

# Obsah

	PŘEDMLUVA . . . . .	9
1	KAVITAČNÍ JEVY . . . . .	11
1.1	Podstata kavitačního jevu . . . . .	11
1.1.1	Kavitační jádro a kavitační bublina . . . . .	12
1.2	Vývoj a typy kavitací . . . . .	18
1.2.1	Kavitační parametr . . . . .	23
1.3	Vliv fyzikálních vlastností kapaliny na kavitaci . . . . .	24
1.3.1	Vliv povrchového napětí, viskozity a obsahu vzduchu . . . . .	24
1.3.2	Vliv teploty kapaliny . . . . .	27
1.4	Účinky kavitace . . . . .	29
1.4.1	Kavitace v proudovém poli . . . . .	30
1.4.2	Kavitační opotřebení materiálu . . . . .	33
1.4.3	Kavitační hluk a vibrace . . . . .	35
1.4.4	Doprovodné účinky kavitace . . . . .	36
1.5	Modelová podobnost při kavitaci . . . . .	37
	Označení v kapitole 1 . . . . .	40
	Literatura ke kapitole 1 . . . . .	42
2	KAVITACE V ČERPADLECH . . . . .	45
2.1	Hydrodynamická čerpadla . . . . .	46
2.1.1	Vznik kavitace v hydrodynamickém čerpadle . . . . .	48
2.1.1.1	Čistá sací měrná energie čerpadla . . . . .	49
2.1.1.2	Vznik kavitace na lopatkách oběžného kola . . . . .	50
2.1.1.3	Křivky počátku kavitace . . . . .	51
2.1.1.4	Spárová kavitace . . . . .	58
2.1.1.5	Vznik kavitace v jiných částech čerpadla . . . . .	58
2.1.2	Vliv kavitace na provozní parametry čerpadla . . . . .	59
2.1.2.1	Vyvinutá a kritická kavitace . . . . .	59
2.1.2.2	Kavitační charakteristiky . . . . .	62
2.1.2.3	Kavitační kritéria . . . . .	63
2.1.3	Průvodní jevy kavitace v čerpadle . . . . .	68
2.1.3.1	Tlakové pulsace . . . . .	69
2.1.3.2	Vibrace a hluk . . . . .	69
2.1.3.3	Kavitační eroze . . . . .	70
2.1.4	Návrh hydrodynamického čerpadla se zřetelem na jeho kavitační vlastnosti . . . . .	71
2.1.4.1	Volba otáček čerpadla . . . . .	71
2.1.4.2	Geometrie vstupní části čerpadla . . . . .	73

