

Edicija: Mehanika fluida i hidrauličke mašine

CVETKO CRNOJEVIĆ

Klasična i uljna
HIDRAULIKA

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

2013.

Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet



Edicija:

Mehanika fluida i
Hidraulične mašine

KLASIČNA I ULJNA HIDRAULIKA

Četvrto izdanje

● Autor:

Dr Cvetko Crnojević, dipl. inž. maš.

Redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

● Recenzenti:

Akademik Vladan D. Djordjević,
redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Dr Svetislav Čantrak, dipl. inž. maš.
redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

● Izdavač:

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Kraljice Marije 16, 11120 Beograd 35,
telefon: (011) 3370 350 i 3302 384, fax: (011) 3370 364

Za izdavača: Dekan prof. dr Milorad Milovančević

Glavni i odgovorni urednik: Prof. dr Aleksandar Obradović

Štampanje odobrila Komisija za izdavačku delatnost: br. 251/13 od 14.11.2013. god.
Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

● Štampa:

PLANETA PRINT

Ruzveltova 10, 11000 Beograd
tel/fax (011) 3088 129

Tiraž: 250 primeraka

© Autor i Mašinski fakultet, Beograd 1998., 2001., 2006., 2013.

Preštampavanje i fotokopiranje nije dozvoljeno. Sva prava zadržava izdavač
i autor.

Cvetko Crnojević

**KLASIČNA I ULJNA
HIDRAULIKA**

Četvrto izdanje



Mašinski fakultet
Univerziteta u Beogradu

2013.

Edicija:

Mehanika fluida i hidraulične mašine

- **Klasična i uljna hidraulika.** IV izdanje, 2013. - ova knjiga
Crnojević C.
- **Hidrodinamika.** V dopunjeno izdanje, 2012.
Čantrak S.
- **Pumpe i ventilatori - problemi, rešenja, teorija.** V izdanje, 2006.
Protić Z. Nedeljković M.
Oktobarska nagrada grada Beograda za najvrednije dostignuće u oblasti tehničkih nauka za 1992. godinu
- **Tehnika merenja.** III izdanje, 2006.
Benišek M., Nedeljković M., Kilibarda R., Gerasimović D.
- **Dinamika jednodimenzijskih strujanja fluida.** III izdanje, 2000.
Djordjević V.
- **Hidraulične turbine.** I izdanje, 1998.
Benišek M.
- **Statika i kinematika fluida.** II izdanje, 1998.
Saljnikov V.
- **Mehanika fluida - Teorija i praksa.** VII izdanje, 2001.
Čantrak S., Marjanović P., Benišek M., Pavlović M., Crnojević C.
- **Priručnik za proračun strujanja stišljivog fluida.** VII izdanje, 2005.
Pavlović D. M., Stefanović Z.

Urednici edicije:

- Prof. dr Zoran Protić
- Akademik Vladan Djordjević,
- Prof. dr Miroslav Benišek
- Prof. dr Svetislav Čantrak

Ključne reči: Mirovanje fluida, hidraulika, uljna hidraulika, jednodimenzijsko strujanje fluida, količina kretanja, kavitacija.

SADRŽAJ

	Strana
Predgovor	VI
Spisak važnijih oznaka	VIII
1. MIROVANJE FLUIDA	
1.1. Polje pritiska. Manometri	1
1.1.1. Pritisak	1
1.1.2. Osnovna jednačina hidrostatičke - Ojlerova jednačina	2
1.1.3. Hidrostatički zakon raspodele pritiska	3
1.1.4. Izobarske - ekvipritisne površi	4
1.1.5. Nivo slobodne površi tečnosti	5
1.1.6. Paskalov zakon	6
1.1.7. Proračun cevi pod pritiskom	7
1.2. Mirovanje stišljivog fluida	15
1.2.1. Jednačina stanja idealnog gasa	15
1.2.2. Jednačina stanja realnog gasa	15
1.2.3. Jednačina promene stanja	16
1.2.4. Kompresori	18
1.2.4.1. Princip rada	19
1.2.4.2. Rad idealnog kompresora	19
1.2.4.3. Teorijski rad stvarnog kompresora	20
1.2.4.4. Višestepeni kompresori	20
1.2.5. Standardna atmosfera	23
1.3. Hidro-pneumo-statika	28
1.4. Sile pritiska radnog fluida na hidrauličke i pneumatske komponente	33
1.5. Sile pritiska na ravne površi	41
1.5.1. Opšte razmatranje	41
1.5.2. Sila pritiska na ravnu površ koja je u kontaktu sa stišljivim fluidom	41
1.5.3. Sila pritiska na ravnu površ koja je u kontaktu sa nestišljivim fluidom	42
1.5.4. Sila pritiska na složeni oblik ravne površi	42
1.6. Sile pritiska na krive površi i tela koja se nalaze u tečnosti	61

