

Упутство за лабораторијске вежбе из механике флуида

Универзитет у Београду
Машински факултет
Катедра за механику флуида



Име и презиме	
Број индекса	
Смена	
Датум и време одржавања вежбе	

Датум и време одбране вежбе	
Вежбу прегледао	
Оцена	

Прва вежба

Циљ прве лабораторијске вежбе која се изводи у оквиру предмета Механика флуида Б је:

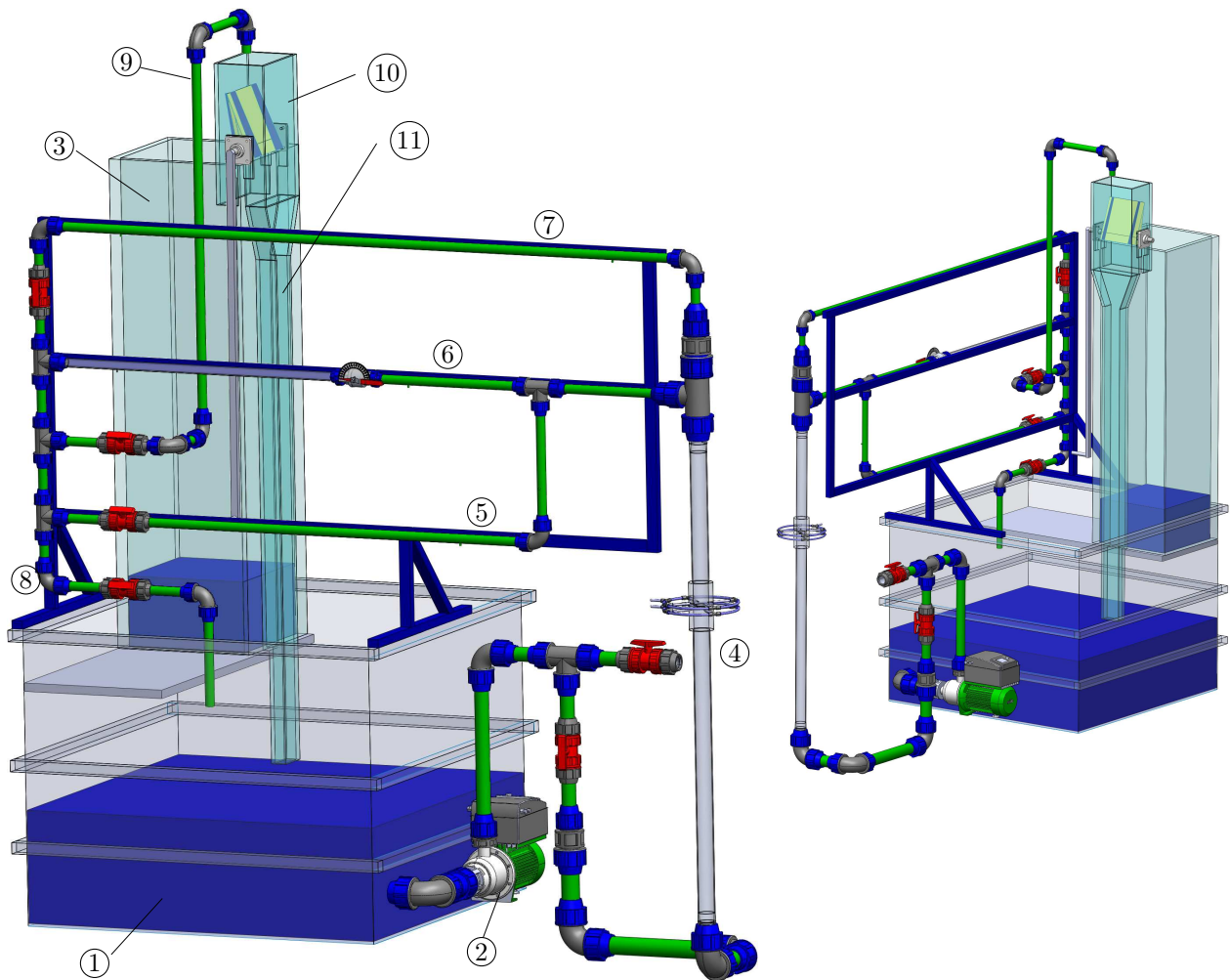
- одређивање калибрационе криве за нестандардну бленду,
- одређивање коефицијента трења у правој пластичној цеви,
- одређивање коефицијента локалног отпора колена,
- одређивање коефицијента локалног отпора кугластог вентила за различите углове затварања,
- одређивање коефицијента протока при квазистационарном истицању воде из резервоара кроз мали отвор.

1 Опис постројења

Експериментално постројење за извођење вежбе 1 је приказано на слици 1.1. Оно је затвореног типа, што значи да иста вода кружи у систему. Бројевима су означени следећи основни делови:

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

Кретање воде кроз систем обезбеђује центрифугална радијална пумпа, приказана на слици 1.2 (а). Она црпи воду из великог доњег резервоара кроз усисну деоницу и потискује је кроз вертикалну потисну деоницу. На слици 1.2 (а) су означени кућиште радног кола пумпе 1, које уједно представља и спиралу пумпе, затим, електромотор 2 и фреквентни регулатор 3. Улога фреквентног регулатора је да регулише брзину обртања ротора електромотора, а тиме и радног



Слика 1.1. Основни делови експерименталног постројења за вежбу 1.

кола пумпе јер се електромотор и радно коло налазе на истом вратилу. Коришћење фреквентног регулатора омогућава веома прецизно регулисања рада пумпе.

Пумпа која се користи има ознаку Wilo MHIЕ 803N-2G. На сајту произвођача су доступне радне карактеристике пумпе у виду дијаграма. Могу се пронаћи вредности напора пумпе, снаге, степена корисности и кавитацијске резерве, све то у зависности од тренутног протока воде кроз пумпу. На слици 1.2 (б) је приказана зависност напора пумпе и зареминског протока, при различитим вредностима брзине обртања радног кола пумпе n [min^{-1}], које се могу постоћи уз помоћ фреквентног регулатора. Напор пумпе Y_p [J/kg] може бити изражен у метрима воденог стуба H [m], као што је на слици приказано, или у вредности разлике притисака испред и иза пумпе Δp [MPa]. Веза између ових величина је следећа:

$$Y_p = gH = \frac{\Delta p}{\rho} \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right].$$

Напор пумпе Y_p [J/kg] представља енергију коју пумпа преда сваком килограму радног флуида који кроз њу протекне.

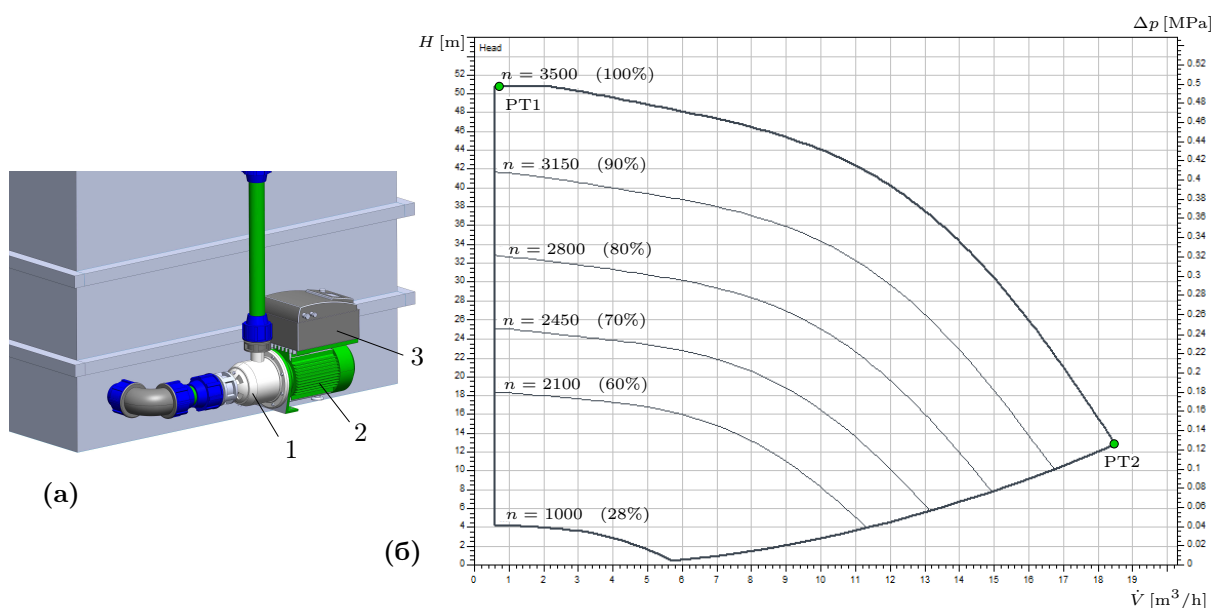
Као што се види на дијаграму 1.2 (б), крива која описује зависност напора и протока зависи од брзине обртања радног кола пумпе n [min^{-1}]. Што је већа брзина обртања то се крива више

удаљава од координатног почетка дијаграма и могуће је да пумпа оствари већи проток и већи напор (да подигне воду на вишу коту, тј. да оствари већи притисак на потису).

Брзина обртања радног кола пумпе Wilo MHE 803N-2G се може кретати у опсегу од $n_{\min} = 1000 \text{ min}^{-1}$ до $n_{\max} = 3500 \text{ min}^{-1}$. Корак са којим се врши подешавање брзине обртања износи 10, што омогућава веома прецизну регулацију. На дијаграму су приказане радне криве пумпе за 6 различитих вредности брзина обртања.

За највећу брзину обртања на дијаграму 1.2 (б) су означене две радне тачке, PT1 и PT2. Види се да при највећој брзини обртања и при најмањем протоку (радна тачка 1) пумпа може остварити напор од $H_{\max} = 51 \text{ m}$, односно $Y_{p_{\max}} = gH_{\max} = 500,3 \text{ J/kg}$. Пумпа тада испоручује проток $\dot{V}_{\max} \approx 0,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

Радна тачка 2 указује на то да пумпа при највећој брзини обртања и при напору од $\approx 13 \text{ m}$ остварује највећи проток који износи $\dot{V}_{\max} = 18,5 \text{ m}^3/\text{h}$.



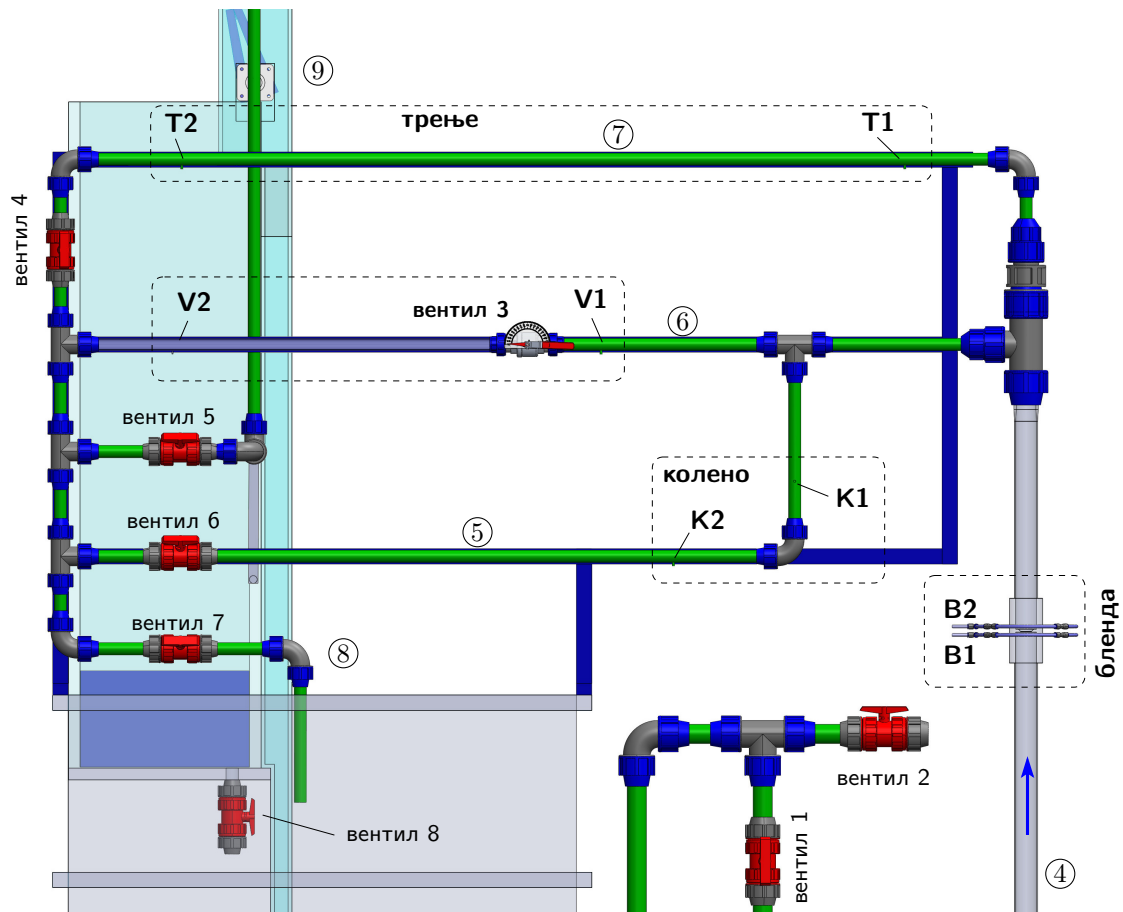
Слика 1.2. (а) Приказ модела пумпе Wilo MHE 803N-2G. (б) Дијаграм напора пумпе у зависности од протока, за различите вредности брзине обртања радног кола пумпе. <https://wilo.com/ie/en/Products-and-expertise/>

Као последица деловања радног кола пумпе, вода се при изласку из пумпе налази под натпритиском и наставља своје кретање ка деоници ④ (слика 1.1). Пре ове деонице вода наилази на два вентила, вентил 1 и вентил 2 (слика 1.3). Први, који води ка деоници ④ је све време отворен, док је вентил 2 увек у затвореном положају. Деоница у којој се налази вентил 2 води ка другом делу система који није део лабораторијске вежбе број 1.