2.1.4.3	Geometrie odstředivého oběžného kola . . . . .	76
2.1.4.4	Geometrie axiálního oběžného kola . . . . .	84
2.1.4.5	Teoretický výpočet křivek počátku kavitace . . . . .	87
2.1.4.6	Empirický výpočet $\Delta y_{kr}$ . . . . .	90
2.1.4.7	Podobnost kavitace v čerpadlech . . . . .	90
2.1.4.8	Předřazené oběžné kolo . . . . .	93
2.1.5	Samonasávací schopnost čerpadla . . . . .	94
2.1.5.1	Vířivá čerpadla . . . . .	95
2.1.5.2	Skříňová samonasávací čerpadla . . . . .	97
2.1.5.3	Samonasávací čerpadla s ejektorovým účinkem . . . . .	98
2.1.6	Kavitační zkoušky a zkušební zařízení . . . . .	98
2.1.6.1	Kavitační zkušební stanice . . . . .	99
2.1.6.2	Zjišťování kavitačních charakteristik . . . . .	102
2.1.6.3	Zjišťování samonasávací schopnosti . . . . .	105
2.1.7	Dispozice a provoz čerpadel se zřetelem na kavitaci . . . . .	108
2.1.7.1	Dispozice čerpadla . . . . .	108
2.1.7.2	Vliv fyzikálních vlastností kapaliny na kavitaci v čerpadle . . . . .	113
2.1.7.3	Samoregulační kavitační provoz . . . . .	118
2.1.7.4	Poznátky z kavitačního provozu hydrodynamických čerpadel . . . . .	121
	Označení v kapitole 2.1 . . . . .	128
2.2	Proudová čerpadla . . . . .	132
	Označení v kapitole 2.2 . . . . .	135
2.3	Hydrostatická čerpadla . . . . .	136
2.3.1	Pístová čerpadla . . . . .	136
2.3.1.1	Vznik kavitace v pístových čerpadlech . . . . .	138
2.3.1.1.1	Pracovní cyklus pístových čerpadel . . . . .	138
2.3.1.1.2	Pokles tlaku v průběhu sací fáze . . . . .	140
2.3.1.1.3	Časová poloha minima tlaku na čele pístu . . . . .	145
2.3.1.1.4	Vliv objemových a tlakových pulsací na průběh měrné energie v sacím hrdle . . . . .	148
2.3.1.2	Vliv kavitace na provozní parametry čerpadla . . . . .	153
2.3.1.2.1	Vliv kavitace na křivky průběhu pracovního cyklu . . . . .	153
2.3.1.2.2	Vliv kavitace na tlakové pulsace . . . . .	155
2.3.1.3	Kavitační zkoušky a zkušební zařízení . . . . .	157
2.3.1.3.1	Kavitační zkušební stanice a metody hodnocení kavitace . . . . .	158
2.3.1.3.2	Kavitační charakteristiky . . . . .	161
2.3.1.4	Konstrukce čerpadla se zřetelem na kavitační vlastnosti . . . . .	163
2.3.1.4.1	Volba hlavních parametrů čerpadla . . . . .	163
2.3.1.4.2	Konstrukce hydraulické části pístového čerpadla . . . . .	166
2.3.1.4.3	Potrubní systém . . . . .	169
2.3.2	Rotační hydrostatická čerpadla . . . . .	171
2.3.2.1	Pracovní proces a možnosti vzniku kavitace . . . . .	171
2.3.2.2	Sací schopnost čerpadel a kavitační charakteristiky . . . . .	172
2.3.2.3	Kavitační charakteristiky . . . . .	173
	Označení v kapitole 2.3 . . . . .	178
	Literatura ke kapitole 2 . . . . .	181

3	KAVITACE VE VODNÍCH TURBÍNÁCH . . . . .	186
3.1	Kavitační jevy ve vodních turbínách a jejich účinky . . . . .	186
3.2	Podmínky vzniku kavitace v přetlakových vodních turbínách . . . . .	188
3.2.1	Kavitace profilů v lopatkové mříži . . . . .	188
3.2.2	Druhy kavitace . . . . .	188
3.2.3	Sací výška . . . . .	190
3.2.4	Kavitační součinitel . . . . .	191
3.2.5	Přepoččet kavitačního součinitele na dílo . . . . .	192
3.3	Kavitační zkoušky na modelu, zkušební zařízení a měřicí metody . . . . .	195
3.3.1	Požadavky na zkušební zařízení . . . . .	195
3.3.2	Kavitační zkušební stanice . . . . .	196
3.3.2.1	Stanice pro nízké a střední měrné energie . . . . .	196
3.3.2.2	Univerzální stanice pro čerpadlové turbíny . . . . .	197
3.3.3	Zkoušky Kaplanových a Francisových turbín . . . . .	198
3.3.4	Zkoušky čerpadlových turbín . . . . .	200
3.3.5	Sledování kavitačního poškození na modelových turbínách . . . . .	203
3.4	Sledování kavitace turbín na díle . . . . .	203
3.4.1	Kavitační jevy na díle . . . . .	203
3.4.2	Účinky kavitačních jevů na díle . . . . .	204
3.4.2.1	Energetická charakteristika na díle . . . . .	204
3.4.2.2	Hluk na díle . . . . .	204
3.4.2.3	Vibrace a tlakové pulsace na díle . . . . .	205
3.4.3	Sledování kavitačního opotřebení na díle . . . . .	205
3.4.3.1	Vliv prostředí na kavitační jevy na díle . . . . .	206
3.4.3.2	Sledování kavitační odolnosti materiálů na díle . . . . .	206
3.4.4	Kaplanovy turbíny, místa výskytu kavitačního opotřebení . . . . .	206
3.4.5	Francisovy turbíny, místa výskytu kavitačního opotřebení . . . . .	208
3.4.6	Čerpadlové turbíny a kavitační opotřebení . . . . .	210
3.4.7	Peltonovy turbíny a kavitační opotřebení . . . . .	211
3.4.8	Předpisy pro vyhodnocování velikostí kavitačního opotřebení . . . . .	212
3.5	Předcházení a opravy kavitačního poškození . . . . .	213
3.5.1	Úpravy hydraulického profilu . . . . .	214
3.5.2	Volba vhodného materiálu . . . . .	215
3.5.3	Provozní režim soustrojí . . . . .	216
3.5.4	Vpouštění vzduchu . . . . .	218
3.5.5	Katodická ochrana . . . . .	219
3.5.6	Opravy povrchu součástí . . . . .	219
3.5.6.1	Navařování . . . . .	219
3.5.6.2	Plátování . . . . .	220
3.5.6.3	Opravy povrchu jinými materiály . . . . .	220
	Označení v kapitole 3 . . . . .	221
	Literatura ke kapitole 3 . . . . .	223
4	KAVITACE V ARMATURÁCH . . . . .	227
4.1	Proudění v armaturách a součinitel $k_v$ . . . . .	229

