

# Obsah

	<b>Úvodní slovo autora .....</b>	<b>25</b>
	<b>Úvodní slovo vydavatele .....</b>	<b>27</b>
	<b>Používané názvosloví .....</b>	<b>30</b>
<b>1.</b>	<b>Základní vztahy pevnosti potrubí, statika .....</b>	<b>33</b>
1.1.	Použité veličiny a jednotky .....	33
1.2.	Všeobecný teoretický základ .....	35
1.2.1.	Skořepiny .....	35
1.2.2.	Membránový a momentový stav napjatosti .....	36
1.2.2.1.	Membránový stav napjatosti .....	36
1.2.2.2.	Momentový stav napjatosti všeobecně .....	37
1.2.2.3.	Momentový stav napjatosti v místech uložení potrubí .....	37
1.2.3.	Napjatost tenkostěnné rotační skořepiny zatížené vnitřním spojitým zatížením .....	37
1.2.3.2.	Membránové síly a napětí pro válcový útvar .....	38
1.2.3.3.	Membránové síly a napětí pro kuželový útvar .....	40
1.2.3.5.	Membránové síly a napětí pro kulový útvar .....	43
1.2.3.7.	Prodlužování přímého potrubí způsobeného vnitřním tlakem – Bourdonův jev .....	44
1.2.4.	Tenkostěnné potrubí a základní vzorce .....	45
1.2.4.1.	Vzorce pro výpočet charakteristických hodnot potrubního průřezu .....	45
1.2.4.2.	Vzorce pro výpočet potrubních hodnot, započítáme-li i délku .....	46
1.2.4.3.	Vztah momentu a síly působící na trubku přes způsobené napětí .....	47
1.2.5.	Charakteristické číslo, SIF a poddajnost .....	47
1.2.5.1.	Definice charakteristického čísla a součinitelů .....	47
1.2.5.2.	Příklady použití součinitelů v případě ohybu .....	47
1.2.5.2.1.	Charakteristické číslo pro ohyb .....	47
1.2.5.2.2.	Určení součinitele koncentrace napětí (SIF) pro ohyb .....	47
1.2.5.2.3.	Určení součinitele poddajnosti pro ohyb .....	48
1.2.5.2.4.	Tlakové ztužení ohybů .....	48
1.2.5.3.	Co je to ASME B31J? .....	48
1.2.6.	Primární a sekundární napětí a redistribuce napětí v průřezu trubky .....	49
1.2.6.1.	Primární a sekundární napětí .....	49
1.2.6.2.	Trvalé deformace a přerozdělování sekundárního napětí ve stěnách přímé trubky .....	50
1.2.6.3.	Trvalé deformace a přerozdělování sekundárního napětí ve stěnách ohybu .....	52
1.3.	Zatížení potrubí .....	53
1.3.1.	Rozdělení zatížení .....	53
1.3.1.1.	Rozdělení zatížení podle provozních podmínek .....	53
1.3.1.2.	Rozdělení zatížení podle kritérií dovoleného namáhání a stability .....	54
1.3.1.3.	Rozdělení zatížení podle času působení .....	55
1.3.1.4.	Živá a mrtvá zatížení .....	56
1.3.1.5.	Rozdělení zatížení podle stochasticity .....	56
1.3.2.	Zatížení trvalá .....	56
1.3.2.1.	Zatížení tlakem, přímé i odvozené zatížení .....	56
1.3.2.1.1.	Zatížení tlakem .....	56
1.3.2.1.2.	Volný ustálený výtok z potrubí .....	57
1.3.2.1.3.	Zatížení potrubí axiální silou od vlnovcového kompenzátoru .....	57
1.3.2.1.4.	Zatížení hrdla aparátu axiální silou od vlnovcového kompenzátoru .....	57
1.3.2.2.	Zatížení vlastní hmotností tekutiny, potrubí a izolace a potrubních dílů .....	57
1.3.2.2.1.	Hmotnost potrubí .....	57
1.3.2.2.2.	Hmotnost tekutiny .....	58
1.3.2.2.3.	Hmotnost izolace .....	59

1.3.3.	Zatížení působením teploty .....	60
1.3.3.1.	Roztažnost potrubí .....	60
1.3.3.2.	Banánový efekt .....	60
1.3.3.3.	Pohyb hrdel .....	60
1.3.3.4.	Zatížení zápornou teplotou .....	60
1.3.4.	Příležitostná zatížení .....	60
1.3.4.1.	Klimatická zatížení .....	60
1.3.4.1.1.	Zatížení větrem .....	60
1.3.4.1.2.	Zatížení sněhem .....	61
1.3.4.2.	Kvazistatická a dynamická zatížení .....	62
1.3.5.	Zatížení od jednoho neopakujícího se pohybu podpěry .....	62
1.4.	Tvorba trubní třídy .....	62
1.4.1.	Základní vzorce pro tvorbu trubní třídy .....	62
1.4.1.1.	Co umožňuje tvorbu potrubní třídy? .....	62
1.4.1.2.	Potrubní třídy pro zatížení potrubí vnitřním podtlakem .....	62
1.4.1.3.	Potrubní třídy pro kryogenní kapaliny a chladiva .....	63
1.4.2.	Systémy značení potrubní třídy .....	63
1.4.3.	Konstrukce potrubní třídy .....	64
1.4.3.1.	Základní údaje a složení potrubní třídy .....	64
1.4.3.2.	Tlakoteplotní tabulka .....	64
1.4.3.3.	Výpočet tloušťky stěny .....	65
1.4.4.	Přidávky tloušťky stěny trubky .....	65
1.4.4.1.	Znázornění a označení přidavek .....	65
1.4.4.2.	Korozně-erozní přídavek .....	66
1.4.4.3.	Záporná výrobní tolerance tloušťky stěny trubky .....	66
1.4.4.3.1.	Bezešvé ocelové trubky .....	66
1.4.4.3.2.	Bezešvé ocelové trubky korozivzdorné .....	67
1.4.4.3.3.	Svařované ocelové trubky .....	67
1.4.4.3.4.	Elektricky svařované ocelové trubky .....	67
1.4.4.3.5.	Pod tavidlem svařované ocelové trubky .....	67
1.4.4.3.6.	Svařované ocelové trubky korozivzdorné .....	67
1.4.4.3.7.	Trubky pro naftovody a plynovody .....	67
1.4.5.	Komponenty potrubní třídy .....	68
1.4.5.1.	Trubky .....	68
1.4.5.2.	Tvarovky .....	69
1.4.5.2.1.	Tvarovky všeobecně .....	69
1.4.5.2.2.	Hladké ohyby - použití .....	69
1.4.5.2.3.	Segmentové ohyby .....	70
1.4.5.3.	Příruby .....	70
1.4.5.4.	Spojovací materiál .....	71
1.4.5.5.	Těsnění .....	72
1.4.5.6.	Kompenzátory .....	73
1.4.5.7.	Tlakové hadice .....	74
1.4.5.8.	Armatury .....	75
1.4.6.	Materiály pro potrubní třídy .....	78
1.4.6.1.	Oceli .....	78
1.4.6.2.	Litiny .....	80
1.4.6.3.	Neželezné kovy .....	80
1.4.6.3.1.	Hliník a jeho slitiny .....	80
1.4.6.3.2.	Měď a její slitiny .....	81
1.4.6.3.3.	Titan a jeho slitiny .....	82
1.4.6.3.4.	Slitiny žáruvzdorné a žárupevné .....	82
1.4.6.4.	Ostatní materiály pro potrubí .....	83
1.4.6.4.1.	Sklo .....	83
1.4.6.4.2.	Keramika .....	83
1.4.6.4.3.	Beton .....	83

