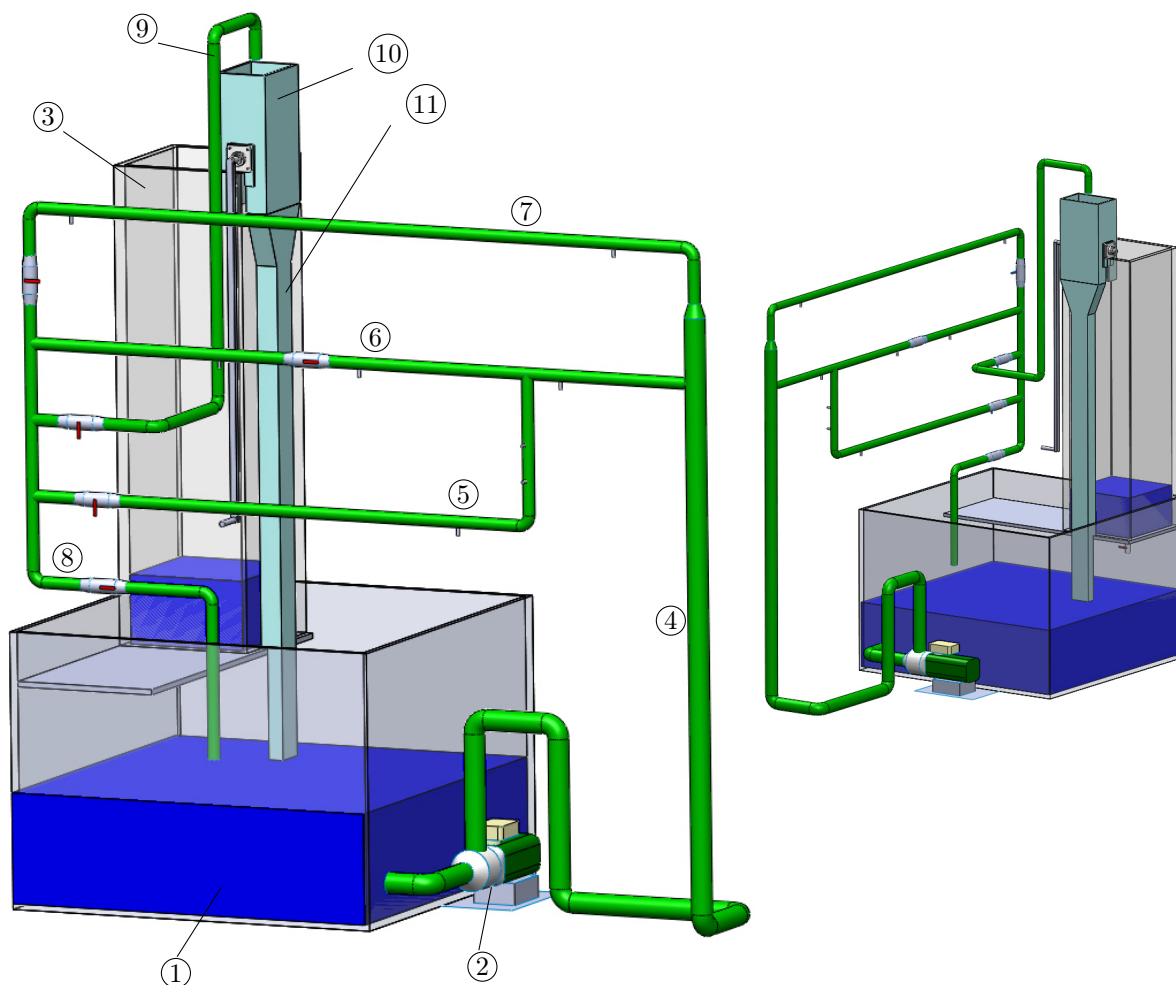
Датум и време одбране
лабораторијске вежбе:

Извештај прегледао:

Оцена:

1 Опис постројења

Постројење за извођење експеримената у оквиру лабораторијских вежби из предмета Механика флуида Б је приказано на слици 1. Бројевима су означени следећи основни делови:



