

Факултет инжењерских наука

Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Индустијски инжењеринг

Предмет: Механика флуида

Број индекса: 143/2011

Павле Д. Лазаревић

Истицање течности кроз отворе, наглавке и преливе

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Слободан Савић, ванредни професор - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

* проучи одговарајућу литературу везану за практичне проблеме истицања течности кроз отворе, наглавке и преливе,

* прикаже развој водоснабдевања са напретком цивилизације,

* теоријски обради једначину кретања течности као и губитке струјне енергије,

* на основу прикупљених и систематизованих података из препоручене и друге литературе ове области неопходно је да размотри све аспекте струјања течности кроз отворе, наглавке и преливе,

* прикаже принцип истицања течности кроз отворе, наглавке и преливе у пракси.

Препоручена литература:

- [1] Обровић, Б., Механика флуида, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2007.
- [2] Маричић, Н., Механика флуида, Универзитет у Приштини, Факултет техничких наука, Косовска Митровица, 2003.
- [3] Адамовић, Ж., Хидраулика и пнеуматика, Институт Гоша, Београд, 2009.

Крагујевац, 2014.

ментор:
др Слободан Савић, ванр. проф.

Резиме

Хидраулика је примењена наука и инжењерска дисциплина, која се бави механичким особинама течности. У овом завршном раду представљени су основни појмови и карактеристике хидраулике, као и њена систематизација, класификација и примена. Поред тога, детаљно је разматран и описан део хидраулике који проучава истицање течности кроз отворе, наглавке и преливе, њихов теоријски аспект и практична намена.

У првом поглављу овог рада приказана је историја и развој водоснабјевања, начини на које су људи користили воду, прављењем вештачких канала, водовода, цеви за проток воде. Појам, примена и основни закони хидраулике, као и типови струјања течности, представљени су у другом поглављу.

У трећем поглављу су детаљно описана кретања течности за време истицања кроз отворе, наглавке и преливе. Појам истицање подразумева анализу кретања флуида за време пражњења или пуњења суда, тј. резервоара кроз отворе, преливе или релативно кратке цеви - наглавке.

Кључне речи: хидраулика, истицање, отвори.

Abstract

Hydraulic is an applied science and engineering discipline dealing with the mechanical characteristics of liquids. Basic concepts and characteristics of hydraulic are presented in this work as well as its systematization, classification and application. Besides that the field of hydraulic which studies liquid flowing through the holes, sleeves and overflows and their theoreticak aspect and practical purpose is detailedly described and considered.

History and development of the water supply are presented in the 1st chapter of this work, as well as the ways people used the water by building artificial canals, plumbings, pipes for water conduciton. Concepts, application and basics laws of the hidraulic likewise types of fluid flow are described in the 2th chapter.

The 3th chapter is dedicated to the liquid movement during its flow through holes, sleeves and overflows. The term liquid flow implies fluid motion analysis during charging or discharging of tenk i.e. reservoir through holes, overflows or relatively small pipes - sleeves.

Key words: hydraulic, flowing, holes

Садржај

1. Увод	6
1.1. Вода	6
1.1.1. Кружење воде у природи	6
1.1.2. Глобална расподела воде	9
1.2. Историја водоснабдевања	9
1.2.1. Асирија и Вавилон	9
1.2.2. Аквадукти	11
1.2.2.1. Аквадукти Наисуса	12
1.2.2.2. Барски аквадукт	13
1.2.3. Историја водоснабдевања Београда	13
2. Хидраулика и њени основни закони	15
2.1. О хидраулици	15
2.2. Примена хидраулике	15
2.3. Основни закони хидростатике и хидродинамике	17
2.3.1. Паскалов закон	17
2.3.2. Једначина континуитета - закон о одржању масе	17
2.3.3. Бернулијева једначина	18
2.3.4. Примена Бернулијеве једначине	20
2.3.4.1. Торичелијева теорема (истицање течности кроз мале отворе)	20
2.3.4.2. Питова цев	21
2.3.4.3. Вентуријева цев	22
2.4. Струјање течности	22
2.4.1. Ламинарно струјање течности	23
2.4.1.1. Вискозност	24
2.4.1.2. Њутнов закон за вискозност	24
2.4.1.3. Стоксов закон вискозности - отпор средине	25
2.4.2. Турбулентно струјање течности	26
3. Истицања течности кроз отворе, наглавке и преливе	29
3.1. Подела отвора и основне карактеристике истицања	29
3.2. Истицање течности кроз мале отворе оштрих ивица при сталном нивоу	31
3.3. Истицање течности кроз велике отворе	33
3.4. Подводно истицање	35
3.5. Истицање течности кроз отворе у пракси	36
3.5.1. Вентуријева цев у карбуратору аутомобила	37

3.5.2. Водена пумпа.....	37
3.5.3. Циркулација крви.....	38
3.5.4. Сегнеров точак.....	39
3.6. Истицање течности кроз наглавке.....	40
3.6.1. Врсте наглавака и њихова практична примена.....	40
3.6.1.1 Шприц (бризгалица).....	41
3.6.2. Хидраулични прорачун наглавака.....	42
3.7. Истицање течности при променљивом нивоу.....	44
3.7.1. Истицање течности у атмосферу при сталном дотицању.....	44
3.7.2. Спојени судови.....	45
3.8. Реакција млаза при истицању течности из суда.....	46
3.9. Преливи.....	47
3.9.1. Практична примена прелива.....	47
3.9.1.1. Бране.....	47
3.9.1.2. Хидроелектране.....	48
3.9.2. Основни параметри прелива.....	49
3.9.3. Формула за проток преко прелива.....	51
4. Закључак.....	52

1. УВОД

1.1. Вода

1.1.1. Кружење воде у природи

Кружење воде или хидролошки циклус је низ токова воде како изнад тако и на тлу као и испод површине тла. Вода се привремено може задржати у тлу, у океанима, морима, језерима и рекама, те у леденим капама и ледницима. Вода затим испарава у атмосферу с површине земље, кондензује се у облацима, те укапљена у облику кише или снега се опет враћа на земљу. Готово сва вода на земљи је небројено пута прошла кроз тај циклус и врло се мало воде створило и нестало у последњих милијарду година.

Огромна количина воде учествује у том циклусу. Око 1,4 милијарде km^3 воде се налази на Земљи. Нешто више од 97% ове количине је морска вода, али испаравањем се не преноси у атмосферу тако да та чињеница не утиче на количину кише која пада на површину земље. Неслана вода, дакле потенцијално погодна за пиће, се налази у ледницима, језерима и рекама, као и у тлу и неким стенама. Према проценама такве воде има 36 милиона km^3 . У атмосфери се у сваком тренутку налази око 12 000 km^3 воде док се у исто време 10 пута толико налази у светским рекама и језерима. Два највећа светска резервоара воде се налазе у поларним капама (28 милиона km^3) те у тлу (8 милиона km^3).

Готово већина светске свеже воде се налази на Антартику и на Гренланду. Те се поларне капе простиру на више од 17 милиона km^2 с просечном дужином већом од 1,5 km . Остали ледници имају врло мали удео у количини свеже светске воде. Када би се сви ледници на Земљи отопили ниво светског мора би порастао за око 80 m .

Воде које теку по површини низ токове река зову се површинске воде. Сваки дан око 100 km^3 такве воде се улива у светска мора. Амазон, светска највећа река, чини око 15% таквих вода. Површинске воде нису константне у својој количини која се смањује за време сушних периода, а повећава се за време кишних периода и за време топљења снега и леда. Воде се сливају у реке било површинским токовима, било подземним токовима. Површински токови се појављују недуго након интензивних кишних олуја или периода брзог топљења снега и леда. Ниво такве воде се може врло брзо повећати што, коначно, узрокује поплаве. У случају неколико поплава ниво река се може повећати за чак 10 m што узрокује плавлeње великих површина. Подземни токови се стварају кроз пропусне стене и тла. У стенама и тлу такве воде стварају подземне резервоаре и вода тече од резервоара који се налази на мањој дубини према ономе који се налази на већој дубини.

Просечна брзина продирања воде је мања од 1 m на дан. Кад таква вода доспе до водених токова, она их снабдева водом која мало утиче на количину воде у тим токовима, али таква вода је отпорна на дуготрајне периоде без кише, међутим, ако такви периоди потрају предуго и подземни резервоари воде ће пресушити.

Људи се већ хиљадама година уплићу у природно кружење воде. Изграђују се канали који преусмеравају воду и доводе је до сушних подручја, копају се бунари како би нам била доступна подземна вода. Бунари су вертикални хидрогеолошки објекти изведени у тлу, експлоатација им је примарна намена, а могу служити и за осматрање подземних вода [21].

Према начину изградње бунари се могу поделити на копане, бушене и побијене бунаре. Копани бунари могу да се изводе по систему спуштања прстенова и по систему подзиђивања. Најповољнији пречник бунара је 1-1,2 m при чему је дебљина зидова 0,10-0,15 m, а уобичајена дубина укопавања је до 20 m. Бушени бунари су мањег пречника (0,3-1 m), обично од челичних цеви, великих су дубина и до 500 m. Бушени бунари се изводе уз употребу бургије, са заштитном цевом или без заштитне цеви са испирањем. Побийени бунари се користе за захват мањих количина воде са дубине до 7 m.



Слика 1. Бунар

За израду бунара користе се методе као што су ископ, бушење са језгровањем или бушење. Бунари могу знатно варирати у димензијама (по дубини), издашности и квалитету воде. Подземне воде захваћене бунаром далеко су квалитетније него воде из површинских токова, јер им није потребна прерада као за површинске воде. Понегде су подземни резервоари воде толико испражњени да је у њих почела продирати морска, слана вода што узрокује промене у тлу и вегетацији тих подручја.

Граде се насипи и бране како би се усмерио ток воде и како би се искористила потенцијална енергија воде за стварање електричне енергије. Испаравањем воде у вештачким језерима, створеним помоћу брана, постижу се врло велики губитци воде. Убрзана урбанизација понекад доводи до поплава, јер се киша убрзано слије у токове и то у већим количинама, поготово са урбаних подручја која су због претеране количине асфалта и цемента заправо водонепропусна.



Слика 2. Канал за одвод воде

Са порастом људске популације ефикасна и рационална употреба воде постаје све више кључно питање одрживости и развоја. Пажљиво и планирано коришћење воде може смањити проблеме, али ограничене количине воде у неким подручјима света, као што је то Блиски исток, може битно утицати на регионалну политику.



Слика 3. Брана

1.1.2. Глобална расподела вода

Само око 2,5 % све воде на Земљи је слатка вода, а од тога је 68,9 % те воде замрзнуто у поларним капама, 30,8 % представљају подземне воде а само 0,3 % питке воде налази се у рекама и језерима. Или када се то представи појединачно [18]:

- 97,5 % слана вода
- 0,0075 % слатка вода у рекама и језерима
- 0,77 % слатка вода у подземним водама
- 1,7225 % слатка вода у глечерима



Слика 4. Глобална расподела вода

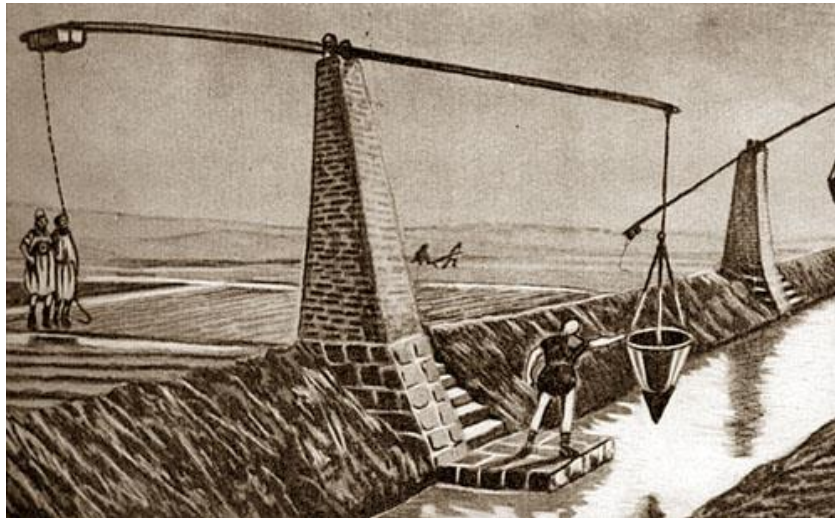
1.2 Историја водоснабдевања

1.2.1. Асирија и Вавилон

Развијена мрежа канала у Асирији повећавала је вредност сиромашних предела. Да би се вода вадилa из канала и да би се поља заливала, Асирци су поставили дугу дрвену мотку, која се окреће, на назидани стуб. На једној страни има терет тако прорачунат да извлачење и окретање суда са водом захтева врло мале напоре.

Првом пумпом се сматра Архимедов завртањ из трећег века пре нове ере који се у Асирији употребљавао чак четири века, иако су вероватно прве пумпе настале у Месопотамији и Старом Египту за потребе наводњавања.

Око првог века пре нове ере, по Кини се нагло почела производити тзв. кинеска ланчана пумпа. Она се састојала од низа правоугаоних плочица и подсећа на данашње елеваторе за кукуруз, јер се у плочицама задржавала вода, земља или песак, пумпа се окретала и материјал из ње се могао подићи и до на 5 m висине.



Слика 5. Водоснабдевање у Асирији

Остаци висећих вртова у Вавилону налазе се на источној обали реке Еуфрат, на око 90 km јужно од Багдада, у Ираку. Сматра се да су легендарни висећи вртови изграђени за време владавине Набукодоносора другог (604-562. п.н.е.) и то по жељи његове супруге.