1.5.	Mezní stavy potrubí – rozdělení a uspořádání .....	84
1.5.1.	Seznam a uspořádání mezních stavů potrubí .....	84
1.5.2.	Mezní stavy únosnosti .....	84
1.5.3.	Mezní stavy použitelnosti .....	84
1.6.	Vyhodnocování napětí a jiných mezních stavů únosnosti pro potrubí z houževnatých materiálů .....	85
1.6.1.	Které materiály, vhodné pro výrobu potrubí, jsou houževnaté? .....	85
1.6.2.	Vyhodnocování napětí a pružnostní analýza .....	85
1.6.2.1.	Hypotéza Tau.max (Max3DShear) .....	85
1.6.2.2.	Hypotéza HMM (von Mises) .....	85
1.6.2.3.	Výpočet dovoleného napětí nezávislého na čase .....	86
1.6.2.4.	Vyhodnocení napětí od trvalých zatížení .....	86
1.6.2.5.	Vyhodnocení napětí od občasných, ev. mimořádných zatížení .....	87
1.6.2.6.	Vyhodnocení rozkmitu napětí od teplotní dilatace .....	87
1.6.2.7.	Vyhodnocení napětí od pohybu podpěry .....	88
1.6.3.	Pevnost závislá na čase .....	89
1.6.3.1.	Výpočet potrubí s creepem .....	89
1.6.3.1.1.	Teoretický úvod .....	89
1.6.3.1.2.	Pevnostní výpočet kovových potrubí .....	89
1.6.3.1.3.	Vyhodnocení napětí při výpočtu s creepem .....	90
1.6.3.2.	Koroze a eroze a výpočet potrubí s nimi .....	90
1.6.3.2.1.	Koroze a eroze – základní pojmy .....	90
1.6.3.2.2.	Pevnostní výpočet .....	90
1.6.3.3.	Únavový lom a výpočet potrubí s cyklickým zatížením .....	91
1.6.3.3.1.	Úvodní teorie pro výpočet .....	91
1.6.3.3.2.	Pevnostní výpočet .....	91
1.6.3.4.	Křehký lom u houževnatých materiálů a ochrana proti němu .....	93
1.6.3.4.1.	Materiálová křehkost .....	93
1.6.3.4.2.	Eliminace křehkého lomu .....	94
1.6.3.4.3.	Některé materiály vhodné pro nízké teploty .....	95
1.6.4.	Výpočet zkušební tlaku pro houževnaté materiály .....	96
1.7.	Vyhodnocování napětí pro potrubí z křehkých materiálů .....	96
1.7.1.	Které materiály, vhodné pro potrubí, jsou křehké? .....	96
1.7.2.	Vyhodnocování napětí a pružnostní analýza .....	97
1.7.2.1.	Podmínky pevnosti – Rankinova hypotéza .....	97
1.7.2.2.	Saint-Venantova hypotéza maximálního prodloužení .....	97
1.7.2.3.	Mohrova hypotéza mezní čáry .....	97
1.7.2.4.	Modifikovaná Mohrova hypotéza .....	97
1.7.2.5.	Výpočet dovoleného napětí nezávislého na čase – odvození součinitele bezpečnosti .....	98
1.7.2.5.1.	Napjatost v trubce .....	98
1.7.2.5.2.	Součinitel bezpečnosti pro kombinaci Mohrovy a Rankinovy hypotézy .....	98
1.7.2.5.3.	Součinitel bezpečnosti pro modifikovanou Mohrovu hypotézu .....	99
1.7.2.5.4.	Součinitel bezpečnosti v normách .....	100
1.7.2.6.	Vyhodnocení osových napětí .....	101
1.7.2.7.	Vyhodnocení obvodových napětí .....	101
1.7.3.	Výpočet zkušební tlaku pro křehké materiály .....	101
1.8.	Mezní stavy použitelnosti potrubí .....	102
1.8.1.	Nepřekročení průhybu pro spádování potrubí .....	102
1.8.1.1.	Spádování .....	102
1.8.1.2.	Určení vzdálenosti podpěr tak, aby nebyly porušeny definované limity pro spádování ..	103
1.8.2.	Nepřekročení posuvu způsobeného tepelnou dilatací .....	103
1.8.2.1.	Základní informace o tepelné dilataci .....	103
1.8.2.2.	Výčet vlivů tepelné roztažnosti .....	103
1.8.2.3.	Banánový efekt (stratifikace teploty) .....	104
1.8.3.	Vzpěr potrubí .....	106

1.8.3.1.	Zvlnění potrubí .....	108
1.8.4.	Periodické kmitání potrubí .....	109
1.8.5.	Stav omezeného poškození při seizmicitě .....	110
1.9.	Kompenzace délkové roztažnosti .....	110
1.9.1.	Příčiny nutnosti kompenzace délkové roztažnosti .....	110
1.9.1.1.	Délková roztažnost potrubí .....	110
1.9.1.2.	Překročení dovoleného namáhání potrubí, dovoleného posunu a dovoleného zatížení hrdel způsobené délkovou roztažností .....	111
1.9.2.	Kompenzace přirozeným tvarem potrubí .....	111
1.9.3.	Kompenzace vložením kompenzátorů tvarem potrubí .....	111
1.9.3.1.	U-kompenzátory pro kovová potrubí .....	111
1.9.4.	Použití kompenzátorů vlnovcových, ucpávkových a textilních pro kompenzaci tepelné roztažnosti .....	113
1.9.4.1.	Použití vlnovcových kompenzátorů .....	113
1.9.4.1.1.	Druhy vlnovcových kompenzátorů .....	113
1.9.4.1.2.	Silové působení kompenzátoru na okolní potrubí .....	114
1.9.4.2.	Ucpávkové kompenzátory .....	116
1.9.4.3.	Použití textilních (tkaninových) kompenzátorů .....	116
1.10.	Související technické normy a legislativa .....	117
1.10.1.	Související legislativa.....	117
1.10.2.	Související technické normy .....	118
1.10.2.1.	Platné původem české technické normy .....	118
1.10.2.2.	Evropské normy (harmonizované k PED) .....	118
1.10.2.2.1.	Tlaková zařízení .....	118
1.10.2.2.2.	Kovová potrubí .....	119
1.10.2.2.3.	Německé normy (harmonizované k PED) .....	120
1.10.2.2.4.	Eurokódy .....	121
1.10.2.2.5.	Jiné významné normy .....	121
<b>2.</b>	<b>Speciální mezní stavy únosnosti potrubí .....</b>	<b>123</b>
2.1.	Použité veličiny a jednotky .....	123
2.2.	Stabilita potrubní stěny .....	125
2.2.1.	Ztráta stability potrubní stěny, boulení stěny všeobecně .....	125
2.2.2.	Ztráta stability (boulení) potrubní stěny mezi podpěrami, zatížení osovou silou a ohybovým momentem .....	126
2.2.3.	Ztráta stability potrubní stěny (boulení) mezi podpěrami, zatížení podtlakem	128
2.2.4.	Kombinace různých druhů zatížení z hlediska stability potrubní stěny mezi podpěrami .....	129
2.2.5.	Ztráta stability potrubní stěny nad podpěrou .....	129
2.2.6.	Rozdíl ve stabilitě potrubní stěny u houževnatých a křehkých materiálů .....	131
2.3.	Únosnost hrdel aparátů a ostatních zařízení .....	132
2.3.1.	Vznik zatížení hrdel .....	132
2.3.2.	Přepočítání zatížení momentem na zatížení silou .....	132
2.3.3.	Výpočet únosnosti hrdla pro hrdlo tvořené nátrubkem na prostorově klenuté anebo válcové nádobě .....	133
2.3.3.1.	Průnik dvou válcových těles – výpočet pomocí WRC 107 a WRC 297 .....	133
2.3.3.2.	Průnik dvou válcových těles – výpočet pomocí ČSN EN 13445-3 a BS5500 .....	134
2.3.3.3.	Smaltovaná hrdla aparátů .....	134
2.3.3.4.	Nekovová hrdla aparátů .....	134
2.3.4.	Omezení zatížení hrdla technickými normami či jinými ustanoveními .....	135
2.3.4.1.	Ocelová hrdla deskových výměníků .....	135
2.3.4.2.	Hrdla ventilů .....	135
2.3.4.3.	Omezení zatížení hrdel u čerpadel .....	135
2.3.4.4.	Omezení zatížení hrdel u turbín .....	135

