

UNIVERZITET U BEOGRADU
SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Ljubiša S. VASOV

MEHANIKA LETA

Tom I
Aerodinamika

BEOGRAD
2025.

Ljubiša S. Vasov
MEHANIKA LETA – Tom I – Aerodinamika
I izdanje

Recenzenti: dr Boško Rašuo
dr Aleksandar Bengin
Za izdavača: dr Milorad Kilibarda, dekan
Glavni i odgovorni urednik: dr Mirjana Bugarinović
Tehnički urednik: Predrag Knežević
Korice: Branka Mrđen
Izdavač: Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet,
Vojvode Stepe 305; telefon: 011 3976 017;
faks: 011 3096 704; www.sf.bg.ac.rs
Priprema: Izdavačka delatnost Saobraćajnog fakulteta;
telefon: 011 3091 344; idsf@sf.bg.ac.rs;
(skriptarnica) sfknjige@sf.bg.ac.rs
Štampa: DONAT GRAF DOO BEOGRAD,
Vučka Milićevića, 29, 11306 Grocka;
telefon: 011 29 28 265; www.donatgraf.com
Tiraž: 150 primeraka
ISBN 978-86-7395-493-6

Na osnovu odluke Uređivačkog odbora Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu, broj 1382/2 od 17. oktobra 2024. godine, odobrava se za upotrebu u nastavi kao osnovni udžbenik na osnovnim studijama za predmet „Mehanika leta”.

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

533.6(075.8)
629.7.01(075.8)

ВАСОВ, Љубиша, 1961-

Mehanika leta. Tom 1., Aerodinamika / Ljubiša S. Vasov. - 1. izd. - Beograd : Univerzitet, Saobraćajni fakultet, 2025 (Beograd : Donat graf). - 336 str. : ilustr. ; 24 cm

Autorova slika. - Tiraž 150. - Beleška o autoru: str. [337]. - Bibliografija: str. 325-326. - Registar.

ISBN 978-86-7395-493-6

a) Механика лета b) Аеродинамика

COBISS.SR-ID 162116105

Izdavač zadržava sva prava. Reprodukcijska pojedinih delova ili celine ove publikacije nije dozvoljena.

SADRŽAJ

OZNAKE	IX
PREDGOVOR.....	XIII
1. UVOD.....	1
1.1. Kratka istorija vazduhoplovstva	1
1.2. Razvojni put aerodinamike	7
1.3. Principi leta letelica	12
1.3.1. Aerostatički princip leta	12
1.3.2. Aerodinamički princip leta	13
1.3.3. Reaktivni princip leta	15
1.3.4. Balistički princip leta	16
1.4. Značaj i podela aerodinamike	19
1.5. Rezime	21
2. ELEMENTI MEHANIKE FLUIDA.....	23
2.1. Fizičke karakteristike fluida	23
2.1.1. Pritisak	25
2.1.2. Temperatura	26
2.1.3. Gustina	26
2.1.4. Viskoznost.....	27
2.1.5. Stišljivost.....	29
2.2. Osnovni termodinamički parametri	30
2.3. Statika fluida.....	34
2.3.1. Osnovna jednačina statike fluida	34
2.3.2. Sila aerostatičkog uzgona	36
2.4. Kinematika fluida	37
2.4.1. Jednačina kontinuiteta.....	39
2.4.2. Fizičko tumačenje pojmova divergencije i rotora brzine	41
2.4.3. Pojam cirkulacije brzine	43
2.4.4. Potencijalni i prinudni vohor	45

2.5. Dinamika savršenog fluida	46
2.5.1. Zakon o količini kretanja.....	47
2.5.2. Eulerova jednačina	48
2.5.3. Bernoullijeva jednačina	49
2.5.4. Strujanje po krivolinijskoj strujnici	51
2.6. Cirkulacija i sila uzgona	54
2.6.1. Strujanje oko kružnog cilindra bez cirkulacije.....	54
2.6.2. Strujanje oko kružnog cilindra sa cirkulacijom.....	57
2.6.3. Teorema Kutta - Жуковскій.....	59
2.7. Rezime	62
3. ZEMLJINA ATMOSFERA.....	65
3.1. Karakteristike Zemljine atmosfere	65
3.2. Međunarodna standardna atmosfera.....	67
3.2.1. Geometrijska i geopotencijalna visina	67
3.3. Definisanje modela standardne atmosfere	69
3.3.1. Troposfera.....	71
3.3.2. Stratosfera.....	72
3.4. Visine po pritisku i gustini	73
3.5. Nestandardni atmosferski uslovi	75
3.6. Rezime	77
4. REŽIMI I BRZINE STRUJANJA.....	79
4.1. Brzina prostiranja zvuka.....	80
4.2. Machov broj i režimi strujanja	82
4.3. Primena Bernoullijeve jednačine.....	85
4.3.1. Strujanje nestišljivog fluida.....	85
4.3.2. Podzvučno strujanje stišljivog fluida	88
4.3.3. Koeficijent pritiska	90
4.3.4. Pretpostavka o nestišljivosti	93
4.4. Definicije i konverzija brzina	94
4.4.1. Indicirana brzina	95
4.4.2. Kalibrisana brzina.....	96
4.4.3. Ekvivalentna brzina	96
4.4.4. Stvarna brzina i Machov broj	97
4.4.5. Konverzija između kalibrisane i stvarne brzine	98
4.4.6. Konverzija između ekvivalentne i stvarne brzine	98
4.4.7. Konverzija između Machovog broja i stvarne brzine	99
4.5. Rezime	100