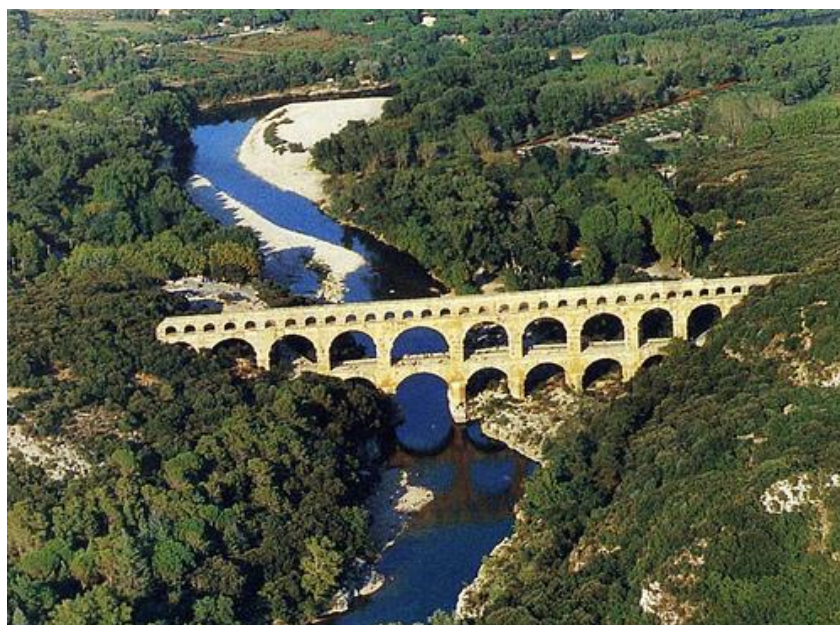
Слика 6. Висећи вртови у Вавилону

Вртови су лежали на четвороспратној кули. На сваком спрату су се налазили чврсти сводови од црепа, који су се ослањали на снажне високе стубове. Терасе су се градиле од великих камених плоча различитих облика и биле су прекривене прво једним слојем трске, а затим слојем. На то је био насут дебели слој плодне земље довољан да у њему расту чак и мале шуме. Спратови вртова спајале су степенице, које су биле покривене плочицама ружичасте и беле боје. Стубови су досезали висину и до 25 m, па је било довољно светлости за цео биљни свет у врту. Око стотину робова је, сваког дана, заливало вртове тако што су довлачили воду из Еуфрата помоћу система полуга и пумпи.

1.2.2. Аквадукти

Аквадукт је вештачки канал за воду, водовод, већа цев за проток воде, постављен преко реке или долине, са одговарајућим грађевинским објектима за премошћавање одстојања [6].

Највећи аквадукт (водени канал) на свету налази се у Француској. У питању је 2000 година стари аквадукт Понт ду Гард који доводи воду до места Нимес. Ова грађевина је 49 m висока, а 275 m дуга. Коцке од којих је мост саграђен су тешке у просеку 6 t, а приликом градње није коришћен малтер.



Слика 7. Понт ду Гард

1.2.2.1. Аквадукти Наисуса

Идеја о довођењу воде у град се први пут појавила код Грка и Феничана, а нешто затим су изграђени аквадукти и у Месопотамији и на простору данашње Либије. Најнапреднији у овој сфери били су Римљани, који су видове експлоатације воде унапредили на веома висок ниво и од аквадукта направили права чуда од грађевине. Најпознатији аквадукт је имао град Рим, а од осталих су били познати и аквадукти у Кампанији и Помпеји. Римљани су градили аквадукте широм свог царства, где год су за то видели повољну прилику, као рецимо и данас видљиви остаци у Швајцарској у Базелу (Аугуста раурицорум) или у Мајнцу (Могунтиацум). Антички Наисус се налазио на територији провинције Горња Мезија, а аквадукте су имали и Сирмиум (Сремска Митровица), Костолац (Виминациум), Царичин град (Иустиниана прима) и др. Углавном је вода служила за сврхе као и данас, за пиће, хигијену и слично.

Посебна пажња се обрађала технологији израде аквадукта, нарочито испитивању извора са кога је требало да се врши водоснабдевање. Након свих сагледавања, одлучивало се да ли је вода корисна и погодна за експлоатацију или не. Изградња аквадукта је захтевала темељан и одговоран прилазак радовима, јер је била веома скупа и није ништа смело да се препушта случају. Одлуку о изградњи и количини средстава која ће бити издвојена за изградњу и снабдевање града водом, доносио је сенат или градско веће. Осим извора, вода се аквадуктима могла спроводити и из оближњих река или језера. Приликом археолошких ископавања у другој половини прошлог века, на територији коју је захватала Медиан, а на потезу где се сада налази структура електронске индустрије, откривена је јединствена грађевина на овим просторима антички водоторањ. Нажалост, остаци ове грађевине нестали су приликом изградње дела електронске индустрије. Остали су само описи и реконструкција археолога који су тада радили на овом локалитету.

Водоторањ се налазио на око 500 m југозападно од најлуксузнијег дела Медиане. Није пронађен извор са којег се напајао водоторањ али се претпоставља да је био на подручју Нишке Бање, која је иначе богата и термалним и другим изворима.

Водоторањ на подручју Медиане може да се опише као резервоар проточно акумулационог типа. Био је укопан у водонепропустљиво земљиште од жуте глине. Функција овог водоторња је била да смирује, таложи и филтрира воду и на крају дистрибуција крајњем кориснику. Дужина водоторња је 47 m, а ширина 7-18,5 m и он се састојао од два базена, једног ширег и другог ужег и краћег. Печишћавање воде је била примарна функција базена, па је дно базена било испуњено слојевима који су служили за филтрирање воде. Торањ је напајан водом из гравитационог канала који је откривен у дужини од 33 m, а од канала је остало очувано само дно. Ширина канала била је око 60 cm а толика је и највећа висина која се могла уочити.

Торањ је снабдеван још једним каналом а од њега је сачуван само део дна водоотпорног малтера. Дно канала једва да је очувано у дужини од 1,5 m, ширине 60 cm. Претпоставља се да је овај канал временом изгубио своју функцију зато што је његово дно на 30 m вишој коти, па се нагађа да је служио као одводни канал од кастелума даље.

1.2.2.2. Барски аквадукт

Барски аквадукт је камени мост, који се налази северно од Старог града - Бар (4 km од центра града) у Црној Гори. Барски аквадукт је једини аквадукт у Црној Гори и један од три највећа и најочуванија аквадукта у бившој Југославији (уз Диоклецијанов аквадукт поред Сплита у Хрватској и Скопски аквадукт у Македонији).

Барски аквадукт је изграђен попут моста, за време Отоманске власти, од XVI до XVII века, служио је да допреми воду са извора на планини Румији удаљеној око 3 км до старог града Бара. Мост носе 17 камених лукова, различите ширине и висине, које носи 17 масивних камених ступова. Водоводне камене цеви положене су на највишој разини аквадукта, оне имају пречник од 12 cm и дуге су 30 cm. Читава грађевина подигнута је од грубо обрађених камених блокова [7].

Након катастрофалног потреса који је погодио Црну Гору 1979. године аквадукт се потпуно урушио. Касније је потпуно обновљен, тако да и данас служи својој основној намени.



Слика 8. Барски аквадукт

1.2.3. Историја водоснабдевања Београда

Најстарији водовод је до данашњег Калемегдана доводио воду из Малог Мокрог Луга. Целу његову путању направили су Римљани, и све се догађало пре безмало две хиљаде година, 85. године нове ере. Канал је био висок 140 - 160 cm, на дну су му биле полегнуте керамичке цеви кроз које је текла вода, а били су остављени посебни отвори да би у тунел озидан опеком могли да уђу мајстори и отклоне евентуални квар.

Канал је дуго постојао и чак је било забележено да је тек изградњом Београда између 1860 и 1870. године пресечен на самом почетку данашњег Булевара револуције, у близини Ташмајдана. И тада је још овај водовод снабдевао Фишеклијску чаршију и делимично двор, а садашњи Пионирски парк.

Водоснабдевање и наводњавање се, као што се види, кроз историју врло брзо и напредно развијало, сходно томе савремен начин живота је захтевао да се ова област подигне на виши ниво и да се детаљно научно размотри и истражи. У наредном поглављу биће представљена научна дисциплина која обухвата и изучава ову област и назива се хидраулика.

2. ХИДРАУЛИКА И ЊЕНИ ОСНОВНИ ЗАКОНИ

2.1. О хидраулици

Хидраулика је примењена наука и инжењерска дисциплина, која се бави механичким особинама течности. Механика флуида је теоријска основа хидраулике (која се концентрише на инжењерску употребу особина течности). Преко притиска у течности преносе се силе, базирајући на једноставној једначини: $p = F/A$, при чему су: p - притисак, F - сила и A - површина на коју притисак делује. У хидроенергији, хидраулика се користи за производњу, контролу и пренос снаге преко течности под дејством притиска. Хидраулика се бави многим темама, које се крећу кроз мноштво научних и инжењерских дисциплина и покривају концепте као што су пумпе, водене турбине, хидроенергија, динамика флуида, мерење и механика речних токова и ерозије [8].

Хидраулика се такође дефинише као физички опис флуида у кретању који се базира на законима конзервације масе, момента и енергије. Математички опис тих закона може се формирати са теоријске тачке гледишта и употребом напредне математике. Резултати који се добијају оваквим приступом могу бити многоструке природе. За практичну примену и инжењеринг хидрауличких система ти физички принципи се замењују емпиријским и експерименталним приступом, на шта се, у ствари, обично и односи појам хидраулика.

2.2. Примена хидраулике

Примена хидраулике врло је разнолика и свеprisутна, што се најбоље може видети на слици 9. Управо због присутности хидраулике, како у индустрији, тако и у транспорту, стање тржишта хидраулике у некој земљи, или на неком подручју, добар је индикатор укупног стања економије и тржишта, па се трендови развоја економије и тржишта могу уочити из тржишних трендова хидраулике.

Углавном, хидраулика се дели на мобилну и стационарну. Због својих специфичности (температура окружења, питање величине, итд.), хидраулички уређаји намењени мобилној и стационарној хидраулици често се разликују. Ваздухопловна хидраулика понекад се, опет због својих специфичности (сигурност, распон температуре околине), сврстава као посебна целина. Како је основна предност хидраулике њена специфична снага, логично је да хидраулика превладава у мобилним применама. Тако се може проценити да се око 75 % вредности тржишта хидраулике односи на мобилну хидраулику. Иначе, вредност тржишта хидраулике и пнеуматике за 2006. годину износи око 27 милијарди €. При томе тржиште хидраулике чини 72 % вредности, а остатак је пнеуматика.

Што се тиче прогноза за будућност, може се очекивати даљи раст тржишта хидраулике. Пад тржишта током кризе (од 2008. године па надаље) у најразвијенијим земљама (Европа, Северна Америка и Јапан) добро су надокнадили земље с убрзаним развојем (Кина, Индија, Бразил, Русија), тако да се и расподела тржишног колача променила њима у корист. Током последње деценије (и дуже) тренд је замена хидраулике електричним машинама. То је мање изражено у транспортним применама, где величина машина није толико критична.

Треба додати да, упркос замени хидрауличких машина електричним, сва предвиђања очекују значајан раст тржишта хидраулике и пнеуматике у годинама што долазе (очекивани пораст је преко 40% у раздобљу од 2006. до 2017. године, према извештајима „Global Industry Analysts, Inc.“). Очито је да апсолутно проширење потражње за разним погонима и преносницима, уопште мехатронике, узрокује релативан пад хидраулике.

Новија истраживања говоре о тржишту хидраулике и пнеуматике у вредности од око 13 милијарди € само у Европи, са сличним односом вредности хидраулике (73%) и пнеуматике (27%) [9].



Слика 9. Подручја примене хидраулике

2.3. Основни закони хидростатике и хидродинамике

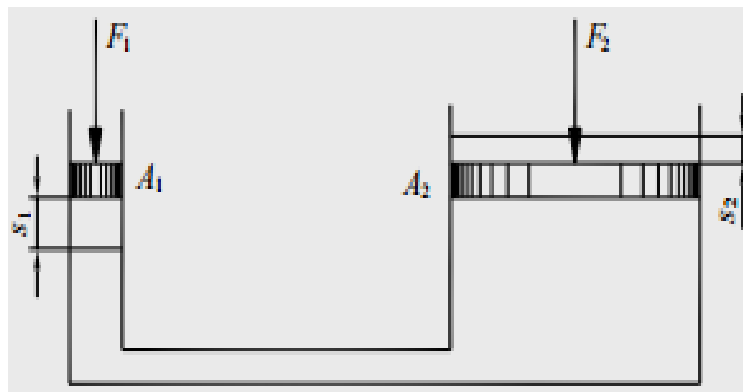
Хидраулика је наука која се бави техничком применом хидромеханике, тј. механике флуида. Хидромеханика се дели на:

- хидростатику - закони течности у равнотежи и,
- хидродинамику - закони течности у покрету.

2.3.1. Паскалов закон

Паскалов закон је закон по којем се притисак у течностима шири на све стране подједнако, па већа површина трпи већи притисак. Колико је пута површина мањег клипа већа од површине већег клипа, толико ће пута бити повећање силе F_2 у односу на силу F_1

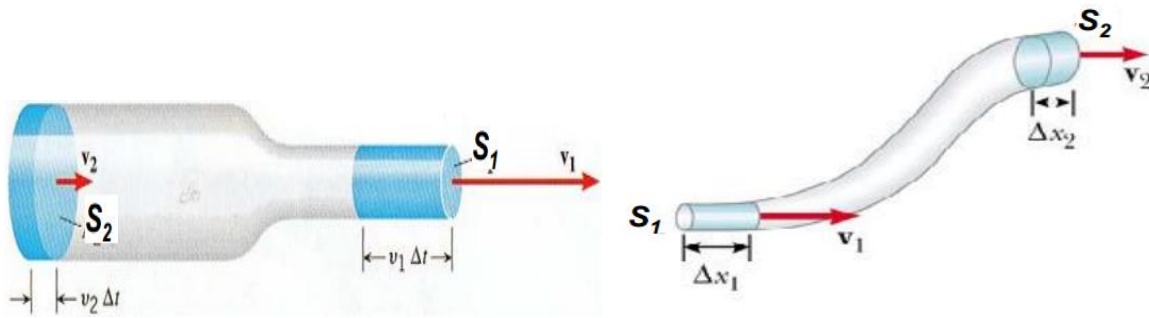
$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2} ; \quad F_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1} . \quad (2.1)$$



Слика 10. Паскалов закон

2.3.2. Једначина континуитета - закон о одржању масе

У општем, тј. реалном случају, када је флуид стишљив (има различиту запремину, па тако и густину у различитим деловима струјне цеви), узима се да је масени проток флуида на два различита пресека струјне цеви једнак (колика маса флуида прође кроз један попречни пресек струјне цеви, толика маса мора проћи у јединици времена и кроз било који други попречни пресек). Због особине нестишљивости, запремине протеклог флуида на два различита пресека струјне цеви су једнаке.



