

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Војна академија Универзитета Одбране



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Војноиндустријско инжењерство

Предмет: Експеримент у машинству

Број индекса: 2038/2018

Букашин М. Мартиновић

Експериментално одређивање карактеристика кугла вентила

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Бранко Тадић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да представи и опише функционисање уређаја за одређивање попречног пресека кугла вентила у зависности од угла под којим је отворен и брзине којом се течност креће приликом истицања. Затим, да објасни значај експеримента, изврши развој теоријског модела, изведе закључке о изведеном експерименту и презентује резултате.

Препоручена литература:

[1] Теорија и планирање инжењерског експеримента, ПРЕДАВАЊЕ – П1

[2] ПРЕДАВАЊА (материјал са мудла), Механика флуида, 13. недеља

[3] Проф. др Бранко Р. Обровић, Механика флуида, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, 2007.

Крагујевац, датум

ментор

Проф. др Бранко Тадић, редовни професор

Резиме рада

У оквиру рада, описани су појам и циљеви експеримента, начин рада и типови кугла вентила. Представљен је 3D модел урађен у програму Catia P3 V5R21, као и физички модел самог уређаја. Такође, извршен је и развој теоријског модела, тумачење и презентовање добијених резултата.

Кључне речи: кугла вентил, пумпа, експеримент

Abstract

In the course of the paper, the concept and objectives of the experiment, the mode and types of valve balls were described. The 3D model made in the Catia P3 V5R21 was performed, as well as the physical model of this device. Also, the theoretical model was developed, and the results were interpreted and presented.

Key words: ball valve, pump, experiment

САДРЖАЈ

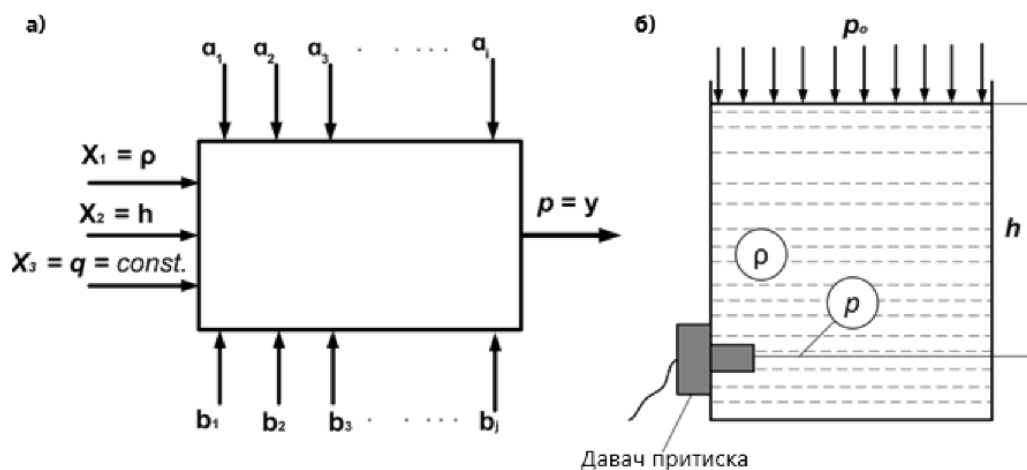
1. УВОД	1
2. ТЕОРИЈСКА РАЗМАТРАЊА	7
2.1 Истицање флуида кроз отворе	7
2.1.1 Класификација отвора	7
2.1.2 Одређивање брзине истицања течности кроз мали отвор заобљених ивица	9
2.1.3 Истицање течности кроз велики отвор	11
2.1.4 Истицање течности кроз отвор пред којим течност не мирује.....	12
2.2 Хидростатика.....	13
2.3 Хидродинамика	13
2.4 Бернулијева једначина	15
2.5 Цевни проблеми - облик са губицима	18
2.5.1 Проширења	19
2.5.1.1 Дифузор.....	19
2.5.2 Сужења.....	21
2.5.2.1 Нагло сужење.....	21
2.5.2.2 Млазник.....	21
2.5.3 Улазни губитак.....	22
2.5.4 Кривине - колено.....	23
2.5.5 Рачве и тројници	25
2.5.6 Цевне арматуре.....	26
2.5.6.1 Усисна корпа.....	26
2.5.6.2 Затварач (лептир)	27
2.5.6.3 Славина.....	27
2.5.6.4 Засун	28
2.5.6.5 Вентил	28
2.5.7 Излазни губитак	30
2.6 Кугла вентил	30
3. ОПИС МЕРНОГ УРЕЂАЈА	34
3.1 3D Модел.....	38
3.2 Карактеристике пумпе	40
4. РАЗВОЈ ТЕОРИЈСКОГ МОДЕЛА	42
5. ПЛАН И ПРОГРАМ ЕКСПЕРИМЕНТА	48
6. РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА	49
7. ЗАКЉУЧАК	52

ЛИТЕРАТУРА	53
-------------------------	-----------

1. УВОД

Експеримент је веома сложен појам и у теоријском и у техничком смислу. Добро организован и добро осмишљен експеримент пуно вреди. Лоше организован и лоше осмишљен експеримент може довести до потпуно погрешних закључака. Славни научници, Галилеј, Архимед, Фарадеј, Њутн и многи други у својим истраживањима примењивали су експерименталне технике. Експеримент се данас, захваљујући развоју теоријске науке и технике, разматра и у теоријском и у техничком смислу [1].

Експеримент је тест или серија тестова у којима се врши промена улазних величина (променљиве процеса или система - фактори) и утврђује утицај тих промена на излазне величине процеса или система. На пример, притисак течности на зидове суда зависи од густине течности, висине стуба течности, земљиног убрзања и атмосферског притиска (слика 1.1б). Дакле, у овом случају притисак течности је излазна величина (променљива), док су улазне величине густина течности, висина стуба течности, земљино убрзање и атмосферски притисак. Овај пример се може илустровати шемом приказаном на слици 1.1а).

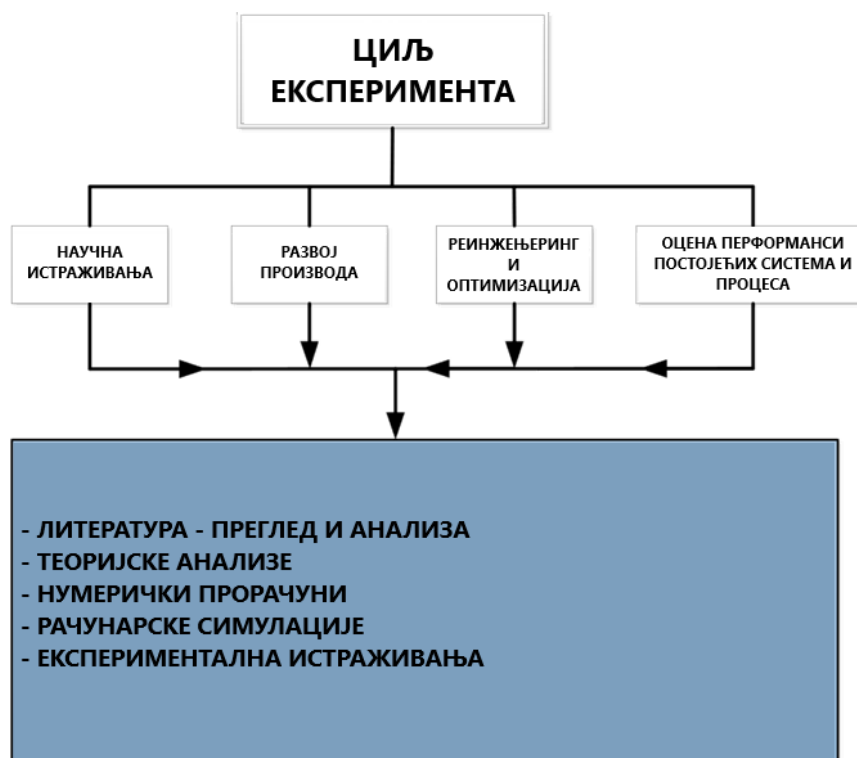


Слика 1.1. Променљиве система при мерењу хидростатичког притиска [1]

Поред улазних и излазних величина система и процеса постоје и одређени поремећаји. У групу a_i (слика 1.1а) спадају поремећаји који се могу контролисати, на пример поремећај температуре. У групу поремећаја b_j , спадају поремећаји који се не могу контролисати или их је веома тешко контролисати (слика 1.1а). У ове поремећаје спада, на пример, поремећај нивоа течности, промена густине течности услед присуства других материја (нечистоћа) и слични поремећаји.

Ако би се давач притиска причврстио за зид суда на висини x могла би се експериментално проверити поменути законитост облика $p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h$.

Експерименти су у великом броју случајева знатно сложеније природе са много већим бројем улазних, излазних и поремећајних величина. Многе појаве и физичке законитости откривене су захваљујући експерименталним истраживањима. Физички процеси су, у великом броју случајева веома сложени, па је са тим у вези, некада веома тешко теоријски утврдити и аналитички описати понашање неког техничког система. Експериментална истраживања имају за циљ да разјасне одређене феномене у области науке, допринесу развоју и побољшању производа и система или на адекватан начин оцене перформансе постојећих система (слика 1.2).



Слика 1.2. Циљеви експерименталних истраживања [1]

Већ је поменуто да експерименти имају за циљ да разјасне одређене феномене у области науке и технике, што је само један од основних циљева експерименталних истраживања. Због сложености одређених процеса и техничких система, веома често, се теоријски не могу разјаснити одређене појаве и одредити неке веома битне величине. И када је то теоријски могуће урадити, увек остаје питање поузданости добијених резултата. Увек је добро и пожељно неку теоријску хипотезу, модел или прорачун, проверити и експериментално. Треба поменути да се физика у својој прошлости није делила на теоријску и експерименталну. Тек у новије време, после бурног развоја експерименталне технике, експериментална физика се проучава као засебна научна дисциплина. Још већи значај има експеримент у примењеним наукама. Ако нека теоријска поставка треба да буде примењена неопходан је експериментални доказ, а често и нека додатна информација која се може добити једино експериментом. У примењеним наукама експеримент је понекад једини извор сазнања, пошто се у њима често долази до недовољно познатих или сувише сложених појава.

Друга велика примена експеримената је у фази развоја производа. Развој производа је веома сложен процес. Да би се опстало на тржишту неопходно је да производ поседује оптималне перформансе по многим аспектима и да буде прихватљиве цене коштања. Са тим у вези, развој производа укључује многе активности везане за експериментална истраживања.

Посебно ако је реч о сложеним производима и системима код којих се подразумевају претходна обимна експериментална истраживања на физичким моделима производа и система. У данашње време развоја науке и технике и велике конкуренције на тржишту, нико није спреман да ризикује и упусти се у развој производа који носи чак и мали степен ризика од неуспеха. Из тог разлога, све што није могуће теоријски детаљно сагледати и предвидети подлеже експерименту. Најчешће експерименту на физичким моделима који омогућавају реално сагледавање стања будућег производа, уз минималне трошкове и минимални ризик од неуспеха.

Трећа веома значајна примена експерименталних истраживања је област реинжењеринга и оптимизације постојећих производа и система, односно побољшање њиховог стања и перформанси. Не постоји производ или систем који идеално функционише по свим аспектима, из простог разлога што у фази развоја производа није могуће постићи оптимум. Оптимум је, теоријски посматрано, тачка у хипер простору утицајних параметара која се никада не може у потпуности достићи. Оптимуму се само више или мање приближавамо. Зато увек има простора да се, у циљу побољшања одређених производа и система, на њима изврше одређене мање или веће промене. Да би те промене носиле што мањи ризик и мање трошкове, у доста случајева је потребно извршити одређена експериментална истраживања.

У инжењерској пракси експеримент је свакодневна метода истраживања или обављања стручног посла. Када се пројектује нови производ потребна су и експериментална испитивања прототипа. Да ли је такав рад стручан или истраживачки зависи једино од природе испитивања и значаја добијених резултата. При увођењу нове технологије највећи значај има експериментални рад јер он, поред осталог, треба да потврди или одбаци хипотезу о предностима нове технологије. Узроци шкарта у некој производњи у великом броју случајева одређују се експерименталним путем.

Експериментална истраживања имају значајну примену и при оцени перформанси постојећих система. То је најчешће везано за дијагностику стања постојећих система код којих је из неког разлога дошло до поремећаја. Због тога се код ових система мерењем и анализом одређених физичких величина (сила, температура, вибрација, буке, притиска,...) врши дијагностика стања и предлажу мере побољшања стања система. Разлози поремећаја стања система могу бити повећано хабање, неправилно одржавање и други разлози. Треба нагласити и то да оцену перформанси постојећих система увек треба вршити у циљу превентивног одржавања система. То доприноси предвиђању отказа и значајном смањењу трошкова.

Експериментална испитивања имају примену и у области едукације и бољег схватања одређених детерминистичких и физичких величина и законитости које између њих важе.

Без обзира о ком типу експеримената је реч (научна истраживања, развој производа, ревитализација производа, оптимизација, оцена перформанси постојећих система) њима би по правилу требале да претходе активности везане за:

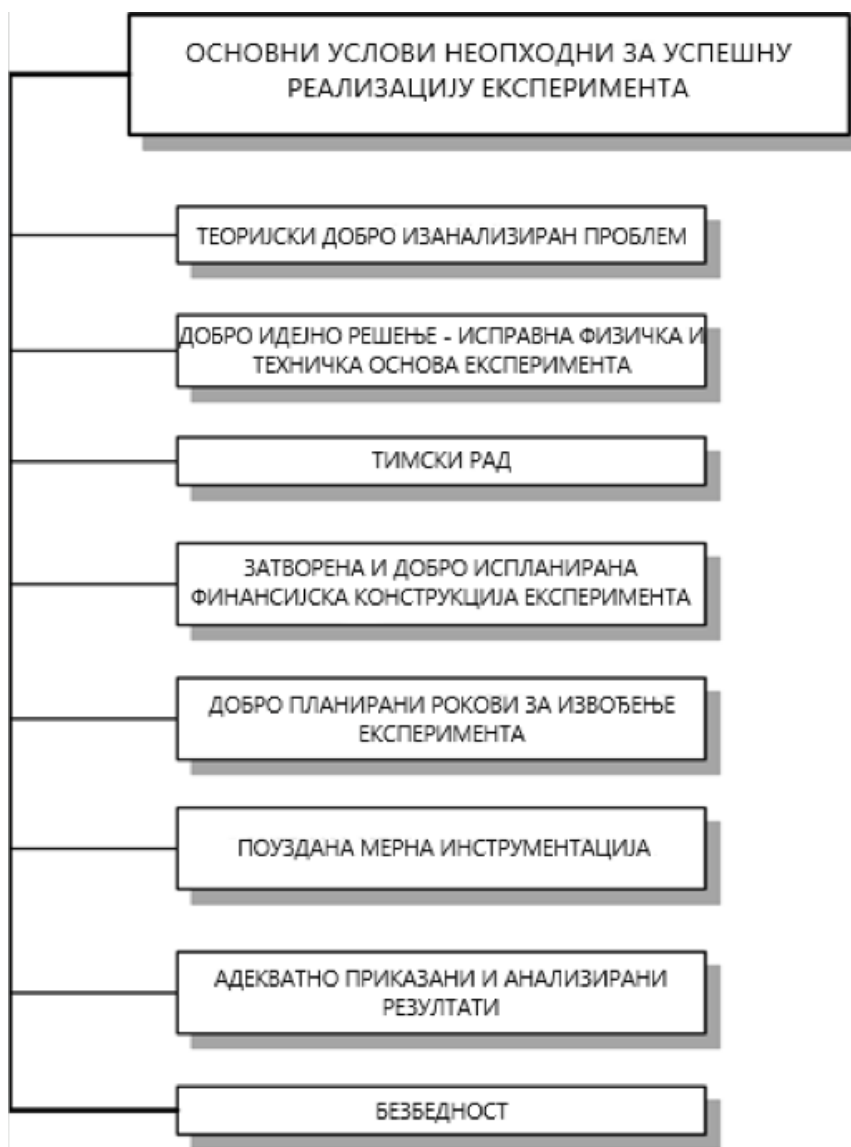
- детаљан преглед литературе везан за предметну проблематику,
- теоријске анализе,
- нумерички прорачуни и
- рачунарске симулације.

Прегледом одговарајуће литературе добиће се веома корисне информације типа: који су проблеми изражени код испитивања која треба урадити, да ли је сличан проблем већ неко решавао, што је веома вероватно, који су могући поремећаји и сл. У сваком случају, информације добијене из литературе допринеће да се експеримент успешније реализује.

У фази теоријских анализа треба сагледати да ли проблем који је планиран да се реши експериментом обухвата феномене који нису теоријски решени. Да ли се ти феномени могу укључити у неки теоријски модел? Да ли се може развити реалан теоријски модел који не би имао значајну грешку предвиђања излазних величина? Без обзира на исход ове фазе рада сигурно се може рећи да ће и теоријске анализе веома значајно допринети успешности реализације планираног експеримента.

Нумерички прорачуни и рачунарске симулације су свакако фазе које би требале да претходе експерименту. На пример, без обзира што нумерички прорачуни (ФЕМ анализа, модална анализа и друге методе), могу некада, због проблема сложених и неодређених граничних услова да проузрокују веће грешке прорачуна, њихова примена ће имати велики значај. Наиме, ови прорачуни ће, и у најкритичнијим случајевима, одредити ред величине излазних величина, што ће имати веома велики значај при глобалном сагледавању проблема и планирању експеримента.

На слици 1.3 дата је шема на којој су прецизирани основни услови неопходни за успешну реализацију експеримента.



Слика 1.3. Основни услови неопходни за успешну реализацију експеримента [1]

Наведене услове (слика 1.3) тешко је градити према значајности, па са тим у вези редослед њиховог навођења треба условно схватити.

