

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Индустијски инжењеринг

Предмет: Механика флуида

Број индекса: 2015/2016

Никола С. Перишић

Струјање нестишљивог флуида кроз цеви
завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Слободан Савић, редовни професор - ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У току израде завршног рада кандидат треба да:

- проучи одговарајућу литературу везану за физичка својства и законе кретања нестишљивог флуида,
- теоријски обради једначину кретања течности као и губитке струјне енергије,
- прикаже ламинарно и турбулентно струјање течности кроз цеви, како при константној, тако и променљивој температури,
- укаже на физичку страну појаве хидрауличног удара при струјању нестишљивог флуида кроз цеви и
- наведе случајеве практичне примене изложене материје у хидраулици.

Препоручена литература:

- 1) Обровић Б.: Механика флуида, уџбеник, Машински факултет Крагујевац, 2007.
- 2) Обровић Б., Савић С.: Хидраулика, уџбеник, Машински факултет Крагујевац, 2005.

Крагујевац, Јун 2020.

ментор:

Др Слободан Савић, редовни професор

Резиме:

На основу истраживања и анализе расположиве литературе у завршном раду су приказане основне физичке карактеристике флуида. У посебном поглављу описано је кретање флуида и губици енергије у току самог кретања. Овај рад такође пружа увид и у физичке законе који су неопходни за разумевање ламинарног и турбулентног кретања флуида у различитим условима. На крају, приказана је огромна примена хидраулике у различитим гранама индустрије.

Кључне речи: механика флуида, ламинарно и турбулентно струјање флуида, хидраулика

Resume:

Based on the research and analysis of the available literature, the basic physical characteristics of the fluid are presented in the final paper. A special chapter describes the flow of fluids and energy losses during the flow itself. This paper also provides insight into the physical laws necessary to understand laminar and turbulent fluid flows in different conditions. Finally, the huge application of hydraulics in various branches of industry is presented.

Keywords: fluid mechanics, laminar and turbulent fluid flow, hydraulics

Садржај

1. Увод	1
2. Физичка својства флуида	2
2.1 Идеалан и реалан флуид	8
2.2 Кретање флуида	8
3. Једначина континуитета и губици струјне енергије	12
3.1 Веза протока и брзине струјања	12
3.2 Једначина континуитета	13
3.3 Губици струјне енергије и могуће грешке	13
4. Једнолико кретање течности кроз цеви	16
4.1 Ламинарно кретање течности кроз цеви при константној температури	16
4.2 Турбулентно кретање течности кроз цеви при константној температури	20
4.3 Ламинарно кретање течности кроз цеви при променљивој температури	22
4.4 Турбулентно кретање течности кроз цеви при променљивој температури	23
5. Нестационарно струјање	24
5.1 Хидраулички удар	24
6. Примена кретања флуида у хидраулици	26
6.1 Улога радног флуида у хидрауличким системима	26
6.2 Примери примене хидрауличких система	27
6.3 Хидропумпе	32
6.3.1 Хидропумпе константног капацитета	32
6.3.2 Хидропумпе променљивог капацитета	40
7. Закључак	44
8. Литература	45

1. УВОД

Механика флуида је део механике који изучава мировање и кретање течности и гасова. Почетак развоја ове науке јавља се још у праисторији, везан је за Архимедов запис "О телима која пливају" који потиче из трећег века пре нове ере. Ово је једна комплексна наука која нам је приближила неке фасцинантне облике понашања из природе као што су на пример: турбуленција авиона, вирови у рекама, кретање чамца у реци, вртлози ветра и многе друге природне појаве. Занимања за ову науку показале су значајне историјске личности као што је споменути Архимед (250 година п.н.е), Галилеј и Леонардо да Винчи (XVI век), Њутн (XVII век), Ојлер и Бернули (XVIII век) и многи други. У природним и другим наукама механика флуида игра веома важну улогу, због тога и постоји велико интересовање за ову науку.

Приликом струјања реалне течности појављује се трење, како у самој течности тако и између зидова и течности. Губици настали струјањем реалне течности кроз цеви и пролазе у хидростатским уређајима, изражавају се у облику пада (губитка) притиска. У хидрауличким инсталацијама и цевоводима струјање може бити или ламинарно или турбулентно.

Код ламинарног струјања течност се креће у слојевима нормално на смер струјања. Због тога је такво струјање и добило назив слојевито струјање (лат. *lamina* = слој). Дакле, струјнице су паралелне с осом цеви.

Облик струјања флуида код којег се делови флуида крећу неправилно с неуједначеним локалним брзинама назива се турбулентно струјање.

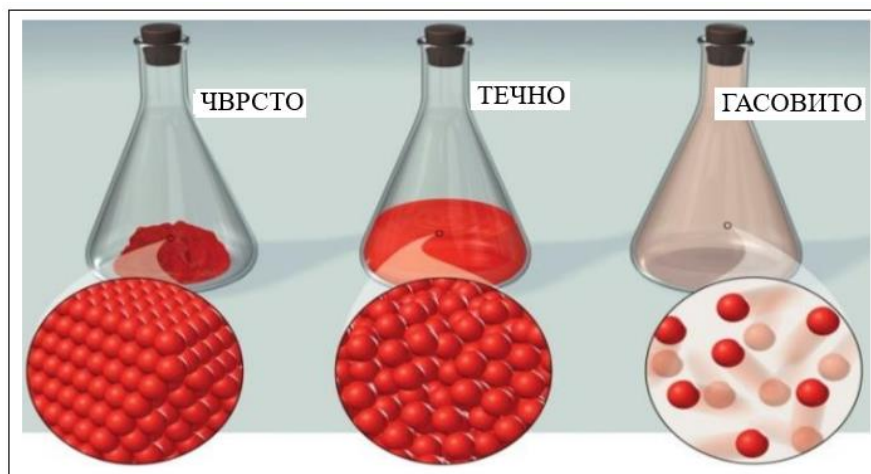
Део механике флуида који се бави кретањем течности назива се динамика флуида, а најшира примена је у хидраулици, и те области ће у овом раду и бити изучаване. Нема скоро ниједне гране технике где се не примењују резултати добијени проучавањем кретања течности. Кад год је у питању механизација и аутоматизација ту је хидраулика нашла своје основно поље примене.

Мада је примена хидраулике врло широка, у завршном раду акенат ће бити стављен на неке карактеристичне области: ауто и авио индустрија, роботика, механизација и друге.

Посебно су обрађене су хидрауличке пумпе. Пумпе се деле у две основне категорије: пумпе константног капацитета и пумпе променљивог капацитета. Пумпе су машине којима се доводи спољашња механичка енергија (рад погонске машине) на рачун које трансформишу енергију радног флуида. Ротацијски хидраулички мотори су слични пумпама и код њих се трансформација енергије обавља у супротном смеру (енергија флуида претвара се у механички рад). Зависно од прикључивања, често иста машина може радити као пумпа или мотор (за такву машину се каже да је реверзибилна, али реверзибилност такође може значити и само могућност обртања у оба смера). За погон пумпе обично се користе електромотори, а у мобилној хидраулици мотори са унутрашњим сагоревањем.

2. ФИЗИЧКА СВОЈСТВА ФЛУИДА

Познато је да се супстанце у природи налазе у једном од три агрегатна стања: чврстом, течном и гасовитом. Основна разлика између чврстих супстанци и флуида је у томе што се под дејством спољашњих сила чврсте супстанце деформишу до неке тачке, а флуид се деформише све док на њега делује спољашња сила. Као што смо рекли флуиди се лако деформишу, па чак и при деловању врло мале спољашње силе и никада се не враћају у првобитан облик. Чврсте супстанце при дејству спољашње силе не мењају свој облик и запремину, течности задржавају своју запремину, док гасови мењају и облик и запремину у односу на посуду у којој се налазе. Овакво понашање јавља се због унутрашњих сила које делују на молекуле, као што се може видети на слици 2.1 [1].



Слика 2.1 Дејство унутрашњих сила на супстанце у различитим агрегатним стањима [2]

Код чврстих супстанци међумолекуларне силе привлачности су веома јаке па прузрокују сталност контактеног окружења, из тог разлога ове супстанце не мењају своју запремину и облик. Међумолекуларне силе код течности су знатно мање него код чврстих супстанци, па ове силе не спречавају да се молекули непрекидно крећу кроз масу течности, али условљавају да се налазе у контактеном окружењу у односу једни на друге. Из тог разлога течности не мењају запремину, али мењају облик. Негативан интензитет који делује на молекуле код гасова, доводи до променљиве запремине и облика.

Карактеристично својство течности и гасова, које их одваја од чврстих супстанци, је лакоћа са којом се могу деформисати под дејством врло малих спољашњих сила. Флуид је термин под којим се подразумева заједнички назив за течности и гасове, а тај заједнички назив указује на заједничка својства, не искључујући њихове разлике.

Сва физичка својства се могу везати или за коначну количину флуида или за једну тачку унутар флуида. Физичка својства флуида погодено је поделити у три групе:

- Механичка (густина (ρ), притисак (p));
- Термичка (температура (t, T), унутрашња енергија (u), енталпија (S), специфична топлота (C));

- Узрокована (вискозност (μ, ν), стишљивост (s), површински напон (γ), напон паре (p_k), топлотно ширење (θ), кавитација (k) [3].

Густина

Густина је најзначајније физичко својство флуида. Дефинише се као маса по јединици запремине, њена јединица је kg/m^3 . Формула за средњу густину је:

$$\rho = m/V, \quad (2.1)$$

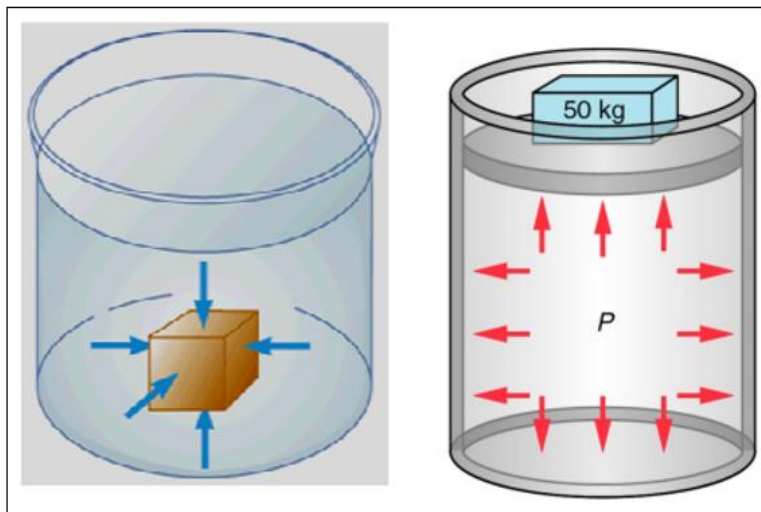
где је m маса, а V запремина. Ако је густина флуида $\rho = \text{const}$, флуид је хомоген. Флуид је хомоген кад не долази до мешања два различита флуида у суду (слика 2.2). Онај који има мању густину заузимаће горњу половину, док ће онај са већом густином заузимати доњу половину суда и њихова граница је јасна. Ово се најбоље може видети уз помоћ два свакодневна састојка: вода и јестиво уље. У посуду прво сипамо воду затим полако и уље, уље ће остати да плива на површини зато што је његова густина мања од густине воде. Међутим, ако густина није константна онда је флуид нехомоген, односно хетероген, и долази до њиховог мешања.



Слика 2.2 Нехомогени флуид [4]

Притисак

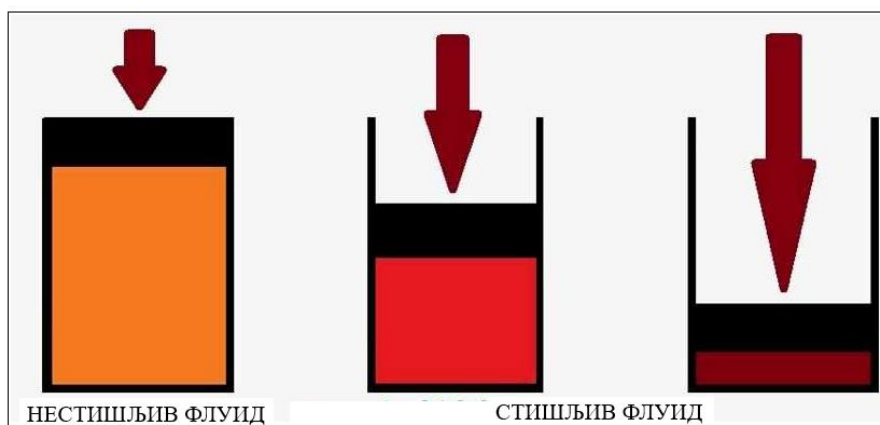
Притисак (слика 2.3) је скалар, означава се малим словом p и има јединицу Паскал. Постоје две врсте притиска: унутрашњи и спољашњи притисак. Унутрашњи притисак у оквиру елементарних запремина у посматраној изведеној флуидној запремини се поништавају. Спољашњи притисак представља дејство спољашњих сила. Спољашње силе могу бити запреминске и површинске. Запреминске силе делују на све тачке супстанце и сразмерне су маси у свакој тачки (земљина тежа). Површинске силе делују на тачке спољашње површине супстанце и независне су од масе (притисак ветра на реку).



Слика 2.3 Физичко својство флуида – притисак [5]

СТИШЉИВОСТ

Као најзначајнију разлику између течности и гасова можемо навести стишљивост. Појам стишљивости везује се за промену густине. Стишљивост је способност флуида да мења запремину при промени температуре и притиска (слика 2.4).



Слика 2.4 Стишљивост флуида услед промене притиска [8]

Све супстанце су у извесној мери стишљиве, јер одређена мера притиска и температуре увек доводи до промене запремине. Ово својство флуида исказује се коефицијентом стишљивости, који је дефинисан на следећи начин:

$$s = -\frac{dV}{V} \cdot \frac{1}{dP} \quad (2.2)$$

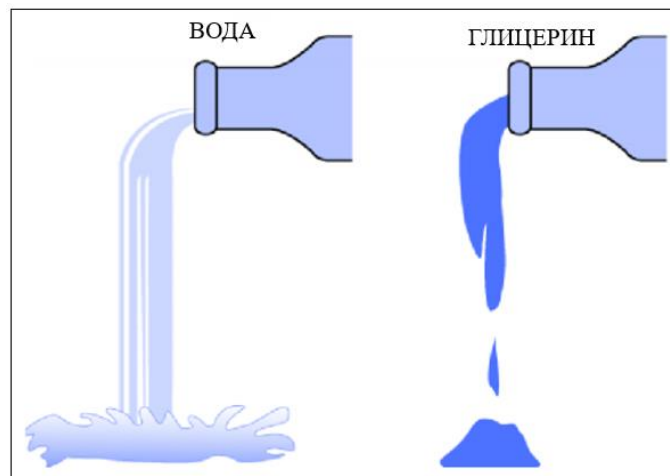
где знак минус у једначини указује на то да се запремина смањује при повећању притиска. Реципрочна вредност коефицијента стишљивости назива се модул стишљивости:

$$\varepsilon = \frac{1}{s} \quad (2.3)$$

Стишљивост воде је незнатна и зато је практично могуће занемарити је. Ако на воду у посуди делује сила великог интензитета, она ће променити свој облик, али не и запремину. Док ће гас променити свој облик и запремину чак и при преласку из мање у већу посуду, односно испуниће целу посуду иако је знатно већа. Стишљивост се не сме занемарити када се проучава стишљивост код којих брзина достиже брзину звука. Течности су флуид који никада не би успели да достигну дату брзину, зато се и посматрају као нестишљив што није случај и са гасовима [3].

Вискозност

Вискозност је својство које се јавља при кретању флуида, показујући отпор при релативном клизању својих молекула. Унутрашње трење, односно вискозност, последица је деловања два механизма. Први механизам је привлачност међумолекуларних сила, други механизам је резултат сталног хаотичног кретања молекула унутар флуида. Код међумолекуларне силе привлачности, што су молекули међусобно ближи, веће су силе између њих па је већа и вискозност. Молекули из слоја који се креће брже бивају успорени од стране молекула из слоја који се крећу спорије услед деловања међумолекуларних сила, и обрнуто. Код другог механизма услед хаотичног кретања, молекули из бржег слоја прелазе у спорији слој и са собом понесу и већу брзину. Када се молекули из ова два слоја сударе долази до размене количине кретања, односно до убрзања споријег молекула. Исти процес се дешава када молекули из споријег слоја пређу у бржи, спорији молекул ће при сударању са бржим успорити га. Процес размене количине енергије се догађа и код течности и код гасова, његов интензитет не зависи од притиска, већ од покретљивости молекула, односно температуре флуида. Кишне капљице се лепе за окно од прозора, иако на њих делује сила Земљине теже која их повлачи ка земљи. У додирној површини капљице и стакла влада сила атхезије која је у стању да заустави капљице. Чврста површина кочи кретање капљице, са површине се кочење преноси на унутрашње кретање, јер постоји унутрашња сила међу њима (кохезија).