Слика 11. Струјне цеви у којој се пресек S мења

$$Q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{S \Delta l}{\Delta t} = \frac{S v \Delta t}{\Delta t} = S v ; \quad V_1 = S_1 v_1 \Delta t ; \quad V_2 = S_2 v_2 \Delta t .$$

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 ; \quad V_2 = S_2 v_2 \Delta t ; \quad V_1 = V_2 \rightarrow S_1 v_1 = S_2 v_2 \quad \rightarrow S v = const.$$

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta t} = \rho_1 S_1 v_1 ; \quad \frac{\Delta m_2}{\Delta t} = \rho_2 S_2 v_2 ; \quad \frac{\Delta m_1}{\Delta t} = \frac{\Delta m_2}{\Delta t} \rightarrow \rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2 .$$

$$\rho S v = const. \quad - \text{једначина континуитета} \quad (2.2)$$

2.3.3. Бернулијева једначина

Бернулијева једначина је једна од основних математичких једначина механике флуида и хидраулике уопште. Описује Бернулијев принцип, односно дефинише међусобну везу између притиска или потенцијалне енергије флуида и његове брзине или његове кинетичке енергије, у струјној цеви. Бернулијева једначина служи управо за описивање овог принципа и израчунавање параметара везаних за проток флуида, у овом случају проток течности. Постоји више облика Бернулијеве једначине које описују разне врсте протока флуида. Најједноставнији облик Бернулијеве једначине се односи на случај када је густина константна (код течности). Струјање течности је последица деловања спољашњих сила. Рад спољашњих сила мења кинетичку и потенцијалну енергију течности [10].

Нека је Δm маса потиснутог (нестисљивог) флуида за време Δt у било ком пресеку струјне цеви

$$V_1 = V_2 = \frac{\Delta m}{\rho} ; \quad \Delta m = \rho S_1 v_1 \Delta t = \rho S_2 v_2 \Delta t \quad - \text{зампремина флуида } \Delta V \text{ у времену } \Delta t .$$

$$V_1 = V_2 = \frac{\Delta m}{\rho} ; \quad \Delta m = \rho S_1 v_1 \Delta t = \rho S_2 v_2 \Delta t ;$$

$$\Delta E_k = \frac{\Delta m v_2^2}{2} - \frac{\Delta m v_1^2}{2} ; \quad \Delta E_p = \Delta m g h_2 - \Delta m g h_1 ,$$

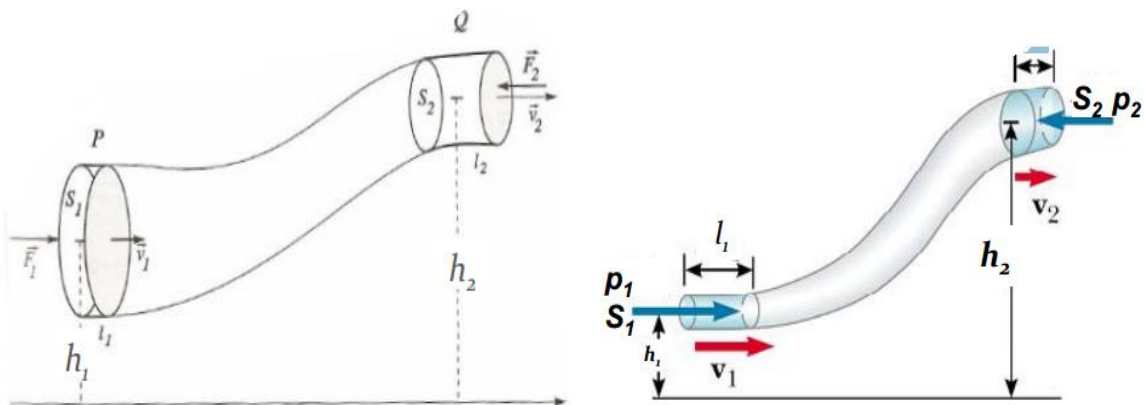
⇓

$$\Delta V = S_1 v_1 \Delta t = S_2 v_2 \Delta t = \frac{\Delta m}{\rho} .$$

силе притиска $F = p \cdot S$ и рад сила притиска $A = F \cdot s$

$$\Delta A_1 = F_1 \Delta S_1 = p_1 S_1 v_1 \Delta t = p_1 \frac{\Delta m}{\rho} \quad \Delta A_2 = -F_2 \Delta S_2 = -p_2 S_2 v_2 \Delta t = -p_2 \frac{\Delta m}{\rho}$$

$$\Delta A = \Delta A_1 + \Delta A_2 = (p_1 - p_2) \frac{\Delta m}{\rho}$$



Слика 12. Принцип Бернулијеве једначине

На основу закона одржања енергије, промена укупне енергије флуида ΔE је једнака раду спољашњих сила ΔA . У флуиду нема трења па је

$$\Delta A = \Delta E . \quad (2.3)$$

ΔA - рад спољашњих сила

ΔE - промена кинетичке и потенцијалне енергије

Уврштавањем $E_k = \frac{mv^2}{2}$ и $E_p = mgh \Rightarrow \Delta E = \frac{\Delta m v_2^2}{2} - \frac{\Delta m v_1^2}{2} + \Delta m g h_2 - \Delta m g h_1 .$

Из израза (2.2) и (2.3) следи

$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \rho gh_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} \text{ или још краће}$$

$$p + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const.} - \text{Бернулијева једначина} \quad (2.4)$$

p - статички притисак због спољшњих сила

ρgh - хидростатички притисак због висинске разлике елемента флуида

$\frac{\rho v^2}{2}$ - динамички притисак због кретања флуида

Код стационарног струјања нестишљивог флуида збир статичког, висинског и динамичког притиска дуж струјне цеви је сталан, тј. сума притиска p , кинетичке енергије по јединици запремине $\rho v^2/2$ и потенцијалне енергије по јединици запремине ρgh нестишљивог флуида има константну вредност дуж струјне цеви.

2.3.4. Примена Бернулијеве једначине

2.3.4.1 Торичелијева теорема (истицање течности кроз мале отворе)

Применом Бернулијеве једначине на примеру истицања течности из широког отвореног суда кроз отвор добијамо:

$$\frac{1}{2} \rho v_2^2 + p_0 + \rho gh_2 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 + p_0 + \rho gh_1 ,$$

одакле следи израз

$$v_2^2 = v_1^2 + 2g(h_2 - h_1) = v_1^2 + 2gh .$$

Из једначине континуитета имамо

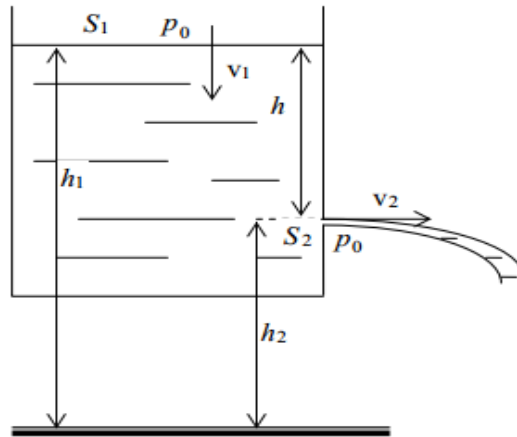
$$v_1 = \frac{S_1}{S_2} v_2 \approx 0 ,$$

из разлога што је

$$v_2 = \sqrt{2gh} . \quad (2.5)$$

Торичелијева теорема: брзина истицања течности из широког и отвореног према атмосфери суда кроз мали отвор, који се налази на вертикалном растојању H од нивоа слободне површине, једнака је брзини слободног пада тела са исте висине.

Дакле, брзина истицања течности из широког суда једнака је брзини коју тело добија при слободном паду које пада са висине која је једнака растојању места на коме течност истиче од нивоа течности у широком суду (кога можемо сматрати константним).



Слика 13. Истицање течности кроз мале отворе

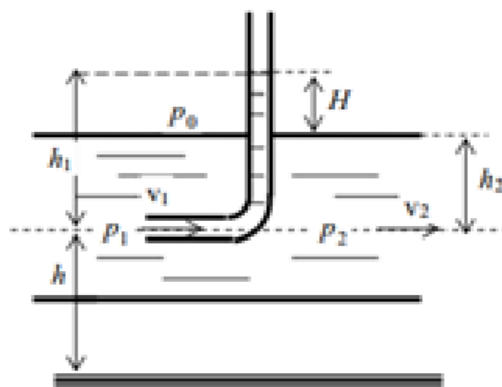
2.3.4.2. Питова цев

Питова цев (сл. 14) се користи за мерење брзине протока флуида. Применом Бернулијеве једначине на месту отвора цеви и далеко изван ње на истој висини у односу на референтни ниво добија се

$$\frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2 + \rho gh = \frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 + \rho gh . \quad (2.6)$$

На отвору цеви флуид мирује, док статички апсолутни притисци у датим тачкама простора износе

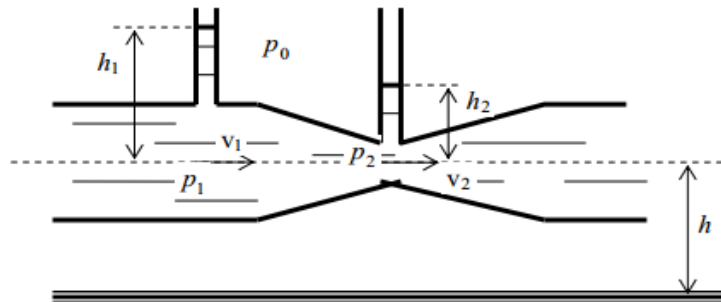
$$p_1 = p_0 + \rho gh_1 , \quad p_2 = p_0 + \rho gh_2 . \quad (2.7)$$



Слика 14. Питова цев

2.3.4.3. Вентуријева цев

Изглед Вентуријеве цеви приказан је на слици 15. Састоји се од једног сужења које је уметнуто у цев и које је изведено тако да се избегавају турбуленције на улазу и излазу из сужења [11].



Слика 15. Вентуријева цев

Применом Бернулијевој једначини на пресецима испод уметнутих вертикалних цеви добијамо:

$$\frac{1}{2} \rho v_2^2 + p_2 + \rho g h = \frac{1}{2} \rho v_1^2 + p_1 + \rho g h ,$$

где су

$$p_1 = p_0 + \rho g h_1 , \quad p_2 = p_0 + \rho g h_2 .$$

Из једначине континуитета имамо да је

$$v_2 = \frac{S_1}{S_2} v_1 .$$

И добијамо брзину протока флуида

$$v_1 = \sqrt{\frac{2gH}{(S_1/S_2)^2 - 1}}, H = h_1 - h_2 . \quad (2.8)$$

2.4. Струјање течности

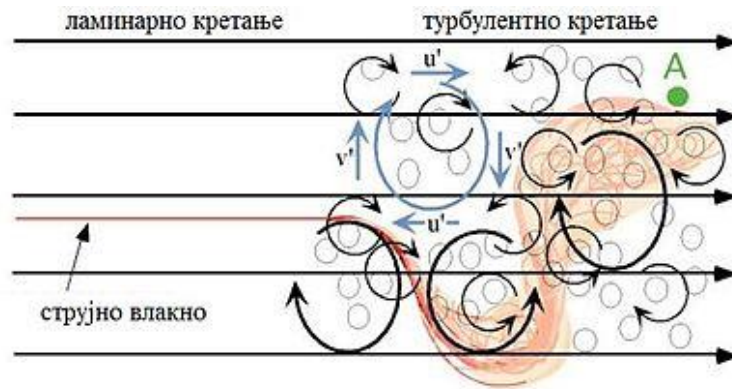
Стање флуида који струји одређено је густином, притиском и брзином. Једначина континуитета представља облик закона одржања масе. За исто време кроз сваки пресек цевног вода протекне иста маса. Одавде се добија да је код нестишљивог флуида који се креће брзином v кроз попречни пресек S , проток Q , константан:

$$Q = S_v = const. \quad (2.9)$$

Сужењем пресека повећава се брзина струјања флуида. Брзине у два пресека односе се обрнуто пропорционално површинама пресека. Проток се може мерити непосредно и посредно.

Непосредно мерење протока заснива се на мерењу масе или запремине која протекне у јединици времена. Струјање флуида може бити:

- слојевито - ламинарно, и
- вртложно-турбулентно.



Слика 16. Ламинарно и турбулентно кретање течности

2.4.1. Ламинарно струјање течности

Стационарно струјање је струјање када се свака честица флуида која се нађе у некој струјној линији наставља да се креће у правцу струјнице као и претходна честица, тј. ако се слика струјнице у току времена не мења. Код стационарног струјања, струјнице се не мењају у току времена и поклапају се са путањом честица флуида. Ако постоји стационарни ток, то не значи да се брзина једне честице флуида неће променити у различитим тачкама струјнице. Управо закривљене линије описују те промене.

Било који флуид може протицати (струјати) стационарно ако су испуњени општи услови [12]:

1. брзина је довољно мала и,
2. препреке су такве да не узрокују превише нагле промене брзине.

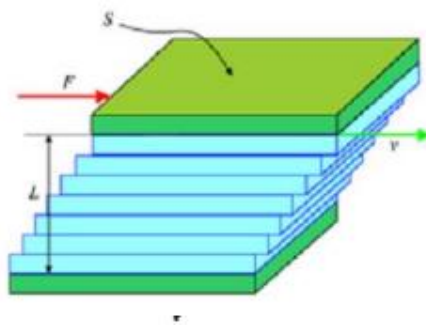
Уколико ови услови нису испуњени, протицање флуида знатно је сложеније и то струјање називамо турбулентно. Облик струјних линија зависи од тога ког је тела облика, тако да то доводи до тога да ће струјне линије имати најправилнији облик код тела у облику рибе/авионског крила, док код тела у облику лопте струјнице имају потпуно дргачији облик.

Иза тела настају турбуленције (вртлози,) тако да то чини да струјнице више нису паралелне. Највећи вртлози настају код кретања равне плоче.

2.4.1.1 Вискозност

Вискозност је појава унутрашњег трења које се јавља између слојева течности при ламинарном (слојевитом) кретању.

Када се прати протицање течности кроз цев, показује се да се сви делови течности не крећу истом брзином. Највећу брзину имају делови течности дуж осе цеви, а најмању делови уз зидове цеви. Течност се кроз цев не креће као целина, него у слојевима који клизе један по другоме различитим брзинама. При протицању течности као да долази до њеног „раслојавања“. Нешто слично се дешава и при кретању, на пример равне даске, танкера или справа по мирном језеру. Када се тело покрене, почиње и вода да се креће, али не као целина, већ по деловима (слојевима) који имају различите брзине. Повећањем растојања од пловног објекта брзина слојева течности се смањује. У течностима се јављају и силе које се супротстављају кретању тела кроз течности. Набројане чињенице и појаве објашњавају се као последица постојања силе унутрашњег трења у течностима, вискозност. Сила вискозности успорава протицање течности и кретање тела кроз течност.