5. ELEMENTI GASNE DINAMIKE	103
5.1. Sonični uslov strujanja.....	103
5.2. Izentropsko strujanje u konvergentno-divergentnom mlazniku.....	106
5.3. Machov konus	111
5.4. Nastajanje udarnih talasa	112
5.5. Normalni udarni talas	114
5.5.1. Promena entropije kroz normalni udarni talas	118
5.5.2. Promena totalnog pritiska kroz normalni udarni talas	119
5.6. Kosi udarni talas	120
5.6.1. Ugao nagiba udarnog talasa i ugao skretanja vazdušne struje.....	123
5.7. Čeoni udarni talas	125
5.8. Ekspanzioni talas	126
5.9. Rezime	130
6. STRUJANJE VISKOZNOSTI FLUIDA.....	133
6.1. Reynoldsov broj.....	134
6.2. Laminarno i turbulentno strujanje	136
6.3. Granični sloj	138
6.3.1. Debljina graničnog sloja	140
6.3.2. Laminarni i turbulentni granični sloj	141
6.3.3. Odvajanje graničnog sloja	144
6.3.4. Otpor površinskog trenja	146
6.3.5. Toplotni granični sloj	148
6.4. Uzajamno dejstvo graničnog sloja i udarnih talasa	152
6.5. Rezime	153
7. AERODINAMIKA AEROPROFILA	157
7.1. Geometrijske karakteristike aeroprofila	158
7.1.1. Sistem obeležavanja aeroprofila	161
7.2. Aerodinamičke sile i aerodinamički moment	162
7.2.1. Strujanje oko aeroprofila	163
7.2.2. Definisanje napadnih uglova	164
7.2.3. Normalna komponenta sile i aerodinamički moment.....	165
7.2.4. Centar potiska	167
7.2.5. Raspodela koeficijenta pritiska po konturi aeroprofila.....	168
7.3. Nastanak cirkulacije oko aeroprofila	170
7.3.1. Cirkulacija oko aeroprofila i sila uzgona.....	172
7.3.2. Uloga viskoziteta u formiranju cirkulacije i sile uzgona.....	174
7.4. Sila aerodinamičkog otpora aeroprofila.....	175
7.4.1. Otpor površinskog trenja	175

7.4.2. Otpor pritiska.....	177
7.4.3. Profilni otpor	179
7.5. Odvajanje strujanja na aeroprofilu.....	180
7.5.1. Odvajanje strujanja na izlaznoj ivici	182
7.5.2. Odvajanje strujanja na napadnoj ivici	182
7.6. Aerodinamički koeficijenti.....	184
7.6.1. Dimenziona analiza	184
7.6.2. Koeficijenti aerodinamičkih sila i aerodinamičkog momenta.....	186
7.7. Koeficijent aerodinamičke sile uzgona.....	188
7.7.1. Kriva uzgona	189
7.7.2. Maksimalna vrednost koeficijenta uzgona	192
7.8. Koeficijent aerodinamičke sile otpora	193
7.9. Finesa aeroprofila	195
7.10. Polara aeroprofila	196
7.11. Koeficijent aerodinamičkog momenta i aerodinamički centar	200
7.11.1. Položaj aerodinamičkog centra.....	204
7.12. Koso krilo	204
7.12.1. Uspostavljanje veze između parametara kosog i ravnog krila	205
7.12.2. Strujanje oko kosog krila.....	207
7.13. Rezime.....	208
8. AERODINAMIKA AEROPROFILA U STRUJI STIŠLJIVOG FLUIDA.....	211
8.1. Prandtl-Glauertova korekcija uticaja stišljivosti	212
8.1.1. Uticaj stišljivosti na aerodinamičke karakteristike aeroprofila	214
8.2. Machov kritični broj	216
8.2.1. Kritični koeficijent pritiska.....	217
8.3. Elementi transsonične aerodinamike	219
8.3.1. Raspodela pritiska oko aeroprofila pri pojavi udarnog talasa	219
8.3.2. Strujanje oko aeroprofila u transsoničnoj oblasti brzina.....	221
8.3.3. Promena koeficijenata uzgona i otpora u transsoničnoj oblasti	222
8.3.4. Superkritični aeroprofil	223
8.3.5. Uticaj strele krila na Machov kritični broj i koeficijent otpora.....	225
8.4. Rezime.....	226
9. AERODINAMIKA KRILA KONAČNOG RAZMAHA.....	229
9.1. Geometrijske karakteristike krila.....	229
9.1.1. Srednja aerodinamička tetiva	232
9.2. Strujanje oko krila konačnog razmaha	234
9.2.1. Indukovano strujanje i indukovani otpor.....	236