4.2	Proudění s kavitací v armaturách . . . . .	231
	Označení v kapitole 4 . . . . .	233
	Literatura ke kapitole 4 . . . . .	234
5	KAVITACE V HYDRAULICKÝCH SYSTÉMECH . . . . .	235
5.1	Kavitační jevy v hydraulických systémech . . . . .	237
5.1.1	Průtok škrticími otvory . . . . .	238
5.1.2	Kavitace ve škrticích prvcích . . . . .	243
5.2	Kavitační zkoušky . . . . .	246
5.2.1	Kavitační zkoušky přímým paprskem kapaliny . . . . .	247
5.2.2	Kavitační zkoušky se zakřiveným paprskem kapaliny . . . . .	248
5.3	Opatření pro zmenšení kavitačních účinků . . . . .	249
	Označení v kapitole 5 . . . . .	250
	Literatura ke kapitole 5 . . . . .	251
6	KAVITAČNÍ ODOLNOST MATERIÁLU . . . . .	252
6.1	Kavitační opotřebení materiálu . . . . .	252
6.1.1	Formy působení kavitace . . . . .	252
6.1.2	Vnější vlivy na kavitační opotřebení . . . . .	255
6.1.3	Vliv materiálu na kavitační opotřebení . . . . .	258
6.1.4	Formy účinků kavitace na napadenou plochu . . . . .	258
6.2	Zkouška kavitační odolnosti materiálu . . . . .	261
6.2.1	Absolutní a relativní odolnost . . . . .	261
6.2.2	Zkušební zařízení a metody . . . . .	261
6.2.3	Podmínky srovnatelnosti zkoušek . . . . .	273
6.3	Metody vyhodnocování zkoušek . . . . .	274
6.3.1	Kritéria pro vyhodnocování kavitační odolnosti . . . . .	274
6.3.2	Matematický model dynamiky kavitačního rozrušení . . . . .	282
6.3.2.1	Mechanický a matematický model kavitačního rozrušení . . . . .	282
6.3.2.2	Metoda vyhodnocování kavitačních zkoušek . . . . .	288
6.3.2.3	Poměrná intenzita kavitačního rozrušení . . . . .	294
6.3.2.4	Intenzita kavitace a kavitačního rozrušení . . . . .	297
6.3.2.5	Matematický model pro vyvinuté kavitační rozrušení materiálu . . . . .	300
6.3.2.6	Aproximace průběhů kavitačních úbytků . . . . .	303
6.4	Zvyšování kavitační odolnosti – snižování kavitační eroze . . . . .	307
6.4.1	Volba vhodného materiálu . . . . .	307
6.4.2	Úprava povrchu . . . . .	307
6.4.3	Užití přídavného elektrického pole – katodická ochrana . . . . .	311
6.5	Vhodné kavitačně odolné materiály . . . . .	315
6.5.1	Příklady vhodných materiálů . . . . .	317
6.5.2	Vhodnost materiálu z technických a ekonomických hledisek . . . . .	321
	Označení v kapitole 6 . . . . .	326
	Literatura ke kapitole 6 . . . . .	327
	REJSTŘÍK . . . . .	332