Први услов за успешну реализацију експеримента односи се на теоријску анализу проблема што подразумева не само аналитичко разматрање проблема већ и преглед литературе, нумеричке прорачуне и рачунарске симулације. Да ли ће све наведене фазе, или само неке од њих, предходити експерименту, зависи од врсте и сложености експеримента.

Други услов односи се на добро идејно решење, односно исправну физичку и техничку основу експеримента. Никада при планирању експеримента не треба журити и прихватити идејни концепт који није изанализиран са аспекта могућих системских грешака, сложености експеримента, случајних грешака, цене и уопште поузданости добијених резултата. Увек је добро критички размотрити више идејних решења, чути мишљење компетентних стручњака и идеју вишекритеријумски оптимизовати.

Трећи услов односи се на тимски рад, то јест добру организацију експеримента. Експеримент је сложен подухват. При планирању и реализацији експеримента увек постоји значајна вероватноћа да експеримент не успе. Та вероватноћа је најчешће у корелацији са бројем компетентних учесника у експерименту и питањем сложености експеримента. Ако је број компетентних и одговорних учесника у експерименту већи вероватноћа успеха расте. Дакле, при организацији експеримента, посебно сложенијих експеримената, треба укључити већи број компетентних али и одговорних учесника.

Експеримент треба да буде реализован на професионалном нивоу. То значи да у тиму треба да постоје експерти за многе фазе реализације експеримента. Мала је вероватноћа да појединац може направити и добар преглед литературе, и добру теоријску анализу проблема који се решава, и дати идејни концепт експеримента, и предвидети адекватну мерну инструментацију, и обезбедити неопходан буџет пројекта, и адекватно анализирати и приказати резултате, и пројектовати неки неопходан физички модел, и обезбедити све мере неопходне за безбедно извођење експеримента. Из наведених разлога тимски рад је веома пожељан и увек даје позитивне ефекте.

Буџет пројекта, односно затворена и добро испланирана финансијска конструкција је такође веома битан предуслов за успешну реализацију експеримента. Недостатак финансијских средстава повлачиће веће ризике из разлога неопходности избора мање поузданих решења физичких модела, мерних ланаца и остале опреме и вероватно мање заинтересованости чланова тима због додатних проблема које недостатак финансијских средстава иницира.

При планирању експеримента увек треба тежити да се рокови завршетка експеримента предвиде са урачунатим степеном неизвесности који већина експеримената повлачи. Неизвесности могу бити у смислу кашњења испоруке мерне инструментације, грешака и проблема при изради физичких модела и осталих специјалних елемената и остале неизвесности.

При планирању експеримента увек је потребно изабрати поуздану мерну инструментацију (даваче, мостове појачиваче, АД конвертор, каблове и осталу инструментацију). Поуздана мерна инструментација обезбедиће већу прецизност мерења и бољу поновљивост резултата мерења.

Резултате мерења треба обрадити адекватним статистичким методама и тестовима и приказати их у виду хистограма, 2D и 3D дијаграма и релативних односа променљивих, дефинисати одређене регресионе функције, тестирати статистичке хипотезе и слично, о чему ће у наредним темама бити више речи.

Безбедност учесника у извођењу експеримента је питање којем треба посветити посебну пажњу. Постоје експерименти који не носе ризик по безбедност, али постоје и високо ризични експерименти који могу имати и крајње непожељне последице по здравље. То могу бити проблеми маса које се крећу већим брзинама, рад са агресивним материјама, рад са експлозивним материјама и слични проблеми.

Планирање експеримента представља посебно сложен задатак. У литератури која третира проблематику експеримента влада мишљење да је основни предуслов за успешан експеримент добро познавање проблема који се експериментално разматра, у теоријском и инжењерском смислу. Са тим у вези, увек је пожељно о проблему који се разматра прикупити и већи број експертских мишљења, односно извршити консултације са експертима из предметне проблематике.

Основни проблем при планирању експеримента своди се на:

- избор броја улазних величина, односно фактора који утичу и у највећој мери детерминишу одређену појаву (излазну величину),
- избор броја потребних варирања вредности сваке појединачне улазне величине (променљиве), то јест број потребних резултата мерења,
- проблем елиминисања или држања на константном нивоу свих осталих утицаја.

О броју потребних улазних променљивих величина процеса/система не може се генерално говорити. То зависи првенствено од проблема који се разматра. Ако је реч о провери познатих физичких закона онда је број улазних променљивих величина познат, па је проблем далеко једноставнији.

2. ТЕОРИЈСКА РАЗМАТРАЊА

2.1 Истицање флуида кроз отворе

Услови истицања течности кроз отворе и наглавке могу да буду веома различити. Течност може да истиче у атмосферу или у простор у коме се већ налази иста или нека друга течност. То је подводно истицање. И у једном и у другом случају истицање може да буде при сталном или променљивом нивоу течности. Поменути услови знатно утичу на брзину истицања, па самим тим и на проток [2].

Истицање, као и свако друго кретање течности, праћено је одговарајућим отпорима кретању за чије се савлађивање троши одређена струјна енергија.

При овом кретању губитак енергије условљен је углавном локалним отпором у самом отвору, јер се трење највише испољава баш на ивицама отвора.

2.1.1 Класификација отвора

У односу на величину отвора и попречног пресека суда, отвори се дела на мале и велике. Код малих отвора се брзина течности по пресеку отвора незнатно мења. Код великих отвора, промена брзине по пресеку млаза течности је осетна. Експерименти су показали да се отвор може сматрати малим ако је [2]:

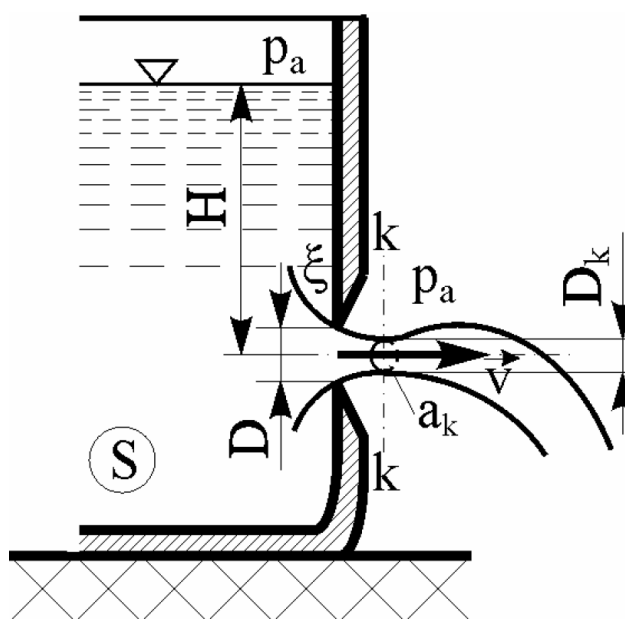
$$D \leq 0.1H, \quad (2.1)$$

где је D пречник отвора (или је то вертикална димензија отвора, ако исти није кружног облика).

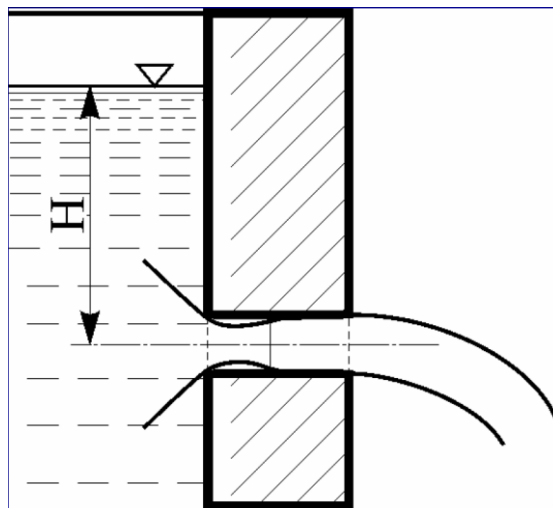
Према дебљини зида у коме се налазе разликују се:

- отвори у танким и
- отвори у дебелим зидовима.

При истицању кроз отвор у танком зиду постоји само локални отпор услед оштрих ивица отвора. Разлика при истицању кроз отворе у танком (слика 2.1) и дебелим зиду (слика 2.2) настаје искључиво због облика ивица отвора у самом зиду, а не због дебљине зидова.



Слика 2.1. Мали отвор оштрих ивица [2]



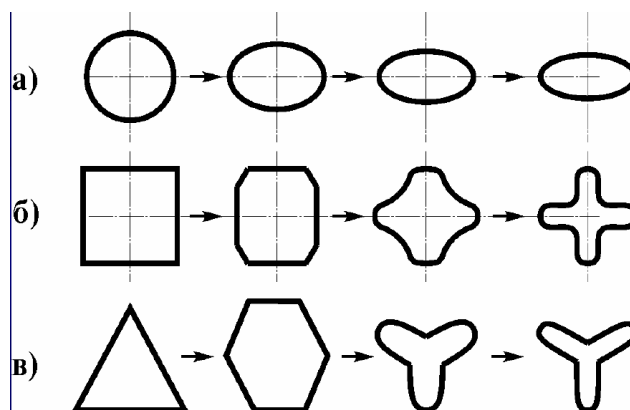
Слика 2.2. Мали отвор у дебелом зиду [2]

Делићи течности не могу, при уласку у отвор за време иситцања, нагло да скрену за 90° , те зато улазе у отвор под неким углом према површи зида. При томе су трајекторије делића течности у облику кривих линија са великом кривином. По изласку из отвора кривина трајекторија (односно струјница при устаљеном струјању) се смањује и на извесном растојању од отвора (пресек к-к на слици 2.1) струјнице су међусобно паралелне. Због тога је попречни пресек млаза у близини отвора мањи од попречног пресека самог отвора. Дакле, млаз се непосредно после отвора са оштрим ивицама сужава, а затим пада услед дејства Земљине теже. Ова појава се назива контракцијом млаза. У случају малих отвора оштрих ивица, највећа контракција млаза јавља на растојању $D/2$ од унутрашње површине зида суда и даје пречник суженог пресека млаза приближно једнак $D_k = 0.8D$.

Коефицијент контракције Ψ представља однос површина најужег пресека млаза a_k и пресека отвора a и за случај кружног отвора има вредност [2]:

$$\Psi = \frac{a_k}{a} = \left(\frac{D_k}{D}\right)^2 = \left(\frac{0.8D}{D}\right)^2 = 0.64. \quad (2.2)$$

Осим контракције (изражене или неизражене, потпуне или делимичне) при истицању долази још до једне појаве која се назива преображајем или инверзијом млаза. Само је облик попречног пресека млаза у близини отвора сличан облику самог отвора, док се надаље облик пресека млаза мења. Кружни пресек млаза деформише се у вертикало издужену елипсу, при истицању кроз отвор у облику квадрата, млаз добија крстасти облик и млаз у облику троугла деформише се у трокраку звезду (слика 2.3).



Слика 2.3. Инверзија млаза [2]

2.1.2 Одређивање брзине истицања течности кроз мали отвор заобљених ивица

Полази се од најједноставнијег примера истицања течности у атмосферу кроз мали отвор који се налази на дубини H испод нивоа течности (слика 2.4). Ниво течности се одржава на сталној висини. Сматра се да је улаз отвора сасвим добро заобљен и да се вискозност течности занемарује. Логично је да се претпостави да брзина истицања зависи од густине ρ течности, од убрзања g Земљине теже и од висине H , тј. да је [3]:

$$v = f_1(\rho, g, H). \quad (2.3)$$

Будући да је реч о појави која се одвија под дејством четири физичке величине, користиће се принцип димензијске хомогености, односно спровешће се директно испитивање димензијске хомогености претпостављеног облика закона за брзину. Стога се претходна једначина развија у ред - збир монома истих димензија [3]:

$$v = \Sigma B_i \rho^x g^y H^z, \quad (2.4)$$

у коме је B_i бездимензијски коефицијент, а x, y и z су за сада непознати изложници. Пошто у претходним изразима величине v, ρ, g и H имају редом димензије: $[v] = LT^{-1}$, $[\rho] = ML^{-3}$, $[g] = LT^{-2}$ и $[H] = L$, то сваком члану хомогеног реда одговара димензијска једначина [3]:

$$LT^{-1} = (ML^{-3})^x (LT^{-2})^y L^z. \quad (2.5)$$

Упоредивањем степена уз исте основе (M, L, T) долази се до следећих алгебарских једначина:

$$0 = x, \quad 1 = -3x + y + z, \quad -1 = 2y,$$

чија су решења:

$$x = 0, \quad y = 1/2, \quad z = 1/2.$$

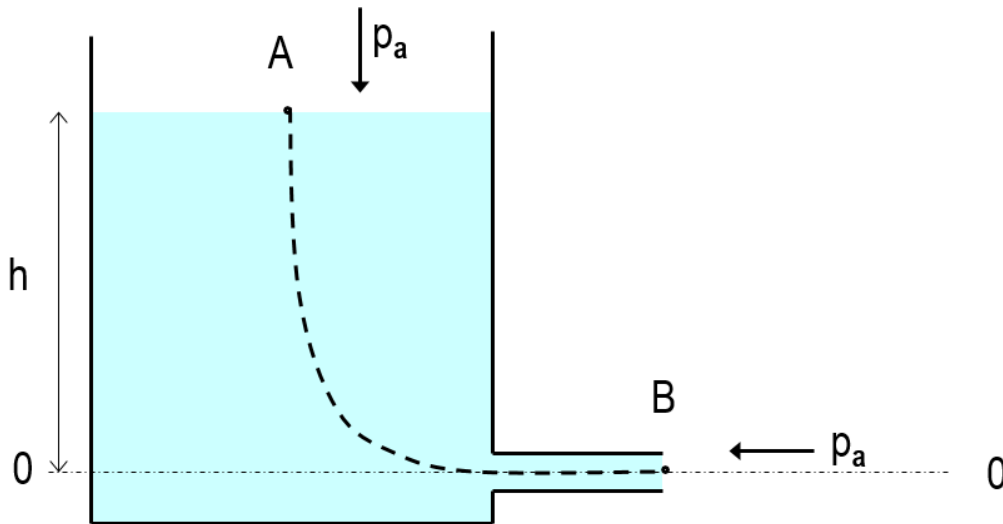
Израз за брзину истицања, према томе, гласи [3]:

$$v = \Sigma B_i \rho^0 g^{1/2} H^{1/2} = (gH)^{1/2} \Sigma B_i = K \sqrt{gH}, \quad (2.6)$$

где је $K = \Sigma B_i$ константа. Ова константа не може да се одреди методом димензијске анализе. Као што се види, брзина истицања кроз мали отвор не зависи од густине течности и сразмерна је квадратном корену из висине H . Из физике се зна да је $K = \sqrt{2}$, те, коначно, израз за брзину истицања кроз мали отвор заобљених ивица гласи [3]:

$$v = v_t = \sqrt{2gH}. \quad (2.7)$$

Овај израз представља познату Торичелијеву (Torricelli) формулу.



Слика 2.4. Истицање течности кроз мали отвор [4]

Уколико је H константно, онда Бернулијева једначина за тачке А и В даје [4]:

$$\frac{p_a}{\rho g} + \frac{v_A^2}{2g} + H = \frac{p_a}{\rho g} + \frac{v_B^2}{2g} + 0. \quad (2.8)$$

Ако је отвор мален, онда је $v_A \approx 0$, па се ово своди на $v_B = \sqrt{2gh}$, где је v_B брзина пада са висине H .

Стварна брзина истицања је мања због губитака на излазном отвору [4]:

$$\Delta h_g = \zeta \frac{v_B^2}{2g}, \quad (2.9)$$

па Бернулијева једначина постаје [4]:

$$\frac{v_A^2}{2g} + h = \frac{v_B^2}{2g} + \Delta h_g, \quad (2.10)$$

са решењем [4]:

$$v_B = \sqrt{\frac{2gh}{1+\zeta}}. \quad (2.11)$$

Ако се излазни уређај састоји само од отвора на посуди, сви губици долазе од њега и описују се коефицијентом смањења брзине [4]:

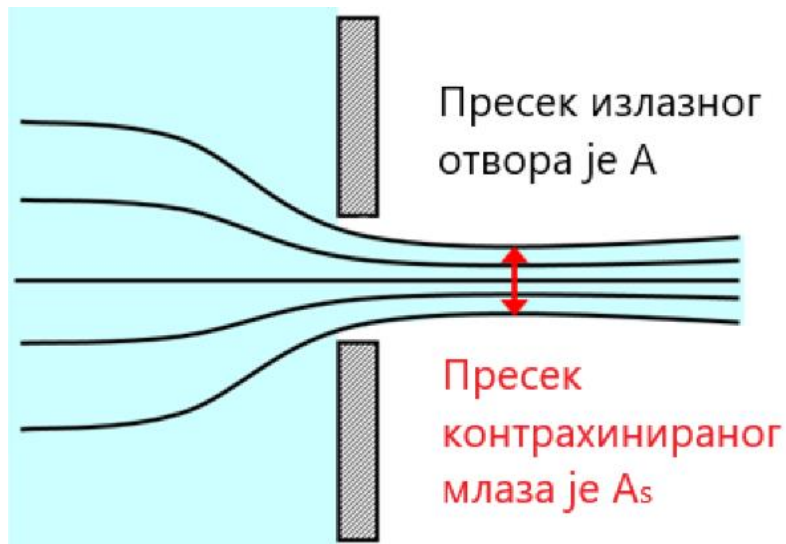
$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{1+\zeta}}, \quad (2.12)$$

па израз за брзину постаје [4]:

$$v_B = \varphi v_{Torr}. \quad (2.13)$$

φ се одређује експериментално, а правилним заобљењем рубова достиже се $\varphi = 0.98$.

На слици 2.5 приказан је пресек отвора.



