

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Пренос снаге флуидом

Број индекса: 63/2013

Богдан В. Живановић

**Радне течности у хидрауличним системима
преноса снаге**

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Душан Гордић - ментор

2. _____

3. _____

Датум
одбране: _____

Оцена: _____

Садржај

	стр.
РЕЗИМЕ	1
1. УВОД	2
2. ОСНОВНЕ ДЕФИНИЦИЈЕ И ФУНКЦИЈЕ ФЛУИДА У ХИДРАУЛИЦИ . . .	4
2.1 Притисак и његова својства	4
2.2 Дефиниције основних појмова кинематике флуида	5
2.3 Запремински и масени проток флуида	5
2.4 Режији струјања	6
2.5 Једначина континуитета (једначина протока)	6
2.6 Бернулијева једначина (енергијска једначина)	7
2.7 Функције радних течности у системима хидрауличног преноса снаге	7
3. ВЕЛИЧИНЕ СТАЊА И ФИЗИЧКА СВОЈСТВА РАДНИХ ТЕЧНОСТИ. . . .	10
3.1 Густина	10
3.2 Стишљивост флуида	11
3.3 Вискозност	13
3.4 Топлотне карактеристике хидрауличних флуида	16
3.5 Оксидациона стабилност	20
3.6 Кавитација	20
3.7 Остала својства радних течности	21
4. КЛАСИФИКАЦИЈА ХИДРАУЛИЧНИХ УЉА И ТЕЧНОСТИ	23
4.1 Карактеристике минералних уља	25
4.2 Својства тешко запаљивих течности	26
4.3 Био-разградиве течности	27
4.4 Вода као хидраулични флуид	27
4.5 Специјални флуиди	28
5 ЗАКЉУЧАК	29
ЛИТЕРАТУРА	30

Резиме

The bachelor diploma thesis „Working fluid in hydraulic fluid power systems” includes a brief overview of the historical development of hydraulics and its application in modern industry. A paper defines the basic concepts of fluid mechanics (pressure, flow, continuity equation, Bernoulli’s equation, etc.) that are the fundamental basics for the study of the complete hydraulics. After that, the most important physical and chemical properties of the working fluid in hydraulic fluid power systems and their changes depending on the different working conditions of the system are described. The physical and chemical properties are: density, compressibility, viscosity, oxidation stability, thermal properties, toxicity, eco-friendly concept, etc. the basic classification of hydraulic oils according to DIN and ISO standards are presented in the paper, as well as characteristics of mineral hydraulic oils, hard flammable liquids, bio-degradable fluids and water as the hydraulic fluid.

Key words: *hydraulics, working fluid, hydraulic oils*

Завршни рад на тему „Радне течности у хидрауличним системима преноса снаге“ садржи кратак преглед историјског развоја хидраулике као и њено поље примене у модерној индустрији. Дефинисани су основни појмови из механике флуида (притисак, проток, једначина континуитета, Бернулијева једначина, итд.) који представљају фундаменталну основу за проучавање комплетне хидраулике. Потом су побројана најважнија физичка и хемијска својства радних течности у системима хидрауличног преноса снаге и њихова промена у зависности од различитих услова рада самог система. У ова физичка и хемијска својства спадају: густина, стишљивост, вискозност, оксидациона стабилност, топлотне карактеристике, токсичност, еколошка прихватљивост итд. Приказане су основне класификације хидрауличних уља према DIN и ISO стандарду, као и карактеристике минералних хидрауличних уља, тешко запаљивих течности, био разградивих-течности и воде као хидрауличног флуида.

Кључне речи: *хидраулика, радни флуид, хидраулична уља*

1. Увод

Природа је направила први и најбољи хидраулични систем. Тај систем садржи пумпу која обезбеђује проток од око 10 l/min на 0.16 bar максималног притиска. Ова пумпа снабдева цевну мрежу дугу чак око 100 000 km. То је скоро два ипо пута обима Земље. Ради у континуитету релативно дуго времена. Описани систем представља људски крвни систем. За 50 година рада, срца десет људи би требало да напумпају количину крви једнаку запремини велике египатске пирамиде (2,600,000m³).[1]

У модерном свету, хидраулика игра јако важну улогу како у индустрији, тако и у свакодневном људском животу. Значај и заступљеност хидраулике је у томе што се сматра да она чини један део мишића који покреће индустрију, док други део мишића чини пенуматика.

Грчка реч „Hydra“ значи вода, док реч „Aulos“ значи цев. Хидраулика је добила име комбинациом ових речи, а у буквалном преводу на српски језик би значила „вода у цевима“. Човек је био свестан важности хидраулике још од праисторијског времена. У периоду између 100. и 200. године пре нове ере, човек је успео да искористи потенцијалну енергију струјања воде у реци како би ту енергију трансформисао у корисну механичку енергију.

Древни историјски извори указују да је вода коришћена вековима да генерише снагу воденичног кола. Међутим, ово рано коришћење снаге флуида захтевало је коришћење огромне количине воде, због релативно ниског притиска флуида који даје природа. Временом, наука о хидраулици заснивала се на истраживању и изучавању ефикаснијих начина конвертовања хидрауличне енергије у механичку. Предмет хидраулике био је изучавање физичког понашања воде у стању мировања или кретања релативно дуго времена.

Након изума парне машине Џејмса Вата (James Watt), јавила се потреба за ефикаснијом трансмисијом снаге и енергије од тачке генерисања до места коришћења. Постепено је откривано мноштво механичких уређаја као што су вратило, зупчаник, котур, ланчаник, итд. То је значајно помогло креирању концепта трансформисања снаге посредством флуида под притиском. То је, дакле, био нови вид хидраулике, који је обухватао пренос снаге и контролу механичког кретања уз помоћ флуида под притиском. Због разликовања те нове хидраулике од водене хидраулике, уведено је име „Индустријска хидраулика“, или „Уљна хидраулика“. Чињеница која стоји иза одабира баш овог имена лежи у томе што је радни флуид у системима хидрауличног преноса снаге било уље. Вода се данас користи углавном у хидроенергетици. Вода се, такође, може користити у системима за пренос снаге под притиском флуида, али због мање отпорности на корозију и мањег својства подмазивања, уља имају знатну предност у примени у системима хидрауличног преноса снаге.

Студија „Уљне хидраулике“, датира још од краја седамнаестог века, када је француски физичар Блез Паскал (Blaise Pascal) објавио закон који представља фундаменталну основу за комплетну хидраулику. Концепт хидрауличне пресе заснива се управо на Паскаловом закону. Касније је Данијел Бернули (Daniel Bernoulli), такође Француз, објавио закон о одржању енергије примењен на хидрауличне системе. Ови

закони су се први пут практично применили тек након индустријске револуције 1850. године у Великој Британији.

Каснијим истраживањима омогућено је коришћење цевовода за транспорт воде на веће удаљености уз помоћ цевоводних мрежа између црпних станица и потрошача. Тада су конструисани и помоћни уређаји као што су пумпе за воду, вентили, акумулатори, заптивке, итд. 1930.-их година, током славних дана хидраулике, 12 m³/min воде се пумпало испод улица Лондона, како би се снабдевали хидраулични лифтови постављени у граду. Тада је, као извор енергије, хидраулични систем био јако јефтин и веома мобилан кроз 300 km дугих цеви испод земље.

Такође, прва половина двадесетог века сведок је појави модерне ере хидрауличног преноса снаге. Тада је, на пример, хидраулични систем мењао електрични систем који је био намењен за подизање и контролу положаја топова на броду „USS Virginia“. Као радни флуид коришћено је уље. Сматра се да је ово била прекретница у даљем развоју хидрауличних система. Након Другог светског рата, поље примене хидраулике забележио је значајан напредак, да би се данас хидраулика користила у многим гранама индустрије. [2]

2. Основне дефиниције и функције флуида у хидраулици

Течности и гасови се једним именом називају флуиди. Поред тога што су течности скоро нестишљиве, јер незнатно мењају запремину по величини и када се подвргну врло високим притисцима, а гасови веома стишљиви, увођење заједничког назива оправдано је и корисно. Пошто је стишљивост течности, као што ће се касније и видети, веома мала у поређењу са стишљивошћу гасова; стишљивост течности се у већини техничких проблема (изузев на пример код појаве хидрауличног удара) практично може и занемарити.

Према опште прихваћеној хипотези, флуид представља непрекидну средину, тј. континуум. Наиме, број микроструктурних елемената (молекула и атома), који је садржан у релативно малим запреминама испуњеним флуидом, изванредно је велики. Под делићем се уопште подразумева веома мала тј. елементарна количина течности или гаса, чији облик не игра улогу при мировању ни при кретању. Зато се делић може замислити као сасвим мала коцка, лопта, ваљак, тетраедар или било које друго геометријско тело.

Вискозност течности и гасова зависи од њихове природе. Мада су све реалне течности и гасови вискозни, може се замислити флуид који не поседује својство вискозности, тј. у коме нема трења за време кретања. Такав флуид назива се савршени. [3]

2.1 Притисак и његова својства

Притисак у произвољној тачки флуида се може математички изразити као:

$$p = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

где је:

F – сила притиска флуида [N]

A – површина [m²]

Притисак је, као што је познато, изведена физичка величина која се мери изведеном јединицом *паскал* (Pa) и која се дефинише као:

$$P_a = \frac{N}{m^2} \quad (2.2)$$

У многим хидрауличним и пнеуматским машинама, постројењима и инсталацијама притисак течности или гасова је најчешће већи или мањи од атмосферског притиска, те је зато уведен појам натпритиска и потпритиска. Ако је стварни, апсолутни притисак већи од атмосферског, тада се вишак притиска изнад атмосферског назива натпритиском или манометарским притиском. У случајевима када је апсолутни притисак у флуиду мањи од атмосферског, тај притисак се онда назива потпритисак или вакуумски притисак и он представља разлику између атмосферског и апсолутног притиска.