2.3.4.5.	Ostatní omezení zatížení hrdel .....	135
2.4.	Výpočet potrubních spojů .....	136
2.4.1.	Zatížení přírubového spoje .....	136
2.4.2.	Přepočet zatížení momentem na zatížení silou .....	136
2.4.2.1.	U přírubového těsnění .....	136
2.4.2.2.	U přírubových šroubů .....	137
2.4.3.	Kontrola tlaku na těsnění .....	138
2.4.4.	Pevnostní výpočet přírubového spoje .....	138
2.4.4.1.	Všeobecné informace .....	138
2.4.4.2.	Trojúhelníkový diagram předpjatého spoje .....	139
2.4.4.3.	Pružinové systémy u přírubových šroubů .....	140
2.4.3.4.	Výstupy z výpočtu přírubového spoje .....	140
2.4.5.	Těsnostně-pevnostní výpočet přírubového spoje .....	140
2.4.5.1.	Těsnostně-pevnostní výpočet přírubového spoje – všeobecné údaje .....	140
2.4.5.2.	Výpočet přírubového spoje pro dosažení požadované těsnosti .....	141
2.4.5.3.	Podmínky pro dosažení vysoké těsnosti .....	141
2.4.5.4.	Principy návrhu těsnostně-pevnostního výpočtu přírubového spoje .....	141
2.4.5.5.	Vlastnosti těsnostně-pevnostního výpočtu přírubového spoje .....	142
2.4.5.6.	Výstupy z výpočtu přírubového spoje .....	143
2.4.6.	Výpočet svařovaného spoje .....	143
2.5.	Výpočet a vyhodnocování napětí v jednotlivých potrubních komponentách .....	144
2.5.1.	Základní potrubní komponenty .....	144
2.5.1.1.	Používání výpočtů v plastické oblasti materiálu .....	144
2.5.1.2.	Ohodnocení bezpečnosti plastického výpočtu .....	145
2.5.1.2.1.	Všeobecné porovnání pružnostního a plastického výpočtu .....	145
2.5.1.2.2.	Porovnání pružnostního a plastického výpočtu pro potrubí namáhané vnitřním tlakem .....	145
2.5.2.	Trubka .....	146
2.5.2.1.	Napětí v trubce za ohybu .....	146
2.5.2.2.	Výpočet plastické únosnosti trubky pro obvodové napětí .....	146
2.5.2.3.	Výpočet žebér a výtuh potrubí na základě plasticity .....	147
2.5.2.4.	Výpočet maximálních rozměrů napadení důlkovou korozí .....	148
2.5.3.	Ohyb .....	148
2.5.3.1.	Hladký ohyb .....	148
2.5.3.1.1.	Součinitel poddajnosti .....	149
2.5.3.1.2.	Součinitel koncentrace napětí .....	149
2.5.3.1.3.	Korekce vratné deformace průřezu ohybu při rovinném zatížení .....	151
2.5.3.2.	Segmentový ohyb .....	151
2.5.3.1.1.	Součinitel poddajnosti .....	151
2.5.3.1.2.	Součinitel koncentrace napětí pro ohyb .....	152
2.5.3.1.3.	Napětí v kritickém místě .....	152
2.5.4.	Redukce .....	153
2.5.4.1.	Napětí v kritickém místě .....	153
2.5.5.	Odbočky, T-kusy .....	154
2.5.5.1.	Jednotlivé typy provedení T-kusů a odboček .....	154
2.5.5.2.	Součinitel poddajnosti pro T-kusy .....	155
2.5.5.3.	Součinitel koncentrace napětí pro T-kusy .....	155
2.5.5.4.	Napětí v kritickém místě .....	156
2.5.6.	Příruba .....	157
2.5.6.1.	Typy výpočtů přírub .....	157
2.5.6.2.	Kdy je možné použít normalizované příruby bez výpočtu .....	157
2.5.6.3.	Součásti a typy přírubového spoje a druhy přírubových spojů .....	158
2.5.6.5.	Princip pružnostního výpočtu .....	159
2.5.6.6.	Princip plastického výpočtu .....	161
2.5.7.	Rovinné zaslepení potrubí .....	163

2.5.7.1.	Princip pružnostního výpočtu .....	163
2.5.7.2.	Princip plastického výpočtu .....	164
2.5.8.	Těleso ventilu .....	165
2.5.9.	Vlnovcový kompenzátor .....	166
2.5.9.1.	Druhy vlnovcových kompenzátorů .....	166
2.5.9.2.	Určení kompenzátoru do potrubní větve .....	167
2.5.9.3.	Pryžové a plastové kompenzátory .....	167
2.5.9.4.	Výpočet vlnovcového kompenzátoru .....	167
2.6.	Související technické normy .....	168
2.6.1.	Související technické normy – seznam na internetu .....	168
2.6.2.3.	Evropské normy (harmonizované k PED) .....	168
2.6.2.3.1.	Tlaková zařízení .....	168
2.6.2.3.2.	Čerpadla a deskové výměníky (omezení zatížení hrdel) .....	168
2.6.2.3.3.	Kovová potrubí .....	168
2.6.2.4.	Německé normy (harmonizované k PED) .....	169
2.6.2.7.	Normy USA .....	169
2.6.2.8.	Ruské normy .....	170
<b>3.</b>	<b>Dynamické výpočty potrubí .....</b>	<b>171</b>
3.1.	Použité veličiny a jednotky .....	171
3.2.	Teoretický základ zopakování a doplnění .....	173
3.2.1.	Základní vztahy pro přímočaré kmitání .....	173
3.2.2.	Vlastní kmitání hmotného bodu .....	174
3.3.	Dynamická zatížení a mezní stavy potrubí .....	177
3.3.1.	Rozdělení zatížení .....	177
3.3.1.2.	Rozdělení zatížení podle kritérií dovoleného namáhání a stability .....	178
3.3.1.3.	Rozdělení dynamických zatížení .....	179
3.3.2.	Dynamická zatížení .....	179
3.3.2.1.	Společné vlastnosti dynamických zatížení .....	179
3.3.2.2.	Kombinace statických a dynamických zatížení .....	179
3.3.3.	Mezní stavy potrubí – rozdělení a uspořádání .....	179
3.3.3.1.	Seznam a uspořádání mezních stavů potrubí .....	179
3.3.3.2.	Mezní stavy únosnosti .....	180
3.3.3.3.	Mezní stavy použitelnosti .....	180
3.3.3.4.	Mezní stav kmitání – detailně .....	180
3.4.	Dynamika tekutin v potrubí .....	181
3.4.1.	Základy mechaniky tekutin pro potrubí .....	181
3.4.2.	Přeměna energie od proudění na tlakovou energii v potrubí .....	182
3.4.3.	Reakce od proudění tekutiny v redukci a rozšíření .....	182
3.4.4.	Reakce od proudění tekutiny v ohybu .....	183
3.4.5.	Sčítání sil od proudění v reálném potrubí .....	184
3.4.6.	Volný ustálený výtok z potrubí .....	184
3.4.7.	Zatížení axiální silou od vlnovcového kompenzátoru .....	184
3.4.7.1.	Zatížení potrubí axiální silou od vlnovcového kompenzátoru .....	184
3.4.7.2.	Zatížení hrdla aparátu axiální silou od vlnovkového kompenzátoru .....	185
3.4.8.	Hydraulický ráz .....	185
3.4.8.1.	Odvození Žukovského rovnice pro přímý hydraulický ráz. ....	185
3.4.8.2.	Hydraulický ráz, základní poznatky z hydrodynamiky .....	185
3.4.8.3.	Výpočet síly způsobené hydraulickým rázem .....	187
3.4.8.4.	Výpočet doby působení síly .....	188
3.4.9.	Odpouštění bezpečnostní armatury .....	188
3.4.9.1.	Výpočet a místo působení síly způsobené odpouštěním bezpečnostní armatury .....	188
3.4.10.	Průtok vícefázové tekutiny, tj. směsi kapaliny a plynu .....	189

3.4.11.	Ráz způsobený výbuchem mimo potrubí .....	190
3.5.	Kvazistatická řešení dynamických zatížení .....	191
3.5.1.	Zatížení impulzem – kvazistatická řešení .....	191
3.5.1.1.	Dynamický součinitel zatížení (DLF) .....	191
3.5.1.2.	Zatížení způsobená impulzem (rázem) – kvazistaticky .....	192
3.5.2.	Nahodilá zatížení .....	192
3.5.2.1.	Zatížení větrem – kvazistaticky .....	192
3.5.2.2.	Zemětřesení – kvazistaticky .....	192
3.5.2.2.1.	Všeobecné údaje .....	192
3.5.2.2.2.	Seismické oblasti .....	193
3.5.2.2.3.	Možnosti kvazistatického výpočtu zemětřesení .....	193
3.5.2.2.4.	Kombinace s pseudostatickým zatížením .....	193
3.5.3.	Možnosti výpočtu programem pro pevnostní výpočty potrubí .....	194
3.6.	Modální a harmonická analýza potrubí .....	194
3.6.1.	Modální analýza .....	194
3.6.1.1.	Modální analýza soustavy hmotných bodů .....	194
3.6.1.3.	Tlumení kmitání potrubí .....	195
3.6.1.4.	Tlumení třením v kluzných podpěrách .....	195
3.6.1.5.	Určení maximální velikosti počítané vlastní frekvence .....	196
3.6.1.6.	Vzorce pro výpočet matice tuhostí potrubí .....	197
3.6.2.	Harmonická analýza .....	198
3.6.2.1.	Harmonická analýza kmitání hmotného bodu .....	198
3.6.2.2.	Harmonická analýza kmitání soustavy hmotných bodů a jejich transformace pro výpočet na počítači .....	200
3.6.3.	Výpočty budící frekvence a budící síly u potrubí v konkrétních případech .....	201
3.6.3.1.	Rotační stroje .....	201
3.6.3.2.	Pístové čerpadlo či kompresor .....	201
3.6.3.3.	Kmitání vyvolané prouděním tekutiny .....	201
3.6.3.4.	Budící frekvence od větru .....	202
3.7.	Spektrální analýza .....	203
3.7.1.	Spektrální analýza všeobecně .....	203
3.7.1.1.	Všeobecné přiblížení spektrální analýzy .....	203
3.7.1.2.	Dynamická odezva konstrukce .....	204
3.7.1.3.	Teoretické základy spektrální analýzy .....	204
3.7.1.4.	Určení maximální velikosti a počtu počítaných vlastních frekvencí a korekce nezapočítaných vlastních frekvencí .....	204
3.7.1.4.1.	Určení maximální velikosti počítaných vlastních frekvencí .....	204
3.7.1.4.2.	Určení maximálního počtu počítaných vlastních frekvencí .....	205
3.7.1.4.3.	Metody statické korekce .....	205
3.7.1.5.	Pravidla pro kombinace odezev modů (Modal Combination Methods) .....	206
3.7.1.5.1.	Důvody kombinace odezev jednotlivých modů .....	206
3.7.1.5.2.	Seskupovací metoda (Grouping Method) .....	206
3.7.1.5.3.	Desetiprocentní metoda (Ten Percent Method) .....	207
3.7.1.5.5.	Metoda „Druhá odmocnina součtu čtverců“ (Square Root of the Sum of the Squares [SRSS]) .....	207
3.7.1.5.7.	Úplná kvadratická kombinace (Complete quadratic combination [CQC]) .....	208
3.7.1.5.8.	Kombinace dynamických a pseudodynamických modálních odezev .....	209
3.7.1.6.	Kombinace dynamických zatížení .....	209
3.7.1.6.1.	Kombinace dynamických zatížení v jednom směru .....	209
3.7.1.6.2.	Kombinace prostorových složek dynamického zatížení (Spatial Combination Method [SRSS/ABS]) .....	209
3.7.1.7.	Která kombinace se má vypočítat dřív? (Spatial or Modal Combination First) .....	209
3.7.2.	Spektrální analýza zatížení impulzem (rázem) .....	210
3.7.2.1.	Definování impulzu (rázu) a generování zatěžovacího spektra odezvy .....	210
3.7.2.2.	Definování impulzu v konkrétních případech .....	211
3.7.3.	Časová posloupnost působení zatížení (Time History) .....	211