Слика 17. Вискозност

2.4.1.2. Њутнов закон за вискозност

Унутрашњи отпор течности се може дефинисати преко силе вискозности уколико је протицање те течности ламинарно. То значи да слојеви течности „клизе“ један по другоме, али тако да течност из једног слоја не прелази у други. Сила вискозног кретања зависи, пре свега, од врсте течности. На пример, док вода код које је та сила релативно слаба, врло брзо истекне из неке посуде, иста количина уља истицаће из исте посуде веома споро. Са порастом температуре, вискозност течности опада.

Сила вискозног трења F је сразмерна додирној површини између слојева S , а обрнуто сразмерна градијенту брзине dv/dz (промена брзине дуж правца нормалног на брзину кретања)

$$F = \eta S \frac{dv}{dz}, \quad (2.10)$$

- η - коефицијент динамичке вискозности, Pas
- ν - коефицијент кинематичке вискозности, m^2/s .

2.4.1.3. Стоксов закон вискозности - отпор средине

Сила вискозности течности утиче на кретање тела која се у њој налазе (подморница, ронилац). Наиме, течност пружа отпор таквом кретању, а тај отпор потиче од вискозности. Танак слој течности „прилепљен“ за тела креће се заједно са телом и истом брзином као тело. Услед тога се покрећу и остали слојеви течности. Сила отпора средине (унутрашњег трења) пропорционална је брзини кретања тела

$$F = k \cdot v \quad (2.11)$$

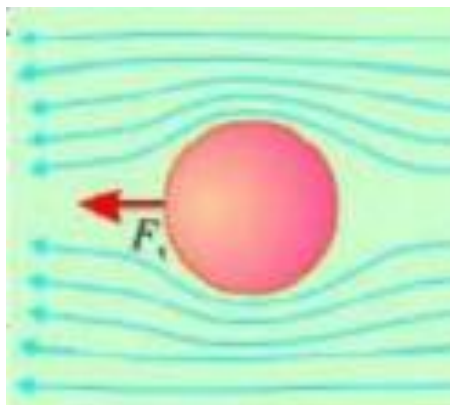
k - коефицијент сразмерности који зависи од облика и димезија тела које се креће и вискозности средине кроз коју се тело креће. За тело сферног облика полупречника r :

$$k = 6\pi\eta r$$

За куглу радијуса R која се креће у флуиду брзином v важи

$$F_r = 6\pi\eta Rv \quad (2.12)$$

што представља Стоксову формулу.



Слика 18. Уз Стоксову формулу

2.4.2. Турбулентно струјање течности

Турбуленција је неправилно вртложно струјање које се јавља у течности када се оно успорава због проласка поред чврстих тела или када брзина струјања прелази одређену границу. За турбулентно струјање карактеристично је да поред средње брзине струјања, свака честица течности има још и додатну брзину која може бити делимично у смеру главног струјања, делимично супротна смеру струјања. По томе се разликује турбулентно од ламинарног струјања, у којем нема додатних брзина. Под одређеним условима уз турбуленцију појављује се и кавитација.

У атмосфери је струјање ваздуха (ветра) готово увек турбулентно. Турбулентно кретање се јавља при већим брзинама, јавља се због препрека на путу, наглих промена брзина, вискозности. Бездимензиони Рејнолдсов критеријум омогућава одређивање режима струјања.

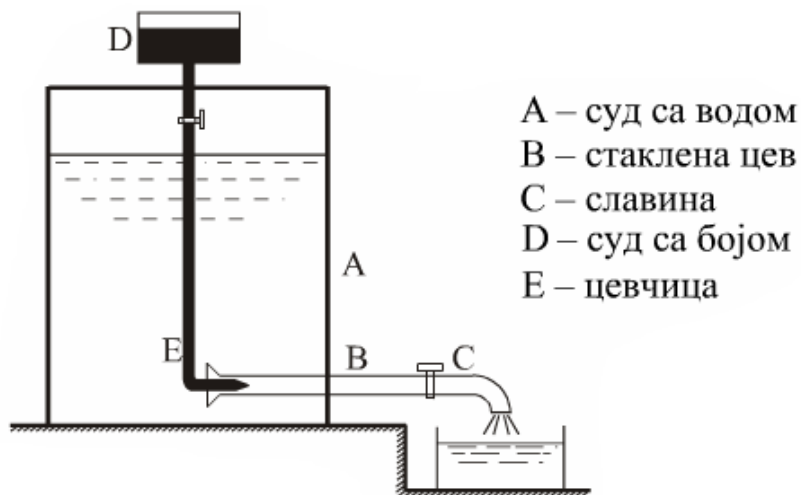
Посматрањем струјног влакна, у зависности од брзине којом вода протиче кроз цев може се уочити један нов феномен, постојање неправилних флукуационих импулса чији утицај на стабилност тока расте са порастом брзине. У области малих брзина, флукуациони импулси су веома слабо изражени и влакно мирно и глатко тече дуж цеви [13].

Повећањем брзине, повећава се и утицај импулса, влакно прво почиње да се повија, а при још већим брзинама да се кида. Квалитативна и квантитативна испитивања су показала да је појава кидања нити управо пропорционална средњој брзини струјања флуида у цеви (w), пречнику цеви (d) и густини флуида (ρ), а обрнуто пропорционална вискозитету флуида (μ) а да кидање нити настаје онда када количник ових величина достигне вредност од око 2000. Овај бездимензионални количник и данас познајемо као Рејнолдсов број Re

$$Re = \frac{d \cdot w \cdot \rho}{\mu} . \quad (2.13)$$

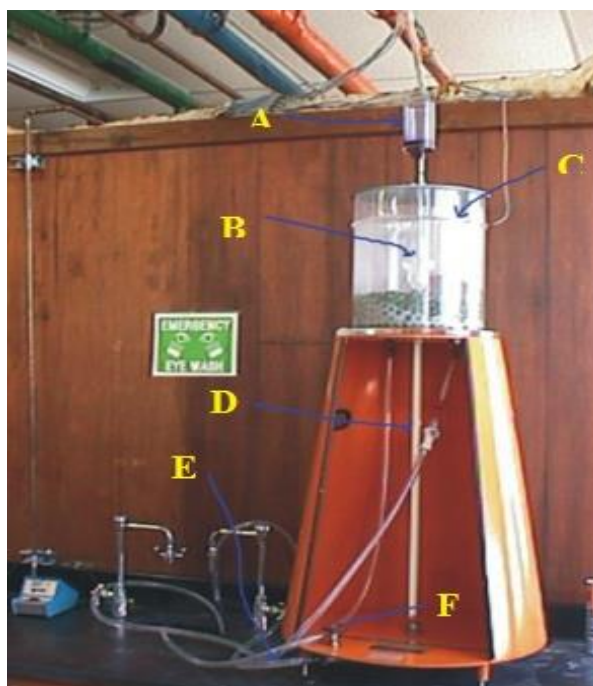
Рејнолдсов број је бездимензиона величина и кључни параметар струјања вискозног флуида. Тим бројем се дефинише граница између ламинарног и турбулентног струјања. На његову бројну вредност утиче више параметара струјања флуида. Користи се за довођење карактеристика струјања на упоредиве услове. Физички смисао Рејнолдсовог броја је однос инерцијалних и вискозних сила флуида.

Када се ради о струјању флуида кроз цеви кружног пресека, оно је при $Re \leq 2300$ ламинарно. У овоме режиму слојеви флуида глатко клизе један преко другог и у њему се количина кретања преноси само молекулским механизмом. Прекорачењем $Re = 2300$ улази се у област у којој све изразитије постаје учешће другог-конвективног механизма преноса количине кретања који потпуно преовладава при $Re \geq 10000$ када струјање постаје изразито турбулентно.



Слика 19. Рејнолдсов експеримент

Турбулентно струјање окарактерисано је, како је то Хинце предложио, као „...неравномерно стање струјања у коме параметри струјања подлежу наасумичним проценама у времену и простору, при чему се статистичким методама ови параметри могу усредњити...“. Испитујући феномен турбуленције, Тејлор и Карман дошли су до закључка да турбуленција настаје услед успостављања градијента брзине који настаје или услед присуства непокретне чврсте површине у струјном пољу (зидна турбуленција), или услед успостављања градијента брзине у слободном току (слободна турбуленција) [14].



Слика 20. Принцип Рејнолдсовог експеримента

A - Суд са бојом;

B - Течност струји глатко кроз улазни отвор облика левка и боја се уводи кроз цеб која излази на центру;

C - Одвод воде који обезбеђује константан ниво течности;

D - Ламинарно или турбулентно струјање се посматра у овој цеви и оно зависи од брзине струјања;

E - Брзина струјања се одређује на основу времена потребног да се напуни суд одређене запремине;

Φ - Вентил за контролу брзине струјања.

Као што се може приметити, хидраулика је веома значајна наука и има широку примену, како у транспорту, тако и у индустрији, а и у осталим областима. Од посебног значаја су случајеви где течност истиче кроз отворе, преливе или релативно кратке цеви - наглавке. Због тога је, у трећем поглављу овог рада, детаљно истражен и приказан теоријски аспект истицања течности кроз отворе, наглавке и преливе, као и њихова примена у пракси, која је од велике користи за људе.

3. ИСТИЦАЊА ТЕЧНОСТИ КРОЗ ОТВОРЕ, НАГЛАВКЕ И ПРЕЛИВЕ

Проучавање кретања течности за време истицања кроз отворе, наглавке и преливе је од великог интереса за инжењерску праксу. Истицање као појам, у механици флуида представља анализу кретања флуида за време пражњења или пуњења суда (резервоара) кроз отворе, преливе или релативно кратке цеви - наглавке. То подразумева да се прорачуни отвора хидротехничких објеката, прорачуни пуњења и пражњења устава, танкера, цистерни за гориво и друге течности, као и разних других покретних или стабилних резервоара, заснивају се на познавању закона о истицању. Као што је већ речено у претходном делу овог рада, истицање течности међу првима је проучавао Торичели (*Toricelli*).

Услови истицања течности кроз отворе и наглавке могу да буду веома различити. Наиме, 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.

Као и свако друго кретање течности, и истицање мора да савлада разне отпоре кретању и на тај начин се троши одређена струјна енергија. Енергија се губи, током овог кретања, јер је губитак условљен локалним отпором у самом отвору, јер се трење најјаче испољава баш на ивицама отвора.

3.1. Подела отвора и основне карактеристике истицања

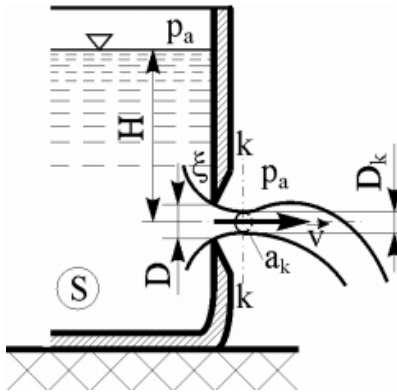
Отвори се, према примарој класификацији, на основу величине отвора и попречног пресека суда, деле на мале и велике. Код малих отвора брзине у свим тачкама попречног пресека струје течности (млаза) по изласку из отвора међусобно су приближно једнаке, јер се брзина течности по пресеку отвора мења врло мало. Док, код великих отвора, та промена брзине по пресеку млаза течности је се више примећује. Експерименти су показали да отвор може бити мали ако је испуњен услов

$$D \leq 0,1 H,$$

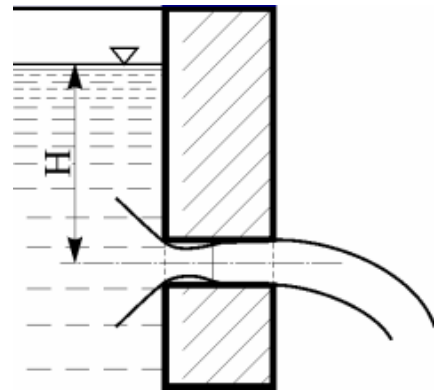
где је D пречник отвора (или је то вертикална димензија отвора, ако исти није кружног облика).

Следећа подела отвора је према дебљини зида, где се разликују отвори у танким и отвори у дебелим зидовима. При истицању кроз отвор у танком зиду постоји само локални оптор услед оштрих ивица отвора. Истицање кроз отвор оштрих ивица (сл. 21) ни по чему се не разликује од истицања кроз отвор у такном зиду, јер и у том случају крајње струјнице млаза не додирују спољашње ивице отвора, а млаз се понаша као слободан. Што говори да разлика при истицању кроз отворе у танком и дебелом зиду настаје само због облика ивица отвора у самом зиду, а не због дебљине зидова. Ако

отвор у дебелом зиду нема оштре ивице (сл. 22), тада граничне струјнице млаза, после извесне дужине, додирују зидове отвора који надаље утичу на млаз одређујући његов облик. У овом је случају истицање слично истицању течности кроз млазник [1].

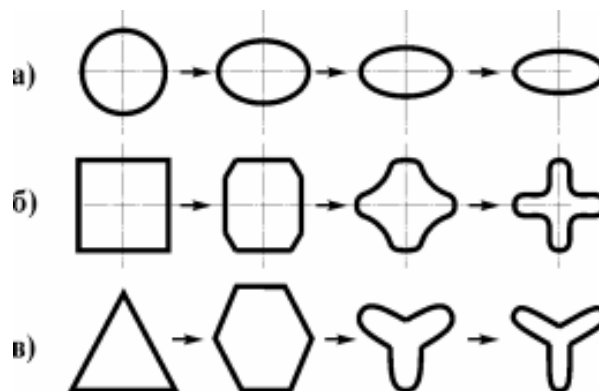


Сл. 21. Истицање кроз мали отвор оштрих ивица



Сл. 22. Истицање кроз мали отвор у дебелом зиду

Делићи течности улазе у отвор под неким углом према површи зида, јер не могу, при уласку у отвор за време истицања, нагло да скрену за под правим углом. При томе су трајекторије делића течности у облику кривих линија са великом кривином. Кривина трајекторија (односно струјница при устаљеном струјању) се смањује у тренутку када течност изађе из отвора и на извесном растојању од отвора (пресек к-к на сл. 23) струјнице су међусобно паралелне. Због тога је попречни пресек млаза у близини отвора мањи од попречног пресека самог отвора. То значи да се млаз непосредно после отвора са оштрим ивицама сужава, а убрзо након тога пада услед дејства Земљине теже. Ова појава се назива контракцијом млаза. Експерименти су показали да се, у случају малих отвора оштрих ивица, највећа контракција млаза јавља на растојању $D/2$ од унутрашње површи зида суда и да је пречник суженог пресека млаза приближно једнак $D_k = 0,8 D$.