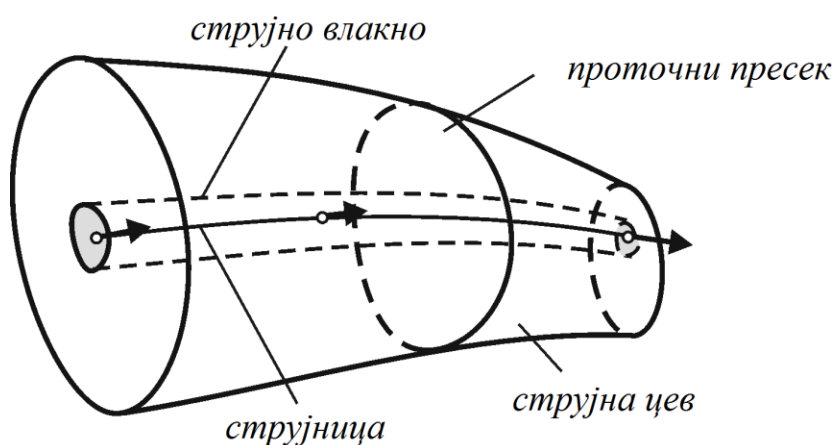
Сила изазвана притиском има два важна својства:

- она делује увек у правцу нормале на површину и
- има исту вредност без обзира како је површина оријентисана, јер притисак има исту вредност у свим правцима који пролазе кроз тежиште површине.

Паскалов закон је врло важан у Хидраулици, јер се на њему заснива рад појединих хидрауличних машина, као на пример, хидрауличних преса. Поменути закон гласи: *Свака промена притиска у било којој тачки течности у стању мировања преноси се подједнако у све тачке простора који та течност заузима.*

2.2 Дефиниције основних појмова кинематике флуида

Струјница или струјна линија је линија код које је у свакој њеној тачки вектор брзине флуидног делића колинеаран са правцем тангенте на струјницу. Када се кроз све тачке затворене контуре неке елементарне површине повуку струјнице, добиће се површина која представља омотач струјног влакна. Струјна влакна кроз затворену контуру неке коначне површине образују омотач струјне цеви. Попречни пресек струјне цеви нормалан на главни пресек струјања флуида назива се проточни пресек. Описани појмови су приказани на слици 1. [4]



Слика 1 – Струјница, струјна цев, струјно влакно и проточни пресек [4]

2.3 Запремински и масени проток флуида

Једна од најважнијих основних величина која карактерише струјање флуида је проток. То је количина флуида која протекне кроз пресек струјног влакна или струјне цеви у јединици времена.

У општем случају, проток се дефинише као количина флуида која проструји кроз неку отворену, односно затворену површ у јединици времена. Као мера за количину протеклог флуида може се усвојити његова запремина или његова маса. У случају струјања нестишљивог флуида из практичних разлога се као мера протеклог флуида усваја његова запремина, те се зато тако дефинисани проток назива запремински проток. Код струјања стишљивог флуида мења се и густина у струјном пољу те је погодније да се за одређивање количине протеклог флуида усвоји протекла маса. Изрази за запремински и масени проток се могу математички дефинисати као:

$$Q = v \cdot A \quad (2.3)$$

где је:

Q – запремински проток $[\frac{m^3}{s}]$

v – брзина $[\frac{m}{s}]$

A – проточна површина $[m^2]$

$$Q_m = Q \cdot \rho \quad (2.4)$$

где је:

Q_m – масени проток $[\frac{kg}{s}]$

ρ – густина флуида $[\frac{kg}{m^3}]$

2.4 Режи ми струјања

Добро је познато да постоји основна подела струјања на ламинарно и турбулентно. При ламинарном струјању струјне линије су паралелне и не постоје попречне компоненте брзина, другим речима, струјање је слојевито. По прекорачењу одређене брзине струјања, ламинарно струјање прелази у турбулентно, где се путање флуидних делића пресецају. Основна особина турбулентног струјања је појава случајне, нерегуларне промене брзине и струјних параметара. [5]

Режим струјања зависи од величине Рејнолдсовог (Reynolds) броја Re [-]. Овај број представља хидродинамички критеријум сличности (однос инерцијалних и вискозних сила):

$$Re = \frac{\rho_0 w_0 l_0}{\mu_0} = \frac{w_0 l_0}{\nu_0} \quad (2.5)$$

где је:

$\nu_0 [\frac{m^2}{s}]$ – кинематска вискозност флуида

$l_0 [m]$ – геометријска карактеристика струјања, за цеви је то унутрашњи пречник

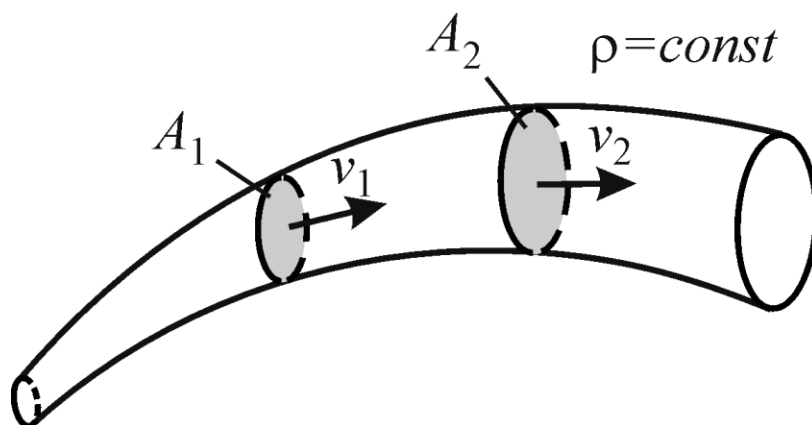
2.5 Једначина континуитета (једначина протока)

Једначина континуитета представља облик закона о одржању масе, по коме масени проток радне течности у струјној цеви променљивог проточног пресека остаје непромењен:

$$Q_m = Q_{m_1} = Q_{m_2} = const. \quad (2.6)$$

За нестишљив флуид важи да је густина константна, па једначина континуитета за овај случај гласи:

$$Q = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 = const. \quad (2.7)$$



Слика 2 – Уз једначину континуитета [4]

2.6 Бернулијева једначина (енергијска једначина)

Бернулијева (Bernoulli) једначина представља облик закона о одржању енергије примењен на хидрауличне системе. Према овом закону, енергија струјања радне течности коју носи савршени флуид (радни флуид без трења) остаје константна. Може се формулисати на следећи начин: у случају да се ради о стационарном струјању савршене течности кроз струјну цев у пољу дејства Земљине теже, и да при томе нема промене унутрашње енергије (нема промене температуре радне течности), збир кинетичке, потенцијалне и притиске енергије јединице масе течности у сваком проточном пресеку је константан:

$$\alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2} + gh_1 + \frac{p_1}{\rho} = \alpha_2 \cdot \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + \frac{p_2}{\rho} = \text{const.} \quad (2.8)$$

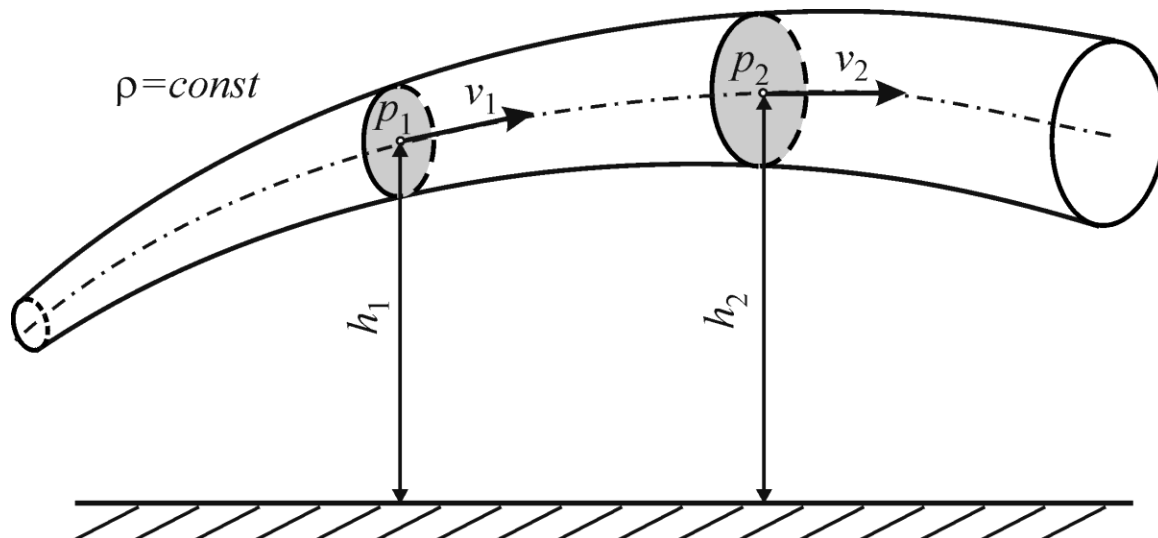
где су:

α_1 и α_2 [—] — Кориолисови бројеви у проточним пресецима 1 и 2 (слика 3)

v_1 и v_2 $\left[\frac{m}{s}\right]$ — средње брзине у проточним пресецима 1 и 2

p_1 и p_2 [Pa] — притисци у тежиштима пресека 1 и 2

h_1 и h_2 [m] — удаљења тежишта пресека 1 и 2 од референтне хоризонталне равни



Слика 3 - Уз Бернулијеву једначину [4]

Огледи са реалним течностима показали су да при кретању течности њена енергија струјања није константна, већ се један њен део „троши“ због трења које се јавља између делића саме течности и између делића течности и површина зидова водова кроз које протиче. Изгубљена енергија струјања пада на терет притисног дела енергије, што се манифестује одговарајућим губитком (падом) притиска Δp_v [Pa]. Тако се Бернулијева једначина, која узима у обзир својства реалне течности, може писати на следећи начин:

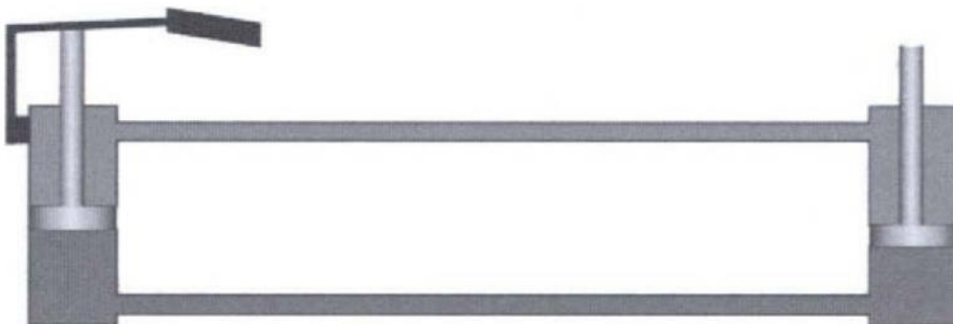
$$\alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2} + gh_1 + \frac{p_1}{\rho} = \alpha_2 \cdot \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + \frac{p_2}{\rho} + \Delta p_v \quad (2.9)$$

2.7 Функције радних течности у системима хидрауличног преноса снаге

Радни флуид је свакако један од најважнијих елемената у хидрауличном систему преноса снаге. Карактеристике флуида имају велики утицај на учинак и живот самог система и зато је важно користити квалитетни и одговарајући флуид како би ефикасност хидрауличног система била на задовољавајућем нивоу.

Примарна улога флуида у системима за пренос снаге флуидом је пренос снаге. Поред тога, хидраулични флуиди се користе за извршавање још неколико функција.

1. Пренос снаге (слика 4): Пренос снаге заснива се на повећању притиске енергије флуида, а нестишљивост флуида дозвољава трансфер те енергије са улазне на излазну снагу.



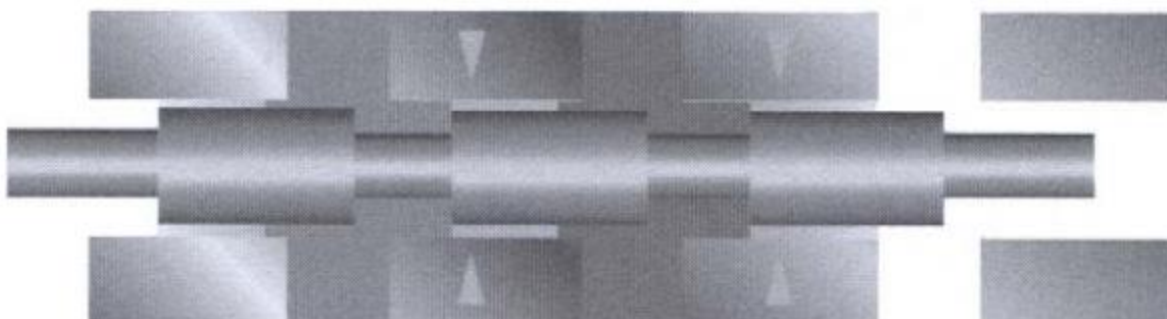
Слика 4 – Пренос снаге посредством флуида [2]

2. Подмазивање покретних делова (слика 5) смањује трење и хабање унутар система.



Слика 5 – Подмазивање покретних делова [2]

3. Заптиваче зазора између делова (слика 6).



Слика 6 – Заптиваче зазора [2]

4. Расподела топлоте настала услед трења.

Да би радни флуид задовољавајуће остварио ове функције, следеће карактеристике течности су од суштинске важности:

- добро својство подмазивања,
- идеална вискозност,
- хемијска стабилност,
- отпорност на ватру,
- добра способност преноса топлоте,
- мала густина,
- отпор пенушању,
- нетоксичност,
- ниска тачка испаравања.

Последње, али не и најмање важно, течност треба да буде јефтина и лако доступна на тржишту. [2]

3. Величине стања и физичка својства радних течности

Може се рећи да су три основна својства флуида следећа:

- густина,
- стишљивост,
- вискозност.

Поред тога, постоје још низ својстава флуида која су значајна у хидрауличним применама.

- топлотне карактеристике,
- оксидациона стабилност,
- кавитација,
- запаљивост,
- подмазивност,
- пењење,
- компатибилност,
- брзина кретања звука,
- граница течења,
- хемијска стабилност,
- киселост,
- токсичност,
- еколошка прихватљивост,
- чистоћа.

3.1 Густина

Густина радне течности представља масу њене јединице запремине.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

где је:

ρ – густина флуида $[\frac{kg}{m^3}]$

m – маса $[kg]$

V – запремина $[m^3]$

Густина је по правилу променљива величина која зависи од притиска и температуре. Код гасова (у пнеуматици) такве промене густине су знатне, па се густина изражава помоћу једначине стања гаса. Код течности, промене густине су доста мање (често се занемарују). Пораст притиска увек повећава густину течности, док пораст температуре, због ширења материјала, смањује густину. Изузеци су ретки, нпр. у опсегу температура од 0 до 4 пораст температуре повећава густину. [6]

Промена густине у зависности од промене температуре и притиска се математички могу изразити на следећи начин:

$$\rho = \rho_0 \cdot \left[1 + \frac{1}{\beta} \cdot (p - p_0) - \alpha \cdot (T - T_0) \right] \quad (3.2)$$

где су:

ρ – густина радне течности при притиску p [Pa] и температури T [K]

ρ_0 – густина радне течности при притиску p_0 [Pa] и температури T_0 [K]

β [Pa] – (изотермски) модул стишљивости радне течности

α [K⁻¹] – запремински коефицијент топлотног ширења

Реципрочна вредност густине представља специфичну запремину v [m³/kg], која се чешће користи у термодинамици, а некад је у примени и специфична тежина.

3.2 Стишљивост флуида

Стишљивост је својство радног флуида да мења своју запремину под дејством притиска. При решавању највећег броја техничких проблема, може се сматрати да су радне течности нестишљиве.

Стишљивост флуида се квалитетно може изразити у диференцијалном облику:

$$\frac{dV}{V} = - \frac{dp}{K} \quad (3.3)$$

где је:

V – запремина течности [m³]

p – притисак течности [Pa]

K – коефицијент стишљивости [Pa]

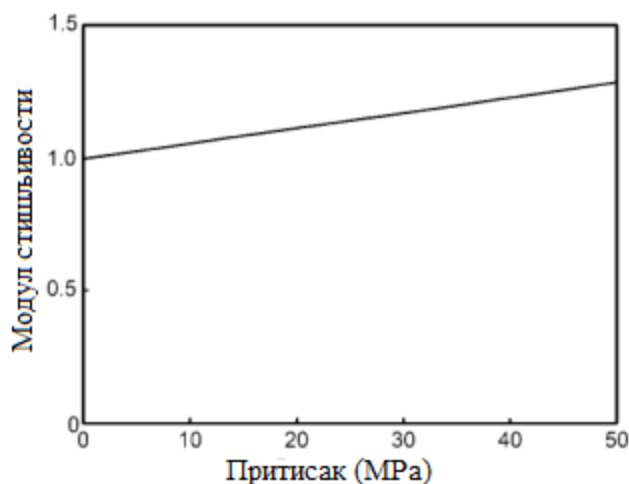
Може се уочити да коефицијент стишљивости има димензију притиска, а негативни предзнак показује да при расту притиска опада запремина. Модул стишљивости је реципрочна вредност коефицијента стишљивости.

$$\beta = \frac{1}{K} \quad (3.4)$$

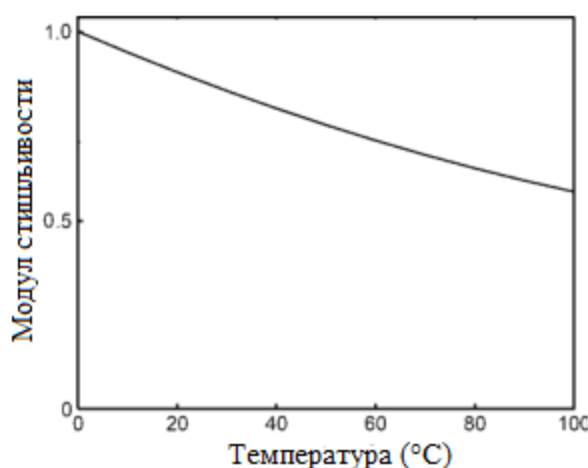
Модул стишљивости β мера је промене запремине флуида од промене притиска.