Слика 2.5 Вискозност код различитих супстанци [5]

У зависности од врсте флуида коју посматрамо приметимо да је вискозност код различитих врста флуида у великој мери различита. Ово се лако може видети у следећем примеру: Ако покушамо да сипамо воду из флаше у чашу то ћемо урадити релативно лако

јер ће она просто лагано да се прелије из флаше у којој се налази. Док уколико будемо желели да сипамо глицерин из боце у неку посуду, мораћемо да притиснемо боцу у којој се налази. Разлог оваквом понашању ове две различите течности је управо њихова вискозност. Унутрашње трење код глицерина је знатно веће него код воде и зато на глицерин морамо да делујемо знатно већом силом (слика 2.5) [3].

Температура јако утиче на вискозност и њеним порастом вискозност течности опада, а вискозност гасова се повећава. У течностима се повећањем температуре смањује сила кохезије међу молекулима (које су код течности узајамно ближе него код гасова), тако да се тиме смањује и вискозност. Код гасова како се повећава температура, повећава се и брзина Брауновог кретања молекула гаса, па се повећава и вероватноћа узајамног сударања молекула, чиме се повећава и вискозност. Вискозност флуида се повећава повећањем притиска.

Температура јако утиче на вискозност и њеним порастом вискозност течности опада, а вискозност гасова се повећава. У течностима се повећањем температуре смањује сила кохезије међу молекулима (које су код течности узајамно ближе него код гасова), тако да се тиме смањује и вискозност. Код гасова како се повећава температура, повећава се и брзина Брауновог кретања молекула гаса, па се повећава и вероватноћа узајамног сударања молекула, чиме се повећава и вискозност. Вискозност флуида се повећава повећањем притиска.

Површински напон

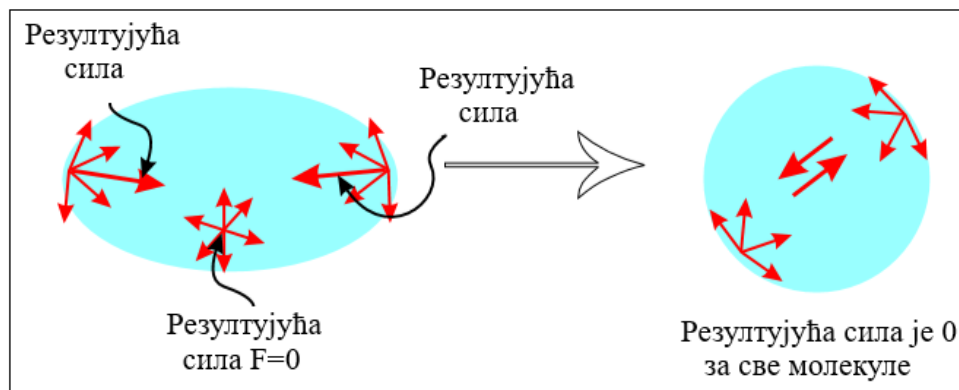
Привлачне силе између молекула истог типа, називају се силе кохезије. Течности остају у суду отвореном одозго јер силе кохезије држе молекуле течности заједно. Ходање неких инсеката по води такође може да се објасни постојањем сила кохезије. Привлачне силе између молекула различите врсте, називају се силе адхезије. Такве силе држе капи кондензоване воде залепљеним за прозорска стакла или лишће биљака (слика 2.6).



Слика 2.6 Капи воде на листу и инсект који хода по површини воде - ефекти сила адхезије и кохезије [9]

Силе кохезије између молекула имају за последицу да се слободна површина течности понаша слично затегнутој гуми. Она се, услед тога, контрахује до најмање могуће површине-односно, ако је то могуће, формира сферну кап. Тај ефекат се зове површински напон. Слика 2.7, показује како силе кохезије редукују слободну површину течности. Разлог постојања ове тежње код течности је што је за молекуле који се налазе у њеној унутрашњости, укупна сила једнака нули, будући да су са свих страна окружени приближно

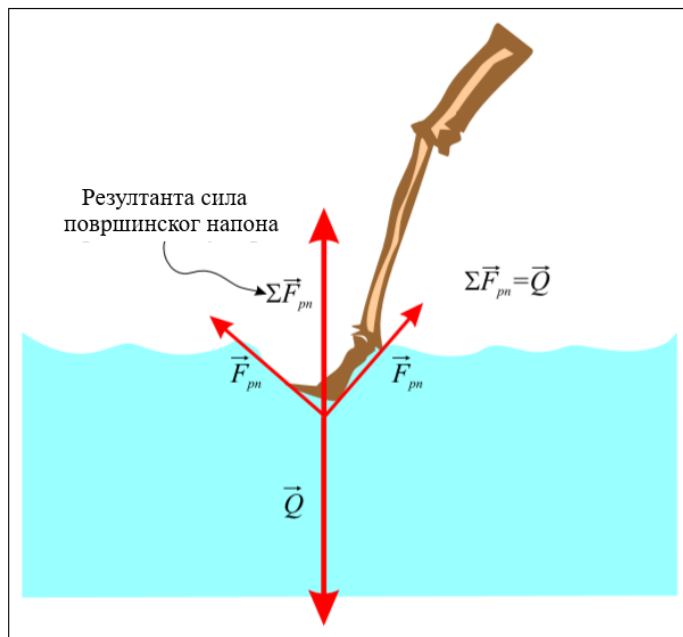
једнаким бројем суседа. Код молекула који се пак налазе у површинском слоју течности, обзиром да са горње стране нису у једнаком броју окружени молекулима исте врсте, се јавља ненулта резултујућа привлачна сила усмерена ка унутрашњости течности. Површински напон је према томе последица сила кохезија.



Слика 2.7 Површински напон је одговоран за тежњу капи флуида да смањи слободну површину [9]

На слици 2.7 приказане су силе које делују на молекулима који се налазе на карактеристичним местима, као и одговарајуће резултујуће силе.

У случају ходања инсекта по води (слика 2.8), површински напон се супротставља тежини инсекта и он остаје на површини воде не продирући у њу. Део ноге инсекта који додирује воду изазива закрвиљавање њене површине. Услед тога се јавља сила површинског напона која има тежњу да смањи слободну површину течности. Та сила је тангенцијална на површину а њена резултанта је усмерена вертикално на више.



Слика 2.8 Капи воде на листу и инсект који хода по површини воде [9]

2.1 Идеалан и реалан флуид

Када се флуид креће, међу његовим честицама и слојевима се јавља унутрашње трење узроковано међумолекуларним силама. Ако је унутрашње трење занемарљиво, кажемо да је флуид идеалан. Из овога закључујемо да је идеалан флуид безвискозан. Закони изведени за струјање идеалног флуида могу се у великом броју случајева уз одређене промене применити и на реалне флуиде. Претпоставка код идеалних флуида је да су нестишљиви, што је добра претпоставка за течности, а вреди и за гасове при мањим брзинама кретања. Ток идеалног флуида је слојевит, па имамо ламинарно, а не турбулентно кретање. Стање стационарног струјања је стање у којем се идеални флуиди налазе ако се у некој тачки простора брзине честица не мењају током времена. Код реалног флуида увек постоји унутрашње трење, које је последица међумолекуларних сила привлачности. За њега постоји ограничен број тачно решених проблема. Један исти флуид под различитим условима може да буде и реалан и идеалан. На пример, брзо кретање компресивног гаса кроз цев има одлике реалног флуида, док под другим условима кретања као што је споро истицање разређеног гаса може бити идеалан [6].

2.2 Кретање флуида

Течности и гасови имају заједничку особину која се огледа у великој покретљивости њихових честица у односу на чврста тела. Када проучавамо кретање флуида потребно је да посматрамо велик број величина у запремини коју заузима неки флуид, које се мењају током времена, то је веома сложен процес. Због ове сложености проучавање се поједностављује на неколико начина. Идеализацијом флуида олакшавамо да се математички на једноставнији начин опише кретање флуида. Историјски посматрано постоје два основна приступа описивања кретања флуида у простору и времену:

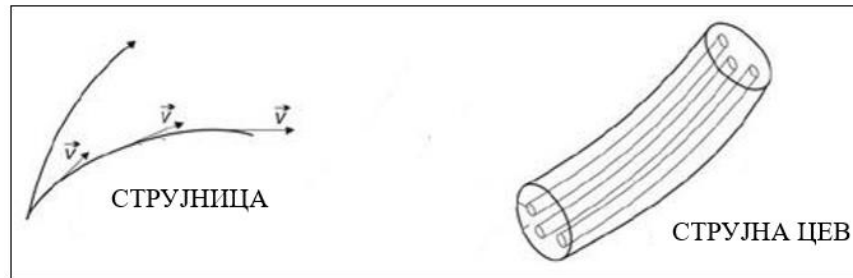
- Ојлеров приступ – посматра промене величина током времена у некој тачки простора коју заузима флуид и
- Лагранжов приступ – прати се промена која се догађа једном молекулу кроз време. Наравно један молекул није довољан за проучавање кретања, па је потребно посматрати више њих, што отежава додатно проблем. Овај метод се често назива супстанцијални метод.

Ојлеров приступ је мање детаљан, због тога се и више примењује, мада се у неким специјалним случајевима користи и Лагранжов приступ.

Ако претпоставимо да се параметри флуида у некој тачки флуидног простора не мењају током времена омогућићемо једноставније математичко описивање. У том случају имаћемо устаљено или стационарно струјање. Међутим, ако се посматране величине мењају током времена кретање је неустаљено (нестационарно). Нестационарност нам доноси доста проблема при решавању.

Кретање флуида се описује помоћу његових честица. Важан појам у анализи кретања флуида представља појам струјне линије или струјнице. Струјнице су замишљене линије дуж којих се крећу честице флуида. Уводе се као криве линије код којих је тангента у свакој тачки флуида колинеарна са вектором брзине. Ако повучемо одговарајуће струјне линије кроз сваку тачку неке уочене затворене контуре добићемо струјну цев. Она обухвата млаз

флуида који се у посматраном тренутку креће кроз област ограничену омотачем ове цеви, као што се види на слици 2.9 [6].



Слика 2.9 Кретање флуида кроз цев [6]

У зависности од услова струјања и брзине, флуидне честице се могу кретати по глаткој путањи, без мешања и пресецања своје путање са путањом других честица, или може хаотично да преплиће своју путању са путањама других честица, да формира вртлоге и таласе. Према путањи струјница разликујемо ламинарно и турбулентно кретање. Кретање код кога су струјнице глатке и непрекидне зове се ламинарно кретање. Карактеристике га слојевито кретање флуидних честица без прелажења флуидних честица из слоја у слој, односно без мешања честица из различитих слојева. Што значи да све честице у истом слоју флуида имају исту брзину тј. сви слојеви флуида крећу се паралелно. Ово кретање је повезано са малим брзинама, вискозност је довољно јака да задржи честице на својој путањи и да не дозволи да дође до мешања честица из различитих слојева. Када брзина порасте, слојеви почињу полако да се мешају и струјање постаје турбулентно. Код турбулентног кретања струјнице нису праве и имају прекиде. За појаву турбуленције у флуиду могу да буду одговорна два узрока. Турбулентно кретање може да буде узроковано неком препреком која се налази на путу флуида, а други узрок може да буде превелика брзина кретања флуида за дате услове. Због интензивног мешања честица спорије честице коче брже, а брже убрзавају спорије па долази до њиховог преплитања и мешања, што доводи до турбуленције. У природи ламинарно кретање се ретко јавља. Турбулентно кретање се много чешће јавља у нашој околини, можемо га видети у рекама, каналима, када дува ветар и тако даље. Постојање ова два струјна режима доказао је Осборне Реунолдс (Рејнолдс). Његов велики допринос био је то што је утврдио критеријум при коме долази до преласка из ламинарног у турбулентно кретање. Запазио је да промена режима кретања зависи од врсте флуида, односно његове вискозности, од брзине кретања флуида и пречника цеви кроз коју се флуид креће. Тај критеријум касније је назван по њему Рејнолдсов број, који је бездимензионалан. Рејнолдсов број је дефинисан на следећи начин:

$$Re = \frac{vd}{\mu} \quad (2.4)$$

где је v – брзина флуида, d – пречник цеви, а μ – вискозност. У уобичајеним условима кад се не поклања превелика пажња експерименту, прелазак из ламинарног у турбулентно кретање дешава се између $Re = 2000 - 4000$. Вредност $Re = 2320$ често се употребљава као граница између ламинарног и турбулентног кретања кроз округле цеви. Између ова два режима кретања флуида налази се прелазни режим. Он садржи елементе и једног и другог кретања [7].

Напон паре

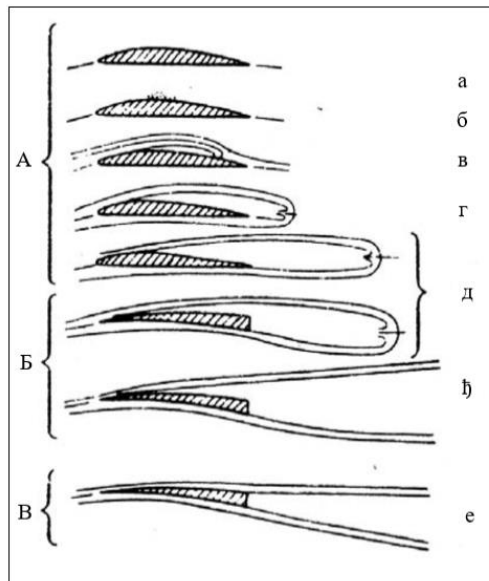
Напон паре је онај притисак, (критични притисак), изнад нивоа течности, при коме се успоставља равнотежа стања између броја молекула течности који испаравају и оних који се кондензују. Зависи од температуре течности. Ако је притисак у течности мањи од напона паре за ту течност, течност ће интензивно да испарава. Настала пара одлази са струјом течности, нпр. кроз цевовод, што лако може да доведе до прекида тока течности [10].

Кавитација

При кретању чврстих тела кроз течности могу се на деловима њихових омотача појавити површине испуњене гасом или паром. Фруд је ову појаву назвао кавитацијом, а Рејнолдс је пре 85 година објаснио. Кавитација се јавља када локална брзина течности на површини тела толико порасте да се притисак у флуидној струји спушта испод напона паре при постојећој температури, па долази до испаравања течности и стварања парних мехурова. Парни мехурови расту, спуштају се низструјно све док не дођу у зону виших притисака, када пуцају уз појаву ударног таласа. Прскање парног мехура изазива ерозију чврсте површине због великог убрзања течних капи кроз гасну средину као и деловање електричних и хемијских појава. Мера кавитације је бездимензијска величина названа кавитацијски број k .

$$k = \frac{p_0 - p_k}{\rho \frac{v_0^2}{2}} \quad (2.5)$$

где су: p_0 , v_0 – притисак [Pa] и брзина [m/s] флуида у неузнемиреној струји, p_k – притисак у мехуру (каверни) [Pa].



Слика 2.10 Утицај кавитације и вентилације на опструјавање крила Типови профила: А-обични, Б-суперкавитацијски, Ц-са вентилацијом задње ивице. Услови опструјавања: а-потпуно оквашен профил, б-почетна кавитација, в-кавитацијска ерозија, г-вибрације, д-режим суперкавитације (парна или ваздушна каверна), ж-режим суперкавитације (целокупна каверна као последица вентилације), е-режим суперкавитације (вентилација задње ивице профила) [10]

Најпрегледнији развој кавитације може да се прати на подводном крилу које је стога најбоље и проучено. Прва појава кавитације је на месту са притиском $p=p_k$ (слика 2.10. б). Када се парни мехур развије иза задње ивице (слика 2.10. ц), ерозија се обуставља и долази до вибрације крила због нестационарног оптицања задње ивице. Оба процеса, ерозија и вибрација, су периодична и одвијају се брзином коју око не може да прати.

Уколико се кавитација развија потпуно изнад или иза крила, режим се назива суперкавитација. Иза крила може да буде нестационаран процес, али због тога што је удаљена од тела не утиче негативно на њега. За суперкавитацију $\kappa = 0$.

Промена кавитацијског броја може да се изведе на два начина: променом амбијентног притиска p_0 (како се и ради у кавитацијским тунелима) или променом p_k притиска у каверни. Оваква кавитација назива се вештачком. Примена вештачке кавитације на суперкавитацијским крилима проширује област њихове примене, смањује енергијске губитке и олакшава управљање хидромеханичким својствима. Потпуна или делимична вештачка кавитација може се остварити и на телима другог облика, по правилу оносиметричним.

