

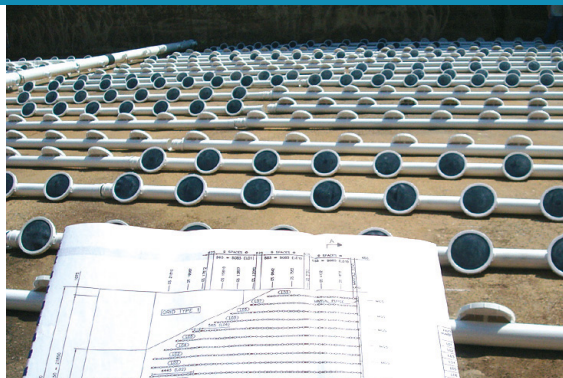
A stylized hydraulic system diagram in shades of red and grey. It features a network of pipes, two hand-operated valves with five-spoke wheels, and two pressure gauges with circular faces and needles. The background is a solid dark red color.

GRADA®

Ondřej Debreczeni

HYDRAULICKÝ RÁZ V PRAXI

Autorizovaný prodej, servis,
montáže a technicko-poradenské služby v oblasti čerpadel,
míchadel, dmychadel a aeračních zařízení pro ČOV,
vodárenství, zemědělství, energetiku, chemický a těžký průmysl



- čerpadla pro čerpání znečištěných a opadných vod
- přenosná a odvodňovací čerpadla
- čerpadla pro čerpání kalů
- čerpadla do dolů a stavebnictví
- čerpací systém s integrovanou inteligencí Concertor
- nová řada inteligentních odvodňovacích čerpadel Bibo[®]

- míchadla včetně návrhu podle původního software Flygt
- kompaktní míchadla z nerezové oceli
- pomaluběžná míchadla s nízkými provozními náklady
- adaptivní míchadla



SANITAIRE

- jemnobublinný provzdušňovací systém SANITAIRE, podle původního SW
- nízká energetická náročnost
- přesné a rovnoměrné dávkování vzduchu
- přizpůsobivost instalace podle dna nádrže
- více než 150 000 instalovaných elementů v ČR a SR

- turbodmychadla
- TurboMAX
- TurboTLX



LK PUMPSERVICE, s.r.o.

Kolbenova 898/11, Vysočany, 190 00 Praha 9

tel.: 266 032 204, 266 032 209

e-mail: lkump@lkpump.cz

www.lkpumpservice.cz

Věnováno památce B. S.

Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována a šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele. Neoprávněné užití této knihy bude **restně stíháno**.

doc. Ing. Ondřej Debreczeni, CSc.

HYDRAULICKÝ RÁZ V PRAXI

Vydala Grada Publishing, a.s.

U Průhonu 22, Praha 7

obchod@grada.cz, www.grada.cz

tel.: +420 234 264 401

jako svou 9316. publikaci

Odpovědná redaktorka Eva Škrabalová

Sazba a grafická úprava Ondřej Mikulecký

Obálka Ondřej Mikulecký

Počet stran 112

První vydání, Praha 2024

Vytiskly Tiskárny Havlíčkův Brod, a.s.

© Grada Publishing, a.s., 2024

Cover Design © Grada Publishing, a.s., 2024

Názvy produktů, firem apod. použité v knize mohou být ochrannými známkami nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků.

ISBN 978–80–271–7375–4 (ePub)

ISBN 978–80–271–7374–7 (pdf)

ISBN 978–80–271–5326–8 (print)

Poděkování:

Děkuji doc. Ing. Vladimíru Habánovi, Ph.D. z Odboru fluidního inženýrství Victora Kaplana FSI Vysokého učení technického v Brně za podnětné připomínky ke konceptu publikace.

Děkuji Ing. Pavlu Dokoupilovi, Ph.D. z Ústavu aplikované mechaniky v Brně za ochotu, se kterou mi poskytl výsledky svých laboratorních měření a konzultace k podkapitole 6.6.

Vydání knihy podpořila firma TERMOSOFT, spol. s r.o.