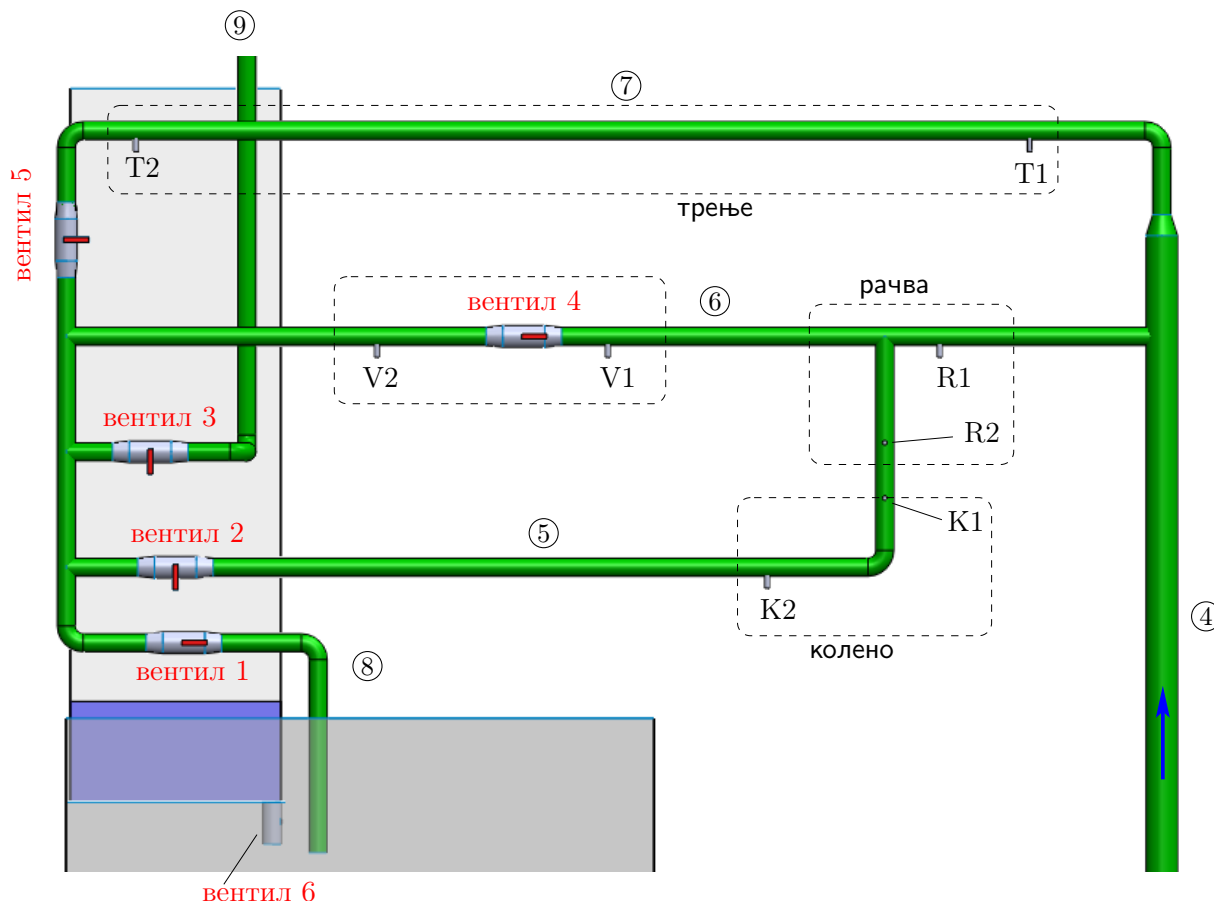
Слика 1. Основни делови експерименталног постројења

- | | |
|---|--|
| ① - велики (доњи) резервоар, | ⑥ - деоница у којој се одређује пад притиска на вентилу, |
| ② - пумпа са фреквентним регулатором, | ⑦ - деоница у којој се одређује коефицијент трења, |
| ③ - горњи резервоар, | ⑧ - деоница којом се вода враћа у доњи резервоар, |
| ④ - деоница од пумпе до рачве, | ⑨ - деоница којом вода одлази у дивертер, |
| ⑤ - деоница у којој се одређује пад притиска на колену, | ⑩ - кућиште дивертера, |
| | ⑪ - канал којим се вода враћа у доњи резервоар. |

Пумпа црпи воду из великог резервоара и потискује је кроз деоницу ④ до велике рачве. Куда ће вода протицати даље зависи од положаја вентила који су уграђени у цевовод. Могуће је остварити протицање воде кроз само једну од деоница ⑤, ⑥ или ⑦, али је могуће остварити и протицање воде кроз две или три хидраулички паралелне гране. Такође, положајем вентила се вода усмерава у доњи резервоар или у дивертер.

Циљ вежбе је експериментално одредити коефицијенте локалних отпора вентила и колена, као и коефицијент трења у деоници ⑦. На крају се одређује коефицијент протока за отвор кроз који се празни горњи резервоар. У ту сврху потребно је мерити запремински проток и падове притиска на

локалним отпорима. На слици 2 су означени: деонице, вентили и мерна места за притисак.



