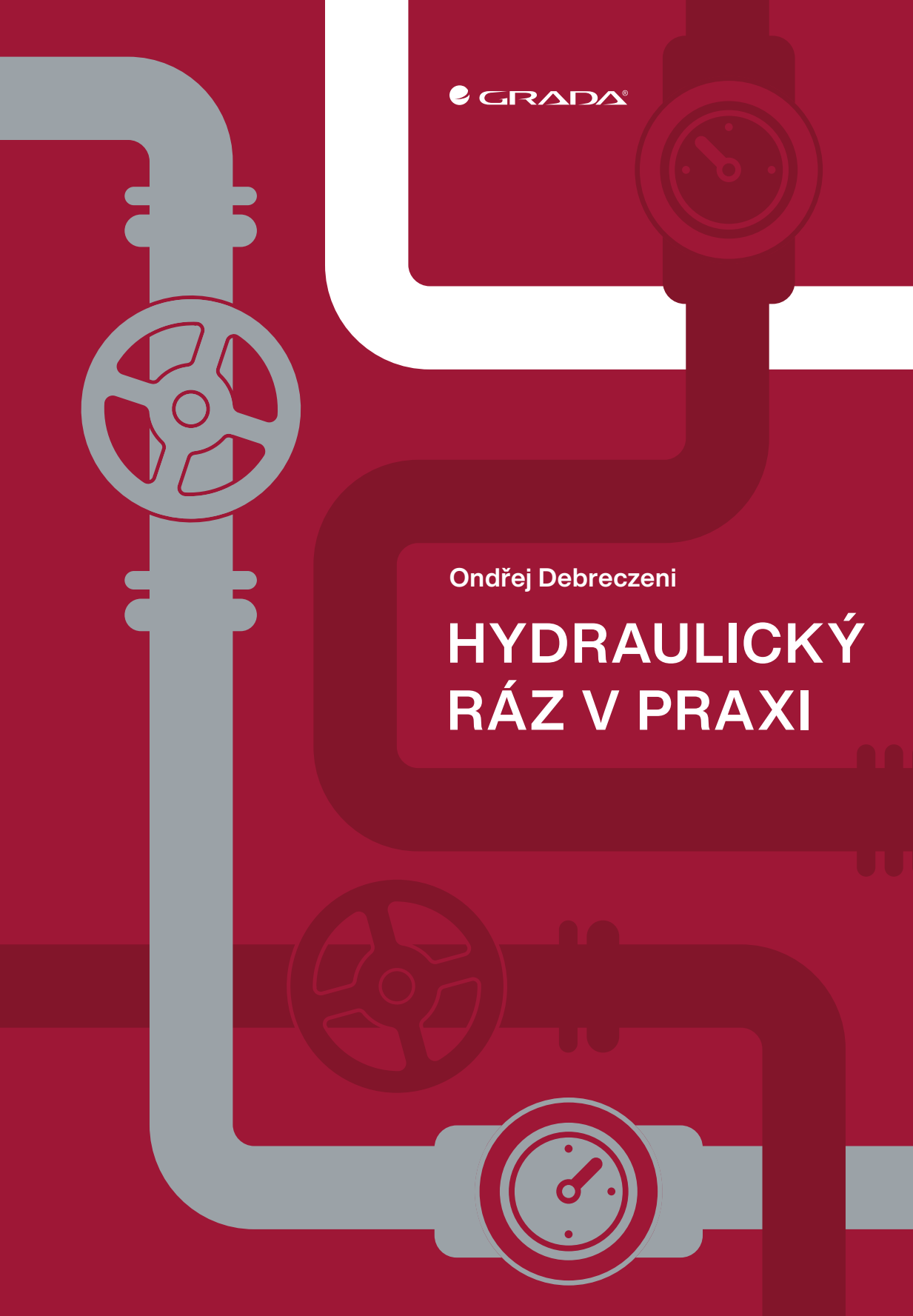


GRADA

Ondřej Debreczeni

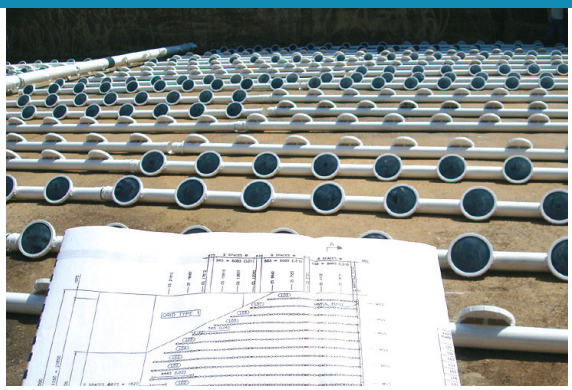
HYDRAULICKÝ RÁZ V PRAXI

pumpservice®
vodní hospodářství

Děláme vodě cestu

**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**





FLYGT

- čerpadla pro čerpání znečištěných a opadních 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$^{\alpha}$

- 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



LOWARA

SAER ELETTROPOMPE

TURBO

LK PUMPSERVICE, s.r.o.
Kolbenova 898/11, Vysočany, 190 00 Praha 9
tel.: 266 032 204, 266 032 209
e-mail: lkpump@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 **trestně 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.



OBSAH

ÚVOD **7**

PŘEHLED VELIČIN **8**

1 DOPRAVOVANÁ VODA, VLASTNOSTI a VELIČINY **10**

2 POTRUBNÍ ŘADY A SÍTĚ **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 Vyrovnávací komory ... 59
6.10 Sekční uzávěry ... 61
6.11 Vzdušníky ... 61
6.12 Kalosvody ... 62

7 SIMULACE ... 63
7.1 Program DYNSIP ... 63
7.2 Zadávání úlohy a digitalizace ... 64
7.2.1 Potrubní úseky ... 64
7.2.2 Potrubní 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 Vyrovnávací 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 $t \in (4;40)$°C, říkejme 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 DYNSIP, 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