TERMO spol. s r.o.
soft
Partner v teplotě

OBSAH

ÚVOD	7
PŘEHLED VELIČIN.....	8
1 DOPRAVOVANÁ VODA, VLASTNOSTI a VELIČINY	10
2 POTRUBNÍ ŘADY A SÍŤ	12
3 STACIONÁRNÍ PROUDĚNÍ VODY	14
4 HYDRAULICKÝ RÁZ.....	16
4.1 Vznik a vývoj rázu	16
4.2 Energetická bilance rázu	18
4.3 Účinky a rizika rázu	20
4.4 Vzduch v potrubí.....	21
4.5 Děje v oblasti rychlých fázových přeměn	22
4.6 Praktická využitelnost rázového principu	23
4.7 Vnější zatížení působená rázem.....	24
4.7.1 Zatížení působící na potrubí a tvarovky	24
4.7.2 Zatížení působící na trubní spoje	28
4.7.3 Zatížení působící na ucpávkové a vlnovcové kompenzátory	28
4.7.4 Zatížení působící na uzávěry	28
4.7.5 Zatížení působící na zpětné uzávěry.....	28
4.8 Protirázové ochrany.....	29
4.8.1 Energetický princip protirázové ochrany.....	29
5 DIFERENCIÁLNÍ ÚLOHA RÁZU A JEJÍ ŘEŠENÍ.....	31
5.1 Vlnová rovnice	31
5.2 Základní časový interval	33
5.3 Počáteční podmínky	34
5.4 Okrajové podmínky	34
6 PRVKY HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU	35
6.1 Potrubí.....	35
6.2 Hydrodynamické čerpadlo	38
6.2.1 Parametry čerpadla.....	38
6.2.2 Úplná charakteristika hydrodynamického stroje.....	39
6.2.3 Pracovní diagram čerpadla.....	41
6.3 Čerpadlové soustrojí.....	41
6.3.1 Parametry čerpadlového soustrojí.....	42
6.3.2 Regulace otáček soustrojí	42
6.3.3 Provozní režimy soustrojí	42
6.3.4 Poruchové režimy soustrojí.....	43
6.4 Regulační uzávěry potrubí	44
6.4.1 Druhy uzávěrů.....	44
6.4.2 Parametry a charakteristiky	45
6.4.3 Požadavky na uzávěr	46
6.5 Ovládání uzávěrů	47
6.5.1 Parametry a charakteristiky	48
6.6 Zpětné uzávěry	48
6.6.1 Druhy zpětných uzávěrů.....	48

6.7	Větrníky	53
6.8	Zavzdušňovací/odvzdušňovací ventily	57
6.9	Vyrovňovací komory	59
6.10	Sekční uzávěry	61
6.11	Vzdušníky.....	61
6.12	Kalosvody	62
7	SIMULACE	63
7.1	Program DYNSSIP	63
7.2	Zadávaní úlohy a digitalizace	64
7.2.1	Potrubiční úseky	64
7.2.2	Potrubiční uzly	64
7.2.3	Čerpadlové soustrojí	64
7.2.4	Regulační uzávěr	65
7.2.5	Zpětný uzávěr.....	65
7.2.6	Větrník.....	65
7.2.7	Odvzdušňovací/zavzdušňovací ventil	65
7.2.8	Vyrovňovací komora.....	66
8	PRAKTICKÁ ŘEŠENÍ RÁZU	67
8.1	Cíl řešení.....	67
8.2	Postup řešení.....	67
8.3	Podklady řešení	67
8.3.1	Podélný profil jako klíčový podklad.....	68
8.4	Nejistota řešení	69
8.5	Dokumentace řešení.....	70
8.6	Ráz ve výtlačném řadu.....	70
8.6.1	Rázová rizika.....	71
8.6.2	Řešený příklad rázu ve výtlačném řadu.....	72
8.6.3	Význam tvaru podélného profilu výtlačného řadu.....	79
8.7	Ráz ve výtlačné vodovodní síti.....	80
8.8	Ráz ve zvyšovacím řadu	81
8.8.1	Rázová rizika.....	81
8.8.2	Řešený příklad rázu ve zvyšovacím vodovodu.....	82
8.9	Ráz v gravitačním řadu	87
8.9.1	Rázová rizika.....	88
8.9.2	Řešený příklad rázu v gravitačním řadu.....	88
8.10	Ráz v gravitačním řadu s čerpadlovou turbínou.....	93
8.10.1	Rázová rizika.....	93
8.10.2	Řešený příklad rázu v gravitačním řadu s čerpadlovou turbínou	94
8.11	Ráz v gravitační síti	95
8.12	Ráz v horkovodu	95
8.12.1	Rázová rizika.....	96
8.12.2	Řešený příklad rázu v jednoduchém horkovodu	97
8.13	Ráz ve výtlačné kanalizaci.....	99
8.14	Ráz při čerpání heterogenní suspenze.....	99
8.15	Systém GeneralSTOP	100
9	ZKOUŠKY RÁZU NA DÍLE	101
9.2	Program zkoušek	101
9.3	Protokol o zkouškách.....	101
10	DEMA.....	102
	LITERATURA.....	103
	REJSTŘÍK	104