Слика 2. Вентили и мерна места за притисак

2 Одређивање коефицијента отпора вентила 4

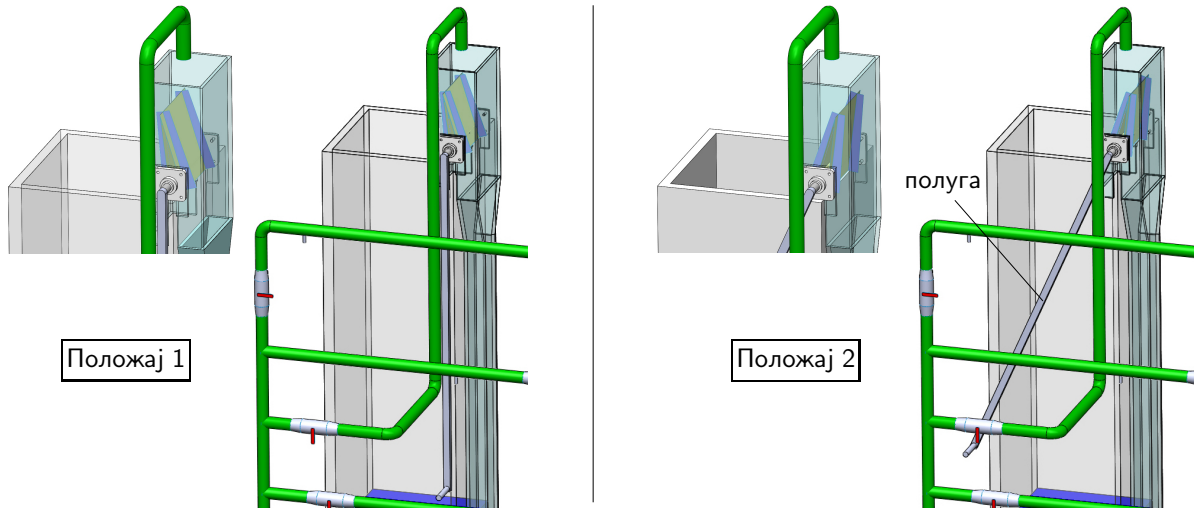
У првом делу вежбе потребно је одредити вредност коефицијента отпора вентила 4 за различите вредности Рејнолдсовог броја. Да би то било могуће потребно је мерити пад притиска на вентилу и запремински проток воде. Најпре је потребно обезбедити да вода протиче кроз деоницу ⑥, што се остварује затварањем вентила 2 и 5. У почетном тренутку вентил 3 је затворен, а вентил 1 отворен, што значи да вода пролази кроз деоницу ④, затим кроз деоницу ⑥, а потом се кроз деоницу ⑧ враћа у доњи резервоар (овакав положај вентила је приказан на слици 2). Вентил 4 треба закренути за угао од 5° и оставити га у том положају. Пре почетка мерења отвара се вентил 3 и затвара вентил 1, чиме се вода преусмерава у дивертер (видети слику 1).

Да би се одредила тражена зависност потребно је за неколико вредности запреминског протока одредити пад притиска (видети табелу 1). Проток се мења променом брзине обртања радног кола пумпе (на пумпу је прикључен регулатор брзине обртања радног кола, тј. фреквентни регулатор, који омогућава фину промену брзине обртања у опсегу од 1000 до 3500 обртаја у току једног минута). У првој колони табеле 1 се види да се прво мерење изводи за случај када је брзина обртања радног кола пумпе $n = 1000 \text{ min}^{-1}$.

2.1 Мерење протока

Проток се одређује **запреминском методом**, која је једна од најпоузданијих метода. При наведеном положају вентила вода кроз деоницу ⑨ долази у дивертер. Улога дивертера је да преусмерава воду у жељеном правцу, тако да вода из дивертера може одлазити у канал ⑪ и кроз њега у доњи резервоар, или може из дивертера одлазити у горњи резервоар. Преусмеравање воде се

врши закретањем лопатице преко полуге. На слици 3 су приказана два крајња положаја лопатице дивертера. Јасно се види да при положају 1, вода удара у лопатицу и слава се у канал (11), а да при положају 2 вода бива преусмерена у горњи резервоар.



Слика 3. Преусмеравање воде закретањем лопатице дивертера

Док се дивертер налази у положају 1, на мерној траци горњег резервоара потребно је прочитати почетни ниво воде у њему (H_1) и унети вредност у табелу. Затим се закретањем полуге лопатица помера у положај 2, чиме почиње пуњење горњег резервоара. Истовремено са закретањем полуге покреће се штоперница ради мерења временског периода током ког се пуни горњи резервоар. После приближно 40 секунди дивертер се враћа у положај 1, чиме се прекида пуњење горњег резервоара. Измерено време се уписује у табелу 1. Када се ниво воде у горњем резервоару умири врши се читавање новог нивоа воде (H_2). Попречни пресек горњег резервоара је облика правоугаоника страница 430 mm и 440 mm, па се на основу разлике нивоа воде у резервоару пре и после пуњења може одредити запремина воде која је доспела у горњи резервоар према изразу $V = A_{rez}(H_2 - H_1)$. Коначно, када се израчуната запремина подели са временом пуњења горњег резервоара, добија се запремина која доспе у горњи резервоар у јединици времена, односно добија се **запремиски проток**. Проток је потребно изразити у lit/s и унети у табелу.

- H_1 - ниво воде у горњем резервоару пре пуњења
- H_2 - ниво воде у горњем резервоару после пуњења
- t - време пуњења
- A_{rez} - површина попречног пресека горњег резервоара $A_{rez} = 0,43 \text{ m} \cdot 0,44 \text{ m}$
- V - запремина воде која је доспела у горњи резервоар за време пуњења $V = A_{rez}(H_2 - H_1)$
- \dot{V} - количник запремине воде која је доспела у горњи резервоар и времена пуњења даје запремину која у току једне секунде из цевовода доспе у резервоар, што представља запремински проток.

