

Pevnostní výpočty potrubí počítačem i bez něj



© Václav Pekař, 2023

iPotrubí.cz, Vysoké Mýto, 2023

Obsah:

1. METODA KONEČNÝCH PRVKŮ A JEJÍ VYUŽÍVÁNÍ PRO POTRUBNÍ SYSTÉMY	5
1.1. Metoda konečných prvků	5
1.1.1. Úvodní poznámky.....	5
1.1.2. Podstata řešení - základní principy	6
1.1.3. Další postup	6
1.1.4. Iterační kroky a kritéria konvergence	7
1.2. Zjednodušení metody konečných prvků pro potrubní systémy	7
1.2.1. Aplikace metody konečných prvků pro potrubní systémy	7
1.2.2. Kritérium konvergence.....	8
1.2.3. Okrajové podmínky.....	9
2. OBVYKLÁ ZÁKLADNÍ STRUKTURA VÝPOČETNÍHO PROGRAMU PRO PEVNOSTNÍ VÝPOČET POTRUBÍ	10
2.1. <i>Préprocesor</i>	10
2.2. <i>Solver</i>	10
2.3. <i>Postprocesor</i>	10
3. MOŽNOSTI ROZŠÍŘENÍ ZÁKLADNÍ STRUKTURY VÝPOČETNÍHO PROGRAMU	12
3.1. <i>Společné vlastnosti těchto možností rozšíření.....</i>	12
3.2. <i>Dynamické výpočty.....</i>	12
3.2.1. Možnosti výpočtu programem pro pevnostní výpočty potrubí.....	12
3.2.2. Spolupráce s programy pro hydrodynamický výpočet.....	13
3.2.3. Dynamický postprocesor	13
3.3. <i>Laminátová (FRP) potrubí</i>	14
3.3.1. Možnosti výpočtu programem pro pevnostní výpočty potrubí.....	14
3.3.2. Výpočet potrubního systému z FRP/GRP – všeobecné zásady.....	14
3.4. <i>Potrubí z plastů</i>	15
3.5. <i>Potrubí v zemi</i>	15
3.5.1. Základní podmínky výpočtu	15
3.5.2. Výpočtový model potrubí v zemině	15
3.6. <i>Výpočet maximální velikosti plošné koroze/eroze při provozu</i>	16
4. PŘÍDAVNÉ VÝPOČTOVÉ MODULY, KTERÉ MOHOU ZÁKLADNÍ STRUKTURU PROGRAMU DOPLŇOVAT	17
4.1. <i>Společné vlastnosti těchto modulů</i>	17
4.2. <i>Modul pro výpočet přírubového spoje</i>	17
4.3. <i>Modul pro výpočet vlnovcových kompenzátorů.....</i>	18
4.4. <i>Modul pro výpočet anebo výběr podpěr a tuhých závěsů</i>	18
4.5. <i>Modul pro výpočet ocelové konstrukce pod podpěrami.....</i>	18
4.6. <i>Modul pro detailní výpočty složitých potrubních prvků metodou FEA.....</i>	19
4.6.1. Obecné podmínky	19
4.6.2. Výpočet hrdel a T-kusů.....	19