ÚVOD

Publikace má dát projektantům, pracovníkům provozu a dalším zájemcům – názorně a jen s nezbytným minimem teorie – ucelenou představu o problematice hydraulického rázu ve vodohospodářských a energetických potrubních tlakových řadech a sítích, o způsobech vyšetřování rázu, hodnocení rázových rizik a o možnostech eliminace těchto rizik. Obsahuje informace a návody, které se jinak obtížně a zdlouhavě shánějí. Pokud není výslovně uvedeno jinak, je v publikaci pojednávána voda o teplotě $t \in (4;40)^\circ\text{C}$, říkáme jí „studená“.

Je to jmenovitě:

- voda pitná;
- surová voda podzemní a povrchová;
- voda chladicí, procesní a požární;
- mechanicky předčištěná voda kalová, odpadní, dešťová a splašková, bez hrubých nečistot.

Jako zvláštnost je pojednána horká voda v dálkových otopných systémech. Publikace se jen okrajově dotýká hydraulické dopravy pevných látek. Publikace obsahuje přímo v textu řadu praktických příkladů řešení rázu. Kromě toho je, na webové stránce uvedené v závěru, doložena výběrem řady řešení z autorovy praxe.

Při sestavování publikace vycházím ze svého dlouholetého působení v oboru, podloženého stovkami realizovaných řešení z let 1975–2023 a řadou hydraulických měření na dílech. Příklady simulací rázu byly řešeny programem DYNSSIP, o němž je dále v publikaci zmínka.

Pokud se čtenář hodlá věnovat hydraulickému rázu zevrubněji, neobejde se ovšem bez hlubšího teoretického studia, bez úzkého styku s praxí a bez spolehlivého programu pro simulaci rázu.

PŘEHLED VELIČIN

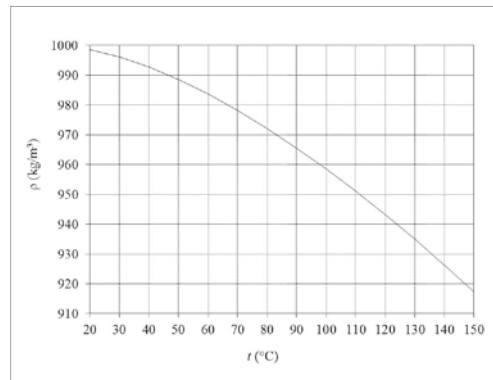
označ.:	význam:	rozměr:
a	rychlost zvuku	m/s
c	rychlost proudění vody	m/s
c_{vzd}	rychlost proudění vzduchu	m/s
C	polytropická konstanta	
$C\pm$	charakteristika (při numerickém řešení vlnové rovnice)	-
d	světlost regulační armatury	m
D	světlost potrubí	m
E	Youngův modul pružnosti materiálu	Pa
E	hydraulická energie	J
ΔE	přebytek/deficit energie	J
E_r	rázová energie	J
F	síla	N
H	dopravní výška čerpadla, čistý spád turbíny	m
δH	tolerance dopravní výšky	%
H^*	relativní dopravní výška čerpadla	1
I	moment setrvačnosti čerpadla, spojky a pohonu	kg.m ²
k	absolutní drsnost potrubí	m
K	objemový modul pružnosti zavodněného potrubí	Pa
K_t	objemový modul pružnosti prázdného potrubí	Pa
K_v	průtokový součinitel regulační armatury	m ³ /h
K_v	objemový modul pružnosti vody	Pa
L	délka potrubí	m
L_x	ekvivalentní délka potrubí	m
M	moment	N.m
M^*	relativní moment	1
\dot{m}	hmotnostní průtok	kg/s
M_k	kroučící moment	N.m
n	polytropický exponent	1
n	otáčky čerpadla	1/min
n^*	relativní otáčky čerpadla	1