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Средња брзина струјања у цевоводу је брзина која помножена са површином попречног пресека цевовода даје стваран запремински проток. Деонице у којима се налазе сви локални отпори имају

унутрашњи пречник $D = 24,8 \text{ mm}$, па се средња брзина може израчунати на следећи начин:

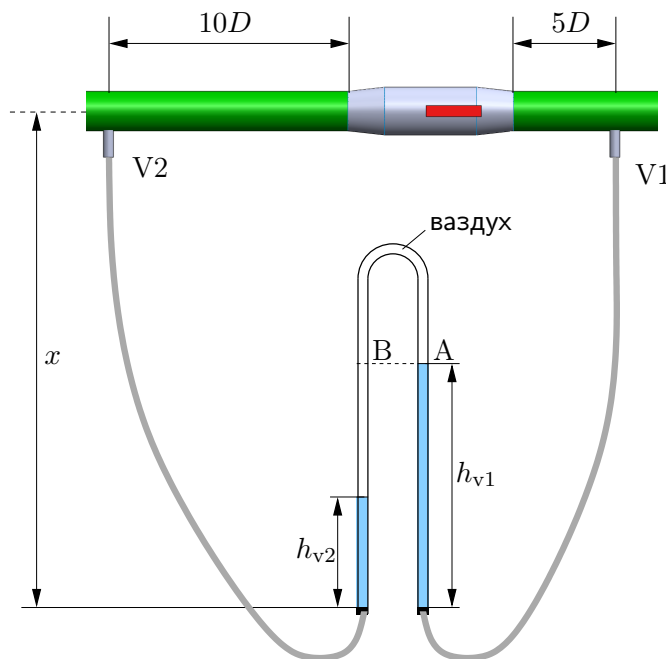
$$\dot{V} = A_{cevi}U \quad \Rightarrow \quad U = \frac{\dot{V}}{A_{cevi}} = \frac{4\dot{V}}{D^2\pi}$$

Радни флуид је вода чија кинематска вискозност на температури од 20°C износи $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, па се вредност Рејнолдсовог броја може одредити према изразу:

$$\text{Re} = \frac{UD}{\nu}$$

2.2 Мерење пада притиска

За време пуњења горњег резервоара друга група студената одређује пад притиска на вентилу. За то се користи обрнута „У-цев“ која је повезана са мерним местима V1 и V2 (слика 2). Овај део постројења је упрошћено приказан на слици 4, где се види да је мерно место пре вентила удаљено од њега за 5 вредности унутрашњег пречника цеви, док је мерно место иза вентила удаљено за 10 вредности унутрашњег пречника. Ово важи и за остале локалне отпоре који су разматрани у овој вежби. Разлог за удаљавање мерних пресека од локалног отпора је неопходност да у мерном пресеку профил брзине буде потпуно **развијен**. Напомиње се да при већим угловима закретања вентила може бити потребно више од $10D$ иза вентила да би се поново успоставио развијени профил брзине. У том случају, ако је растојање између мерних места велико, не сме се занемарити утицај трења, па се укупан пад притиска дели на део проузрокован трењем и део проузрокован локалним отпором. Овде то није случај (угао закретања је 5°), па је растојање између мерних пресека мало, те се сви губици између мерних пресека V1 и V2 приписују вентилу.



Слика 4. Мерење пада притиска на вентилу 4

У обрнутој „У-цеви“ (манометру) се изнад воде налази ваздух. Притисак испред вентила је већи, па је ниво воде у десном краку манометра виши. Потребно је прочитати нивое воде у манометру (h_{v1} и h_{v2}) и вредности унети у табелу. Писањем једначине хидростатичке равнотеже за тачке А и В може се на основу разлике нивоа $h_{v1} - h_{v2}$ одредити разлика притисака испред и иза вентила 4.

$$p_A = p_B \quad \Rightarrow \quad p_{v1} + \rho gx - \rho gh_{v1} = p_{v2} + \rho gx - \rho gh_{v2}$$

$$p_{v1} - p_{v2} = \rho g (h_{v1} - h_{v2}) \quad (2)$$

Да би био одређен коефицијент локалног отпора вентила 4 потребно је користити Бернулијеву једначину од пресека V1 до пресека V2, у којој се појављује управо израчуната разлика притисака.

$$Y_{v1} = Y_{v2} + Y_g$$

$$\frac{p_{v1}}{\rho} + \frac{U^2}{2} = \frac{p_{v2}}{\rho} + \frac{U^2}{2} + \zeta_{v4} \frac{U^2}{2}$$

$$p_{v1} - p_{v2} = \zeta_{v4} \rho \frac{U^2}{2} \quad (3)$$

Изједначавањем једначина (2) и (3) следи коефицијент отпора вентила 4 у зависности од измерених величина:

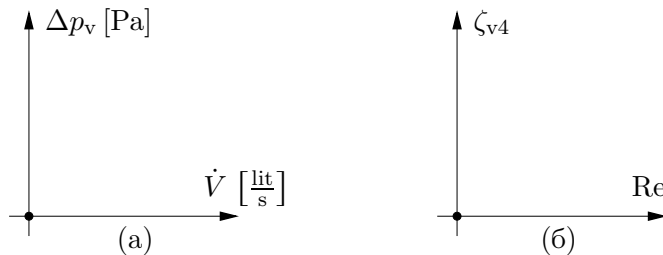
$$\rho g (h_{v1} - h_{v2}) = \zeta_{v4} \rho \frac{U^2}{2}$$

$$\boxed{\zeta_{v4} = g (h_{v1} - h_{v2}) \frac{2}{U^2}} \quad (4)$$

Добијене вредности се уносе у табелу.

Тиме је завршена прва мерна тачка (први ред у табели 1). Затим се мења запремински проток тако што се повећава брзина обртања радног кола пумпе на 1100 min^{-1} и понавља се поступак мерења протока и пада притиска (друга мерна тачка - наредни ред у табели 1). И у наредним мерним тачкама већи проток се остварује повећавањем брзине обртања радног кола (видети табелу 1).

Када је табела 1 потпуно попуњена потребно је нацртати следеће дијаграме (дијаграме урадити у програму по избору или ручно на милиметарском папиру - ова напомена се односи на све дијаграме у овој вежби):



Слика 5. (а) зависност пада притиска на вентилу од запреминског протока, (б) зависност коефицијента отпора вентила 4 од Рејнолдсовог броја

Одређена зависност пада притиска на локалном отпору од запреминског протока омогућава да се тај локални отпор може користити као **протокомер**, на тај начин што ће се при непознатом протоку кроз локални отпор очитати пад притиска, и затим са том вредношћу ући у дијаграм (слика 5 а), из ког је могуће очитати тренутну вредност протока.

Вентил											
n [min^{-1}]	H_1 [mm]	H_2 [mm]	t [s]	\dot{V} [lit/s]	U_v [m/s]	Re	h_{v1} [cm]	h_{v2} [cm]	Δh_v [mm]	Δp_v [Pa]	ζ_{v4}
1000			30								
1100			30								
1200			30								
1300	196	510	60				97,4	38,6			
1400	578	929	60				106,7	34,9			
1500	187	578	60				118	29,8			

Табела 1. Запремински проток кроз вентил и пад притиска

Колено											
n [min^{-1}]	H_1 [mm]	H_2 [mm]	t [s]	\dot{V} [lit/s]	U_k [m/s]	Re	h_{k1} [cm]	h_{k2} [cm]	Δh_k [mm]	Δp_k [Pa]	ζ_k
1000			30								
1100			30								
1200			30								
1300	200	510	60				41,3	5,6			
1400	510	854	60				47,1	2,95			

Табела 2. Запремински проток кроз колено и пад притиска

3 Одређивање коефицијента отпора колена

Задатак у другом делу вежбе је одредити коефицијент отпора колена за различите вредности Рејнолдсовог броја (различите вредности протока). Колено на којем се врши мерење, као и места мерних пресека су приказани на слици 2.

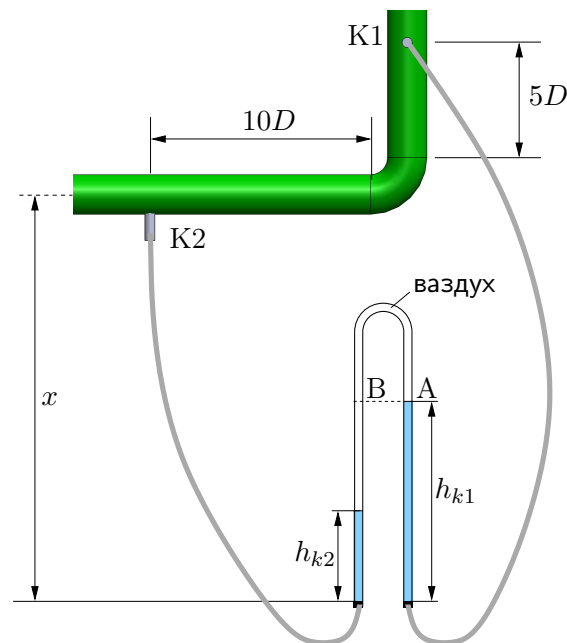
Поступак мерења је сличан као у претходном делу вежбе. У првој мерној тачки брзина обртања радног кола пумпе је 1000 min^{-1} (први ред табеле 2). Да би се вода преусмерила у деоницу у којој се налази колено, потребно је отворити вентил 2 и затворити вентил 4. (**Напомена:** пре затварања вентила 4, пажљиво затворити мале вентиле на дну манометра којим се мери пад притиска на вентилу.) Вода се кроз деоницу ⑨ пење у дивертер, а из њега се враћа у доњи резервоар. Очитава се почетни ниво воде у горњем резервоару H_1 . Мерење започиње закретањем лопатице дивертера и покретањем штопернице. Вода пуни горњи резервоар. Након времена пуњења горњег резервоара од 40s дивертер се враћа у првобитни положај како би се вода поново преусмерила у доњи резервоар. Очитава се нови ниво воде у горњем резервоару H_2 , а затим се запремински проток израчунава према изразу (1).