3.7.4.	Seizmická spektrální analýza .....	212
3.7.4.1.	Všeobecně o zeměřesení .....	212
3.7.4.2.	Projevy seizmického zatížení .....	214
3.7.4.3.	Seizmické oblasti .....	214
3.7.4.4.	Spektrální analýza seizmicity .....	215
3.7.4.4.1.	Základní rovnice spektrální analýzy seizmicity .....	215
3.7.4.4.3.	Vytvoření návrhového spektra odezvy .....	216
3.7.4.4.4.	Vysvětlení základních pojmů a součinitelů použitých pro návrhové spektrum .....	217
3.7.4.4.5.	Třídy významu potrubí .....	218
3.8.	Jak postupovat, když dynamický výpočet nevychází? .....	218
3.8.1.	Všeobecný úvod .....	218
3.8.2.	Způsob řešení kmitání v pásmu rezonance .....	218
3.8.2.1.	Řešení kmitání potrubí zásahem do tvaru kmitání (zabráněním kmitání o určité frekvenci) .....	219
3.8.2.2.	Řešení kmitání potrubí zásahem do tvaru kmitání (zmenšováním amplitudy kmitání čili zatlumením) .....	219
3.8.2.3.	Řešení kmitání potrubí zásahem do frekvence kmitání (přeladění konkrétních modů) .....	219
3.8.3.	Řešení kmitání při současné tepelné dilataci .....	220
3.8.4.	Řešení dynamického zatížení ve speciálních případech .....	220
3.8.4.1.	Řešení, když potrubí nevyhoví hydraulickému rázu .....	220
3.8.4.2.	Řešení potrubí v případě seizmicity .....	221
3.8.5.	Připuštění kmitání podmíněné výpočtem vysokocyklové únavy .....	221
3.9.	Zařízení pro tlumení kmitání potrubí .....	221
3.9.1.	Tlumiče rázů .....	221
3.9.1.1.	Hydraulický tlumič rázů .....	221
3.9.1.2.	Mechanický tlumič rázů .....	222
3.9.1.3.	Viskoelastický tlumič (damper) .....	223
3.9.2.	Omezovač kmitání .....	224
3.9.2.1.	Klasický pružinový omezovač kmitání .....	224
3.9.2.2.	Antivibrační objímka .....	225
3.9.2.3.	Mechanický tlumič – absorbér energie .....	226
3.9.2.4.	Vibroizolační prvky .....	227
3.10.	Související technické normy .....	227
<b>4.</b>	<b>Plastová a laminátová potrubí .....</b>	<b>229</b>
4.1.	Veličiny, jednotky a jejich označení .....	229
4.2.	Teoretický základ pro plasty .....	232
4.2.1.	Základní informace .....	232
4.2.1.1.	Rozdělení plastů .....	232
4.2.2.	Struktura plastů .....	232
4.2.2.1.	Molekulární struktura plastů .....	232
4.2.2.2.	Nadmolekulární struktura plastů .....	233
4.2.3.	Společné vlastnosti plastů .....	234
4.2.3.1.	Základní vlastnosti plastů .....	234
4.2.3.2.	Termodynamické vlastnosti plastů .....	235
4.2.3.3.	Mechanické vlastnosti plastů .....	235
4.2.3.4.	Tepelné vlastnosti plastů .....	237
4.2.3.5.	Elektrické vlastnosti plastů .....	238
4.2.3.6.	Chemická odolnost plastů .....	238
4.2.4.	Viskoelastická, viskoplasticita .....	239
4.2.4.1.	Viskoelastická .....	239
4.2.4.2.	Primární a sekundární napětí a jejich pohyb v čase .....	239
4.2.4.3.	Modul viskoelastické a jeho pohyb v čase .....	240
4.2.4.4.	Viskoplasticita .....	241



4.2.5.	Reologické modelování .....	242
4.2.5.1.	Základní články reologických modelů .....	242
4.2.5.2.	Kelvin-Voigtův model .....	243
4.2.5.3.	Maxwellův model .....	243
4.2.5.4.	Norton-Hoffův model .....	245
4.3.	Vlastnosti potrubí z plastů .....	245
4.3.1.	Skořepiny z plastů .....	245
4.3.2.	Rozměrové řady plastových trubek .....	246
4.3.3.	Materiály plastových trubek .....	246
4.3.3.1.	Polyetylén (PE) .....	246
4.3.3.2.	Polypropylén (PP) .....	247
4.3.3.3.	Polybutén (PB) .....	247
4.3.3.4.	Polyvinylchlorid (PVC) .....	247
4.3.3.5.	Polyvinylidénfluorid (PVDF) .....	247
4.3.3.6.	Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) .....	248
4.3.3.7.	Perfluoralkoxy-copolymer (PFA) .....	248
4.3.4.	Technické normy pro získání materiálových vlastností plastů .....	248
4.4.	Tvorba potrubní třídy pro potrubí z plastů .....	248
4.4.1.	Co umožňuje tvorbu potrubní třídy pro plastová potrubí? .....	248
4.4.2.	Systémy značení potrubní třídy .....	249
4.4.3.	Konstrukce potrubní třídy .....	249
4.4.3.1.	Základní údaje a složení potrubní třídy .....	249
4.4.3.2.	Tlakoteplotní tabulka .....	249
4.4.3.3.	Výpočet tloušťky stěny .....	249
4.4.4.	Přidávky tloušťky stěny trubky .....	250
4.4.5.	Komponenty potrubní třídy .....	251
4.4.5.1.	Trubky, tvarovky .....	251
4.4.5.2.	Spojování, příruby .....	251
4.4.5.3.	Spojovací materiál a těsnění .....	252
4.4.5.4.	Kompenzátory a armatury .....	252
4.5.	Kompenzace délkové roztažnosti a uložení potrubí z plastů .....	252
4.5.1.	Příčina nutnosti kompenzace délkové roztažnosti .....	252
4.5.2.	Klasická kompenzace délkové roztažnosti v kombinaci s klasickým uložením .....	252
4.5.2.1.	Kompenzační tvary plastů totožné s potrubím z oceli .....	252
4.5.2.2.	Kompenzační tvary potrubí specifické pro plasty – dilatační smyčky .....	253
4.5.2.3.	Kompenzace vlnovcovými kompenzátory .....	253
4.5.2.4.	Uložení klasické .....	254
4.5.2.4.1.	Zásady používání podpěr .....	254
4.5.2.4.2.	Příklady použití sestavy podpěr .....	255
4.5.3.	Klasická kompenzace délkové roztažnosti v kombinaci s uložením do korýtek .....	256
4.5.3.1.	Zásady používání podpěr .....	256
4.5.3.2.	Maximální možná délka potrubí bez korýtka .....	256
4.5.3.3.	Příklady použití sestavy podpěr .....	256
4.5.4.	Kompenzace plastových potrubí „pevnou montáží“ .....	257
4.5.4.1.	Kompenzace délkové roztažnosti .....	257
4.5.4.2.	Zásady používání podpěr a jejich vzdálenosti .....	259
4.5.4.3.	Příklady použití sestavy podpěr při „pevné montáží“ .....	260
4.6.	Náhrada kovových potrubí za plastové .....	260
4.6.1.	Seznam nebezpečí při náhradě potrubí za plastové a opatření proti tomuto nebezpečí .....	260
4.6.1.1.	Omezení tlaku a teploty .....	260
4.6.1.2.	Nebezpečí vysoké tepelné roztažnosti .....	261
4.6.1.3.	Nebezpečí stárnutí plastů vlivem UV záření .....	261
4.6.1.4.	Nebezpečí vzniku elektrostatického náboje v zónách s nebezpečím výbuchu .....	261

