Сети се, када расправљаш о води, закључуј прво по искуству, затим према разуму.

Леонардо да Винчи (1452 – 1519)

Предговор првом издању

Курс хидраулике на Одсеку за хидротехнику Грађевинског факултета Универзитета у Београду већ двадесет година се предаје у оквиру два предмета. У предмету Хидраулика 1 изучавају се устаљена струјања, а у предмету Хидраулика 2, неустаљена. Ова књига садржи предавања из Хидраулике 1, која аутор, од школске 2001./02. године, држи студентима треће године Одсека за хидротехнику и водно-еколошко инжењерство.

С обзиром да се Хидраулика 1 у највећој мери ослања на знања из математике и механике флуида, у првом поглављу су само укратко поновљени основни појмови и законитости из наведених области, претпостављајући да су студенти већ одслушали и успешно положили одговарајуће предмете. Друго поглавље, које се бави устаљеним струјањем флуида у затвореним проводницима, обухвата, поред фундаменталних енергетских разматрања и основе теорије хидрауличких машина. У преостала два поглавља детаљно се разматра устаљено течење са слободном површином (поглавље 3) и устаљено течење кроз порозну средину (поглавље 4). У трећем поглављу обрађено је течење у каналима и око разних хидротехничких објеката, а у четвртом су дате и основе потенцијалног струјања.

Ова књига је намењена пре свега студентима Грађевинског факултета, са жељом да им олакша стицање знања из хидраулике и помогне у припреми и полагању испита. Стечена знања студенти Одсека за хидротехнику и водно-еколошко инжењерство имају прилике да користе и у другим предметима, као што су: Хидраулика 2, Хидротехничке грађевине, Регу-

лација река и др. Аутор се нада да ће ова књига корисно послужити и инжењерима хидротехнике у њиховој свакодневној пракси.

Аутор дугује захвалност асистентима Буди Зиндовићу и Ањи Ранђеловић, за помоћ у техничкој обради књиге, као и рецезентима – професорима Марку Иветићу и Миодрагу Јовановићу, за пажљив преглед текста и корисне сугестије, које су допринеле квалитету књиге.

Београд, мај 2008. године *Радомир Капор*

Предговор другом издању

У другом допуњеном и измењеном издању исправљене су све уочене штампарске и друге грешке. Додата су два нова дела: о благо променљивом, неједноликом течењу у природном водотоку и о течењу у бочном преливу.

Рецезенти, професори Миодраг Јовановић и Марко Иветић, уложили су значајан напор при прегледању другог издања. Поред пажљивог прегледа нових делова књиге поново су пажљиво прегледани и остали делови. Професор Љубодраг Савић прегледао је део о бочном преливу. Све сугестије и савети, које су добијени, сигурно су значајно побољшали квалитет другог издања.

Асистент Будо Зиндовић је и овога пута помогао у припреми књиге.

Београд, новембар 2011. године *Радомир Капор*

Предговор трећем издању

У трећем допуњеном и измењеном издању исправљене су све уочене штампарске и друге грешке. Неки делови књиге су значајно промењени, а посебно део о преливу са степенастим брзотоком. Додати су и нови делови: о потопљеном истицању испод уставе, о хидрауличким моделима објеката за евакуацију великих вода, о вртлогу и о струјању у једноликој струји, са двополом и вртлогом.

Рецезенти, професори Миодраг Јовановић и Марко Иветић, уложили су и овог пута значајан напор при прегледању трећег издања. Поред пажљивог прегледа нових делова књиге поново су пажљиво прегледани и остали делови. Професор Љубодраг Савић прегледао је делове о преливу са степенастим брзотоком и о хидрауличким моделима објеката за евакуацију великих вода. Све сугестије и савети, које су добијени, сигурно су значајно побољшали квалитет трећег издања.

Аутор ће бити захвалан читаоцима уколико му скрену пажњу на евентуалне грешке, или дају свој коментар на обраду и тумачење појединих тематских јединица. Адреса за комуникацију је `rkapor@hikom.grf.bg.ac.rs`.