За дозвољени ниво кавитације (нпр. $\kappa = 0,8$) може се одредити максимално дозвољена брзина опструјавања профила:

$$v_{max} = \sqrt{\frac{p_0 - p_k}{\frac{\rho \kappa}{2}}} \quad (2.6)$$

За струјне режиме са дубоким стадијумом кавитације ($\kappa \rightarrow 0,1$) користе се профили клинастог облика, како је то приказано на слици 2.10. б и 2.10. ц. Они се називају суперкавитацијски и њихово основно својство је да обезбеде стабилну карактеристику профила при свим режимима оптицања, као и виши степен корисности у поређењу са обичним аеродинамичким профилима. Стабилна карактеристика са суперкавитацијским профилем постиже се тако што се већ при вишим вредностима κ (слабије изражена кавитација) са леђне стране и иза профила формира стабилна парна или ваздушна каверна која се задржава и при врло ниским вредностима $\kappa \sim 0,1$. Код оваквих профила узгонска сила је искључиво последица натпритиска течности са грудне стране профила, јер је густина ваздушног (парног) мехура са леђне стране занемарива у односу на течност. Међутим, пошто је код суперкавитацијских профила дозвољена знатно већа брзина, лако је достићи жељену узгонску силу.

Начини борбе против штетног деловања кавитације потпуно се разликују код нормалних и суперкавитацијских профила.

3. ЈЕДНАЧИНА КОНТИНУИТЕТА И ГУБИЦИ СТРУЈНЕ ЕНЕРГИЈЕ

Флуиди према самој њиховој дефиницији, као основну особину имају то да могу да теку, односно да се крећу. Свакодневни примери су: дим који ствара ватра, струјање воде у рекама и цевима водовода, крв која циркулише кроз крвне судове.

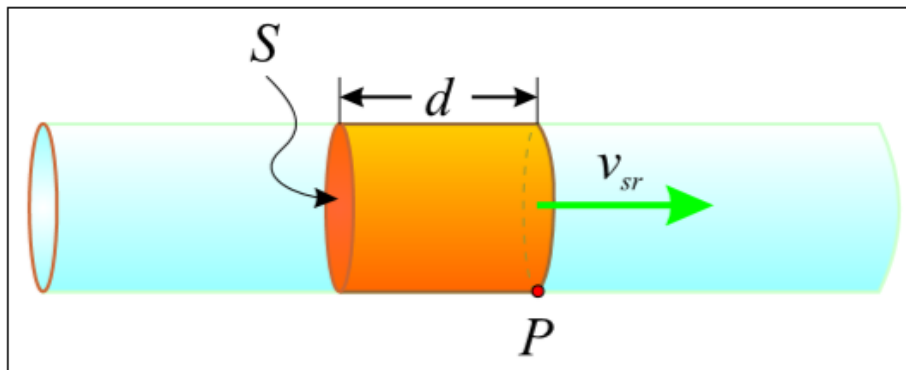
3.1 Веза протока и брзине струјања

Проток флуида Q , се дефинише као запремина која у јединици времена прође кроз неку тачку (прецизније би било рећи кроз неку површину), односно:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3.1)$$

SI јединица за проток је m^3/s , али се у свакодневној употреби налазе и неке друге јединице. Најчешћа је литар у минути, па тако на пример срце одрасле особе која мирује, има проток крви од 5,00 литара у минути [9].

Проток и брзина струјања су повезане, иако различите, физичке величине. Тако на пример, што је већа брзина речног тока, то ће већа количина воде да протекне њоме, односно биће већи запремински проток реке. Међутим, проток зависи и од величине реке, односно њеног попречног пресека. Јасно је да ће, много више воде у јединици времена протећи релативно спорим Дунавом, него неким брзим планинском потоком.



Слика 3.1 Проток флуида који струји кроз цев константног пресека средњом брзином v_{sr} [9]

Флуид који се налази у освеченом цилиндру на слици 3.1 има запремину $V=Vd$ и он за време t прође крај тачке P на слици, односно кроз попречни пресек цеви површине S . У јединици времена ће протећи

$$\frac{V}{t} = \frac{Sd}{t} \quad (3.2)$$

флуида. Како је V/t запремински проток Q , а средња брзина протицања флуида $v_{sr} = d/t$, добија се једначина

$$Q = S \cdot v_{sr} \quad (3.3)$$

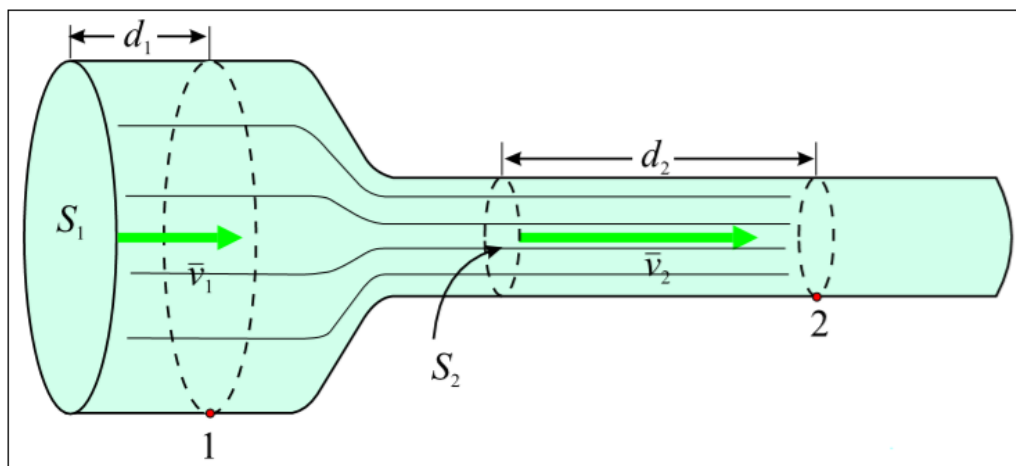
која повезује проток и средњу брзину струјања флуида.

3.2 Једначина континуитета

Познато је да уколико на неки начин смањимо попречни пресек баштенског црева кроз које струји вода, приметићемо да она истиче већом брзином. Слично се дешава и на местима где се речно корито сужава, тамо настају брзаци. Супротно, уколико река наиђе на проширење, вода ће тећи спорије, али ће се ток поново убрзати на месту где се њено корито сужава. Другим речима брзина струјања расте када површина попречног пресека опада и обрнуто. На слици 3.2 је приказано протицање флуида кроз цев неједнаког полупречника.

Уколико је флуид чије је протицање приказано на слици нестишљив (под дејством притиска му се не мења запремина), иста запремина флуида ће за исто време t да протекне крај тачака 1 и 2, односно

$$V = S_1 d_1, V = S_2 d_2 \quad (3.4)$$



Слика 3.2 *Што је цев ужа, иста запремина флуида заузима већи део цеви [9]*

Како су путеви d_1 и d_2 које су исте количине флуида прешле, дате релацијама $d_1 = v_{1sr}t$ и $d_2 = v_{2sr}t$, из једнакости запремина (и протока) се добија

$$S_1 v_{1sr} = S_2 v_{2sr} \quad (3.5)$$

Ова једначина је у динамици флуида позната под називом једначина континуитета и важи за све нестишљиве флуиде. Према њој, брзина флуида је већа тамо где је пресек флуида мањи и обрнуто. Другим речима, флуид се убрзава у смеру сужења цеви а то значи да у том смеру делује сила. Ова сила настаје услед разлике притисака, па се намеће закључак да је притисак већи у ширем делу цеви (где је брзина струјања мања) а нижи у ужем делу цеви (где је брзина струјања већа).

3.3 Губици струјне енергије и могуће грешке

Једна од тајни хидротехничке струке је и одређивање коефицијента трења, односно, линијског губитка енергије, који директно одређује пропусну моћ цевовода. Све величине од којих зависи коефицијент трења имају изванредно познати степен неодређености. То посебно важи за храпавост цеви, мада није ограничено само на то. Према изразу (3.6), одступање стварне вредности пречника цеви од онога шта се у рачуну узима, за само 1 % одражава се као

грешка од 5 % у процени губитка енергије. Одступање од ± 1 % се толерише код челичних цеви, док је за цеви од других материјала, то и више [11].

$$r_{ij} = \lambda_{ij} \frac{L_{ij}}{D_{ij}} \frac{1}{2gA_{ij}^2} = \frac{8\lambda_{ij}L_{ij}}{\pi^2 g D_{ij}^5} \quad (3.6)$$

Не треба заборавити да "номинални пречник", представља погодан заокружен број који означава цеви, прирубнице, затвараче и остале елементе који одговарају једни другима. Код наручивања цеви и арматура увек се специфицира спољни пречник цеви. Веза са стварним димензијама тих елемената је само приближна. Такође, врло често, на овим просторима уграђују се цеви које се тренутно могу набавити, под условом да се не разликују "много" од пројектованих.

Одређивање репрезентативне храпавости цеви није лак задатак. За велике Re бројеве, грешка у процени храпавости од 100 %, даје грешку у коефицијенту трења и губитку енергије између 10 и 20 %. Због могућих великих разлика у "проценама" храпавости цеви у експлоатационим условима, могуће су велике разлике у проценама пројектованог капацитета.

Апсолутна храпавост цеви, k , није само величина микро избочина на зиду, него је мера макро неправилности дуж цеви, начина спајања, квалитета спојница, полагања у ров, исталоживања, одступања пречника од номиналне вредности итд.

Постоје табеле са препорученим вредностима храпавости, које се односе на нове цеви, одређени квалитет израде и одређену технологију. Ти подаци су добијени углавном на бази лабораторијских мерења, а врло мало их је, на бази мерења у експлоатационим условима [11].

Иако су препоручене вредности храпавости за неке материјале јако ниске, 0.001 mm за стаклене и неке врсте пластичних цеви, односно, 0.02 mm за нове челичне цеви, неопходно је имати одређену резерву због напред поменутих разлога. Код провере капацитета дистрибуционе мреже препоручује се 0.5 mm као минимална вредност, и то само за чисту, хлорисану и неагресивну воду. У осталим случајевима, минимална вредност би требало да буде 1 mm.

Кинематички коефицијент вискозности флуида зависи од температуре (T), што утиче на вредност Re броја, и на варијацију коефицијента трења, нарочито у области хидраулички глатких цеви.

На основу свега овога може се дати и неколико практичних напомена:

- Под условом да се пречник цеви познаје са 0.5 % неизвесности, могућа грешка процене коефицијента трења за нове цеви, у области хидраулички глатких цеви (као и у прелазној области када је процењена вредност мања од 1.2 вредности за глатку цев), је око 10 %.
- Ако је процењена вредност коефицијента трења између 1.2 и 1.5 пута вредност за глатку цев, могућа грешка процене прелази 10 %, такође за нове цеви. Због промена током експлоатације може се десити повећање коефицијента трења за 25 до 50 %, мада и веће промене нису тако ретке.
- Ако је дужина цеви већа од 500 D (или 1000 D), ради се о тзв. дугачкој цеви, и тада се стандардни локални губици енергије (улаз у цев, кривина, излаз и

слично) могу занемарити. На први поглед ово делује као груба апроксимација, али све постаје јасније када се има у виду колика је неизвесност код одређивања коефицијента трења цеви. Што се налазимо ближе вредностима за глатку цев могуће грешке су мање, а оне расту како расте утицај релативне храпавости.

Стандардни коефицијенти локалних губитака су реда величине 1, ($\Sigma \xi = O(1)$), а коефицијент трења $\lambda \cong 0.02$, што даје

$$\lambda \frac{L}{D} \approx 0.02 \cdot 500 = 10 \quad (3.7)$$

из чега се види да, код дугачких цеви, локални губици достижу највише око 10 % линијских губитака енергије, што је мање од неизвесности процене самог коефицијента трења [11].

4. ЈЕДНОЛИКО КРЕТАЊЕ ТЕЧНОСТИ КРОЗ ЦЕВИ

Под једноликим или равномерним кретањем течности подразумева се такво кретање које има исту средњу брзину у свим управним пресецима цеви. Разуме се, брзине се разликују у разним тачкама истог пресека. Да би кретање течности кроз цеви било једнолико, не сме да се мења попречни пресек цеву ни по величини ни по облику. При томе је неопходно да и храпавост унутрашњих зидова цеви буде иста по њеној дужини.

Код једноликог кретања течности, распоред притиска у попречном пресеку струјног тока приближно се померава хидростатичком закону, при чему се узима да притисак течности у одговарајућем пресеку има вредност притиска у тежишту пресека.

Зависно од вредности Рејнолдсовог броја једнолико кретање може да буде равномерно или турбулентно.

4.1 Ламинарно кретање течности кроз цеви при константној температури

Када је Re број мањи од 2320, кретање течности у цевима константног пречника је ламинарно. Ако се претпостави да је кретање устаљено, онда ће се струјнице поклапати са путањама и биће паралелне оси цеви. Струјање је и осносиметрично, тј. Струјна слика је истоветна у свим меридијанским равнима. При оваквом струјању кроз цевоводе, на течност делују силе притиска, сила Земљине теже и сила трења. Пошто је струјање равномерно, убрзање је једнако нули, па су и силе инерције једнаке нули.

Услед вискозности делићи течности се лепе за зидове цеви и тамо је брзина струјања једнака нули. Применом Њутновог закона о трењу могуће је да се одреди промена брзине по попречном пресеку кружне цеви.

Да би се одредио закон промене брзине, посматраће се цев унутрашњег пречника $D=2R$ кроз коју течност струји ламинарно. Део цеви дужине l ограничен је пресецима 1-1 и 2-2 (слика 4.1). Из течности се издваја њен део у облику цилиндра полипречника r и дужине l , чија се оса поклапа са осом цеви а основе цилиндра леже на уоченим пресецима 1-1 и 2-2.

На посматрани део течности делују силе притиска околне течности по основама цилиндра и сила трења по његовом омотачу. Како је цев хоризонтална, то сила Земљине теже не утиче на струјање у правцу осе цеви, па је извођење једноставније.

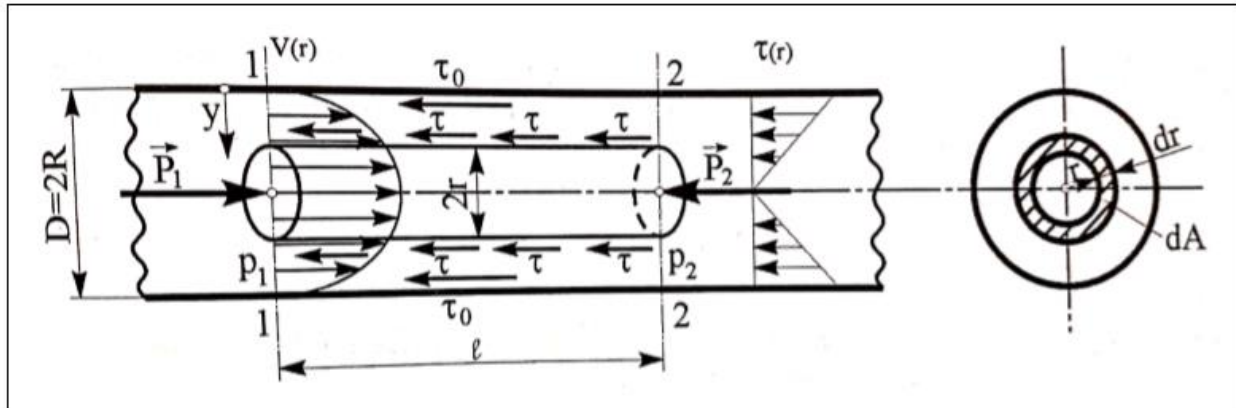
Ако су p_1 и p_2 притисци у пресецима 1-1 и 2-2 а τ тангенцијални напон по омотачу цилиндра који се релативно креће у односу на околну течност, онда се из једначине за једнолико кретање

$$(p_1 - p_2)r^2\pi - 2\pi r l \tau = 0 \quad (4.1)$$

налази тангентни напон као

$$\tau = \frac{p_1 - p_2}{2l} r = \frac{\Delta p}{2l} r, \quad (4.2)$$

где је Δp пад притиска услед трења на дужини l цеви.



Слика 4.1 Ламинарно кретање течности у кружној цеви [7]

Према томе, напон трења τ између појединих слојева течности у цеви мења се по линеарном закону у функцији радијуса r . Дијаграм напона $\tau=\tau(r)$ показан је на слици 4.1.