4.6.1.5.	Nebezpečí zabránění boje s požárem .....	261
4.6.1.6.	Nebezpečí chybného spojení plastových a kovových potrubí .....	261
4.6.2.	Důvody, proč se i přes uvedená nebezpečí plastová potrubí prosazují .....	262
4.6.2.1.	Cenová úroveň .....	262
4.6.2.2.	Chemická odolnost plastových potrubí .....	262
4.6.2.3.	Schopnost tlumení kmitů a rázů .....	262
4.6.3.	Některé realizované případy náhrady kovových potrubí plastovými .....	262
4.6.3.1.	Kanalizační přípojky a stokové sítě .....	262
4.6.3.2.	Rozvody vody .....	263
4.6.3.3.	Rozvody zemního plynu .....	264
4.6.3.4.	Průmyslové aplikace .....	264
4.6.3.5.	Rozvody vzduchu .....	264
4.7.	Pružnostní analýza potrubí z viskoelastických materiálů .....	265
4.7.1.	Které materiály, vhodné pro výrobu potrubí, jsou viskoelastické? .....	265
4.7.2.	Popis mechanismu porušení plastů .....	265
4.7.2.1.	Porušení při krátkodobé zkoušce .....	265
4.7.2.2.	Porušení creepem .....	265
4.7.3.	Aplikace hypotéz Tau-max (Max3DShear) a HMM (von Mises) na plastová potrubí .....	266
4.7.4.	Překročení dovolené krátkodobé pevnosti .....	266
4.7.5.	Překročení dovoleného namáhání plastu, které je závislé na čase .....	266
4.7.5.1.	Kritéria dovoleného namáhání za působení viskoelastického stavu .....	266
4.7.5.2.	Pevnost potrubí za určitý čas daný únavovou únosností .....	267
4.7.6.	Vyhodnocování napětí .....	267
4.7.7.	Možnosti výpočtu programem pro pevnostní výpočty potrubí .....	268
4.7.7.1.	Základní informace .....	268
4.7.7.2.	Vliv viskoelasticity a viskoplasticity .....	268
4.7.7.3.	Určování koeficientu bezpečnosti .....	269
4.7.7.4.	Rozdílné a neprobádané jevy u plastů, důležité pro výpočet .....	269
4.7.7.5.	Způsob výpočtu uložení plastových potrubí do korýtky .....	270
4.7.8.	Výpočet plastových potrubí podle GOST .....	270
4.8.	Speciální mezní stavy pro plastová potrubí .....	271
4.8.1.	Seznam a uspořádání mezních stavů potrubí .....	271
4.8.1.1.	Mezní stav únosnosti .....	271
4.8.1.2.	Mezní stav použitelnosti .....	271
4.8.2.	Speciální mezní stavy únosnosti pro plastová potrubí .....	271
4.8.2.1.	Stabilita vůči podtlaku, stabilita při ohybu vůči zhroucení tlakové oblasti nad podpěrou i jinde .....	271
4.8.2.2.	Plastová hrdla aparátů .....	271
4.8.3.	Speciální mezní stavy použitelnosti pro plastová potrubí .....	271
4.8.3.1.	Nepřekročení průhybu pro spádování a odvzdušňování potrubí .....	271
4.8.3.2.	Nepřekročení posuvu způsobeného tepelnou dilatací .....	272
4.8.3.3.	Vzpěr potrubí z plastů .....	272
4.8.3.4.	Zvlnění potrubí .....	273
4.8.4.	Určení zkušební tlaku pro plastová průmyslová potrubí .....	273
4.9.	Teoretický základ pro kompozity (lamináty) .....	275
4.9.1.	Základní informace .....	275
4.9.2.	Metoda návrhové analýzy .....	276
4.9.2.1.	Objemový a hmotnostní podíl vláken .....	276
4.9.2.2.	Metoda maximálního napětí .....	277
4.9.2.3.	Metoda maximálních deformací .....	277
4.9.3.	Výpočet napětí a deformace. Klasická laminátová teorie (CLT) .....	277
4.9.4.	Složení kompozitů .....	278
4.9.4.1.	Popis a druhy kompozitů .....	278
4.9.4.2.	Vysvětlení zkratk a názvosloví .....	278

4.9.4.3.	Vlastnosti použitých materiálů .....	279
4.9.4.4.	Kompozit UP/jednosměrná skleněná výztuž .....	279
4.9.4.5.	Kompozit UP/tkaná skleněná výztuž .....	279
4.9.5.	Porušení kompozitů .....	280
4.9.5.1.	Porušení vláken .....	280
4.9.5.2.	Porušení mezi vlákny .....	280
4.9.5.3.	Podmínky pevnosti laminátů (Puckova hypotéza) .....	280
4.10.	Potrubní komponenty z FRP/GRP .....	281
4.10.1.	Všeobecný úvod .....	281
4.10.2.	Výpočet potrubních komponent .....	281
4.10.2.1.	Metoda návrhové analýzy pro trubku .....	281
4.10.2.2.	Metoda maximálního napětí .....	282
4.10.2.3.	Metoda maximálních deformací .....	283
4.10.3.	Výroba potrubních komponent .....	283
4.10.3.1.	Vrstvení laminátů .....	283
4.10.4.	Normy pro potrubí z FRP/GRP .....	284
4.10.4.1.	Potrubní kompozity podle normy EN .....	284
4.10.4.2.	Potrubní kompozity podle norem DIN .....	284
4.10.4.2.1.	Trubky .....	284
4.10.4.2.2.	Tvarovky .....	286
4.10.5.	Oprava ocelových potrubí FRP/GRP bandáží .....	286
4.11.	Tvorba potrubní třídy z GRP/FRP .....	287
4.11.1.	Všeobecná fakta pro tvorbu potrubní třídy a rozdíly v případě laminátů .....	287
4.11.2.	Systémy značení potrubní třídy .....	287
4.11.3.	Konstrukce potrubní třídy .....	288
4.11.3.1.	Základní údaje a složení potrubní třídy .....	288
4.11.3.2.	Tlakoteplotní tabulka .....	288
4.11.3.3.	Výpočet tloušťky stěny .....	288
4.11.4.	Komponenty potrubní třídy .....	288
4.12.	Náhrada kovových potrubí za FRP/GRP potrubí .....	289
4.12.1.	Seznam nebezpečí při náhradě potrubí za plastové a opatření proti tomuto nebezpečí .....	289
4.12.2.	Důvody, proč se i přes uvedená nebezpečí tato potrubí prosazují .....	290
4.12.3.	Kompenzace délkové roztažnosti v kombinaci .....	290
4.12.4.	Některé realizované případy náhrady ocelových potrubí laminátovými .....	290
4.13.	Pružnostní analýza potrubního systému z FRP/GRP .....	291
4.13.1.	Mechanismy poškození potrubní z FRP/GRP .....	291
4.13.1.1.	Porušení vláken .....	291
4.13.1.2.	Porušení mezi vlákny .....	291
4.13.1.3.	Poškozování při cyklickém zatížení .....	291
4.13.2.	Výpočet potrubního systému z FRP/GRP – všeobecné zásady .....	292
4.13.2.1.	Maximální napětí .....	292
4.13.2.2.	Maximální deformace .....	292
4.13.3.	Výpočet potrubí z FRP/GRP podle normy ISO .....	292
4.13.3.1.	Teorie .....	292
4.13.3.1.1.	Součinitelé koncentrace napětí a poddajnosti .....	295
4.13.3.2.	Vyhodnocení napětí .....	295
4.13.4.	Výpočet potrubí z FRP/GRP podle britských norem .....	296
4.13.5.	Možnosti výpočtu programem pro pevnostní výpočty potrubí .....	297
4.14.	Související technické normy .....	297
4.14.1.	Plastová potrubí .....	297
4.14.2.	Laminátová potrubí .....	298