Слика 2.5. Пресек излазног отвора [4]

Коефицијент протока износи [4]:

$$\mu = \frac{A_s}{A}, \quad (2.14)$$

па је проток кроз отвор [4]:

$$Q = vA = \varphi v_{Torr} \mu A. \quad (2.15)$$

Уводи се коефицијент истицања [4]:

$$\alpha = \varphi \mu, \quad (2.16)$$

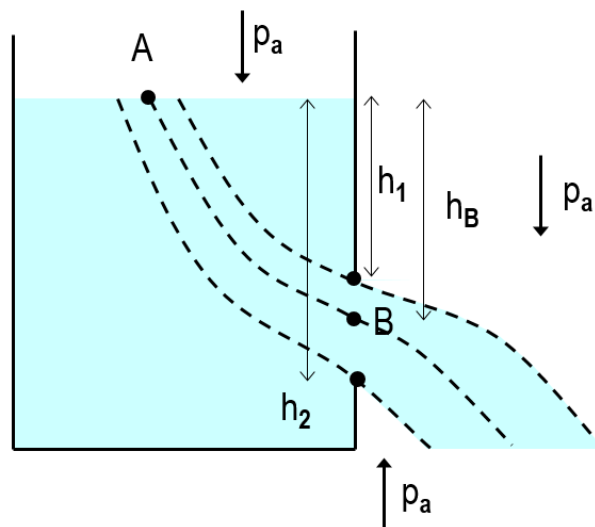
па израз за проток постаје [4]:

$$Q = vA = \alpha A \sqrt{2gh}. \quad (2.17)$$

Предност је то што се коефицијент истицања може директно експериментално мерити преко протока, на пример за округли отвор оштрих ивица је $\varphi = 0.61$.

2.1.3 Истицање течности кроз велики отвор

На слици 2.6 приказано је истицање течности у атмосферу кроз велики отвор [4].



Слика 2.6. Истицање течности кроз велики отвор [4]

Бернулијева једначина од А до В (уз $v_A \approx 0$ и $p_B \approx p_A$) даје [4]:

$$v_B \approx \sqrt{2gh}. \quad (2.18)$$

Ово није сасвим тачно јер је струјница закривљена, па постоји допринос центрифугалне компоненте притиска.

Истовремено, за тачке 1 и 2 на крајевима отвора следи да је [4]:

$$v_1 = \sqrt{2gh_1} \text{ и} \quad (2.19)$$

$$v_2 = \sqrt{2gh_2}, \quad (2.20)$$

наравно, како је $h_2 > h_1$ и $v_2 > v_1$ проток се мора наћи интеграцијом преко површине отвора. Ради једноставности узима се да је отвор правоугаоног пресека, ширине b , па је [4]:

$$dQ = \mu b \sqrt{2gh} dh, \quad (2.21)$$

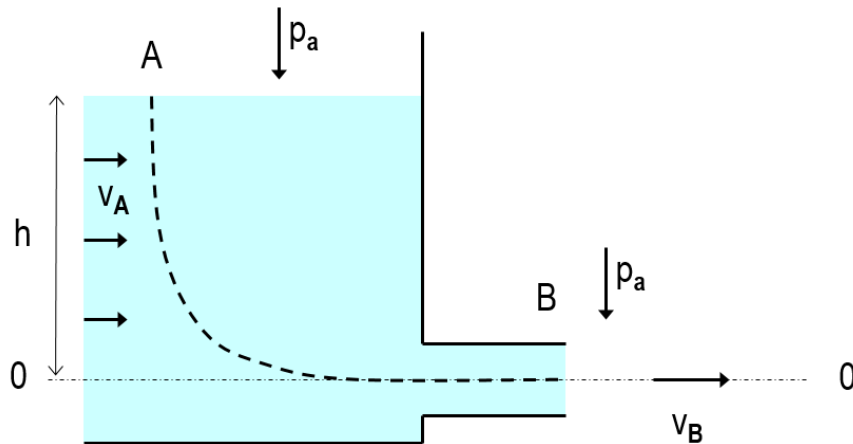
$$Q = \int_{h_1}^{h_2} dQ, \quad (2.22)$$

Интеграција као коначни резултат даје следећи израз [4]:

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} (h_2^{3/2} - h_1^{3/2}). \quad (2.23)$$

2.1.4 Истицање течности кроз отвор пред којим течност не мирује

Слика 2.7 приказује истицање течности у атмосферу кроз отвор пред којим течност не мирује [4].



Слика 2.7. Истицање кроз отвор пред којим течност не мирује [4]

Брзина v_A се не може занемарити, па Бернулијева једначина постаје [4]:

$$\frac{p_a}{\rho g} + \frac{v_A^2}{2g} + h = \frac{p_a}{\rho g} + \frac{v_B^2}{2g} + 0, \quad (2.24)$$

са решењем [4]:

$$v_B = \sqrt{2gh + v_A^2}, \quad (2.25)$$

Код великог отвора проток се опет налази интеграљењем. На пример, за правоугаони отвор следи да је [4]:

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} \left[\left(h_2 + \frac{v_A^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(h_1 + \frac{v_A^2}{2g} \right)^{3/2} \right], \quad (2.26)$$

односно за прелив [4]:

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} \left[\left(h + \frac{v_A^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{v_A^2}{2g} \right)^{3/2} \right]. \quad (2.27)$$

2.2 Хидростатика

Хидростатички притисак p је притисак у течности који узрокује тежина. Зависи само од висине нивоа течности изнад места мерења h и густине течности ρ [5]:

$$p = \rho gh. \quad (2.28)$$

Притисак F на хоризонтално дно посуде зависи само од хидростатичког притиска p и од површине дна A [5]:

$$F = pA = \rho ghA. \quad (2.29)$$

Тај притисак, међутим, не зависи од облика посуде (хидростатички парадокс).

Паскалов закон

Спољашњи притисак шири се по течности несмањено и једнако у свим смеровима. Притисак p на дно посуде у којој је изнад површине течности (висине h и густине ρ) притисак p_0 износи [5]:

$$p = p_0 + \rho gh. \quad (2.30)$$

Ваздушни притисак p_a на површини течности проузрокује у течности стварни притисак који је већи од хидростатичког и износи $p = p_a + \rho gh$. При прорачунавању посуда с обзиром на притисак течности, ваздушни притисак у течности се не узима у обзир јер он делује и са друге стране зида посуде, па се деловања, у односу на зидове, међусобно поништавају.

2.3 Хидродинамика

Проматрано стационарно струјање је оно, при којем брзина у одређеној тачки не мења с временом ни величину ни смер. Ламинарно струјање је оно, при којем се честицегибају у бесконачно танким слојевима, што се клижу један по другоме без мешања, а турбулентно струјање је оно, при којем се честицегибају неправилно у свим смеровима [5].

У обзир се узима само њихово просечногибање у смеру струјања.

Једначина континуитета гласи да је проток масе $q_m = konst.$, што се може изразити пресеком A , брзином v и густином ρ : $q_m = Av\rho = konst.$

За нестишљиве флуиде, за које важи да је $\rho = konst.$, запремински проток је $q_v = konst.$, $q_v = Av = konst.$

Бернулијева једначина за стационарно струјање идеалног нестишљивог флуида (без трења) гласи, да је сума свих енергија (положајне + од притиска + брзине) у сваком пресеку (на свакој струјници) константа. Бернулијева једначина се може изразити (за два посматрана пресека 1 и 2):

- специфичном енергијом с обзиром на јединицу масе [5]:

$$z_1 g + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = z_2 g + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} = Y = konst., \quad (2.31)$$

- притиском (енергијом за јединицу запремине) [5]:

$$z_1 \rho g + p_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} = z_2 \rho g + p_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} = p = konst., \quad (2.32)$$

- манометарском висином (енергијом за јединицу тежине) [5]:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = H = konst.. \quad (2.33)$$

Бернулијева једначина за стационарно струјање реалног флуида узима у обзир губитке (од пресека 1 до 2), који се изражавају губитком притиска Δp_t [5]:

$$z_1 \rho g + p_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} = z_2 \rho g + p_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} + \Delta p_t, \quad (2.34)$$

или губитком манометарске висине Δh_t [5]:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h_t. \quad (2.35)$$

У тим су једначинама: z_i - геодетска висина над по вољи одабраним хотизонтом, $p_i = h_i \rho g$ - статички притисак у флуиду (где је h_i - манометарска висина), ρ - густина и v_i - брзина струјања. Губитак притиска Δp_t или манометарске висине Δh_t рачуна се помоћу Дарсу-јеве формуле.

2.3.1 Брзина истицања

Теоретска брзина истицања кроз мали отвор из посуде у којој је стални ниво течности висине h изнад излаза (Торricelli-јева формула) је [5]:

$$v_0 = \sqrt{2gh}, \quad (2.36)$$

где је g убрзање силе земљине теже.

Због трења у млазу и отвору стварна брзина биће мања $v = \varphi v_0$.

За добро заобљене отворе коефицијент брзине је $\varphi = 0.95 \dots 0.99$.

Количина истицања:

- Количина истицања кроз отвор пресека A изражена протоком масе q_m износи $q_m = Av\rho$, где је v излазна брзина и ρ густина флуида.

Због контракције млаза μ и узимајући у обзир коефицијент брзине φ добија се [5]:

$$q_m = \alpha A v_0 \rho, \quad (2.37)$$

где је α коефицијент истицања који здружује коефицијенте контракције и брзине [5]:

$$\alpha = \mu \varphi. \quad (2.38)$$

При истицању течности из посуде важи [5]:

$$q_m = \alpha A \rho \sqrt{2gh}. \quad (2.39)$$

- Количина истицања кроз отвор пресека A изражена запреминским протоком флуида q_v износи [5]:

$$q_v = \frac{q_m}{\rho} = \alpha A v_0. \quad (2.40)$$

2.3.2 Проток

За одређивање протока кроз цевовод служе: пригушнице, сапнице (млазнице) и Вентуријеве сапнице (горе-краћи, доле-дужи облик) [5].

Уколико флуид густине ρ протиче кроз најужи отвор пресека А, настаће пад притиска Δp . Проток се изражава:

- протоком масе $q_m = \alpha A \sqrt{2\rho \Delta p}$ и
- запреминским протоком $q_v = \alpha A \sqrt{2\Delta p / \rho}$.

Коефицијент протицања α одређен је за сваку врсту мерног уређаја у зависности од односа $m = (d/D)^2$, где је D пречник цеви, а d пречник отвора протицања у којем је пресек $A = d^2\pi/4$.

Губитак притиска у пригушници, односно сапници Δp_t зависи од односа m (табела 2.1).

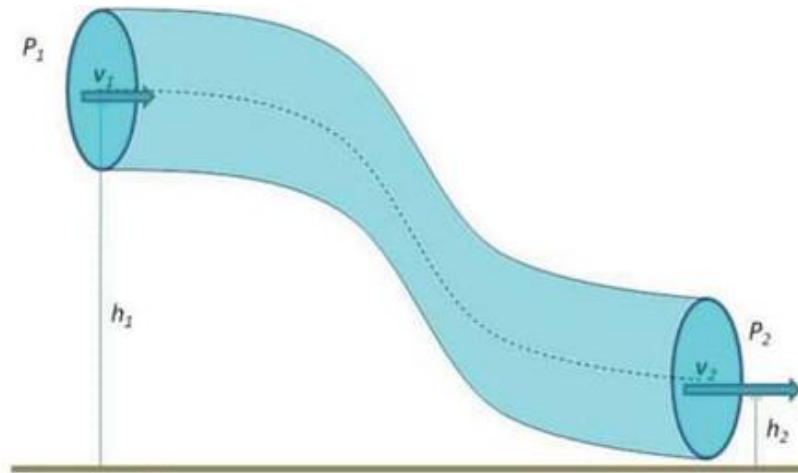
Табела 2.1. Коефицијент протицања α у зависности од односа m [5]

$m = (d/D)^2$	Коефицијент α за		
	Пригушнице	Сапнице (млазнице)	Вентуријеве сапнице
0.05	0.598	-	-
0.10	0.602	0.989	0.989
0.15	0.608	0.993	0.994
0.20	0.615	0.999	1.001
0.25	0.624	1.005	1.010
0.30	0.634	1.015	1.020
0.35	0.645	1.029	1.032
0.40	0.660	1.043	1.048
0.45	0.676	1.060	1.067
0.50	0.695	1.081	1.091
0.55	0.716	1.108	1.120
0.60	0.740	1.142	1.155
0.65	0.768	1.183	-
Δp_t	$(1 - m)\Delta p$	$(1 - m)/(1 + m)\Delta p$	$\approx 0.1\Delta p$

2.4 Бернулијева једначина

Бернулијева једначина је једна од основних математичких дефиниција, у делу физике, која се зове динамика флуида. Она описује Бернулијев принцип, односно дефинише међусобну везу између притиска или потенцијалне енергије флуида и његове брзине или његове кинетичке енергије, у струјној цеви (струјном пољу) [6].

На слици 2.8 дат је пример једноставног протока цеви. Како вода губи висину од горњег краја цеви до доњег краја, она добија брзину. Да би се пронашла тачна вредност било којег параметра, примењује се Бернулијева једначина на две тачке било где дуж истог тока (представљено испрекиданом линијом).



Слика 2.8. Проток цеви [6]

Бернулијева једначина каже да за идеалну течност (тј. нулту вискозност, константну густину и сталан проток), збир њене кинетичке, потенцијалне и топлотне енергије не сме да се мења. Ово ограничење доводи до предвидљивог односа између брзине течности, његовог притиска и надморске висине (релативне висине).

Бернулијева једначина је важан израз који се односи на притисак, висину и брзину течности у једној тачки дуж његовог протока. Однос између ових течних стања дуж струје увек је једнак истој константи дуж те струје у идеализованом систему. Идеализовани систем односи се на течност која има константну густину и нулту вискозност.

Бернулијева једначина стриктно вреди за нестишљиве и невискозне флуиде. Проматрају се законитости кретања флуида кроз цеви којима се мења проток, те које мењају висину [7].

Разматра се цев којој се крајеви различитих попречних пресека A_1 и A_2 налазе на различитим висинама h_1 и h_2 (слика 2.8). Флуид у тој цеви протиче са лева на десно. Након времена t леви крај флуида померио се за s_1 , а десни за s_2 . Уколико се упореде почетно и коначно стање види се да се на средњем делу није догодила никаква промена и да се целокупна промена може приписати елементима флуида 1 и 2, на почетку и на крају дела који се крећу брзинама v_1 и v_2 .

Због нестишљивости, оба дела флуида имају једнаку масу [7]:

$$m_1 = m_2 = m = \rho V. \quad (2.41)$$

Промена потенцијалне енергије је [7]:

$$\Delta E_p = m_2 g h_2 - m_1 g h_1, \quad (2.42)$$

$$\Delta E_p = \rho V g h_2 - \rho V g h_1. \quad (2.43)$$

Промена кинетичке енергије је [7]:

$$\Delta E_k = \frac{m_2 v_2^2}{2} - \frac{m_1 v_1^2}{2}, \quad (2.44)$$

$$\Delta E_k = \frac{\rho V v_2^2}{2} - \frac{\rho V v_1^2}{2}. \quad (2.45)$$

Укупна промена механичке енергије је [7]:

$$\Delta E = \Delta E_p + \Delta E_k. \quad (2.46)$$

Да би се флуид померио на њега треба деловати силама $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, тј. притисцима на оба краја. Силе $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ имају супротне смерове.

Потребно је израчунати рад који течност обавља на разматраном сегменту. Током времена t леви крај течности флуида пређе пут s_1 , дужине $v_1 t$. Притом сила F_1 обави рад [7]:

$$W_1 = F_1 \cdot s_1. \quad (2.47)$$

Током истог времена десни крај флуида пређе пут s_2 , дужине $v_2 t$. На тај флуид делује сила F_2 у смеру супротном од смера кретања. Зато је рад те силе негативан [7]:

$$W_2 = -F_2 \cdot s_2. \quad (2.48)$$

Према томе обављени рад износи [7]:

$$W = W_1 + W_2, \quad (2.49)$$

$$W = F_1 s_1 - F_2 s_2. \quad (2.50)$$

Сила F_1 , којом течност делује на пресек A_1 једнака је производу притиска p_1 и пресека A_1 [7]:

$$F_1 = p_1 \cdot A_1. \quad (2.51)$$

Сила F_2 , којом течност делује на пресек A_2 износи [7]:

$$F_2 = p_2 \cdot A_2. \quad (2.52)$$

Убацавањем ових релација у израз (2.50), добија се [7]:

$$W = p_1 A_1 s_1 + p_2 A_2 s_2. \quad (2.53)$$

Зна се да је запремина V једнака производу пресека A и пута s па се израз (2.53) може записати као [7]:

$$W = p_1 V_1 + p_2 V_2. \quad (2.54)$$

Због нестишљивости обе запремине су једнаке [7]:

$$V = V_1 = V_2. \quad (2.55)$$

па се једначина (2.55) записује као [7]:

$$W = (p_1 - p_2)V. \quad (2.56)$$

Према закону о очувању енергије, рад који је околна течност обавила у посматраном сегменту у временским интервалима једнак је укупној промени кинетичке и потенцијалне енергије на том делу [7]:

$$W = \Delta E_k + \Delta E_p. \quad (2.57)$$

Увођењем израза (2.42), (2.43), (2.44), (2.45) и (2.56) у израз (2.57) добија се [7]:

$$(p_1 - p_2)V = \rho V g h_2 - \rho V g h_1 + \frac{\rho V v_2^2}{2} - \frac{\rho V v_1^2}{2}. \quad (2.58)$$

Овај израз се дели запремином V , што даје [7]:

$$p_1 + \rho g h_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \rho g h_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}. \quad (2.59)$$

Овај израз представља Бернулијеву једначину.