Коефицијент и модул стишљивости мењају се с променом притиска и температуре радне течности. Сlike 7. и 8. илуструју утицај притиска и температуре на модул стишљивости типичног минералног хидрауличног уља.

Модул стишљивости повећава се са повећањем притиска, а смањује са повећањем температуре. Повећање притиска од 0 до 300 bar повећава модул стишљивости за око 25%. Међутим, модул стишљивости се обично узима за константу када је хидраулични систем подвргнут уобичајеним радним притисцима и температурама. [1]



Слика 7 – Ефекат притиска на модул стишљивости при константној температури [1]



Слика 8 – Ефекат температуре на модул стишљивости при константном притиску [1]

Оно што у практичним применама значајно утиче на модул стишљивости флуида у хидрауличном систему јесте ваздух који се налази „заробљен“ у течности. Како ваздух има много мањи модул стишљивости од било које течности, тако се битно смањује модул стишљивости самог уља. Модул стишљивости ваздуха је око 1.4 bar (адијабатски), или око 1 bar (изотермски), док је модул стишљивости уља око 18000 bar (на температури од око 20°C). У литературама се наводи да 0,1% ваздуха у минералном уљу смањује његов модул стишљивости за око 7% (на собној температури), док 1% ваздуха смањује модул стишљивости за чак 55%. Међутим, порастом притиска у систему, утицај ваздуха на модул стишљивости може се значајно смањити.

Да би се објаснила разлика стишљивости уља и ваздуха, може се навести следећи пример. У посуду запремине једног литра, у којој је минерално уље под притиском од 10 bar дода се још 1 ml уља. Питање је за колико ће порасти притисак у посуди? Модул стишљивости уља је $1,8 \cdot 10^3 MP_a$ (модул стишљивости се узима за константу због једноставности примера).

$$\Delta V = -\frac{V_0}{K} \Delta p \quad (3.5)$$

$$\Delta p = K \frac{-\Delta V}{V_0} = 18000 \frac{0,001}{1} = 18 \text{ bar}$$

Дакле, додавањем само 1 ml уља у посуду од једног литра, притисак ће порасти са 10 bar на 28 bar. Ако би се исти пример показао са ваздухом уместо уља (под претпоставком да је $K_{\text{vazduha}} = 0,1 \text{ МПа}$, уз изотермску промену) биће:

$$\Delta p = K \frac{-\Delta V}{V_0} = 1 \cdot \frac{0,001}{1} = 0,001 \text{ bar}$$

У овом случају, притисак је порастао само за 1 mbar. Дакле, разлика у стишљивости ваздуха и уља из примера је прилично очита.

Поред наведеног, на модул стишљивости утичу и еластичност зидова хидрауличних компонената (посебно цевовода). [6]

3.3 Вискозност

Вискозност је веома важна карактеристика хидрауличног уља и представља величину унутрашњег трења које делује као отпор кретању честица течности, када су оне изложене смицајном напрезању. Другим речима, вискозност представља отпор струјању флуида. Према Њутновом закону, вискозност се може изразити према:

$$\frac{F}{A} = \mu \cdot \frac{dv}{dx} \quad (3.6)$$

где је:

F [N] – сила која доводи до кретања

A [m²] – величина константне површине

μ [Pa · s] – динамичка вискозност

$\frac{dv}{dx}$ [s⁻¹] – градијент брзине

Ако се величина $\frac{F}{A}$ означи са τ – смичући напон [Pa], добија се једначина:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dx} \quad (3.7)$$

Код њутновских флуида, вискозност за разне вредности брзине или напона смицања је константна величина, а код нењутновских флуида је променљива. Хидраулична уља спадају у групу њутновских флуида, али код ниских температура, када вредност вискозности порасте, понашају се као нењутновске течности. Код њутновских флуида, вискозност је зависна једино од величине температуре и притиска.

Динамичка вискозност може се физички изразити:

$$P_a \cdot s = \frac{N \cdot s}{m^2} = \frac{kg}{m \cdot s} \quad (3.8)$$

Раније се динамичка вискозност изражавала у поазима [P], али ова физичка величина више није у употреби.

Кинематска вискозност ν [$\frac{m^2}{s}$] се дефинише као однос динамичке вискозности и густине:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.9)$$

Кинематској вискозности одговара димензија:

$$\frac{m^2}{s} = \frac{Pa \cdot s \cdot m^3}{kg} \quad (3.10)$$

Према међународном систему мерних јединица није дефинисано, али је дозвољено да се кинематска вискозност изражава у стоксима [St].

Поред наведених, постоје и конвенционалне ознаке, које зависе од апаратуре на којој се мери вискозност, на пример: степен Енглера (у Европи), Редвуд секунда (у Великој Британији) или Сајболтове универзалне секунде (у Сједињеним Америчким Државама). [7]

Конверзије поменутих физичких величина приказане у табели 1 и табели 2.

центипоаз (centipoise)	поаз (poise)	паскал секунд	килограм сила секунд по метру квадратном	рејн (reyn)	фунта сила секунд по квадратној стопи
[cP]	[P]	[Pa s]	[kg s/m ²]	[lbf s/in ²]	[lb s/ft ²]
1	0.01	0.001	$10.2 \cdot 10^{-5}$	$1.45 \cdot 10^{-7}$	$2.088 \cdot 10^{-5}$
100	1	0.1	$10.2 \cdot 10^{-3}$	$1.45 \cdot 10^{-5}$	$2.088 \cdot 10^{-3}$
1000	10	1	0.102	$1.45 \cdot 10^{-4}$	$2.088 \cdot 10^{-2}$
9810	98.1	9.81	1	$1.45 \cdot 10^{-3}$	$2.0476 \cdot 10^{-1}$
$6.895 \cdot 10^6$	$6.895 \cdot 10^4$	$6.895 \cdot 10^3$	$7.033 \cdot 10^2$	1	$6.9441 \cdot 10^{-3}$
47879	478.79	47.879	4.8823	0.06944	1

Табела 1 – Конверзија физичких величина динамичке вискозности [4]

центистокс [mm ² /s] [cSt]	стокс [cm ² /s] [St]	њут (newt) [in ² /s]	кв. стопа у секунди [ft ² /s]	Сајболтове универзалне секунде [SSU]	Редвуд секунда (redwood) [s Red]	степен Енглера [°E]
1	$1 \cdot 10^{-2}$	0.00154	1.08E-05	31	29	1
4	$4 \cdot 10^{-2}$	0.00620	4.31E-05	39.2	35.5	1.3
4.25	$4.25 \cdot 10^{-2}$	0.00658	4.58E-05	40	36.2	1.32
5	$5 \cdot 10^{-2}$	0.00775	5.38E-05	42.4	38.6	1.37
5.5	$8.5 \cdot 10^{-2}$	0.00852	5.92E-05	44	40.6	1.4
6	$6 \cdot 10^{-2}$	0.00929	6.46E-05	45.6	41.8	1.43
6.13	$6.13 \cdot 10^{-2}$	0.00950	6.6E-05	46	42.3	1.44
7	$7 \cdot 10^{-2}$	0.01085	7.54E-05	46.8	43.1	1.48
7.36	$7.36 \cdot 10^{-2}$	0.01140	7.92E-05	50	44.3	1.58
8	$8 \cdot 10^{-2}$	0.12399	8.61E-05	52.1	46	1.64
10	0.1	0.01549	0.000108	58.8	51.3	1.83
15.66	0.1566	0.02427	0.000169	80	69.2	2.45
20.52	0.2052	0.03180	0.000221	100	85.6	3.02
108	1.08	0.16747	0.001163	500	423	14.6

Табела 2 – Конверзија физичких величина кинематске вискозности [4]

Вискозност може доста зависити од температуре и притиска. Код већине флуида који се користе у хидраулици, вискозност значајно зависи од температуре флуида (не зависи нпр. код воде). С порастом температуре, вискозност течности пада (код идеалног гаса расте). Зависност вискозности од температуре може се изразити једначином:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{-\alpha_{\nu T} \cdot (T - T_0)} \quad (3.11)$$

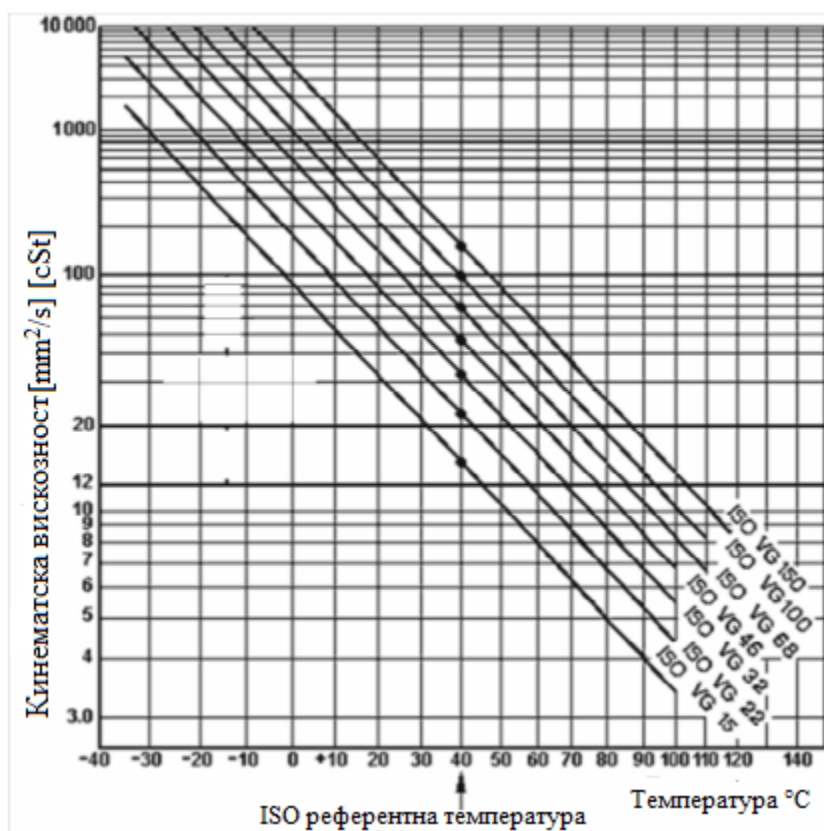
где су:

$\mu [Pa \cdot s]$ – динамичка вискозност на температури $T [K]$

$\mu_0 [Pa \cdot s]$ – динамичка вискозност на референтној температури $T_0 [K]$

$\alpha_{\nu T} [K^{-1}]$ – коефицијент зависности вискозности од температуре

Зависност вискозности од температуре се често приказује и дијаграмима, попут оног приказаног на слици 9. Ту је приказана зависност за минерална уља са неколико различитих вредности вискозности (VG). Степени вискозности говори о кинематској вискозности при 40°C (референтна температура према ISO). На зависност вискозности флуида од температуре указује индекс вискозности (VI). Што је крива вискозности стрмија, индекс вискозности је већи. Пожељан је што виши индекс вискозности, дакле да вискозност буде што равномернија. Типичан индекс вискозности за минерална уља је око 100.



Слика 9 – Дијаграм вискозност- температура за минерално уље [6]

Вискозност такође зависи и од притиска, међутим у знатно мањој мери него од температуре. Ако хидраулични систем ради при већим притисцима, пожељно је рачунати вискозност у зависности од притиска. Углавном, код пораста притиска и вискозност расте (дакле, супротно понашање него код пораста температуре). За једноставан прорачун зависности вискозности од притиска може се користити следећа једнакост:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{\alpha_{vp} \cdot p} \quad (3.12)$$

где су:

$\mu [Pa \cdot s]$ – динамичка вискозност на притиску $p [bar]$

$\mu_0 [Pa \cdot s]$ – динамичка вискозност на атмосферском притиску

$\alpha_{vp} [Pa^{-1}]$ – коефицијент зависности вискозности од притиска

Вискозност је свакако једно од најважнијих својстава флуида на основу којих се врши одабир течности за неки хидраулични систем. На одабир вискозности утиче минимална температура приликом покретања система, максимална радна температура система и оптимално и дозвољено подручје вискозности за компоненте хидрауличног система. Превисока вискозност значи велики пад притиска у систему, повећану температуру и губитке, док прениска вискозност значи лоше подмазивање и повећане губитке настале услед цурења.

3.4 Топлотне карактеристике хидрауличних флуида

Уобичајене температуре радне течности у системима преноса снаге се крећу у интервалу $[-40\text{ }^{\circ}\text{C}, 120\text{ }^{\circ}\text{C}]$.

Зависност унутрашње енергије од температуре дефинише се појмом специфичног топлотног капацитета (специфичне топлоте), који се може математички изразити:

$$c = \frac{dQ_H}{m dT} \quad (3.13)$$

где је:

$Q_H [J]$ – количина топлоте

$m [kg]$ – маса флуидног делића

$T [K]$ – температура флуида

$c \left[\frac{J}{kgK} \right]$ – специфична топлота

Дакле, специфична топлота је она количина топлоте коју треба довести јединици масе флуида да би температура порасла за један $^{\circ}\text{C}$. Специфични топлотни капацитет мења се са температуром, тако да нпр. за воду показује минимум на око $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Специфична топлота минералног уља има вредност око 40% вредности воде. Што се тог податка тиче, вода је бољи хидраулични флуид од уља, јер захтева више него двоструко већу доведену количину топлоте да би се постигла једнака температура једнаке масе флуида. Ипак, ако се хлади, то значи да је потребно одвести више него двоструко већу количину топлоте води да би имала исту температуру као иста маса уља. [6]

Флуид се шири с повећањем температуре (уз изузетке нпр. при промени фазе). Коефицијент запреминског ширења флуида $\alpha [K^{-1}]$ при константној температури може се математички написати:

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (3.14)$$

где је:

$V [m^3]$ – запремина флуида

$T [K, \text{ или } ^{\circ}\text{C}]$ – температура

Промена запремине флуида може се анализирати у различитим физичким стањима:

а) Код константног притиска, па је реч о запреминском коефицијенту топлотног ширења.

$$\alpha_p = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p [K^{-1}] \quad (3.15)$$

Вредност коефицијента α_p за уље ISO VG 32 креће се у границама датим у табели 3.

Притисак [bar]	Коефицијент $\alpha_p \cdot 10^4 [K^{-1}]$ код температуре [K]		
	15	45	70
1	7.04	7.19	7.32
101	6.75	6.88	7.01
201	6.47	6.60	6.71
301	6.23	6.34	6.45
401	5.99	6.11	6.20

Табела 3 - Вредност коефицијента α_p [7]

б) Код константне запремине, па се говори о изохорском коефицијенту ширења.

$$\alpha_V = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_V [K^{-1}] \quad (3.16)$$

Вредност коефицијента α_V за уље ISO VG 32 креће се у границама датим у табели 4.

Притисак [bar]	Коефицијент $\alpha_V [K^{-1}]$ код температуре [K]		
	15	45	70
1	11.94	10.11	9.54
101	11.12	10.49	9.09
201	11.06	11.05	9.05
301	11.04	11.04	9.03
401	11.03	11.03	9.02

Табела 4 – Вредност коефицијента α_V [7]

в) Код константне температуре, па је реч о тангенцијалном компресионом коефицијенту.

$$K_T = -V \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_T [bar] \quad (3.17)$$

Вредност коефицијента K_T за уље ISO VG 32 креће се у опсегу датим у табели 5.

Притисак [bar]	Коефицијент $K_T \cdot 10^3 [bar]$ код температуре [K]		
	15	45	70
1	16.95	14.59	13.01
101	17.90	15.48	13.85
201	18.85	16.39	14.73
301	19.79	17.31	15.61
401	20.75	18.24	16.51

Табела 5 – Вредност коефицијента K_T [7]

г) Код изентропног компресионог коефицијента (адијабатског).

$$K_s = -V \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_s = \frac{c_p}{c_v} K_T (\text{bar}) \quad (3.18)$$

где је:

p – притисак [bar]

T – температура [K]

C_p – специфична топлота код константне запремине [J/kgK]

Вредности K_s се крећу у границама датим у табели 6.

Притисак [bar]	Коефицијент $K_s \cdot 10^3 [\text{bar}]$ код температуре [K]		
	15	45	70
1	19.81	16.89	14.96
101	20.79	17.84	15.89
201	21.77	18.79	16.81
301	22.75	19.76	17.75
401	23.73	20.74	18.70

Табела 6 – Вредности коефицијената K_s [7]

Топлотна проводљивост може се изразити коефицијентом проводљивости који је нумерички једнак количини топлоте која прође кроз јединицу површине у јединици времена, уз јединични температурни градијент. Јединица којом може изразити коефицијент топлотне проводљивости је W/mK.

Примера ради, коефицијент топлотне проводљивости минералног уља је око 0.14 W/mK, воде (при стању од 1 bar и 20 °C) је 0.6 W/mK, нискоугљеничног челика је 50 W/mK, алуминијума 221 W/mK. Дакле, минерално уље је слабији проводник топлоте па се може сматрати топлотним изолатором.

У табели 4 приказане су вредности топлотне проводљивости воде, $k \cdot 10^{-2}$ (W/mK) при појединим температурама и притисцима.

T (°C)	p (bar)							
	1	20	40	60	80	100	200	300
0	56.9	57	57.2	57.4	57.5	57.7	58.5	59.2
40	63	63.3	63.5	63.7	63.8	64	64.8	65.4
50	64.3	64.5	64.7	64.8	65	65.1	65.9	66.6
60	65.3	65.5	65.7	65.8	66	66.1	66.9	67.6
70	66.2	66.4	66.5	66.7	66.8	67	67.7	68.4
80	66.9	67.1	67.3	67.4	67.6	67.7	68.4	69.1
90	67.5	67.7	67.9	68	68.2	68.3	69	69.6
100	2.45	68.2	68.4	68.5	68.6	68.8	69.4	70.1
120	2.6	68.8	68.9	69.1	69.2	69.3	70	70.6

Табела 7 – Топлотна проводљивост воде [8]

У експлоатацији хидродинамичких спојница, максималне дозвољене температуре

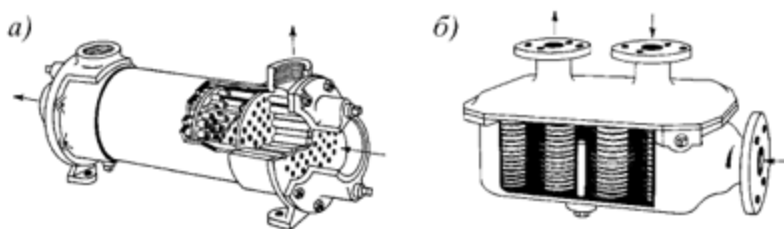
уља се крећу у границама од 80-100 °С. При дужем раду, долази до загревања делова спојнице, као и самог уља, што је праћено повећањем термичких напона у елементима спојнице. Да ови напони не би прекорачили дозвољене границе, хидродинамичке спојнице имају топлотне осигураче-сигурносне чепове на ободу спојнице који се топе на температури од 130-140 °С и испуштају уље из радног простора, чиме се прекида пренос снаге и погонски мотор се растерећује. [9]