<b>5.</b>	<b>Uložení a podpěry potrubí .....</b>	<b>301</b>
5.1.	Použití veličiny a jednotky .....	301
5.2.	Výběr vhodného uložení .....	301
5.2.1.	Všeobecně .....	301
5.2.2.	Základní vývojový diagram pro umístování podpěr .....	302
5.2.3.1.	Všeobecná pravidla .....	302
5.2.3.2.	Podpěry anebo závěsy .....	303
5.2.3.3.	Jednoduché anebo dvojité závěsy .....	303
5.2.3.4.	Zatížení konstrukce od podpěr a závěsů v závislosti na jejich typu .....	304
5.3.	Určení vzdálenosti podpěr tak, aby nebyly porušeny mezní stavy potrubí .....	305
5.3.1.	Mezní stavy potrubí mající vliv na vzdálenost podpěr .....	305
5.3.2.	Dovolené napětí v materiálu potrubí a z něj odvozená vzdálenost podpěr .....	305
5.3.3.	Maximální vzdálenost podpěr vypočítaná z dovoleného průhybu .....	306
5.3.4.	Dovolená únosnost podpěr a z ní odvozená vzdálenost podpěr .....	306
5.4.	Výpočet únosnosti a konstrukce podpěr .....	306
5.4.1.	Materiál podpěr .....	306
5.4.2.	Konstrukční teploty a dovolené napětí u podpěr .....	307
5.4.3.	Zatížení podpěr .....	307
5.4.4.	Provádění výpočtu .....	307
5.4.5.	Výpočet tuhosti pružného závěsu či podpěry .....	308
5.4.6.	O konstantních závěsech .....	310
5.4.7.	Podpěry při dynamických zatížení potrubí .....	310
5.5.	Provedení podpěr pro ocelová potrubí .....	310
5.5.1.	Kotvení .....	310
5.5.2.	Kluzná tuhá podpěra .....	311
5.5.3.	Směrová zarážka .....	312
5.5.4.	Směrová zarážka ve všech směrech .....	313
5.5.5.	Vedení .....	314
5.5.6.	Pružná podpěra .....	314
5.5.7.	Tuhý závěs .....	315
5.5.8.	Pružný závěs .....	316
5.5.9.	Konstantní závěs .....	317
5.5.10.	Tlumič rázů .....	317
5.5.11.	Provedení uložení se vzpěrnými tyčemi .....	318
5.5.12.	Uložení speciálně pro potrubí pro kryogeny a chladiwa .....	319
5.5.13.	Uložení duktů .....	319
5.5.14.	Staré, neplatné oborové normy pro potrubní podpěry .....	320
5.6.	Podpěry pro plastová potrubí .....	322
5.6.1.	Upravené uložení klasické .....	322
5.6.1.1.	Důvody nutnosti úpravy uložení .....	322
5.6.1.2.	Některé klasické podpěry či závěsy ve verzi pro plastová potrubí .....	322
5.6.2.	Uložení do korytek .....	324
5.6.3.	Uložení plastových potrubí při „pevné montáži“ .....	325
5.7.	Podpěry pro laminátová potrubí .....	326
5.8.	Související technické normy a legislativa .....	326
5.8.1.	Související legislativa .....	326
5.8.2.	Evropské normy (harmonizované k PED) .....	326

<b>6.</b>	<b>Potrubí v zemi .....</b>	<b>327</b>
6.1.	Veličiny a jednotky všeobecné .....	327
6.2.	Základy mechaniky zemin .....	329
6.2.1.	Klasifikace zemin ve stavebnictví .....	329
6.2.2.	Charakteristické vlastnosti zemin .....	332
6.2.3.	Hodnoty charakteristických vlastností zemin .....	333
6.2.4.	Napjatost, deformace, pevnost a tlak zeminy .....	333
6.2.5.	Stlačitelnost a zhutňování zeminy .....	333
6.2.6.	Základní druhy působení zeminy na potrubí .....	335
6.2.6.1.	Druhy výkopu .....	335
6.2.6.2.	Působení nadloží (zásypu) na potrubí .....	335
6.2.6.3.	Působení podloží na potrubí .....	335
6.3.	Zatížení uložením potrubí v zemi .....	335
6.3.1.	Zatížení hmotností nadloží (zásypu) a zatížení povrchu terénu .....	335
6.3.1.1.	Zatížení svislým zatížením od hmotnosti nadloží (násypu) .....	335
6.3.1.1.1.	Výpočet svislé složky od geostatického napětí .....	336
6.3.1.1.2.	Výpočet svislé složky s ohledem na tření materiálu mezi jednotlivými částmi .....	336
6.3.1.1.3.	Hypotéza zemní klenby .....	337
6.3.1.1.4.	Zatížení zhutněním nadloží .....	337
6.3.1.1.5.	Působení svislých zatížení na potrubí .....	337
6.3.1.2.	Zatížení vodorovným tlakem zeminy způsobeným svislými zatíženími při širokém výkopu .....	337
6.3.1.3.	Zatížení povrchu terénu – statická i dynamická .....	339
6.3.1.4.	Roznášení zatížení povrchu terénu konstrukcí komunikace .....	340
6.3.1.5.	Shrnutí zatížení působením zeminy násypu v příčném směru trubky .....	340
6.3.2.	Zatížení potrubí v jeho podélné ose .....	341
6.3.3.	Zatížení potrubí pohyby podloží .....	342
6.3.3.1.	Pokles podloží pružností zeminy .....	342
6.3.3.2.	Poddolované podloží .....	342
6.3.3.3.	Podloží s nedokončeným konsolidačním sedáním .....	342
6.3.3.4.	Podemleté podloží vodou – nepředpokládané přetvoření zeminy .....	343
6.3.3.5.	Podloží tvořené zeminou saturovanou vodou .....	343
6.3.4.	Zatížení potrubí vnitřním tlakem či podtlakem .....	343
6.3.5.	Uložení potrubí na zemi (na terénu) .....	344
6.4.	Tvorba potrubní třídy pro potrubí v zemi .....	344
6.4.1.	Co umožňuje tvorbu potrubní třídy? .....	344
6.4.2.	Potrubí zatížené nadložím .....	344
6.4.3.	Omezení tloušťky stěny příčnou deformací či tuhostí .....	345
6.5.	Mezní stavy potrubí – rozdělení a uspořádání .....	345
6.5.1.	Druhy mezních stavů .....	345
6.5.2.	Mezní stavy únosnosti .....	345
6.5.2.1.	Určení dovoleného napětí či součinitele bezpečnosti konstrukce .....	345
6.5.2.2.	Napětí v potrubí způsobené působením hmotností nadloží (zásypu) .....	345
6.5.2.2.1.	Výpočet napětí pro potrubí zatížené nadložím tvořeným zeminou vodou nesaturovanou pro úzký výkop .....	345
6.5.2.2.4.	Výpočet napětí pro potrubí zatížené nadložím tvořeným zeminou vodou saturovanou .....	348
6.5.2.3.	Překročení dovoleného napětí způsobeného pohyby podloží .....	348
6.5.2.3.1.	Předpokládané přetvoření vodou nesaturované zeminy například na poddolovaném podloží .....	348
6.5.2.4.	Napětí způsobené roztažností potrubí v podélné ose .....	349
6.5.2.5.	Ztráta stability potrubní stěny .....	350
6.5.2.6.	Odolnost potrubní stěny plasticitou po ztrátě stability .....	350
6.5.3.	Mezní stavy použitelnosti .....	350
6.5.3.1.	Uvažované mezní stavy .....	350
6.5.3.2.	Výpočet příčných deformací .....	350
6.6.	Plastová a laminátová potrubí v zemi – mezní stavy .....	352
6.6.1.	Vlastnosti plastů a laminátů a potrubí z laminátů a plastů .....	352
6.6.2.	Mezní stavy únosnosti .....	352