Исто се добија и за елементе флуида на неким другим местима у цеви, па се може закључити да у сваком делу цеви важи да је [7]:

$$p + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2} = konst. \quad (2.60)$$

Поделивши рад и енергију са запремином добијају се три члана, од којих сваки представља неки од притисака у течности. Притисак p је притисак спољашњих сила, тзв. статички притисак. Притисак $p_h = \rho gh$ је динамички притисак који настаје услед тежине самог флуида, а познат је и као хидростатски притисак. Члан $\frac{1}{2}\rho v^2$ се зове динамички притисак, који постоји само ако се флуид креће. Збир ова три притиска, односно укупан притисак, приликом кретања остаје сталан, а Бернулијева једначина произлази као последица закона очувања енергије.

2.5 Цевни проблеми - облик са губицима

Струјање реалног флуида прате губици. Теоријска анализа струјања реалног флуида заснива се на Навије-Стоксовој једначини. Вискозне силе које се јављају при струјању кроз цевоводе у практичним задацима представљају се члановима који у себи садрже губитке енергије [8].

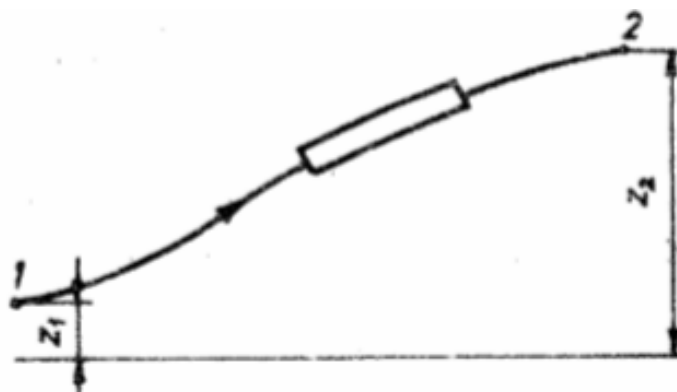
Губици енергије се деле на:

- локалне и
- губитке услед трења.

Ови чланови са губицима енергије представљају се у процентима кинетичке енергије. За локалне губитке члан губитка представљен је производом коефицијента локалног губитака ζ и динамичког притиска $\rho v^2/2$ за цевни пресек непосредно испред локалног отпора. За губитке услед трења, члан губитака представља се као $\lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2}$, где су λ коефицијент трења, l дужина цевне деонице и d унутрашњи пресек цеви.

Локални губици јављају се при промени вектора брзине. Карактеристична места где се јављају локални губици су: колена, вентили, засуни, бленде, нагла проширења и сужења, усисне корпе, рачве и др.

Део укупне флуидне енергије у пресеку 1 (слика 2.9) троши се на савладавање губитака који се јављају при струјању на путу до пресека 2. Због тога је укупна енергија у пресеку 2 мања од енергије у пресеку 1, за вредност губитака.



Слика 2.9. Примена Бернулијеве једначине са губицима на цевовод са променљивим цевним пресеком [8]

Изгубљена енергија (губици) $h_i g$ у Бернулијевој једначини уноси се са десне стране [8]:

$$\frac{p_1}{\rho} + \alpha \frac{v_1^2}{2} + g z_1 = \frac{p_2}{\rho} + \alpha \frac{v_2^2}{2} + g z_2 + h_i g. \quad (2.61)$$

Локални губици могу да се распореде у неколико група:

- проширења,
- сужења,
- кривине,
- рачве и
- цевне арматуре.

2.5.1 Проширења

Пад притиска и коефицијент локалног губитка дати су следећим изразима [8]:

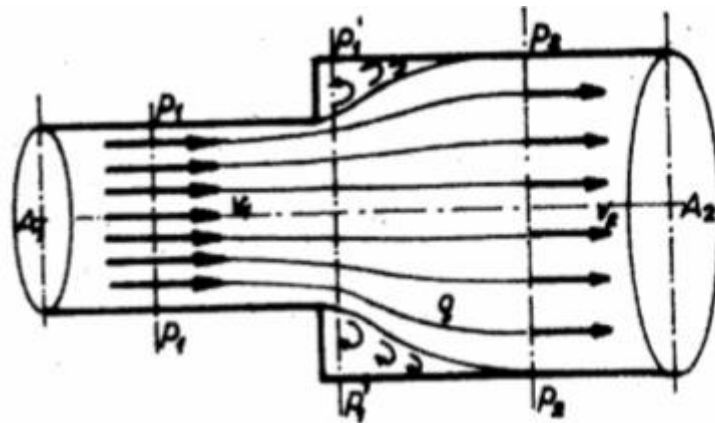
$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (v_1 - v_2)^2, \quad (2.62)$$

$$\xi = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho v_1^2} = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2. \quad (2.63)$$

Испитивања су показала да притисак у вртложној зони p'_1 није једнак притиску у улазној деоници p_1 , па се због тога уводи корекциони фактор C , те је кориговани коефицијент губитка (слика 2.10) [8]:

$$\xi = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho v_1^2} = C \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2, \quad (2.64)$$

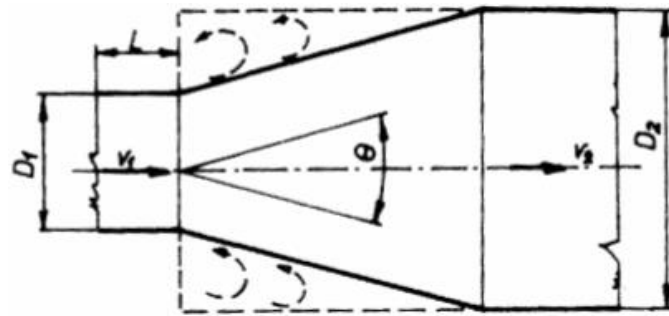
где је C незнатно веће од 1, а изгубљена снага услед наглог проширења дата је са $P = \Delta p Q$.



Слика 2.10. Нагло проширење [8]

2.5.1.1 Дифузор

Употребом дифузора (слика 2.11) смањује се губитак у односу на нагло проширење.

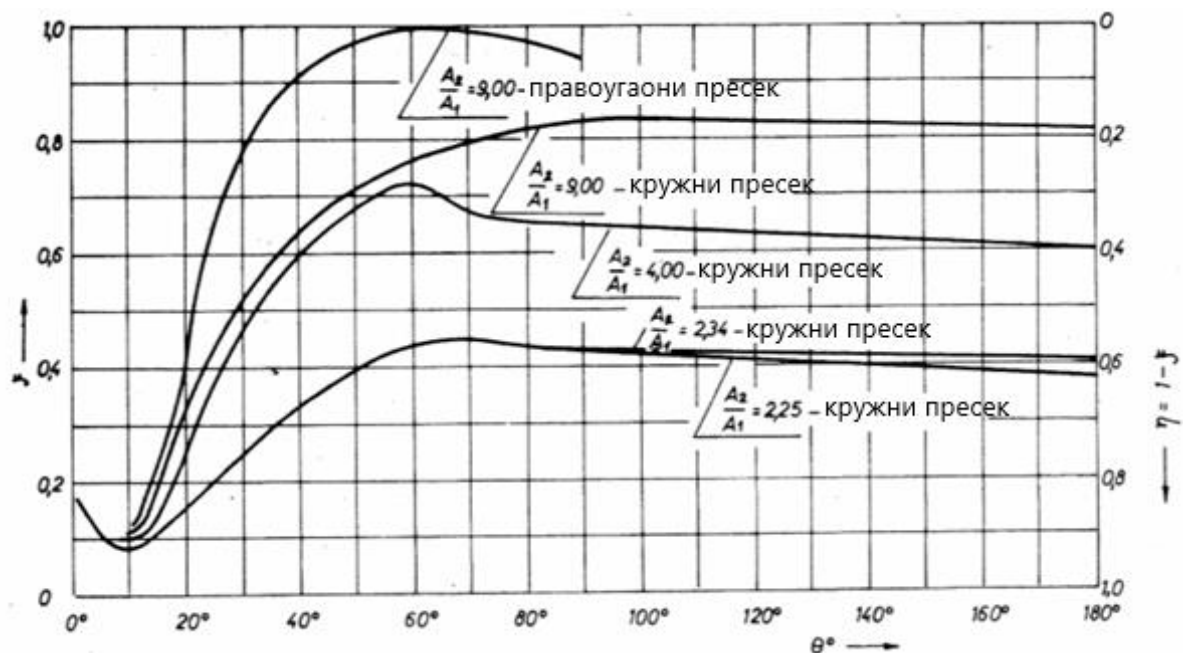


Слика 2.11. Дифузор

Експерименти су показали да је коефицијент губитка функција угла θ и односа површина A_2/A_1 [8]:

$$\xi = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_2^2)} = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho v_1^2 \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2\right)}. \quad (2.65)$$

Његова вредност и вредност степена искоришћења дифузора ($\eta = 1 - \xi$) дате су на слици 2.12. Степен искоришћења показује колико се енергије сачувало после дифузора.

Слика 2.12. Коефицијент губитка ξ и степен корисности η дифузора [8]

Испитивања су показала да је:

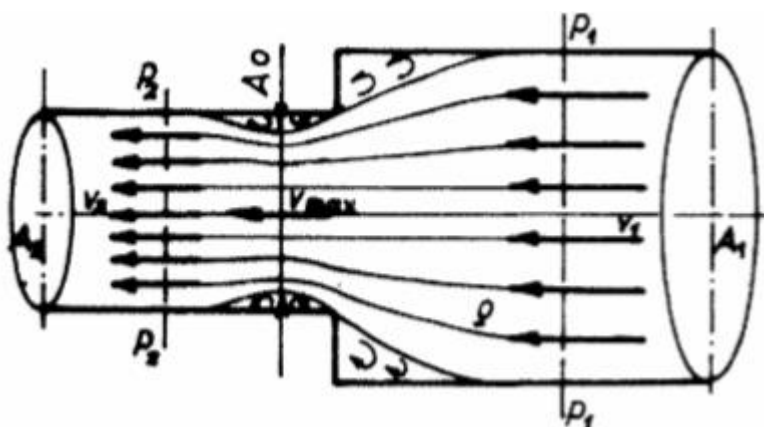
- угао проширења, који даје најбољи коефицијент корисности, око 6° - 8° за цеви кружног пресека, 6° за цеви квадратног пресека и 11° за правоугаоне цеви,
- за задати однос A_2/A_1 , дифузор са кружним пресеком и квадратним наставком даје најбоље η ,
- дужина цеви пре дифузора треба да буде што је могуће краћа. У извесној граници η је функција производа θ и l/D_1 , где је l/D_1 - „ефективна улазна дужина“,
- дужина цеви иза дифузора побољшава η , а дужина излазне цеви треба да буде 4-6 пута већа од већег пречника D .

У пракси се дифузор најчешће користи за трансформацију кинетичке енергије у енергију притиска. Када је дифузор постављен на крају цевовода, а на улазу у резервоар, треба очекивати повећање протока, због смањења излазног губитка.

2.5.2 Сужења

2.5.2.1 Нагло сужење

При струјању флуида кроз нагло сужење проточна површина се смањује као што је приказано на слици 2.13. Струјањем низводно од сужења, тј. кроз најмањи пресек струја се постепено шири да би најзад у потпуности испунила пресек. Вртлози који се стварају између зидова цеви и граничних струјница, користе струјну енергију која их држи у ротацији.



Слика 2.13. Нагло сужење [8]

Занемарујући губитке кроз сужени део, губитак у проширеној деоници, који је много већи је [8]:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (v_{max} - v_2)^2 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 \left(\frac{A_2}{A_0} - 1 \right)^2, \quad (2.66)$$

односно:

$$\xi = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho v_2^2} = \left(\frac{A_2}{A_0} - 1 \right)^2. \quad (2.67)$$

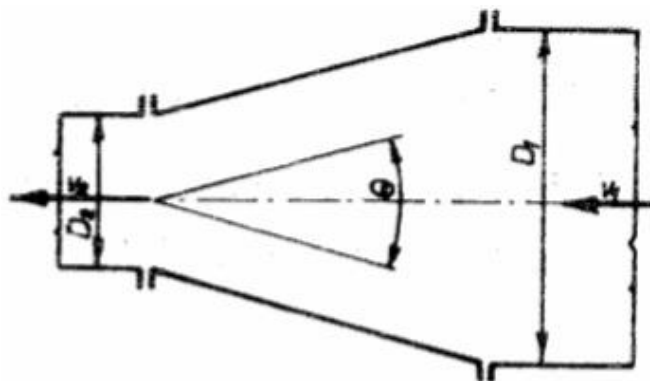
Количник A_2/A_0 зависи од A_2/A_1 , па је коефицијент губитка ζ у функцији од A_2/A_1 . Неке вредности за ζ дате су у табели 2.2.

Табела 2.2. Вредности ζ за нагла сужења [8]

A_2/A_1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
ζ	0,34	0,27	0,16	0,05	0

2.5.2.2 Млазник

Постепено сужење (слика 2.14), у нормално изведеним конструкцијама, одликује се малим коефицијентом губитка ζ .



Слика 2.14. Млазник [8]

Губитак се везује за брзину v^2 , тј. [8]:

$$\Delta p = \xi \rho \frac{v^2}{2}. \quad (2.68)$$

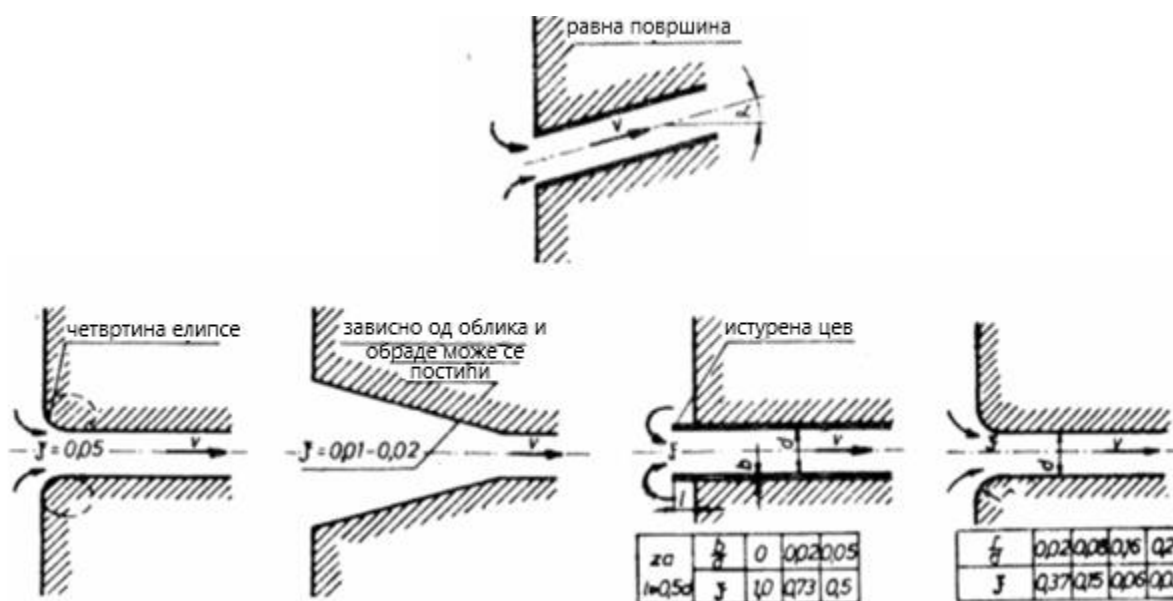
У табели 2.3 дати су експериментални подаци за ζ у функцији угла θ и односа улазног и излазног пречника.

Табела 2.3. Вредности ζ за млазнике [8]

за $\frac{D_1}{D_2} = 1,2$	$\theta [^\circ]$	10	20	30	40
	ζ	0,04	0,05	0,07	0,08
за $\frac{D_1}{D_2} = 2$	$\theta [^\circ]$	10	20	30	40
	ζ	0,07	0,08	0,12	0,14
за $\frac{D_1}{D_2} = 3$	$\theta [^\circ]$	10	20	30	40
	ζ	0,08	0,10	0,14	0,17

2.5.3 Улазни губитак

Улазни губици су мањи уколико је улаз подешен тако да је блажа промена струјнице. На слици 2.15 дате су вредности коефицијента губитака ζ за неке врсте цевних улаза.

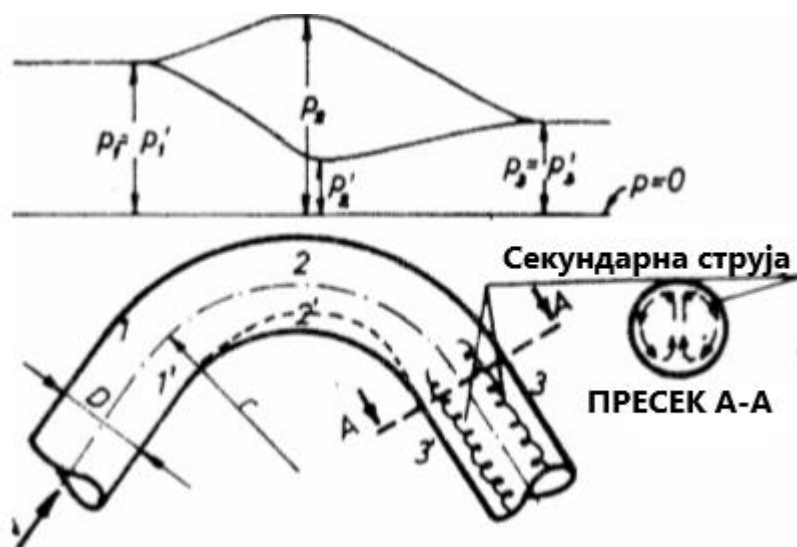


Слика 2.15. Различите врсте цевних улаза [8]

Треба избегавати усвајање наглог сужења за улаз у ценоводе, а уместо тога практиковати заобљене прелазе. Постепено сужавајућим, добро обрађеним пресеком могуће је највише смањити улазни губитак.