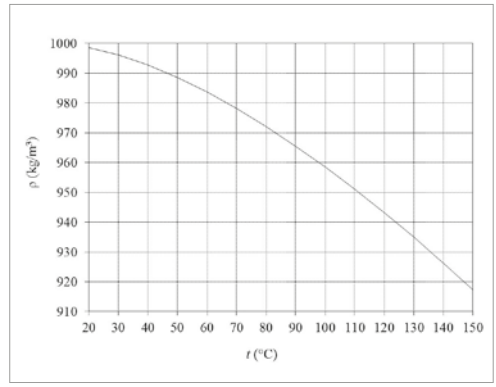
označ.:	**význam:**	**rozměr:**
a	rychlost zvuku	m/s
c	rychlost proudění vody	m/s
c_{vzd}	rychlost proudění vzduchu	m/s
C	polytropická konstanta	
$C\pm$	charakteristika (při numerickém řešení vlnové rovnice)	-
d	světlost regulační armatury	m
D	světlost potrubí	m
E	Youngův modul pružnosti materiálu	Pa
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
Kv	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	krouticí 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	^0C
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
ξ	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/m^3) závisí na teplotě, pro studenou vodu $\boldsymbol{\rho \cong 1000}$ **(kg/m^3).** Závislost hustoty vody na teplotě je znázorněna na *obrázku 1.1*.

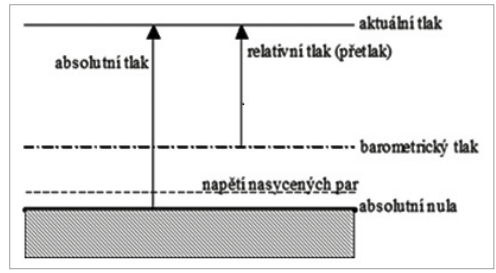


Obr. 1.1 Závislost hustoty vody na teplotě $t \in (4;40)$ °C

- Tlak p (Pa) je síla F (N) působící kolmo na plochu 1 (m^2). V praxi se lze setkat i s jednotkami:
  1 (bar) = 10^5 (Pa);
  1 (at) = 1 (kp.cm^{-2}) = 9,81.10^4 (Pa);
  1(torr) = 1 (mm Hg) = 1,36. 10^2 (Pa);
  1 (mvsl) = 9.81.10^3 (Pa);
  1 PSI = 1 (libra.inch^{-2}) ≅ 6,90. 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).