Да би се интензивирало одвођење топлоте у околину и снизила температура радне течности, често се спољашњи дискови пумпног кола израђују са ребрима за хлађење. Проблем са ниским коефицијентима прелаза топлоте најчешће се јавља код гасовитих флуида. У великом броју случајева тај флуид је ваздух. Због мале топлотне проводљивости, која је на пример мања за више од двадесет пута од топлотне проводљивости воде, ваздух се понаша као топлотни изолатор. Дакле, уколико се хидраулична компонента додирује са ваздухом, увећање коефицијента пролаза топлоте ће по правилу бити постигнуто увећањем коефицијента прелаза топлоте са стране ваздуха. Да би се постигло ово побољшање, најчешће се прибегава увећању површине размене топлоте са стране ваздуха, односно примени оребрених површина. [5]

Када је загревање радне течности у систему толико, да се течност не може природно охладити, потребно је у хидраулични систем уградити хладњак. Они се уграђују најчешће код мобилних система. Најпростији, али и најмање ефикасан начин хлађења је постављање вентилатора за хлађење резервоара. Нешто бољи начин је постављање цеви у резервоар, кроз које струји вода за хлађење. Најбољи ефекат се постиже хлађењем у специјално конструисаним размењивачима топлоте (хладњаци). Као расхладни флуид се може користити вода или ваздух.

Уколико систем ради у условима ниских температура, пре пуштања у рад радну течност треба загрејати на прописану вредност температуре. Код мањих система, у ту сврху користе се грејачи, који се уграђују у резервоар или постављају на спољашњу површину резервоара. Код већих система и нижих температура околине, за предгревање радне течности користе се размењивачи топлоте (грејачи), чије се грејно тело загрева електричном струјом, паром, топлим водом или топлим ваздухом. [4]

На слици 10 приказани су најраспрострањеније врсте размењивача топлоте.



Слика 10 – а) Цевasti размењивач топлоте, б) Плочасте размењивач топлоте [4]

3.5 Оксидациона стабилност

Хидраулично уље је у току експлоатације непрекидно изложено дејству кисеоника.

Оксидација је процес који резултује из хемијске реакције кисеоника и хидрауличног уља. Она може драстично смањити животни век течности. Минерална уља посебно подлежу оксидацији јер се кисеоник лако сједињује са молекулима угљеника и водника. Већина продукта оксидације су растворљива у уљу и могу изазвати озбиљнија оштећења хидрауличних компоненти. Продукти настали оксидацијом су муљ и талог и они имају тенденцију повећања вискозности уља. Постоји много параметара који убрзавају процес оксидације. Неки од значајнијих су притисак, присуство нечистоћа, присуство воде и металне површине. Међутим, оксидација зависи највише од температуре флуида. Разни адитиви укључени у састав хидрауличних уља спречавају високу стопу оксидације. Како адитиви значајно повећавају цену уља, они треба да се користе у системима једино када су неопходни.

Релативна промена хемијског састава уља под оксидационим условима може се проучавати уз помоћ стандардног теста. Овај тест даје меру формирања штетних материја у уљу. Главни циљ теста је да измери отпорност оксидацију, мерењем промене киселости уља услед апсорпције кисеоника. Другим речима, мери се оксидациона стабилност течности.

Поступак теста је следећи: Најпре се 300 ml уља стави у епрувету при температури од 95 °C. Затим се у периоду од 1000 h кисеоник пушта да континуално пролази кроз узорак, са протоком од 3 l/h. За мерење оксидационе стабилности, након тих 1000 часова, уље се ставља у другу епрувету. Потом се око 100 ml растварача додаје у узорак, па се око тридесет капи индикатора додаје у овај раствор. За обављање процеса, индикатор је калијум хидроксид (KOH), и он се кап по кап додаје у раствор, док се боја не промени из наранџасте у плаво-зелену. Количина поменутог индикатора у mg, показује ниво оксидације.

Неутрализациони број је мера релативне киселости течности. Течност са мањим неутрализационим бројем је више препоручљива. За киселе течности, неутрализациони број једнак је броју mg KOH потребних да неутралишу киселину у узорку од 1 g.

Рђање и корозија су сасвим два различита појма, иако оба контаминирају уље и интензивирају процес хабања. Рђање је хемијска реакција између гвожђа или челика и кисеоника. Примарни извор кисеоника у хидрауличном систему је атмосферски ваздух који улази у резервоар. Корозија је, са друге стране, хемијска реакција између метала и киселине. Због рђања или корозије, металне површине хидрауличних система се троше и то доводи до прекомерног цурења течности кроз захваћене делове. Од рђања и корозије се може заштитити адитивима уљу који формирају заштитни слој на металним површинама и на тај начин спречавају појаву хемијске реакције. [2]

3.6 Кавитација

Једно од важнијих својстава реалних флуида је да они могу да мењају своја агрегатна стања, а све зависно од спољашњих услова којима се подвргну. Снижавањем температуре, при одржавању константног притиска, испод одговарајуће вредности (тачка мржњења) течни флуид прелази у чврсто стање, а повећањем његове температуре изнад одговарајуће вредности (тачка кључања) течни флуид прелази у гасовиту фазу.

Тачка мржњења и тачка кључања сваког реалног флуида функције су притиска и температуре. Зна се да свакој вредности притиска, одговара једна вредност температуре мржњења или кључања.

Тако, на пример, ако се притисак у течном флуиду при константној температури сноси испод вредности која одговара тачки кључања, онда ће он прокључати при чему ће се у њему појавити гасовита фаза.

У хидрауличним системима, у току рада, може на одговарајућим локацијама да притисак у радној течности опадне испод оног који одговара њеној тачки кључања на тој температури, услед чега ће се на том месту појавити парна фаза (локално кључање). Створени мехурићи парне фазе путују низводно са течном фазом и доспевају у зоне вишег притиска, услед тога долази до нагле кондензације парне фазе и ишчежавања мехурића. Ова појава, у којој се на константној температури радне течности због снижавања и пораста притиска у њој појављују и нестају парни мехурићи назива се кавитација. [10]

3.7 Остала својства радних течности

Запаљивост. У многим применама нужно је да хидраулични флуид буде што теже запаљив. Различите су дефиниције и норме које говоре о запаљивости флуида. Приликом дефинисања, обично се посматра температура запаљивања. За минерална уља те температуре су релативно ниске.

Подмазивност је мера могућности флуида да носи велики терет задржавајући својство ниског трења. На подмазивност делује доста фактора, један од најважнијих је свакако вискозност. Тенденција побољшања радних својстава хидрауличних машина врло је захтевна са становишта подмазивања. Повећани притисци и брзине, уз смањење толеранције зазора (ради смањења губитака цурењем), негативно утичу на подмазивност. Ради побољшања овог својства, радној течности додају се разчилити адитиви.

Пењење течности је стварање емулзије са гасовима, посебно са ваздухом. Пењење уља није пожељно јер може резултовати кавитацијом, повећаном буком и интензивним трошењем елемената. Такође, смањује се модул стишљивости флуида. Пењење се може сматрати првенствено конструкцијским проблемом. Уобичајни извори пењења су нпр. низак ниво уља у резервоару или пребрз проток кроз повратни вод.

Флуид мора бити компатибилан са различитим елементима у систему, тј треба бити што инертнији у реакцији са материјалима који чине хидраулични систем.

Брзина кретања импулса притиска кроз уље је једнака брзини кретања звука кроз исто. Величина брзине кретања звука је зависна од густине уља, структуре, притиска и температуре. У табели 8 су дате вредности брзине кретања звука кроз уље ISO VG 32.

Притисак [bar]	Вредности брзине звука [ms^{-1}] код температуре [K]		
	15	45	70
1	1502.3	1402.2	1320.0
101	1534.7	1436.2	1354.6
201	1544.3	1469.5	1389.0
301	1597.0	1502.4	1423.0
401	1627.1	1534.8	1456.6

Табела 8 – Вредности брзине звука кроз уље [7]

Под границом течења подразумева се температура уља код које оно престаје да тече. Произвођачи уља дају најчешће податке о тачки ситњавања, која је приближно 2-3 степена нижа од границе течења. Мерење ове карактеристике код минералних уља и тешко запаљивих течности се врши по методи коју дефинише DIN стандард. Оцена ове

карактеристике врши се на основу добијене вредности, али и карактеристике промене вискозности код пораста температуре.

Хемијска стабилност је још једна важна карактеристика хидрауличних флуида. Она дефинише способност течности да се одупре оксидацији и погоршању карактеристика на дужи временски период. Све течности имају тенденцију да се подвргну неповољним променама под тешким условима рада. Неки метали, као што су цинк, олово, месинг и бакар имају нежељене хемијске реакције са одређеним течностима. Ове реакције резултирају појавом талога који зачепљују отворе. Како се ове наслаге појављују, дешавају се извесне промене у физичком и хемијском саставу течности. Течност обично постаје тамнија, повећава се вискозност и појављују се штетне киселине. Стабилност течности се може побољшати адитивима уљу који морају бити компатибилни са другим потребним својствима течности.