У деоници ④ се налази мерна бленда (слике 1.1 и 1.3). Мерна бленда је врста пригушнице (локалног отпора) која се користи за мерење запреминског протока.

Деоница ④ се грана на три деонице ⑤, ⑥ и ⑦. Као што је на слици 1.3 приказано, у деоници ⑤ се налази колена. Оно је уобичајени локални отпор на који наилази вода при свом кретању. На означеном колелу се мери пад притиска ради одређивања коефицијента локалног отпора колена ζ_k . Мерења се врше при различитим протоцима.

У деоници ⑥ се налази кугласти вентил 3. Он може бити постављен у различитим угловима отварања, што утиче на отпор струјању воде кроз њега. Постављена су мерна места испред и иза вентила ради мерења пада притиска и одређивања његовог коефицијента локалног отпора. Мерења се врше за различите вредности угла закретања вентила и при различитим вредностима запреминског



Слика 1.3. Ознаке доница, вентила и мерних пресека.

протока воде.

Деоница ⑦ представља праволинијску деоницу у којој нема локалних отпора. То значи да је пад притиска који се деси између мерних места **T1** и **T2** последица трења у води и између воде и зидова цеви. Овај пад притиска се мери ради одређивања коефицијента трења. Мерења се врше при различитим вредностима протока.

Вода из деонице ④ може протицати кроз било коју од наведене три деонице, а то зависи од положаја вентила 3, 4 и 6 (слика 1.3). Деоница ⑧, у којој се налази вентил 7, служи као резервна могућност за враћање воде у доњи резервоар али тако да се избегне дивертер. Она се не користи у току лабораторијске вежбе, тако да је вентил 7 све време у затвореном положају.

Вода напушта цевовод кроз деоницу ⑨, која се завршава изнад дивертера (слика 1.1). Вода из деонице ⑨ право улази у кућиште дивертера, а да ли ће даље ићи у канал ⑪ па у доњи резервоар или ће се уливати у горњи резервоар ③ зависи од положаја лопатице дивертера, што ће касније бити ближе објашњено.

Када се горњи резервоар ③ напуни водом, он се може испразнити кроз мали отвор на дну и вентил 8 који је прикључен на њега. Очитавањем нивоа воде у горњем резервоару пре и после пражњења, као и мерењем времена пражњења, може се израчунати коефицијент протока малог отвора на дну горњег резервоара.

У изложеном опису постројења, укратко је наведено све оно што ће бити испитивано у току прве лабораторијске вежбе.

2 Калибрација нестандардне мерне бленде

Као што је већ поменуто, **мерна бленда** представља пригушницу у облику диска који има отвор на средини, чији је пречник мањи од пречника цеви у којој се бленда налази, слика 1.4. Овакав диск се смешта у деоницу у којој је потребно извршити мерење протока. Бленде доводи до наглог смањења проточног пресека, што значи да се локално повећава брзина (према једначини континуитета) и опада притисак (према Бернулијевој једначини). Овај пад притиска, који се лако мери, зависи од тренутног протока флуида кроз цев. Што је проток већи то је и пад притиска већи. Основна улога бленде је да се она користи као протокомер, а то је могуће када се утврди зависност тренутног протока и пада притиска. Поступак одређивања ове зависности се назива калибрација или баждарење бленде. Резултат овог поступка је калибрациони коефицијент бленде k_b и калибрациона крива бленде.

Са истим циљем могу се уместо бленди користити Вентури цеви или млазнице. Постоје стандардне бленде (као и стандардне Вентури цеви и стандардне млазнице) за које су познате вредности калибрационог коефицијента. Оне су саставни део стандарда ISO 5167-1:2003 [1] и ISO 5167-2:2003 [2] из 2003. године. Стандард прецизно прописује димензије бленде, као што су пречник отвора бленде d , пречник цеви у коју је бленда уграђена D , дебљина бленде B и b , угао ширења бленде γ , што је означено на полупресеку на слици 1.4. Поред тога стандард детаљно прописује дозвољене толеранције наведених димензија, као и захтеве за уградњу бленде у систем. За оне бленде које испуњавају захтеве стандарда (**стандардне бленде**) масени проток се израчунава према једначини:

$$\dot{m} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{d^2 \pi}{4} \sqrt{2\Delta p_b \rho}.$$

У претходној једначини ε означава коефицијент експанзије гаса. За нестишљив флуид он има вредност $\varepsilon = 1$. Запремински проток нестишљивог флуида је:

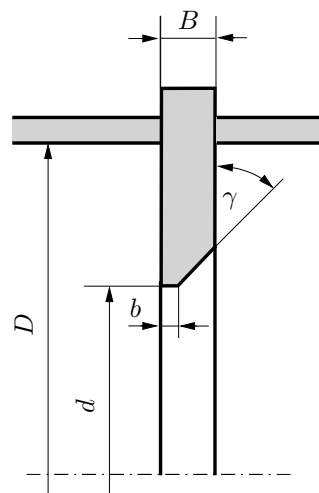
$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{d^2 \pi}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p_b}{\rho}}. \quad (1.1)$$

Са Δp је означена разлика притисака непосредно испред и иза бленде, ρ је густина радног флуида, $d^2 \pi / 4$ је површина светлог отвора бленде, а $\beta = \frac{d}{D}$ представља однос пречника отвора бленде и пречника цеви. За стандардне бленде он се налази у опсегу $0,1 < \beta < 0,75$. У једначини (1.1) се још појављује *коефицијент пражњења бленде* C , чије вредности су дате у стандарду и зависе од односа пречника β и вредности Рејнолдсовог броја у цеви. На овај начин могуће је уз помоћ стандарда и мерења пада притиска на бленди израчунати запремински проток кроз бленду.

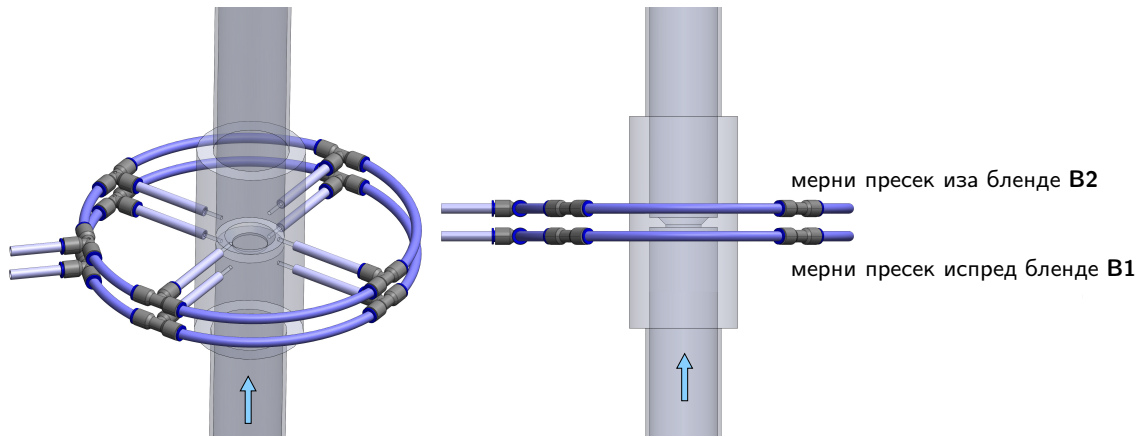
Први разломак $\frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}}$ у једначини (1.1) се назива и коефицијент протока бленде, а он помножен са површином светлог отвора бленде је **коефицијент бленде** k_b , тако да се једначина (1.1) може записати као:

$$\dot{V} = k_b \sqrt{\frac{2\Delta p_b}{\rho}} \quad (1.2)$$

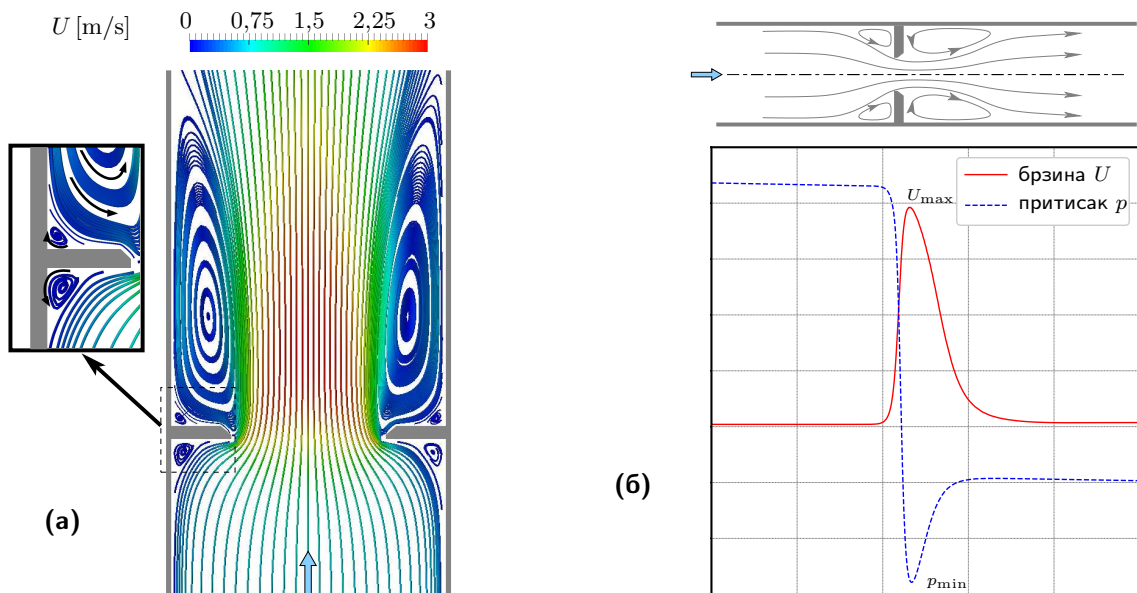
Димензије бленде могу бити такве да не одговарају стандардима. Такав случај може бити и са Вентури цеви и млазницама. Тада се каже да је бленда **нестандардна** и одговарајуће карактеристике бленде морају бити одређене експериментално. Бленда која се налази у деоници 4 (слика 1.1) је направљена од клирита и није стандардних димензија, тако да је у првом делу вежбе потребно експериментално одредити коефицијент ове бленде k_b . Нестандардна бленда је приказана на слици 1.5.



Слика 1.4. Димензије бленде.



Слика 1.5. Приказ модела нестандартне бленде која је уграђена у деоницу 4. Приказане су и огрлице за мерење притиска у пресецима непосредно испред и иза бленде, као и смер струјања воде.



Слика 1.6. (а) Приказ поља брзина струјницама у околини бленде. (б) Промена брзине и притиска дуж осе цеви са блендом. Обе слике се односе на ограничен простор у близини бленде. Сlike су део резултата нумеричког прорачуна струјања воде кроз цев са мерном блендом [3].