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



Obr. 1.2 Absolutní a relativní tlak

Příklad: $p_{bar} = 10^5$ Pa, $p_{abs} = 5.10^4$ Pa; $\boldsymbol{p_{rel} = -5.10^4}$ **Pa** (podtlak)

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

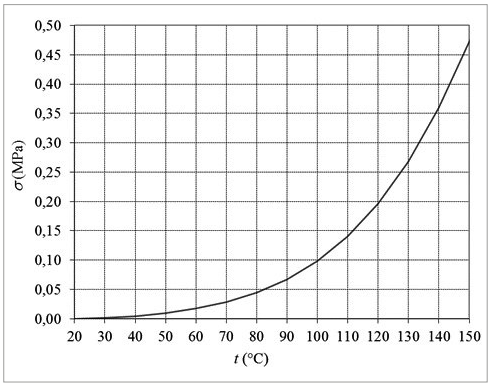
- Tlaková výška H (mvsl) je dána vztahem $\boldsymbol{H = \frac{p}{\rho . g}}$**.** Veličina je v praxi používána pro vyjádření dopravní výšky čerpadel a je výhodná pro práci s podélnými profily řadů.

- Měrná energie Y (J/kg) je dána vztahem $\boldsymbol{Y = \frac{p}{\rho} = H.g}$**.** 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 $\sigma \cong 0$.

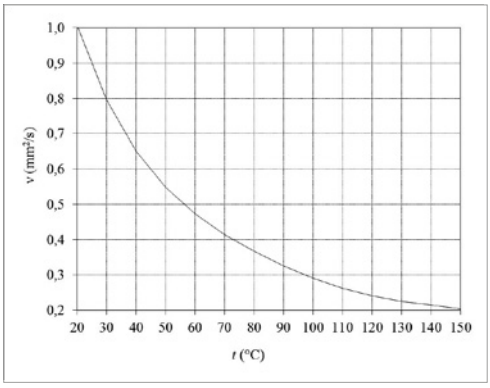
Příklad: voda o teplotě t = 100 °C ***σ* = 0,1 MPa.** Tlak nasycených par vody s vodou o teplotě 100 °C je přibližně roven hodnotě barometrického tlaku; v potrubí s vodou o teplotě 100 °C principiálně nemůže vzniknout podtlak.



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

- Kinematická viskozita vody ν (m²/s). Veličina se uplatní ve vztahu pro Reynoldsovo číslo *Re* a tím i pro výpočet hydraulických odporů. Pro studenou vodu $\boldsymbol{\nu \cong 1.10^{-6}}$ **(m²/s).**

- Modul objemové pružnosti vody *K* (Pa). Veličina je definována vztahem mezi změnou tlaku Δp a relativní změnou objemu stlačované vody ΔV/V, pro rychlý (adiabatický) proces. Platí $K = -V.\frac{\Delta p}{\Delta V}$. Pro studenou lze brát ***K* ≅ 2,1 GPa**.



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

2 POTRUBNÍ ŘADY A SÍTĚ

Potrubní řady jsou liniové stavby skládající se ze sériově řazených potrubních úseků; úseky se liší použitým trubním materiálem, jeho světlostí, hodnotou jmenovitého tlaku, stářím, apod.

Potrubní sítě mohou být větevnaté nebo okruhové a skládají se ze sériově a paralelně řazených potrubních úseků; jednotlivé úseky se liší použitým trubním materiálem, světlostí, hodnotou jmenovitého tlaku, stářím, apod. Potrubní řady a sítě mohou být (zcela nebo zčásti) podzemní, nadzemní, případně vedené v kanálech, kolektorech a potrubních mostech.

Součástí potrubních řadů a sítí jsou objekty, zejména: čerpací stanice, vodojemy, MVE, šachty s potrubními odbočkami, odběry, kalosvody, vzdušníky, sekčními a regulačními armaturami.

Zvláštní skupinou jsou oběhové sítě chladicí a topné. Jsou to uzavřené okruhové a větevnaté sítě bez odběru kapaliny, s vřazenými chladicími nebo topnými výměníky.