Идеална хидраулична течност треба да буде слободна од киселина које доводе корозију од материјала систему. Већина течности не може да остане потпуно некорозивна под тешким режимима рада хидрауличног система. Степен киселости нове течности може бити задовољавајућа, али после извесног времена употребе, течност може да постане корозивна.

Токсичност се може дефинисати као степен отровности хидрауличног флуида. Неке течности садрже хемикалије које представљају озбиљну токсичну опасност. Ове токсичне или отровне хемикалије могу ући кроз тело путем дисања, апсорпцијом кроз кожу или кроз очи или уста. Резултат тога је болест, или у неким случајевима смрт. Произвођачи хидрауличне течности покушавају да произведу одговарајуће течности које не садрже отровне хемикалије, и као резултат тога, већина уља су нетоксичне. Неке тешко запаљиве течности имају отровних компоненти у себи, тако да се мора обезбедити адекватна заштита људи у околини.

Последње године су обележене напорима у борби против озбиљне претње у виду индустријског загађења животне средине. Природно, и хидраулична уља су укључена у ове догађаје, јер се користе у великим количинама у машинама за ископавање, грађевинској механизацији и друге опреме. Цурење уља може довести до значајног загађења земљишта и подземних вода. Минерална уља се састоје од релативно стабилних угљоводоничних једињења, па знатно спорије утичу на микроорганизме у окружењу. Међутим, загађење од минералних хидрауличних уља може да поремети еколошку равнотежу у дужем временском периоду. Ова чињеница је довела до повећаног интереса за биоразградивим и еколошко прихватљивим проиловима.

Чистоћа у хидрауличним системима има значајну улогу. Неки системи, рецимо у авио индустрији, су изузетно осетљиви на нечистоће. Чистоћа флуида је од примарног значаја јер нечистоћа може изазвати квар компоненти, да омета правилно дејство вентила и може проузроковати хабање. Ваздух, вода, растварачи и друге течности спадају у загађиваче уља. [6]

4. Класификација хидрауличних уља и течности

Већ су наведене основне функције хидрауличних флуида. То су, дакле, пренос енергије, подмазивање покретних делова, заптивање зазора и расподела топлоте. За обављање ових функција у хидрауличним системима се користе уља и течности, која могу бити: минерална уља, синтетичке течности, а у последње време у примени су биљна уља и вода. С обзиром на веома бројне сегменте примене хидрауличних система, из којих следе и различити услови експлоатације, развијен је велики број типова хидрауличних течности и уља. Уобичајно је да се она класификују према стандарду ISO 6743/4 (табела 9) по коме се деле на три групе: нормално запаљиве течности (минерална уља), тешко запаљиве течности и био-разградиве течности. У наведеној класификацији, прво слово Н означава да се ради о уљу или течности које се користи за пренос хидрауличне енергије.

С обзиром да је хидраулична опрема често пореклом из Савезне Републике Немачке, наводи се неколико основних информација у хидрауличним течностима које су дефинисане DIN стандардом.

Минерална уља се деле на:

- тип Н – уље без адитива,
- тип HL – уље са додатком адитива против оксидације и адитивима за заштиту од корозије,
- тип HLP – уље са адитивима за подношење високих притисака,
- тип HV – уље са адитивима за побољшање индекса вискозности.

Тешко запаљиве течности се деле на:

- тип HSA – емулзија уља у води код које је удео запаљиве материје до 20%, намењена је за употребу код радних температура у интервалу од 5-55 °C,
- тип HSB – емулзија воде у уљу код које је удео запаљиве материје до 60%, намењена је за употребу код радних температура у интервалу од 5-55 °C,
- тип HSC – водени раствор са адитивом за повећање вискозности и најмање 35% воде,
- тип HSD – синтетичке течности израђене на бази фосфата естера, за радне температуре између -20°C и 150°C.

Симбол ISO		Састав и основна својства
Минерална уља – Н	HH	Стандардно рафинисано минерално уље
	HL	Рафинисано минерално уље са додатком адитива против оксидације и заштити од корозије
	HM	Својства уља HL са побољшаним својствима против трошења
	HR	Својства уља HL са додатком адитива за побољшање индекса вискозности
	HV	Својства уља HM са додатком адитива за побољшање индекса вискозности
	HG	Својства уља HM са адитивима који смањују „slick-stip“ ефекат

Тешко запаљиве течности – HF	HS	Синтетичке тешко запаљиве течности
	HF	Група тешко запаљивих течности са водом
	HFAE	Емулзија „уље у води“ или водени раствор, која садржи највише 20% горивог материјала
	HFAS	Раствор, хемикалија са најмање 80% воде
	HFB	Емулзија „вода у уљу“ са највише 20% горивог материјала
	HFC	Водени раствор са адитивом за повећање вискозности (полимер)
	HFD	Група тешко запаљивих течности без воде
	HFDR	Синтетичка течност израђена на бази фосфат естера
	HFDS	Синтетичка течност израђена на бази хлорисаних угљоводоника
	HFDT	Мешавине синтетичких течности означених са HFDS и HFDR
Био-разградиве течности – HE	HFDU	Тешко запаљиве течности другог састава
	HETG	Триглицериди
	HEPG	Полигликоли
	HEES	Синтетички естри
	HEPR	Поли-алфа-олефини и слични угљоводоноци

Табела 9 – Класификација хидрауличних уља према ISO 6743/4

Осим поделе по критеријуму нивоа квалитета, хидраулична уља се деле и према вредности вискозности (табела 10). У том погледу важи класификација ISO 3448/75. [7]

ISO ознака	Вискозност mm ² /s (cSt) на 40 °C		
	Средња	Најмања	Највећа
ISO VG 2	2.2	1.98	2.42
ISO VG 3	3.2	2.88	3.54
ISO VG 5	4.6	4.14	5.06
ISO VG 7	6.8	6.12	7.48
ISO VG 10	10.0	9.0	11.0
ISO VG 15	15.0	13.5	16.5
ISO VG 22	22	19.8	24.2
ISO VG 32	32	28.8	35.2
ISO VG 46	46	41.4	50.6
ISO VG 68	6	61.2	74.8
ISO VG 100	100	90	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	28	352
ISO VG 460	460	411	508
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1000	1000	900	1100
ISO VG 1500	1500	1350	1650

Табела 10 – Класификација вискозности према ISO 3448/75

4.1 Карактеристике минералних уља

Због низа добрих својства и због доступности на тржишту и прихватљиве цене, минерална уља су далеко најзаступљенији радни флуид у хидраулици. Ипак, растући захтеви корисника хидрауличне опреме, као и све строжија законска регулатива помало смањују доминацију минералних уља претежно у корист биоразградивих течности и воде. [6]

Минерална уља су хемијски стабилна током уобичајених радних температура. Међутим, на вишим температурама њих прати хемијска нестабилност. Постоје одређени недостаци минералних уља који се не могу надоместити уношењем адитива. Два најважнија недостатка су запаљивост и повећање вискозности при високим притисцима. Ризик од пожара искључује употребу минералних уља у опасним подручјима, као што су машине за обликовање метала, рудници угља или уређаји у близини пећи. [11]

Услове рада савремених хидрауличних постројења најчешће задовољавају уља израђена према спецификацији HLP (DIN 51524, лист 2), па је дата информација о хидрауличном уљу класе ISO VG 10 – 100, чије су карактеристике дефинисане DIN-ом 51524. (табела 11)

Тип уља			HLP 10	HLP 22	HLP 32	HLP 46	HLP 68	HLP 100	Метода испити- вања
ISO вискозност према DIN- у 51519			ISO VG10	ISO VG22	ISO VG32	ISO VG46	ISO VG68	ISO VG100	
Кинематска вискозност mm ² s ⁻¹	код -20 °C, макс.		600	-	-	-	-	-	DIN 51500
	код 40 °C, макс.		90	300	420	780	1400	2500	
	код 40 °C	макс.	11.0	24.2	35.2	50.6	74.8	110	
		мин.	9.0	19.8	28.8	41.4	61.2	90.0	
код 100 °C, мин.			2.4	41	5.0	6.1	7.8	9.9	
Ситниште °C			-30	-21	-16	-15	-12	-12	DIN 51597
Пламиште °C			126	166	175	185	195	205	DIN 51376
Садржај чврстих примеса			Испод 0.05% - код прецизног мерења није могуће утврдити ниже вредности						DIN 51592
Садржај воде			Испод 0.01% - код прецизног мерења није могуће утврдити ниже вредности						ISO 3733
Корозија челика			Степен корозије О-А						DIN 51586
Корозија бакра			Степен корозије 2-100А3						DIN 51750
Тест старења			Одређује споручилац уља						DIN 51587
Утицај на заптиваче	Промена протока %		Одређује испоручилац уља						DIN 51538/1
	Промена тврдоће		Одређује испоручилац уља						DIN 51537/1

Издавање ваздуха 50 °C		5	5	5	10	10	одређ. исп.	DIN 51318
Антипенушава својства		Одређује испоручилац уља						DIN 51566
Деемулзивност на 54 °C, макс минута		30	40			60		DIN 51599
Механички тест, испитивање зупчаника	Степен оптерећења, мин.	10						DIN 51364
	Гупитак масе, макс. mg/kWh	0.27						
Механичко испитивање крилца пумпе	Прстен- макс.	120						DIN 51389
	Крилца- макс.	30						
Густина на 15 °C		Одређује испоручилац уља						DIN 51575
Пепео g/100g		Одређује испоручилац уља						DIN EN7
Неутрализациони број		Одређује испоручилац уља						DIN 51558

Табела 11 – Карактеристике уља према DIN-у 51524

4.2. Својства тешко запаљивих течности

Императив је да хидрауличне течности не проузрокују или подржавају ватру. Као што је речено, већина хидрауличних течности ће се запалити под одређеним условима. Постоје многа места где се због људске безбедности мора употребљавати тешко запаљива течност. Примењује се, дакле, на местима где је примена минералних уља небезбедна, а то укључује руднике угља, опрему и машине за обраду метала и системе који се користе у поморству и ваздухопловству.