9.3. Elementi teorije krila konačnog razmaha	237
9.3.1. Krilo konačnog razmaha kao vihorni sistem	237
9.3.2. Biot-Savartov zakon	239
9.3.3. Prandtlova teorija uzgonske linije	240
9.3.4. Eliptična raspodela cirkulacije	245
9.3.5. Koeficijent otpora i gradijent krive uzgona eliptičnog krila	248
9.3.6. Indukovani otpor i gradijent krive uzgona krila proizvoljnog oblika	249
9.3.7. Popravke zbog promene vitkosti krila	252
9.4. Faktori koji utiču na silu indukovanog otpora	253
9.4.1. Uticaj sile uzgona na silu indukovanog otpora	253
9.4.2. Uticaj visine leta na silu indukovanog otpora	254
9.4.3. Uticaj brzine leta na silu indukovanog otpora	255
9.4.4. Mogućnosti smanjenja indukovanog otpora	256
9.5. Strelasto krilo konačnog razmaha	257
9.5.1. Aerodinamički parametri strelastog krila konačnog razmaha	258
9.5.2. Strujanje oko krila male vitkosti	260
9.6. Uticaj oblika krila u osnovnoj ravni na pojavu gubitka uzgona	261
9.7. Uređaji za povećanje koeficijenta uzgona	264
9.7.1. Uređaji na izlaznoj ivici krila za povećanje koeficijenta uzgona	265
9.7.2. Uređaji na napadnoj ivici krila za povećanje koeficijenta uzgona	267
9.7.3. Aerodinamički efekti korišćenja uređaja za povećanje uzgona	269
9.8. Rezime	271
10. AERODINAMIKA LETELICE	275
10.1. Aerodinamička interferencija	276
10.1.1. Interferencija između krila i trupa	276
10.1.2. Interferencija između krila i horizontalnih repnih površina	280
10.2. Sila uzgona aviona	281
10.3. Aerodinamički otpor letelice	282
10.3.1. Polara aviona	284
10.4. Finesa letelice	287
10.5. Uticaj blizine zemlje na aerodinamičke karakteristike letelice	289
10.6. Rezime	291
DODATAK 1	293
Faktori konverzije između fizičkih jedinica	293
DODATAK 2	295
Osnovni elementi matematičke teorije polja	295

DODATAK 3	299
Materijalni izvod i Reynoldsova transportna teorema	299
DODATAK 4	303
Potencijalno ravansko strujanje nestišljivog fluida	303
DODATAK 5	313
Tabela Međunarodne standardne atmosfere	313
DODATAK 6	317
Linearizovana jednačina ravanskog strujanja stišljivog fluida	317
Poremećaji brzine u stišljivom i nestišljivom strujanju	320
DODATAK 7	323
Rešenje integrala za eliptičnu raspodelu cirkulacije	323
LITERATURA	325
INDEKS	327
BELEŠKA O AUTORU	337

*Jednom kada probaš leteti, hodaćeš zemljom sa očima okrenutim ka nebu,
zato što si gore bio i zato što se gore želiš vratiti.¹*

Predgovor

Mehanika leta – Tom I – Aerodinamika jeste prvi deo udžbenika iz predmeta *Mehanika leta*, koji dugi niz godina držim na Univerzitetu u Beogradu – Saobraćajnom fakultetu. Ovaj predmet je vremenom doživljavao različite promene, koje su uglavnom bile vezane za nastavni plan na Katedri za vazduhoplovna prevozna sredstva. Međutim, osnovni sadržaj i program nastave su zadržali početni oblik, koji je uspostavljen 1960-ih godina, nezavisno od neprekidnog procesa unapređenja gradiva. Osnovni razlog ovog pristupa leži u činjenici da predmet *Mehanika leta* daje bazična znanja iz oblasti vazduhoplovstva, koja su neophodna za praćenje nastave na Odseku za vazdušni saobraćaj i transport.