4.6.3. Výpočet SIF a koeficientů flexibility	19
4.6.4. Výpočet vzpěru, boulení stěny a jiné stabilitní problémy	19
4.7. Modul pro výpočty FFS metodou FEA.....	19
4.7.1. Obecné podmínky	19
4.7.2. Výpočet maximální lokální či důlkové koroze	19
4.7.3. Výpočet progresu únavového poškození	20
4.7.4. Výpočet limitního rozměru trhliny lomovou mechanikou.....	20
4.7.5. Výpočet progresu creepu.....	20
5. HODNOCENÍ VÝPOČETNÍCH PROGRAMŮ PRO PEVNOSTNÍ VÝPOČTY POTRUBÍ A JEJICH VÝČET	21
5.1. Druhy výpočetních programů potrubí	21
5.1.1. Výčet nejznámějších programů počítající potrubní systém jako celek.....	21
5.1.2. Výčet programů počítající jednotlivé části potrubí	22
5.1.3. Výčet programů počítající potrubní přírubový spoj	22
5.2. Kritéria pro hodnocení programů	23
6. ZADÁVÁNÍ VŠEOBECNÝCH DAT DO PROGRAMU	26
6.1. Určení kódu či normy výpočtu.....	26
6.2. Výpočtové databáze.....	26
6.3. Zásady číslování uzlů (nodes)	26
7. A NĚCO JDE I BEZ POČÍTAČE: ZJEDNODUŠENÁ VÝPOČTOVÁ ANALÝZA POTRUBÍ – NOSNÍKOVÁ METODA	27
7.1. Použité veličiny a jednotky.....	27
7.2. Zjednodušení používání nosníkové metody	28
7.3. Veličiny, které se získávají pomocí této metody.....	28
7.3.1. Zatížení a vnitřní síly a momenty	28
7.3.2. Osová napětí	29
7.3.3. Průhyby a deformace	29
7.3.4. Zatížení podpěr	30
7.4. Příklady používání zjednodušené výpočtové analýzy.....	30
7.4.1. Potrubí zatížená vlastní hmotností.....	30
7.4.1.1. Rovné dlouhé potrubí.....	30
7.4.1.2. Jednoduchý vetknutý nosník	31
7.4.1.3. Výpočet vzdálenosti podpěr.....	31
7.4.2. Potrubí zatížená tepelnou expanzí	33
7.4.2.1. Rovné dlouhé potrubí.....	33
7.4.2.2. Jednoduchý vetknutý nosník	34
7.4.2.3. Výpočet kompenzace pro přirozený tvar potrubí	34
7.4.2.4. Výpočet vyložení U-kompenzátoru.....	35
7.4.3. Potrubí zatížené pohybem podpěry	36
7.4.3.1. Prostý pohyb podpěry bez započítání vlastní hmotnosti potrubí.....	36
7.4.3.2. Pokles potrubí volně položené na konstrukci	37
7.4.3.3. Pokles potrubí pevně spojené s konstrukcí	38
8. A ZASE BEZ POČÍTAČE: GRAFY A NOMOGRAMY.....	39
8.1. Veličiny, které se získávají pomocí této metody.....	39
8.1.1. Síly a momenty.....	39
8.1.2. Osová napětí	39

8.1.3. Průhyby a deformace	39
8.2. Nomogramy pro určení tepelné roztažnosti.....	40
8.3. Nomogramy pro určení vzdálenosti podpěr.....	41
8.3. Nomogramy pro určení vnitřních napětí a reakčních sil.....	42
8.3.1. Výpočet pomocných koeficientů N a S.....	42
8.3.2. Potrubí tvaru L	42
8.3.3. Potrubí tvaru Z.....	43
8.3.4. Potrubí tvaru U	44
8.3.5. Potrubí složené	44
8.4. Nomogramy pro určení minimálních délek potrubí nutných ke kompenzaci	45
8.4.1. Potrubí tvaru L , výpočet minimální délky delšího ramene podle Přílohy Q, ČSN EN 13480-3.....	45
8.4.2. Potrubí tvaru L , výpočet minimální délky kratšího ramene	46
8.4.3. Potrubí tvaru L , výpočet minimální délky delšího ramene	47
8.5. Nomogramy pro určení rozměrů U-kompenzátoru.....	48
9. POUŽITÁ LITERATURA A LITERATURA PRO DALŠÍ STUDIUM.....	49
9.1. Odborná literatura.....	49
9.2. Související technické normy včetně norem, které je nutno zadávat ve výpočtovém programu	49
9.2.1. Pro ocel, kovy a ostatní houževnaté homogenní materiály	49
9.2.2. Normy pro lamináty	50
9.2.3. Další využívané normy	51
9.3. Firemní literatura.....	51
9.4. Zajímavé internetové adresy.....	52

1. Metoda konečných prvků a její využívání pro potrubní systémy

1.1. Metoda konečných prvků

1.1.1. Úvodní poznámky

Zatímco tlakové nádoby je možno počítat jednoduše metodou Design by formulae. A to vzorci, které byly odvozeny z membránové teorie, eventuálně z plastické únosnosti, u potrubního systému je těžké a velmi pracné vypočítat zatížení jednotlivých potrubních komponent ze zatížení celkového z tohoto důvodu se využívají speciální programy, které využívají metodu konečných prvků s tím, že konkrétní prvky mají blízko ke konkrétním potrubním komponentám.