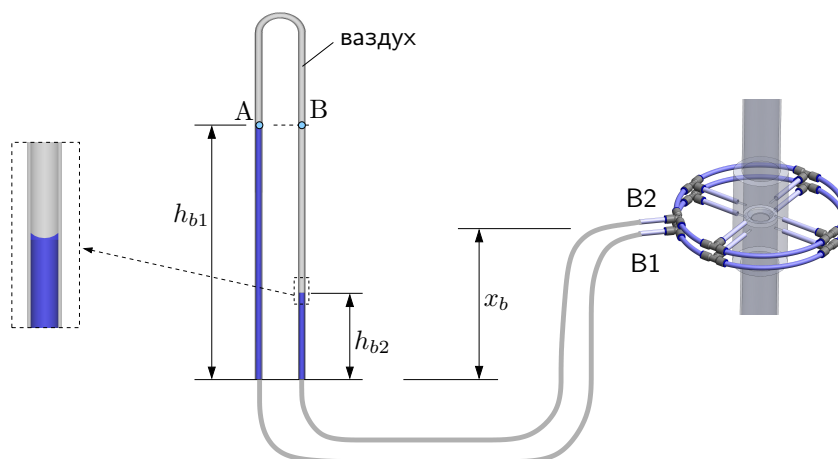
За воду која долази, бленда представља пригушницу која нагло смањује површину проточног пресека. То, према једначини континуитета, за последицу има нагло повећавање брзине струјања кроз отвор бленде. Ово се може видети на слици 1.6 (а) где је помоћу струјница приказано поље брзине у околини бленде. Према Бернулијевој једначини за струјницу која пролази кроз осу цеви, ово нагло повећавање брзине доводи до смањења притиска. Профили брзине и притиска дуж осе цеви се виде на слици 1.6 (б). Након бленде образују се врложне зоне које заузимају део струјног простора. Удаљавањем од бленде, део простора који заузимају вртлози је све мањи, тако да се постепено повећава површина проточног пресека, што доводи до смањења брзине у оси цеви до оне вредности која влада у области испред бленде. Ово постепено смањивање брзине (кинетичке енергије флуида) има за последицу рекулацију притиска, односно благо повећавање вредности притиска, што следи из Бернулијеве једначине и што се види на слици 1.6 (б). Ипак постоји трајни пад притиска као последица присуства бленде која је локални отпор.

2.1 Мерење пада притиска на бленди

Да би се измерила разлика притисака испред и иза бленде, у овим пресецима постоје 4 равномерно распоређена отвора (слика 1.5). Отвори се налазе у бочним зидовима тако да мери струјни (статички) притисак флуида. Сва четири отвора у пресеку испред бленде су повезана огрлицом која се завршава једним цревом. Овим се у сваком тренутку мери средња вредност струјног притиска у пресеку испред бленде **V1**. Исто важи за пресек иза бленде **V2**. Црева која крећу од мерних пресека **V1** и **V2** воде до диференцијалног манометра где се очитава разлика вредности струјних притисака испред и иза бленде. У овом случају као диференцијални манометар се користи обрнута У цев са ваздухом. Овај диференцијални манометар је због свог облика, који подсећа на обрнуто латинично слово У, добио назив обрнута У цев, слика 1.7.

Леви крак У цеви је спојен са пресеком испред бленде **V1**, док је десни крак спојен са пресеком иза бленде **V2**. Нивои воде у овим крацима неће бити исти зато што притисак испред и иза бленде нема исту вредност. У пресеку **V1** влада већи притисак, тако да ће он подићи ниво воде у левом краку У цеви на виши ниво. Непосредно иза У цеви налази се мерна скала на којој се може извршити очитавање нивоа воде у крацима У цеви. Ниво воде у левом краку се означава са h_{b1} , а ниво воде у десном краку са h_{b2} (слика 1.7). Положај почетка скале за очитавање нивоа воде у крацима У цеви, у односу на положај бленде означен је са x_b док се разлика висине пресека испред бленде **V1** и иза бленде **V2** занемарује јер је много мања у односу на друге наведене висине.

Изобарска површ се уочава у обрнутој У цеви. На слици 1.7 су означене тачке А и В које припадају изобарској површи, тако да за њих важи једначина хидростатичке равнотеже $p_A = p_B$. Испуњена су оба услова: тачке се налазе на истој висини, и од тачке А до тачке В се може доћи пролазећи само кроз један флуид, што је у овом случају ваздух. Цев диференцијалног манометра је направљена од стакла тако да се нивои воде у њој лако очитавају. Унутрашњи пречник У цеви износи само 8 mm, тако да услед деловања површинског напона разделна површ између воде и ваздуха није хоризонтална већ закривљена, као што је приказано на издвојеном делу слике 1.7. Најдубља тачка је у осни цеви, а вода се пење уз зидове. Приликом очитавања нивоа воде може се посматрати врх, дно или средина разделне површи али је важно да се исти критеријум примени приликом очитавања у оба крака.



Слика 1.7. Мерење пада притиска на бленди коришћењем диференцијалног манометра - обрнуте У цеви са ваздухом.

Након очитавања вредности нивоа воде у крацима У цеви h_{b1} и h_{b2} , на основу једначине хидростатичке равнотеже може се израчунати пад притиска на бленди, односно разлика притисака испред и иза бленде $p_{b1} - p_{b2}$:

$$p_A = p_B \quad \Rightarrow \quad p_{b1} + \rho g x_b - \rho g h_{b1} = p_{b2} + \rho g x_b - \rho g h_{b2}$$

$$\boxed{\Delta p_b = p_{b1} - p_{b2} = \rho g (h_{b1} - h_{b2})} \quad (1.3)$$

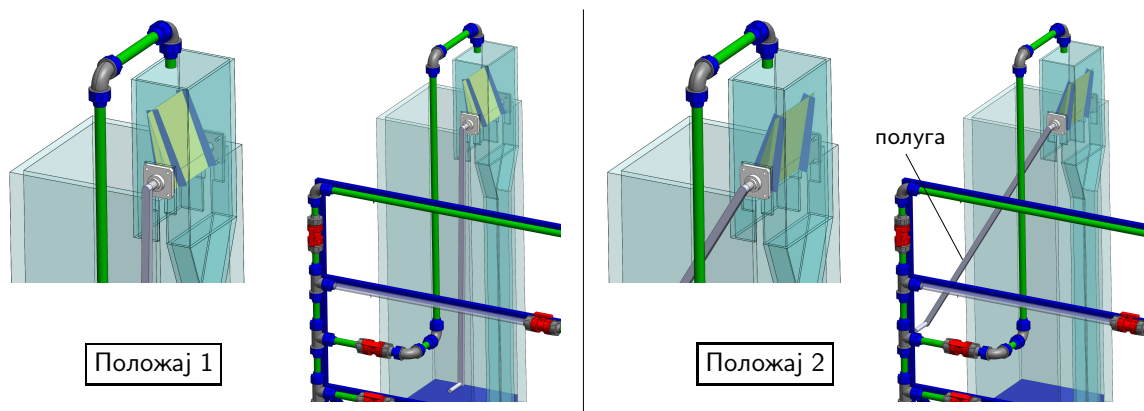
Једначином (1.3) израчунава се пад притиска на бленди. Као што се види, поступак мерења пада притиска је једноставан. Предност коришћења обрнуте У цеви као диференцијалног манометра је једноставност и то што манометар није потребно повремено калибрисати, што је случај са коришћењем дигиталних давача притиска. Мана је што мерење читава човек, чиме се увек уноси додатна грешка у поступак мерења и то што је брзина узорковања (читавања) веома мала у односу на брзину узорковања коју пружају дигитални давачи притиска прикључени на рачунаре. Такође, опсег разлике притисака који је могуће мерити зависи од висине обрнуте У цеви.

Да би био извршен поступак калибрације бледне потребно је истовремено са мерењем пада притиска мерити запремински проток воде кроз бленду. Овде се за то користи запреминска метода.

2.2 Мерење протока запреминском методом

Проток воде кроз бленду се одређује **запреминском методом**, која је једна од најпоузданијих метода. Она захтева постојање горњег резервоара и дивертера који су на слици 1.1 означени бројевима ③ и ⑩. Посматрањем слике 1.1 прати се смер протицања воде: вода из деонице ④, у којој се налази бленда, пролази кроз три паралелне деонице ⑤, ⑥ и ⑦ (вентили 3, 4 и 6 са слике 1.3 су отворени), а затим се вода сабира и одлази у грану ⑨ која се завршава изнад дивертера ⑩. Вентил у грани ⑧ је затворен тако да целокупан проток који је прошао кроз бленду и деоницу ④ завршава у дивертеру, у који долази кроз грану ⑨.

Дивертер је уређај који се налази на врху горњег резервоара ③ и чија је улога 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 1.8 су приказана два крајња положаја лопатице дивертера. Јасно се види да при положају 1, вода удара у лопатицу и слава се у канал ⑪ (слика 1.1), а да при положају 2 вода бива преусмерена у горњи резервоар.

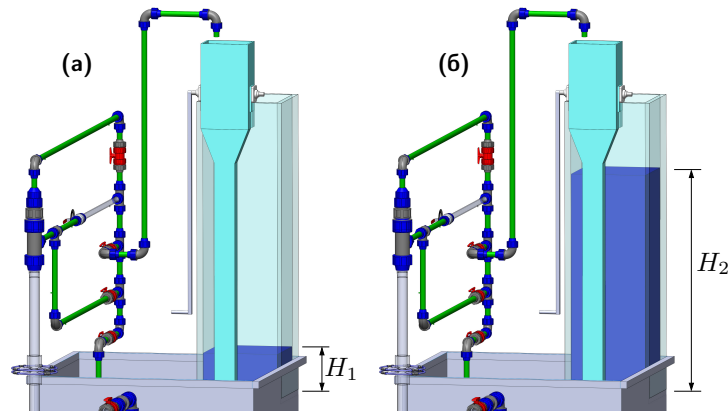


Слика 1.8. Преусмеравање воде закретањем лопатице дивертера.

Док се дивертер налази у положају 1, на мерној траци горњег резервоара потребно је очитати почетни ниво воде у њему (H_1), слика 1.9 (а). Затим се закретањем полуге (слика 1.8) лопатица помера у положај 2, чиме почиње пуњење горњег резервоара. Истовремено са закретањем полуге треба покренути штоперицу ради мерења временског периода током ког се пуни горњи резервоар. После истека предвиђеног временског периода дивертер се враћа у положај 1, чиме се прекида пуњење горњег резервоара. Када се ниво воде у горњем резервоару умири врши се читавање новог нивоа воде (H_2), 1.9 (б). Попречни пресек горњег резервоара је облика правоугаоника страница 430 mm и 440 mm, па се на основу разлике нивоа воде у горњем резервоару пре и после пуњења може одредити запремина воде која је доспела у горњи резервоар према изразу:

$$V = A_{\text{rez}}(H_2 - H_1).$$

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**.



Слика 1.9. (а) Ниво воде у горњем резервоару пре пуњења водом H_1 . (б) Ниво воде у горњем резервоару после пуњења водом H_2 .

Још једном се наводе битне величине за одређивање протока запреминском методом:

- 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 $A_{\text{rez}} = 0,43 \text{ m} \cdot 0,44 \text{ m}$
- V - запремина воде која је доспела у горњи резервоар за време пуњења $V = A_{\text{rez}}(H_2 - H_1)$
- \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.

$$\dot{V} = \frac{V}{t} = \frac{A_{\text{rez}}(H_2 - H_1)}{t} \quad (1.4)$$

На овај начин запреминском методом мери се проток воде кроз бленду.

2.3 Израчунавање калибрационог коефицијента бленде k_b и коефицијента отпора бленде ζ_b

Да би бленда била калибрисана потребно је у више мерних тачака (при различитим вредностима протока) извршити истовремено мерење пада притиска на бленди и запреминског протока, и затим спровести обраду добијених података. Крајњи резултат је израчунавање калибрационог коефицијента бленде k_b и добијање калибрационе криве бленде у виду дијаграма. Да би то било извршено потребно је попунити табелу 1.1.

Поступак извођења експеримента је следећи:

- Постави се пумпа на жељени број обртања (у првој мерној тачки то је $n = 1000 \text{ min}^{-1}$). Потребно је мало сачекати ради успостављања стационарног режима струјања. Прва величина која се мери је ниво воде у горњем резервоару H_1 . Та вредност се уноси у табелу.
- На почетку експеримента дивертер се налази у положају 1 (слика 1.8), што значи да вода из дивертера одлази у канал и враћа се у доњи резервоар. Сада је потребно закренути полуку тако да лопатица дивертера доспе у положај 2, чиме почиње пуњење горњег резервоара. У истом тренутку када лопатица дивертера сече млаз воде, што се догађа у средишњем положају између позиција 1 и 2, потребно је покренути штоперицу како би се мерило време пуњења горњег резервоара.