Základní dokumentací řadu nebo sítě pro řešení rázu jsou:

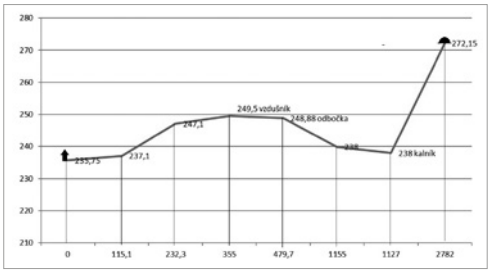
1/ půdorysná situace, nejlépe zakreslená do mapy s vrstevnicemi, je důležitá jako podklad řešení rázu ve větevnaté a okruhové potrubní síti. V měřítku jsou zakreslena všechna významná potrubí, jejich vzájemné propojení a důležité objekty na potrubní síti (*obr. 2.1*).

2/ přehledný podélný profil řadu, ze kterého jsou (pokud možno) zřejmé: výškový průběh řadu, délky potrubních úseků, druh a vlastnosti potrubí, světlosti *D* a jmenovité tlaky PN všech úseků, umístění a druh objektů na potrubí, provozní hladiny v akumulacích a recipientech, provozní průtoky *Q*



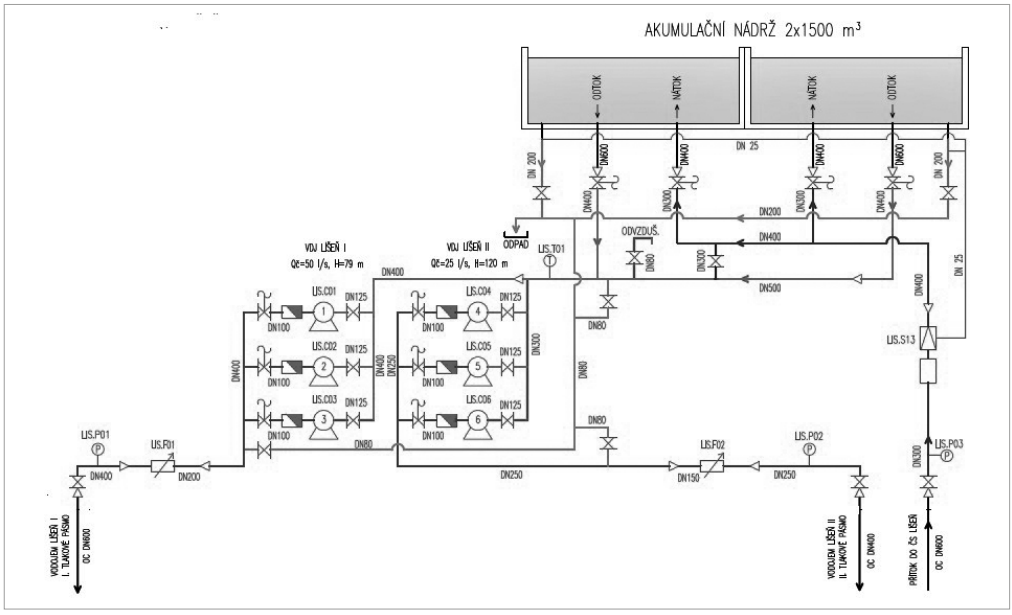
Obr. 2.1 Příklad situace jednoduché potrubní sítě

a rozložení provozních tlakových výšek po délce úseků (*obr. 2.2*). Není vždy jednoduché pro starší díla takový komplexní podklad získat.



Obr. 2.2 Příklad jednoduchého podélného profilu výtlačného řadu

3/ <u>technologická schémata objektů</u>



Obr. 2.3 Příklad technologického schématu vodárenské čerpací stanice

4/ parametry zařízení řadů a sítí (výšky hladin vodojemů a sacích jímek, charakteristiky čerpadel, světlosti, průtokové a zavírací charakteristiky regulačních armatur, technická dokumentace zpětných uzávěrů, informace o stáří a poruchovosti řadů, atp.).

5/ stavební a strojně-technologické výkresy a technické zprávy z projektové a zpětné dokumentace.

6/ dodatečné informace, které pomohou identifikovat řešený systém a jeho režimy: provozní záznamy a zkušenosti, údaje o stáří a poruchovosti (stávajících) potrubních řadů.

3 STACIONÁRNÍ PROUDĚNÍ VODY

Stacionární proudění (čili ustálené) znamená, že se objemový průtok *Q,* potažmo průtočná rychlost *c* a tlak *p* v daném místě potrubí s časem (významně) nemění.