Výsledky z počítačového programu jsou popsány v dalších kapitolách, jsou zde též různé mezní stavy potrubí, které jsou v této publikaci popsány. Nejproblematictější je vyhodnocení napětí, které je provedeno analýzou a kategorizací napětí. Vždy se zde tedy postupuje metodou Design by analysis. Použitá metoda pro uvedenou analýzu se jmenuje metoda konečných prvků. Metoda konečných prvků je velmi zjednodušeně vysvětlena v dalším.

Metoda konečných prvků je numerická metoda sloužící k simulaci průběhů napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tepla atd. na vytvořeném fyzikálním modelu. Její princip spočívá v diskreditaci spojitého kontinua do určitého konečného počtu prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech (nodech).

Software pro analýzu konečných prvků vytvoří síť milionů menších prvků a vytvoří tak úplný konstrukční tvar. Účinek zatížení, například vnitřní tlakové síly, se posoudí na každý prvek a poté se zkombinuje, aby se dospělo ke konečnému výsledku pro celé zařízení nebo konstrukci.

Metoda konečných prvků se objevila v polovině padesátých let pod označením tuhostní analýza. V inženýrské praxi je to metoda maticová. Použití MKP znamená řešit rozsáhlé výpočty lineárních rovnic, případě vlastních čísel a tvarů, které jsou upraveny do matic. Proto je vývoj této metody úzce spjat s rozvojem počítačů, bez nichž by její použití nebylo myslitelné. Výhodnost metody konečných prvků záleží v možnosti automatizace řešení složitých technických problémů, ve vysokém stupni přesnosti výsledků a v možnosti správně vystihnout skutečné vlastnosti konstrukcí.

1.1.2. Podstata řešení - základní principy

Při aplikaci metody konečných prvků se konstrukce považují za soustavu konstrukčních elementů, vzájemně spojených v konečném počtu uzlových bodů. Základní rovnice elementu v prostoru je potom:

$$\mathbf{f} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{u}$$

kde $\mathbf{K}$ je matice tuhosti,

$\mathbf{u}$ je vektor posunů skládající se z ve sloupcové matici napsaných tří poměrných posunů a tří poměrných otáčení

$\mathbf{f}$ je vektor sil skládající se z ve sloupci napsaných ve sloupcové matici tří sil a tří momentů

Rozepíšeme-li tuto rovnici, pak platí:

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & K_{26} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ K_{61} & K_{62} & K_{63} & K_{64} & K_{65} & K_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ \varphi_x \\ \varphi_y \\ \varphi_z \end{Bmatrix}$$

Konstrukčních elementů může být několik druhů, a to lineární, rovinný a prostorový, s tím, že lineární a rovinný může být umístěn v rovině i prostoru, prostorový samozřejmě lze umístit jen v prostoru (kontinuu).

Tento postup můžeme nazvat tuhostní metodou, obrácenou metodu můžeme nazvat deformační a má tvar:

$$\mathbf{u} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{f}$$

kde $\mathbf{A}$ je matice poměrných deformací (na jednotku síly),

$\mathbf{u}$ je vektor posunů skládající se z ve sloupcové matici napsaných tří poměrných posunů a tří poměrných otáčení

$\mathbf{f}$ je vektor sil skládající se z ve sloupci napsaných ve sloupcové matici tří sil a tří momentů.

V některých programech jsou použity i metody kombinované.