Слика 23. Инверзија млаза

Појаву контракције млаза карактерише коефицијент контракције ψ који представља однос површина најужег пресека млаза a_k и пресека отвора a и за случај кружног отвора има вредност:

$$\psi = \frac{a_k}{a} = \left(\frac{D_k}{D} \right)^2 = \left(\frac{0,8D}{D} \right)^2 = 0,64 . \quad (3.1)$$

Током истицања, сем контракције, долази још и до једне појаве која се назива преображајем или инверзијом млаза. Пошто се облик пресека млаза надаље мења, само је облик попречног пресека млаза у близини отвора сличан облику самог отвора. То може да се види на примеру кружног пресека који се деформише у вертикално издужену елипсу (сл. 23 а). При истицању кроз отвор у облику квадрата, млаз добија крстаст облик (сл. 23 б); док се млаз у облику троугла деформише у трокраку звезду (сл. 23 в).

3.2. Истицање течности кроз мале отворе оштрих ивица при сталном нивоу

Из суда S (сл. 21) истиче течност у атмосферу кроз мали отвор оштрих ивица. Претпоставља се да се дотицањем течности у суду одржава ниво на сталној висини, $H = \text{const}$; па је истицање течности устало.

Брзина којом течност истиче у овом случају, одређена је Торичелијевим обрасцем. За ову врсту истицања рађена су мерења, која су показала да је стварна брзина истицања увек нешто мања од брзине коју даје Торичелијева формула. Вискозност течности је објашњење овог неслагања и она доводи до губитка енергије и смањења брзине.

За одређивање стварне брзине истицања течности треба узети у обзир и губитак енергије услед оштрих ивица отвора; па проширена Бернулијева једначина, написана за ниво воде у резервоару и за пресек млаза, гласи :

$$\frac{p_a}{\rho} + g \cdot H = \frac{v^2}{2} + \frac{p_a}{\rho} + \xi \frac{v^2}{2} . \quad (3.2)$$

Овде је ξ коефицијент отпора услед оштрих ивица отвора. При постављању Бернулијеве једначине узето је у обзир да млаз истиче у атмосферу и да је притисак у млазу једнак атмосферском притиску. Из овога следи да је коефицијент φ дефинисан изразом

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi}} , \quad (3.3)$$

и назива се коефицијентом брзине. За воду и кружне отворе овај коефицијент има вредност $\varphi = 0,96 - 0,99$. Најчешће се при прорачунима истицања користи средња

вредност овог коефицијента $\varphi = 0,97$; на основу које се налази да је $\xi = 0,06$. За $\varphi = 1$ израз за стварну брзину истицања своди се на Торичелијеву формулу.

Ако се средња брзина истицања помножи површином a попречног пресека отвора, добија се

$$Q' = va = \frac{D^2 \pi}{4} \varphi \sqrt{2gH} . \quad (3.4)$$

Проток који се добије на овакав начин је доста већи од протока који се добија путем мерења. Узрочник контракције млаза при истицању управо је та поменута разлика између израчунатог Q' и стварног протока Q . Будући да се израз за брзину v истицања течности односи на брзину у суженом пресеку к-к млаза, површине a_k , то стварни проток при истицању износи

$$Q = \varphi a_k \sqrt{2gH} ,$$

или дефинитивно

$$Q = \mu a \sqrt{2gH} , \quad (3.5)$$

где је коефицијент μ одређен релацијом $\mu = \varphi \psi$ и назива се коефицијентом протока.

Очигледна чињеница у овом случају је да је стварни проток за 38% мањи од протока који се добија када се попречни пресек отвора помножи са "теоријском" брзином истицања, одређеном Торичелијевом формулом. То је огромно одступање и оно је, као што је већ речено, проузроковано контракцијом млаза и вискозношћу течности.

Проблем контракције млаза решаван је и теоријским путем (конформним пресликавањем). Добијен је резултат у облику изрази

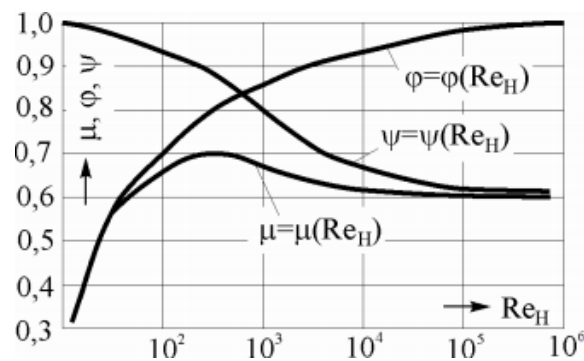
$$\psi = \frac{\pi}{\pi + 2} \approx 0,611,$$

који представља Кирхофову (Kirchhoff) формулу и који релативно добро одговара стварности.

Коефицијенти брзине φ , контракције ψ и проток μ зависе пре свега од врсте и величине отвора, а затим и од Рејнолдсовог броја, показано је кроз веома детаљно и тачно спроведене експерименте. На сл. 24 графички је приказана зависност ових коефицијената од Рејнолдсовог броја дефинисаног као

$$Re_H = \frac{v_T \cdot D}{\nu} = \frac{D \cdot \sqrt{2gH}}{\nu}, \quad (3.6)$$

и то за кружне отворе. Како се види из приложеног дијаграма, коефицијент протока првобитно расте, достиже максималну вредност ($\mu_{\max} = 0,69$ за $Re_H = 350$) и након тога опада. Из дијаграма се даље види да су, при $Re_H > 100000$, сва три коефицијента практично константна. Зато се за мање вискозне течности (као што су вода, бензин, керозин и сл.), код којих се при истицању и постижу велике вредности Рејнолдсових бројева, може сматрати да су поменути коефицијенти константни и да износе: $\varphi = 0,97$; $\psi = 0,64$; $\mu = 0,62$.



Слика 24. Зависност коефицијента истицања од Рејнолдсовог броја

Вредности коефицијента протока могу се врло лако одредити и мерењем, где се мери проток Q , површина a отвора и висина H течности. Затим се овај коефицијент рачуна према обрасцу

$$\mu = \frac{Q}{a\sqrt{2gH}}. \quad (3.7)$$

На основу овог обрасца и експерименталних резултата, може се закључити:

- да μ опада када H расте,
- да μ опада када a расте, и
- да μ зависи од облика отвора.

При истој вредности површине, највеће μ је за правоугаоник, а најмање за круг, па за квадрат. При већем односу ширине према висини правоугаоника, μ је веће.

3.3. Истицање течности кроз велике отворе

Брзина истицања течности, код великих отвора, није константна по његовом пресеку. Напротив, брзина се знатно мења повећавајући се од горње према доњој ивици отвора (сл. 25). Брзина по пресеку млаза одређена је сложеним законом.

Брзина се може сматрати константном само на површини

$$dA = x(z)dz = dA(z).$$

Због тога се сматра да се велики отвор састоји из безброј малих отвора површине dA . Елементарни проток кроз сваки од малих отвора може да се напише у облику израза

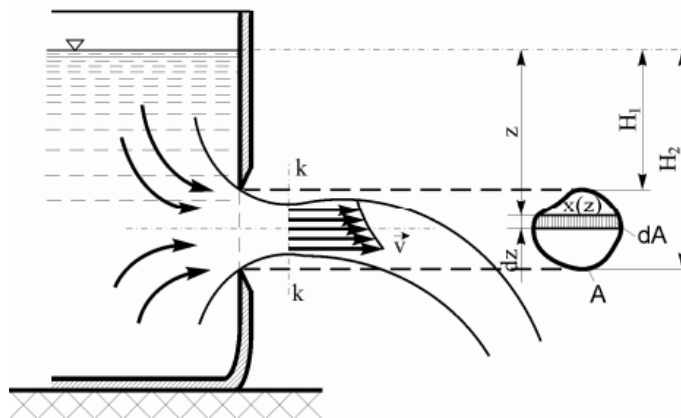
$$dQ = \mu_i \sqrt{2gz} x(z) dz.$$

Како је проток течности кроз велики отвор једнак збиру елементарних протока кроз све мале отворе који чине велики отвор, то је укупни проток одређен интегралом

$$Q = \int_{H_1}^{H_2} \mu_i \sqrt{2gz} x(z) dz,$$

па израз за проток кроз велики отвор може да се напише као

$$Q = \mu \sqrt{2g} \int_{H_1}^{H_2} x(z) \sqrt{z} dz. \quad (3.8)$$



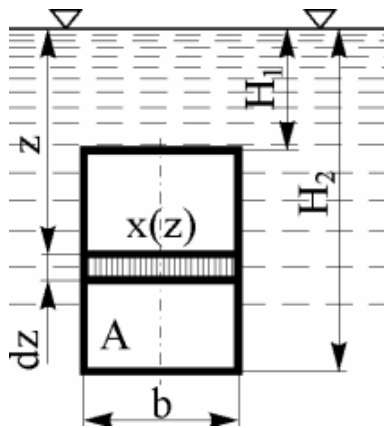
Слика. 25. Истицање кроз велики отвор

Ако, на пример, течност истиче кроз велики отвор у облику правоугаоника (сл. 26), онда је $x(z) = b = \text{const.}$, па је проток кроз овај отвор

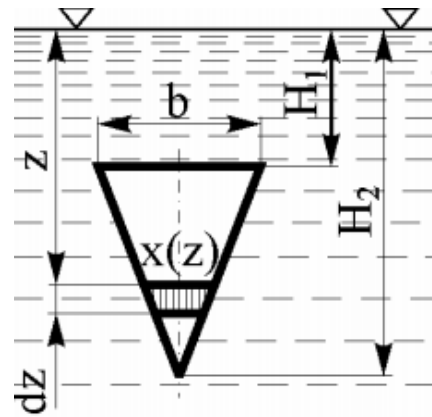
$$Q_p = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} (H_2^{3/2} - H_1^{3/2}). \quad (3.9)$$

За случај да течност истиче кроз велики отвор облика равнокраког троугла основице b и висине $h = H_2 - H_1$ (сл. 27), то се из услова сличности троуглова добија да је елементарна површина

$$dA(z) = x(z)dz = \frac{b}{h} (H_2 - z) dz. \quad (3.10)$$



Сл. 26. Истицање кроз велики правоугаони отвор



Сл. 27. Истицање кроз велики отвор у облику троугла

Из израза за елементарни проток

$$dQ = \mu \sqrt{2gz} dA(z),$$

добиа се проток кроз отвор у облику троугла као

$$Q_t = \mu \sqrt{2g} \frac{b}{h} \int_{H_1}^{H_2} (H_2 - z) \sqrt{z} dz.$$

Решавањем интеграла у изразу за проток налази се коначно да је

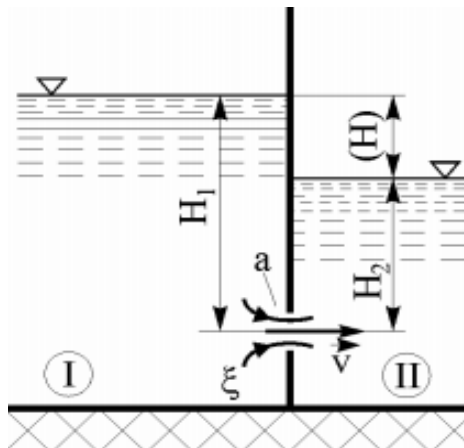
$$Q_t = \frac{b}{H_2 - H_1} \mu \sqrt{2g} \left(\frac{4}{15} H_2^{5/2} - \frac{2}{3} H_2 H_1^{3/2} + \frac{2}{5} H_1^{5/2} \right). \quad (3.11)$$

Када се основица великог отвора у облику троугла поклапа са нивоом течности ($H_1 = 0$, $H_2 = H = h$) израз за проток се знатно поједностављује и гласи

$$Q_t = \frac{4}{15} \mu b \sqrt{2g} H^{3/2}. \quad (3.12)$$

3.4. Подводно истицање

Посматра се истицање течности из суда I у суд II кроз мали отвор пресека a , који се налази у преградном зиду судова (сл. 28). Суштина је да течност не истиче у атмосферу, него у простор у коме се налази иста (или нека друга) течност. При томе је мали отвор потопљен, па се ово истицање назива подводним [2].



Слика 28. Шема подводног истицања

Из Бернулијеве једначине, постављене за нивое воде у судовима,

$$H_1 = H_2 + \frac{v^2}{2g}(1 + \xi),$$

где је ξ коефицијент отпора услед оштрих ивица отвора, налази се брзина којом течност протиче кроз отвор,

$$v = \sqrt{\frac{2g(H_1 - H_2)}{1 + \xi}} = \varphi \sqrt{2gH}.$$

Овде је, као и при истицању у атмосферу,

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi}},$$

према томе, израз за проток гласи

$$Q = \mu' a \sqrt{2gH}. \quad (3.13)$$

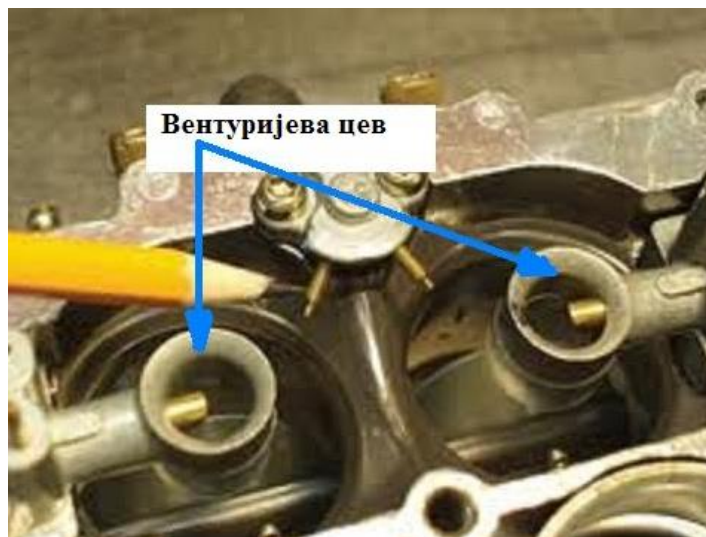
У претходном изразу коефицијент протока означен је са μ' , јер се исти незнатно разликује од коефицијента μ за случај истицања у атмосферу. Како у овом случају долази и до ширења млаза при истицању (Бордина теорема), то је μ' нешто мањи од μ . Мерењем је утврђено да је $\mu' = 0,98 \mu \approx \mu$.