Према Њутновом закону, тангентни напон једнак је производу из динамичке вискозности и промене брзине у правцу нормале на површину. Како је у разматраном случају смер радијуса r супротан од смера нормале у на чврстој површини коју течност кваси, може се написати да је

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} = -\eta \frac{dv}{dr} \quad (4.3)$$

одавде и из израза (4.2) следи да је прираштај брзине одређен диференцијалном једначином

$$dv = -\frac{\Delta p}{2\eta l} r dr, \quad (4.4)$$

чије је решење

$$v = -\frac{\Delta p}{2\eta l} \cdot \frac{r^2}{2} + C \quad (4.5)$$

Константа интеграције C се одређује из услова лепљења делића течности за зидове цеви. Наиме, на зиду цеви је $v=0$ и $r=R$, па је

$$C = \frac{\Delta p r^2}{4\eta l} \quad (4.6)$$

Заменом ове вредности за C у нађено решење, добија се промена брзине по пресеку кружне цеви при ламинарном струјању

$$v = \frac{\Delta p}{4\eta l} (R^2 - r^2) = v(r) \quad (4.7)$$

из које се види да се брзина мења по параболичном закону. Максимална брзина струјања остварује се у оси цеви ($r=0$) и иста износи

$$v_{max} = \frac{\Delta p r^2}{4\eta l} \quad (4.8)$$

Израз за брзину (4.7) омогућава одређивање протока течности кроз цев. Наиме, кроз елементарну површину dA попречног пресека цеви у облику кружног прстена полупречника r и ширине dr , протиче количина течности

$$dQ = v dA = v \cdot 2\pi r \cdot dr \quad (4.9)$$

Зато је укупни проток течности кроз цев одређен изразом

$$Q = 2\pi \frac{\Delta p}{4\eta l} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr \quad (4.10)$$

одакле се, после интеграције, налази да је

$$Q = \frac{\Delta p R^4 \pi}{8\eta l} \quad (4.11)$$

Из обрасца (4.11) види се да је проток - сразмеран четвртој степену полупречника цеви. Овај образац је први извео Стокс (Stokes). Међутим, до истог обрасца дошли су и Хаген (Hagen) и Поазеј (Poiseuille), али експерименталним путем. Према томе, они су својим експериментима потврдили исправност поступка извођења обрасца (4.11) теоријским путем. У литератури се израз (4.11) најчешће назива Поазејевим законом за проток.

На основу израза за проток лако се може израчунати средња брзина струјања течности кроз цев као

$$v_s = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{R^2 \pi} = \frac{\Delta p R^2}{8\eta l} \quad (4.12)$$

Упоредивањем израза (4.8) и (4.12) за максималну и средњу брзину, закључује се да је средња брзина при ламинарном струјању два пута мања од максималне, односно

$$v_s = \frac{1}{2} v_{max} \quad (4.13)$$

Ако се израз (4.11) реши по паду притиска Δp , добиће се формула

$$R_v = \frac{128 \eta l Q}{\pi D^4} \quad (4.14)$$

при чему је стављено $D = 2R$ и $\eta = \rho \nu$. И образац (4.14) се често у литератури назива, такође, Поазејевом формулом. Како је $Q = V_s A = V_s D^2 \pi / 4$, то се израз (4.14) може написати и посредством средње брзине као

$$R_v = \frac{32 \eta l v_s}{D^2} \quad (4.15)$$

а, затим, и посредством Рејнолдсовог броја ($Re = v_s D / \nu$),

$$R_v = \frac{64}{Re} \frac{l}{D} \frac{v_s^2}{2} \quad (4.16)$$

Губитак струјне енергије услед трења одређен је изразом

$$R_v = \lambda \frac{l}{D} \frac{v_s^2}{2} \quad (4.17)$$

то се упоређивањем ова два израза добија да је при ламинарном струјању реалне течности коефицијент отпора услед трења дефинисан релацијом

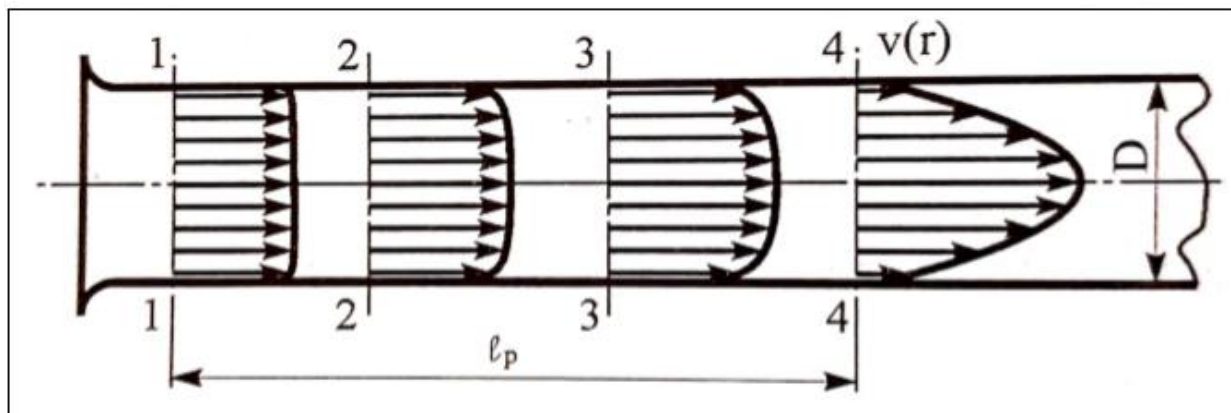
$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (4.18)$$

Коефицијент трења при ламинарном кретању, као што се види, зависи само од Рејнолдсовог броја, тј. овај коефицијент не зависи од хrapавости унутрашњости цевовода. Експерименти су потврдили образац (4.18), те се као такав и користи при практичним прорачунима кад год је у питању ламинарно кретање течности. Пошто се зна закон промене брзине (4.7) по попречном пресеку цеви, лако се може израчунати вредност Кориолисовог коефицијента α за случај ламинарног струјања.

Стварна кинетичка енергија, при ламинарном струјању течности, два пута је већа од кинетичке енергије истог струјног тока рачунате посредством средње брзине струјања.

Када течност из резервоара улази у неку цев, онда се параболични закон брзине успоставља тек после неке дужине, односно на неком растојању l_p од уласка у цев. Ако је улаз у цев довољно заобљен, тада је у пресеку 1-1 до самог улаза (слика 4.2) промена брзине скоро равномерна. Али затим, под дејством вискозности, долази до издужења профила брзине, да би се тек у пресеку 4-4 успоставио параболични профил. Почетна дужина успостављања параболичног профила брзине може да се одреди по Шилеровој (Schiller) формули која гласи

$$l_p = 0.029 D Re \quad (4.19)$$



Слика 4.2 Формирање параболичног профила брзине на улазуу цев [7]

Експерименти су показали да је отпор услед трења на овој деоници цевовода већи од отпора када би у истој цеви било стабилно ламинарно струјање.

Отпор услед трења на почетној дужини цеви, на којој се формира параболични профил брзине, за 9% је већи од отпора услед трења на истој дужини цеви у којој је струјање са већ формираним параболичним профилем брзине.

4.2 Турбулентно кретање течности кроз цеви при константној температури

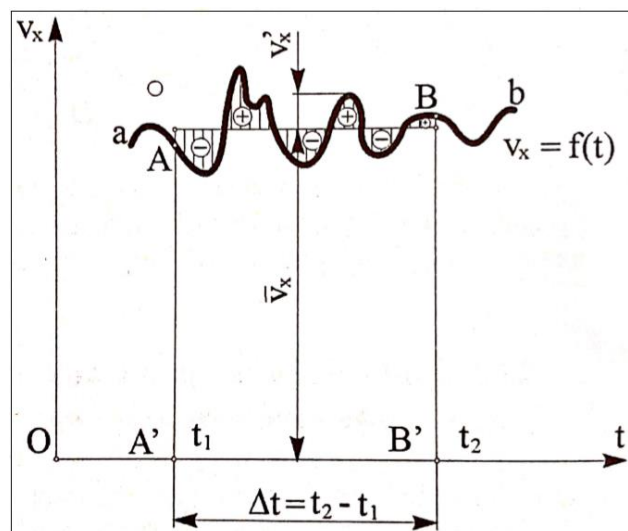
Турбулентно кретање течности је од већег значаја него ламинарно, јер је ово кретање много чешће заступљено у пракси. Наиме, вода, ваздух, као и други технички флуиди у уљно-хидрауличким системима, скоро увек струје турбулентно.

Основно својство турбулентног кретања течности и гасова је мешање струјница, ако се о њима уопште може и говорити. Поред брзине у главном правцу кретања, појављују се и брзине управне на овај правац. Брзина и притисак у једној те истој тачки струјног простора стално осцилују око неке временски средње вредности. Брзина се мења у току времена и по правцу и по величини. Ове временске промене, које чине турбулентно струјање неусталеним, стварају главне тешкоће за његово теоријско проучавање. За разлику од ламинарног, турбулентно кретање није слојевито. Напротив, коначне (моларне) запремине течности прелазе из једне у суседну област носећи своју масу, количину кретања, енергију, као и примесе које су у њој садржане. Пренос (транспорт) количине кретања доводи до појаве турбулентног трења, односно турбулентних напона, који не постоје код ламинарног струјања. Пренос топлоте доводи до појаве топлопроводности, док је пренос примеса повезан са тзв. турбулентном дифузијом, значајном појавом у хемијској индустрији. Према томе, теорија турбулентног струјања је изузетно сложена и још увек није добила свој завршни облик. Зато се, при практичним прорачунима турбулентног струјања или користе полуемпиријске методе или се користе разни обрасци добијени чисто експерименталним путем.

БРЗИНЕ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ СТРУЈАЊУ

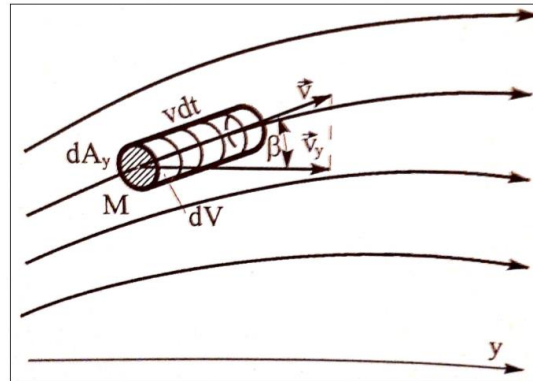
Експерименти су показали да брзина течности у посматраној тачки осцилује око неке вредности, која представља средњу вредност брзине у тој тачки у односу на време и назива се просечном брзином.

На слици 4.3 крива ab представља временске промене (пулсације), на пример, пројекције V_x брзине у некој тачки струјног простора.



Слика 4.3 Пулсација пројекције брзине при турбулентном струјању [7]

Испоставило се да при довољно дугом интервалу времена Δt , просечна брзина V_x не зависи од тог временског интервала, тј. $V_x \neq V_x(t)$. Ово сазнање је од великог практичног значаја, јер омогућава да се поље стварних брзина код турбулентног струјања замени пољем просечних брзина, које не зависе од времена.

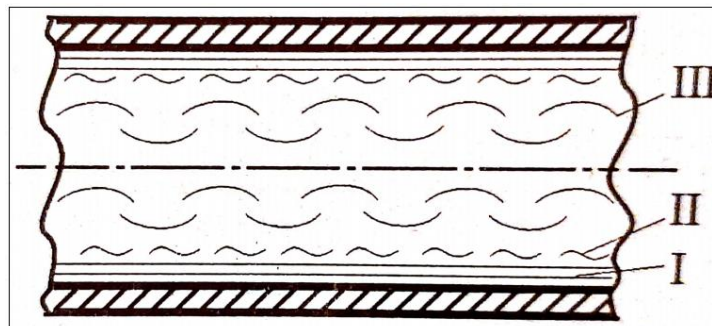


Слика 4.4 Одређивање секундне количине кретања [7]

Сам поступак одређивања просечне вредности неке струјне величине назива се осредњавање. Просечна вредност тренутних одступања било које физичке струјне величине, која линеарно зависи од брзине, једнака је нули. Ово важи под условом да је интервал времена осредњавања Δt довољно дуг. Међутим, ово не важи када је реч о струјној величини која је нелинеарно зависна од брзине, односно када се ради о производу две пројекције брзине. Ако се, у произвољној тачки M поља турбулентног струјања течности (слика 4.4) уочи мала површина $dA = dA_y$, која је управна на осу y кроз ову малу површину ће за време dt прострујати елементарна запремина течности, чија је маса $dm = \rho V_y dA dt$. Количина кретања ове масе износи $dK = \rho V_y dA dt v$. Промена количине кретања по јединици површине и у јединици времена, односно количина кретања која се пренесе кроз јединицу површине у јединици времена износи:

$$\frac{dK}{dt dA} = \rho v_y v \quad (4.19)$$

Многобројни експерименти су потврдили да се турбулентни струјни ток, при кретању течности кроз цеви, састоји из три области (слика 4.5). Непосредно поред зида цеви формира се ламинарни гранични слој, који је сасвим мале дебљине (област I на слици 4.5), затим прелазна област (област II на слици 4.5), а у средини цеви турбулентно језгро (област III на слици 4.5).



Слика 4.5 Структура турбулентног тока [7]

4.3 Ламинарно кретање течности кроз цеви при променљивој температури

Кретање течности кроз цеви при променљивој температури остварује се када је температура течности виша или нижа од температуре околине. У пракси је чешћи случај кретања загрејаних течности: топле воде, сирове нафте, уља за ложење, мазута, разних метала итд. Загрејана течност одаје топлоту околини за време кретања, температура јој опада у смеру кретања, а вискозност јој се повећава. Коефицијент трења λ није више константан.

Пре него што пређемо на извођење одговарајућег обрасца за пад притиска, покажемо како се одређује средња температура течности по пресеку цевовода који се налази на произвољном растојању од његовог почетка. Количина топлоте коју загрејана течност за време кретања преда цевоводу дужине l , m износи:

$$q = Q_m c (t_1 - t_2)$$

Овде је Q_m , kg/s – масени проток течности; c , J/kgK – њена специфична топлота; t_1 , °C и t_2 , °C – температура течности на почетку и на крају цевовода. Количина топлоте која прође кроз цевовод на околину одређује се помоћу обрасца:

$$q = k D_m \pi l \Delta t_m$$

у коме је k , J/m²sK – коефицијент пролаза топлоте кроз цевовод; D_m , m – средњи пречник цевовода који може да буде изолован или неизолован и Δt_m – средња логаритамска разлика температура чија је вредност:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{t_1 - t_a}{t_2 - t_a}}$$

Са t_a , °C обележена је температура околине у којој је цевовод положен. Изједначавањем написаних израза за количину топлоте q , узимајући у обзир формулу за Δt_m , добија се веза између температура и течности на почетку и на крају цевовода:

$$t_2 = t_a + (t_1 - t_a) e^{-al} \quad (4.20)$$

или

$$t_1 = t_a + (t_2 - t_a) e^{al} \quad (4.21)$$

где је:

$$a = \frac{k D_m \pi}{Q_m c} \quad (4.22)$$

На произвољном растојању x , m од почетка цевовода, температура течности износиће, према (4.20),

$$t = t_a + (t_1 - t_a) e^{-ax} \quad (4.23)$$

Средња температура течности дуж цевовода добија се помоћу обрасца:

$$t_s = \frac{1}{l} \int_0^l t \, dx = t_a + (t_1 - t_a) \frac{1 - e^{-al}}{al} \quad (4.24)$$

Најзад, промена кинаматичке вискозности течности са температуром дата је у облику израза

$$\nu = C/t^m \quad (4.25)$$

где су C и m константе чије вредности зависе од природе течности која се креће кроз цевовод у топлом стању. Ове две константе одређују се експериментално за сваку течност мерењем вискозности на два температурама које леже између t_1 и t_2 , на пример коришћењем Енгелеровог вискозиометра.

4.4 Турбулентно кретање течности кроз цеви при променљивој температури

Приликом проучавања турбулентног кретања течности кроз цеви при константној температури речено је да, зависно од вредности Re броја и релативне храпавости δ/D , цевовод може да се понаша као гладак или као храпав. Цевовод је хидраулички гладак или хидраулички храпав, будући да је исти у техничком погледу увек храпав. Зависно од тога да ли је цевовод хидраулички гладак или храпав имамо и одговарајуће изразе за коефицијент трења, па према томе и различите изразе за израчунавање пада притиска услед трења. Ако је цевовод хидраулички гладак, формула за израчунавање пада притиска услед трења у хидраулички глатким цевима при кретању загрејане течности гласи:

$$\Delta p = 0.241 \frac{\rho v_1^{0.25} Q^{1.75} l}{D_{ci}^{4.75}} \left(\frac{\alpha_i D_{ci}}{\alpha_i D_{ci} - k D_m} \right)^{0.14m} \frac{e^{0.25mal} - 1}{0.25mal} \quad (4.26)$$

Добијени израз састоји се из три дела. Први део представља део пада притиска услед трења који би се остварио при турбулентном струјању у хидраулички глатким цевима загрејане течности при константној температури t_1 . Остала два члана у решењу узимају у обзир промену температуре течности због одавања топлоте околини.