За време пуњења горњег резервоара очитавају се нивои воде у манометрима (обрнутим „У-цевима“) који су повезани са мерним местима пре и после колена. Те вредности (h_{k1} и h_{k2}) се уносе у табелу 2. Пречник деонице ⑤ је $D = 24,8 \text{ mm}$, а радни флуид је вода, па се вредности средње брзине струјања и Рејнолдсовог броја могу израчунати на следећи начин (наредне две колоне у табели 2):

$$U_k = \frac{4\dot{V}_k}{D^2\pi}, \quad \text{Re} = \frac{U_k D}{\nu}.$$

На основу очитаних вредности h_{k1} и h_{k2} , из једначине хидростатичке равнотеже за манометар који је повезан са коленом може се одредити разлика струјних притисака испред и иза колена (слика 6):

$$\begin{aligned} p_A = p_B & \Rightarrow p_{k1} + \rho g 5D + \rho g x - \rho g h_{k1} = p_{k2} + \rho g x - \rho g h_{k2} \\ p_{k1} - p_{k2} & = \rho g (h_{k1} - h_{k2}) - \rho g 5D \end{aligned} \quad (5)$$



Слика 6. Мерење пада притиска на колену

Коефицијент отпора колена, који је потребно одредити, се појављује у Бернулијевој једначини од пресека K1 до пресека K2:

$$Y_{k1} = Y_{k2} + Y_g$$

$$\frac{p_{k1}}{\rho} + \frac{U_k^2}{2} + g5D = \frac{p_{k2}}{\rho} + \frac{U_k^2}{2} + \zeta_k \frac{U_k^2}{2}$$

$$p_{k1} - p_{k2} = \zeta_k \rho \frac{U_k^2}{2} - \rho g 5D \quad (6)$$

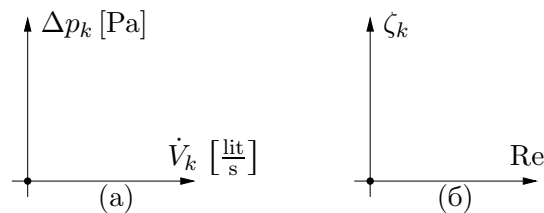
Изједначавањем израза (5) и (6) може се коефицијент отпора колена изразити у зависности од измерених величина:

$$\rho g (h_{k1} - h_{k2}) - \rho g 5D = \zeta_k \rho \frac{U_k^2}{2} - \rho g 5D$$

$$\boxed{\zeta_k = g (h_{k1} - h_{k2}) \frac{2}{U_k^2}} \quad (7)$$

Добијене вредности се уносе у табелу 2. Када је мерење завршено, потребно је поступак поновити још четири пута при већим вредностима протока што се остварује повећавањем брзине обртања радног кола пумпе на $n = 1100, 1200, 1300, 1400$ обртаја у минути (табела 2).

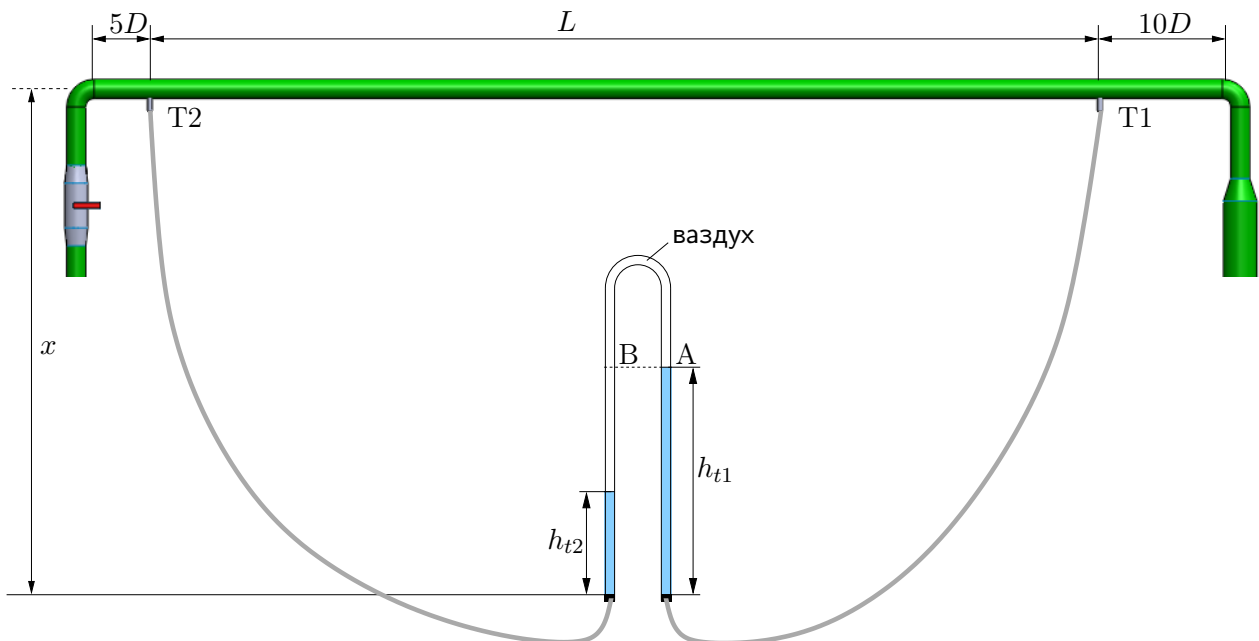
Добијене резултате представити табеларно и преко следећих дијаграма:



Слика 7. (а) зависност пада притиска на колону од запреминског протока, (б) зависност коефицијента отпора колена од Рејнолдсовог броја

4 Одређивање коефицијента трења

За експериментално одређивање коефицијента трења λ користи се права деоница (7) у којој између мерних пресека T1 и T2 нема локалних отпора. Вентил 5 се отвара, а вентили 2 и 4 су затворени да би сав проток који остварује пумпа пролазио кроз деоницу (7). Проток воде се одређује запреминском методом као и у претходним случајевима, а пад притиска проузрокован трењем се одређује помоћу обрнуте „N-цеви“ (слика 8).



Слика 8. Одређивање коефицијента трења

Писањем једначине хидростатичке равнотеже за тачке А и В изражава се разлика притисака у пресецима Т1 и Т2, а Бернулијевом једначином за струјницу која спаја ова два пресека добија се коефицијент трења:

$$p_A = p_B \quad \Rightarrow \quad p_{T1} + \rho g x - \rho g h_{t1} = p_{T2} + \rho g x - \rho g h_{t2}$$

$$p_{T1} - p_{T2} = \rho g (h_{t1} - h_{t2}) \quad (8)$$

$$Y_{T1} = Y_{T2} + Y_g$$

$$\frac{p_{T1}}{\rho} + \frac{U^2}{2} = \frac{p_{T2}}{\rho} + \frac{U^2}{2} + \lambda \frac{L}{D} \frac{U_t^2}{2}$$

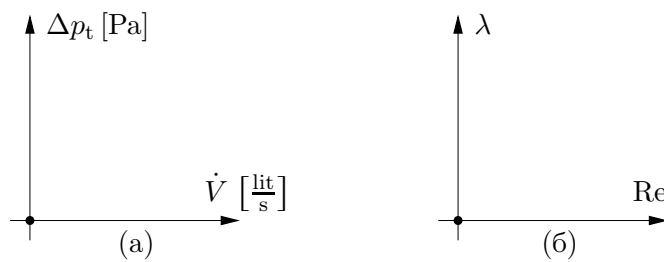
$$p_{T1} - p_{T2} = \rho \lambda \frac{L}{D} \frac{U_t^2}{2} \quad (9)$$

Изједначавањем израза (8) и (9) може се коефицијент трења изразити у зависности од измерених величина:

$$\rho g (h_{t1} - h_{t2}) = \rho \lambda \frac{L}{D} \frac{U_t^2}{2}$$

$$\boxed{\lambda = g (h_{t1} - h_{t2}) \frac{D}{L} \frac{2}{U_t^2}} \quad (10)$$

Растојање између мерних пресека Т1 и Т2 је = 2,03 m, а унутрашњи пречник цеви износи $D = 24,8 \text{ mm}$. Потребно је мерења извршити за шест радних тачака (табела 3), а затим резултате приказати и помоћу дијаграма (слика 9).