II *Sadržaj*

1.6.1	Sile pritiska koje deluju na krivu površ	61
1.6.2.	Sila potiska	68
1.6.3.	Metoda ravnoteže tečnosti	78
1.7.	Relativno mirovanje tečnosti pri translaciji	84
1.7.1.	Osnovna jednačina relativnog mirovanja fluida. Polje pritiska i izobarske površi	84
1.7.2.	Sile pritiska koje deluju na ravne i krive površi	85
1.7.3.	Određivanje sila pritiska tečnosti na krive površi metodama ravnoteže tečnosti i potiska	86
1.8.	Relativno mirovanje tečnosti pri rotaciji	97
1.8.1.	Polje pritiska i izobarske površi	97
1.8.2.	Rotacija oko vertikalne ose cilindričnog rezervoara napunjenog tečnošću	98
1.8.3.	Sile pritiska na ravne i krive površi	99
1.8.4.	Sile koje deluju na telo koje se nalazi u fluidu koji relativno miruje	116
2.	HIDRAULIKA	
2.1.	Teorijske osnove jednodimenzijskih nestišljivih strujanja	119
2.1.1.	Šta je strujanje? Podele strujanja.	119
2.1.2.	Jednačine koje opisuju strujanje nestišljivog fluida	120
2.1.3	Jednačina kontinuiteta. Srednja brzina	123
2.1.4.	Energijska jednačina - Bernulijeva jednačina	124
2.1.5.	Gubici strujne energije	129
2.1.5.1.	Gubici usled trenja	132
2.1.5.1.1.	Darsijeva formula	132
2.1.5.1.2.	Fizičko tumačenje koeficijenta trenja	133
2.1.5.1.3.	Koeficijent trenja unutrašnjih laminarnih strujanja	134
	Laminarno strujanje u cevima kružnog poprečnog preseka ...	134
	Laminarno strujanje između paralelnih ploča	135
	Laminarno strujanje u cevima različitog oblika	137
2.1.5.1.4.	Određivanje koeficijenta trenja turbulentnog strujanja u cevima	138
2.1.5.1.4.1	Turbulentno strujanje u hidraulički glatkim cevima	139
	Blazijusova formula	140

Univerzalni zakon trenja u hidraulički glatkim cevima.	
Prandtlova formula	142
2.1.5.1.4.2 Turbulentno strujanje u hidraulički hrapavim cevima	142
Hidraulički potpuno hrapave cevi	143
Hidraulički hrapave cevi	144
2.1.5.1.5. Određivanje koeficijenta trenja - Moody-ev dijagram	144
2.1.5.1.6. Određivanje koeficijenta trenja iterativnim putem	147
2.1.5.1.7. Određivanje koeficijenta trenja primenom računara	148
2.1.5.1.8. Koeficijent trenja pri dozvučnom strujanju stišljivog fluida	149
2.1.5.1.9. Određivanje koeficijenta trenja pri neizotermskom strujanju	150
2.1.5.2 Gubici na lokalnim otporima	150
2.1.5.2.1. Struktura strujanja u lokalnim otporima	150
2.1.5.2.2. Gubitak energije na lokalnim otporima	153
2.1.5.2.3. Uopštena Bordina formula	154
2.1.5.2.4. Određivanje koeficijenta lokalnog otpora	156
2.1.5.2.5. Međusobni uticaj lokalnih otpora	160
2.1.6. Podela cevovoda	161
2.1.7. Ekvivalentni koeficijenti otpora cevne deonice	161
2.1.8. Strujna mašina u cevovodu	162
2.1.9. Karakteristike pumpe i cevovoda, i sprega pumpa - cevovod	163
2.1.10. Sprezanje pumpi	164
2.2. Proračun prostih cevovoda. Profili brzina	166
2.2.1. Hidraulički proračun prostog cevovoda	166
2.2.2. Hidraulička karakteristika prostog cevovoda sa rednim povezivanjem grana	166
2.2.3. Merenje brzine primenom Prandtlove sonde	177
2.3. Proračun složenih cevovoda	184
2.3.1. Hidraulički proračun složenih cevovoda	184
2.3.2. Hidraulička karakteristika složenog cevovoda sa hidraulički paralelnim granama	185
2.4. Kavitacija	213
2.4.1. Opšte o kavitaciji	213
2.4.2. Hidrodinamička kavitacija	214
2.4.3. Kavitacijska erozija	217
2.4.4. Kavitacija u pumpama	221
2.5. Stacionarna isticanja kroz male otvore i naglavke	226
2.5.1. Stacionarna isticanja kroz male otvore	226