2.5.4 Кривине - колено

Губици у коленима већи су од губитака у правим цевима исте дужине. Ти додатни губици проузроковани су повећаном турбуленцијом која је последица промене смера струјања. Промена струјања изазива повећање притиска на спољашњој страни кривине и смањење притиска на унутрашњој. Због тога се нарушава профил брзине и центрифугалне силе изазивају секундарно струјање као што је приказано на слици 2.16. Струја флуида напута колено крећући се у дуплој спирали која нестаје тек у доста удаљеном низводном пресеку. Међутим, подразумева се да је пун ефекат губитка концентрисан на колено.

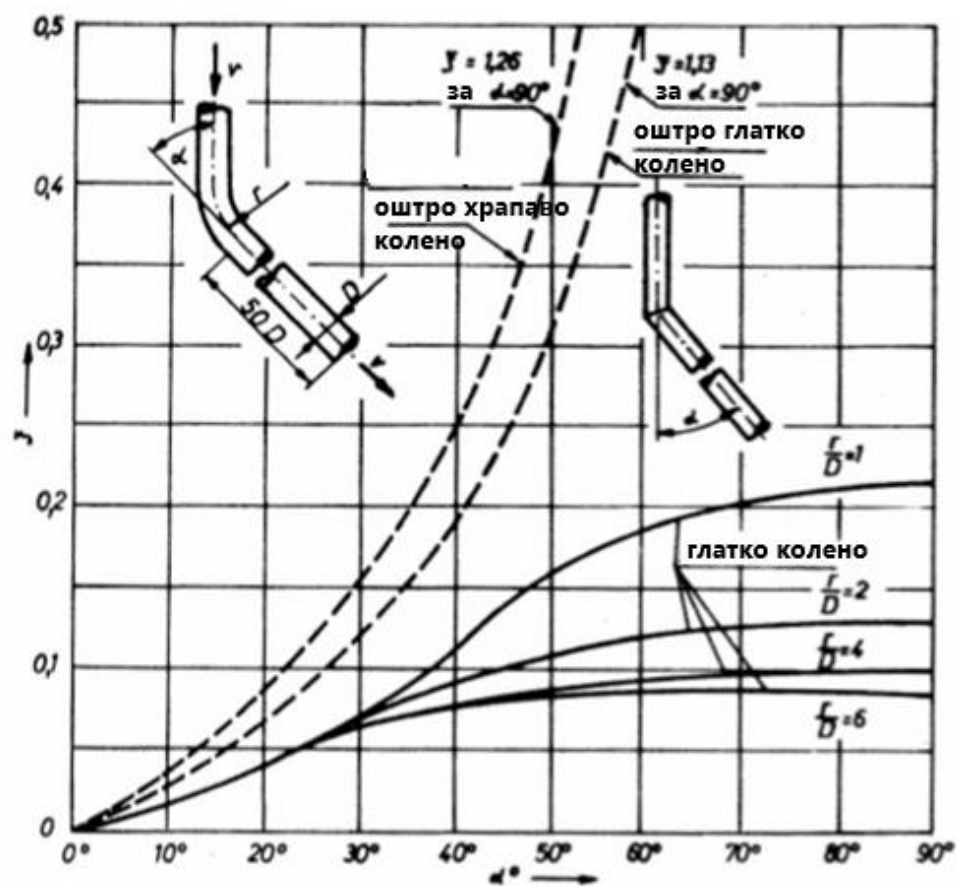


Слика 2.16. Струјна слика и распоред притиска у колени [8]

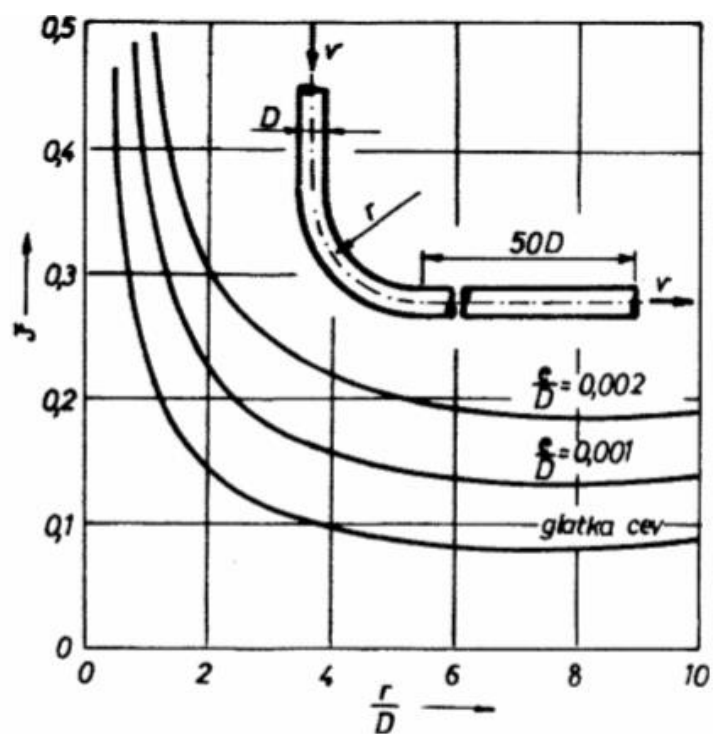
Коефицијент губитка дефинише се као [8]:

$$\xi = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho v^2}, \quad (2.69)$$

и зависи од односа r/D , а не зависи од Re . На следећим дијаграмима дате су вредности коефицијента губитка ξ за колено до 90° и оштро колено до 90° (слика 2.17), као и за колено од 90° (слика 2.18).



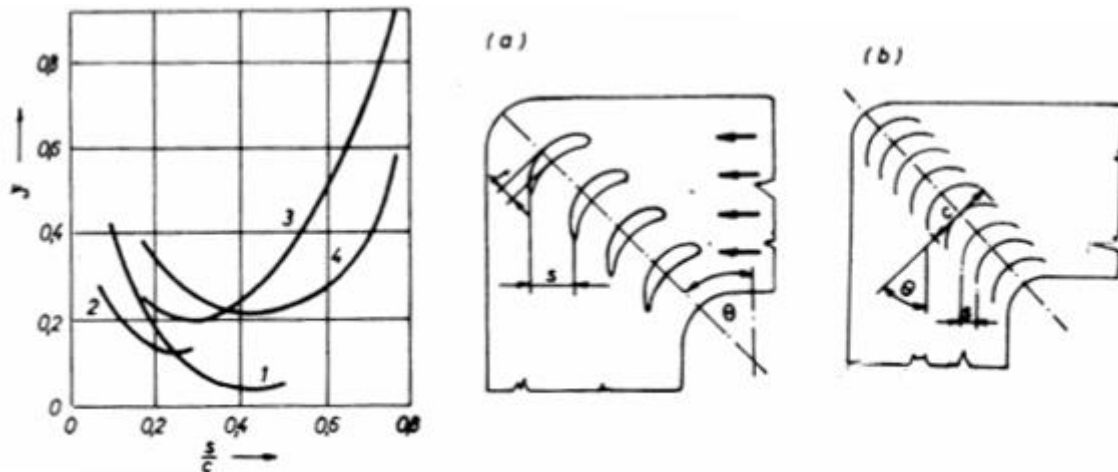
Слика 2.17. Коефицијент губитка ζ за колено до 90° и оштро колено до 90° у зависности од односа r/D [8]



Слика 2.18. Коефицијент губитка ζ за колено од 90° у зависности од односа r/D и релативне храпавости e/D [8]

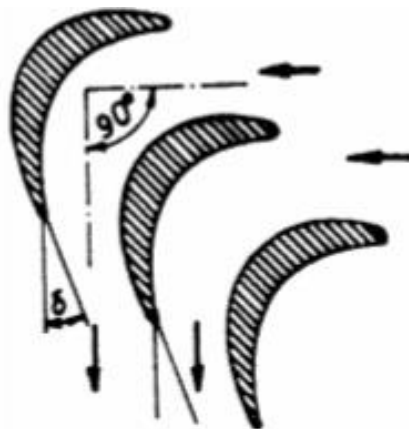
Цевне кривине мање од 90° имају мањи коефицијент губитка ζ (слика 2.17). Међутим, да би се коефицијент губитка ζ знатније смањио, угао α мора бити мањи од 45° . За веће односе r/D је занамарљив губитак проузрокован одлепљивањем струје, али је испољен губитак услед појаве секундарне спиралне струје, тако да се са порастом угла α постепено повећава губитак. Нпр. коефицијент губитка за колено од 180° само је за око 50 % већи од истог коефицијента за колено од 90° .

Уградњом скретних лопатица у оштро колено губици се знатно смањују. На следећем дијаграму (слика 2.19) дати су коефицијенти губитака ζ за разне врсте скретних лопатица.



Слика 2.19. Коефицијент губитка ζ за оштро колено од 90° са скретним лопатицама у зависности од облика скретних лопатица – крива 1 лопатице облика аеропрофила а); криве 2, 3 и 4 кружни лук различитог облика б) и односа s/c [8]

Да би се флуидна струја скренула тачно за 90° , потребно је лопатице савити за додатни угао δ , због ранијег одлепљивања струје (слика 2.20).



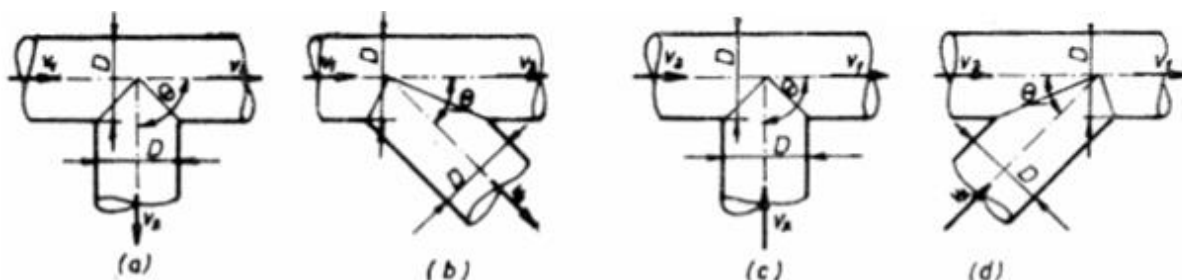
Слика 2.20. Додатно савијање лопатица у циљу постизања скретања струје за 90° [8]

2.5.5 Рачве и тројници

У табели 2.4 дати су коефицијенти губитака ζ за неке случајеве рачвања и сучељавања флуидне струје (слика 2.21). Притисци у појединим гранама једне рачве ($\theta < 90^\circ$), или тројника ($\theta = 90^\circ$), међусобно се разликују само за величину губитка који се одређује преко одговарајућег коефицијента губитка и брзине основног тока струје. Губитак у рачви може се смањити заобљивањем улазних ивица.

Табела 2.4. Коефицијент ζ за рачвање и сучељавање [8]

	v_2/v_1	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Рачвање а) $\theta = 90^\circ$	ζ_{1-2}	0,96	0,88	0,89	0,96	1,10	1,0
	ζ_{1-3}	0,05	-0,08	-0,04	0,07	0,21	0,35
Рачвање б) $\theta = 45^\circ$	ζ_{1-2}	0,90	0,66	0,47	0,33	0,29	0,35
	ζ_{1-3}	0,04	-0,06	-0,04	0,07	0,20	0,33
Сучељавање ц) $\theta = 90^\circ$	ζ_{2-1}	-1,04	-0,40	0,20	0,47	0,73	0,92
	ζ_{3-1}	0,06	0,18	0,30	0,40	0,50	0,60
Сучељавање д) $\theta = 45^\circ$	ζ_{2-1}	-0,90	-0,37	0	0,22	0,37	0,38
	ζ_{3-1}	0,05	0,17	0,18	0,05	-0,20	-0,57

**Слика 2.21.** Неки случајеви рачвања и сучељавања [8]

Пад притиска правцем струјања одређен је коефицијентом губитка ζ и брзином флуидне струје v_1 . Нпр. за случај сучељавања (ц) за $v_2/v_1 = 0.2$, пад притиска од рачве до хоризонталне цеви је негативан [8]:

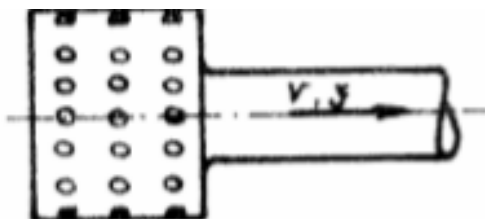
$$\Delta p_{2-1} = \zeta_{2-1} \frac{v_1^2}{2} \rho = -0.4 \frac{v_1^2}{2} \rho = -0.2 \rho v_1^2, \quad (2.70)$$

што значи да је притисак од рачве до хоризонталне цеви порастао.

2.5.6 Цевне арматуре

2.5.6.1 Усисна корпа

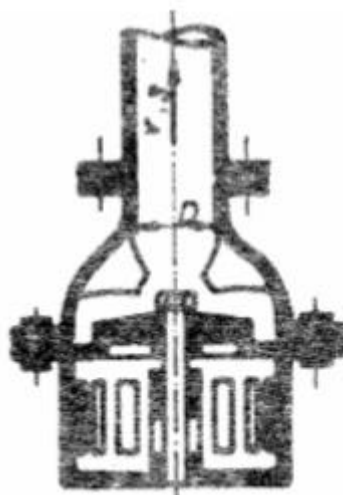
У зависности од конструкције, вредност коефицијента губитка је $\zeta = 1 \div 5$. На слици 2.22 приказана је једноставна усисна корпа.

**Слика 2.22.** Једноставна усисна корпа [8]

За усисну корпу са једносмерним вентилом, конструкције према слици 2.23, коефицијент губитка дат је у функцији пречника усисног цевовода и износи [8]:

$$\xi = \frac{2.2}{D}, \quad (2.71)$$

где је D [m].



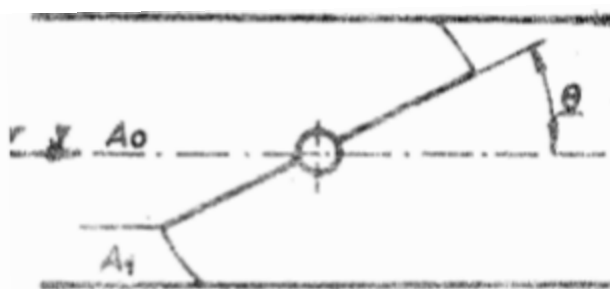
Слика 2.23. Усисна корпа са једносмерним вентилом [8]

2.5.6.2 Затварач (лептур)

Коефицијент губитка у функцији угла θ (слика 2.24) дат је табелом 2.5.

Табела 2.5. Коефицијент ζ за лептур затварач [8]

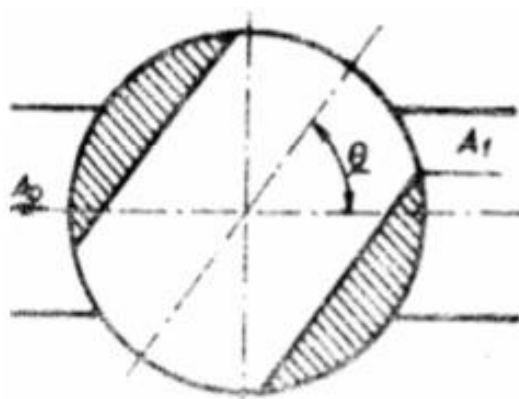
θ [°]	5	10	15	20	25	30	40	50	60	65	70	90
ξ	0,24	0,52	0,90	1,54	2,51	3,91	10,8	32,6	118	256	751	∞



Слика 2.24. Лептур затварач [8]

2.5.6.3 Славина

Коефицијент губитка у функцији угла θ и односа површина A_1/A_0 (слика 2.25), дат је табелом 2.6.



Слика 2.25. Славина [8]

Табела 2.6. Коефицијент ζ за славину [8]

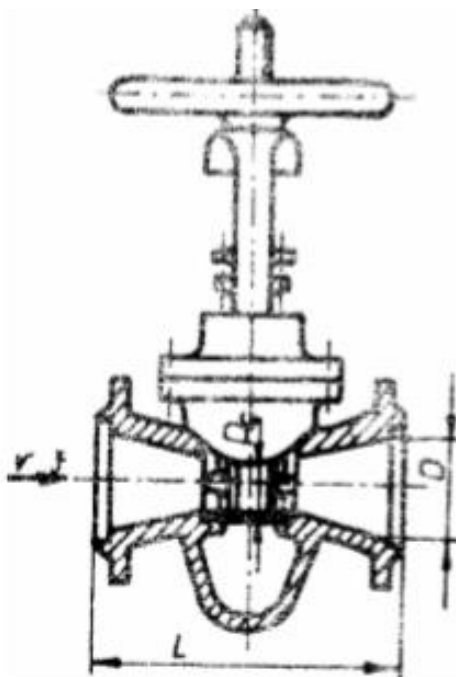
$\infty [^\circ]$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	67
$\frac{A_1}{A_2}$	0,93	0,85	0,77	0,69	0,60	0,52	0,44	0,35	0,27	0,19	0,11	0
ξ	0,05	0,31	0,88	1,84	3,45	6,15	11,2	20,7	41,0	95,3	275	∞

2.5.6.4 Засун

Коефицијент губитка за засун са симетричним језгром (слика 2.26) у зависности од геометријских карактеристика дат је у табели 2.7.

