

OBSAH

OBSAH	3
SEZNAM SYMBOLŮ	10
I. ÚVOD DOMECHANIKY TEKUTIN	16
1. PŘEDMĚT MECHANIKY TEKUTIN	16
1.1. Historický vývoj	16
1.2. Základní členění předmětu	17
1.3. Metody řešení a základní pojmy	18
1.4. Prostory a souřadné systémy	20
a) Prostor absolutní	20
b) Prostor relativní	20
c) Souřadné systémy	20
1.5. Přehled sil působících na kapalinu	20
1) Hmotnostní (objemové) síly	21
a) Setrvačná síla	21
b) Tíhová síla	21
c) Hybnostní síla	22
2) Plošné síly	22
a) Tlaková síla	22
b) Třecí (tečná) síla	22
c) Kapilární (povrchová) síla	22
d) Kompresní (dynamická) síla	22
2. FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI KAPALIN	23
2.1. Stavové veličiny	23
a) Tlak	23
b) Teplota	23
c) Hustota a měrný objem	23
2.2. Měrná hmotnost (hustota) kapaliny	23
2.3. Stlačitelnost kapaliny	25
1) Součinitel objemové stlačitelnosti	25
2) Modul objemové pružnosti kapaliny	26
3) Rychlost zvuku	26
2.4. Teplotní roztažnost kapaliny	27
2.5. Napětí v kapalině	29
1) Napětí normálové (tlak)	29
a) Absolutní tlak	29
b) Atmosférický tlak	30
c) Napětí nasycených par	30
2) Třecí napětí, dynamická a kinematická viskozita kapaliny	30
2.6. Povrchové napětí	31
1) Kapilarita	33
2) Silové poměry na rozhraní tří látek	33
3) Chování dvou kapalin různých hustot	34

2.7.	Absorbce (pohlcování) plynu do kapaliny	35
2.8.	Tíhové zrychlení	35
2.9.	Nenewtonské kapaliny	36
	1) Kapaliny s časově nezávislými vlastnostmi	37
	2) Pseudoplastické kapaliny	37
	a) Binghamské kapaliny	37
	b) Dilatantní kapaliny	37
	3) Kapaliny s časově závislými vlastnostmi	37
	a) Tixotropní kapaliny	37
	b) Reopexní kapaliny	37
II.	HYDROSTATIKA	38
3.	ZÁKLADNÍ ZÁKONY HYDROSTATIKY	38
3.1.	Zákon o šíření tlaku v kapalině – Pascalův zákon	38
3.2.	Eulerova rovnice hydrostatiky	39
	1) Odvození obecné rovnice hydrostatiky	39
	2) Aplikace Eulerovy rovnice hydrostatiky	41
3.3.	Tlaková funkce a hladinové plochy	42
	1) Diferenciální rovnice tlakové funkce	42
	2) Hladinové plochy a tlakové hladiny	42
3.4.	Archimédův zákon	44
	1) Vztlak a plavání těles	44
	2) Rovnováha tělesa ponořeného ve dvou kapalinách	45
4.	APLIKACE ZÁKONŮ HYDROSTATICKE ROVNOVÁHY	46
4.1.	Hydrostatická rovnováha v absolutním prostoru	46
4.1.1.	Tlak v kapalině	46
	1) Nestlačitelná kapalina v klidu	46
	a) Tlakové hladiny pod dvěma kapalinami rozdílných hustot	47
	b) Určení tlakového rozdílu	48
	2) Stlačitelná kapalina v klidu	48
4.1.2.	Tlakové síly kapaliny na různé plochy	48
	1) Tlaková síla na vodorovnou rovinnou plochu	49
	2) Tlaková síla na šikmou (svislou) rovinnou plochu	49
	3) Tlakové síly na křivé plochy	52
	a) Grafičká metoda	53
	b) Složková metoda	53
	c) Metoda náhradní plochy	54
4.2.	Hydrostatická rovnováha v relativním prostoru	55
4.2.1.	Přímočarý rovnoměrně zrychlený (zpožděný) pohyb	55
	1) Přímočarý pohyb ve vodorovné rovině	55
	2) Přímočarý pohyb po šikmé rovině	56
4.2.2.	Rovnoměrně otáčivý pohyb (N+K)	58
	1) Rotační pohyb kolem svislé osy	58
	2) Rotační pohyb kolem vodorovné osy	61