1.1.3. Další postup

Pokud jsou známy vztahy mezi silami a posuvy uzlových bodů, je možné provést řešení vlastností konstrukce. Pružná konstrukce se rozdělí na konečný počet elementů spojené vzájemně v konečném počtu uzlových bodů. V těchto uzlových bodech je nutno zavést síly, reprezentující účinek napětí na okrajích prvků. Je-li takováto idealizace provedena tak, že je z hlediska přesnosti řešení přijatelná, je možné za pomoci počítače provést numerické řešení problému matematické teorie pružnosti.

Aby se řešení problému pružného kontinua převedlo na metodicky stejný postup řešení jako u soustavy konstrukčních prvků, je nutné provést tyto úkony:

- a) Rozdělit těleso konstrukce myšlenými řezy na určitý konečný počet prvků. Uvážit, že komponenty jsou vzájemně spojeny v konečném počtu uzlových bodů umístěných na okrajích prvku. Posuvy těchto uzlových bodů se považují za základní neznámé.
- b) Zvolí se funkce, které se považují za definice posuvů bodů uvnitř prvků a které se vyjádří pomocí posuvů uzlových bodů. Obvykle se tyto funkce volí v lineárních tvarech, neboť vzhledem k tomu, že jde o první iteraci, je tento tvar výhodný, jestliže je zároveň dodržena podmínka spojitosti posuvů na okrajích prvků.
- c) Z takto zvolených funkcí posuvů lze vyjádřit poměrné deformace uvnitř prvků. Pomocí obecného vyjádření Hookova zákona, lze definovat napětí ve všech bodech prvků
- d) Stanoví se podmínka rovnováhy ve všech uzlových bodech po zavedení sil, soustředěných v těchto uzlových bodech od posuvů těchto bodů, vnějšího zatížení včetně objemových sil a sil od tepelných dilatací.

V uzlových bodech mohou též působit tyto okrajové podmínky:

1. Jsou to silové okrajové podmínky, které jsou většinou to, co se uvádí pod pojmem zatížení konstrukce
2. Jsou to geometrické okrajové podmínky

Používá se maticový zápis, který umožňuje velkou přehlednost výpočtu, umožňující sestavení výkonného software. Maticový zápis používá matici sil, matici posunů a matici tuhosti. Aplikace metody konečných prvků má tedy smysl jen tehdy, je-li k výpočtu použito výpočetní techniky.

1.1.4. Iterační kroky a kritéria konvergence

Při zhušťování sítě konečných prvků, tj. při každé další iteraci, se numerické řešení musí blížit k řešení odpovídajícího reálného problému. Tento požadavek je zaručen při splnění alespoň minimálních požadavků spojitosti použitého typu prvku s deformačními parametry (spojitost v posuvech na hranicích u lineárních prvků s deformačními parametry u, v, w a spojitost 1. derivace posuvů navíc u prvků s rotacemi). Ve všeobecnosti však kritérium pro ukončení iteračního procesu můžeme volit různě. Prvotní neznámou jsou však posuvy, proto je nej přirozenější použít toto posuvové kritérium.

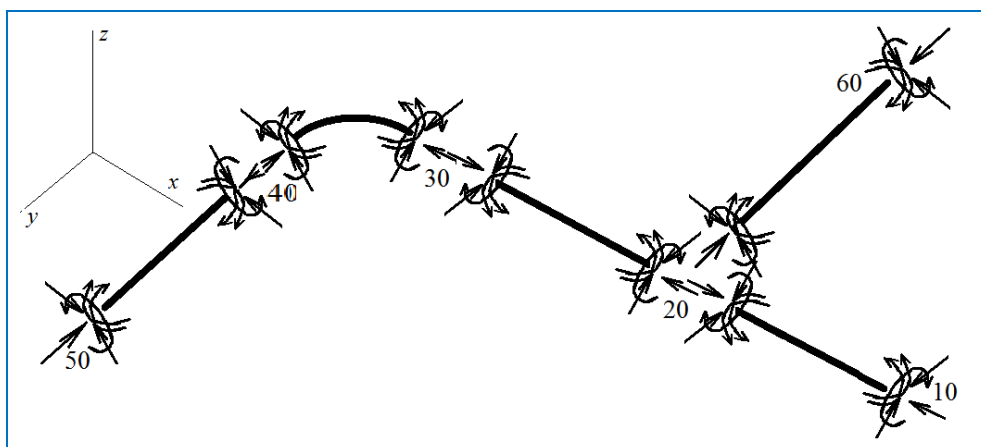
1.2. Zjednodušení metody konečných prvků pro potrubní systémy