3.5. Истицање течности кроз отворе у пракси

Истицање течности кроз отворе има веома велику и разноврсну примену у пракси, као што је истицање кроз отвор који се налази на зиду неког суда, нпр. буре са водом или неким другим пићем. Овај принцип је описан Бернулијевом једначином и Торичелијевом теоремом у претходном поглављу овог рада.

3.5.1. Вентуријева цев у карбуратору аутомобила

Следећи пример истицања је Вентуријева цев, која се може користити за извлачење течности из суда. Дифузор (сужени део цеви) Вентуријеве цеви у карбуратору аутомобила може бити повезан са судом у којем је бензин под атмосферским притиском. Пошто је притисак мали, бензин улази у цев и на тај начин одлази до мотора [4].



Слика 29. Карбуратор са Вентуријевом цевом

3.5.2. Водена пумпа

Водена пумпа ради на сличном принципу као Вентуријева цев. Пумпа је механички уређај који покреће, шири и скупља течности помоћу усисавања или промене притиска. Водени млаз на једном делу је сужен и ту се ствара област ниског притиска, па ваздух излази из суда и одлази са водом.

Пумпе се могу поделити на :

- динамичке пумпе - течности се преносе дејством сила у простору који је непрекидно повезан са усисним и цевоводима за притисак, и
- запреминске пумпе - течности се преносе периодичним променама запремине простора у ком се налазе, који се у одређеним тренуцима и наизменично повезује са усисним и цевоводима за притисак

У зависности од тога у ком смеру је потребно да пумпају течност, пумпе се деле на пумпе за довод и пумпе за одвод. Најраспрострањенија пумпа за довод течности је центрифугална пумпа, која је врста динамичких пумпи. Центрифугалне пумпе се деле у зависности од точка на: центрифугалне пумпе са радијалним, аксијалним и дијагоналним точком [17].

Пумпе са аксијалним током воде

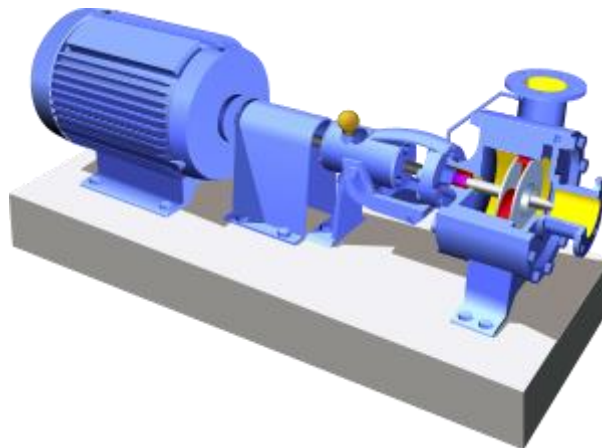
Течност утиче у радно коло и истиче из њега аксијално. За аксијалне машине карактеристичан је пролаз течности кроз радно коло у правцу који је паралелан са осом обртања. Ове машине у односу на остале турбомашине постижу веће протоке.

Пумпе са дијагоналним током воде

Пумпе с дијагоналним током воде се називају и радиаксијалне пумпе, јер течност утиче у радно коло аксијално, а истиче у смеру који је између радијалног и аксијалног. Радиаксијалне хидрауличне машине су по конструкцији комбинација радијалних и аксијалних машина. Код ових машина течност се креће и у правцу осе обртања и радијално у односу на тај правац.

Радијалне центрифугалне пумпе

Код радијалних машина, кретање течности је усмерено од осе обртања ка периферији радног кола. Ове машине постижу мање протоке у односу на остале турбомашине.



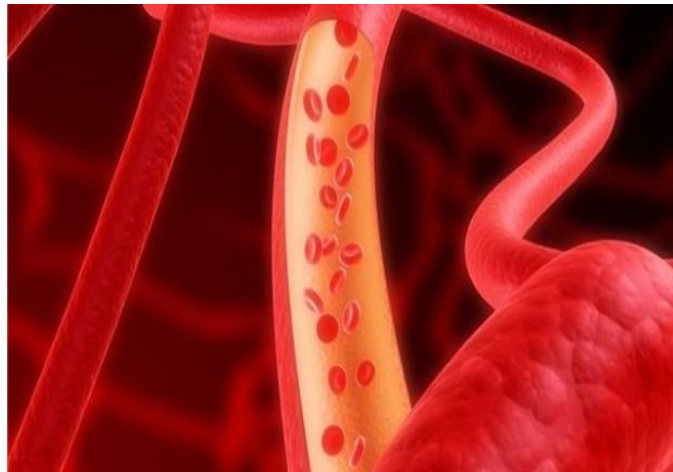
Сл 30. Пресек једноступене радијалне центрифугалне пумпе

3.5.3. Циркулација крви

Циркулација крви је непрекидно, стално кретање (дотицање и истицање) крви кроз систем шупљина срца и крвне судове, које омогућава нормално функционисање свих виталних функција тела. Циркулација крви настаје услед градијента притиска, који је одређен активношћу срца, количином циркулишуће крви, њене вискозности, отпором протоку у крвним судовима и другим факторима. Кретање крви омогућавају лева и десна срчана комора које раде као пумпе. Циркулација крви се обавља помоћу енергије условљене разликом у притиску, који влада у појединим деловима крвотока [19].

Крв без икаквих потешкоћа и отпора пролази кроз обе „растегљиве коморе“ (артерије и вене) циркулационог система, али не и кроз артериоле и капиларе. Како би крв протицала кроз артериоле и капиларе, срце пумпа крв у артерије под високим притиском, да би она у артериолама и капиларима наишла на одређени отпор при кретању.

Крв увек тече, из подручја са високим у подручје са ниским притиском изузев у одређеним ситуацијама, када инерција за кратко време подржава проток. Циркулацију крви кроз организам одређују два фактора; разлика притиска и отпор у крвном суду

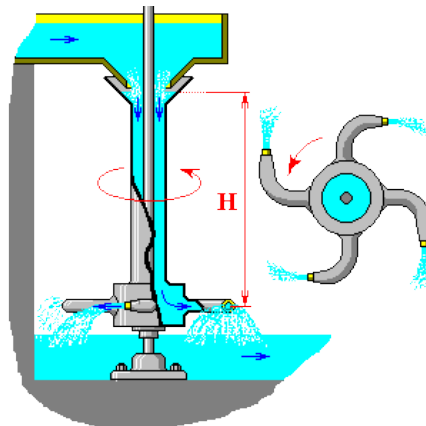


Слика 31. Проток крви кроз крвне судове

3.5.4. Сегнеров точак

Један од првих видова хидрауличне турбине био је Сенгеров точак. Око 1750. године проф. Јохан Андреас Сегнер је конструисао прво водно коло засновано на реакцијском принципу. Оптимални хидраулични степен корисности Сегнеровог точка је био око 52 %, што је веома мало у односу на данашње хидрауличне степене корисности модерних великих хидрауличних турбина који се крећу до 95 % [5].

Сегнеров точак састоји се од шупљег цилиндра, који се може окретати око вертикалне осовине. При дну су цеви за истицање, чији су отвори окренути на једну страну. Кад се цилиндар напуни водом, она истиче млазом кроз цеви, а цилиндар се с цевима креће на супротну страну. Унутрашњи притисак воде истерује воду на отвору, јер на том месту нема никакве препреке. Док, на другој страни од тог отвора, одговарајући унутрашњи притисак на бокове остаје и даље као притисак на суд. Због тог притиска суд се покреће на супротну страну - цилиндар се окреће око вертикалне осовине. Сила, која на овај начин производи кретање, назива се реакција, а само кретање се назива кретање од реакције.



Слика 32. Сегнеров точак

3.6. Истицање течности кроз наглавке

Под наглавком се подразумевају кратке цеви цилиндричног, конусног или неког другог облика које се постављају на мали отвор у танком зиду са спољашње или са унутрашње стране зида. Наглавци служе за повећање протока, односно брзине при истицању течности. Постоје следећи типови наглавака: цилиндрични (Вентуријев), проширени, сужени и заобљени наглавак.

3.6.1. Врсте наглавака и њихова практична примена

Цилиндрични наглавак (сл. 34 а) представља кратку цилиндричну цев која се врло често употребљава у хидротехници (одводне цеви испод подлоге путева). Овај наглавак повећава проток само ако му је дужина l исправно одређена у односу на пречник D , о чему ће бити касније речи.

Проширени наглавак (сл. 34 б) представља зарубљени конус чија се маља основица поставља на отвор у зиду резервоара. Овај се наглавак, дакле, шири у правцу струјања течности при истицању, при чему је Θ угао ширења. Проширени наглавак има веће "сишуће дејство" од цилиндричног; то дејство је израженије уколико је угао θ већи. Међутим, прекомерно ширење наглавка доводи до одвајања млаза течности од његових зидова, те угао θ не сме да буде сувише велики. Већ при угловима $\theta > 8^\circ$ наступа поменуто одвајање млаза, те се за поуздан рад ове врсте наглавака препоручује $\theta = 5^\circ - 7^\circ$. Губитак струјне енергије у овом наглавку већи је него код цилиндричног због интензивнијег ширења струје после суженог пресека млаза. Мада коефицијенти φ и μ зависе од угла θ , и зависе од величине вакуума који се образује у наглавку.

Према томе, проширени наглавци повећавају проток уз релативно мању брзину истицања на њиховом излазу (већи пресек). Због овог својства ови се наглавци често употребљавају за одвод воде из радног кола хидрауличких турбина.

Сужени наглавак представља, такође, зарубљени конус. Међутим, код овог се наглавка већа основа поставља на отвор у зиду резервоара, док мања основа представља његов излазни пресек (сл. 34 в). Губитак струјне енергије код суженог наглавка мањи је него код цилиндричног и то углавном због мањег отпора струјању на самом улазу у наглавак. Огледи су показали да и коефицијент брзине φ и коефицијент протока μ зависе од угла θ сужавања овог наглавка. Док коефицијент φ непрекидно расте са порастом угла θ од 0 до 50° , дотле коефицијент μ најпре расте, потом достиже максималну вредност $\mu_{\max} = 0,946$ (за $\theta = 13^\circ 24'$), а таим опада $\mu = 0,847$ (за $\theta = 48^\circ 50'$). При оптималној вредности угла конуса $\theta \approx 13^\circ$ коефицијент брзине има вредност $\varphi = 0,963$. Ово смањење коефицијента протока, при $\theta > 13^\circ 24'$, условљено је допунском контракцијом млаза на излазу из наглавка.

Будући да се код овог наглавка, постиже велика брзина струјања течности на његовом излазу, исти се примењује као млазник код противпожарних апарата, код фонтата и сл.

3.6.1.1 Шприц (бризгалица)

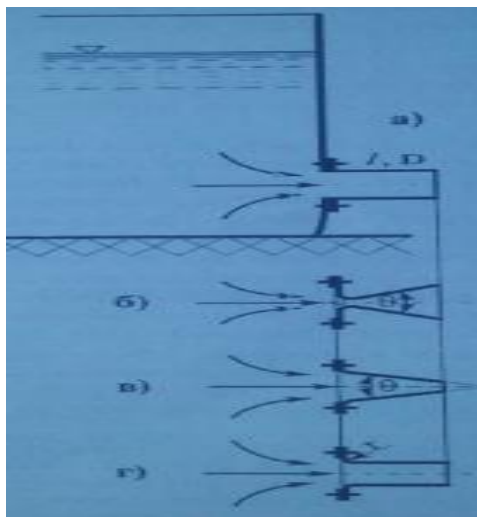
Бризгалица је једноставна пумпа која се састоји од клипа који је чврсто склопљен у ситну цев. Клип може да се повуче и притисне у оквиру цилиндричне цеви (барел), дозвољавајући тако бризгалици да прими и потисне течност кроз отвор на крају цевчице. Завршетак цевчице са отвором, углавном је опремљен суженим наглавком, који помаже да се усмери проток и изван барела. Бризгалице се често користе приликом давања инјекција, интравенској апликацији лекова, примени супстанци као што су лепак или лубрикант, као и у премеравању течности [20].



Слика 33. Медицинска бризгалица са иглом

Заобљени наглавак (сл. 34 г) има цилиндрични излазни део, те се код овог, за разлику од суженог наглавка, не појављује допунска контракција млаза. Његов улазни део је пажљиво заобљен. Наиме, облик улазног дела овог наглавка истоветан је са обликом граничних струјница слободног млаза који се формира при истицању кроз мале отворе. Захваљујући овоме, заобљени наглавак има врло велике вредности коефицијента протока које се крећу у границама $\mu = \varphi = 0,97 - 0,99$; зависно од квалитета унутрашње површине као и од висине течности у суду.

И поред велике предности над другим наглавцима у хидрауличном смислу, заобљени наглавак се ретко примењује, јер је компликован за израду па је стога и врло скуп.



Слика 34. Врсте наглавака

3.6.2. Хидраулични прорачун наглавака

Посматра се истицање течности кроз цилиндрични наглавак унутрашњег пречника D и дужине l који је са спољашње стране постављен на мали отвор у танком зиду резервоара (сл. 33). Претпоставља се ради лакшег рачуна, да је висина нивоа воде у резервоару $H = \text{const}$.

Ако се омогући истицање течности кроз наглавак онда ће и овде, као при истицању кроз мале отворе, да дође до контракције млаза. Наиме, због немогућности скретања за 90° граничне струјнице млаза додирују унутрашњу површ зидова наглавка тек на извесном растојању од његовог почетка. На тај начин између граничних струјница млаза и унутрашње површи наглавка формира мртва област која је испуњена ваздухом. Услед трења, вода одвлачи "молекуле" ваздуха из мртве области, условљавајући смањење притиска у истој. Када се појава устали, у овој области се успоставља константан притисак мањи од атмосферског, тј. вакуум. Због смањења притиска p_k у мртој области долази, према Бернулијевој једначини, до повећања брзине $\bar{v}_k$ у суженом делу млаза. Тиме се и повећава проток кроз наглавак.

Описана појава назива се сишућим дејством, па се каже да наглавак сише воду. Осим ове појаве, кретање течности кроз наглавак, као и кроз сваку другу цев, праћено је одговарајућим отпорима услед којих долази до губитка струјне енергије млаза, односно смањења његове брзине. Поред губитка струјне енергије на улазу у наглавак, постоји додатни губитак услед ширења млаза као и губитак на трење по дужини наглавка.

Дакле, с једне стране сишуће дејство наглавка поспешује истицање, док отпори струјању смањују проток кроз наглавак. Који ће од ова два супротна ефекта наглавка да има већи утицај на проток при истицању, може се, према Агроскину, да закључи помоћу прорачуна који следи.