Тешко запаљиве течности су оне које могу да се запале, али неће подржати сагоревање када се uklони извор паљења. Запаљивост се дефинише као лакоћа паљења и способност да се шири пламен. Уобичајене карактеристике које се тестирају у циљу утврђивања запаљивости хидрауличног флуида су следеће:

- температура бљеска; представља најнижу температуру уља на којој се изнад површине образују смеше способне да бљесну при постојању одговарајућег извора паљења, при томе не долази до устаљеног процеса сагоревања,
- температура паљења; представља најнижу температуру на којој се уље помешано са ваздухом може запалити уз помоћ одговарајућег извора, и
- температура самозапаљивања; представља најнижу температуру до које је потребно загрејати запаљиву материју да би се она у процесу самооксидације загрејала и запалила без спољашњег извора паљења.

Тешко запаљиве течности су развијене како би смањиле ризик од пожара. У основи, постоје четири различите врсте ових течности који се користе у хидрауличним системима.

1. Раствор полимера (гликола) и воде; Овај тип се састоји од раствора са око 40% воде и 60% полимера. Имају високу вредност индекса вискозности и вискозност расте како вода испарава. Радна температуре се креће у опсегу од 14 до 356 °C. Већина новијих синтетичких материјала за заптивање су компатибилни са растворима воде и гликола. Међутим, материјали као што су цинк, камдијум и магнезијум реагују са раствором вода-гликол и стога не треба примењивати ова уља у том случају.
2. Емулзија „вода у уљу“; Овај тип течности се састоји од око 40% воде у раствору са посебном базом уља. Одликује се малим капљицама воде потпуно окруженим уљем. Вода даје добре расхладне карактеристике течности, али има тенденцију корозивности. Стога су веће количине инхибитора корозије потребни као адитиви течности. Радна температура је у опсегу од -4 до 347 °C. Као што је случај код раствора гликола и воде, неопходно је надоместити губитке у испаравању воде додавањем нове, како би се одржавала правилна и тражена вискозност. Емулзије „вода у уљу“ су компатибилне са већином заптивки од гумених материјала који се налазе у хидрауличним системима у индустрији за прераду нафте.
3. Синтетичке течности; Овај тип је хемијски формулисан тако да инхибира сагоревање, и уопштено говорећи, има највишу температуру отпора на ватру. Типични флуиди у овој категорији су на бази фосфат естера или хлорисаног угљоводоника. Недостатак синтетичких течности укључују низак индекс вискозности, некомпатибилност са већином природне или синтетичке гуме, као и релативно високе цене.
4. Течности са високим садржајем воде; Овај тип се састоји од око 90% воде и 10% адитива. Адитиви побољшавају вискозност, својство подмазивања, штите течност од појаве бактерија и сузбијају рђање. Предности овог типа течности укључују високу отпорност на ватру, уз изванредне карактеристике хлађења и ниску цену која је за око 20% од цене минералног уља. Максималне радне температуре треба да се одржавају до 148 °C да би се спречило испаравање. Због нешто веће густине и ниже вискозности, пумпа за довод течности треба бити пројектована да притисак на улазу не буде пренизак, како не би дошло до појаве кавитације. Компатибилни су са већином гумених материјала за заптивање. [12]

4.3. Био-разградиве течности

Био-разградиве течности су еколошки прихватљиви флуиди. Такође, често коришћен назив за ове флуиде су „зелени“ флуиди. Поменуте течности могу се поделити у четири основне групе: на бази полигликола, на бази биљних (или животињских уља), полиалфаолефини и синтетички естри. Флуиди на бази полигликола имају проблем компатибилности са неким заптивачима. Флуиди на бази биљних уља не подnose дуготрајни рад на температурама изнад 70 °C. Полиалфаолефини губе вискозност након дуже употребе, а синтетички естри имају заиста доста различитих својстава, зависно о врсти. Због различитих својстава и широког спектра примене еколошких флуида, потребан је јако пажљив одабир флуида, као и адекватно одржавање система. [7]

4.4. Вода као хидраулични флуид

Због добре еколошке прихватљивости, незапаљивости и своје цене, вода може да буде добар хидраулични флуид. У поређењу са минералним уљем има још неколико битнијих предности: вискозност је нижа за 30% и практично не зависи од температуре. Затим, специфична топлота и топлотна проводност су веће, па има боље карактеристике у домену испаравања, чиме се повећава модул стишљивости. То значи да ће губити

трењем бити мањи, да има боља својства хлађења и да због крутости има боља динамичка својства. Међутим, вода као хидраулична течност има и неколико значајних недостатака. Распон радне температуре је мали, лоша подмазивност, подстиче корозију, висок притисак испаравања и има велику густину па је могућност кавитације знатно већи. Због свега тога, ако је вода радни флуид, примењују се материјали који нису стандардни у класичној хидраулици, попут керамичких или полимерних превлака и нерђајућег челика. То значајно утиче на карактеристике система и на поступке израде и одржавања. Дакле, са водом као радним флуидом добијају се битно различити хидраулични системи. У сваком случају, вода добија на важности у хидраулици, а претпоставља се да ће тај тренд и наставити у будућности. Због значаја и посебности воде у хидраулици, постоји и посебна грана хидраулике која се назива „водна хидраулика“. [1]

4.5. Специјални флуиди

Због посебних услова рада и потреба у неким применама, могу се користити специјални флуиди који се могу посматрати изван претходно наведених категорија. Пример могу бити уља за кочнице (због повећане температуре и оптерећења и потребе за високим модулом стишљивости), затим уља за аутоматске преноснике (такође због високих оптерећења и температуре). Магнетореолошки и електрореолошки флуиди (који мењају вискозност зависно о интензитету магнетног или електричног поља на коме су изложени) такође могу бити пример флуида који се понекад користи у хидраулици. [7]

5. Закључак

Развој конструкције машина и саобраћајних средстава је уско везан са развојем хидрауличних преносника снаге, или хидрауличних система. Потпуно је немогуће размишљати о конструкцији разних транспортних средстава, пољопривредних и рударских машина, преса, авиона и читавог низа других машина, а да се истовремено не размишља и о конструкцији хидрауличног система.

Након Другог светског рата развој хидраулике се знатно интензивирао, тако да је она постепено налазила примену у практично свим подручјима. Све строжи еколошки захтеви и потреба за економичним пословањем захтевају све ефикасније системе. При том је кључно да цена производа остане конкурентна. Због тога је нужен непрекидан развој. Развој хидраулике обележава еволуција свих компоненти и система у целини. Примењују се нови материјали и технологије обраде са циљем побољшања заптивања и смањења хидро-механичког трења (ради побољшања укупног степена корисности). Конструкције компоненти побољшавају се интензивним коришћењем програма за симулацију динамике флуида. Користе се електроника и микропроцесори ради бољег вођења система. Кључне технологије за које се може сматрати да ће обележити будућност хидраулике су управљање протоком, дигитални вентили и хибридни хидраулични системи.

Дакле, најважнији циљеви напретка су смањење потрошње енергије уз задржавање прихватљиве цене производа, наравно, уз поштовање еколошких прописа.

Радне течности у хидраулици представљају један од најважнијих чинилаца у читавом систему, стога је јако важно познавати величине стања и физичка и хемијска својства радних течности, као и њихове промене у зависности од режима рада. Данас постоји много типова хидрауличних флуида, који морају бити компатибилни са осталим компонентама система, како би сам систем био што ефикаснији и безбеднији по околину.

Даљи развој хидраулике прати повећање коришћења еколошких течности због све оштријих регулатива и прописа везаних на очување животне средине и сматра се да се ова пракса наставити и у будућности.

Литература

- [1] M. Galal Rabije Fluid Power Engineering, The McGraw-Hill Companies 2009.
- [2] Ravi Doddannavar, Andries Barnard, Practical Hydraulic Systems, Elsevier Science & Technology Boks, 2005.
- [3] Бранко Обровић, Механика флуида, Машински факултет у Крагујевцу, 2007.
- [4] Душан Гордић, Пренос снаге флуидом – хидраулика, Машински факултет у Крагујевцу, 2007.
- [5] Небојша Лукић, Пренос топлоте и масе – скрипта, Факултет инжењерских наука
- [6] Хидраулика, Јошко Петрић, Факултет стројарства и бродоградње, Свеучилиште у Загребу, 2012.
- [7] Владимир Савић, Уљна хидраулика, Дом штампе, Зеница, 1991.
- [8] Небојша Лукић, Приручник за термодинамику, Машински факултет у Крагујевцу, 2011.
- [9] Вања Шуштершич, Хидропреносиви снаге – скрипта, Факултет Инжењерских наука у Крагујевцу, 2015.
- [10] Милун Бабић, Светислав Стојковић, Турбомашине, теорија и математичко моделирање, Машински факултет у Крагујевцу, 1997.
- [11] Anton Hehn, Fluid Power Troubleshooting – 2nd. Ed., Marcel Dekker, New York, 1995.
- [12] Anthony Esposito, Fluid Power with applications, Stephan Helba, 1997.