Београд, август 2015. године *Радомир Капор*

Садржај

1 Основе **1**

1.1 Основни хидраулички појмови 1

1.1.1 Маса, густина, стишљив и нестишљив флуид 1

1.1.9 Основна једначина хидростатике 2

1.1.10 Мерење притиска 5

1.1.11 Сила притиска течности на равне површине 7

1.1.2 Брзина 9

1.1.3 Трајекторија 10

1.1.4 Материјални извод 11

1.1.5 Убрзање 11

1.1.6 Количина кретања 12

1.1.7 Струјница 12

1.1.8 Емисиона линија 14

1.1.12 Проток 15

1.1.13 Осредњавање брзине по времену и средња брзина у попречном пресеку . 16

1.2 Основни закони одржања 19

1.2.1 Закон одржања масе – једначина континуитета 19

1.2.2 Динамичка једначина за елементарну масу 22

1.2.3 Динамичка једначина за коначну масу . 23

2 Струјање у цевима **27**

2.1 Једначина одржања енергије – Бернулијева једначина 27

2.2 Трење при једноликом струјању 36

2.3 Одређивање отпора трења у цевима 41

2.3.1 Димензионална анализа отпора трења у цевима 41

2.3.2 Експериментална испитивања отпора трења у цевима 43
2.3.3 Промена храпавости током времена . . . 52
2.3.4 Веза Манинговог коефицијента храпавости n и апсолутне храпавости k 53
2.4 Локални губици 54
2.4.1 Губитак енергије на наглом проширењу – Бордина теорема 57
2.4.2 Губитак енергије на наглом сужењу цеви 63
2.4.3 Губитак енергије на улазу у цев 65
2.4.4 Губитак енергије на кружној кривини . 67
2.4.5 Губитак енергије на затварачу 69
2.5 Хидрауличке машине 70
2.5.1 Турбина 71
2.5.2 Пумпа 73
2.5.3 Ојлерова једначина за хидрауличке машине 75
2.5.4 Аксијалне и центрифугалне пумпе 78
2.5.5 Карактеристике цевовода и одређивање радне тачке пумпе 82
2.5.6 Карактеристике комбинованих пумпи . . 84
2.6 Кавитација 86

3 Струјање са слободном површином 93
3.1 Основни појмови 93
3.1.1 Једначина одржања енергије у струјању са слободном површином – Бернулијева једначина 96
3.2 Једнолико струјање 98
3.3 Специфична енергија пресека и критична дубина 103
3.3.1 Бурно и мирно струјање 108
3.4 Благо променљиво неједнолико струјање 111
3.4.1 Једначина за благо променљиво неједнолико струјање у каналу 113

3.4.2 Анализа решења диференцијалне једначине за благо промењљиво неједнолико струјање у каналу 116
3.4.3 Промена режима струјања дуж канала . 121
3.4.4 Једначина благо промењљивог неједноликог струјања у природном водотоку 125
3.4.5 Хидраулички скок 129
3.4.6 Линије нивоа на споју канала и непокретне воде 139
3.4.7 Линија нивоа воде у каналу узводно од каскаде 146
3.5 Нагло промењљиво неједнолико струјање 148
3.5.1 Истицање испод уставе у каналу 148
3.5.2 Преливање преко широког прага 153
3.5.3 Мостовско сужење 159
3.5.4 Сужење у каналу намењено мерењу протока 168
3.5.5 Преливање преко оштроивичног прелива 172
3.5.6 Преливи за мерење протока 174
3.5.7 Прелив практичног профила 182
3.5.8 Прелив са слапиштем 184
3.5.9 Кружни прелив 194
3.5.10 Бочни прелив 206
3.5.11 Прелив са ски одскоком 220
3.5.12 Прелив са степенастим брзотоком 225
3.5.13 Сифонски прелив 232
3.5.14 Хидраулички модели објеката за евакуацију великих вода 237

4 Струјање у порозној средини 243
4.1 Основни појмови 243
4.2 Дарсијев закон филтрације 247
4.2.1 Експериментално утврђивање вредности коефицијента филтрације 247
4.2.2 Основне једначине 249

4.2.3 Физичко тумачење Дарсијевог коефицијента K 251
4.2.4 Уопштавање Дарсијевог закона и границе његове важности 253
4.3 Примена Дарсијевог закона филтрације на једнодимензионална струјања 255
4.3.1 Струјање под притиском 255
4.3.2 Струјање са слободном површином воде 263
4.4 Потенцијално струјање 270
4.4.1 Физичко тумачење услова потенцијалног струјања 271
4.4.2 Струјна функција ψ 275
4.4.3 Потенцијал брзине ϕ 278
4.4.4 Везе између струјне функције и потенцијала брзине 279
4.4.5 Физичко тумачење функција ϕ и ψ 281
4.4.6 Слагање потенцијалних струјања 284
4.4.7 Комплексни потенцијал и комплексна брзина 286
4.4.8 Комплексни потенцијал основних струјања 288
4.4.9 Комплексни потенцијал збирних струјања 297
4.5 Филтрација кроз насуту брану 327
4.5.1 Основни појмови 327
4.5.2 Мере за смањење штетних последица филтрације кроз насуту брану 328
4.5.3 Раванско струјање са слободном површином према дрену 329
4.5.4 Раванско струјање у насутој брани са хоризонталним дреном 334
4.5.5 Раванско струјање у насутој брани са слабопропусним језгром 336
4.6 Суфозија и флуидизација 337

Литература **343**

Индекс **347**

Поглавље 1

Основе

У овом Поглављу наводе се основни појмови и законитости механике флуида, које се користе у наредним поглављима. Претпоставља се да је предмет разматрања познат, па се неке од дефиниција и доказа у извођењима дају у скраћеном облику. За разјашњавање евентуалних нејасноћа могу се користити [16, 33, 13].