Из Бернулијеве једначине, постабљене за слободну површину течности у резервоару и за излаз из наглавка,

$$gH = \frac{v^2}{2} + \xi \frac{v_k^2}{2} + \frac{(v_k - v)^2}{2} + \lambda \frac{l}{D} \frac{v^2}{2} ,$$

даљим решавањем добијамо израз који може да се напише у облику

$$v = \varphi_n \sqrt{2gH} , \quad (3.14)$$

при чему је φ_n коефицијент брзине при истицању течности из наглавка.

При некој дужини $l = l_{kr}$ наглавка (критична дужина) отпори струјању у самом наглавку достићи ће толику вредност да ће течност да истиче као да наглавак не постоји. Будући да је проток без наглавка одређен изразом

$$Q = \mu \frac{D^2 \pi}{4} \sqrt{2gH} ,$$

добија да је

$$l_{kr} = 56,88D \approx 57D . \quad (3.15)$$

Дакле, тек при дужини наглавка једнакој $57 D$ отпори струјању пониште сишуће дејство наглавка и тада проток кроз наглавак остаје исти као при истицању без наглавка. Да би се повећао проток мора да буде

$$l < 57D ,$$

и, при томе, дужина наглавка треба да је што могуће мања. Испитивања су показала да оптимална дужина износи

$$l = l_{op} = (3,5-4)D \approx 4D . \quad (3.16)$$

При истицању течности кроз наглавак оптималне дужине $(3,5-4) D$, може да се занемари губитак механичке енергије услед трења. Ово се сме урадити и због тога што трење долази до изражаја само на делу дужине наглавка десно од пресека к-к, тј. од мртве области па до његовог изласка.

Повећање протока условљено је, као што је већ речено, сишућим дејством наглавка, односно потпритиском у суженом пресеку млаза (мртва област). Да би се израчунао потпритисак у овом пресеку треба поставити Бернулијеву једначину за слободну површину течности у резервоару и сужени пресек к-к млаза у наглавку

$$\frac{p_a}{\rho g} + H = \frac{v_k^2}{2g} + \frac{p_k}{\rho g} + \xi \frac{v_k^2}{2g}$$

на крају, то излази да је

$$\frac{p_{vk}}{\rho g} = \left[\frac{\varphi_n^2 (1 + \xi)}{\psi^2} - 1 \right] H . \quad (3.17)$$

Ако се узме да је $\xi = 0,06$; $\psi = 0,64$; $\varphi_n = 0,82$ добиће се да је

$$\frac{p_{vk}}{\rho g} = 0,74H \quad (p_{vk} = p_a - p_k). \quad (3.18)$$

Из добијене формуле непосредно следује да је вакуум у вентуријевом наглавку сразмеран висини нивоа течности у резервоару.

Вентуријев наглавак може поуздано да ради само ако је висина нивоа воде у резервоару $H < 9,46 \text{ m}$. Ако се деси да је $H > 9,46 \text{ m}$; доћи ће до одвајања млаза од зида наглавка и течност ће да истиче као да наглавак не постоји. Тада се коефицијент

протока смањи од 0,82 на 0,62; а због тога се смањује и проток течности кроз наглавак. О овоме се мора водити рачуна при употреби Вентуријевог наглавка.

3.7. Истицање течности при променљивом нивоу

Ова врста истицања настаје увек када се суд, претходно напуњен течношћу, празни или кад дотицање течности у суд не одговара истицању. Ако у суд дотиче мање течности него што из њега истиче, опадаће ниво течности у суду и обрнуто. Са променом нивоа течности у суду мења се и брзина истицања. Према томе, истицање при променљивом нивоу представља пример неустаљеног кратања течности [3].

3.7.1. Истицање течности у атмосферу при сталном дотицању

Из суда (сл. 35) истиче течност у атмосферу кроз мали отвор површине пресека a уз истовремено дотицање течности у суд у количини Q_0 . При томе могу да наступе следећи случајеви:

а) Ако је $Q_0 = Q$, односно ако из суда истиче онолико течности колико у исти дотиче, у суду ће се усталисти ниво течности на висини H_0 , одређеној једначином

$$H_0 = \frac{Q_0^2}{2g\mu^2 a^2} = const. \quad (3.19)$$

У овом се случају ниво течности не мења, и таква врста истицања већ је приказана у поглављу 3.2.

б) Ако је почетни ниво течности у суду на висини $H > H_0$, из суда ће истицати количина

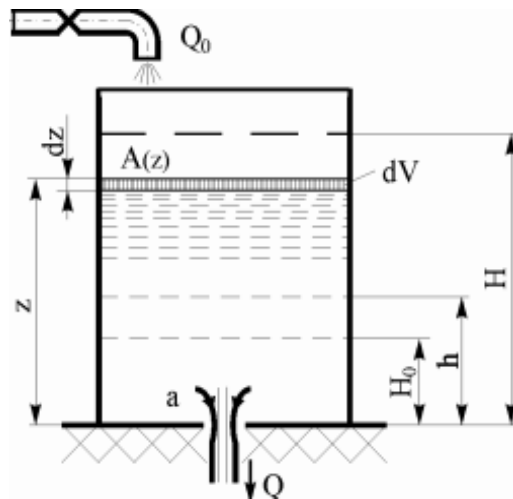
$$Q = \mu a \sqrt{2gH} > Q_0.$$

Дакле, из суда истиче више течности него што дотиче. Ниво течности у суду се спушта и тежи да достигне висину H_0 .

в) Ако је почетни ниво воде у суду на висини $H < H_0$, биће проток при истицању

$$Q = \mu a \sqrt{2gH} < Q_0,$$

те више течности дотиче него што истиче. Висина воде у суду расте и тежи да достигне висину H_0 .



Слика 35. Истицање течности при променљивом нивоу

Од интереса је за праксу да се одреди време за које ће се ниво течности у суду спустити са висине $H > H_0$ на висину $h > H_0$ (в. сл. 35).

Нека је у тренутку t ниво течности на висини z . За време dt ниво течности у суду спустиће се за dz (или подићи ако је $Q_0 > Q$), те ће за ово време из суда истећи елементарна (шрафирана) запремина течности $dV = A(z)dz$. Међутим, за време dt у суд доспе количина $Q_0 \cdot dt$ течности, а истовремено изађе $Q \cdot dt = \mu a \sqrt{2gz} \cdot dt$, тако да се за време dt промени запремина течности у суду за $(Q - Q_0)dt$. Из једнакости запреминских промена долази се до једначине,

$$-A(z)dz = (Q - Q_0)dt, \quad (3.20)$$

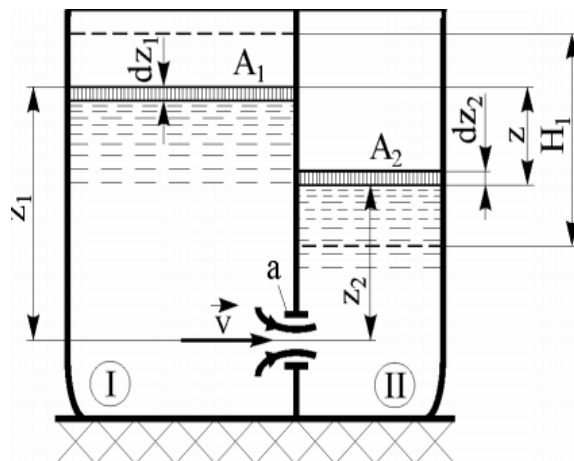
која се назива диференцијалном једначином пражњења суда.

3.7.2. Спојени судови

Течност претиче из суда I у суд II кроз мали отвор у преградном зиду (сл. 36). Попречни пресек отвора је a , при чему су димензије судова величине истог реда. Пошто течност не дотиче споља, то ће се при истицању течности из једног у други суд мењати и нивои течности у оба суда. Ниво течности у суду I ће да опада, док ће ниво течности у суду II да расте, тако да се почетна разлика H_1 између нивоа смањује све док се нивои потпуно не изједначе.

У неком тренутку времена у току претицања, положаји нивоа одређени су висинама z_1 и z_2 у односу на осу отвора а њихова разлика је z . За време dt пређе из суда I у суд II . Истовремено се у суду I промени запремина за $A_1 dz_1$, а у суду II за $A_2 dz_2$, те диференцијална једначина претицања гласи

$$-A_1 dz_1 = A_2 dz_2 = \mu a \sqrt{2gz} \cdot dt. \quad (3.21)$$



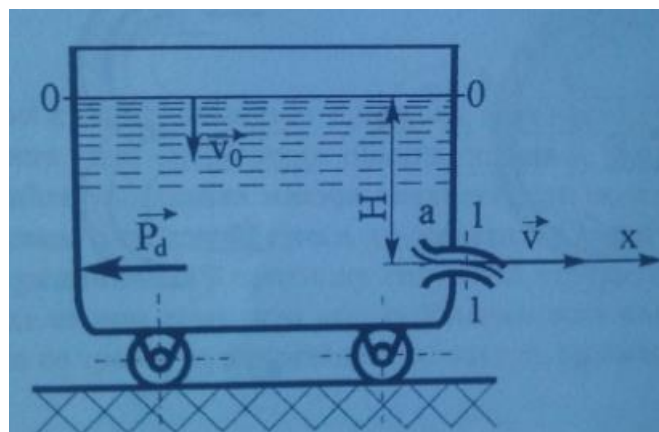
Слика 36. Спојени судови

3.8. Реакција млаза при истицању течности из суда

Из суда, који се може кретати у хоризонталном правцу, истиче течност у атмосферу кроз бочни мали отвор (сл. 37). Брзина истицања течности је $\bar{v}$, док је $\bar{v}_0$ брзина спуштања нивоа течности у суду. Пошто при истицању долази до промене брзине струјања од $\bar{v}_0$ до $\bar{v}$, то се на масу течности у суду може применити Закон о промени количине кретања који у овом случају гласи

$$\frac{d\bar{K}}{dt} = \rho Q(\bar{v} - \bar{v}_0) = \bar{F}_R = \bar{G} + \bar{R} \quad (3.22)$$

На уочену масу течности у суду (између пресека 0 - 0 и 1 - 1) делују сила $\bar{G}$ Земљине теже и реакција суда $\bar{R}$. Силе притиска на слободној површини и у пресеку 1-1 млаза не узимају се у обзир, јер је на њима притисак атмосферски.



Слика 37. Дејство реакције млаза

Будући да је брзина истицања течности одређена Торичелијевом формулом, то је сила којом суд делује на течност

$$R_x \approx 2\rho g H a ,$$

где је a површина отвора, док је H висина течности изнад осе отвора. Течност делује на суд супортном силом

$$P_d = -R_x = -\rho Q v \approx -2\rho g H a , \quad (3.23)$$

која се назива реакцијом млаза.

3.9. Преливи

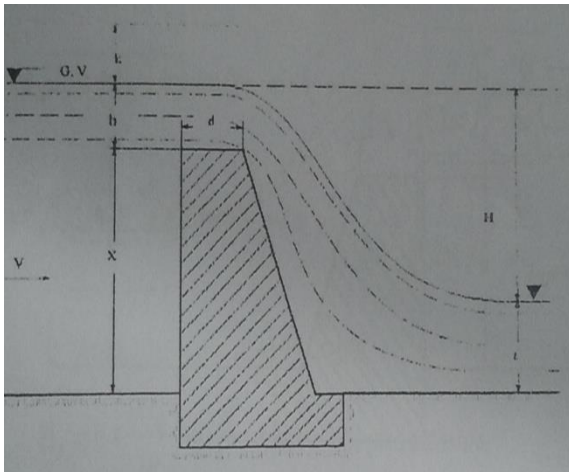
Под преливима се подразумевају специјално изведене препреке, које се постављају на путу кретања воде и преко којих, услед силе Земљине теже, вода прелива. Преливи имају широку праткичну примену као важни елементи хидротехничких објеката (за регулисање нивоа воде, за каналисање река, при наводњавању). Неке врсте прелива служе и за врло прецизно лабораторијско мерење протока.

3.9.1. Практична примена прелива

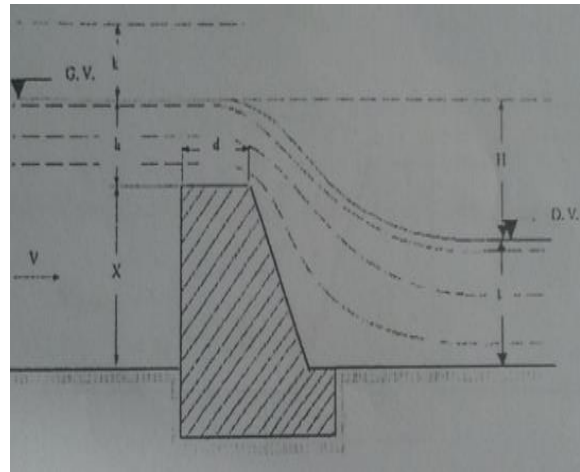
3.9.1.1. Бране

При градњи хидроелектрана, бране тј. преливи, служе да издигну ниво воде, створе вештачко језеро, да би се потенцијална енергија воде претворила, приликом пада на, природан ниво, у електричну енергију. Сврха подизања брана - преграда, у бујичњацама је да задржи воду изнад преграде, издигне јој ниво и смањи пад воде, а самим тим омогући таложење суспендованих честица земље, песка, шљунка и камена изнад преграде.

Бране могу бити сталне, покретне или мешовите. Сталне бране су у целости непомичне масивне грађевине, којима се не може регулисати водостај узводно од бране, а вишак воде се прелива преко њеног врха. Бране могу бити насуте, од камена или армирано-бетонске. Ако се водостај не може регулисати, сталне бране се подижу већином само у горњем току планинских водотока или у дубоко усеченим коритима, где дизање водостаја код преливања великих вода не проузрокује штете на обалном подручју. Сталне се бране граде до висине од приближно 15 m; ако им је висина већа или ако затварају долину у брдовитом терену, зову се долиנסке преграде, а ако се граде од земљаног насипа, зову се успорним насипима. Бране до 15 m називају се ниским (потопљени преливи), а више од тога високим (непотопљени преливи). Покретне бране састоје се од покретних конструкција, устава, смештених међу стубовима. Дизањем или спуштањем устава отвара се протицајни пресек водотока. Тако се регулише протицање воде кроз брану, а тиме и водостај узводно од бране [16].