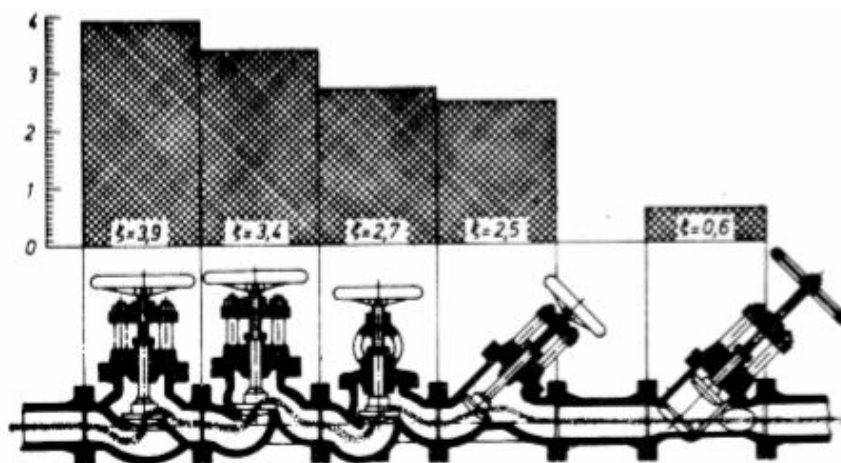
Табела 2.7. Коефицијент ζ за симетричан засун [8]

$D [mm]$	D_c/D	L/D	ξ
300	0,67	1,50	1,45
300	0,67	2,68	2,80
250	0,80	1,50	0,39
200	0,75	1,33	0,60

**Слика 2.26.** Засун са симетричним језгром [8]

2.5.6.5 Вентил

Коефицијент губитка за различито изведене конструкције вентила, дат је дијаграмски на слици 2.27.

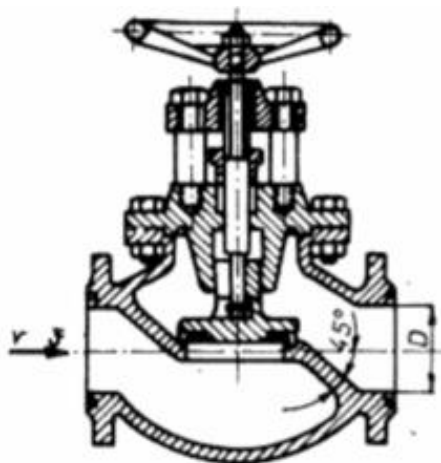


Слика 2.27. Коефицијенти губитака вентила различитих конструкција [8]

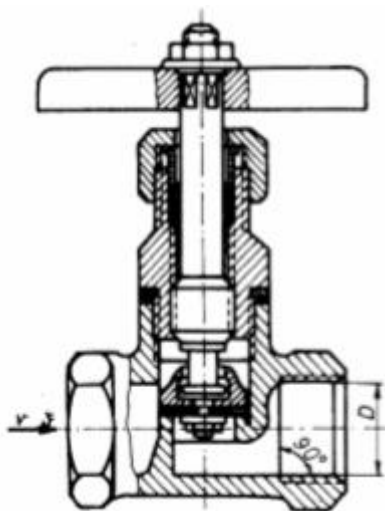
У табели 2.8 дати су коефицијенти губитака вентила са подеоним зидом од 45 и 90 степени (слике 2.28 и 2.29).

Табела 2.8. Коефицијент губитка за вентиле са подеоним зидом у зависности од називног пречника [8]

$D[mm]$	ζ – са подеоним зидом од 45°	ζ – са подеоним зидом од 90°
13	10,8	15,9
20	8,0	10,5
25	-	9,3
30	-	8,6
40	4,9	7,6
50	-	6,9
80	4,0	-
100	4,1	-
150	4,4	-
200	4,7	-
250	5,1	-
300	5,4	-
350	5,5	-



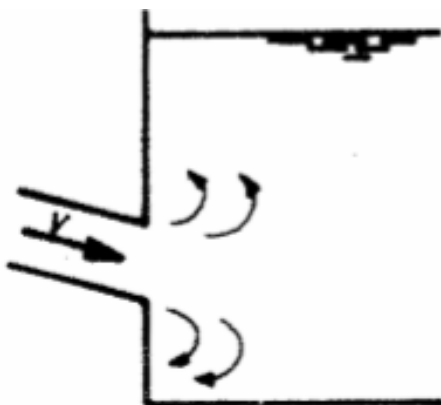
Слика 2.28. Вентил са подеоним зидом од 45° [8]



Слика 2.29. Вентил са подеоним зидом од 90° [8]

2.5.7 Излазни губитак

При истицању флуида из цеви у резервоар (слика 2.30) кинетичка енергија, коју је флуид поседовао у цеви, губи се у великим димензијама резервоара и остаје неискоришћена.



Слика 2.30. Истицање флуида из цеви у резервоар [8]

Овај губитак одређен је са [8]:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho v^2, \quad (2.72)$$

а коефицијент губитка $\zeta = 1$ - за турбулентно струјање, $\zeta = 2$ - за ламинарно струјање.

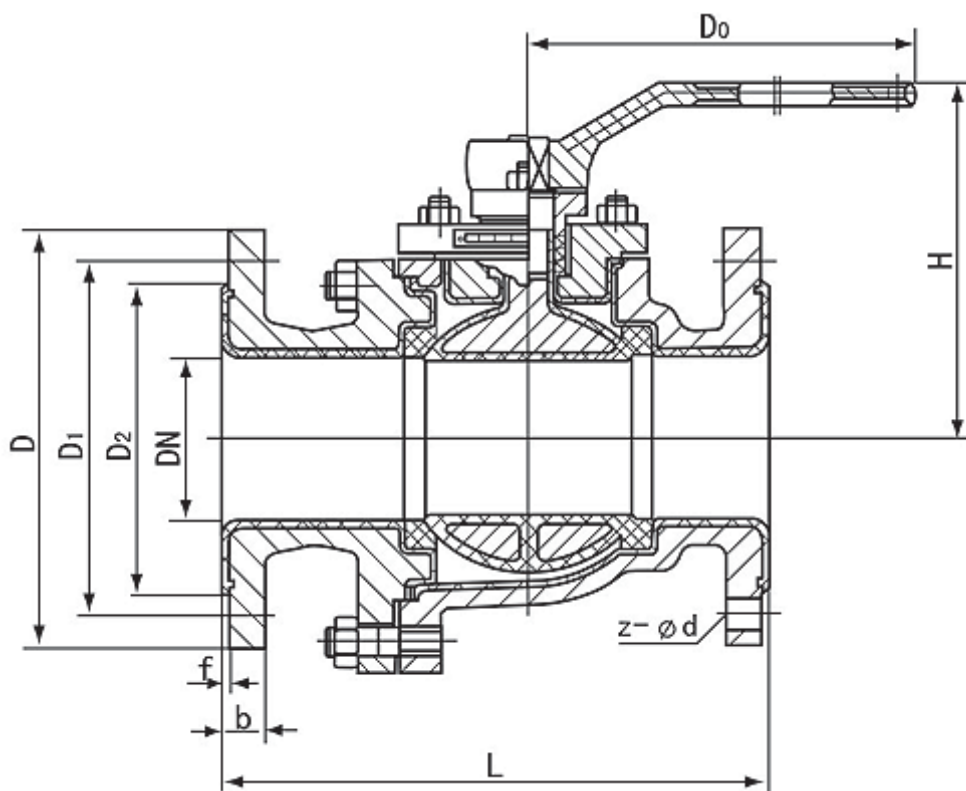
2.6 Кугла вентил

Кугла вентил (слика 2.31) је уређај који поседује сферични (лоптасти) део који служи за контролу протока флуида. Сферични део има отвор, тзв. бушотина, који се пружа кроз његову средину. Када је вентил постављен тако да се бушотина пружа дуж истог правца као и цев, тада је вентил у отвореној позицији и флуид може да тече кроз њега. Када се ротира за 90 степени, бушотина се поставља управно у односу на правац пружања цеви што значи да је вентил затворен и флуид не може да тече кроз њега [9].



Слика 2.31. Кугла вентил [9]

Кугла вентил (слика 2.32) заједно са лептир вентилом и чеп вентилом, спада у породицу вентила четвртине окрета. Кугласти вентили су познати по поузданом заптивању при ком не долази до стварања мехурића. Стога представљају одличан избор када је примењени флуид у гасном облику, јер је тада чврсто заптивање неопходно. Због могућности константног трошења на својим лежајевима, кугла вентили нису идеална опција за фино регулационе примене. Тело кугластог вентила је обично направљено од челика и може бити никловано ради дуже трајности.



Слика 2.32. Кугла вентил (пресек) [9]

Најтипичнији кугла вентил је двострани и он омогућава линеарни проток од улаза ка излазу. Троострани (слика 2.33) и четворострани кугла вентили омогућавају проток у више праваца, укључујући и проток под углом од 90 степени.



Слика 2.33. Тространи кугла вентил [9]

Постоје четири различита типа кугла вентила који се разликују по грађи тела: потпуно заварени, троделни (такође познат и као кугла вентили са улазом са стране и улазом на крају), подељеног тела, и кугла вентили са уласком на врху. Разликују се по томе како су делови вентила направљени и састављени, али принцип рада свих ових модела је исти. Сваки дизајн има своје предности. На пример, дизајн CAMERON® T31 потпуно завареног кугла вентила даје максималну снагу са минималном тежином као и максималну отпорност на притисак и оптерећење цеви. Компактни, сферични дизајн такође елиминише постојање ивица, што смањује свеукупну величину тела и елиминише потенцијална места цурења флуида.

Типови кугла вентила - кретање кугле:

- Флексибилно причвршћени кугласти вентил - Поседује додатни механички причвршћивач на дну и на врху кугле. Овај специјални причвршћивач је погодан за веће и вентиле под већим притиском. Шта више, овакав дизајн омогућава смањење обртног момента вентила с обзиром да је кугла причвршћена на два места. Сваки CAMERON® T31 кугла вентил је флексибилно причвршћен. Флексибилно причвршћујући систем апсорбује вибрације изазване линијским притиском, спречавајући претерано трење између лопте и лежаја, тако да под пуним рандим притиском оперативни обртни моменат остаје низак.
- Плутајући кугласти вентил - Није позициониран у месту флексибилним причвршћивачем, већ је само прикачен за дршку. Због тога кугла понекад одплута благо низводно. Међутим, када се то догоди, лопта направи притисак на лежиште узрокујући позитивно заптивање.
- Кугласти вентил са подижућом дршком - Укључује операције отклона и окретања чиме елиминише трење приликом заптивања, што представља један од главних узрока пропадања вентила. Када је вентил затворен, језгро се ослања на лежај, обезбеђујући позитивно затварање. Када је вентил отворен, језгро се отклања од затварача омогућавајући униформни проток око лица језгра. Камерунов ORBIT кугла вентил са подижућом дршком користи овај оперативни систем чиме обезбеђује брз рад са малим обртним моментом као и дугорочни поуздани рад. Такође, овај вентил спречава стварање локализованог протока велике брзине који уобичајено доводи до неједнаког трошења лежишта код обичног кугла, капија и чеп вентила.

Такође постоје три основна типа бушотине код кугла вентила: са комплетним отвором, са редукованим отвором (познатији као стандардни отвор) и v-отвор. Ова три типа имају различите конструкције и сврхе:

- Кугла вентил са комплетним отвором - познат и као кугла вентил са комплетном бушотином, поседује бушотину чији је унутрашњи пречник скоро идентичан унутрашњем пречнику цеви. То обезбеђује смањено трење и смањени притисак на вентил. Са кугла вентилом комплетног отвора не постоји ограничење протока флуида, али овакав вентил може бити скупљи. Овакав тип бушотине је идеалан за ситуације где ће чишћене можда бити неопходно. Камерунова TBV серија подељеног тела, комплетног отвора, кугла вентил без ивица, комбинује своју заптивајућу технологију и експертски дизајн заједно са својом разноврсношћу како би одговорио и на најзахтевније примене. Ова технологија се широко примењује у хемијској, петрохемијској и рафинеријској индустрији.
- Кугласти вентил редукованог отвора - редуковани отвор, такође познат и као редукована бушотина представља вентил мањи за једну до две номиналне величине. Ово обезбеђује ограничени проток што резултира повећаним утрошком енергије. Камерон ТК кугла вентил нуди оба кугла вентила, са комплетним и редукованим отвором. Познат по свом робусном дизајну, супериорном заптивању и нерђајућим челиком, ТК бренд је широко познат као лидер у обезбеђивању решења за вентиле за најкритичније примене у индустрији нафте и гаса.
- Кугласти вентил са v-отвором поседује или куглу у облику слова “v” или лежиште у облику слова “v”. Овај тип вентила такође је познат као контролни вентил и коме брзина протока треба да се контролише у зависности од примене.

Кугла вентили имају многе примене као што су испоручивање, складиштење, обрада гаса, индустријска и многе друге примене. Jefri Josef, менаџер производње за CAMERON кугла вентиле, објашњава да кугла вентили обезбеђују поуздану заштиту од цурења што је нарочито корисно приликом коришћења гаса. Кугла вентил показује мали пад у притиску и може се брзо отворити или затворити.

Варијабилност у материјалима, деловима и дизајну чини кугла вентиле веома разноврсним. Кугла вентили као што су RING-O подморски кугла вентили се обично користе у подморским условима што у многим случајевима захтева дугорочну функцију под високим притиском. Кугла вентили, укључујући и Cameron TBV линију кугла вентила, такође имају и криогену примену где компресовани гас мора бити држан под сталном температуром како би могао ефикасно да се креће.

3. ОПИС МЕРНОГ УРЕЂАЈА

Циљ испитивања је утврђивање попречног пресека кугла вентила у зависности од угла под којим је отворен као и утврђивање брзине којом се креће течност приликом истицања. Такође, циљ експеримента је и утврђивање валидности математичког прорачуна са експериментално добијеним вредностима.

Уређај за вршење опита (слика 3.1) се састоји од вертикалне пластичне цеви унутрашњег пречника $\Phi 34$, кугла вентила величине $\frac{1}{2}$ " (пола цола) (слика 3.2), угломера (слика 3.3), посуде за складиштење течности (слика 3.4) и пумпе за транспорт течности (слика 3.5). Максимална висина до које се се цев може напунити течношћу је 0.6 m.



Слика 3.1. Уређај за мерење протока кугла вентла



Слика 3.2. Кугла вентил

Кугла вентил је облик четвороокретног вентила који користи шупљу, перфорирану и окретну куглу за контролу протока кроз њега [10].

Кугла вентили су издржљиви, раде добро после многих циклуса и поуздани су, сигурно се затварају чак и након дужих периода употребе. Ове особине их чине одличним избором за примене за затварање и управљање.

Подржавају притиске до 100 бара и температуре од 400 °C до 752 °C, у зависности од дизајна и материјала који се користе. Њихове величине се обично крећу од 0,5 до 121 cm. Тела вентила су израђена од метала, пластике или метала са керамиком, док су плутајуће куглице често хромиране због дуготрајности.

У случају да се кугла вентил користи за криогенику или производ који се може ширити унутар куглице, на отвору на горњој страни вентила налази се одушак. То се назива вентилирана лопта.



Слика 3.3. Угломер

Када је вентил постављен тако да се ручица пружа дуж истог правца као и цев, односно када се показивач налази у правцу 0 степени на угломеру, тада је вентил отворен. Када се ручица ротира за 90 степени, она се поставља управно у односу на правац пружања цеви, односно показивач се налази у правцу 90 степени на угломеру, то значи да је вентил затворен.



Слика 3.4. Посуда за складиштење течности

Резервоар за воду је контејнер за складиштење воде. Резервоари за воду користе се за обезбеђивање складиштења воде за различите употребе, за снабдевање питком водом, наводњавање пољопривреда, сузбијање пожара, пољопривредни узгој биљака и стоке, хемијску производњу, припрему хране, као и многе друге намене. Параметри резервоара за воду укључују генерални дизајн резервоара и избор грађевинских материјала, облога. За израду резервоара за воду користе се различити материјали, као што су пластика (полиетилен, полипропилен), фиберглас, бетон, камен, челик (заварени или спојен завртњевима, карбонски или нерђајући). Земљане саксије такође функционишу као складишта воде.



Слика 3.5. Пумпа за транспорт течности

Као пумпа за транспорт течности коришћена је електрична пумпа за гориво у аутомобилима.

Гориво се у пумпу увлачи кроз усисну цев и мрежасту чарapu за филтрирање (што помаже да се рђа и прљавштина задржи изван пумпе), пролази кроз унутрашњост пумпе и излази из пумпе кроз једносмерни контролни вентил. Каблови мотора пумпе повезани су са везивним постољем на кућишту пумпе, преносећи напон који управља електричном пумпом за гориво [11].

Додатне функције пумпе за гориво остварују сигурносни и једносмерни вентили. Сигурносни вентили могу да спрече да се притисак превише повећа када је блокиран пут уља, у случају да се оштети уље или пумпа горива. Једносмерни вентили користе се за заптивање уљног пута када пумпа престане да ради.

На слици 3.6 приказан је пресек пумпе за гориво.



Слика 3.6. Пресек електричне пумпе за гориво [11]

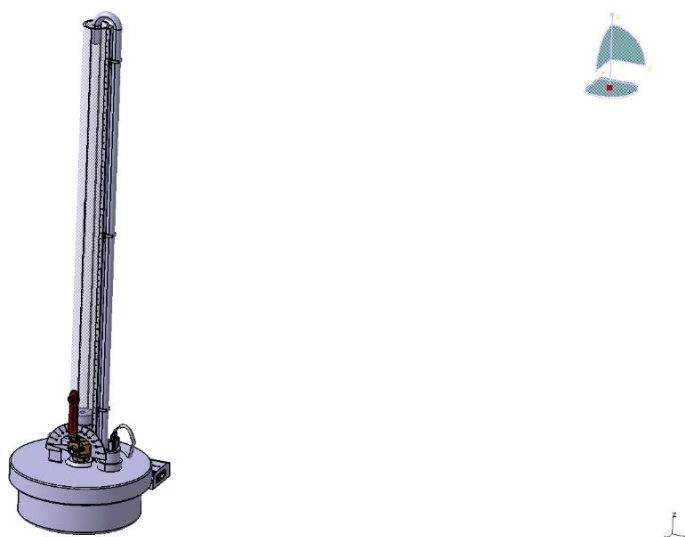
3.1 3D Модел

У циљу да помогне да се сагледа дигитални приказ димензија уређаја, као и то да би се олакшало пројектовање самог уређаја, користи се такозвано 3D моделирање.