1.1 Основни хидраулички појмови

1.1.1 Маса, густина, стишљив и нестишљив флуид

Маса је својство материје. *Просечна густина флуида*, ρ_{pros}, је:

$$\rho_{\text{pros}} = \frac{m}{V}, \tag{1.1}$$

где је m маса флуида, а V коначна запремина коју та маса заузима.

На сличан начин *густина флуида у тачки*, ρ, је:

$$\rho = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}V}. \tag{1.2}$$

Ако је *флуид нестишљив* густина не зависи од притиска и

онда[1] важи:

$$\boxed{\rho = \text{const}\,.} \tag{1.3}$$

Димензија за густину је:

$$[\rho] = M\,L^{-3}.$$

За воду, при температури $t = 4^\circ$ C, густина је $\rho \approx 1000\,\mathrm{kg/m^3}$. Сматра се да је вода нестишљива, осим при разматрању хидрауличког удара (неустаљеног струјања у цевима). Ваздух се сматра да је нестишљив све док брзина кретања ваздуха није већа од 1/4 брзине кретања звука у ваздуху (око 300 km/час). Да ли ће се флуид сматрати стишљивим, или не, зависи од проблема који се решава.

1.1.2 Основна једначина хидростатике

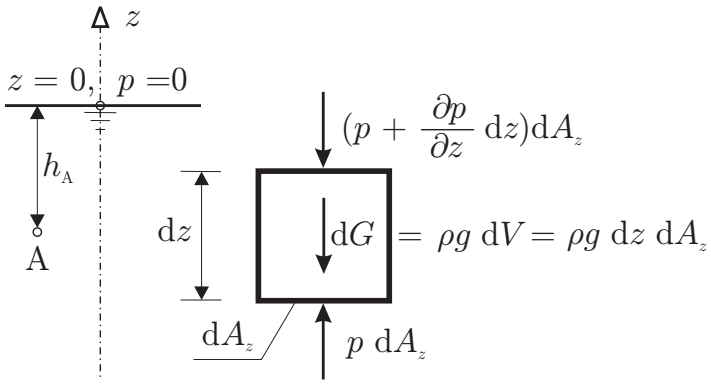
Хидростатика је део механике флуида који разматра флуиде у миру. Претпоставља се да се флуид, или суд и флуид у њему, не крећу. Због тога се између флуидних делића не могу јавити тангенцијални напони, већ само сферни део нормалног напона – *притисак*. Све површинске силе у хидростатици су нормалне на чврсте границе и не зависе од вискозности флуида.

На слици 1.1 приказана је елементарна запремина флуида (флуидни делић), која се налази на дубини h_A од слободне површине флуида, на којој је координатни почетак $z = 0$. Претпоставља се да је густина флуида константна ($\rho = \text{const}$). Пошто флуид мирује, од запреминских сила делује само тежина, у смеру супротном од позитивног смера вертикалне осе z. Из истих разлога постоје само нормални напони – *притисак* p, а тангенцијалних (смичућих) напона нема.

Динамичка једначина, за позитиван смер вертикалне осе z, је:

$$p\,\mathrm{d}A_z - \left(p + \frac{\partial p}{\partial z}\,\mathrm{d}z\right)\mathrm{d}A_z - \rho\,g\,\mathrm{d}z\,\mathrm{d}A_z = 0, \tag{1.4}$$

[1] Све једначине у тексту које су важне су уоквирене.



Слика 1.1: Силе на елементарну запремину, $\mathrm{d}V$, на дубини h_{A}, флуида који мирује.

где је g *гравитационо убрзање*, $\rho\, g\, \mathrm{d}z\, \mathrm{d}A_z$ тежина елементарне запремине флуида (запреминска сила), а $p\, \mathrm{d}A_z - [p + (\partial p/\partial z)\, \mathrm{d}z]\, \mathrm{d}A_z$ разлика површинских сила на доњу и горњу површину елементарне запремине $\mathrm{d}V$.

Из једначине (1.4) добија се:

$$\frac{\partial p}{\partial z}\, \mathrm{d}z\, \mathrm{d}A_z + \rho\, g\, \mathrm{d}z\, \mathrm{d}A_z = 0\,,$$

што дељењем са $\mathrm{d}z\, \mathrm{d}A_z$ даје:

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho\, g = 0. \tag{1.5}$$

За ортогоналне правце у хоризонталној равни, x и y, могу се такође написати динамичке једначине. Пошто у хоризонталној равни нема запреминских сила динамичке једначине су:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \tag{1.6}$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0. \tag{1.7}$$

Ако важе једначине (1.6) и (1.7) притисак, p, се не мења у хоризонталној равни, па се парцијална диференцијална је-