6.6.2.1.	Určení dovoleného napětí či koeficientu bezpečnosti konstrukce .....	352
6.6.2.2.	Překročení dovoleného napětí či koeficientu bezpečnosti způsobené hmotností nadloží (zásypu) .....	352
6.6.2.3.	Vliv na ostatní mezní stavy, způsobené materiálovými veličinami .....	353
6.6.3.	Mezní stavy použitelnosti .....	353
6.7.1.	Výpočtový model potrubí v zemině .....	354
6.7.2.	Výpočet tuhostí a mezních zatížení pro program pro pevnostní výpočty potrubí .....	355
6.7.2.1.	Základní podmínky podle L.C.Penga a možnost přímého zadání zatížení .....	355
6.7.2.2.	Vlastní výpočet tuhostí a mezních zatížení působících na potrubí v zemi .....	356
6.8.	Předizolovaná potrubí .....	357
6.8.1.	Předizolované bezkanálové potrubí v zemi pro parovod .....	357
6.8.1.1.	Uložení parovodu, vedeném v zemi .....	357
6.8.1.2.	Kompensace tepelných dilatací .....	358
6.8.1.3.	Použití programů pro pevnostní výpočty potrubí .....	358
6.8.2.	Předizolované bezkanálové (sdružené) potrubí v zemi pro horkovod .....	358
6.8.2.1.	Definice a popis předizolovaného bezkanálového (sdruženého) potrubí .....	358
6.8.2.2.	Materiálové hodnoty jednotlivých složek a rozdělení napětí v sdruženém potrubí .....	359
6.8.2.3.	Kompensace tepelných dilatací .....	359
6.8.2.4.	Vodorovné zatížení potrubí zásypem (nadložím) kolmé na osu .....	360
6.8.2.5.	Použití programů pro pevnostní výpočty potrubí .....	361
6.8.3.	Možnosti použití předizolovaných potrubí .....	361
6.9.	Související technické normy .....	363
<b>7.</b>	<b>Pevnostní výpočty potrubí počítačem .....</b>	<b>365</b>
7.1.	Metoda konečných prvků a její využívání pro potrubní systémy .....	365
7.1.1.	Metoda konečných prvků .....	365
7.1.1.1.	Úvodní poznámky .....	365
7.1.1.2.	Podstata řešení .....	365
7.1.1.3.	Iterační kroky a kritéria konvergence .....	367
7.1.2.	Zjednodušení metody konečných prvků pro potrubní systémy .....	367
7.1.2.1.	Aplikace metody konečných prvků pro potrubní systémy .....	367
7.1.2.2.	Kritérium konvergence .....	367
7.1.2.3.	Okrajové podmínky .....	367
7.2.	Obvyklá základní struktura výpočetního programu pro pevnostní výpočet potrubí ...	368
7.2.1.	Préprocesor .....	368
7.2.2.	Solver .....	368
7.2.3.	Postprocesor .....	368
7.3.	Přídavné výpočtové moduly, které mohou základní strukturu programu doplňovat ..	369
7.3.1.	Dynamické výpočty .....	369
7.3.1.1.	Možnosti výpočtu programem pro pevnostní výpočty potrubí .....	369
7.3.1.2.	Spolupráce s programy pro hydrodynamický výpočet .....	370
7.3.1.3.	Dynamický postprocesor .....	370
7.3.2.	Potrubí v zemi .....	370
7.3.2.1.	Základní podmínky výpočtu .....	370
7.3.2.2.	Výpočtový model potrubí v zemině .....	370
7.3.3.	Laminátová (FRP) potrubí .....	371
7.3.3.1.	Možnosti výpočtu programem pro pevnostní výpočty potrubí .....	371
7.3.3.2.	Výpočet potrubního systému z FRP/GRP – všeobecné zásady .....	371
7.3.4.	Modul pro detailní výpočty složitých potrubních prvků metodou MKP .....	371
7.3.5.	Modul pro výpočet přírubového spoje .....	371
7.3.6.	Příklady jiných možných modulů .....	373
7.4.	Hodnocení výpočetních programů pro pevnostní výpočty potrubí a jejich výčet .....	373
7.4.1.	Druhy výpočetních programů potrubí .....	373
7.4.1.1.	Výčet nejznámějších programů počítající potrubní systém jako celek .....	373
7.4.1.2.	Výčet programů počítající jednotlivé části potrubí .....	374

7.4.1.3.	Výčet programů počítající potrubní přírubový spoj .....	374
7.4.2.	Kritéria pro hodnocení programů .....	374
7.5.	Zadávání všeobecných dat do programu .....	376
7.5.1.	Určení kódu či normy výpočtu.....	376
7.5.2.	Výpočtové databáze .....	376
7.5.3.	Zásady číslování uzlů (nodes) .....	376
7.6.	Související technické normy včetně norem, které je nutno zadávat ve výpočtovém programu .....	377
<b>8.</b>	<b>Bezpečnost, spolehlivost, životnost a stárnutí potrubí .....</b>	<b>379</b>
8.1.	Veličiny a jednotky všeobecné .....	379
8.2.	Bezpečnost a analýza rizik u potrubí v provozu .....	380
8.2.1.	Bezpečné technické řešení .....	380
8.2.2.	Analýza rizik provozu potrubí .....	380
8.2.2.1.	Nebezpečí překročení nejvyššího dovoleného tlaku či teploty .....	381
8.2.2.2.	Nebezpečí překročení korozního/erozního přírůstku .....	382
8.2.2.2.1.	Koroze – základní pojmy .....	382
8.2.2.2.2.	Erozní opotřebení – základní pojmy .....	383
8.2.2.2.3.	Možnosti kontroly postupu koroze/eroze .....	383
8.2.2.3.	Nebezpečí únavového lomu .....	384
8.2.2.3.1.	Úvodní teorie .....	384
8.2.2.3.2.	Možnosti kontroly únavového lomu .....	385
8.2.2.4.	Nebezpečí překročení maximální dovolené deformace způsobené creepem .....	386
8.2.2.4.1.	Teoretický úvod .....	386
8.2.2.4.2.	Možnosti kontroly creepu .....	387
8.2.2.5.	Nebezpečí a rizika pro potrubí uložená v zemi .....	387
8.2.3.	Mezní stavy, které se dají ošetřit projektem a neměly by tak způsobovat zbytková nebezpečí/rizika .....	387
8.2.3.1.	Pevnost potrubí – houževnatý lom .....	387
8.2.3.2.	Křehký lom .....	388
8.2.3.3.	Mezní stavy použitelnosti .....	389
8.2.4.	Minimalizace rizika/nebezpečí .....	389
8.2.4.1.	Minimalizace rizik/nebezpečí uvedených projektantem zařízení .....	389
8.2.4.2.	Minimalizace rizika/nebezpečí provozovatelem zařízení .....	389
8.2.5.	Analýza rizik a PED .....	390
8.2.5.1.	Všeobecné poznámky o PEDu .....	390
8.2.5.2.	Kategorizace potrubí podle PED .....	391
8.2.5.3.	Určení skupiny tekutiny .....	392
8.2.5.4.	Určení stavu tekutiny .....	392
8.2.5.5.	Definice nestabilního plynu .....	393
8.2.6.	Fitness-for-service .....	393
8.2.7.	Analýza rizik a připravovaný zákon o provozu VTZ .....	393
8.2.7.1.	Zákon o bezpečnosti práce v souvislosti s provozem VTZ .....	393
8.2.7.2.	Nařízení vlády o vyhrazených plynových zařízeních .....	394
8.2.7.3.	Nařízení vlády o vyhrazených tlakových zařízeních .....	394
8.3.	Spolehlivost u potrubí v provozu .....	394
8.3.1.	Základní pojmy .....	394
8.3.2.	Spolehlivost potrubí a metody jejího získávání .....	397
8.3.2.1.	Sdružená funkce hustoty pravděpodobnosti .....	397
8.3.2.2.	Pravidlo násobení částečných pravděpodobností .....	398
8.3.3.	Poruchové modely .....	398
8.3.4.	Křivka teoretické degradace .....	399
8.3.5.	Vanová křivka .....	400
8.3.6.	Výhody a nevýhody metody spolehlivosti .....	401