III. HYDRODYNAMIKA	62
5. ZÁKLADNÍ ZÁKONY HYDRODYNAMIKY	62
5.1. Rozdělení proudění a základní pojmy	62
5.1.1. Rozdělení podle fyzikálních vlastností kapaliny	62
1) Proudění ideální (dokonalé) kapaliny	62
a) Potenciální (nevířivé) proudění	62
b) Vířivé proudění	62
2) Proudění reálné (skutečné) kapaliny	63
a) Laminární proudění	63
b) Turbulentní proudění	63
5.1.2. Rozdělení podle kinematických hledisek	63
1) Podle uspořádání proudění v prostoru	63
a) Prostorové (třírozměrné) proudění	63
b) Rovinné (dvourozměrné) proudění	63
c) Jednorozměrné proudění	63
2) Podle rovnoměrnosti rychlosti v daném profilu	63
a) Rovnoměrné proudění	63
b) Nerovnoměrné proudění	64
3) Podle závislosti proudění na čase	64
a) Ustálené (stacionární) proudění	64
b) Neustálené (nestacionární) proudění	64
5.2. Zákon o zachování hmoty – rovnice kontinuity	64
1) Odvození obecné rovnice kontinuity – pro jednorozměrné proudění	65
2) Zjednodušené rovnice kontinuity	66
a) Rovnice pro tuhé potrubí	66
b) Rovnice pro ustálené proudění	66
c) Rovnice pro ustálené proudění nestlačitelné kapaliny	66
5.3. Zákon o rovnováze sil při proudění	67
1) Silová rovnováha pro skutečnou kapalinu	67
2) Eulerova rovnice hydrodynamiky – pro ideální kapalinu	67
a) Rovnice pro jednorozměrné proudění	67
b) Rovnice pro obecné prostorové proudění	68
5.4. Zákon o zachování energie – Bernoulliovy rovnice	70
1) Odvození obecné Bernoulliovy rovnice	70
2) Bernoulliova rovnice pro ideální kapalinu	71
3) Bernoulliova rovnice pro skutečnou kapalinu	72
5.5. Věta o změně hybnosti – impulsová věta	74
1) Síla od hybnosti – obecně	74
2) Silový účinek proudu na potrubí	75
3) Silový účinek proudu na desky v klidu	76
a) Proud působící kolmo na rovinnou desku	77
b) Šikmý nátok na rovinnou desku	77
c) Proud působící na rotační plochu (koreček)	77