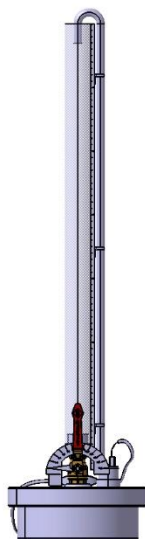
То је специфичан програм који пружа могућност приказивања одређеног модела, тј. слике или производа у простору са циљем да се јасно идентификују његова структура и димензије. Једноставно речено, примена тродимензионалног моделирања омогућава да се они елементи који се појављују директно у људском оку приказују на екрану рачунара у облику који омогућава кориснику да лако увиди различите димензије.

Једна од главних предности овог процеса је чињеница да се све измене и евентуалне надоградње потребне за уређај могу брзо имплементирати. 3D моделирање се карактерише као креирање слика у одређеном рачунарском програму, уз постављање тачних димензија у одређеној размери (ширина, дубина и висина) и манипулацију тим димензијама у складу са потребама.

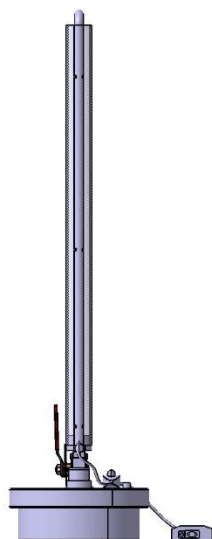
3D модел приказан на сликама 3.7 – 3.11 рађен је у програму Catia P3 V5R21.



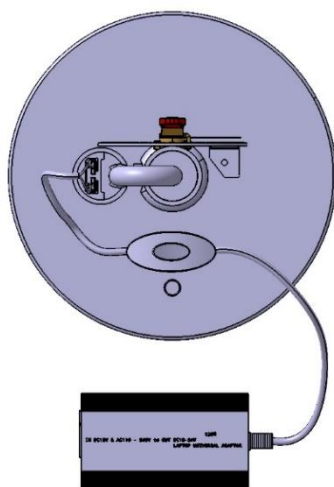
Слика 3.7. 3D модел уређаја



Слика 3.8. Уређај - поглед спреда

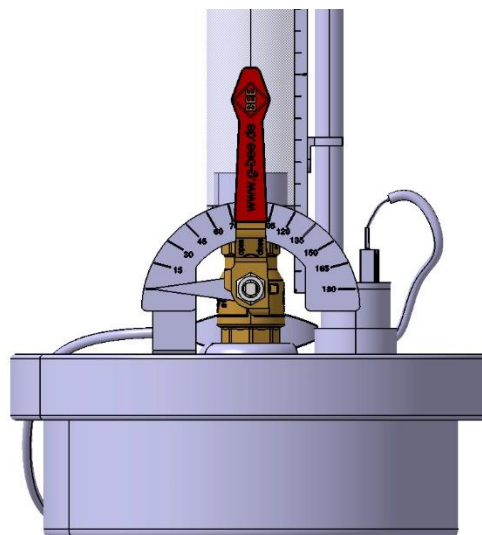


Слика 3.9. Уређај- поглед са стране



Слика 3.10. Уређај - поглед одозго




 $\vec{z}$
 $\vec{y}$

Слика 3.11. Угломер, кугла вентил, пумпа и посуда за складиштење течности

3.2 Карактеристике пумпе

Као електропогон пумпе коришћен је лаптоп универзални адаптер (слика 3.12) са следећим карактеристикама [12]:

- напајање подесивим напонем 12-24 V,
- улазни напон 100-240 V,
- фреквенција 50/60 Hz,
- ефективна излазна снага 120 W,
- излазни напон DC12/15/16/18/19/20/22/24 V (подесиво),
- излазна струја за 12-19 V, 5.5 A, максимално, за 20-24 V, 4 A, максимално,
- 8 конектора,
- решења за напајање: IC решења, 100% снаге, сигурности и стабилности,
- бука и пулсирање <100 mV,
- заштитна функција: заштита од кратког споја, прекострујна заштита, пренапонска заштита,
- заштита од преоптерећења 120 % минимално,
- ефикасност конверзије ≥ 85 %,
- стопа регулације напона ≤ 1 %,
- регулација оптерећења ≤ 1 %,
- радна температура 0 °C-40 °C, пуно оптерећење, нормалан рад,
- температура складиштења -20 °C до 80 °C, са кућиштем.



Слика 3.12. Лаптоп универзални адаптер

Овај адаптер прихвата најновији PWM IC интегрисани дизајн, са више заштитних функција, било да је у кратком споју, прекострујна или пренапонска. Може се користити на разним уређајима у возилу или за кућну употребу, са 8 конектора за пуњење лаптопа, променљивим напонем 12~24V (слика 3.13), тако да се може лакше користити за све врсте примена.



Слика 3.13. Напон 12 ~ 24V

Улазни напон се може напајати напајањем DC12V из возила или може бити напајање наизменичном струјом. Два улазна напона не могу се користити истовремено.

Излазни подесиви напон опремљен је са 8 једносмерних утикача. Корисници могу одабрати одговарајући адаптер према сопственој марки рачунара, а сваки адаптер је обележен излазним напонем.

Погодан је за већину преносних рачунара на тржишту, а такође може користити и USB пуњење за дигиталне електронске производе.

4. РАЗВОЈ ТЕОРИЈСКОГ МОДЕЛА

Брзина воде која пролази кроз отвор једнака је:

$$v = 0.7\sqrt{2gh}. \quad (4.1)$$

Количина запремине воде која пролази кроз цев $\Delta V/\Delta t$ једнака је површини попречног пресека отвора помноженој са брзином воде, која је дефинисана једначином (4.1):

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = A_s v. \quad (4.2)$$

Постоји почетно стање где је висина у току времена једнака нули. Висина је функција времена, па кад је време једнако нули висина је једнака 0.6 метара:

$$h(0) = 0.6 \text{ m}, \quad (4.3)$$

при чему је $g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ – убрзање земљине теже.

Промена запремине воде биће једнака површини попречног пресека цеви помноженој са променом висине:

$$\Delta V = -A_l \Delta h. \quad (4.4)$$

Како висина опада, запремина се смањује, тако да мора постојати негативан знак, тако да постоји још један однос према којем се промена запремине може довести у везу са површином попречног пресека цеви и променом висине нивоа воде.

Из једначине (4.2) промена запремине ΔV може се написати као:

$$\Delta V = A_s v \Delta t. \quad (4.5)$$

Заменом једначине (4.1) у једначину (4.4) добија се да је промена запремине једнака:

$$\Delta V = A_s (0.7\sqrt{2gh}) \Delta t = -A_l \Delta h. \quad (4.6)$$

Тражи се диференцијална једначина која се односи на висину и време. Из једначине (4.6) може се видети да су једине две променљиве у овој једначини висина и време и да се она може написати као диференцијална једначина. Уколико из ове једначине изразимо $\Delta t/\Delta h$ као dh/dt , добија се следећа диференцијална једначина:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{-0.7A_s\sqrt{2gh}}{A_l}. \quad (4.7)$$

Пошто имамо диференцијалну једначину само са променљивама h и t она се може решити употребом технике раздвајања променљивих. Пошто су A_s , A_l и g константе, које се не мењају, из израза (4.7) може се извући константа k :

$$k = \frac{0.7A_s\sqrt{2g}}{A_l}, \quad (4.8)$$

тако да се може написати да је:

$$\frac{dh}{dt} = -kh^{1/2}. \quad (4.9)$$

Добијени израз се множи са $\frac{dt}{h^{1/2}}$ како би се добио следећи облик:

$$\frac{dh}{h^{1/2}} = -k dt \rightarrow h^{-\frac{1}{2}} dh = -k dt, \quad (4.10)$$

а затим се овај образац интегралом и добија се следећи облик:

$$\int h^{-1/2} dh = -k \int dt. \quad (4.11)$$

k се извлачи испред интеграла с обзиром да је константа и не мења се ни по једном параметру. Решавањем овог интеграла добија се следеће:

$$\frac{h^{1/2}}{1/2} = -kt + C_1 \rightarrow 2h^{1/2} = -kt + C_1 \rightarrow h^{1/2} = -\frac{kt}{2} + \frac{C_1}{2}, \quad (4.12)$$

при чему је:

$$h = \left(-\frac{k}{2}t + C\right)^2. \quad (4.13)$$

Како би се добила вредност константе C узима се максимална висина течности у почетном тренутку мерења, односно кад је $h = 0.6 \text{ m}$ и $t = 0 \text{ s}$, заменом ових вредности у претходном обрасцу добија се следеће:

$$0.6 = \left(-\frac{k}{2}(0) + C\right)^2 \rightarrow 0.6 = C^2 \rightarrow C = 0.77459. \quad (4.14)$$

Добијена константа се сада враћа у израз (4.13) како би се могао добити коначан израз за добијање времена у зависности од висине:

$$h = \left(-\frac{k}{2}t + 0.77459\right)^2. \quad (4.15)$$

Заменом K из једначине (4.8) може се добити да је висина H као функција времена једнака:

$$h(t) = \left(\frac{-0.7A_s\sqrt{2g}}{2A_l}t + 0.77459\right)^2. \quad (4.16)$$

На основу ове једначине може се одредити време за које ће се висина течности смањити до краја:

$$0 = \left(\frac{-0.7A_s\sqrt{2g}}{2A_l}t + 0.77459\right)^2, \quad (4.17)$$

тако да је решење за време:

$$t = \frac{(\sqrt{h}-0.77459)2A_l}{-0.7A_s\sqrt{2g}}, \quad (4.18)$$

Заменом вредности добија се следеће:

$$t = \frac{(\sqrt{0}-0.77459) \cdot 2 \cdot 0.00090792}{-0.7 \cdot 0.00012667 \cdot \sqrt{2 \cdot 9.81}} = 3.58 \text{ s}. \quad (4.19)$$

Добијени резултат приказује време које је потребно да вода истекне из посуде.

Сада се инверзним путем може добити површина проточног пресека у зависности од угла, па онда образац за површину проточног пресека гласи:

$$A_s = \frac{(\sqrt{h}-C) \cdot 2 \cdot A_l}{-0.7 \cdot \sqrt{2g} \cdot t}, \quad (4.20)$$

где је сада t измерено време.

На основу претходних израза добијени су резултати који су приказани у табели 4.1.

Табела 4.1. Добијено време у зависности од висине течности

Убрзање земљине теже g [m/s ²]	Висина течности h [m]	Унутрашњи радијус цеви r_l [m]	Површина попречног пресека цеви A_l [m ²]	Унутрашњи радијус кугла вентила r_s [m]	Површина попречног пресека цеви A_s [m ²]
9,81	0,6	0,017	0,000907894	0,00635	0,000126673
9,81	0,45	0,017	0,000907894	0,00635	0,000126673
9,81	0,3	0,017	0,000907894	0,00635	0,000126673
9,81	0,15	0,017	0,000907894	0,00635	0,000126673
9,81	0	0,017	0,000907894	0,00635	0,000126673
Брзина Торичелијева теорема v_s [m/s]	Константа k	Константа C	Тренутна висина течности h [m]	Теоријско време t [s]	Измерено време t [s]
2,401724381	0,432610593	0,774596669	0	3,58103422	3,67
2,079954326	0,432610593	0,670820393	0	3,10126661	2,95
1,698275596	0,432610593	0,547722558	0	2,53217358	2,36
1,20086219	0,432610593	0,387298335	0	1,79051711	1,54
0	0,432610593	0	0	0	

Сада кад су добијени сви неопходни параметри, приступа се прорачуну губитка у самом вентилу (табела 4.2) на основу Бернулијеве једначине која у основном облику гласи:

$$p_a + \rho g h_1 + \frac{v_1^2}{2} \rho = p_a + \rho g h_2 + \frac{v_s^2}{2} \rho + \Delta p_{vent}, \quad (4.21)$$

где је Δp_{vent} губитак у кугла вентилу, а p_a атмосферски притисак.

На основу израза:

$$\rho g h + \frac{v_1^2}{2} \rho = \frac{v_2^2}{2} \rho + \Delta p_{vent}, \quad (4.22)$$

следи да је Δp_{vent} :

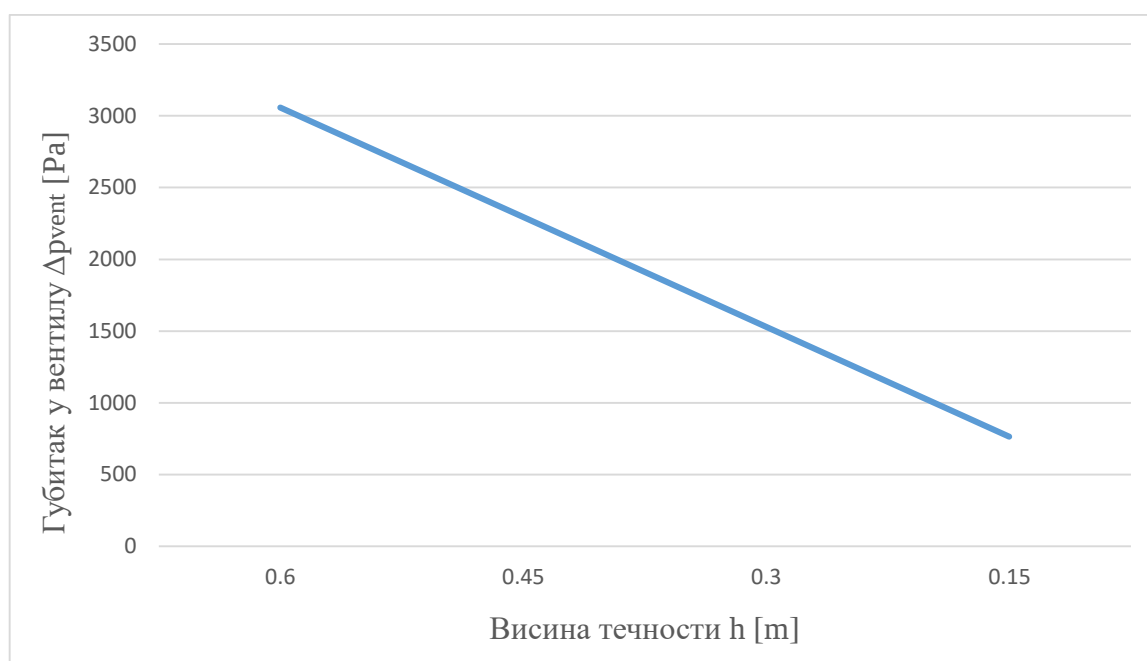
$$\Delta p_{vent} = \rho g h + \frac{v_1^2}{2} \rho - \frac{v_2^2}{2} \rho, \quad (4.23)$$

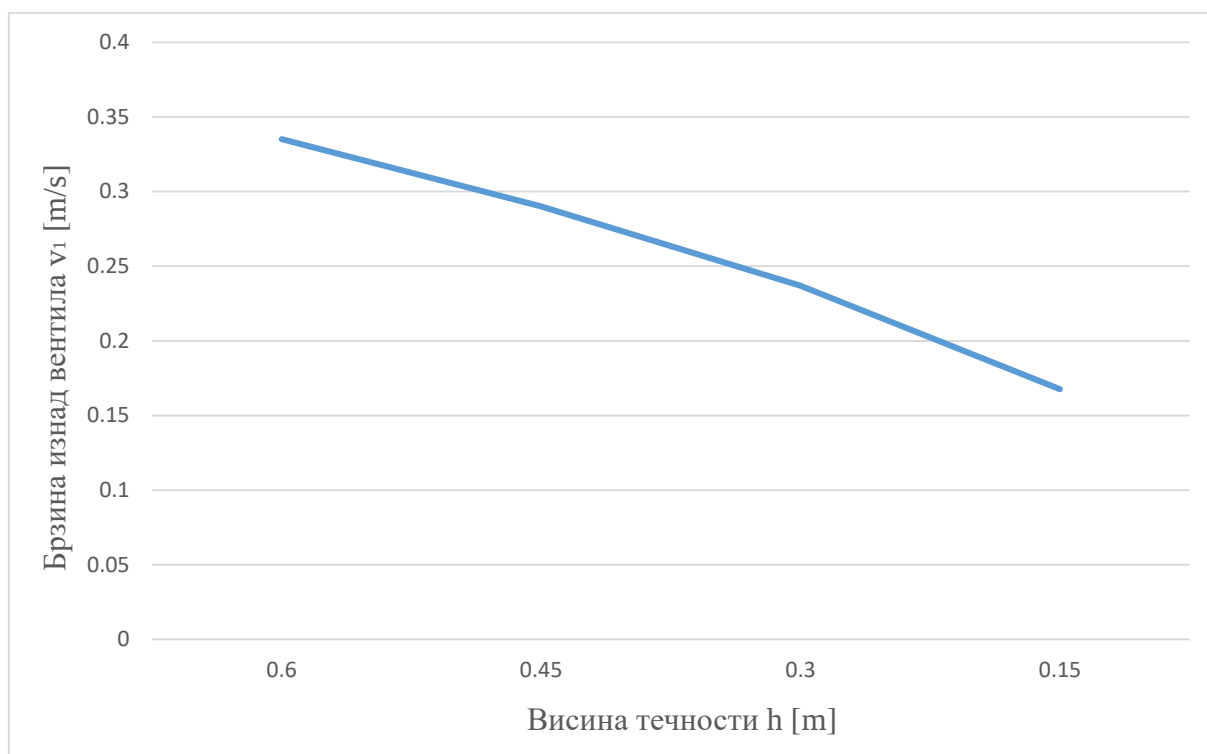
где је v_1 брзина изнад вентила за дату висину h , а v_2 брзина истицања из вентила за дату висину h .