8.3.7.	Klasický příklad výpočtu pro potrubí i tlaková zařízení .....	401
8.3.7.1.	Obvodové napětí válce způsobené tlakem .....	401
8.3.7.2.	Mezní úchytky průměru D0 a tloušťky stěny h potrubí podle jednotlivých norem .....	401
8.3.7.3.	Mezní úchytky tlaku p v potrubí .....	402
8.3.7.4.	Výpočet stochastických účinků zatížení .....	402
8.3.7.5.	Získávání odolnosti potrubí .....	402
8.3.7.6.	Životnost a spolehlivost potrubí .....	402
8.4.	Stárnutí potrubí a jeho životnost .....	402
8.4.1.	Deterministické vztahy pro stárnutí potrubí .....	402
8.4.1.1.	Stárnutí podzemních potrubí .....	402
8.4.1.1.1.	Způsoby stárnutí podzemních potrubí .....	402
8.4.1.1.2.	Výpočet předpokládané zbytkové bezpečnosti .....	403
8.4.1.1.3.	Výpočet limitních rozměrů délku při poškození délkovou korozí .....	404
8.4.1.2.	Stárnutí nadzemních, tepelně namáhaných potrubí .....	407
8.4.1.2.1.	Způsoby stárnutí nadzemních, tepelně namáhaných potrubí .....	407
8.4.1.2.2.	Výpočet kovových potrubí - creep .....	407
8.4.1.2.3.	Výpočet kovových potrubí - únava .....	408
8.4.2.	Stárnutí a životnost potrubí ve stochastických vztazích .....	410
8.4.2.1.	Stárnutí a životnost dané korozi a/nebo erozi .....	410
8.4.2.1.1.	Teoretické zákonitosti .....	411
8.4.2.2.	Výpočty životnosti a celkové poškození únavou .....	411
8.4.2.2.1.	Teoretické zákonitosti .....	411
8.4.2.2.2.	Získání a zpracování provozního zatížení a jeho účinků .....	412
8.4.2.3.	Odolnost konstrukce proti únavě .....	413
8.4.2.3.	Nadměrná deformace způsobená creepem .....	415
8.4.2.3.1.	Teoretické zákonitosti .....	415
8.4.2.3.3.	Odolnost konstrukce proti creepu .....	416
8.5.	Diagnostika potrubí jako součást kontroly a údržby .....	416
8.5.1.	Diagnostika přístupného potrubí .....	416
8.5.1.1.	Používání NDT metod .....	416
8.5.1.2.	Zkouška těsnosti a tlaková zkouška .....	417
8.5.2.	Diagnostika potrubí v zemi a jinak nedostupných úseků potrubí .....	417
8.5.2.1.	Sledování potrubí v případě neskonzolidovaného podloží například po úniku kapaliny a změny podloží .....	417
8.5.2.2.	Elektromagnetická metoda metalických trub (metoda EDMET) .....	417
8.5.2.3.	Metoda DCVG .....	418
8.5.2.4.	Metoda MMM .....	419
8.5.2.5.	Využití satelitního dálkového průzkumu Země .....	419
8.6.	Ochrana proti stárnutí .....	419
8.6.1.	Společná opatření .....	419
8.6.2.	Ochrana proti stárnutí korozi vnějšku potrubí .....	419
8.6.2.1.	Klasifikace vnějšího prostředí .....	419
8.6.2.2.	Podmínky pro aplikaci nátěrů .....	420
8.6.2.3.	Normy pro nátěry .....	420
8.6.2.4.	Ochrana proti stárnutí vnějšku potrubí pro korozní agresivitu Im3 - ponor do půdy .....	420
8.6.2.4.1.	Izolace potrubí proti korozi v zemi .....	420
8.6.2.4.2.	Příklad použití .....	421
8.6.2.4.3.	Seznam norem týkající se izolace potrubí proti korozi v zemi .....	421
8.6.3.	Ochrana proti stárnutí potrubí napadeného zevnitř .....	421
8.6.3.1.	Korozní anebo erozní přídavek a jeho sledování v provozu .....	421
8.6.3.2.	Zanášení potrubí trvalým tvrdým sedimentem .....	421
8.6.3.3.	Čištění vnitřku potrubí .....	422
8.6.4.	Ochrana proti stárnutí materiálu potrubí únavou .....	422
8.6.5.	Ochrana proti stárnutí materiálu potrubí creepem .....	422
8.6.6.	Ochrana proti stárnutí potrubí kontrolou a údržbou podpěr .....	422



8.6.7.	Ochrana proti stárnutí potrubí kontrolou a údržbou vlnovcových kompenzátorů .....	422
8.6.8.	Ochrana proti stárnutí potrubí kontrolou a údržbou přírubových spojů .....	423
8.6.9.	Ochrana proti stárnutí potrubí kontrolou a údržbou armatur .....	423
8.7.	Související legislativa a technické normy .....	424
8.7.1.	Související legislativa .....	424
8.7.2.	Související technické normy .....	427
<b>9.</b>	<b>Atlas řešení problematických potrubních konstrukčních uzlů .....</b>	<b>429</b>
9.1.	O tomto atlasu .....	429
9.2.	Konkrétní provedení některých potrubních komponent .....	429
9.2.1.	Podpěry a závěsy.....	429
9.2.2.	Používání a druhy vlnovcových kompenzátorů .....	429
9.2.3.	Některé potrubní komponenty a konstrukční uzly .....	429
9.2.3.1.	Hladké ohyby vyrobené z trubky ohnutím .....	429
9.2.3.2.	Segmentové ohyby .....	430
9.2.3.2.	Svařované T-kusy a tvarovky .....	433
9.2.3.3.	Duplikové potrubí .....	435
9.3.	Všeobecně o izometriích v tomto atlasu .....	438
9.3.1.	Zásady kreslení izometrií v tomto atlasu .....	438
9.4.	Řešení požadavků tepelné kompenzace .....	439
9.4.1.	O nutnosti kompenzace délkové roztažnosti .....	439
9.4.2.	Tepelná kompenzace vodorovného potrubí svým tvarem .....	439
9.4.3.	Tepelná kompenzace svislého potrubí svým tvarem .....	440
9.4.4.	Tepelná kompenzace axiálními vlnovcovými kompenzátorů .....	441
9.4.5.	Tepelná kompenzace angulárními vlnovcovými kompenzátorů .....	442
9.4.6.	Kompenzace potrubí u T-kusů .....	442
9.4.7.	Kompenzace potrubí u bypassů .....	443
9.4.8.	Kompenzace potrubí u rozvaděče .....	443
9.4.9.	Kompenzace potrubí u ventilů .....	444
9.4.10.	Odchytky v tepelné kompenzaci u potrubí z plastů .....	444
9.4.10.1.	Kompenzace horizontálních potrubí svým tvarem .....	444
9.4.10.2.	Kompenzace horizontálních plastových potrubí pro uložení do korýtek .....	445
9.4.10.3.	Kompenzace plastových potrubí „pevnou montáží“ .....	446
9.4.11.	Příklady špatného řešení potrubí z hlediska zabránění kompenzace tepelné roztažnosti .....	446
9.4.11.1.	Umístění pevných bodů vedle sebe .....	446
9.4.11.2.	Vzpěr potrubí a následné zvlnění potrubí .....	446
9.4.11.3.	Chybné umístění vlnovcového kompenzátoru na potrubní větví .....	447
9.5.	Řešení potrubí u hrdel zařízení s omezeným zatížením .....	447
9.5.1.	Omezení zatížení hrdel výrobcem zařízení či aparátu .....	447
9.5.1.1.	Ocelová hrdla aparátů .....	447
9.5.1.2.	Hrdla běžných válcových výměníků .....	448
9.5.1.3.	Smaltovaná hrdla aparátů .....	448
9.5.1.4.	Hrdla laminátových nádob .....	448
9.5.1.5.	Hrdla plastových nádob .....	448
9.5.2.	Omezení zatížení hrdel technickými normami .....	449
9.5.2.1.	Omezení zatížení hrdel kotlů .....	449
9.5.2.2.	Omezení zatížení hrdel parní turbíny .....	449
9.5.2.3.	Omezení zatížení hrdel čerpadel .....	449
9.5.2.4.	Omezení zatížení hrdel deskových výměníků .....	450
9.5.2.5.	Omezení zatížení hrdel ventilů .....	450
9.5.3.	Řešení potrubí u vodorovných hrdel .....	450

9.5.3.1.	Potrubí u vodorovných hrdel, pouze podpěrami .....	450
9.5.3.2.	Potrubí u vodorovných hrdel, pomocí kompenzátorů .....	451
9.5.4.	Řešení potrubí u svislých horních hrdel .....	452
9.5.4.1.	Potrubí u svislých horních hrdel, pouze podpěrami .....	452
9.5.4.2.	Potrubí u svislých horních hrdel, pomocí kompenzátorů .....	453
9.5.5.	Řešení potrubí u svislých spodních hrdel .....	453
9.5.5.1.	Potrubí u svislých spodních hrdel, pouze podpěrami .....	453
9.5.5.2.	Potrubí u svislých spodních hrdel, pomocí kompenzátorů .....	454
9.5.6.	Příklady špatného řešení potrubí z hlediska přetížení hrdel .....	454
9.5.6.1.	Velký pohyb hrdla anebo malé dovolené zatížení hrdla .....	454
9.5.6.2.	Blízká vzdálenost hrdla a pevného bodu .....	454
9.5.6.3.	Použití vlnovcového kompenzátoru na hrdle v případě velkého tlaku média .....	455
9.6.	Řešení uložení potrubí při hydraulickém zatížení .....	455
9.6.1.	Potrubí u volného výtoku .....	455
9.6.2.	Potrubí okolo pojišťovacího zařízení .....	456
9.6.3.	Potrubí v případě existence hydraulického rázu .....	456
9.7.	Řešení potrubí při dynamickém zatěžování .....	456
9.7.1.	Řešení kmitání potrubí zásahem do tvaru kmitání .....	456
9.7.2.	Řešení potrubí přeladěním .....	457
9.7.3.	Řešení potrubí ztlumením .....	458
<b>10.</b>	<b>Použitá literatura a literatura pro další studium .....</b>	<b>459</b>
10.1.	Odborná literatura .....	459
10.2.	Firemní literatura .....	462
10.3.	Zajímavé internetové adresy .....	463
	<b>Slovo závěrem .....</b>	<b>465</b>