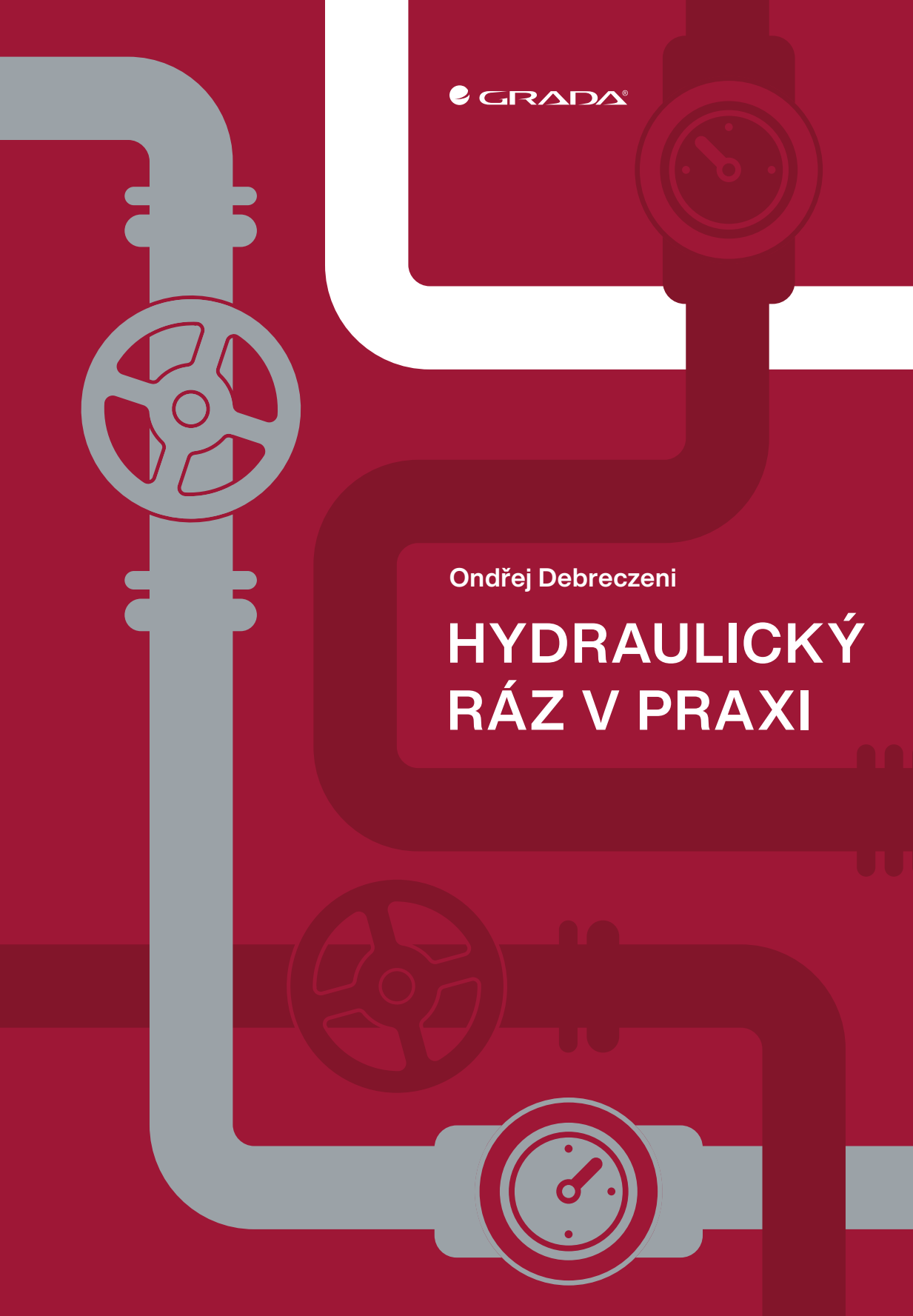
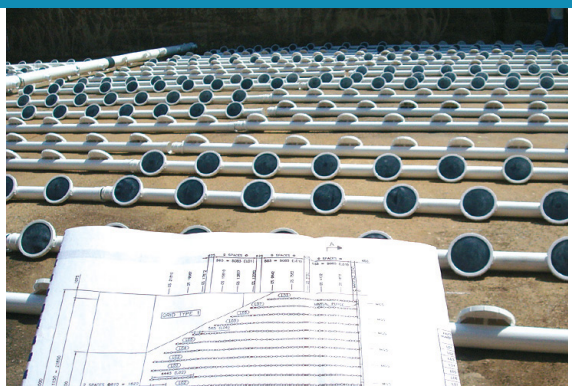