6.	VÝTOK KAPALIN A NESTACIONÁRNÍ PROUDĚNÍ	78
6.1.	Případy výtoku kapaliny z nádrží	78
	1) Výtok kapaliny malým otvorem	78
	a) Malý otvor ve dně nádrže	78
	b) Malý otvor na stěně nádrže	79
	2) Vyprazdňování nádoby	80
	3) Výtok velkým otvorem ve stěně nádoby	81
	4) Výtok z nádrže dlouhým potrubím	82
	a) Určení výtokové rychlosti a průtoku	83
	b) Určení absolutního tlaku před uzávěrem	84
6.2.	Neustálené proudění v potrubí	85
	1) Nepružný hydraulický ráz	85
	a) Bernoulliova rovnice pro neustálené proudění	85
	b) Druhá rovnice kontinuity	87
	c) Doba rozběhu proudu kapaliny v potrubí	87
	d) Poměrné zvýšení tlaku	88
	2) Kmitavý pohyb kapaliny mezi dvěma nádržemi	89
6.3.	Pružný hydraulický ráz	92
	1) Odvození diferenciálních rovnic rázu	92
	2) Fyzikální význam diferenciálních rovnic rázu	95
	3) Úplný – totální ráz	98
	4) Částečný – řízený ráz	99
	5) Časový průběh rázu – příklad	100
7.	HYDRAULICKÉ ODPORY V POTRUBNÍCH SYSTÉMECH	102
7.1.	Určení oblasti proudění	102
	1) Reynoldsovo číslo a hydraulický průměr	102
	2) Absolutní a relativní drsnost potrubí	104
	3) Kriterijní diagram pro určení režimu turbulentního proudění	106
7.2.	Ztráty třením po délce	107
	1) Koeficient tření – přehled vztahů	107
	2) Ztrátový součinitel tření po délce	109
7.3.	Místní – singulární ztráty	109
	1) Přehled místních ztrát	110
	2) Součinitelé místních ztrát	112
	a) Ztráty změnou průřezu	112
	b) Ztráty změnou směru	113
	c) Ztráty v uzávěrech	114
	d) Ztráty dělením (stékáním) proudu	114
7.4.	Ztrátové konstanty	116
	1) Základní ztrátové konstanty (ZZK)	117
	a) ZZK tření po délce	117
	b) ZZK místních ztrát	117
	2) Souhrnné ztrátové konstanty (SZK)	118
	3) Provozní ztrátové konstanty (PZK)	119
	4) Výsledné ztrátové konstanty (VZK)	120
	5) Princip superpozice ztrát	121

8.	POTENCIÁLNÍ PROUDĚNÍ IDEÁLNÍ KAPALINY	123
8.1.	Základní vztahy potenciálního proudění	124
	1) Úhlová rychlost částice a rotor rychlosti	124
	2) Potenciál rychlosti	124
	3) Lagrangeův integrál	125
	4) Cirkulace vírového vlákna	126
8.2.	Rovinné potenciální proudění	128
	1) Potenciál rychlosti a proudová funkce	128
	2) Laplaceova diferenciální rovnice – rovnice kontinuity	129
	3) Komplexní potenciál	130
8.3.	Základní druhy potenciálního rovinného proudění	132
	1) Paralelní proud	132
	2) Zdroj a propad	133
	3) Potenciální vír	136
8.4.	Skládání potenciálního proudění v rovině	138
	1) Paralelní proud a zdroj – rovinné polotěleso	138
	2) Dvojice zdroje a propadu – dipól	140
	3) Propad a potenciální vír	141
	4) Obtékání kruhu paralelním proudem	143
	a) Proudění bez cirkulace	143
	b) Proudění s cirkulací	144
9.	OBECNÉ PROUDĚNÍ KAPALINY	146
9.1.	Obecné proudění ideální kapaliny	146
	1) Rovnice kontinuity	146
	2) Rovnováha měrných sil	147
	3) Integrál Eulerovy rovnice hydrodynamiky po proudnici	149
	4) Integrace sil v uzavřeném prostoru	150
	5) Vztlak na rovinný osamocený profil – věta Kutta-Žukovského	151
	6) Proudění v lopatkové mříži	153
9.2.	Laminární proudění skutečné kapaliny	156
	1) Odvození rychlostního profilu v kruhovém potrubí	156
	2) Ztráty třením po délce při laminárním proudění	158
	3) Navier-Stokesova rovnice	159
9.3.	Speciální případy laminárního proudění	161
	1) Vodorovné proudění mezi rovnoběžnými stěnami	161
	2) Stékání po svislé stěně	162
	3) Proudění ve válcové mezeře	164
	4) Proudění v klínové mezeře	164
9.4.	Turbulentní proudění skutečné kapaliny	165
	1) Turbulence a Reynoldsovy rovnice	166
	2) Odvození turbulentního rychlostního profilu	167
	3) Tloušťka laminární podvrstvy	169
	4) Nerovnoměrný rychlostní profil	169
9.5.	Mezní vrstva	171
	1) Laminární a turbulentní mezní vrstva	172
	2) Odtržení mezní vrstvy – úplav	173