Veličiny a vztahy:

- Objemový průtok *Q* (m^3/s);
- Hmotnostní průtok $\dot{m}$ (kg/s, t/h) je veličina používaná v energetice;
- Průtočná rychlost *c* (m/s) je předpokládána konstantní v celém průřezu potrubí podle vztahu $c = \frac{4.\ Q}{\pi.\ D^2}$; (3.1)

Příklad: Objemový průtok Q = 0,1 m^3/s, světlost potrubí D = 0,310 m; ***c* = 1,33 m/s**;

- Reynoldsovo číslo *Re* (1) je dáno vztahem $Re = \frac{c.\ D}{\nu}$; (3.2)

Příklad: Rychlost proudění c = 1,33 m/s, světlost potrubí D = 0,310 m, kinematická viskozita vody $\nu = 1.10^{-6}\ m^2/s$; ***Re* = 3,75.10^5.**

- Součinitel délkových odporů λ (1). Pro výpočet λ je téměř univerzálně vhodná oblíbená rovnice White-Colebrookova (explicitní úprava původně implicitní rovnice)

$$\lambda = \left(\frac{1}{\left(2.log_{10}\frac{k}{D} - 1{,}13874\right)^8} + \frac{0{,}00785.\nu.D}{Q} \right)^{0{,}25} \quad . \quad (3.3)$$

Příklad: Objemový průtok Q = 0,1 m^3/s, světlost potrubí D = 0,310 m, kinematická viskozita vody $\nu = 1.10^{-6}\ m^2/s$, absolutní drsnost potrubí $k = 0{,}002$ m; $\lambda = \mathbf{0{,}033}$.

Při velmi nízké průtočné rychlosti *c*, přesněji v laminární oblasti (*Re* < 1200), která je ale pro hydraulický ráz, kdy průtok v potrubí běžně klesá k nule a obrací se i jeho smysl, aktuální, platí Poisselův vztah $\lambda = \frac{64}{Re}$. (3.4)

Příklad: Rychlost proudění c = 0,003 m/s, světlost potrubí D = 0,310 m, kinematická viskozita vody $\nu = 1.10^{-6}\ m^2/s$; ***Re* = 845, λ = 0,076** (výpočet součinitele tření White-Colebrookovou formulí by zde vedl k výsledku λ = 0,098).

- Délková ztráta tlaku $p_{z,L}$ v potrubí světlosti D a délky L se určí pomocí Nikuradzeho vztahu

$$p_{z,L} = \frac{8.\rho.\ \lambda.L.\ Q^2}{\pi^2.\ D^5} \quad (3.5)$$

Jak ze vztahu (3.5) také vyplývá, významný vliv na hodnotu délkových ztrát má nepřesnost v zadání skutečné světlosti potrubí *D* (která zde vystupuje v 5. mocnině).

Příklad: Součinitel délkových odporů λ = 0,033, délka potrubí *L* = 1000 m, objemový průtok *Q* = 0,1 m^3/s. Světlost potrubí DN300 je zadána:
a/ skutečná *D* = 0,310 m; $\boldsymbol{p_{z,L}}$ **= 93 kPa**.
b/ jmenovitá *D* = 0,300 m; $\boldsymbol{p_{z,L}}$ **= 110 kPa**.

- Součinitel místních odporů ξ (1). Součinitele jsou tabelovány v literatuře, vztahují se ke vstupní světlosti *d* daného místního odporu (např. trubní redukce). K určení místních odporů $p_{z,m}$ tlaku lze použít vztah. $p_{z,m} = \frac{8.\rho.\ \xi.\ Q^2}{\pi^2.\ d^4}$ (3.6)

Obvyklé je místní ztráty (odpory) zahrnout sumárně určitým, odborně odhadnutým podílem, do ztrát délkových jako „ekvivalentní délky“, nebo, pro výpočty hydraulického rázu vhodněji, zadáním přiměřeně větší drsnosti *k* potrubí.