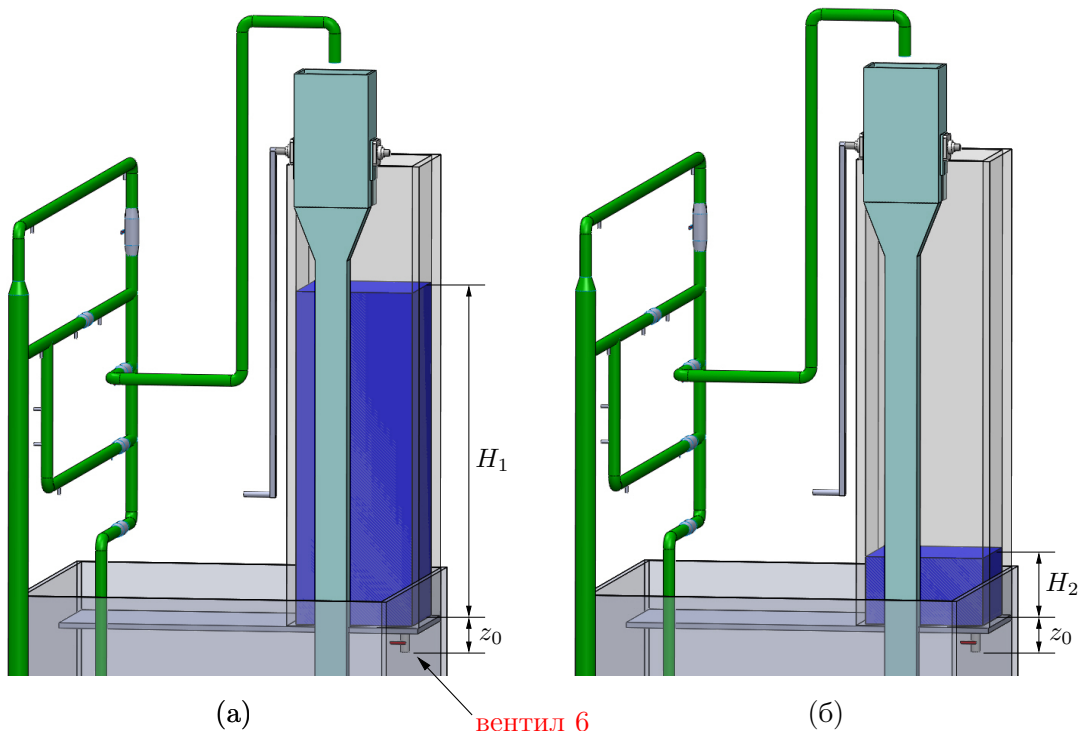
Слика 9. (а) зависност пада притиска на правој деоници од запреминског протока, (б) зависност коефицијента трења од Рејнолдсовог броја

Коефицијент трења											
n [min ⁻¹]	H_1 [mm]	H_2 [mm]	t [s]	\dot{V} [lit/s]	U [m/s]	Re	h_{t1} [cm]	h_{t2} [cm]	Δh_t [mm]	Δp_t [Pa]	λ
1000			30								
1100			30								
1200	620	900	60				80	48,5			
1300	207	530	60				87,2	47,1			
1400	530	888	60				94,2	45,3			
1500	204	604	60				102,2	43,3			

Табела 3. Одређивање коефицијента трења

5 Нестационарно истицање воде

Последњи део лабораторијске вежбе се тиче одређивања коефицијента протока малог отвора кроз који истиче вода из горњег резервоара који је на слици 1 означен бројем ③. Потребно је прочитати ниво воде у резервоару пре истицања H_1 (слика 10 а). У почетном тренутку отвара се вентил 6 (слике 2 и 10) и покреће се штопера. После извесног времена затвара се вентил и прекида мерење времена. Затим је потребно прочитати крајњи ниво воде у горњем резервоару H_2 (слика 10 б). Познато је да је попречни пресек резервоара облика правоугаоника страница 430 mm и 440 mm, па је могуће одредити коефицијент протока отвора кроз који истиче вода.



Слика 10. Ниво воде у горњем резервоару пре истицања (а) и после истицања (б).

Запремински проток којим вода истиче из горњег резервоара је $\dot{V} = \mu \frac{d^2\pi}{4} \sqrt{2gz} = \frac{dV}{dt}$, одакле следи запремина која за елементарни период времена dt истекне из резервоара:

$$dV = \mu \frac{d^2\pi}{4} \sqrt{2gz} dt.$$

Она је једнака промени запремине у резервоару $dV = -A_{rez} dz$, при чему је координата z везана за излазни пресек отвора кроз који вода истиче. Изједначавањем претходна два израза и интегралњем следи:

$$\begin{aligned} \mu \frac{d^2\pi}{4} \sqrt{2gz} dt &= -A_{rez} dz \\ \int_0^T dt &= \int_{z_0+H_1}^{z_0+H_2} -\frac{4A_{rez}}{\mu d^2\pi \sqrt{2g}} z^{-\frac{1}{2}} dz \\ T &= \frac{4A_{rez}}{\mu d^2\pi \sqrt{2g}} 2 \left(\sqrt{z_0 + H_1} - \sqrt{z_0 + H_2} \right) \end{aligned}$$

Из претходне једначине могуће је изразити и израчунати коефицијент протока:

$$\boxed{\mu = \frac{8A_{rez}}{Td^2\pi\sqrt{2g}} \left(\sqrt{z_0 + H_1} - \sqrt{z_0 + H_2} \right)}, \quad (11)$$

при чему су:

- $z_0 = 200 \text{ mm}$ - растојање од излазног пресека малог отвора до почетка скале за читавање нивоа у резервоару,
- $A_{rez} = 0,43 \text{ m} \cdot 0,44 \text{ m}$ - површина попречног пресека резервоара,
- $d = 26 \text{ mm}$ - пречник малог отвора за истицање,
- T - измерено време истицања,
- H_1 - почетни ниво воде у резервоару,
- H_2 - крајњи ниво воде у резервоару.

Измерене и израчунате вредности је потребно унети у табелу.

H_1 [mm]	H_2 [mm]	T [s]	μ

Табела 4. Одређивање коефицијената протока малог отвора