1.2.1. Aplikace metody konečných prvků pro potrubní systémy

Potrubí se skládá především z takového typu elementu, který má dva uzlové body (nody), např. rovná trubka, redukce, koleno. V uzlovém bodu se může setkávat více elementů. Nody jsou místa, kde se prvek stýká s okolními komponenty potrubí anebo

podpěrou či hrdlem (viz okrajové podmínky). Jde o lineární element v prostoru. Podpěr je několik typů podle reakcí (síly, momenty), podle pružnosti jednotlivých reakcí a podle tlumení vibrací jednotlivých reakcí. Hrdlo se může různě pohybovat, a mít různé reakce vůči potrubí.

Jednotlivé potrubní komponenty, např. rovná trubka, redukce, koleno, jsou samy o sobě dostatečně zpracovány klasickými metodami, které jsme si představili v prvním díle této knihy.



obr. 1.1. Lineární konstrukční elementy v prostoru se očíslovanými nody a se znázorněním šesticí sil a momentů

Výpočet potrubního systému se takto zjednodušuje. A to především ve fázi, kdy je nutno rozdělit těleso konstrukce na určitý konečný počet elementů. Následně se zjednodušují i všechny fáze výpočtu, které jsou uvedeny v první kapitole. Podobná je aplikace MKP pro příhradové ocelové konstrukce.

Problémy mohou nastat při modelování T-kusů, kdy je normou předepsáno zavedení koncentrátorů napětí (SIFů) podle normy. V těchto místech potom vyjdou napětí, která, jak ukazuje literatura, mnohdy neodpovídají realitě. Jsou však vždy vyšší, tedy na konzervativní straně.

V těchto místech můžeme použít speciálních programů, které využívají jiný systém, např. systém prostorových elementů v prostoru. I tyto programy jsou uvedeny ve větě v další kapitole.

1.2.2. Kritérium konvergence

V našem případě nemůžeme v iteračním procesu používat zhušťování sítě konečných prvků, protože jde prvky, které nemá smysl zmenšovat. Ve všeobecnosti však kritérium pro ukončení iteračního procesu můžeme volit různě. Prvotní neznámou jsou však posuvy, proto je nejpřirozenější použít toto posuvové kritérium. Je zde tedy možno zužovat anebo rozšiřovat tolerance způsobené nelineárním třením u kluzných podpěr, a úhlem

vychýlení závěsů. Z tohoto důvodu můžeme též změnit konstanty tření anebo úhel či délku závěsu.

1.2.3. Okrajové podmínky

Potrubní systémy mají tyto okrajové podmínky:

1. Jsou to „silové okrajové podmínky“, které jsou většinou to, co se uvádí pod pojmem zatížení potrubí – viz příslušné kapitoly (tj. tlak a teplota media, klimatická zatížení, tlak půdy atd.). Jak zadávat tyto okrajové podmínky zatížení potrubí. je uvedeno v dalších kapitolách.

2. Jsou to „geometrické okrajové podmínky“, tj. začátek a konec potrubí a jeho upevnění (např. hrdlem k aparátu) a všechny druhy podpěr. Jak zadávat tyto okrajové podmínky – podpěry a hrdla zařízení. je uvedeno v dalších kapitolách.