2.5.2.	Isticanje kroz naglavke	228
2.6.	Isticanje tečnosti kroz velike otvore	234
2.6.1.	Protok tečnosti kroz veliki otvor. Zapremina tečnosti koja istekne kroz veliki otvor za vreme njegovog otvaranja	234
2.7.	Kvazistacionarna isticanja nestišljivog fluida	243
2.7.1.	Kvazistacionarna isticanja tečnosti pri punjenju ili pražnjenju rezervoara različitih oblika	243
2.7.2.	Kvazistacionarno preticanje tečnosti u spojenim sudovima	265
2.7.3.	Kvazistacionarno isticanje pri tonjenju ili izranjanju sudova	272
3.	PRIMENA ZAKONA O PROMENI KOLIČINE KRETANJA	
3.1.	Zakon o promeni količine kretanja za geometrijski složene strujne prostore	279
3.2.	Moment sila nastao promenom količine kretanja	281
3.3.	Udarac mlaza u čvrstu pregradu	298
4.	OSNOVE ULJNE HIDRAULIKE	
4.1.	Osnovna razmatranja i primena uljne hidraulike	311
4.2.	Hidraulički sistemi prenosa snage	312
4.3.	Osnove proračuna UHS	313
4.3.1.	Jednačine koje se koriste za stacionarni proračun rada UHS	313
4.3.1.1.	Bernulijeva jednačina	314
4.3.1.2.	Jednačina kontinuiteta	315
4.3.1.3.	Jednačina kretanja	316
4.3.2.	Energetski bilans UHS	316
4.3.2.1.	Opšta razmatranja	316
4.3.2.2.	Promena temperature ulja	317
4.3.2.3.	Stepen korisnosti UHS	318
4.4.	Grafičko prikazivanje uljno-hidrauličkih komponenata	320
4.5.	Razvodnici	321
4.5.1.	Sila aktiviranja razvodnika	322
4.5.2.	Hidrauličke karakteristike razvodnika	323
4.5.3.	Preračunavanje hidrauličke karakteristike	324
4.6.	Pumpe i hidromotori	325
4.6.1.	Pumpe	325
4.6.2.	Hidromotori	326
4.7.	Hidrocilindri	330

4.7.1.	Brzinsko polje u hidrocilindru	330
4.7.2.	Polje pritiska u hidrocilindru	332
4.7.3.	Faze kretanja klipa	333
4.2.4.	Proračun kretne sile hidrocilindra	334
4.7.5.	Sila trenja koja deluje na klip	335
4.7.6.	Strujanje kroz kružne procepe	339
4.7.6.1.	Koncentrični kružni procep	339
4.7.6.2.	Ekscentrični kružni procep	342
4.7.7.	Dinamika hidrocilindra	343
4.7.8.	Hidrauličko kočenje kretanja	346
4.7.9.	Proračun HC na izvijanje	350
4.7.9.1.	Elastična linija i kritična sila izvijanja	350
4.7.9.2.	Praktični proračun hidrocilindra na izvijanje	353
	Literatura	372

PREDGOVOR ČETVRTOM IZDANJU

Ovo izdanje je identično sa II i III izdanjem, s tim što je iz tehničkih razloga bilo neophodno da se izvrši novi kompjuterski prelom teksta, tom prilikom promenjen je i kvalitet slika koje su sastavni deo teksta. U ovom izdanju dopunski zadaci iz II izdanja stavljeni su da budu sastavni deo odgovarajućeg teksta.