- Rovnice zachování energie pro stacionární proudění (Bernoulliova rovnice)

$$\frac{c_1^2.\rho_1}{2} + p_1 + H_1.\rho_1.g = \frac{c_2^2.\rho_2}{2} + p_2 + H_2.\rho_2.g + p_{z,1-2}. \quad (3.7)$$

- Rovnice zachování hmoty pro stacionární proudění (rovnice kontinuity)

$$c_1.\rho_1.\frac{\pi.D_1^2}{4} = c_2.\rho_2.\frac{\pi.D_2^2}{4}, \quad (3.8)$$

což pro model nestlačitelné vody *($\rho_1 = \rho_2$)* vede ke zjednodušení

$$c_1 . D_1^2 = c_2 . D_2^2. \quad (3.9)$$

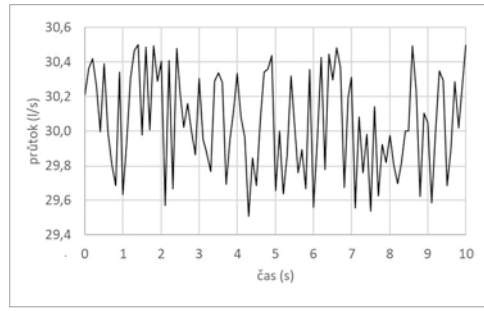
4 HYDRAULICKÝ RÁZ

4.1 VZNIK A VÝVOJ RÁZU

Nestacionární proudění (čili neustálené) znamená, že se objemový průtok *Q,* potažmo průtočná rychlost *c* a tlak *p* v daném místě potrubí s časem významně mění.

Nestacionární proudění se vyvine z ustáleného proudění nebo klidu zejména vlivem:
- manipulace s uzávěry v objektech a na potrubí;
- spouštění, zastavování, poruchového výpadku a regulace čerpadel a turbín;
- zavodňování, odvzdušňování a odkalování potrubí;
- samovolného pohybu vzduchových „pytlů“ v částečně zavzdušněném potrubí;
- prasknutí potrubí.

Hydraulický ráz je synonymem pro „nestacionární proudění pružného média v pružném potrubí“. Protože médium (voda) a potrubí jsou vždy pružné, a protože každé proudění je do určité míry vždy nestacionární (*obr. 4.1*) je vlastně každé proudění v potrubí „hydraulickým rázem“ a záleží jen na tom, co ještě z praktického hlediska hodláme za „ustálenost“ považovat.

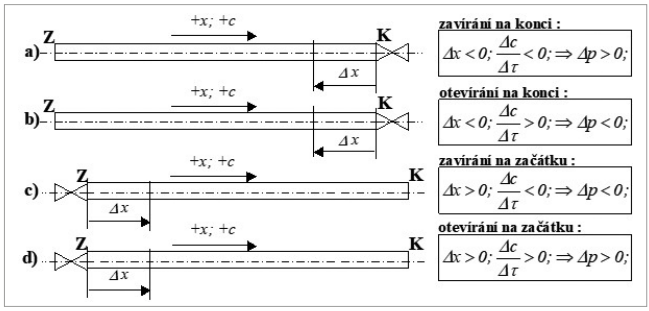


Obr. 4.1 Příklad záznamu „ustáleného“ průtoku čerpadlem

1/ Vyjděme nejprve ze zjednodušující představy neustáleného proudění nestlačitelného média v nepružném potrubí konstantní světlosti *D*, kdy se kapalina v potrubí chová jako „tuhé těleso“. Rychlost zvuku v potrubí a → ∞. Rychlost kapaliny *c* se mění s časem, ale je v daném okamžiku v celé délce potrubí shodná. Nejedná se o hydraulický ráz, ale „oscilační proudění“ (Haindl [1]). Platí (Newtonův zákon) $F = m.\frac{\Delta c}{\Delta \tau}$. (4.1)

Setrvačná síla je rovna součinu hmoty média a zrychlení sloupce média v potrubí. V potrubí délky Δx, vnitřního průřezu S, kterým proudí médium o hustotě ρ měnicí se rychlostí c, nás bude zajímat diference tlaku Δp (kladná, záporná). Ze vztahu (4.1) lze odvodit $S.\Delta p = S.\rho.\Delta x.\frac{\Delta c}{\Delta \tau} \Rightarrow \Delta p = \rho.\Delta x.\frac{\Delta c}{\Delta \tau}$. (4.2)

Zda je diference tlaku Δp kladná, nebo záporná, závisí na tom, zda se průtok otevírá ($\Delta c > 0$) nebo uzavírá ($\Delta c < 0$) a zda původce změny rychlosti Δc (uzávěr, čerpadlo, turbína) je na začátku (pro Z: $\Delta x > 0$) nebo na konci (pro K: $\Delta x < 0$) potrubí.