- У току пуњења горњег резервоара читава се показивање обрнуте У цеви која је спојена са пресецима испред и иза бленде (слика 1.7). Вредности нивоа воде у крацима У цеви h_{b1} и h_{b2} се уписују у први ред, у девету и десету колону табеле 1.1. Ове вредности нису сталне, већ нивои воде осцилују услед природе турбулентног струјања и услед пулзација притиска у систему које су изазване присуством пумпе. Потребно је очитати средњу вредност у временском интервалу t .
- По истеку предвиђеног времена пуњења t , које не сме бити мање од 30 s, лопатица дивертера се закретањем полуге враћа у првобитни положај 1, чиме се прекида пуњење горњег резервоара. Поново, у тренутку када лопатица дивертера сече млаз воде искључује се штоперица и тачно време пуњења t се уписује у четврту колону табеле 1.1.
- Потребно је сачекати да се ниво слободне површи у горњем резервоару умири и тада се читава његова вредност H_2 и уписује у табелу.

Сада су измерене све потребне величине да би се попунио први ред табеле 1.1. У првом делу табеле се на основу величина H_1 , H_2 и t може израчунати запремински проток \dot{V} (једначина 1.4). Њега је потребно изразити у [lit/s] и у [m³/h] и унети у табелу.

Средња брзина струјања у цевоводу је брзина која помножена са површином попречног пресека цевовода даје стваран запремински проток. Деоница у којој се налази бленда има унутрашњи пречник $D_4 = 54$ mm, па се средња брзина струјања у деоници (4) може израчунати на следећи начин:

$$\dot{V} = A_4 U_4 \quad \Rightarrow \quad U_4 = \frac{\dot{V}}{A_4} = \frac{4\dot{V}}{D_4^2 \pi}.$$

Бездимензијска величина која говори о режиму струјања је Рејнолдсов број, који представља однос инерцијалних и вискозних сила у флуиду. Радни флуид је вода чија кинематска вискозност на температури од 20°C износи $\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ m²/s. Израз за Рејнолдсов број у деоници (4) гласи:

$$\text{Re}_4 = \frac{U_4 D_4}{\nu}.$$

Табела 1.1. Одређивање карактеристике бленде k_b и њеног коефицијента локалног отпора ζ_b .

n [min ⁻¹]	H_1 [mm]	H_2 [mm]	t [s]	\dot{V} [lit/s]	\dot{V} [m ³ /h]	U_4 [m/s]	Re_4 [/]	h_{b1} [mm]	h_{b2} [mm]	Δh_b [mm]	Δp_b [Pa]	k_b [/]	ζ_b [/]
1000													
1100													
1200													
1300	187	889	120,4					732	300				
1400	188	781	90,2					828	283				
1500	184	849	90,4					927	257				
1600	198	951	95,3					1027	230				

средња вредност коефицијента бленде k_b износи:

средња вредност коефицијента отпора бленде ζ_b износи:

У другом делу табеле 1.1, на основу разлике нивоа воде у крацима У цеви $\Delta h_b = h_{b1} - h_{b2}$, може се израчунати пад притиска на бленди Δp_b , према једначини (1.3). Коначно, на основу једначине (1.2)

може се израчунати коефицијент бленде k_b у првој мерној тачки:

$$\dot{V} = k_b \sqrt{\frac{2\Delta p_b}{\rho}} \Rightarrow \boxed{k_b = \frac{\dot{V}}{\sqrt{\frac{2\Delta p_b}{\rho}}}} \quad (1.5)$$

Преостаје да се израчуна коефицијент локалног отпора бленде ζ_b . Бленда представља локални отпор, па се пад притиска који она ствара може изразити применом Вајсбаховог израза, а из њега се може израчунати коефицијент локалног отпора бленде:

$$\Delta p_b = \zeta_b \rho \frac{U_4^2}{2} \Rightarrow \boxed{\zeta_b = \frac{2\Delta p_b}{\rho U_4^2}} \quad (1.6)$$

На овај начин израчунате су све потребне величине које одговарају првој мерној тачки. Подаци су смештени у првом реду табеле 1.1. Прву мерну тачку карактерише брзина обртања радног кола пумпе $n = 1000 \text{min}^{-1}$.

Након што су завршена мерења у првој мерној тачки потребно је променити брзину обртања пумпе на вредност од $n = 1100 \text{min}^{-1}$ и поновити поступак мерења. Ови подаци ће бити смештени у други ред табеле. Затим је потребно наставити поступак мерења до последње мерне тачке, тј. док се не попуни табела 1.1. Свако повећавање брзине обртања радног кола пумпе за последицу има повећавање напора пумпе и протока који пумпа шаље кроз цевовод, тј. промену положаја радне тачке система (видети слику 1.2).

Када су извршена мерења у свих седам мерних тачака потребно је израчунати средњу вредност коефицијента бленде k_b и коефицијента отпора бленде ζ_b . Вредности уписати на дну табеле 1.1. Такође, потребно је приказати два дијаграма, на првом представити зависност пада притиска Δh_b [mm] од запреминског протока \dot{V} [m³/h], а на другом зависност коефицијента отпора бленде ζ_b од Рејнолдсовог броја Re_4 . На првом дијаграму посебно означити тачке добијене мерењем, а потом нацртати калибрациону криву бленде користећи израчунату **средњу вредност коефицијента бленде k_b** . Да би дијаграм био дат у захтеваним јединицама за пад притиска и запремински проток, потребно је искористити једначину за калибрациону криву бленде у следећем облику:

$$\Delta h_b = \frac{1}{2g} \left(\frac{\dot{V}/3600}{k_b} \right)^2 1000$$

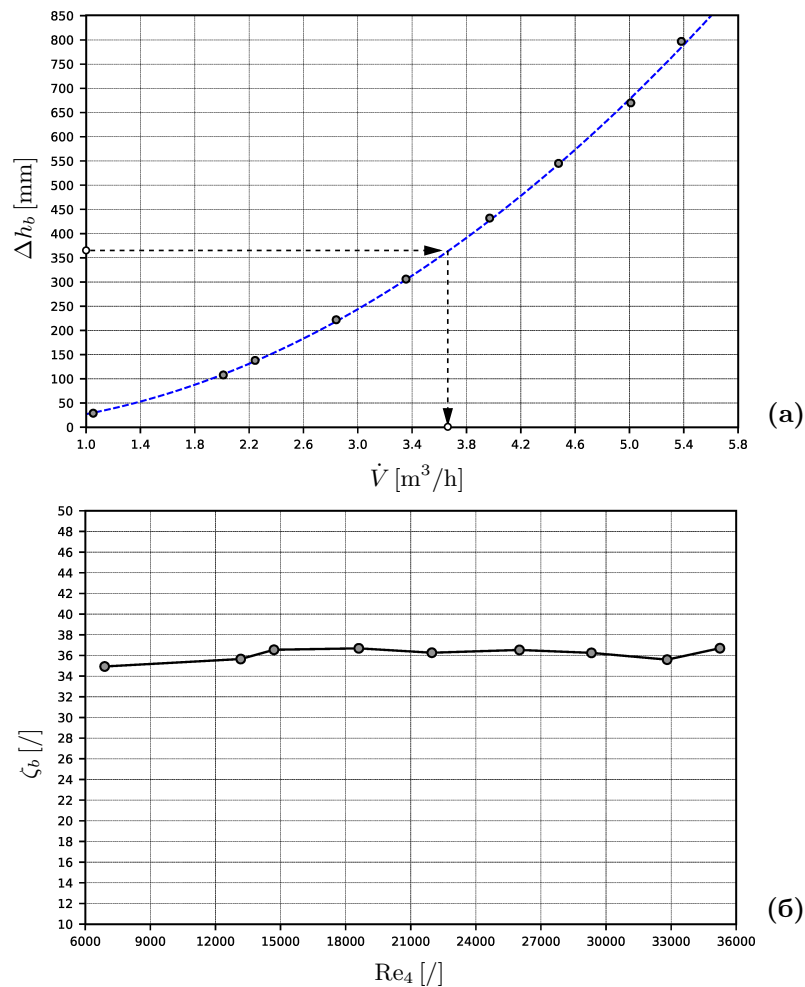
Једначина произилази из израза (1.2) и (1.3).

На дијаграму зависности коефицијента отпора бленде од Рејнолдсовог броја означити тачке добијене мерењем, а у простору између њих искористити линеарну интерполацију, тј. тачке спојити правим линијама.

Пример како треба да изгледају тражени дијаграми је дат на слици 1.10. За добијање ових дијаграма коришћено је више мерних тачака него што је то предвиђено табелом 1.1. Потребно је направити нове дијаграме на основу података из табеле 1.1. Дијаграме урадити у програму по избору или ручно на милиметарском папиру. Табела и дијаграми се прилажу као део извештаја са лабораторијске вежбе.

Када је израчуната средња вредност коефицијента бленде k_b и нацртана калибрациона крива бленде (слика 1.10 (а)) сматра се да је нестандартна бленда из деонице ④ калибрисана. У овом, или било којем другом систему, ова бленда се сада може користити као **протокомер**. Да би се знао проток воде кроз бленду потребно је измерити пад притиска на бленди и затим искористити једначину (1.2) у којој се појављује управо израчунати коефицијент бленде k_b . Други начин за одређивање протока би био графички, односно коришћењем дијаграма 1.10 (користи се нови дијаграм који је добијен на основу табеле 1.1, а не дијаграм са слике који је дат као пример). Измерени пад притиска је улазна величина. Од те вредности се вуче хоризонтална линија док се не пресече калибрациона крива бленде, а од те тачке се спушта вертикална линија ка оси на којој је означен проток. Очитавањем са апсцисе добија се

вредност протока \dot{V} (видети слику 1.10 (а)).



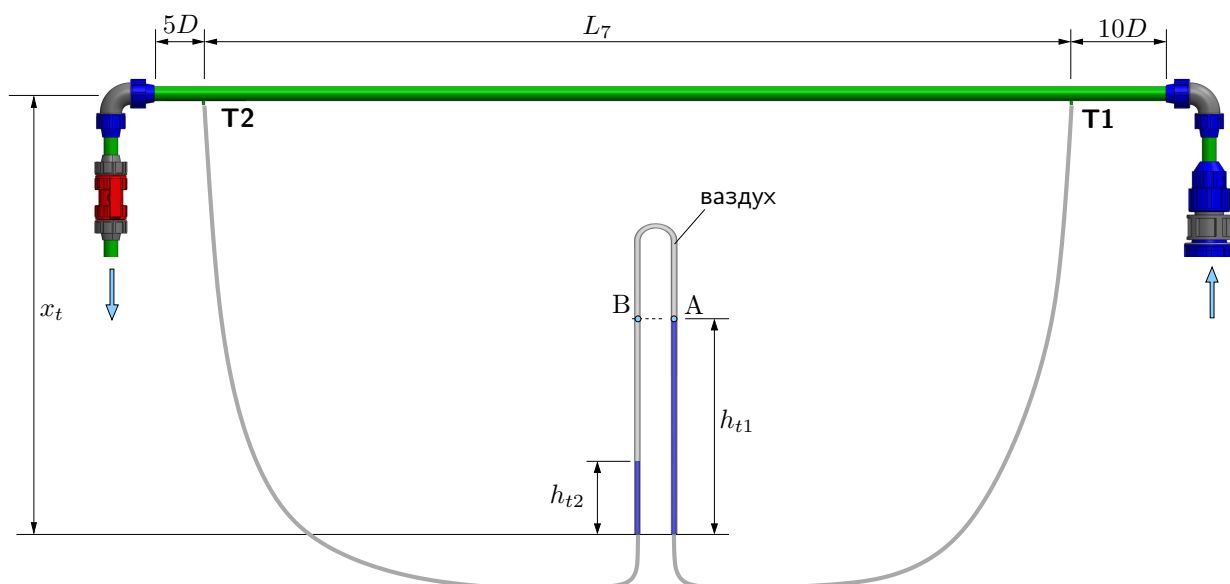
Слика 1.10. Пример дијаграма који се добијају на основу табеле 1.1. На првом (а) је приказана зависност пада притиска и запреминског протока, а на другом (б) зависност коефицијента отпора и Рејнолдсовог броја.