n_s	specifické otáčky čerpadla	-
p	tlak	Pa
P	výkon, příkon	W
P_r	rázový výkon	W
$p_{z,L}$	délkové tlakové (energetické) ztráty	Pa
$p_{z,m}$	místní tlakové (energetické) ztráty	Pa
Q	objemový průtok	m ³ /s
δQ	tolerance objemového průtoku	%
Q^*	relativní objemový průtok	1
R	odporový součinitel	Pa.s ² /m ⁶
S	průřez potrubí	m ²
t	teplota	°C
T	doba úplného uzavření regulační armatury	s
V	objem	m ³
x	osa délek	m
Y	měrná energie čerpadla	J/kg
z	otevření uzávěru	m
z^*	relativní otevření uzávěru	1
ε	tloušťka stěny potrubí	m
η	dynamická viskozita vody	Pa.s
η	celková účinnost čerpadla	1
κ	adiabatický exponent	1
λ	součinitel délkových odporů	1
μ	doba reflexe rázové vlny	s
ν	kinematická viskozita vody	m ² /s
ζ	součinitel místních odporů	1
ϱ	hustota	kg/m ³
σ	tlak (napětí) nasycených par vody	Pa
σ	Thomův kavitační součinitel	1
τ	čas	s
$\Delta\tau$	časový interval, základní časový interval simulace	s
ω	úhlová rychlost	1/s

1 DOPRAVOVANÁ VODA, VLASTNOSTI A VELIČINY

- Teplota t (°C) ovlivňuje vlastnosti vody a související fyzikální veličiny. Pokud není výslovně uvedeno jinak, jde vždy o „studenou“ vodu s teplotou $t \in (4; 40)$ °C.

- Hustota ρ (kg/m³) závisí na teplotě, pro studenou vodu $\rho \approx 1000$ (kg/m³). Závislost hustoty vody na teplotě je znázorněna na obrázku 1.1.



Obr. 1.1 Závislost hustoty vody na teplotě $t \in (4; 40)$ °C

- Tlak p (Pa) je síla F (N) působící kolmo na plochu 1 (m²). V praxi se lze setkat i s jednotkami:

1 (bar) = 10^5 (Pa);

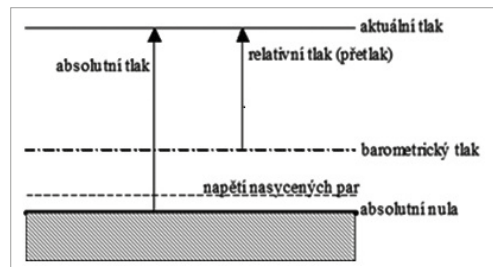
1 (at) = 1 (kp.cm⁻²) = $9,81 \cdot 10^4$ (Pa);

1(torr) = 1 (mm Hg) = $1,36 \cdot 10^2$ (Pa);

1 (mvsl) = $9.81 \cdot 10^3$ (Pa);

1 PSI = 1 (libra.inch⁻²) $\approx 6,90 \cdot 10^3$ (Pa)

Nutno rozlišit, jedná-li se o tlak absolutní p_{abs} , vždy nezáporný, nebo tlak relativní $p_{rel} = p_{abs} - p_{bar}$, jenž záporný být může (podtlak).