GRADA
Ondřej Debreczeni
HYDRAULICKÝ
RÁZ V PRAXI

LK 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

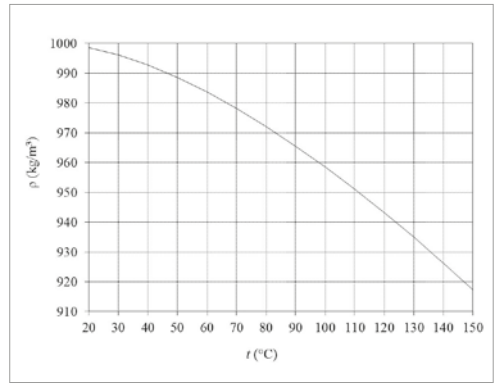
označ.:	**význam:**	**rozměr:**
a	rychlost zvuku	m/s
c	rychlost proudění vody	m/s
c_{vzd}	rychlost proudění vzduchu	m/s
C	polytropická konstanta	
$C\pm$	charakteristika (při numerickém řešení vlnové rovnice)	-
d	světlost regulační armatury	m
D	světlost potrubí	m
E	Youngův modul pružnosti materiálu	Pa
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*.

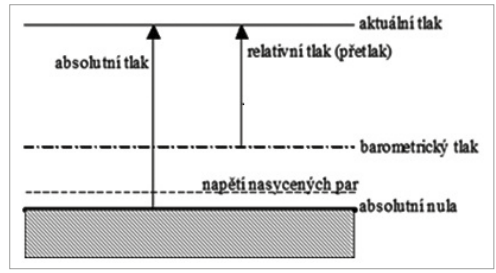


Obr. 1.1 Závislost hustoty vody na teplotě $t \in (4;40)$ °C

- 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.

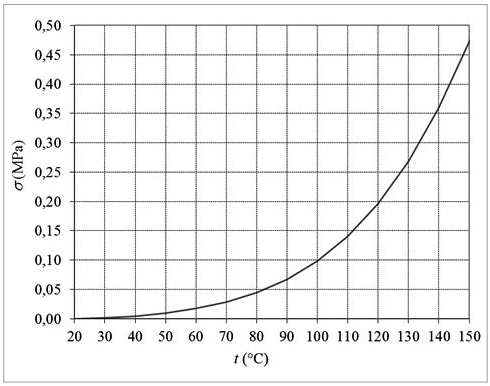
- Tlaková výška H (mvsl) je dána vztahem $\boldsymbol{H = \frac{p}{\rho . g}}$**.** Veličina je v praxi používána pro vyjádření dopravní výšky čerpadel a je výhodná pro práci s podélnými profily řadů.

- 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 $\sigma \cong 0$.

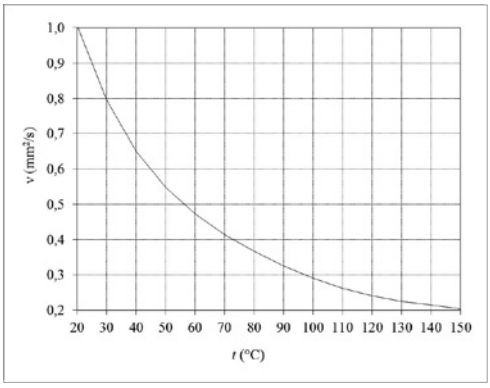
Příklad: voda o teplotě t = 100 °C ***σ* = 0,1 MPa.** Tlak nasycených par vody s vodou o teplotě 100 °C je přibližně roven hodnotě barometrického tlaku; v potrubí s vodou o teplotě 100 °C principiálně nemůže vzniknout podtlak.



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