5. НЕСТАЦИОНАРНО СТРУЈАЊЕ

У хидрауличком систему проток флуида подложен је сталним променама: вентили се отварају и затварају, више актуатора се може прикључити или стајати, пумпе испоручују течност мање или више неравномерно (пулсирајући), и тако даље. Флуид по својој инертности одолева променама у кретању и захваљујући стишљивости може да складишти енергију. Све у свему, последица је да проток флуида у хидрауличком систему подлеже законима сложене импеданције, а не "обичног" Омовог отпора. Стога је аналогија ближа круговима наизменичних струја са капацитетом и индуктивношћу. Индуктивност флуида у цеви може се лако израчунати ако се флуид у цеви одсека A и дужине l сматра чврстом масом m . Сила F потребна за убрзање течности a је следећа:

$$F = m \cdot a = A \cdot l \cdot \rho \cdot \frac{dv}{dt} = l \cdot \rho \frac{dQ}{dt} \quad (5.1)$$

Јер је, $a = \frac{1}{A} \frac{dQ}{dt}$. Ако се у (4.13) уврсти да је $\Delta p = F/A$, онда следи:

$$\Delta p = \frac{l \cdot \rho}{A} \cdot \frac{dQ}{dt} = L_H \cdot Q' \quad (5.2)$$

Што одговара изразу у електротехници, који повезује напон и промену струје $u = L \cdot di/dt$. Стога је хидрауличка индуктивност L_H пропорционална дужини цеви l и густини течности ρ , и обрнуто пропорционална површини пресека цеви A :

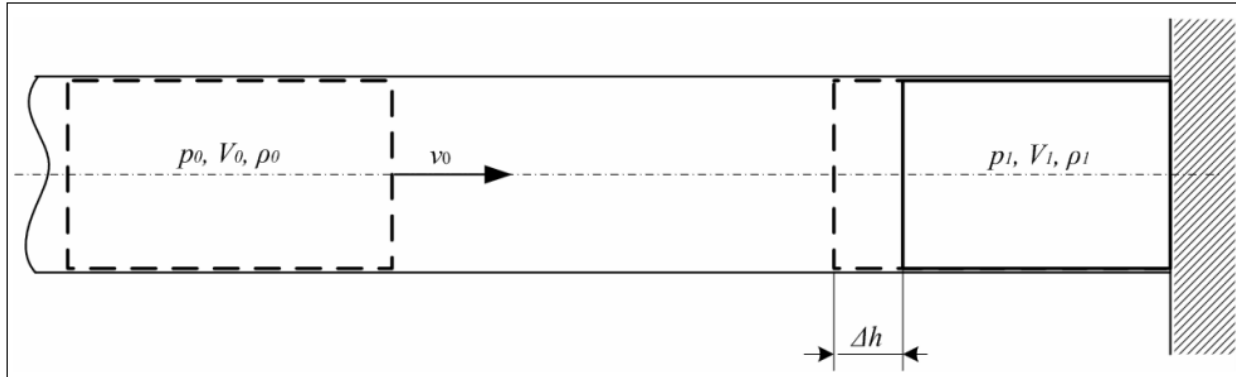
$$L_H = \frac{l \cdot \rho}{A} \quad (5.3)$$

Треба додати да су хидрауличне индуктивности хидрауличног цилиндра или мотора различито изражене ($L_H = m/A^2$ за цилиндар, тј. $L_H = I/(V/\pi^2)$ за мотор) [12].

Теорија импеданције у цевоводима је добро развијена, уз познавање капацитета и индуктивности цеви и различите варијанте импеданце оптерећења (тј. раскида препоручене дужине цеви, величине батерија и сличне интервенције, што ће умањити утицај резонантних покрета таласа течности или пулсација пумпе.

5.1 Хидраулички удар

Хидраулички удар је нагло и велико повећање притиска услед једнако нагле промене брзине протока флуида, на пример, због наглог затварања вентила. Тада се тај притисак шири кроз цевовод великом брзином и често изазива звук попут ударања чекића о цеви (енглески израз за појаву је *water hammer*, немачки је *Druckstoß*). Поједностављено изражавање за повећање притиска због наглог повећања заустављања флуида који тече кроз цев може се извести из кинематске равнотеже енергије, један део флуида у струјању и потенцијалну енергију нагло заустављеног флуида. Поједностављено, преглед догађаја дат је на слици 5.1 [12].



Слика 5.1 Нагло заустављање флуида у струјању – хидраулички удар [12]

Дакле, кинетичка енергија једног дела флуида (приказана нацртаним правоугаоником) је:

$$E_k = 0.5 \cdot \rho_0 \cdot v_0 \cdot v_0^2 \quad (5.4)$$

Енергија тог дела флуида који се нагло зауставио је потенцијална енергија услед еластичне деформације флуида (део течности сабијен од Δh):

$$E_p = 0.5 \cdot \rho_0 \cdot v_0 \cdot \Delta h^2 \quad (5.5)$$

Изједначавањем кинетичке енергије једног дела флуида који креће од (5.4) и потенцијалне енергије деформисаног флуида, коначно се може написати израз за повећање притиска због изненадног заустављања флуида:

$$\Delta p = v_0 \cdot \rho_0 \cdot c \quad (5.6)$$

где је c израз за брзину ширења звука кроз флуид, а то је такође и брзина ширења ударног таласа:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}} \quad (5.7)$$

c за течности је од око 1000 m/s (нешто мин. уља) до око 1480 m/s (вода). Уочљиво је да пораст притиска првенствено зависи од почетне брзине флуида (дата је брзина c и густина ρ за одређени флуид). Такође, из већ поменутог разматрања импеданције цевовода и познавањем брзине c за одређену течност може се израчунати и критично време затварања вентила у нафтоводу.

Дакле, да би се избегао хидраулички удар, постоји неколико опција: смањење почетне брзине протока флуида (на пример помоћу шире цеви), смањујући импедансу на крају цеви (уградњом батерије или евентуално вентила за смањење притиска) или споријим затварањем вентила [12].

6. ПРИМЕНА КРЕТАЊА ФЛУИДА У ХИДРАУЛИЦИ

Хидраулика је област која има велики број примена у различитим гранама индустрије. Навођење свих примена и примера хидрауличких система није могуће. У завршном раду биће обрађени неки примери примене хидрауличног система, са посебним акцентом на хидрауличке пумпе. Такође, биће приказана улога радног флуида.

6.1 Улога радног флуида у хидрауличким системима

Радна течност (радни флуид) у хидрауличком систему обавља следеће основне функције:

- ✓ преноси енергију,
- ✓ преноси сигнал (импулс притиска),
- ✓ подмазује покретне делове машина и уређаја,
- ✓ одводи топлоту насталу услед губитака у систему,
- ✓ пригушује, због притисног удара, насталу буку и вибрације... [13]

Радна течност је у хидрауличким погонима изложена високом притиску, кретању и повишеним температурама. Ти утицаји не смеју битно мењати својства радне течности. Због свега наведеног радна течност треба задовољити многобројне захтеве, као што су:

- вискозност треба да буде од 20 до 30 mm²/s код 50 °C. Не сме се битно мењати с променом температуре. Смањењем вискозности, наине, повећава се цурење и смањује укупан степен искористивости система,
- способност подмазивања, тј. треба да створи чврст уљни филм и на тај начин спречи превелико трење између покретних делова,
- треба да штити делове од корозије,
- не сме хемијски да утиче на савитљиве гумене цеви од синтетских материјала,
- не сме да има склоност ка стварању пене. Појава пене може довести до губитка снаге и појаве кавитације,
- треба бити хемијски постојана,
- не сме, мешајући се с водом, да ствара емулзију да се не би променила вискозност,
- треба се лако да се одваја од ваздуха. Ако се у уљу налази ваздух у облику мехурића утицаће, између осталог, на повећање компресибилности течности,
- не сме бити штетна по здравље, а загрејана до радне температуре не сме да ствара отровне паре,
- треба да има велики топлотни капацитет, како би код повишених температура могла да савлада велико термичко оптерећење. Краткотрајно се уље може загрејати и преко 100 °C, али је нормална радна температура око 60 °C,
- треба да буде постојана на старење (пре свега због термичких утицаја), јер се старењем мењају својства течности,
- не сме да биде запаљива, температура паљења и тачка самозапаљења требају да буду што је могуће више,
- треба да је што је могуће мање компресибилна, тј. треба да има велики модул компресибилности,

- крутих честица треба да буде што мање како се не би пореметила функција уређаја [13].

Да би уље имало сва ова својства потребно је користити разне адитиве које основном уљу побољшавају својства. Најчешће се користе минерална уља, у специјалним случајевима синтетска (код повећане опасности од пожара), емулзије с водом (код великих потрошача), а најновији је тренд примена биоразградивих уља.

6.2 Примери примене хидрауличких система

Хидраулички лифтови (слика 6.1) користе се за кретање робе или људи вертикално. Жичаре, дизалице са два постоља, дизала са четири постоља, колица за дизање различите робе су врсте хидрауличких дизалица. Хидраулички лифтови користе се у аутомобилској, транспортној, и грађевинској индустрији. Каблови се не користе код ових дизалица. Дакле, то елиминише ризик од смртних исхода.

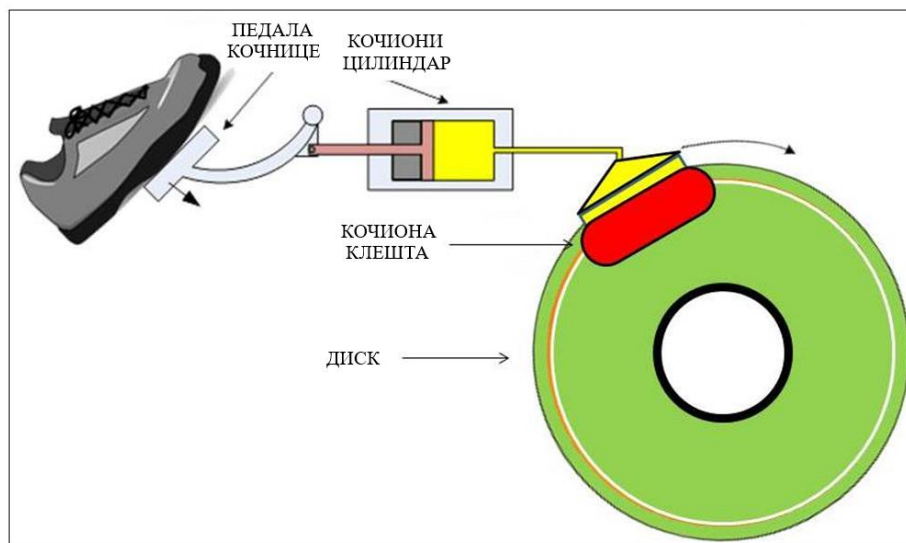
Рам, пумпа, мотор и вентил су главне компоненте хидрауличног лифта. Пумпа, мотор и течност чувају се у машинској соби. Пумпа ће вршити притисак на клип за померање лифта према горе и лифт се помера према доле када се вентил отвори [15].



Слика 6.1 Хидраулички лифт [14]

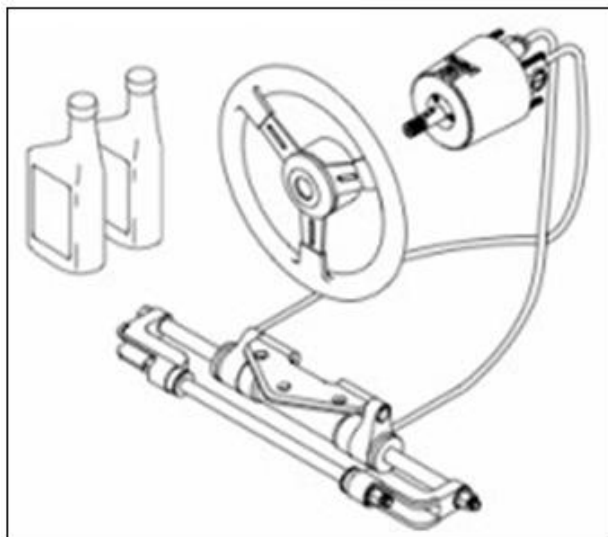
Хидрауличне кочице (слика 6.2) - Кочиони систем возила је важан пример хидраулике. Они су класификовани на основу механизма трења контакта (добош кочица и диск кочица) и расподеле силе кочења (једноструко деловање и двоструко деловање). Главни и подређени цилиндри, водови, јастучићи, кочионе течности и ротор су компоненте које се користе за хидраулички кочиони систем. Најчешће коришћене течне кочице су ДОТ течност или минерално уље. Док се ногом притиска на папучици кочице, ово ће вршити притисак на течност унутар кочионих водова. Према Паскаловом принципу, овај

притисак који пролази кроз кочионе водове вршиће притисак на други цилиндар, што доводи до контакта кочионих плочица и плочица возила [15].



Слика 6.2 Диск кочица [16]

Хидраулично управљање - Хидраулички серво управљач (слика 6.3) је важан део возила који помаже у промени правца возила улево или у десно. Овај систем смањује напор возача и апсорбује шокове на путу. Контролни вентил, зупчаник, притисни/повратни водови, клип и кућиште носача су примарне компоненте које се користе за хидраулички серво управљач. У смеру казаљке на сату и у супротном смеру казаљке на сату волана отвара се и затвара вентил причвршћен на кућиште сталка. Ово ће гурнути течност из резервоара у кућиште сталка.



Слика 6.3 Серво управљач [17]

Хидрауличне дизалице (слика 6.4) су јаче и могу подићи већа оптерећења. Дизалице и подне дизалице су класификације хидрауличких дизалица. Хидраулички прикључак састоји се од цилиндра и пумпног система за складиштење и пренос

хидрауличне течности. Систем за пумпање садржи ручну или механичку пумпу за притисак на течност. Једносмерни вентил гура течност према цилиндру дизалице и не дозвољава струјање уназад. Рад се заснива на Паскаловом принципу (притисак унутар затворене површине биће једнак) [15].



Слика 6.4 Хидраулична дизалица [18]

Тешка опрема (слика 6.5) на бази хидраулике ће имати више снаге и могућности брзог кретања.



Слика 6.5 Булдожер [19]

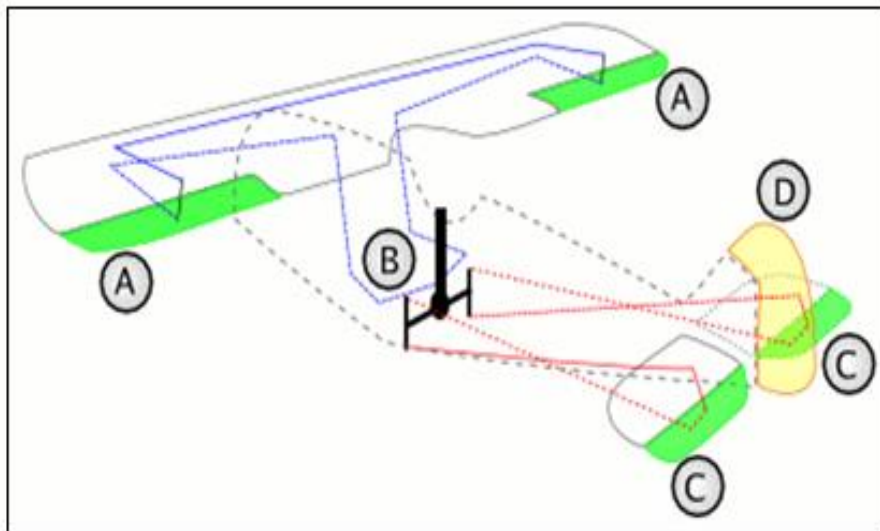
Већина грађевинске индустрије користи такву опрему. Неки од коришћених машина су булдожери, ровокопачи, цепачи трупца, лопате, утоваривачи, виљушкари и дизалице.

Код ровокопача и багера кретање руке заснива се на хидраулици. Булдожери користе хидраулични систем за кретање сечива. Кипер камион (6.6) подиже сандучарски део камиона помоћу хидраулике.



Слика 6.6 Кипер камион [20]

Авиони - Хидраулика се примењује у авионима (слика 6.7) и млазним авионима у многим случајевима као што су: подешавање крила, увлачење и продужење степена преноса, отварање/затварање врата, кочнице, управљање итд. Радни притисак ће варирати од 200 psi до 5000 psi у зависности од хидрауличног система. Хидраулика има бројне предности као што су исплатив, лак за одржавање, ефикасан рад у свим условима [15].