Obr. 4.2 Vznik nestacionární diference tlaku

Oscilačnímu proudění se blíží hydraulický ráz v potrubních systémech s vyrovnávacími komorami nebo velkými větrníky (což lze prokázat měřením nebo matematickou simulací).

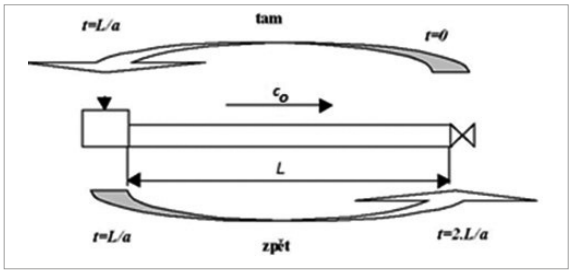
2/ Přejděme nyní z nepružného systému na pružný (z oscilačního proudění na hydraulický ráz):

Nestacionární rychlost *c* je vlivem pružnosti v daném okamžiku pro každý průřez potrubí jiná.

Pro uplatnění vlivu pružnosti lze vyjít ze vztahu (4.2) pro dokonale tuhé prostředí a nahradit přírůstek délky Δ*x* součinem rychlosti zvuku *a* (rychlost zvuku reprezentuje vliv pružnosti) a přírůstku času Δτ. Platí $\Delta x = a.\Delta\tau;\ \Rightarrow\ \Delta p = \rho.a.\Delta\tau.\frac{\Delta c}{\Delta\tau};\Rightarrow \boldsymbol{\Delta p = \rho.a.\Delta c}$ (4.3) což je známý Žukovského vztah, jeden z klíčových vztahů teorie hydraulického rázu.

Přírůstek tlaku (kladný nebo záporný) je roven součinu hustoty kapaliny, rychlosti zvuku a (kladného nebo záporného) přírůstku rychlosti sloupce kapaliny. Skutečnosti ilustrované *obr. 4.2* pro „tuhé těleso“, platí i pro hydraulický ráz.

Zdá se, že ve vztahu (4.3), na rozdíl od „nepružného“ vztahu (4.2) již nevystupují ani délkový přírůstek *Δx* (čili délka *L)*, ani zrychlení sloupce kapaliny *Δc/Δ*τ**.** Vystupují „skrytě“. Vztah (4.3) totiž platí právě jen pro „totální ráz“.



Obr. 4.3 K objasnění pojmu „totální ráz“

Z nádrže vlevo proudí kapalina gravitací potrubím délky *L* přes otevřenou armaturu vpravo do volné atmosféry ustálenou rychlostí c_0. V okamžiku $\tau = 0$ je zahájeno zavírání armatury; rázová vlna se šíří rychlostí zvuku *a* k nádrži, kam dospěje v čase $\tau = L/a$. Odrazí se od hladiny a vrací se zpět ke klapce, kam dorazí v čase $\tau = 2.\, L/a$ (to je „doba reflexe", označená μ). Jestliže uzavírání armatury už mezitím skončilo, jedná se o totální ráz. Podmínkou vzniku totálního rázu je tedy platnost vztahu $\mu \geq T$, (4.4)

kde *T* je doba, po kterou trvá souvislá změna průtoku (vlivem manipulace s uzávěrem, čerpadlem, vlivem poruchy apod.). Totální ráz znamená limitní (kladný nebo záporný) přírůstek tlaku, dalším zkracováním doby *T* se přírůstek tlaku prakticky nemění. Pokud je manipulace s uzávěrem pomalejší, nejedná se o totální, ale o nepřímý ráz, kdy (kladná nebo záporná) diference tlaku je mírnější, protože dochází k interferenci přímých a odražených rázových vln.

Příklad: gravitační vodovod, *L* = 5000 m, c_0 = 1 m/s, a = 1000 m/s. K uzavření koncového uzávěru dojde a) za méně než 10 s, b) přesně za 10 s, c) za více než 10 s; **v případech a, b) se jedná o totální ráz, Δp = 1 MPa, v případě c) se jedná o nepřímý ráz, Δp < 1 MPa.**

Z místa vzniku rázu se všemi volnými směry šíří rychlostí zvuku *a* rázové vlny, odrážejí se od rozhraní (volné hladiny, uzavřené konce potrubí, větvení), vracejí se a vzájemně interferují. Hydraulický ráz postupně zasáhne celý řad a projevuje se pulzacemi průtoku a tlaku, které jsou vlivem hydraulických (správněji energetických) odporů postupně tlumeny. Ustane-li prvotní příčina změny rychlosti *c*, přechází ráz postupně do nového režimu ustáleného proudění, nebo do klidu a zaniká.