Дакле, коришћењем запреминске методе мерен је проток воде кроз бленду. Истовремено мерен је пад притиска на бленди. Након обраде резултата израчунат је коефицијент бленде k_b , тако да се у наредним деловима вежбе ова бленда користи као протокомер.

3 Одређивање коефицијента трења на правој деоници

Деоница ⑦ са слике 1.1 и слике 1.3 представља праволинијску деоницу у којој нема локалних отпора. Целокупан пад притиска од мерног пресека **T1** до пресека **T2** проузрокован је трењем. Деоница ⑦ служи за експериментално одређивање коефицијента трења λ у пластичној цеви унутрашњег пречника $D_7 = 24,8 \text{ mm}$. Да би коефицијент трења био одређен, потребно је мерити разлику притисака на улазу и излазу из праволинијске цеви и истовремено мерити запремински проток воде. На самом почетку овог дела вежбе, треба водити рачуна да се вентили 3 и 6 налазе у затвореном положају, а вентил 4 у отвореном, тако да сав проток из бленде (деонице ④) пролази кроз деоницу ⑦.

Пад притиска се поново мери обрнутом У цеви, како је то приказано на слици 1.11. Притисак у мерном пресеку **T1** је већи од притиска у пресеку **T2**, тако да ће ниво воде бити виши у десном краку обрнуте У цеви. Положај дна обрнуте У цеви у односу на праволинијску деоницу ⑦ је означен са x_t . Пад притиска се израчунава на основу једнине хидростатичке равнотеже која важи за тачке А и В са



Слика 1.11. Одређивање коефицијента трења

слике 1.11:

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

$$\boxed{\Delta p_t = p_{T1} - p_{T2} = \rho g (h_{t1} - h_{t2})} \quad (1.7)$$

Исти пад притиска се може изразити из Бернулијеве једначине за струјницу која иде од пресека **T1** до пресека **T2**:

$$Y_{T1} = Y_{T2} + Y_{g7}$$

$$\frac{p_{T1}}{\rho} + \frac{U_7^2}{2} = \frac{p_{T2}}{\rho} + \frac{U_7^2}{2} + \lambda \frac{L_7}{D_7} \frac{U_7^2}{2}$$

$$\boxed{p_{T1} - p_{T2} = \rho \lambda \frac{L_7}{D_7} \frac{U_7^2}{2}} \quad (1.8)$$

У претходној Бернулијевој једначини Y_{g7} представља губитак енергије флуида по јединици масе. Као што је већ речено, губитак енергије је последица само трења, тако да се израчунава преко Дарсијевог израза у којем фигурише коефицијент трења λ . Растојање између пресека у којима се мери притисак износи $L_7 = 2,03$ m.

На слици 1.11 се види да је мерни пресек **T1** удаљен од колена за растојање $10D_7$. То је учињено због тога што је потребно да у мерном пресеку профил брзине буде развијен. Други мерни пресек **T2** је удаљен од колена које следи за растојање $5D$ да се не би узводно осетио утицај колена.

Изједначавањем једначина (1.7) и (1.8) може се изразити коефицијент трења:

$$\boxed{\lambda = g (h_{t1} - h_{t2}) \frac{D_7}{L_7} \frac{2}{U_7^2}} \quad (1.9)$$

Да би једначином (1.9) био одређен коефицијент трења, потребно је још знати средњу брзину струјања U_7 у деоници (7). Она се израчунава на основу запреминског протока, а он се мери помоћу претходно калибрисане бленде. У истом периоду када се мери пад притиска услед трења (h_{t1} и h_{t2}), мери се и пад притиска на бленди (h_{b1} и h_{b2}). На основу једначина (1.2) и (1.3) и познате вредности коефицијента бленде k_b израчунава се запремински проток воде кроз бленду, што је уједно и запремински проток кроз деоницу (7). Затим се на основу познатог пречника D_7 израчунава средња брзина струјања воде у

праволинијској деоници и Рејнолдсов број:

$$\dot{V} = k_b \sqrt{2g(h_{b1} - h_{b2})}, \quad \dot{V} = U_7 \frac{D_7^2 \pi}{4} \Rightarrow \boxed{U_7 = \frac{4\dot{V}}{D_7^2 \pi}}, \quad \text{Re}_7 = \frac{U_7 D_7}{\nu}. \quad (1.10)$$

Унутрашњи пречник деонице (7) је $D_7 = 24,8 \text{ mm}$, а кинематска вискозност воде на радној температури је $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Сада, када су израчунати проток кроз деоницу (7) и средња брзина струјања, могуће је из једначине (1.9) одредити коефицијент трења. Њега је потребно израчунати при различитим вредностима протока, што значи да је овај поступак потребно спровести за седам мерних режима, који су одређени брзином обртања радног кола пумпе и који су приказани табелом 1.2.

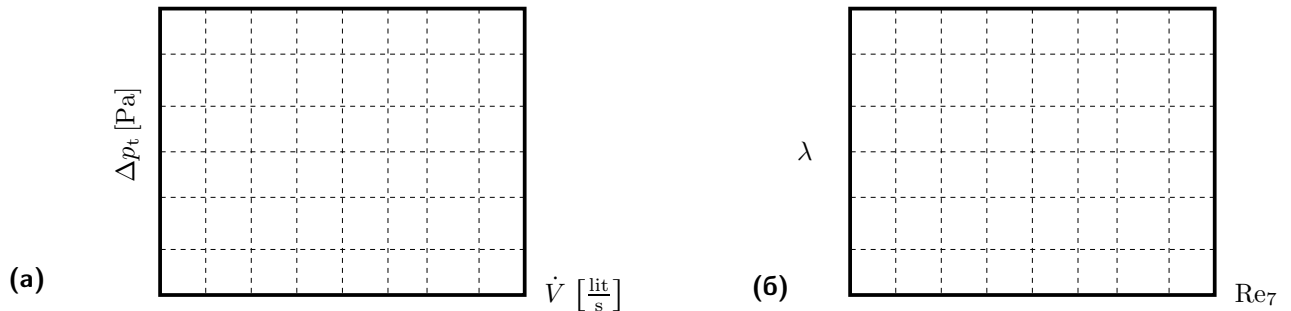
Табела 1.2. Одређивање коефицијента трења λ у правој деоници 7.

n [min ⁻¹]	h_{b1} [mm]	h_{b2} [mm]	Δh_b [s]	\dot{V} [lit/s]	\dot{V} [m ³ /h]	U_7 [m/s]	Re_7 [/]	h_{t1} [mm]	h_{t2} [mm]	Δh_t [mm]	Δp_t [Pa]	λ [/]
1000												
1100												
1200												
1300	716	383						746	365			
1400	803	383						813	359			
1500	889	378						885	349			
1600	982	372						961	325			

Поступак мерења

- Вентил 4 је отворен, а вентили 3 и 6 затворени, тако да исти проток пролази кроз деонице (4) и (7).
- У првом режиму (прва мерна тачка) пумпа се подеси на брзину обртања $n = 1000 \text{ min}^{-1}$.
- Истовремено се читава пад притиска на бленди (h_{b1} и h_{b2}) и пад притиска услед трења у правој деоници (h_{t1} и h_{t2}). Вредности се уписују у први ред табеле 1.2.
- Према једначини (1.7) израчунава се пад притиска на правој деоници.
- На основу једначина (1.2), (1.3), познате вредности коефицијента бленде k_b и једначине (1.10) израчунавају се запремински проток кроз деоницу (7) и средња брзина струјања U_7 и Рејнолдсов број Re_7 .
- Једначином (1.9) одређује се вредност коефицијента трења λ у првој мерној тачки (у првом радном режиму).
- Када је мерење у првој мерној тачки завршено, мења се брзина обртања радног кола пумпе $n [\text{min}^{-1}]$ и поступак мерења се понавља.

Потребно је резултате приказати и помоћу дијаграма (слика 1.12). Дијаграме урадити у програму по избору или ручно на милиметарском папиру. Табела 1.2 и дијаграми 1.12 су део извештаја са лабораторијске вежбе.



Слика 1.12. (а) Зависност пада притиска на правој деоници од запреминског протока, (б) зависност коефицијента трења од Рејнолдсовог броја.

4 Одређивање коефицијента отпора колена

Задатак у овом делу вежбе је измерити пад притиска на колену за различите вредности протока и затим одредити коефицијент отпора колена ζ_k за различите вредности Рејнолдсовог броја. Колено на којем се врши мерење је смештено у деоници ⑤ (слика 1.3). Издвојено колено са означеним мерним пресецима и апаратуром за мерење пада притиска је приказано на слици 1.13.

Најпре треба обезбедити да су вентили 3 и 4 затворени, а вентил 6 отворен. При таквој позицији вентила нема протока кроз деонице ⑥ и ⑦, већ сав проток из гране ④ пролази кроз деоницу ⑤ и колено на којем се врши мерење.

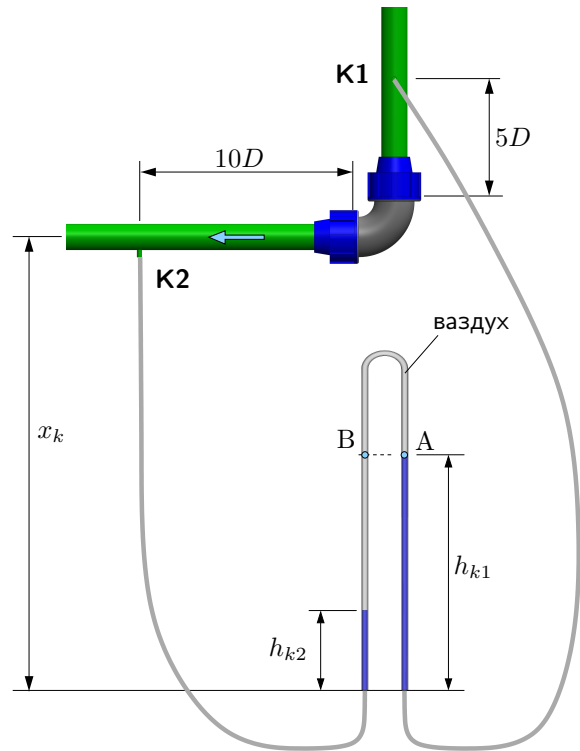
Запремински проток кроз колено се поново одређује коришћењем калибрисане бленде. Пад притиска на колену се мери обрнутом У цеви (слика 1.13).

Притисак флуида у мерном пресеку испред колена **K1** има већу вредност него у пресеку **K2** након колена, тако да ће ниво воде у обрнутој У цеви достићи већу висину у десном краку. Обрнута У цев која се користи за мерење пада притиска на колену има скалу од 600 mm, тако да највећи пад притиска који овде може бити измерен износи 600 mm воденог стуба.

Пад притиска на колену се израчунава на основу једначине хидростатичке равнотеже за раван која се налази при врху обрнуте У цеви. Тој равни припадају тачке А и В, тако да једначина гласи:

$$p_A = p_B \quad \Rightarrow \quad p_{k1} + \rho g 5D_5 + \rho g x_k - \rho g h_{k1} = p_{k2} + \rho g x_k - \rho g h_{k2}$$

$$\boxed{\Delta p_k = p_{k1} - p_{k2} = \rho g (h_{k1} - h_{k2}) - \rho g 5D_5} \quad (1.11)$$



Слика 1.13. Мерење пада притиска на колену

Мерни пресеци **K1** и **K2** се не налазе на истој висини па је потребно и то узети у обзир приликом писања претходне једначине. Разлика притисака у мерним пресецима се може изразити и из Бернулијеве једначине за струјницу која иде од пресека **K1** до пресека **K2**:

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

$$\frac{p_{k1}}{\rho} + \frac{U_b^2}{2} + g5D_5 = \frac{p_{k2}}{\rho} + \frac{U_b^2}{2} + \zeta_k \frac{U_5^2}{2}$$

$$\boxed{p_{k1} - p_{k2} = \zeta_k \rho \frac{U_5^2}{2} - \rho g 5D_5} \quad (1.12)$$

У последњој једначини се појављује коефицијент отпора колена ζ_k који је потребно одредити. Да би он био изражен изједначавају се једначине (1.11) и (1.12):

$$\rho g (h_{k1} - h_{k2}) - \rho g 5D_5 = \zeta_k \rho \frac{U_5^2}{2} - \rho g 5D_5$$

$$\boxed{\zeta_k = g (h_{k1} - h_{k2}) \frac{2}{U_5^2}} \quad (1.13)$$

За његово израчунавање потребно је знати средњу брзину струјања у деоници ⑤, а она се израчунава из запреминског протока кроз бленду. Истовремено са читавањем пада притиска на колену (h_{k1} и h_{k2}) читава се и пад притиска на бленди (h_{b1} и h_{b2}), па се запремински проток израчунава на основу једначина (1.2) и (1.3) и познате вредности коефицијента бленде k_b :

$$\dot{V} = k_b \sqrt{2g(h_{b1} - h_{b2})}, \quad (1.14)$$

Протоци кроз бленду и деоницу ⑤ су једнаки па се лако могу одредити средња брзина струјања и Рејнолдсов број у деоници ⑤:

$$\dot{V} = U_5 \frac{D_5^2 \pi}{4} \Rightarrow \boxed{U_5 = \frac{4\dot{V}}{D_5^2 \pi}} \quad \text{Re}_5 = \frac{U_5 D_5}{\nu} \quad (1.15)$$

Унутрашњи пречник деонице ⑤ је $D_5 = 24,8 \text{ mm}$, а кинематска вискозност воде на радној температури је $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Коначно, када је позната средња брзина струјања U_5 могуће је из једначине (1.13) израчунати коефицијент отпора колена. Поступак је потребно поновити за свих седам мерних тачака (радних режима), колико их је наведено у табели 1.3. Промена мерне тачке се остварује променом брзине обртања радног кола пумпе $n[\text{min}^{-1}]$.