Слика 6.7 Управљање закрилцима и кормилом за контролу смера летења на авионима [15]

Хидраулички амортизер (слика 6.8) је уређај који апсорбује и ублажава ударне импулсе. Цилиндар са хидрауличким уљем и клипом су компоненте које се користе за развој амортизера. Клип ће се померати горе-доле на основу компресије и ширења струне.



Слика 6.8 Амортизер [21]

Стоматолошке и берберске столице - Према лондонском Музеју науке, амерички стоматолог Базил Вилкерсон конструисао је 1877. подесиву хидрауличку столицу, коју многи људи, нарочито стоматолози и бербери, и данас користе. Столице (слика 6.9) раде баш као и хидрауличне пумпе. Да бисте подигли особу треба да притиснете полугу која заузврат компримује течност у малом цилиндру. Већи цилиндар, у овом случају, је причвршћен на дно седишта. Дакле, сила коју генеришете гура столицу према горе [15].



Слика 6.9 Берберска столица [22]

6.3 Хидропумпе

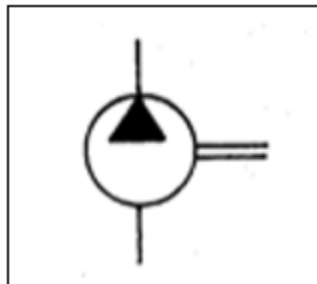
Задатак хидропумпи (слика 6.10) је да посредством механичке енергије мотора произведу кретање (струју) флуида уз потребан притисак. При томе пумпа усисава флуид (најчешће из резервоара) и потискује га ка излазу пумпе, а одатле течност доспева у систем, преко појединих управљачких елемената, све до потрошача. Потрошач за течност представља неко оптерећење, на пример хидроцилиндар на чији клип делује спољашња сила. Према овом оптерећењу ствара се и одговарајући притисак флуида у инсталацији, који ће расти све дотле док се не савладају сви отпори кретању или док се не достигне максимално дозвољени притисак. Према томе, притисак у неком хидросистему се не ствара у пумпи и на самом почетку рада, већ тек онда када настану отпори, што значи да је притисак зависан од отпора који се супростављају струјању флуида [23].



Слика 6.10 Хидропумпа [24]

6.3.1 Хидропумпе константног капацитета

Симбол за све пумпе константног капацитета (протока) се састоји (слика 6.11) од једног круга у коме је у горњем делу, са врхом усмереним ка периферији, постављен један затамњен троугао (за случај пнеуматских елемената овај троугао је незатамњен). Вертикалне линије представљају прикључке за усисни (линија испод круга) односно потисни вод (линија изнад круга код троугла), док две линије са стране означавају везу са погонским агрегатом (електромотором или сл.).

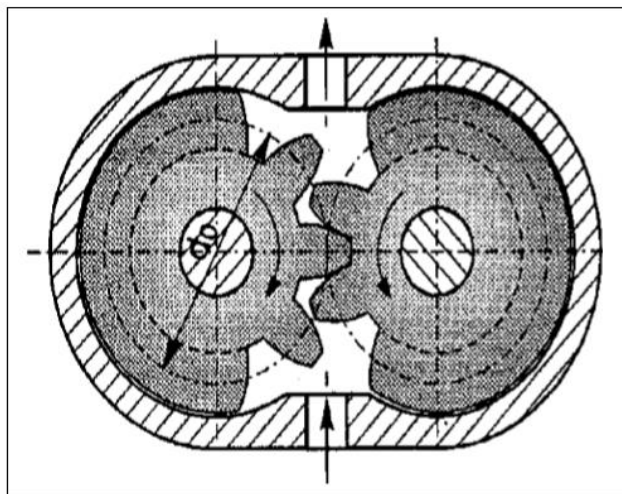


Слика 6.11 Симбол пумпе константног притиска [13]

Зупчасте пумпе

Најједноставнији представник пумпе константног капацитета је зубчаста пумпа која може бити изведена како са спољашњим, тако и са унутрашњим озубљењем. Састоји се углавном из кућишта и једног пара спрегнутих зупчаника који преко вратила једног од зупчаника добијају погон од мотора. Зазори између зупчаника и кућишта, како по ободу (теменима зубаца) тако и по челу, су тако мали да је практично остварено заптивање уља између зупчаника и кућишта. Усисна страна (прикључак) је повезана са резервоаром течности а потисна са хидросистемом.

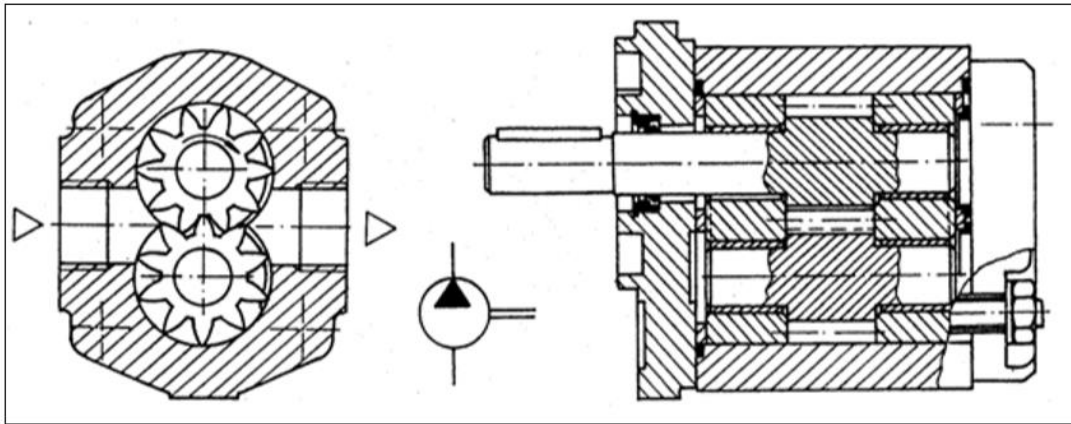
Услед обртања спрегнутих зупчаника (слика 6.12), зуби зупчаника излазе из захвата тако да међузубља остају слободна. На тај начин настаје подпритисак у усисном делу пумпе, тако да атмосферски притисак који делује на уље у резервоару потискује флуид у пумпу. Уобичајено је да се овде говори о "усисавању уља". Усисана течност испуњава међузубља зупчаника, тако да бокови и подножја зубаца и унутрашње површине кућишта (бочне и цилиндричне) образују затворене коморе којим се уље, услед обртања зупчаника, транспортује у други - потисни део пумпе. У том делу долази до поновног спрезања зубаца и уље бива истиснуто из комора, а како не може да се врати у усисни део, мора бити истиснуто из пумпе кроз потисни прикључак. Један мали део течности, међутим, остаје између зуба и ту бива "заробљен", са опасношћу да се ту јаве веома велики притисци који имају за последицу тврд и пулсирајући рад, односно рад са ударима. Да би се ово избегло, по боковима су израђени канали за растерећење, који овај део течности одводе у потисни вод [23].



Слика 6.12 Принципијски пресек зубчасте пумпе [23]

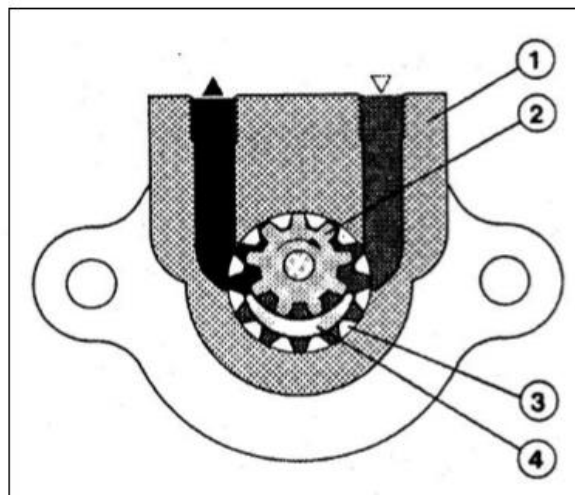
Зазор између зупчаника и кућишта има велику улогу при експлоатацији ових хидропумпи. Код великих зазора се смањује трење између елемената али се умногоме смањује степен искоришћења и могући радни притисци. Насупрот томе, премали зазори ће обезбедити веће притиске и бољи степен искоришћења пумпе, али ће се јавити велико трење а с тим и могућност "зарибавања" али и повећано хабање, што временом има за последицу опет повећани зазор. У конструкцији зубчасте пумпе приказане на слици 6.13 постоји хидростатичко изједначење улежиштења. Са плочама 7, које су оптерећене притиском који влада у систему, врши се притискивање блокова лежишта 6 на зупчанике 5. Зазор се, дакле,

подешава према притиску у систему, па је на тај начин обезбеђен добар степен искоришћења независно од броја обртаја и притиска. Зупчасте пумпе се израђују са протоцима који се крећу од 3.5 до $100 \text{ cm}^3/\text{o}$ уз радне притиске до 250 bar-a .



Слика 6.13 Зупчаста пумпа са спољашњим озубљењем [13]

Све што је речено напред о функцији пумпе са спољашњим озубљењем важи углавном и за пумпе са унутрашњим озубљењем (слика 6.14). Она се састоји из кућишта 1, у коме се обрће пар зупчаника са тако малим аксијалним и радијалним зазором да је практично остварено заптивање уља. Погон се доводи малом зупчанику са спољашњим озубљењем који погони већи зупчаник са унутрашњим озубљењем у истом смеру обртања. Преградни зид у облику српа омогућава да се у међузубљима оформе коморе за транспорт уља из усисне стране, која је спојена за хидраулични систем.

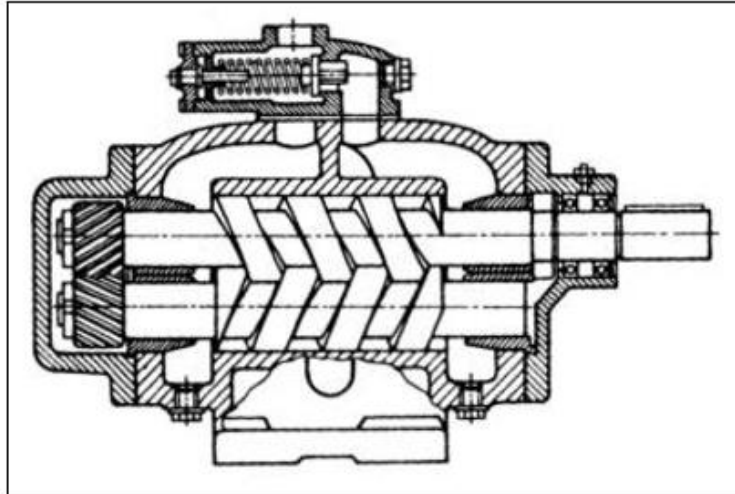


Слика 6.14 Зупчаста пумпа са унутрашњим озубљењем [13]

Завојне пумпе

Завојне пумпе које се одликују равномернијим радом у односу на зупчасте, састоје се од два или више завојна вретена супротносмемих завојница, међусобом спрегнутих да остваре везу сличну хеликоидним зупчаницама. Принцип рада се може објаснити сликом 6.15. Једно од вретена добија погон од мотора и то кретање (обртање) предаје другом

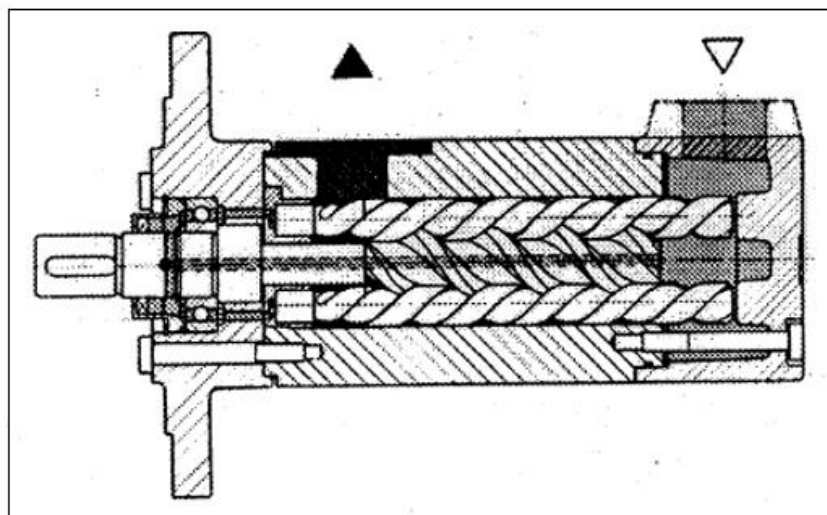
вретену, услед чега два завојка (зуба) горњег вретена, кућиште и завојак погонског вретена образују затворени простор. Овај се простор при обртању вретена непрекидно помера, креће се од усисне стране, спојене за резервоар, ка потисној, без промене своје запремине, што има за последицу да је код ових пумпи проток сталан, равномеран и без удара.



Слика 6.15 Принцип рада завојне пумпе [13]

Укупни теоријски капацитет се добија множењем овог капацитета са бројем обртаја погонског вретена, а уношењем у израз и степен волуметријског степена искоришћења, који је код ове пумпе већи него код зупчастих ($\eta=0.90$), добија се и стварни укупни капацитет. Израз за потребну погонску снагу је истоветан као и код зупчистих, само је укупан степен искоришћења већи ($\eta=0.70$) [23].

Завојне пумпе са два или три вретена (слика 6.16) се израђују за бројеве обртаја између 1500 и 3000 [o/min] уз радне притиске до 600 bar-а. Миран и континуалан млаз флуида који ова пумпа даје, чини је применљивом за инсталације прецизних машина, нпр. брусилца, али које не захтевају велике протоке.

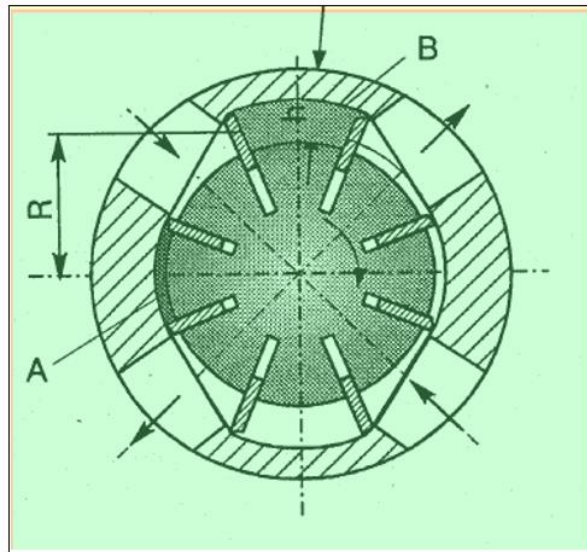


Слика 6.16 Завојна пумпа са три вретена [23]

Вишећелијске-крилне пумпе

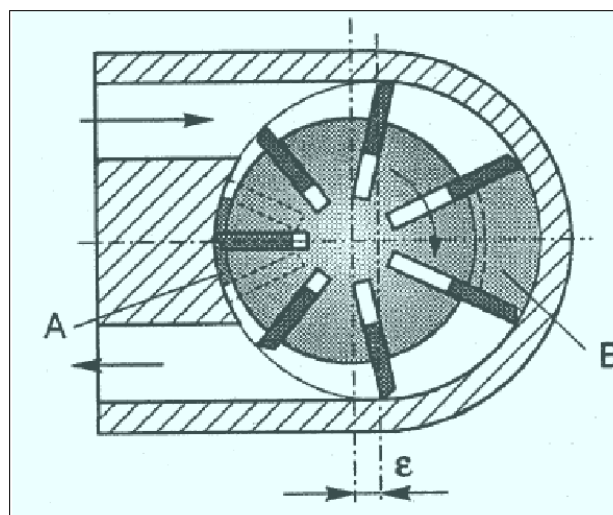
Ове пумпе се одликују мирним радом и релативно малим димензијама, свој назив су добиле било према конструкцији (крилне пумпе) било према дејству (вишећелијске пумпе), а јавља се и назив "пумпе са лопатицама". Сва ова три назива представљају једну хидропумпу, која може имати два конструктивна решења.

Код прве изведбе (слика 6.17) унутрашњи профил статора омогућава да се запремина сваке ћелије, формиране између две лопатице радијално покретних по жљебовима у ротору, спољашње цилиндричне површине ротора и унутрашњих површина статора (радијалне и бочних), два пута за један обртај ротора, мења од минималне А до максималне В и обратно.