Viz ukázku „**JAK_VZNIKÁ_RÁZ.xlsx**" na stránce (*https://debreczeni.webnode.cz/*)

4.2 ENERGETICKÁ BILANCE RÁZU

Během rázu dochází v potrubí k opakované přeměně energií: kinetické, tlakové, potenciální polohové a potenciální elastické. Nevratná je přeměna kinetické energie v teplo vlivem energetických odporů, která vede k postupnému přechodu rázu do nového ustáleného režimu, nebo do klidu a tím k jeho zániku.

Hydraulický ráz je provázen přechodným přebytkem event. deficitem hydraulické energie a to v okamžiku jeho vzniku přebytkem/deficitem lokálním. Lze definovat:

1) příčinu rázu, která může být záměrná (např. uzavírání průtoku šoupátkem, vypnutí čerpadla) nebo může být náhodná (např. poruchový výpadek čerpadla);
2) místo vzniku rázu, např. čerpací stanice na začátku výtlačného řadu;
3) historii vzniku rázu, obvykle historii (tj. časový průběh) měnícího se průtoku v místě vzniku rázu.

Při výpadku čerpadla na začátku potrubí dochází k deficitu hydraulické rázové energie ($E_r < 0$) $E_r = \int_{c0}^{0} m.c.dc = \rho.L.S.\int_{c0}^{0} c.dc = \rho.L.\int_{Q0}^{0} Q.dQ$, (4.5)

kde m je vodní hmota v řadu, c rychlost proudění, hustota vody, L délka řadu, S průřez potrubí, Q objemový průtok. Při úplném zastavení vodního sloupce z rychlosti c_0 je hodnota zbrzděné kinetické energie $E_r = -\rho.L.\frac{\pi.D^2}{4}.\frac{c_0^2}{2} = -\rho.L.\frac{Q_0^2}{2}$. (4.6)

Podobně při zavírání na konci potrubí dochází k přebytku hydraulické energie ($E_r > 0$). $E_r = +\rho.L.\frac{\pi.D^2}{4}.\frac{c_0^2}{2} = +\rho.L.\frac{Q_0^2}{2}$. (4.7)

Rázová energie není zdánlivě velká, ale uplatní-li se v krátkém časovém intervalu $\Delta\tau$, může být lokální účinek destruktivní, neboť rozhodující není sama energie, ale okamžitý výkon rázu P_r. Mechanický účinek rázu je přímo úměrný přebytku/deficitu hydraulické energie $\pm E_r$ a nepřímo úměrný době trvání rázového šoku $\Delta\tau$ $P_r = \frac{\pm E_r}{\Delta\tau}$, (4.8)

Příklad: výtlačný vodovod, D = 0,3 m, L = 5000 m, c_0 = 1 m/s. Havarijní výpadek, čerpadlo se zastaví (zpětná klapka uzavře) za 0,5 s; $E_r < 0$; E_r = **-1,77.10^5 J**, P_r = **-354 kW.**

Příklad: gravitační vodovod, D = 0,3 m, L = 5000 m, c_0 = 1 m/s. K uzavření koncového uzávěru dojde a) za 30 s, b) za 3 s; $E_r > 0$; E_r = **1,77.10^5 J**, $P_{r,a}$ = **+6 kW**, $P_{r,b}$ = **+60 kW.**

Případ je zjednodušen, je zanedbána pružnost systému, pro tuto úvahu nepodstatná; v uvedených příkladech se předpokládá (obtížně dosažitelná) lineární změna rychlosti proudění v čase a tím i konstantní hodnota (průměrného) rázového výkonu po celou dobu změny.

Vážení čtenáři, právě jste dočetli ukázku z knihy ***Hydraulický ráz v praxi*.**
Pokud se Vám ukázka líbila, na našem webu si můžete zakoupit celou knihu.