Поступак мерења

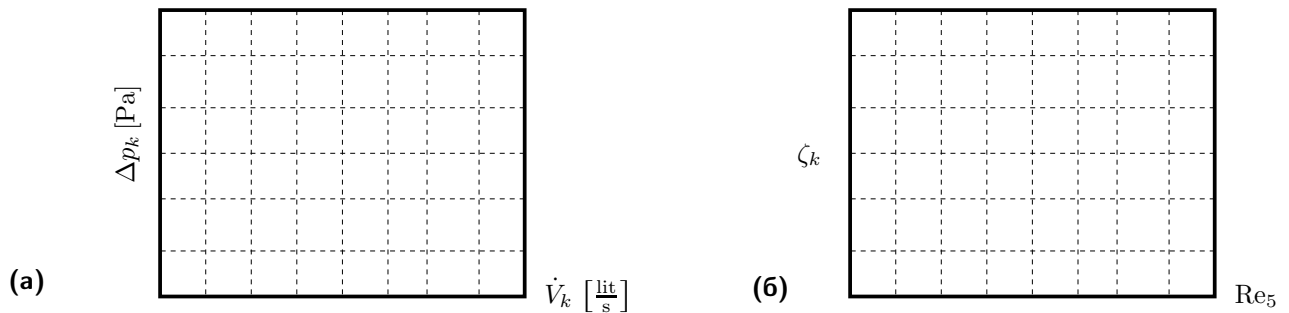
- Вентил 6 је отворен, а вентили 3 и 4 затворени, тако да исти проток пролази кроз деонице ④ и ⑤.
- У првом режиму (прва мерна тачка) пумпу треба подесити на брзину обртања $n = 1000 \text{ min}^{-1}$.
- Истовремено се читава пад притиска на бленди (h_{b1} и h_{b2}) и пад притиска на колену (h_{k1} и h_{k2}). Вредности се уписују у први ред табеле 1.3.
- Према једначини (1.11) израчунава се пад притиска на колену.
- На основу једначина (1.2), (1.3), познате вредности коефицијента бленде k_b и једначине (1.15) израчунавају се запремински проток кроз деоницу ⑤, средња брзина струјања U_5 и Рејнолдсов број Re_5 .

- Једначином (1.13) одређује се вредност коефицијента локалног отпора колена у првој мерној тачки (у првом радном режиму).
- Када је мерење у првој мерној тачки завршено, мења се брзина обртања радног кола пумпе n [min^{-1}] и поступак мерења се понавља.

Табела 1.3. Одређивање коефицијента отпора колена ζ_k у деоници 5.

n [min^{-1}]	h_{b1} [mm]	h_{b2} [mm]	Δh_b [s]	\dot{V} [lit/s]	\dot{V} [m^3/h]	U_5 [m/s]	Re_5 [/]	h_{k1} [mm]	h_{k2} [mm]	Δh_k [mm]	Δp_k [Pa]	ζ_k [/]
1000												
1100												
1200												
1300	713	399						412	80			
1400	795	403						468	58			
1500	881	404						527	32			
1600	969	399						591	6			

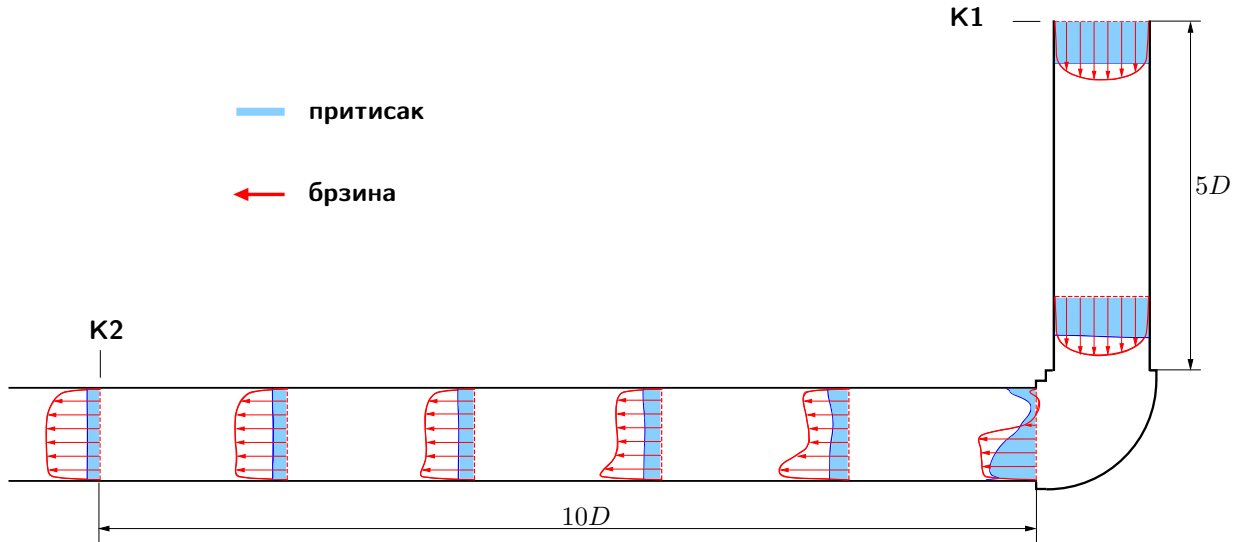
Потребно је резултате приказати и помоћу дијаграма (слика 1.14). Дијаграме урадити у програму по избору или ручно на милиметарском папиру. Табела 1.3 и дијаграми 1.14 су део извештаја са лабораторијске вежбе.



Слика 1.14. (а) Зависност пада притиска на колелу од запреминског протока, (б) зависност коефицијента отпора колелу од Рејнолдсовог броја.

Већ је напоменуто зашто су мерна места удаљена од локалних отпора. Да би мерење било исправно изведено потребно је да у мерном пресеку буде развијен профил брзине, а локални отпори својим присуством доводе до поремећаја профила брзине. Због тога је мерни пресек испред колелу **K1** удаљен за $5D_5$, док је мерни пресек након колелу **K2** удаљен за $10D_5$. На слици 1.15 приказани су профили брзине и релативног притиска у више попречних пресека у близини колелу. Види се да у улазном пресеку **K1** профил брзине јесте развијен и да њему одговара уједначна расподела притиска по попречном пресеку. Унутар самог колелу вода није у стању да испрати наглу промену геометрије струјног простора, па се

на самом излазу из колена виде изразито деформисани профили брзине и притиска. Између колена и мерног пресека **K2** остављен је део праве цеви у дужини од $10D_5$ управо зато да би се овај профил брзине развио и да би профил притиска био уједначен по попречном пресеку. Развој профила брзине и притиска у овом делу струјног простора се може пратити на слици 1.15. Уочљиво је да је у пресеку **K2** профил брзине поново развијен.



Слика 1.15. Приказ профила брзине и притиска између мерних пресека **K1** и **K2**.

Према једначини континуитета средња брзина струјања има исту вредност у пресецима **K1** и **K2**, јер су пречници ових пресека исти. Дакле, нема промене кинетичке енергије флуида између ова два пресека. Са друге стране, разлика интензитета релативног притиска у пресецима испред **K1** и иза колена **K2** сведочи о губитку енергије флуида због наиласка на локални отпор.

Подаци о струјној слици унутар овог струјног простора, који су приказани на слици 1.15 су резултат рада у специјализованом софтверу за симулирање струјања флуида OpenFOAM.

5 Одређивање коефицијента отпора вентила 3

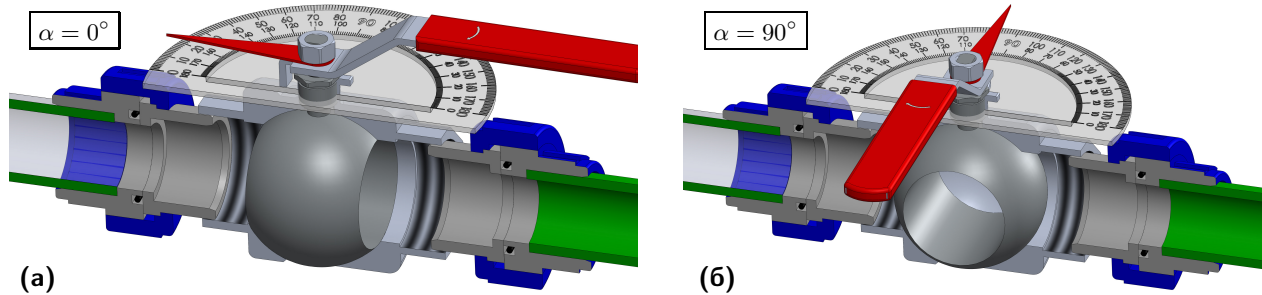
Као што се види на сликама 1.1 и 1.3 у деоници ⑥ је смештен вентил 3. Ради се о кугластом вентилу ознаке Giacomini R850 који је приказан на слици 1.16. Вентили се могу користити за регулацију протока кроз систем, или тако да се налазе само у једном од два могућа положаја: потпуно отворен или потпуно затворен. У зависности од тога каква им је намена, разликује се њихова конструкција.



Слика 1.16. Кугласти вентил 3 који је смештен у деоници 6.

Кугласти вентил носи овакав назив јер је његов главни део кугла која на себи има отвор чији пречник одговара пречнику цеви у којој се вентил налази. Када је оса отвора паралелна оси цеви, односно када угао закретања вентила има вредност $\alpha = 0^\circ$, тада је вентил потпуно отворен. Овај случај приказан је на

слици 1.17 (а). Повећавањем угла закретања смањује се површина проточног пресека за воду, повећава се отпор струјању који ствара вентил и проток се смањује. Када угао закретања достигне највећу вредност од $\alpha = 90^\circ$, попречни пресек је потпуно затворен и нема протока воде кроз вентил. Ово је приказано на слици 1.17 (б).



Слика 1.17. Полупресек кугластог вентила при различитим угловима закретања: **(а)** отворен положај $\alpha = 0^\circ$, **(б)** затворен положај $\alpha = 90^\circ$.

Циљ овог дела вежбе је да се одреди коефицијент локалног отпора вентила ζ_v за различите вредности протока (Рејнолдсовог броја). Пошто отпор вентила зависи од угла закретања вентила α , испитивање треба да буде спроведено за више различитих вредности угла α .

Потребно је измерити пад притиска на вентилу и запремински проток воде кроз вентил. Бленда се поново користи као протокомер. Вентил се налази у деоници ⑥ (слика 1.3) тако да је потребно затворити вентиле 4 и 6 да би сва вода која прође кроз бленду прошла и кроз вентил 3, тј. да би протоци кроз деонице ④ и ⑥ били једнаки.

Пад притиска на вентилу при већим вредностима угла закретања је велики тако да не може бити мерен обрнутом У цеви која има скалу од 1200 mm. Због тога се користе два дигитална манометра. Први је једним крајем повезан на мерни пресек испред бленде **V1**, а другим крајем је отворен ка атмосфери, тако да он показује разлику ова два притиска, односно, показује вредност натпритиска p_{m1} . Други дигитални манометар је једним крајем повезан на пресек иза вентила **V2**, а други крај је отворен ка атмосфери. Његово показивање представља вредност натпритиска p_{m2} . Поређењем вредности релативних притисака испред p_{m1} и иза p_{m2} вентила израчунава се пад притиска на вентилу.