Слика 6.17 Принципу рада вишећелијске пумпе [23]

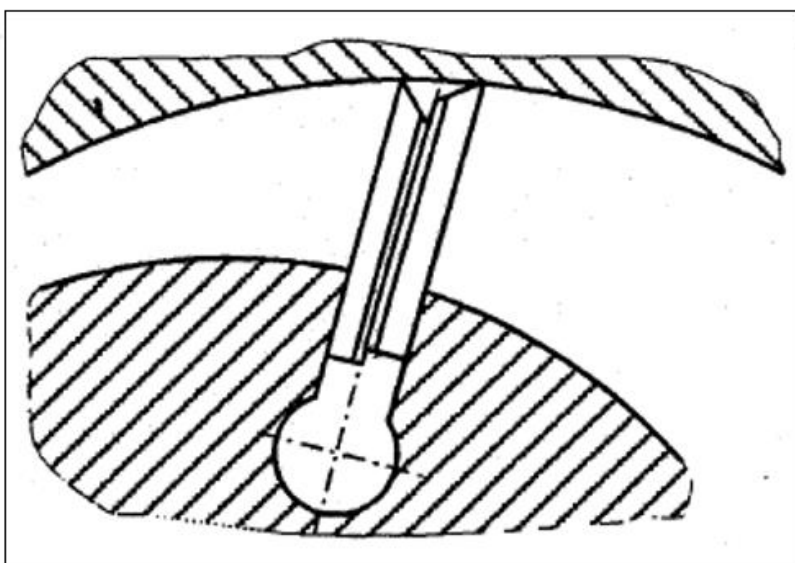
Друга конструкција, приказана на слици 6.18, је једноставније конструкције, али је проток за исте димензије мањи, јер се у току једног обртаја ротора такт усисавања и потискивања изводи само једном.



Слика 6.18 Принципу рада вишећелијске пумпе са ексцентричним ротором [23]

Разлика је у облику унутрашње површине статора, која у овом случају има цилиндрични облик. Промена запремина ћелије се овде изводи тако што постоји ексцентричност оса ротора и статора, и од ове величине зависи и разлика максималне и минималне запремине ћелије, односно и капацитет ове пумпе [23].

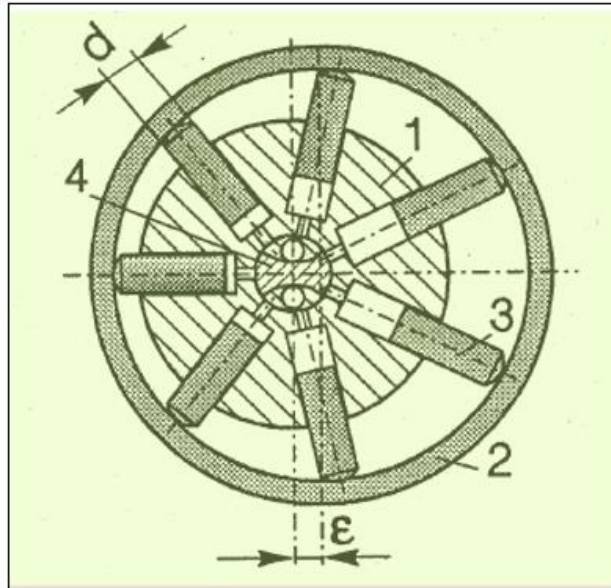
Крилца лопатице се приљубљују уз унутрашњу површину статора услед центрифугалне силе, само се при малим бројевима обртаја оне избацују малим опругама између њих и дна радијалних канала у ротору. Посебан проблем код ових пумпи је питање заптивања између лопатица и унутрашњих површина статора, што условљава и релативно мали степен искоришћења у односу на друге пумпе ($\eta = 0.5-0.7$), и ограничен максимални притисак. Код неких изведби ових пумпи, за повећање притиска између лопатица и статора користи се створени притисак уља који се из потисног вода доводи испод лопатица, али и специјалне конструкције двојних лопатица (слика 6.19).



Слика 6.19 Изглед двојне лопатице крилних пумпи [23]

Радијалне клипне пумпе

Радијална клипна пумпа, приказана на слици 6.20, састоји се од статора и ротора у коме су израђени радијални цилиндри са клиповима који се у њима налазе. Обртањем ротора, чија је оса ексцентрично постављена у односу на осу статора, услед центрифугалне силе, а и опруга испод клипа, долази до приљубљивања клипова уз унутрашњу површину статора, односно до њиховог радијалног померања у цилиндрима. Радни цилиндри су повезани отворима са усисним и потисним водовима кроз стојер око кога се ротор окреће, тако да за један обртај ротора клип у цилиндру изврши један такт усисавања уља из резервоара и његовог потискивања у систем [23].



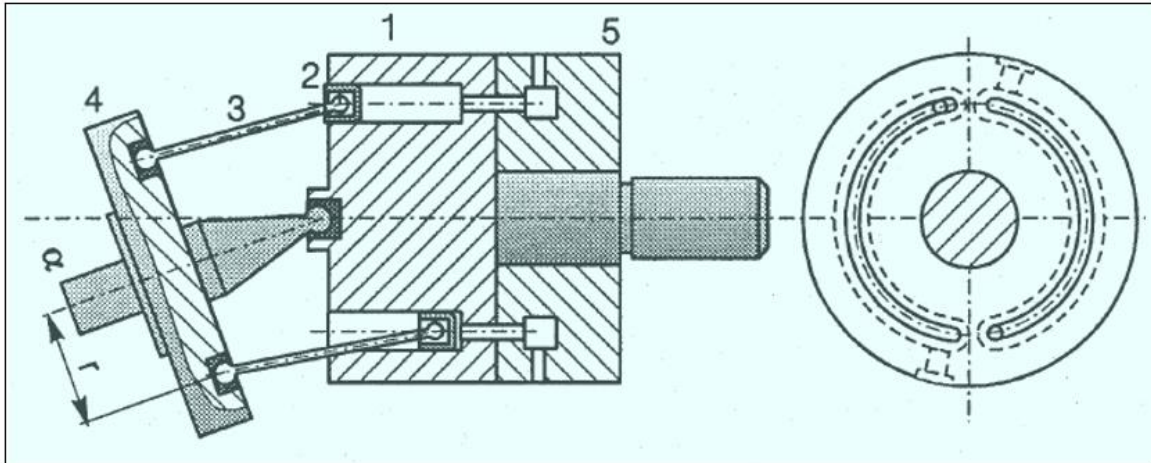
Слика 6.20 Радијална клипна пумпа [23]

Број цилиндара у ротору је обично непаран да би се обезбедила већа равномерност у раду. Обзиром да се код ових пумпи може извршити веома добро заптивање између клипа и цилиндра, то је и укупни степен искоришћења врло велики ($\eta=0.80-0.85$), а волуметријски се креће чак до $0.95-0.98$, и притисци који се са овом пумпом могу постићи су из истих разлога веома велики и крећу се до више стотина бара. Међутим, због малог искоришћења укупне запремине ротора, то је капацитет ових пумпи ограничен. У циљу смањења трења између клипова и унутрашње површине статора, на врховима клипова се постављају ролнице.

Аксијалне клипне пумпе

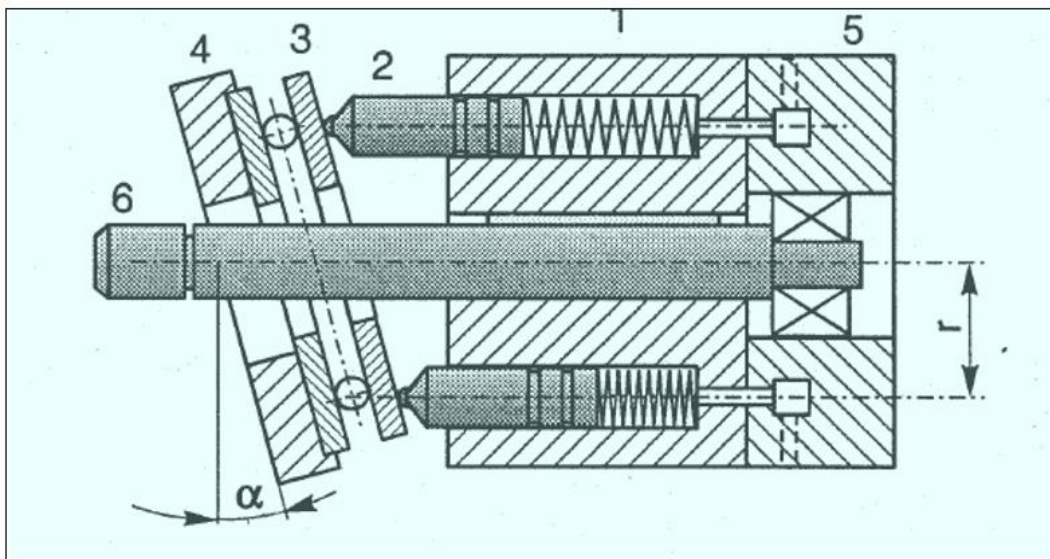
За разлику од радијалних клипних пумпи, аксијалне клипне пумпе високог притиска имају аксијално избушене цилиндри у ротору 1, са клиповима 2 који се у њима крећу и стварају исти ефекат усисавања и потискивања флуида као и у претходном случају. Обзиром да се на овај начин боље искоришћава маса (запремина) ротора, то ове пумпе уз исте димензије имају веће капацитете од радијалних клипних пумпи, уз исте високе притиске. У зависности од начина на који се остварује кретање клипова, постоје две конструкције ових пумпи: аксијалне клипне пумпе са нагнутом осом (добошем) и са нагнутом плочом [13].

У првом су случају (слика 6.21) клипови 2 помоћу полуга 3 зглобно везани за диск 4 чија је оса нагнута под углом α у односу на осу ротора и који се, посредством стојера, обрће истом брзином као и ротор пумпе. При том обртању доћи ће до увлачења и извлачења клипова у цилиндрима, што омогућава и усисавање уља из резервоара кроз усисни вод на статору 5 као и његово потискивање кроз потисни вод.



Слика 6.21 Принципијални рад аксијалне клипне пумпе са нагнутом осом [23]

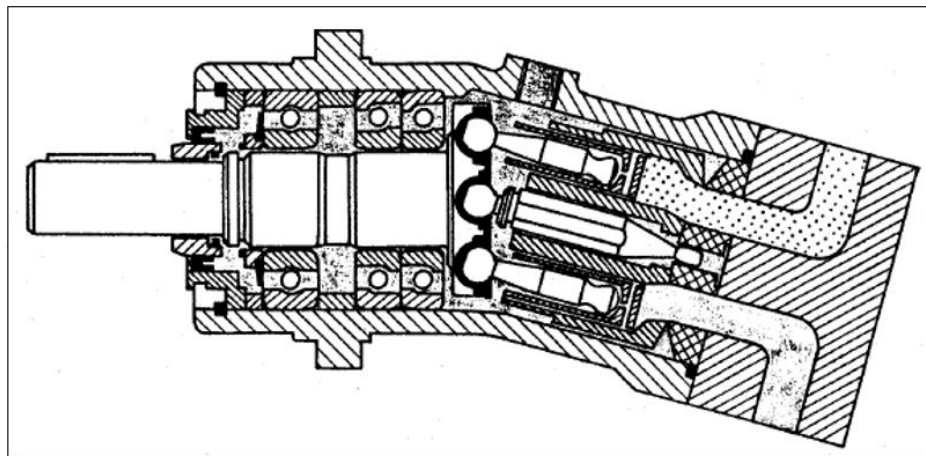
Код друге варијанте (слика 6.22) клипови се помоћу опруга приљубљују уз плочу нагнуту за угао α , што такође условљава да се за један обртај ротора у коме су цилиндри израђени изврши цео један такт уписавања и потискавања уља. Да би се умањило трење између клипова и нагнуте плоче, ова задња је постављена на куглице, тако да се може лако окретати заједно са клиповима.



Слика 6.22 Принципијални рад аксијалне клипне пумпе са нагнутом плочом [23]

Све оно што је о експлоатационим карактеристикама (протоку, притисцима) речено за радијалну клипну пумпу важи и овде.

На слици 6.23 је приказана једна изведена конструкција хидрауличне аксијално-клипне пумпе константног капацитета са нагнутом осом фирме REXROTH. Кућиште пумпе је повијено да би се у њему могао поставити ротор под неким углом у односу на осу погонског вратила.



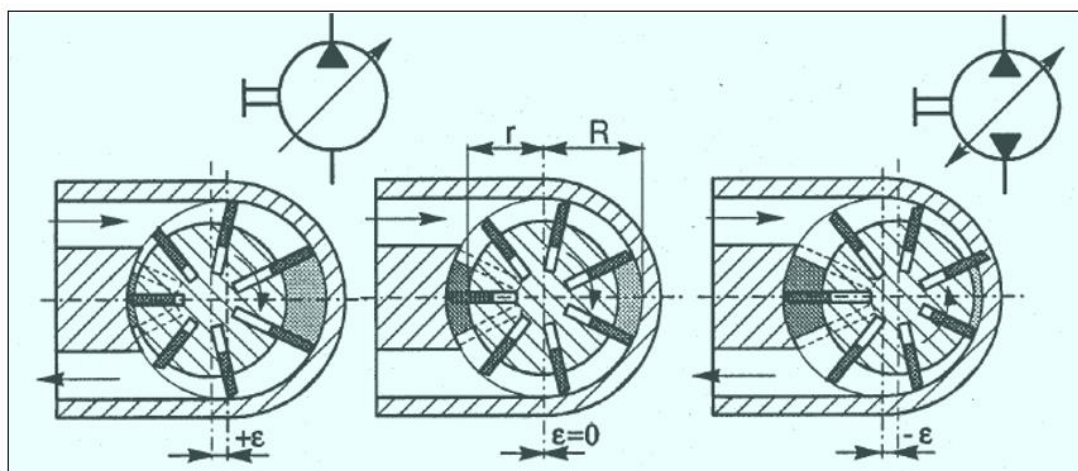
Слика 6.23 Аксијална пумпа са нагнутом осом [23]

6.3.2 Хидропумпе променљивог капацитета

Већина напред приказаних пумпи, са изузетком зупчастих и завојних, могу се, одговарајућом конструкцијом, израђивати и као пумпе променљивог протока тј. капацитета. Измене се углавном свде на то да се одговарајућа величина, која утиче на капацитет, може по жељи мењати у току рада. Услед тога се неће објашњавати сам принцип рада ових пумпи (изузев прве), јер је он исти као и код пумпи константног капацитета. Симбол ових пумпи (слика 6.24) је исти као претходни, само допуњен једном стрелицом преко круга која представља променљивост капацитета (протока). Уколико се ради о пумпама које осим промене количине уља које шаљу у систем, могу и да мењају смер кретања уља, ова стрелица је такође двосмерна [13].

Вишећелијска пумпа променљивог капацитета

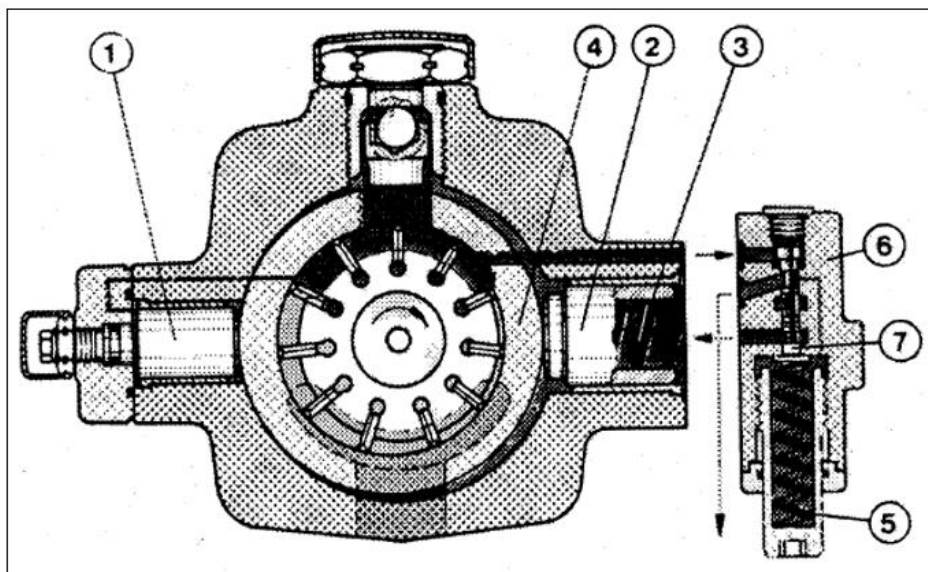
Конструкција овде приказане вишећелијске пумпе је истоветна са другом верзијом ових пумпи константног капацитета, приказаној раније.



Слика 6.24 Принцип рада и симбол вишећелијске пумпе променљивог капацитета [23]

Лопатице, радијално покретне по каналима у ротору пумпе ексцентрично постављеног у односу на осу статора, са површинама ротора и статора формирају ћелије променљиве запремине, које су основа функционисања ових пумпи. На слици 6.24 приказан је принцип рада ове пумпе. На левом делу слике оса ротора је померена у лево у односу на осу статора, тако да ће и запремине ћелија на левој страни бити мање од оних које се формирају са десне стране, тако да ће минималну запремину имати ћелија када се налази скроз лево на хоризонталној оси.