Obr. 1.2 Absolutní a relativní tlak

Barometrický tlak p_{bar} stále náhodně kolísá. Pro praktické účely lze používat $p_{bar} \approx 10^5$ (Pa).

Příklad: $p_{bar} = 10^5$ Pa, $p_{abs} = 5 \cdot 10^4$ Pa; $p_{rel} = -5 \cdot 10^4$ Pa (podtlak)

Není-li uvedeno jinak, je „tlakem“ rozuměn dále v textu vždy tlak relativní, označovaný veličinou p , tj. bez indexu.

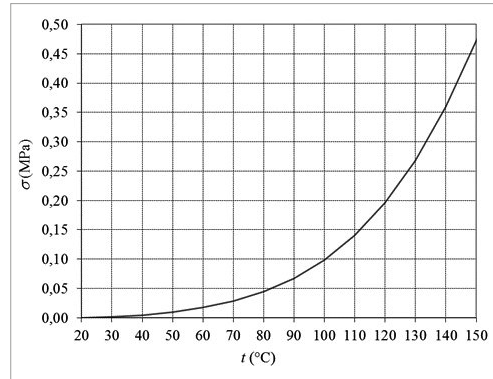
- Tlaková výška H (mvsl) je dána vztahem $H = \frac{p}{\rho \cdot g}$. Veličina je v praxi používána pro vyjádření dopravní výšky čerpadel a je výhodná pro práci s podélnými profily řadů.

- Měrná energie Y (J/kg) je dána vztahem $Y = \frac{p}{\rho} = H \cdot g$. Veličina se v praxi příliš neujala, ale vyskytuje se, mj. např. v technické dokumentaci některých výrobců čerpadel.

Příklad: studená voda, $p = 10^6$ Pa; $H = 102$ mvsl, $Y = 1000$ J/kg

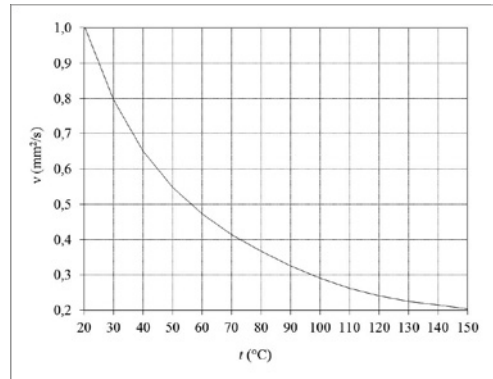
- Tlak (napětí) nasycených par vody σ (Pa) je hodnota, pod kterou nemůže v uzavřeném prostoru (potrubí) klesnout tlak, neboť voda by začala spontánně vřít a měnit se v páru. Závisí na teplotě a je to tlak absolutní. Pro studenou vodu $\sigma \approx 0$.

Příklad: voda o teplotě $t = 100$ °C $\sigma = 0,1$ MPa. Tlak nasycených par vody s vodou o teplotě 100 °C je přibližně roven hodnotě barometrického tlaku; v potrubí s vodou o teplotě 100 °C principiálně nemůže vzniknout podtlak.



Obr. 1.3 Závislost tlaku nasycených par vody na teplotě $t \in (20; 150)$ °C

- Kinematická viskozita vody ν (m^2/s). Veličina se uplatní ve vztahu pro Reynoldsovo číslo Re a tím i pro výpočet hydraulických odporů. Pro studenou vodu $\nu \approx 1.10 \cdot 10^{-6}$ (m^2/s).
- Modul objemové pružnosti vody K (Pa). Veličina je definována vztahem mezi změnou tlaku Δp a relativní změnou objemu stlačené vody $\Delta V/V$, pro rychlý (adiabatický) proces. Platí $K = -V \cdot \frac{\Delta p}{\Delta V}$. Pro studenou lze brát $K \approx 2,1$ GPa.



Obr. 1.4 Závislost viskozity vody na teplotě $t \in (20; 150)$ °C