Tokom jednog perioda, *Mehanika leta* je bila podeljena na dva predmeta, *Mehanika leta I* u kome je obrađivana oblast aerodinamike, kao i *Mehanika leta 2* u kome je bila pokrivena oblast stacionarnih režima leta, i stabilnosti i upravljivosti letelica. Sagledavajući obim predviđenog gradiva iz ovih oblasti, koje su međusobno povezane i istovremeno se razlikuju po sadržaju, uvideo sam da postoji opravdanost štampanja osnovnog udžbenika iz predmeta *Mehanika leta* u dve knjige: *Mehanika leta – Tom I – Aerodinamika* i *Mehanika leta – Tom II – Stacionarni režimi leta i stabilnost i upravljivost letelica*.

Prema svom sadržaju, udžbenik *Mehanika leta – Tom I – Aerodinamika* obuhvata četiri celine: u prvoj su date osnove mehanike fluida kao i elementi gasne dinamike, druga celina obuhvata aerodinamiku aeroprofila, treća obrađuje aerodinamiku krila konačnog razmaha, i četvrta obrađuje aerodinamiku letelice. Ove celine se nadovezuju jedna na drugu, pri čemu bih želeo da naglasim osnovne ciljeve, kojima sam se rukovodio tokom pisanja ovog udžbenika: sticanje osnovnih znanja iz dinamike strujanja idealnih i realnih gasova, povezivanje ovih saznanja sa karakteristikama ravanskog strujanja vazduha oko aeroprofila i prostornog strujanja oko krila, i sagledavanje aerodinamičkih karakteristika vazduhoplova kao celine.

¹ *Una volta che abbiate conosciuto il volo, camminerete sulla terra guardando il cielo, perché là siete stati e là desidererete tornare. (Leonardo da Vinci)*

Navedeni ciljevi treba da uvedu čitaoce u teorijske osnove vazduhoplovne tehnike i time ih osposobe za dalje produbljivanje znanja iz ove oblasti, koja se više od jednog veka nalazi u neprekidnom razvoju. Preduslovi za uspešno razumevanje materije izložene u ovom udžbeniku, jesu određena znanja iz oblasti mehanike fluida, matematičke teorije polja, dinamike i termodinamike.

Zbog toga, pri izlaganju gradiva sam posvetio određenu pažnju delovima navedenih oblasti u obimu koji je potreban za praćenje izložene materije i formiranje jedne zaokružene celine, kroz nekoliko dodataka na kraju knjige. Pored toga, teorijske osnove koje su izložene u knjizi su proširene u odnosu na gradivo predviđeno nastavnim programom, u meri koju daje sloboda pisanja udžbenika i koja odgovara uže stručnom obrazovanju u oblasti vazduhoplovstva. U tom smislu, dati su teorijski modeli i analitički postupci prikaza različitih aerodinamičkih fenomena. Odgovarajući numerički primeri, koji su zasnovani na teorijskim modelima, nisu obrađeni u knjizi obzirom da postoji pomoćni udžbenik *Mehanika leta – praktikum* u kome su dati prateći proračuni.

Nezavisno od toga što je ovaj udžbenik namenjen studentima Odseka za vazdušni saobraćaj i transport Saobraćajnog fakulteteta, njega može koristiti i šira stručna javnost, kao i svi zainteresovani za usavršavanje znanja iz ove oblasti. Dijagrami, tabele i podaci koji su prikazani u ovom udžbeniku, kao rezultat analize različitih teorijskih modela, imaju isključivo naučni i edukativni značaj i kao takvi ne mogu biti korišćeni u praktičnim letачkim procedurama.

U tekstu, radi lakšeg praćenja materije, slike i relacije su označavane brojevima u redosledu po poglavljima i dodacima. Sve slike koje su označene brojevima su originalne, pri čemu za neke od njih su kao idejno rešenje korišćene slike iz navedene literature. Takođe, na pojedinim mestima u tekstu kurzivom su navedena imena naučnika koji se spominju u knjizi, i naglašeni su ključni pojmovi i bitni delovi gradiva važni za razumevanje izložene materije.

Pisanje ovakvog udžbenika, u kome se obrađuje širok dijapazon različitih oblasti, predstavlja veliki izazov u kome autor treba da nađe pravu meru zastupljenosti različitih tema, koje se kasnije suštinski povezuju u jednu celinu. Nezavisno od uloženog truda i mnogobrojnih provera, kako od strane samog autora tako i recenzenata, prisustvo grešaka u tekstu se praktično ne može izbeći. Zbog toga se unapred zahvaljujem čitaocima, koji ukažu na eventualne greške i time poboljšaju kvalitet sledećih izdanja. Takođe, zahvaljujem se recenzentima na uloženom trudu i korisnim savetima, koji su doprineli ukupnom kvalitetu ovog udžbeniku.