U Beogradu, Decembar 2013.

Autor

PREDGOVOR TREĆEM IZDANJU

Tekst trećeg izdanja knjige je u potpunosti isti kao i tekst drugog izdanja.

U Beogradu, 17. mart 2006.

Autor

PREDGOVOR DRUGOM IZDANJU

U tekstu prvog izdanja knjige ispravljene su uočene štamparske greške. U drugom izdanju na kraju knjige dodato je novo poglavlje pod nazivom "Dopunski zadaci" u kome se uglavnom nalaze tipski drugačiji problemi u odnosu na prvo izdanje knjige. Da se zbog jednostavnosti tekst prvog izdanja ne bi menjao dopunski problemi su označeni sa na pr. P.1.2-11 što predstavlja nastavak postojećeg poglavlja 1.2, ili P.1.5-4/1 što znači da se problem po tretiranoj tematici nalazi iza problema P.1.5-4 u odeljku 1.5.

U Beogradu, 31. oktobar 2001.

Autor

PREDGOVOR PRVOM IZDANJU

Polazni materijal-osnovu ove knjige čini deo koji je autor pisao u sklopu knjige *Hidraulika-teorija, problemi, zadaci*, autora S. Čantraka i C. Crnojevića, koja je bila u izdanju Gradjevinske knjige iz 1990. godine. Taj postojeći tekst je presudno uticao da koncepcija ove knjige uglavnom ostane ista kao i koncepcija knjige preteče, a to znači da je posle teorijskog uvoda neke oblasti dat odgovarajući broj primera. Prema tome, ova knjiga istovremeno predstavlja i udžbenik iz dela teorije i zbirku rešenih primera iz hidraulike i uljne hidraulike. Veći deo rukopisa ove knjige bio je spreman za štampu još 1993. godine, međjutim, sticajem različitih okolnosti štampanje ove knjige je odloženo za neku drugu priliku. Ovo odlaganje mi je dalo dovoljno vremena, nadam se na račun poboljšanja kvaliteta, da se rukopis naknadno doradi i dopuni sa novim poglavljima.

U odnosu na pomenuto "prethodno" izdanje postojeći teorijski delovi su uglavnom doradjeni, dok su neki potpuno preradjeni, a takodje su dodati i novi teorijski prilozi, a sa ciljem kompletiranja teorijskih znanja iz oblasti primenjene hidraulike. Odeljak 3. koji se odnosi na primenu zakona o promeni količine kretanja je potpuno preradjjen. Dodato je i novo poglavlje 4. *Osnove uljne hidraulike*, a sa namerom da se ovom knjigom, bar što se primera tiče, u potpunosti pokrije predmet *Hidraulika i pneumatika* koji se sluša na trećoj godini studija Mašinskog fakulteta u Beogradu. U sklopu neke izložene teorijske jedinice pojedine jednačine i izrazi su zaokruženi a sa ciljem da se čitocacu i vizuelnim putem skrene pažnja na ono što je važno za primenu.

Treba napomenuti da je, izmedju ostalog, autorov cilj bio da se da što veći broj primera, odnosno problema, koji su u tekstu označeni sa problem ili P., a koji su dati posle odgovarajućih teorijskih osnova. Odabir datih primera vršen je tako da sadrži spektar klasičnih primera iz oblasti mehanike fluida, veći deo originalnih zadataka koje je autor davao duži niz godina na pismenim ispitima iz predmeta Hidraulika i pneumatika i Mehanika fluida, kao i deo primera koji predstavljaju stvarne inženjerske potrebe i probleme. Pri izboru primera autor je nastojao da oni što vernije odslikavaju realnu inženjersku hidrauličku praksu. I pored toga, dat je i izvestan broj primera (zadaci radi zadataka) koji imaju veoma retku primenu, kao što su, na pr., slučajevi prisustva većeg broja međjusobno ne mešajućih tečnosti u rezervoarima, ili neki primeri relativnog mirovanja tečnosti, a čija je svrha u korektnoj primeni teorijskih znanja na složenim slučajevima. Dati primeri u knjizi, a na osnovu dugogodišnjeg nastavno-pedagoškog iskustva, izloženi su tako što je jedan broj primera i problema rešen detaljno, drugi je sa delimičnim postupkom

rešavanja, dok je treći dat samo sa završnim rešenjem kako bi zainteresovani čitaoci, kroz samostalan rad, mogli da provere svoja stečena znanja.