За мерење релативних притисака користе се манометри *testo 511* приказани на слици 1.18. Њихов опсег мерења натпритиска је до 1000 hPa, односно, приближно 10 m воденог стуба. Манометри поседују екран са којег се могу читавати вредности натпритиска. Постоји могућност повезивања манометра на рачунар како би се аутоматизовао процес читавања резултата.

На слици 1.19 је приказан део деонице ⑥ у којем се налазе вентил 3 и мерна места испред вентила **V1** и иза вентила **V2**. На слици је представљен начин на који су манометри *testo 511* повезани са мерним пресецима. Манометри се налазе на истој висини. Разлика коте на којој се налазе манометри у односу на осу цеви је означена са x_v .

Апсолутни притисци у мерним пресецима **V1** и **V2** су p_1^* и p_2^* . Апсолутни притисци који се доводе манометрима су:

$$p_1 = p_1^* + \rho g x_v \quad \text{и} \quad p_2 = p_2^* + \rho g x_v.$$



Слика 1.18. Дигитални манометри Testo 511 коришћени за мерење натпритисака испред и иза вентила.

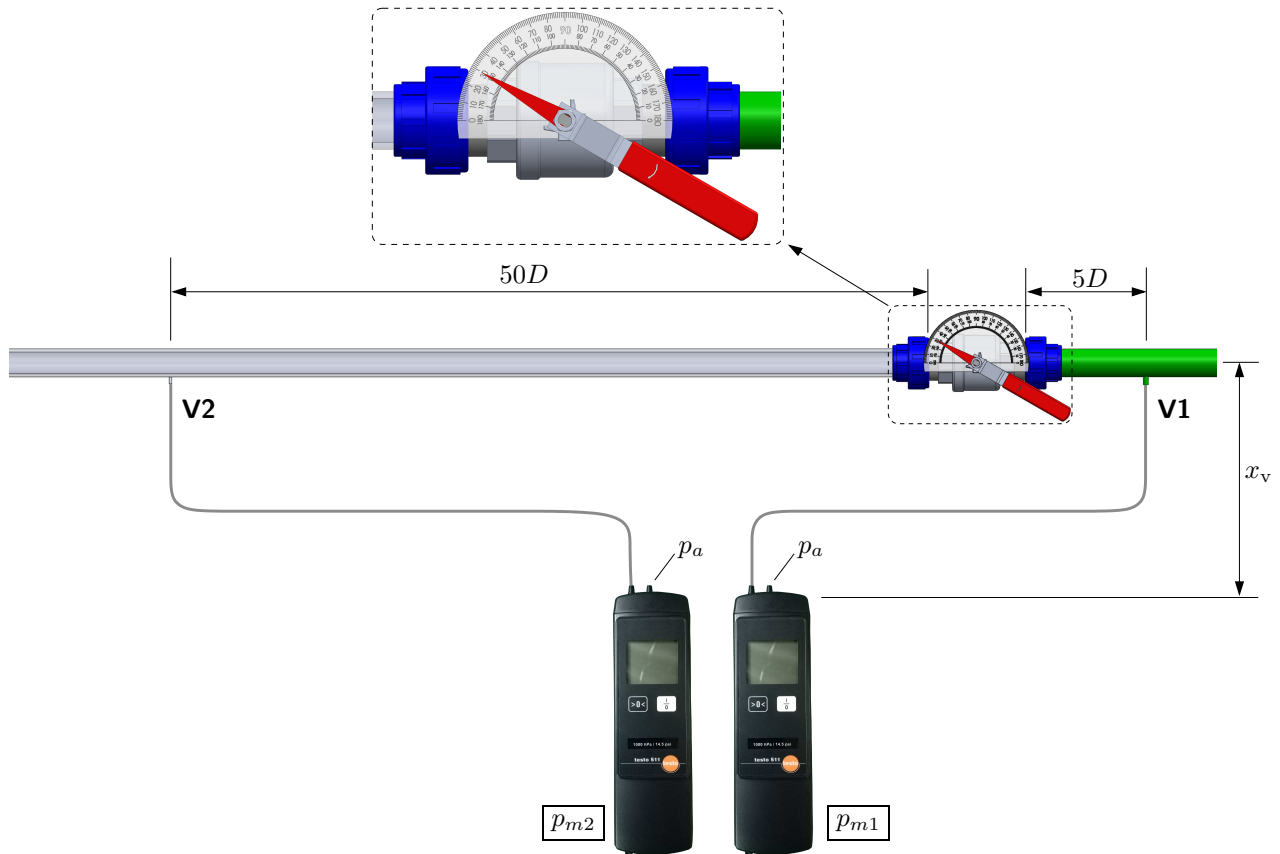
Манометри ове притиске пореде са атмосферским притиском, тако да су њихова показивања:

$$p_{m1} = p_1^* + \rho g x_v - p_a \quad \text{и} \quad p_{m2} = p_2^* + \rho g x_v - p_a$$

На основу показивања манометара могуће је изразити разлику притисака испред и иза вентила, тј. пад притиска у делу цеонице ⑥ услед присуства вентила 3:

$$\Delta p_v = p_1^* - p_2^* = p_{m1} - p_{m2} \quad (1.16)$$

Целокупни пад притиска између мерних пресека приписује се вентилу 3.



Слика 1.19. Део деонице 6 са кугластим вентилом и манометрима за мерење пада притиска.

Могуће је написати Бернулијеву једначину од пресека **V1** до пресека **V2** и из ње изразити коефицијент локалног отпора вентила:

$$\frac{p_1^*}{\rho} + \frac{U_6^2}{2} = \frac{p_2^*}{\rho} + \frac{U_6^2}{2} + \zeta_v \frac{U_6^2}{2}$$

$$\zeta_v = \frac{2}{\rho U_6^2} (p_1^* - p_2^*)$$

Разлика притисака која се појављује у претходној једначини, одређена је једначином (1.16), тако да је коначан израз за коефицијент отпора вентила:

$$\zeta_v = \frac{2}{\rho U_6^2} (p_{m1} - p_{m2}) \quad (1.17)$$

Да би вредност коефицијента отпора била израчуната потребно је знати средњу брзину струјања у деоници ⑥, односно, потребно је знати запремински проток кроз ову деоницу. И у овом случају

запремински проток је одређен блендом. Упоредо са читавањем показивања манометара p_{m1} и p_{m2} читава се пад притиска на бленди h_{b1} и h_{b2} . Запремински проток се израчунава на основу једначина (1.2) и (1.3) и познате вредности коефицијента бленде k_b :

$$\dot{V} = k_b \sqrt{2g(h_{b1} - h_{b2})}, \quad (1.18)$$

Протоци кроз бленду и деоницу ⑥ су једнаки па се могу одредити средња брзина струјања и Рејнолдсов број у овој деоници:

$$\dot{V} = U_6 \frac{D_6^2 \pi}{4} \Rightarrow \boxed{U_6 = \frac{4\dot{V}}{D_6^2 \pi}} \quad \text{Re}_6 = \frac{U_6 D_6}{\nu} \quad (1.19)$$

И деоница ⑥ има унутрашњи пречник $D_6 = 24,8 \text{ mm}$. Са познатом вредношћу средње брзине струјања U_6 могуће је једначином (1.17) израчунати коефицијент отпора вентила ζ_v . Пошто пад притиска на вентилу зависи и од тренутног запреминског протока и од положаја вентила, тј. угла закретања, потребно је за изабране вредности угла закретања извршити мерења при различитим протоцима воде.

На ручици вентила се налази казаљка, а иза ње скала на којој је могуће прочитати вредност угла закретања α (слика 1.19). Изабрано је да се испитивање изврши за следеће вредности угла закретања α : 10° , 20° , 30° , 40° и 50° . При свакој од ових вредности врши се мерење пада притиска за различите протоке воде кроз вентил.

Поступак мерења

- Вентил 3 поставити на жељени угао отварања α (за први део табеле 1.4 то је 10°), а вентиле 4 и 6 затворити, тако да исти проток пролази кроз деонице ④ и ⑥.
- У првом режиму (прва мерна тачка) подесити пумпу на брзину обртања $n = 1000 \text{ min}^{-1}$.
- Истовремено се читава пад притиска на бленди (h_{b1} и h_{b2}) и пад притиска на вентилу (p_{m1} и p_{m2}). Вредности се уписују у први ред табеле 1.4.
- Према једначини (1.16) израчунава се пад притиска на колелу и изражава у hPa и Pa.
- На основу једначина (1.2), (1.3), познате вредности коефицијента бленде k_b и једначине (1.19) израчунавају се запремински проток кроз деоницу ⑥, средња брзина струјања U_6 и Рејнолдсов број.
- Једначином (1.17) одређује се вредност коефицијента локалног отпора вентила 3 у првој мерној тачки (у првом радном режиму).
- Када је мерење у првој мерној тачки завршено, мења се брзина обртања радног кола пумпе $n [\text{min}^{-1}]$ и поступак се понавља (не мења се угао закретања вентила).
- Након свих шест мерних тачака, израчунава се средња вредност коефицијента отпора вентила и уписује се на дно прве табеле 1.4. Тиме је завршено мерење за једну вредност угла закретања вентила ($\alpha = 10^\circ$).
- Као што се види, табела 1.4 се састоји од 5 табела, при чему свака од њих одговара једној вредности угла α . Када се изврши наведени поступак мерења, угао закретања вентила α се мења на нову вредност и поступак мерења се понавља док све табеле не буду попуњене.

Потребно је резултате приказати и помоћу дијаграма (слика 1.20). Сваки од дијаграма садржи пет кривих, по једну за сваки угао закретања вентила. Дијаграме урадити у програму по избору или ручно на милиметарском папиру. Табела 1.4 и дијаграми 1.20 су део извештаја са лабораторијске вежбе.

Табела 1.4. Одређивање коефицијента отпора вентила ζ_v у деоници 6 за различите вредности угла закретања α .

$\alpha = 10^\circ$

n [min ⁻¹]	h_{b1} [mm]	h_{b2} [mm]	Δh_b [s]	\dot{V} [lit/s]	\dot{V} [m ³ /h]	U_6 [m/s]	Re_6 [/]	p_{m1} [hPa]	p_{m2} [hPa]	Δp_v [hPa]	Δp_v [Pa]	ζ_v [/]
1000												
1100												
1200												
1300												
1400												
1500												

средња вредност коефицијента отпора вентила ζ_v износи:

$\alpha = 20^\circ$

n [min ⁻¹]	h_{b1} [mm]	h_{b2} [mm]	Δh_b [s]	\dot{V} [lit/s]	\dot{V} [m ³ /h]	U_6 [m/s]	Re_6 [/]	p_{m1} [hPa]	p_{m2} [hPa]	Δp_v [hPa]	Δp_v [Pa]	ζ_v [/]
1000												
1100												
1200												
1300												
1400												
1500												

средња вредност коефицијента отпора вентила ζ_v износи:

$\alpha = 30^\circ$

n [min ⁻¹]	h_{b1} [mm]	h_{b2} [mm]	Δh_b [s]	\dot{V} [lit/s]	\dot{V} [m ³ /h]	U_6 [m/s]	Re_6 [/]	p_{m1} [hPa]	p_{m2} [hPa]	Δp_v [hPa]	Δp_v [Pa]	ζ_v [/]
1000												
1100												
1200												
1300												
1400												
1500												

средња вредност коефицијента отпора вентила ζ_v износи:

$\alpha = 40^\circ$

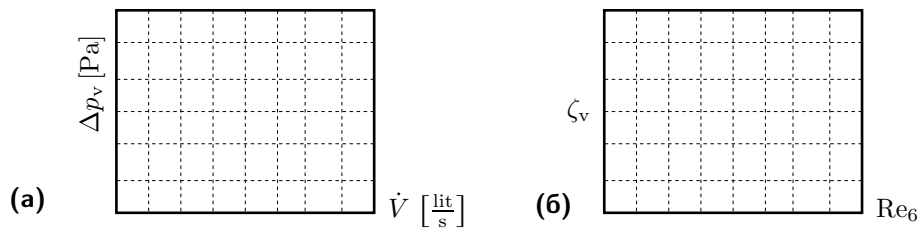
n [min ⁻¹]	h_{b1} [mm]	h_{b2} [mm]	Δh_b [s]	\dot{V} [lit/s]	\dot{V} [m ³ /h]	U_6 [m/s]	Re_6 [/]	p_{m1} [hPa]	p_{m2} [hPa]	Δp_v [hPa]	Δp_v [Pa]	ζ_v [/]
1000												
1100												
1200												
1300												
1400												
1500												