Пример једне изведене крилне - вишећелијске пумпе (производње REXROTH) је приказан на слици 6.25. Ова пумпа је карактеристична по томе што, поред могућности промене протока, омогућава и такозвани рад при "нултом ходу". Овај израз карактерише пумпу која поред тога што може мењати проток, може и вршити подешавање максималног радног притиска.

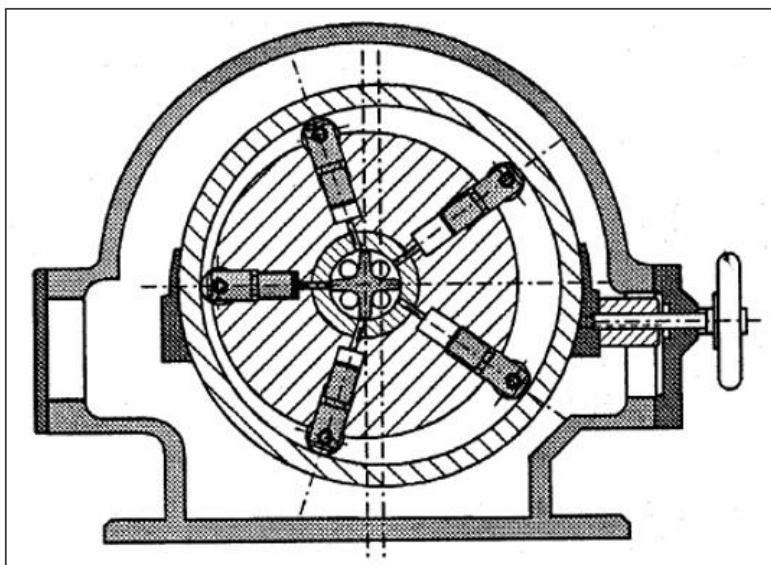


Слика 6.25 Крилна пумпа променљивог капацитета са компензатором [23]

Принцип рада је следећи: Опруга са десне стране пумпе делује на статор, који је у овом случају кружни прстен, померајући га у његов ексцентрични положај у односу на ротор. Величина ексцентрицитета, а с тим и подешени капацитет пумпе, се регулише помоћу завртња са контранавртком са леве стране пумпе. Статор је тангенцијално вођен са завртњем на горњој страни кућишта, којим се подешава и висински положај статора. Настали притисак услед неког оптерећења на потисној страни пумпе (на пример хидроцилиндар са клипом оптерећеног спољном силом) делује на страни притиска на унутрашњу клизећу површину статора. Услед тога настаје једна хоризонтална компонентна сила која делује насупрот опрузи, тако да ће при неком (подешеном) притиску ова сила постати већа од силе у опрузи, што доводи и до враћања статора у неутрални центричан положај а с тим и до смањивања протока до нуле. Величина радног притиска се подешава завртњем који притиска опругу. Треба напоменути да постоје различита управљања овом пумпом [23].

Радијална клипна пумпа

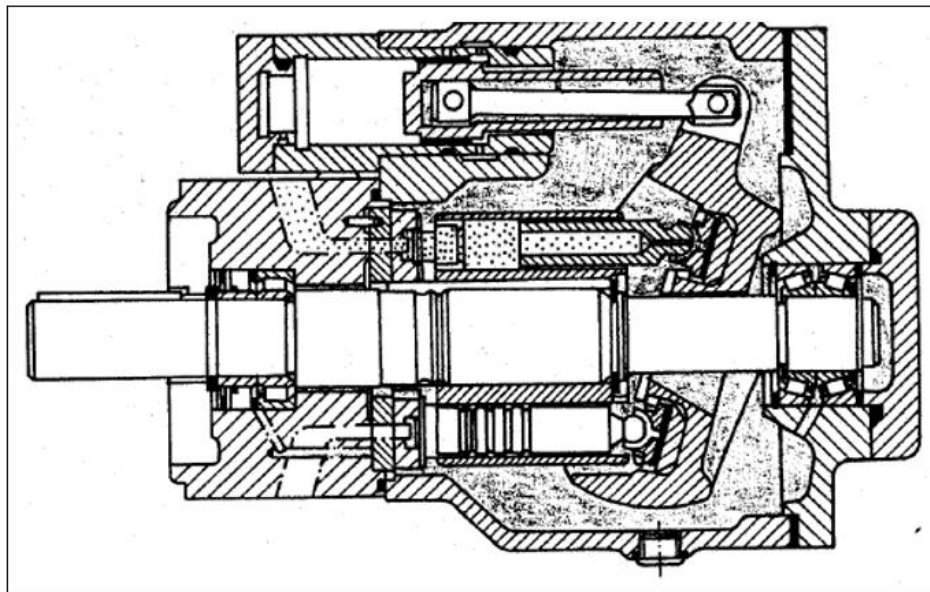
Ова пумпа променљивог капацитета, приказана на слици 6.26, ради на истом принципу као и раније описана пумпа константног капацитета према слици 6.19. Ротор пумпе је улежиштен у кућишту и окреће се у њему, док је статор изведен у виду цилиндричног прстена, повезаног са механизмом за радијално померање. Помоћу овог механизма оса статора може да се помера, при чему се јавља и одговарајућа ексцентричност која утиче и на величину протока, како је већ раније објашњено. У циљу смањења трења између клипова статора, на спољњим крајевима клипова се налазе ваљци помоћу којих се клипови котрљају по унутрашњој површини прстена. Рукавци осовиница ових ваљака улазе у бочне прстенасте жљебове вођица клипова, чиме се обезбеђује поузданије вођење клипова.



Слика 6.26 Радијална клипна пумпа променљивог капацитета [23]

Аксијална клипна пумпа

Аксијална клипна пумпа променљивог капацитета, приказана на слици 6.27, представља конструкцију са нагнутом плочом и ради на истом принципу као што је објашњено код пумпи константног капацитета. Основна разлика у конструкцији се огледа у томе да се угао нагиба плоче, по којој клизе врхови клипова, може мењати и тиме омогућавати и промену протока. Ова промена нагиба је омогућена помоћу заокретног склопа и једног хидроцилиндра монтираног на горњем делу кућишта саме пумпе, чији је клип помоћу клипне полуге повезан зглобно за овај склоп. Померајући се улево, клип хидрауличног цилиндра повлачи и заокретни зглоб, што доводи до смањења радних ходова клипова пумпе и смањења њеног капацитета. Када плоча достигне вертикалан положај, ход клипова, а самим тим и проток уља, постају једнаки нули, да би се при даљем заокретању плоче са заокретним склопом јавили негативни углови нагиба при чему се мења смер протока уља.



Слика 6.27 Аксијална клипна пумпа променљивог капацитета са нагнутом плочом [23]

7. ЗАКЉУЧАК

Људи вековима користе хидроенергију како би добили механички рад. У Старом веку су коришћена обртна кола, која су покретала брзи водотокови, а која су служила за погон млинова. Данас се за такве послове користе хидрауличке машине, иако се у неким забаченијим деловима света још увек користе овакве конструкције за погон млинова.

Са развојем механике флуида, људи су долазили до најразличитијих начина како би обуздали и користили енергију самог флуида. Током 18. и 19. века уложено је пуно труда у математичко описивање кретања флуида. Данијел Бернули (1700-1782) извео је своју, и данас битну и чувену, једначину, а Леонард Ојлер (1707-1783) поставио је једначине које описују закон одржања количине кретања невискозног флуида и закон одржања масе. Такође је увео и теорију потенцијалног струјања. Жозеф Луј Лагранж (1736-1813), највећи математичар осамнаестог века, Леонард Ојлер и Данијел Бернули оснивачи су науке о механици флуида. Да би описали различите појаве у струјном пољу, физичка својства флуида морала су да се идеализују у великој мери. И поред тога, компликоване једначине нису могле да се примене на решавање практичних проблема. Неминовна поједностављивања водила су до нетачних решења која нису могла да се користе за многе техничке проблеме. Тако је започет развој практичне - експерименталне хидромеханике - хидраулике.

Француз Клод Луј Мари Навије (1785-1836) и ирац Џорџ Габријел Стокс (1819-1903) увели су вискозне утицаје у Ојлерову једначину, што је резултовало чувеном Навије-Стоксовом једначином. Ова векторско диференцијална једначина, постављена пре 200 година, данас представља основу за развој нове научне дисциплине - рачунарске динамике флуида, или краће и опште прихваћено – ЦФД (Computational Fluid Dynamics), а у себи обухвата изразе за одржање масе, количине кретања, притисак, вискозност и турбуленцију. Скаларни облик ове једначине толико је комплексан за решавање да је тек развитак дигиталних рачунара шездесетих и седамдесетих година прошлог века омогућио њихову примену на проблеме реалног струјања.

Са све већим развојем индустрије, јавила се и већа потреба за аутоматизацијом. Хидрауличке пумпе имају велику улогу у томе, јер помажу кретању флуида кроз системе и на тај начин омогућавају бржу испоруку самог флуида а самим тим подижу и степен искоришћења.

Хидрауличке машине су техничке направе које трансформишу механичку енергију покретних делова машине у струјну енергију флуида или обрнуто. У хидрауличне машине се обично убрајају пумпе и мотори. У зависности од тога да ли се енергија предаје или одузима флуиду, разликују се:

- радне хидрауличне машине - када се енергија предаје флуиду,
- моторне хидрауличне машине - када се енергија одузима од флуида и претвара у механичку енергију и
- комбиноване хидрауличне машине - машине које могу да претварају и хидрауличку у механичку енергију и обрнуто.

8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Обровић Б.: Механика флуида, Машински факултет Крагујевац, 2003.
- [2] Humphrey J.D. Cardiovascular solid mechanics, cells tissues, and organs, Springer, New York, 1999.
- [3] Букуров М., Механика флуида, Факултет техничких наука Нови Сад, 2013.
- [4] Web stranica:
https://www.google.com/search?q=+ulje+i+voda&tbm=isch&ved=2ahUKEwiP8oCjotHpAhVI_4UKHUBNAP0Q2-cCegQIABAA&oq=+ulje+i+voda&gs_lcp=CgNpbWcQAzIECCMQJzICCAAYBAgAE B4yBAgAEB4yBAgAEB4yBAgAEBg6BggAEAcQHID0sQVYvOsFYNbyBWgAcAB4 AIABtgGIAZsEkgEDMC4zmAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWc&sclient=img&ei=We jMXs_hIMj-lwTAmoHoDw&bih=890&biw=1680#imgsrc=iZWhVWdCXq8QLM, приступљено 10.05.2020.
- [5] Стаменковић Ж.: Примењена механика флуида, Факултет заштите на раду Ниш, 2015.
- [6] Павличевић Ј.: Простирање топлоте и масе, Технолошки факултет Нови Сад, 2017.
- [7] Обровић Б., Савић С.: Хидраулика, Машински факултет Крагујевац, 2005.
- [8] Web stranica:
https://www.google.com/search?q=compressibility+fluid&sxsrf=ALeKk00tUQ8OQMU YFKVuNBSel41Sssh7cw:1590493065158&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahU KEwih9KmxuNHpAhVQpIsKHftLCKMQ_AUoAXoECBAQAaw&biw=1680&bih=890 #imgsrc=Mv89sl8z2eKInM&imgdii=DtO1jRZYR33reM, приступљено 12.05.2020.
- [9] Вукославчевић П., Караџић У.: Основе механике флуида, Машински факултет Подгорица, 2010.
- [10] Букуров М., Механика флуида – скрипта, Факултет техничких наука Нови Сад, 2006.
- [11] Иветић М., Рачунска хидраулика – Течење у цевима, Грађевински факултет Београд, 1996.
- [12] Петрић Ј.: Хидраулика, Факултет стројарства и бродоградње Загреб, 2012.
- [13] Корбар Р, 2007, Пнеуматика и хидраулика, Велеучилиште у Карловцу, Карловац
- [14] Web stranica:
https://www.google.com/search?q=hydraulic+lifts&rlz=1C1PRFI_enRS831RS831&sxsrf=ALeKk03ZINx8iE5_KnM_mU2DqrX_xnjEfw:1590577727965&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjh3dnj89PpAhXLTcAKHdjRAAt0Q_AUoAXoECBAQAaw&biw=1366&bih=608#imgsrc=B708iSd69irrZM, приступљено 12.05.2020.
- [15] Web stranica:
<https://whyhs.com/examples-of-hydraulic-system,> приступљено 14.05.2020.

- [16] Web stranica:
https://www.google.com/search?q=hydraulic+brakes&rlz=1C1PRFI_enRS831RS831&sxsrf=ALeKk02p2GoEvNpG_oC5vQm5wcwOEMHduw:1590578485616&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj_9PzM9tPpAhWK6KYKHTPsCtQQ_AUoAXoEC_AwQAw&biw=1366&bih=608#imgsrc=B33Myclwi2iIrM, приступљено 15.05.2020.
- [17] Web stranica:
https://www.google.com/search?q=hydraulic+steering+system&tbm=isch&ved=2ahUKEwjRvuL89tPpAhWF34UKHQE5B-AQ2-cCegQIABAA&oq=Hydraulic+Steering+&gs_lcp=CgNpbWcQARgAMgIIADIECAAQZzIECAAQZzICCAAYAggAMgIIADICCAAYAggAMgIIADICCAABQ04kDWNOJA2CpmANoAHAAeACAAYwBiAGMAZIBAZAuMZgBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1n&sclient=img&ei=mU3OXpGOM4W_lwSB8pyADg&bih=608&biw=1366&rlz=1C1PRFI_enRS831RS831#imgsrc=x4RfUVgPhV1EhM, приступљено 15.05.2020.
- [18] Web stranica:
https://www.google.com/search?q=Hydraulic+Jacks&rlz=1C1PRFI_enRS831RS831&sxsrf=ALeKk00P-iGIAOKG3Y_fHuMMDiJw3yEb9g:1590578742379&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjewbTH99PpAhXRM5oKHUjzCx8Q_AUoAXoECBEQAw&biw=1366&bih=608#imgsrc=y8testsSve0ahM, приступљено 15.05.2020.
- [19] Web stranica:
https://www.google.com/search?q=bulldozers&rlz=1C1PRFI_enRS831RS831&sxsrf=ALeKk00gzrLLExMGpsSfid9DjpH1_RPPLg:1590578876107&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjmyZaH-NPpAhVqwqYKHWIHBMcQ_AUoAXoECBYQAw&biw=1366&bih=608#imgsrc=FJRONfIQT9DtIM, приступљено 16.05.2020.
- [20] Web stranica:
https://www.google.com/search?q=%D0%BA%D0%B8%D0%BF%D0%B5%D1%80+%D0%BA%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BE%D0%BD&rlz=1C1PRFI_enRS831RS831&sxsrf=ALeKk03FFjCjm-Nb1D5kIm26il_JpQgSRQ:1590581896082&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=GN4-kFDISKE_JM%253A%252CHqitsgHeByq07M%252C_&vet=1&usg=AI4_-kRcjmAGAmRuUUSdUSob-fRQtkLrEw&sa=X&ved=2ahUKEwixuZung9TpAhVXilwKHYadBeUQ9QEwAHoECAoQHA#imgsrc=GN4-kFDISKE_JM:, приступљено 17.05.2020.
- [21] Web stranica:
https://www.google.com/search?q=hydraulic+shock+absorbers&rlz=1C1PRFI_enRS831RS831&sxsrf=ALeKk00Ou1vbt3H2iqKf_6JR7ktSvAEhQ:1590579066539&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwijx_3h-NPpAhVNR5oKHXKCB9QQ_AUoAXoECAwQAw&biw=1366&bih=608#imgsrc=gQQ7Zsk97-udtM, приступљено 20.05.2020.

[22] Web stranica:

https://www.google.com/search?q=Dental+and+Barber+Chairs&rlz=1C1PRFI_enRS831RS831&sxsrf=ALeKk027w23X9QOE92M8ew2YUjuMJpq3Kg:1590579253872&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwixw6e7-dPpAhWF2aYKHf7PBPMQ_AUoAXoECAwQAw&biw=1366&bih=608#imgsrc=Fm3dczcTfkKDTM, приступљено 21.05.2020.

[23] Захар С.: Машине алатке, Машински факултет Крагујевац, 1989.

[24] Web stranica:

https://www.google.rs/search?q=hidro+pumpa&rlz=1C1AVNG_enRS770RS773&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwj85OXsJnYAhVDuxQKHcB8Dc0Q_AUICigB&biw=1024&bih=677#imgsrc=r1lQHbzT41wByM, приступљено 23. 05. 2020.