Табела 4.2. Прорачун губитака у самом вентилу

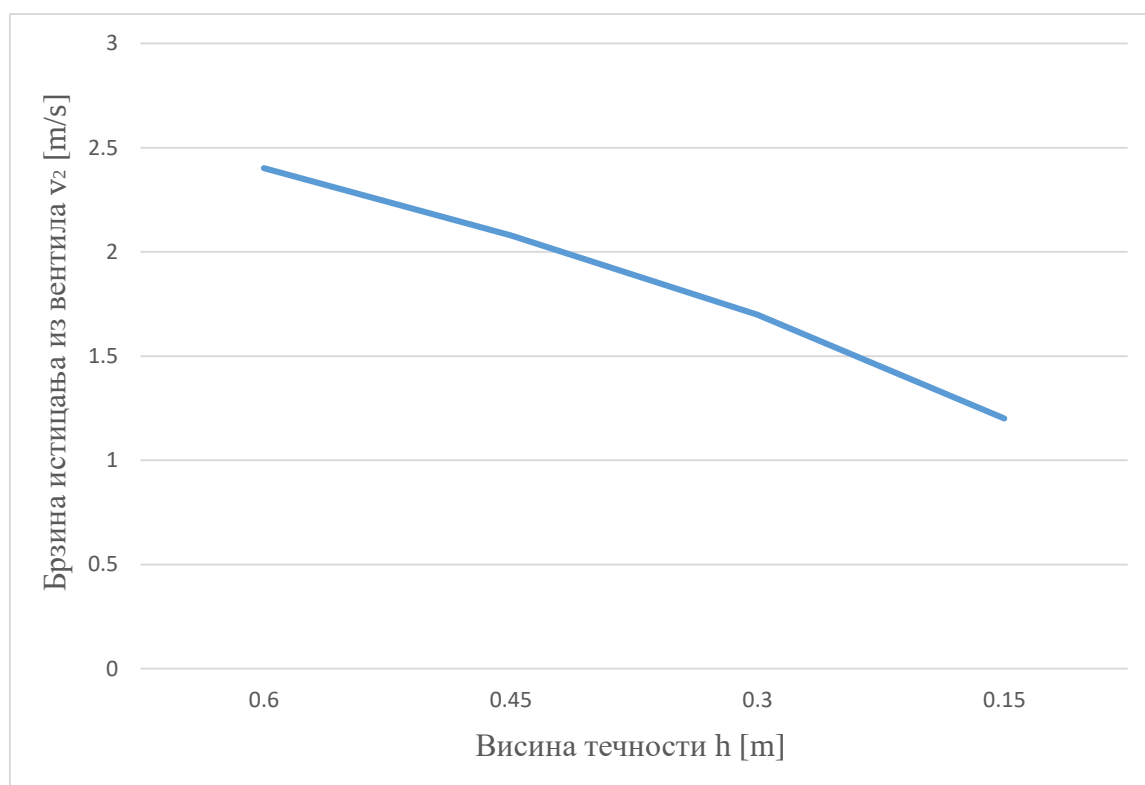
БЕРНУЛИЈЕВА ЈЕДНАЧИНА						
Висина течности h [m]	Густина течности ρ [kg/m ³]	Убрзање земљине теже g [m/s ²]	Брзина изнад вентила v_1 [m/s]	Брзина истицања из вентила v_2 [m/s]	Губитак у вентилу Δp_{vent} [Pa]	Губитак у вентилу Δp_{vent} [bar]
0,6	1000	9,81	0,335098724	2,401724381	3058,005578	0,030580056
0,45	1000	9,81	0,290204008	2,079954326	2293,504183	0,022935042
0,3	1000	9,81	0,23695058	1,698275596	1529,002789	0,015290028
0,15	1000	9,81	0,167549362	1,20086219	764,5013944	0,007645014

Из претходне табеле добијени су дијаграми приказани на сликама 4.1, 4.2 и 4.3.

**Слика 4.1.** Губици у вентилу у Pa



Слика 4.2. Брзина изнад вентила



Слика 4.3. Брзина истицања из вентила

У табели 4.3 дати су резултати за проток течности кроз мањи и већи попречни пресек.

Табела 4.3. Проток $A_l v_l$ и $A_s v_s$

Запремина која се празни $V \text{ [m}^3\text{]}$	Проток кроз мањи попречни пресек $Q \text{ [m}^3\text{/s]}$	Брзина у цеви (већи попречни пресек) $v_l \text{ [m/s]}$	Проток кроз цев (већи попречни пресек) $Q \text{ [m}^3\text{/s]}$	Измерено време $t \text{ [s]}$	Висина течности у зависности од времена $h(t) \text{ [m]}$
0,000545	0,000304234	0,335098724	0,000304234	0	0,6
0,000409	0,000263474	0,290204008	0,000263474	2,95	0,001070583
0,000272	0,000215126	0,23695058	0,000215126	2,36	0,001386971
0,000136	0,000152117	0,167549362	0,000152117	1,54	0,002936359
0	0	0	0		0

5. ПЛАН И ПРОГРАМ ЕКСПЕРИМЕНТА

У лабораторијском моделу посматран је физички систем који се састоји од пумпе, коју покреће електропогон за који је коришћен лаптоп универзални адаптер и која црпи воду из резервоара, односно посуде за складиштење течности. Течност затим пролази кроз црево и улази у вертикалну цев на чијем се крају налази кугла вентил.

Датим уређајем се мери време које је потребно да одређена запремина течности истекне из цеви на чијем се дну налази кугла вентил са отвором мањег попречног пресека од попречног пресека цеви. Такође, мери се и време истицања течности када је кугла вентил отворен под одређеним углом који се се подешава на угломеру. Тако добијено време биће искоришћено за израчунавање попречног пресека отвора кугла вентила под задатим углом.

У експерименту је коришћена течност густине 1000 kg/m^3 , на коју делује само атмосферски притисак (слика 5.1). Висина до које је цев напуњена течношћу је 0.6 m .



Слика 5.1. Уређај напуњен течношћу

6. РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА

Након извршених мерења добијени су резултати дати у табели 6.1.

Табела 6.1. *Резултати мерења*

Теоријско време t [s]	Измерено време t [s]
3.581034223	3.67
3.101266609	2.95
2.532173583	2.36
1.790517112	1.54

Из претходне табеле се види да су експериментални и теоријски добијени резултати готово идентични што потврђује валидност математичког прорачуна. Након тога приступило се мерењу времена потребном за истицање течности у зависности од угла под којим је кугла вентил отворен. За сваки од задатих углова отвора вентила, почетна висина стуба течности износи 0.6 m. Након извршеног опита добијени су резултати приказани у табели 6.2.

Табела 6.2. *Време потребно за истицање течности*

Угао [°]	Почетна висина h [m]	Крајња висина h [m]	Измерено време t [s]
11	0.6	0	5945.41
12	0.6	0	682.78
15	0.6	0	134
20	0.6	0	50.59
25	0.6	0	29.23
30	0.6	0	22.97
35	0.6	0	13.95
45	0.6	0	8.82
60	0.6	0	5.2
75	0.6	0	3.96
90	0.6	0	3.67

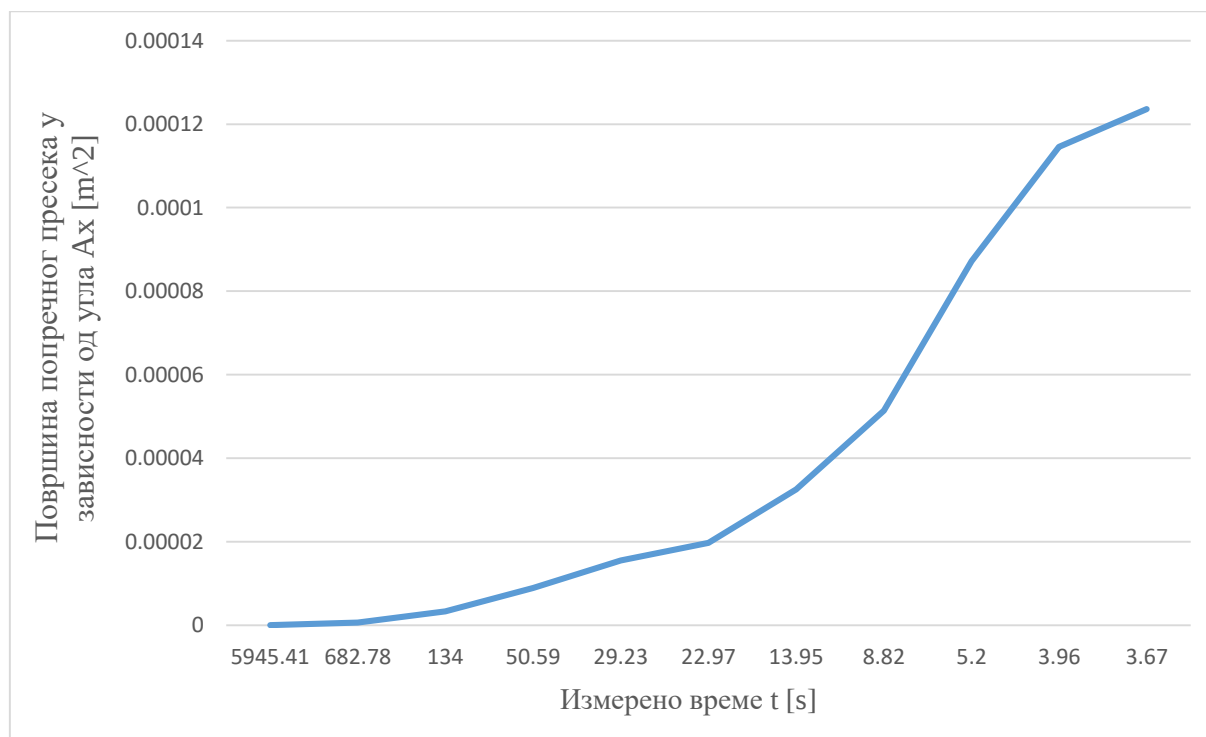
Из табеле се може видети да време потребно за истицање течности опада са повећањем угла под којим је кугла вентил отворен.

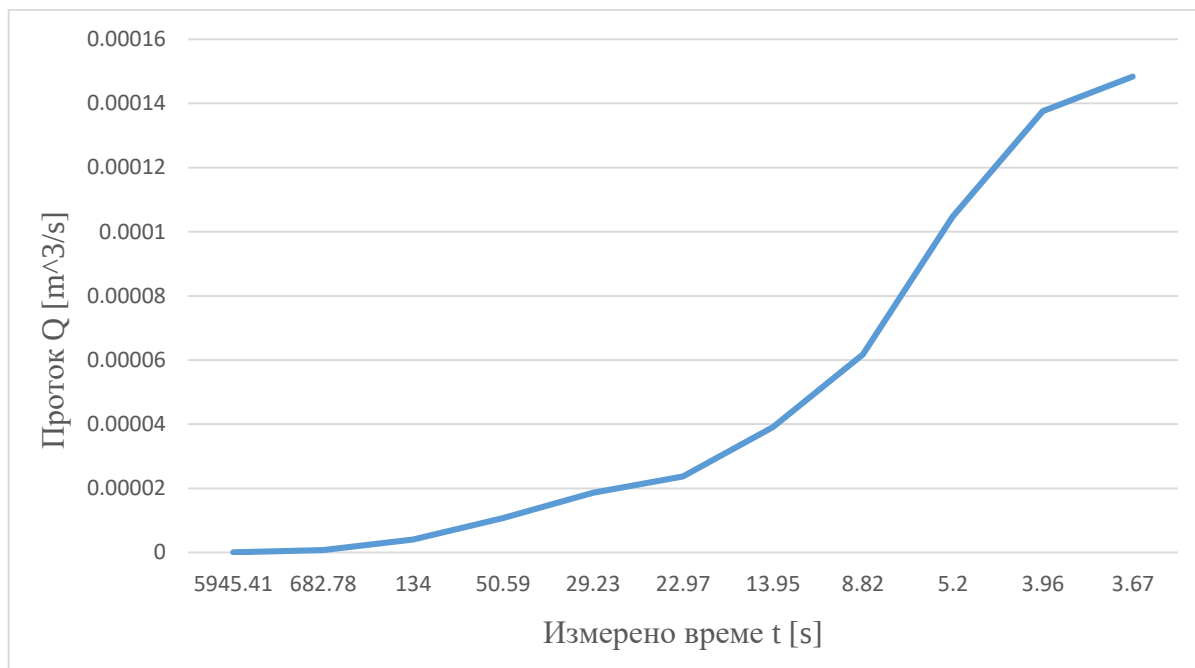
Затим се приступило прорачуну попречног пресека кугла вентила на основу измерених времена истицања течности са висине од 0.6 m (табела 6.3).

Табела 6.3. Попречни пресек кугла вентила у зависности од времена истицања

Угао [°]	Почетна висина h [m]	Крајња висина h [m]	Измерено време t [s]	Константа C	Површина попречног пресека у зависности од угла A_x [m ²]	Запремина V [m ³]	Проток Q [m ³ /s]
11	0,6	0	5945,41	0,774596669	7,62977E-08	0,000544736	9,1623E-08
12	0,6	0	682,78	0,774596669	6,64373E-07	0,000544736	7,97821E-07
15	0,6	0	134	0,774596669	3,38523E-06	0,000544736	4,06519E-06
20	0,6	0	50,59	0,774596669	8,96661E-06	0,000544736	1,07677E-05
25	0,6	0	29,23	0,774596669	1,5519E-05	0,000544736	1,86362E-05
30	0,6	0	22,97	0,774596669	1,97484E-05	0,000544736	2,37151E-05
35	0,6	0	13,95	0,774596669	3,25176E-05	0,000544736	3,90492E-05
45	0,6	0	8,82	0,774596669	5,14309E-05	0,000544736	6,17615E-05
60	0,6	0	5,2	0,774596669	8,72348E-05	0,000544736	0,000104757
75	0,6	0	3,96	0,774596669	0,000114551	0,000544736	0,00013756
90	0,6	0	3,67	0,774596669	0,000123602	0,000544736	0,000148429

На сликама 6.1 и 6.2 дати су дијаграми резултата добијених у табели 6.3.

**Слика 6.1.** Површина проточног пресека

**Слика 6.2. Проток**

Приликом вршења експеримента у обзир треба узети грешке мерења, с обзиром да су се мерења вршила визуелном методом стартовања и стопирања штоперице, као и ручним подешавањем угла које може довести до малих одступања од предвиђене вредности.

7. ЗАКЉУЧАК

Кугла вентил је вентил који контролише проток течности или гаса помоћу окретне кугле. Ротирањем лопте за четвртину окрета (90 степени) око своје осе, течност може тећи кроз њега или је блокирана. Карактерише их дуг радни век и пружају поуздано заптивање током века трајања, чак и када се вентил не користи дуже време. Као резултат тога, они су популарнији као вентили за затварање. Штавише, отпорнији су на загађене течности од већине осталих типова вентила. У посебним случајевима, кугла вентили се такође користе као контролни вентили. Ова примена је ређа због релативно ограничене тачности контроле протока у поређењу са другим типовима регулационих вентила.

У овом раду направљена је анализа рада кугла вентила са ручицом. Време измерено на штоперици је скоро идентично са теоријски добијеним резултатима чиме се потврђује исправност математичког прорачуна.

Резултати детаљних симулација показују да код мањих углова под којим је кугла вентил отворен време које је потребно за истицање течности је веће. Такође, извршен је и прорачун губитака у вентилу коришћењем Бернулијеве једначине. Добијени резултати показују да се са смањењем висине течности у цеви, смањују и губици.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Теорија и планирање инжењерског експеримента, ПРЕДАВАЊЕ – П1
- [2] ПРЕДАВАЊА (материјал са мудла), Механика флуида, 13. недеља
- [3] Проф. др Бранко Р. Обровић, Механика флуида, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, 2007.
- [4] https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_4578/objava_19703/fajlovi/ISTICANJA%20.pdf, приступљено: 21. 09. 2019.
- [5] СТРОЈАРСКИ ПРИРУЧНИК, Бојан Краут, Техничка књига Загреб 1970.г ISBN 86-7059-063-8.Новија издања
- [6] https://www.teachengineering.org/lessons/view/cub_bernoulli_lesson01, приступљено: 21. 09. 2019.
- [7] <https://repozitorij.pmf.unizg.hr/islandora/object/pmf:365/preview>, приступљено: 27. 09. 2019.
- [8] <https://prekucavanje.files.wordpress.com/2012/10/bernulijeva-jednacina-sk.pdf>, приступљено: 27. 10. 2019.
- [9] <https://www.products.slb.com/en/valves/valve-academy/how-does-it-work-ball-valves>, приступљено: 21. 09. 2019.
- [10] https://www.researchgate.net/publication/317031378_Design_manufacture_and_test_a_hydraulic_ram, приступљено: 28. 09. 2019.
- [11] https://www.aa1car.com/library/fuel_pump.htm, приступљено: 29. 09. 2019.
- [12] <https://www.ebay.ca/itm/Universal-120W-Laptop-Car-DC-Charger-Notebook-with-8-AC-Adapter-Power-Supply-EU/113770463478?hash=item1a7d3f80f6:g:-xsAAOSwFxVc9O5p>, приступљено: 21. 09. 2019.