9.6. Obtékání těles	174
1) Třecí a tlakový odpor	174
2) Obtékání válce s cirkulací proudu – vztlková síla	177
3) Aerodynamické vlastnosti letadlových křídel	179
a) Geometrické charakteristiky profilu	179
b) Odpor, vztlak a klopný moment křídla	180
c) Polární diagram	181
10. PROUDĚNÍ V HYDRAULICKÝCH STROJÍCH	182
10.1. Proudění v relativním prostoru oběžného kola (OK)	182
1) Rychlostní diagramy pro OK	182
2) Bernoulliova rovnice pro rotující kanál	183
3) Eulerovy energetické rovnice	184
a) Eulerova turbinová rovnice	184
b) Eulerova čerpadlová rovnice	184
4) Přetlak OK vodních turbín	185
5) Moment rotujícího kanálu OK	185
10.2. Energetické stroje – vodní turbíny	186
10.2.1. Energetické a provozní parametry	187
1) Výkon a účinnost vodních turbín	187
2) Měrné energie HS	188
a) Geodetická měrná energie	188
b) Čistá (užitečná) měrná energie	188
c) Sací měrná energie	190
3) Frekvence otáčení – otáčky soustrojí	191
10.2.2. Přetlakové (reakční) vodní turbíny	192
1) Kaplanovy turbíny	192
2) Francisovy turbíny	193
10.2.3. Rovnotlakové (akční) vodní turbíny	194
10.3. Pracovní stroje – čerpadla	196
10.3.1. Hydrostatická – objemová čerpadla	197
1) Pístové čerpadlo jednočinné(PČ)	197
2) Tlakové poměry na pístu čerpadla	197
10.3.2. Hydrodynamická – lopatková čerpadla	200
1) Rozdělení lopatkových čerpadel	200
2) Měrná energie čerpadla	202
3) Ztráty a celková účinnost čerpadla	203

IV. EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM	204
11. MĚŘENÍ HYDRAULICKÝCH VELIČIN	204
11.1. Základní členění měřících metod	204
1) Měřicí přístroje	204
2) Automatický měřicí systém (AMS)	205
11.2. Způsoby měření hydraulických veličin	206
1) Měření tlaku	206
2) Měření rychlosti proudění	208
3) Měření průtoku	209
11.3. Modelové zkoušky hydraulických strojů (HS)	212
1) Schéma zkušebního okruhu	212
2) Určení základních parametrů	213
a) Přehled měřených veličin	213
b) Vypočtené (určené) parametry z měřených veličin	214
11.4. Nejistoty měření	216
1) Systematické relativní a absolutní nejistoty měřených veličin	216
2) Nejistota určení dopočítávaných veličin	217
12. TEORIE HYDRAULICKÉ PODOBNOSTI	219
12.1. Úplná mechanická podobnost	219
1) Geometrická podobnost	220
2) Kinematická podobnost	220
3) Dynamická podobnost	221
4) Odvození některých podobnostních čísel	222
12.2. Základní podobnostní čísla v oboru HS	224
1) Aplikace Navier-Stokesovy rovnice	224
2) Reynoldsovo číslo – vliv měřítka	225
3) Froudeovo číslo	225
4) Eulerovo číslo	226
5) Strouhalovo číslo	226
12.3. Kritéria podobnosti	227
1) Jednotkové parametry	227
2) Charakteristické koeficienty	228
3) Rychloběžnost hydraulických strojů	229
12.4. Charakteristiky vodních turbín	231
1) Energetické (účinnostní) charakteristiky	231
2) Návrh prototypu VT z její účinnostní charakteristiky	233
3) Čtyřkvadrantová charakteristika	233
12.5. Charakteristiky lopatkových (hydrodynamických) čerpadel	235
1) Afinní vztahy	235
2) Základní typy charakteristik lopatkových čerpadel	236
3) Modelové akumulární čerpadlo	237
LITERATURA	238