2. Obvyklá základní struktura výpočetního programu pro pevnostní výpočet potrubí

2.1. Préprocesor

Funkce préprocesoru může obsahovat tyto funkce:

- konfigurace programu
- vytváření modelu potrubí, je možné též přetáhnout hotový model ze speciálních programů pro vytváření modelu
- přiřazení materiálu a zatížení,
- přiřazení druhu izolace a její tloušťku
- přiřazení hustoty média
- výběr dat z databází a ukládání dat do databází,
- přiřazení tlaků a teplot média v různých kombinacích
- přiřazení zkušebního tlaku a hustoty druhu média pro tlakovou zkoušku
- vytváření a přiřazování ostatních statických příležitostných zatížení
- vytváření a přiřazování dynamických příležitostných zatížení

Vytváření modelu znamená, že je nutno zadat postupně zadávat jednu potrubní komponentu za druhou. Tj. nutno zadat druh komponenty (trubka, koleno, redukce atd.) souřadnice začátku a konce (je možno je zadávat různými způsoby, různých souřadných soustav a úhlů) a průměr, tloušťka stěny, záporná tolerance tloušťky stěny a korozní/erozní přírůstek tloušťky stěny. K těmto údajům komponenty je nutno postupně přiřazovat ostatní vyjmenovaná data. Při vytváření modelu se musí též určit místa, kde budou umístěny podpěry či závěsy.

Musí zde být též možnost kombinací různých vyjmenovaných zatížení.

2.2. Solver

Funkce procesoru zjednodušeně znamená vlastní výpočet podle zvoleného kódu. Podle upravené metody konečných prvků z předchozí kapitoly 4.3. "Zjednodušení metody konečných prvků pro potrubní systémy"

Měla by zde být též ošetřena konvergence programu. Mělo by zde být označeno kritérium pro ukončení iteračního procesu a způsob změny iteračních limitů.

2.3. Postprocesor

Funkce postprocesoru se může dělit na dvě části tj. část statickou a dynamickou. Statický postprocesor znamená postprocesor pro výpočty, které nejsou dynamické. Může obsahovat:

- Seznam a možnost podrobné volby výsledných hodnot pro určená zatížení. Výsledné hodnoty musí minimálně obsahovat hodnoty napětí a porovnání s dovolenými v určených

nodech, maximální posuvy a průhyby v určených nodech a zatížení podpěr za tepla, za studena i v kombinacích s příležitostnými zatíženími, a to vše v globálních i lokálních souřadnicích.

- Vytváření a uspořádání výpočtové zprávy, se zvolenými výsledky a s možností zopakování zadání
- Grafické zobrazení potrubí včetně barevného odlišení napětí, animace průhybů apod.
- Prostor pro výsledek specifikace pružných a konstantních závěsů a podpěr.

3. Možnosti rozšíření základní struktury výpočetního programu

3.1. Společné vlastnosti těchto možností rozšíření

Zjednodušeně řečeno: Zde v této kapitole jsou vyjmenována rozšíření, která využívají preprocesorem vytvořený výpočtový model a též mohou z části anebo úplně využívat solverem provedené řešení. Postprocesor však mohou mít svůj.

Mohou být tedy i jiné zde nevyjmenované možnosti rozšíření.

3.2. Dynamické výpočty

3.2.1. Možnosti výpočtu programem pro pevnostní výpočty potrubí

Jestliže chceme dynamický výpočet provádět na výpočtovém programu pro potrubí, musí mít program speciální dynamický solver a dynamický postprocesor. Musí být schopen řešit soustavu dynamických rovnic.

V případě, že chceme, aby byl program schopen řešit v návaznosti na dynamický výpočet i vysokocyklovou únavu, kdy nám udává např. počet cyklů do poruchy reálný počet cyklů anebo jejich poměr, musíme zde mít možnost zadat Wöhlerovu křivku a ostatní součinitele ovlivňující vysokocyklovou únavu, ale o tom více v kapitole týkající se únavy.

Přesněji a rozsáhleji je toto téma rozebráno v díle III. Teorie, dynamika v této knize. Modální analýzu budeme chápat jako výpočet modů. Každý modus se skládá z vlastní frekvence potrubí a z tvaru této vlastní frekvence způsobenou deformací potrubí. Modů je velmi mnoho a bývají svázány konstrukcí potrubí. Vlastní frekvence se používají při vyladění potrubí tak, aby některá z vlastních frekvencí nebyla v rezonanci s nějakou budící frekvencí.