Ova knjiga je prvenstveno namenjena studentima mašinskih fakulteta koji slušaju predmete: Hidraulika i pneumatika, Hidromehanika i Mehanika fluida, ili neki drugi predmet koji koristi znanja iz mehanike fluida, ali i inženjerima i stručnjacima koji u svojoj praksi imaju potrebe za primenama mehanike fluida. S obzirom da se teorijski delovi, ili, pak, izvestan broj primera teorijskog karaktera, koji su dati u knjizi uglavnom odnose na inženjerski najčešće korišćene oblasti mehanike fluida to znači da se tim delovima samo delimično pokrivaju potrebe predavanja osnovnih kurseva Mehanike fluida, Hidromehanike i Hidraulike i pneumatike.

Na kraju želim da se zahvalim svojoj supruzi Ljiljani koja je strpljivo kompjuterski obradila i složila komplikovani tekst ove knjige i uradila većinu slika. Zahvaljujem se dip. maš. inž. Nenadu Ivanoviću koji je uradio radnu verziju slika za odeljke 2.4-2.7. Zahvaljujem se kolegama i studentima koji su mi ukazali na štamparske greške i nedorečenosti u već pomenutoj knjizi *Hidraulika* koja mi je poslužila kao polazni materijal za nastajanje ove knjige. Posebnu zahvalnost dugujem recenzentima akademiku prof. dr. Vladanu Djordjeviću i prof. dr. Svetislavu Čantraku na datim sugestijama i savetima.

Autoru je potpuno jasno da su i pored uložnog truda u toku pripreme, tehničke obrade i pregleda rukopisa nedorečenosti i štamparske greške sastavni deo knjige. U tom smislu sve dobronamerne čitaoce ove knjige autor moli da ukažu na takva mesta.

Svim korisnicima, a naročito studentima, želim uspešno druženje sa ovom knjigom, i nadam se da će njima za razumevanje napisanog biti potrebno mnogo manje vremena nego što je to meni bilo potrebno za pripremu istog.

U Beogradu, 18. februara 1998.

Autor

SPISAK VAŽNIJIH OZNAKA

a	- dužina, ubrzanje
A	- površina poprečnog preseka
b	- dužina
c	- koeficijent krutosti opruge
C	- ekvivalentni koeficijent otpora cevne deonice
d, D	- prečnik
D_H	- hidraulički prečnik
E	- modul elastičnosti
F	- sila
g	- ubrzanje sile Zemljine teže ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)
G	- težina
h, H	- visina
I	- moment inercije površine
K	- koeficijent hidrauličke karakteristike cevovoda
l, L	- dužina
m	- masa
\dot{m}	- maseni protok fluida
n	- normala na površinu, broj obrtaja
p	- pritisak
P	- sila pritiska, snaga
q	- specifični zapreminski protok
r	- poluprečnik, polarna koordinata
R	- poluprečnik, gasna konstanta, sila reakcije
Re	- Rejnoldsov broj
t	- vreme, temperatura
T	- vremenski period, apsolutna temperatura
v	- brzina strujanja
V	- zapremina
\dot{V}	- zapreminski protok
W	- rad
x, y, z	- Dekartove koordinate
Y	- napor, strujna energija po jedinici mase
z_c	- koordinata težišta površine u odnosu na nivo slobodne površi tečnosti
α	- ugao, koeficijent korekcije kinetičke energije
β	- ugao, koeficijent korekcije količine kretanja

X *Sadržaj*

δ	- debljina zida, apsolutna visina hrapavosti
Δp	- pad/porast pritiska
ζ	- koeficijent lokalnog otpora
κ	- koeficijent adijabate
λ	- koeficijent trenja
μ	- koeficijent protoka
ρ	- gustina
σ	- normalni napon
τ	- tangencijalni-viskozni napon
φ	- ugaona koordinata, koeficijent brzine
ω	- ugaona brzina

Indeksi

a	- stanje atmosfere
c	- težište površine
k	- krivina, kritično stanje
m	- manometar, srednja vrednost
o	- početno stanje
P	- pumpa, klip
R	- račva
S	- srednja vrednost
T	- trenje
u	- usis
v	- ventil
w	- zid
x, y, z	- koordinatni pravac