Сл. 38. Високе бране
(непотопљени преливи)



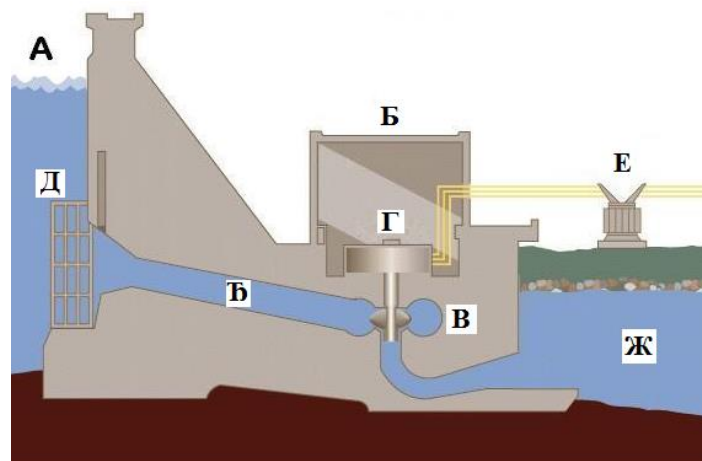
Сл. 39. Ниске бране
(потопљени преливи)

3.9.1.2. Хидроелектране

Хидроелектрана или хидроцентрала је електрично постројење за производњу електричне енергије са погоном на воду. Текућа вода обрће својом кинетичком енергијом хидрауличну турбину, која је повезана са електричном машином - генератором електричне енергије.

Овај вид електрана се гради на местима где постоји довољно текуће воде у смислу количине и висинске разлике. Снага хидроелектране је сразмерна количини воде и висинској разлици. Зато се бирају водотокови са великим протоком воде (равничарске реке са малим висинским разликама нису повољне) или планинске реке са мањим током, али великим падовима [15].

Један kWh енергије произведен у хидроелектрани је значајно јефтинији од оног у термоелектрани и има мањи негативни утицај на животну околину. Из овог разлога су хидроелектране популарније и пожељније као извор енергије за једну државу. Међутим количина произведене енергије зависи од количине дотока воде и варира током године. Ово се сматра највећим недостатком ових електрана уз чињеницу да акумулациона језера заузимају огромна пространства највероватније плодног земљишта.



Слика 40. Хидроелектрана у пресеку

А - резервоар;

Д - улаз воде;

Б - зграда;

Ђ - цев за воду;

В - турбина;

Е - високонапонске линије;

Г - генератор;

Ж - река.

По количини воде и начину конструкције хидроелектране се могу поделити на:

- Акумулациона хидроелектрана (брана)
- Реверзибилна хидроелектрана, која је слична по конструкцији акумулационој хидроелектрани, али има велике пумпе које у време мање потрошње струје враћају воду у акумулационо језеро, док у време несташице енергије пуштају воду из акумулације и производе струју у ситуацији када је потребнија и скупља. Овакве електране служе уравнотежењу производње и потрошње у електричној мрежи.
- Проточна хидроелектрана, која има малу висинску разлику испред и иза места захватања воде тако да не користи потенцијалну енергију разлике нивоа већ само кинетичку енергију коју поседује водени ток. Стога је снага овакве електране зависна од тренутне количине протока воде. Код ових електрана се за покретање генератора користе Капланове турбине које су погодне за велике протоке воде и мале падове.

3.9.2. Основни параметри прелива

Код сваког прелива разликујемо горњи (GT) и доњи (DT) ток воде. Прелив, као и свака друга препрека, доводи до дизања нивоа воде у горњем току. Нешто испред прелива долази до пада горњег тока и вода у облику млаза прелива преко низводне ивице прелива.

Основни параметри сваког прелива су:

- ширина прелива b ,
- ширина преграде B ,
- висина прелива h_p у односу на горњи ток и h'_p у односу на доњи ток,
- дебљина преливног млаза H ,
- ширина круне прелива c , и
- облик прелива.

Ширина прелива b мери се дуж горење ивице и представља ширину преливног отвора, односно прореза у зиду. Ова ширина може да буде једнака ширини B целе преграде или мања од ширине преграде. Када је ширина прелива мања од ширине канала, долази до бочне контракције преливног млаза и проток у овом случају мањи је од протока прелива без бочне контракције.

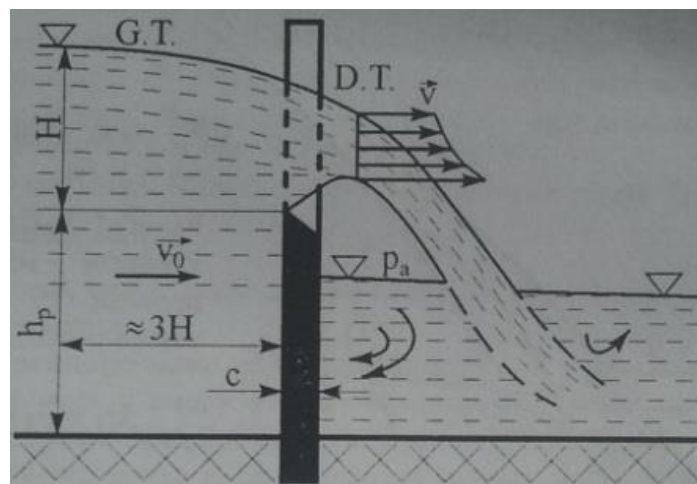
Дебљина преливног млаза H представља вертикално растојање од преливне ивице до места где почиње пад горњег тока. Према Базеновим истраживањима, пад горњег тока почиње на растојању $l \approx 3H$ испред узводне стране преграде.

Ширина круне прелива c одређена је хоризонталним растојањем од узводне до низводне горње ивице прелива.

У зависности од начина извођења, односно од облика и ширине круне, преливи се деле на три групе и то: на преливе у танком зиду, на преливе у дебелом зиду и на специјално профилисане преливе.

Код прелива у танком зиду (преливи са оштром ивицом) обично је ширина круне $c < 0,5H$. Због мале дебљине зида, течност се одваја од прелива и пада као млаз који најчешће не кваси низводну страну прелива (сл. 41). У зависности од услова истгицања кроз прелив у танком зиду, преливни млаз може да буде слободан, спуштени, подливени и приљубљени.

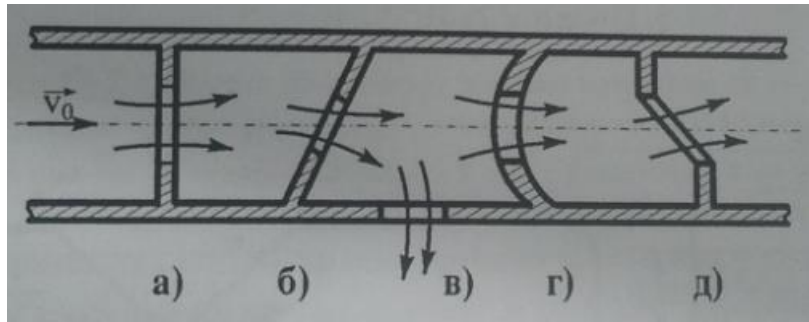
Преливи са широком круном или преливи у дебелом зиду врло често се употребљавају у хидротехници. Код њих је круна толико широка да су струјнице на једном делу изнад круне хоризонталне и паралелне међу собом. Обично је $2H < c < (10-12)H$. Ако је $c > (10-12)H$, онда се струјање изнад круне може разматрати као струјање у хоризонталном каналу.



Слика 41. Прелив са оштром ивицом

Специјално профилисани преливи се најчешће изводе као преливи са заобљеном круном. Код њих је, дакле, горњи део круне заобљен, а низводна страна прелива има облик граничних струјница млаза.

Према положају прелива у односу на правац струјања воде (сл. 42) разликују се: **а** - нормални, **б** - коси, **в** - бочни, **г** - криволинијски и **д** - изломљени преливи.



Слика 42. Положај прелива у односу на правац струјања течности

3.9.3. Формула за проток преко прелива

Експерименти су показали да на проток преко прелива битно утичу ширина прелива b , дебљина преливног млаза H , убрзање Земљине теже $\bar{g}$ и брзина $\bar{v}_0$ којом течност прилази преливу. Карактер кретања течности преко прелива је скоро истоветан са истицањем течности кроз велике отворе, па се теорија истицања кроз велике отворе може применити и на преливе. Наиме, кретање преко прелива може да се посматра као истицање кроз велики отвор, код којег не постоји горња ивица која ограничава преливни млаз са горње стране. Према томе, ако се у изразу за проток кроз велики отвор у облику правоугаоника

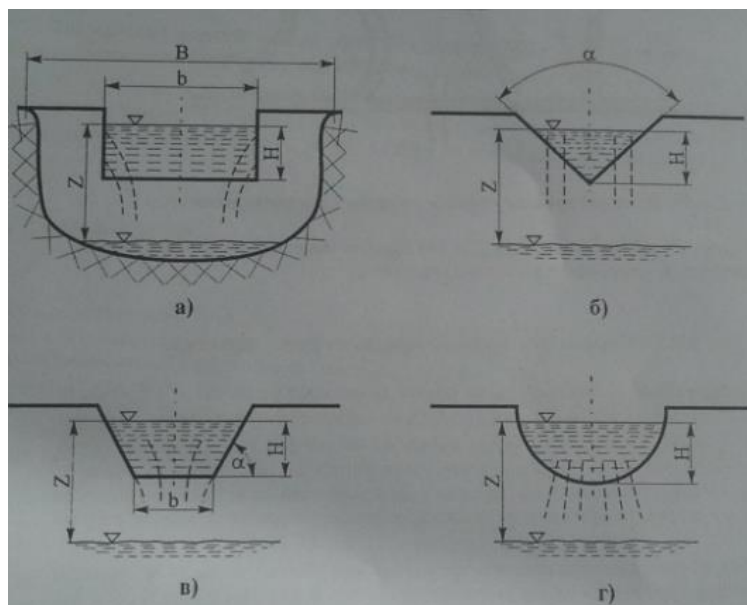
$$Q_p = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} (H_2^{3/2} - H_1^{3/2}) ,$$

Ако се уведе ознака

$$m = \frac{2}{3} \mu ,$$

где је m коефицијент протока прелива, онда се израз за проток своди на

$$Q = mb\sqrt{2g}H^{3/2}. \quad (3.24)$$



Слика 43. Разни облици прореза у зиду прелива

4. ЗАКЉУЧАК

Хидраулика постепено налази примену практички у свим сферама живота. Све строжи еколошки захтеви, те потреба за економичним пословањем захтевају много већу ефикасност. При том је кључно да цена производа остане конкурентна. Стога је нужен непрекидан развој. Развој хидраулике обележава еволуција свих компоненти у целини. Кључне технологије за које се може сматрати да ће обележити будућност хидраулике су управљање протоком, дигитални вентили и машине, и хибридни хидраулички састави.

Дакле, најбитнији циљеви напретка хидраулике су смањење потрошње енергије, поштовање еколошких захтева, повећање функционалности, уз задржавање прихватљиве цене производа. Могућности остваривања тих циљева даљим развојем дефинисаће и будућност хидраулике. Свакако треба нагласити да се застој развоја и постепено одумирање хидраулике предвиђало већ пре тридесетак година. Међутим, упркос томе, развој вероватно никада није био живљи, а тржиште хидраулике практички непрекидно расте. Према очекивањима, тако би и требало да се настави.

У овом раду је представљено је истицање течности кроз разне типове отвора, наглавака и прелива, као и начини на које су људи то искористили у пракси. Наиме, изграђени су многи вештачки водотокови, канали за преусмеравање воде, бунари, а све у циљу коришћења воде из подземних резервоара. Од посебног значаја су насипи и бране помоћу којих се ефикасно користи потенцијална енергија воде за стварање електричне енергије.

Теорије и принципи истицања кроз отворе највећу практичну примену имају у прорачунима за пуњење и пражњење резервоара - цистерни, танкера и др.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Обровић, Б., Механика флуида, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2007.
- [2] Маричић, Н., Механика флуида, Универзитет у Приштини, Факултет техничких наука, Косовска Митровица, 2003.
- [3] Адамовић, Ж., Хидраулика и пнеуматика, Институт Гоша, Београд, 2009.
- [4] Чалуковић, Н., Физика 2, Круг, Београд, 2003
- [5] Михаиловић, Ј., Експериментална физика, Књижарница Геце Кона, Београд, 1920.
- [6] <http://sh.wikipedia.org/wiki/Akvadukt>, приступљено августа 2014.
- [7] http://sh.wikipedia.org/wiki/Barski_akvadukt, приступљено септембра 2014.
- [8] <http://sr.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B8%D0%B4%D1%80%D0%B0%D1%83%D0%BB%D0%B8%D0%BA%D0%B0>, приступљено септембра 2014.
- [9] http://titan.fsb.hr/~jpetric/Udzbenici/Udzbenik_HIDRAULIKA_JPetric.pdf, приступљено септембра 2014.
- [10] <http://www.tehnikum.edu.rs/predmeti/0003/Predavanje062.pdf>, приступљено септембра 2014.
- [11] http://www.rgf.bg.ac.rs/predmet/GO/I%20semestar/Fizika%201/Predavanja/2.DINAMIK_A_FLUIDA.pdf, приступљено септембра 2014.
- [12] <http://sr.wikipedia.org/sr/%D0%94%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D1%84%D0%BB%D1%83%D0%B8%D0%B4%D0%B0>, приступљено септембра 2014.
- [13] <http://sr.wikipedia.org/sr/Turbulencija>, приступљено септембра 2014.
- [14] <http://zoran.nasamreza.com/hidrodinamika/hidrodinamika.swf>, приступљено септембра 2014.
- [15] <http://sr.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B8%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B0>, приступљено септембра 2014.

- [16] <http://sr.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B0>,
приступљено септембра 2014.
- [17] <http://sr.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%83%D0%BC%D0%BF%D0%B0>,
приступљено септембра 2014.
- [18] <http://web.zpr.fer.hr/ergonomija/2004/cindric/kruzenje.html>, приступљено
септембра 2014.
- [19] [http://sr.wikipedia.org/sr/%D0%A6%D0%B8%D1%80%D0%BA%D1%83%D0%BB%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%98%D0%B0_%D0%BA%D1%80%D0%B2%D0%B8_\(%D1%85%D0%B5%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0\)](http://sr.wikipedia.org/sr/%D0%A6%D0%B8%D1%80%D0%BA%D1%83%D0%BB%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%98%D0%B0_%D0%BA%D1%80%D0%B2%D0%B8_(%D1%85%D0%B5%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0)), приступљено септембра 2014.
- [20] <https://sr.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%80%D0%B8%D0%B7%D0%B3%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D1%86%D0%B0>, приступљено септембра 2014.
- [21] <http://sr.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%83%D0%BD%D0%B0%D1%80>,
приступљено августа 2014.