средња вредност коефицијента отпора вентила ζ_v износи:

$\alpha = 50^\circ$

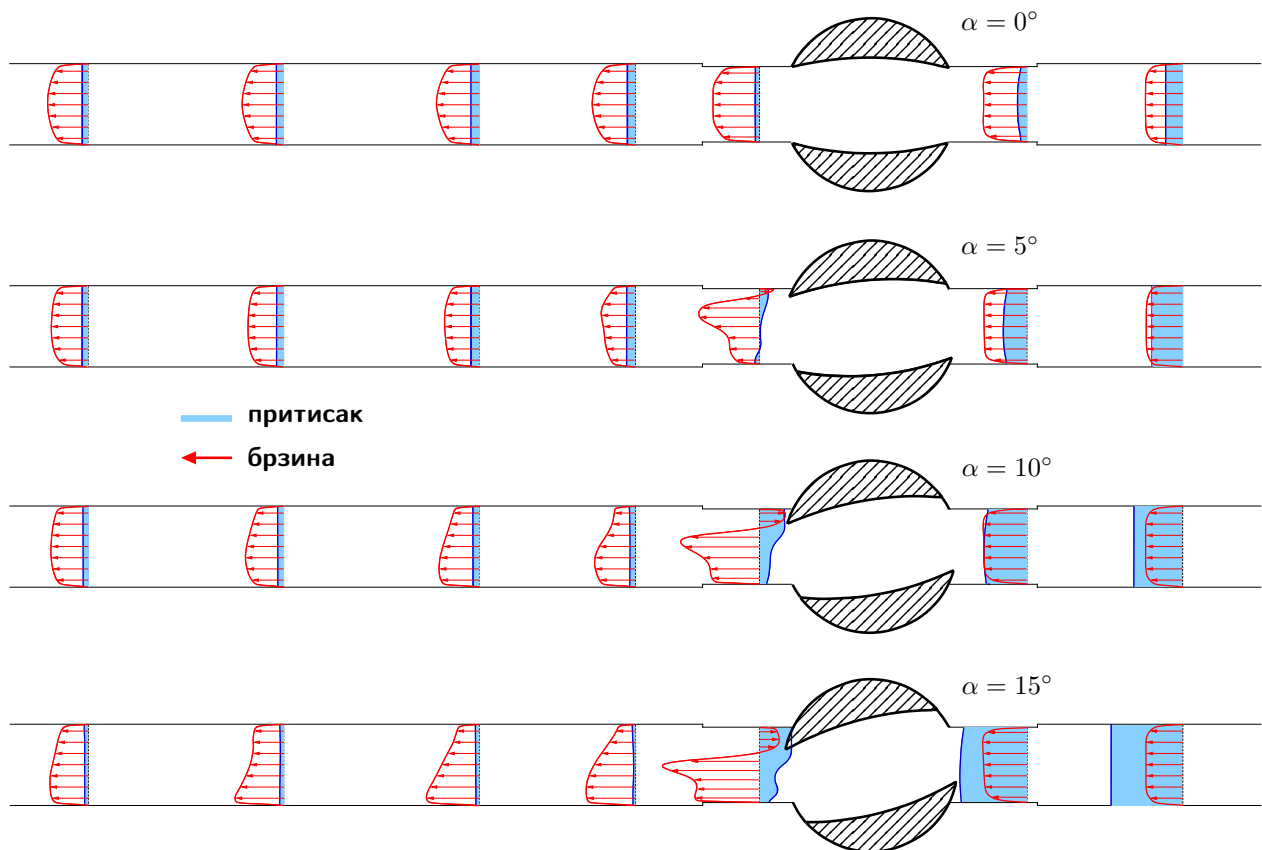
n [min ⁻¹]	h_{b1} [mm]	h_{b2} [mm]	Δh_b [s]	\dot{V} [lit/s]	\dot{V} [m ³ /h]	U_6 [m/s]	Re_6 [/]	p_{m1} [hPa]	p_{m2} [hPa]	Δp_v [hPa]	Δp_v [Pa]	ζ_v [/]
1000												
1100												
1200												
1300												
1400												
1500												

средња вредност коефицијента отпора вентила ζ_v износи:



Слика 1.20. (а) Зависност пада притиска на вентилу од запреминског протока, (б) зависност коефицијента отпора вентила од Рејнолдсовог броја.

И у овом случају треба водити рачуна да је у мерним пресецима профил брзине развијен. Као што се види на слици 1.19, мерни пресек испред вентила **V1** је удаљен за $5D_6$, док је мерни пресек иза вентила **V2** удаљен за растојање $50D_6$. Разлог веће удаљености мерног пресека након вентила је тај што при већим вредностима угла закретања α кугласти вентил може изазвати веће поремећаје профила брзине, па је потребна већа дужина да би се профил брзине поново развио. Приказ промене профила брзине и притиска у околини вентила, за различите вредности угла закретања α је дат на слици 1.21. На слици није приказан целокупни простор између мерних пресека, већ само део овог простора у ближој околини вентила. Обухваћена су четири случаја, којима одговарају вредностима угла α : 0° , 5° , 10° и 15° . Резултати приказани на слици 1.21 добијени су коришћењем софтвера за симулирање струјања флуида OpenFOAM.



Слика 1.21. Приказ профила брзине и притиска у непосредној околини вентила 3.

Стрелицама су приказани профили брзине, а плавим линијама профили релативног притиска. Приказан је релативни притисак у односу на притисак на крају деонице ⑥. Након вентила профили су деформисани (осим у случају када је угао закретања $\alpha = 0^\circ$). Са повећавањем угла закретања повећава се деформација профила брзине и притиска. Након вентила у правој цеви долази до постепеног развијања профила. Што је већи угао α , води је потребан дужи пут да би профили били поново развијени.

Последњи приказани профил се налази на растојању $8D$ од вентила. Уочљиво је да ово растојање није довољно да дође до потпуног развијања профила када је угао закретања $\alpha = 15^\circ$. Из тог разлога усвојено је да мерни пресек **V2** буде удаљен за растојање $50D$ како би се осигурало да профил брзине буде развијен и при већим угловима закретања.



Слика 1.22. Приказ струјног поља непосредно иза вентила. Ради визуализације струјног поља, у воду су убачени мехурови ваздуха.

Цев иза вентила је провидна да би био могућ визуелни приступ струјном пољу у овом делу деонице ⑥. Ради увида у струјно поље воде, убачени су ситни мехурови ваздуха узводно од вентила. Они се виде на слици 1.22.

6 Квазистационарно истицање воде

У току калибрисања бленде запреминском методом горњи резервоар, који је на слици 1.1 означен бројем ③, се пуни водом. Резервоар на дну има мали отвор за пражњење. На отвор је додат вентил 8, који се налази у затвореном положају. Последњи део прве лабораторијске вежбе се тиче одређивања коефицијента протока малог отвора на дну горњег резервоара.

Када је горњи резервоар напуњен, потребно је на скали очитати ниво воде у њему H_1 (слика 1.23 (а)). У почетном тренутку отвара се вентил 8 (слика 1.23 (а)) и покреће се штоперица за мерење времена током којег се горњи резервоар празни. После извесног времена затвара се вентил и зауставља се штоперица. Затим је потребно очитати крајњи ниво воде у горњем резервоару H_2 (слика 1.23 (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.

Запремински проток којим вода истиче из горњег резервоара зависи од тренутног нивоа воде у резервоару z и износи $\dot{V} = \mu \frac{d^2\pi}{4} \sqrt{2gz} = \frac{dV}{dt}$, одакле следи запремина која за елементарни период времена dt истекне из резервоара:

$$dV = \mu \frac{d^2\pi}{4} \sqrt{2gz} dt. \quad (1.20)$$

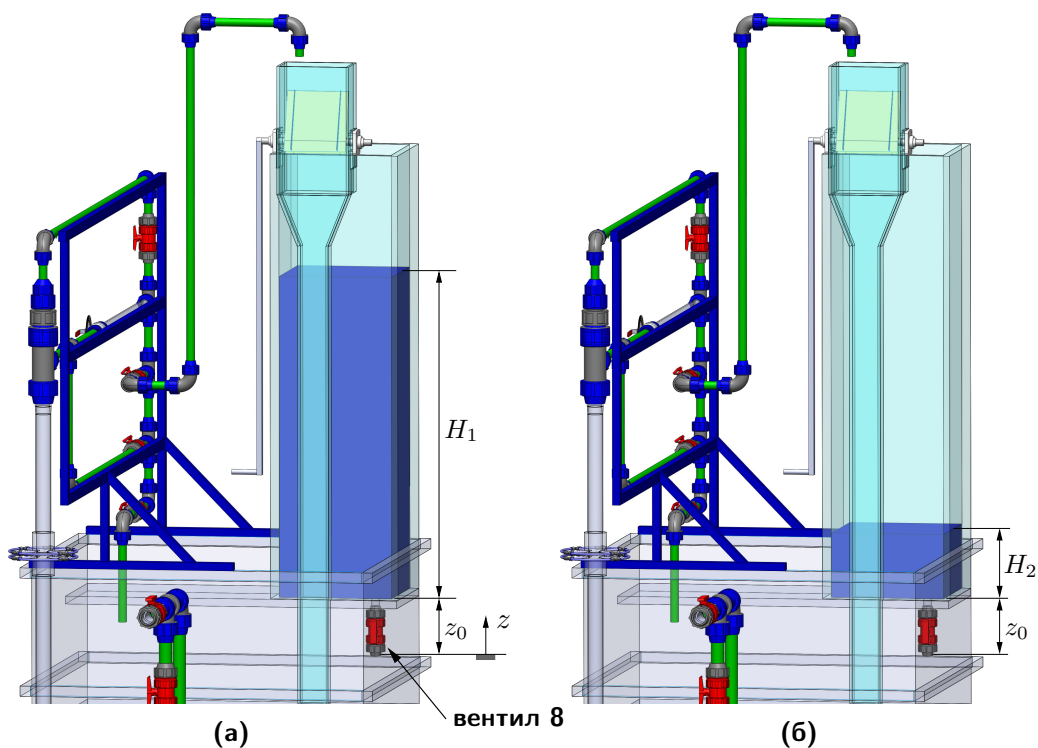
Са d је означен пречник излазног пресека вентила 8, кроз који вода истиче у атмосферу. Његова вредност је $d = 26 \text{ mm}$.

Запремина која напусти резервоар, изражена једначином (1.20), је једнака промени запремине у резервоару:

$$dV = -A_{rez} dz, \quad (1.21)$$

при чему је координата z везана за излазни пресек вентила 8 кроз који вода истиче (слика 1.23). Изједначавањем израза (1.20) и (1.21) и интегралњем добија се:

$$\mu \frac{d^2\pi}{4} \sqrt{2gz} dt = -A_{rez} dz$$



Слика 1.23. Ниво воде у горњем резервоару пре истацања (а) и после истацања (б).

$$\int_0^T dt = \int_{z_0+H_1}^{z_0+H_2} -\frac{4A_{rez}}{\mu d^4 \pi \sqrt{2g}} z^{-\frac{1}{2}} dz$$

$$T = \frac{4A_{rez}}{\mu d^4 \pi \sqrt{2g}} 2 \left(\sqrt{z_0 + H_1} - \sqrt{z_0 + H_2} \right)$$

Из претходне једначине могуће је изразити и израчунати коефицијент протока:

$$\mu = \frac{8A_{rez}}{T d^2 \pi \sqrt{2g}} \left(\sqrt{z_0 + H_1} - \sqrt{z_0 + H_2} \right), \quad (1.22)$$

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 излазног пресека вентила,
- T - измерено време истацања,
- H_1 - почетни ниво воде у резервоару,
- H_2 - крајњи ниво воде у резервоару.

Измерене и израчунате вредности је потребно унети у табелу 1.5.

H_1 [mm]	H_2 [mm]	T [s]	μ

Табела 1.5. Одређивање коефицијената протока малог отвора

Литература

- [1] EN ISO 5167-1: Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full. Part 1: General principles and requirements. 2003.
- [2] EN ISO 5167-2: Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full. Part 2: Orifice plates. 2003.
- [3] Милан М. Раковић, *Нумерички прорачун турбулентног струјања воде кроз цев са уграђеном мерном блендом*, Мастер (MSc) рад, Машински факултет Универзитета у Београду, 2016.