Harmonická analýza. Všeobecně můžeme říci, že odezva systému při harmonickém, tj. sinusovém zatěžování se dá vyjádřit pomocí rovnic, kde na pravé straně je vyjádřená budící síla, která má harmonický (sinusový) průběh. Jako výsledek harmonické analýzy je informace, zda potrubní systém pevnostně anebo únavově vydrží anebo nevydrží nastalé kmitání při zadaném harmonickém buzení. V záporném případě nám umožňuje navrhnout opatření pro kladný výsledek výpočtu.

Spektrální analýza ve všeobecnosti reprezentuje pokus odhadnout úplnou odezvu konstrukce. Analýza spektra odezvy se provádí v následujících krocích:

1. Mody jsou vypočítány algoritmem pro výpočet vlastních frekvencí a tvaru vlastní frekvence pro potrubí.
2. Výpočet odezvy konstrukce potrubí odpovídající frekvenci každého modu při daném zatížení.

3. Výpočet úplné odezvy, která je určena kombinací jednotlivých modálních odezev, použitím metod uvedených dále.

Spektrální analýza impulzů (rázů). Pro zatížení impulzem si zatěžovací spektrum musíme odvodit z průběhu působení síly v závislosti na čase pomocí koeficientu DLF. Spektrum odezvy je v tomto případě tabulka s koeficienty DLF v závislosti na vlastní frekvenci potrubí. Jako impuls můžeme brát: akci pojišťovacího ventilu, hydraulický ráz anebo průchod vícefázové tekutiny. Jako výsledek spektrální analýzy impulzů je informace, zda potrubní systém pevnostně vydrží anebo nevydrží uvedený ráz. V záporném případě nám umožňuje navrhnout opatření pro kladný výsledek výpočtu.

Seizmická spektrální analýza. V případě seismického zatížení tuto odezvu reprezentuje seismické návrhové zatěžovací spektrum, které dáno v normách. A které je různými koeficienty odpovídajícím různým vlastnostem z řetězce *zdroj seismicity. prostředí – konstrukce (pouze v případě nadzemního potrubí) – potrubí* modifikováno, pro co nejvěrnější zachycení reality. Jako výsledek seismické spektrální analýzy je informace, zda potrubní systém pevnostně vydrží anebo nevydrží zadané seismické návrhové zatěžovací spektrum. V záporném případě nám umožňuje navrhnout opatření pro kladný výsledek výpočtu.

Časová posloupnost působení rázů (Time History). Analýza časové posloupnosti je přesnější, než analýza odezvového spektra, kterou jsme se až dosud zabývali. Analýza časové posloupnosti nám umožňuje získat výsledky tak, jak se vyvíjejí v čase. Umožňuje seřadit více rázů časově za sebou. Jako výsledek časové posloupnosti působení rázů je informace, zda potrubní systém pevnostně vydrží anebo nevydrží. V záporném případě nám umožňuje navrhnout opatření pro kladný výsledek výpočtu.

3.2.2. Spolupráce s programy pro hydrodynamický výpočet

Dynamické výpočty, které jsou zapříčiněny hydraulickým rázem a kde nám pro výpočet nezbyvá nic jiného než ráz definovat jako konstantní sílu působící po určitý čas, můžeme zpřesnit použitím speciálního programu pro hydraulický výpočet definující hydraulický ráz definovat přesněji. Je žádoucí, aby oba programy měli možnost předávání modelu potrubí a po výpočtu výsledného tvaru jednotlivých hydraulických rázů.

Za určitých podmínek může být tento hydrodynamický program přímo jedním z modulů základního programu.

3.2.3. Dynamický postprocesor

Dynamický postprocesor znamená postprocesor pro dynamické výpočty. Může obsahovat:

- Seznam a možnost podrobné volby výsledných hodnot pro určená dynamická zatížení. Výsledné hodnoty musí minimálně obsahovat hodnoty napětí a porovnání

s dovolenými v určených nodech, maximální posuvy a průhyby v určených nodech a zatížení podpěr v kombinacích s příležitostnými dynamickými zatíženími, a to vše v globálních i lokálních souřadnicích. Též by měl obsahovat seznam vlastních frekvencí.

- Vytváření a uspořádání výpočtové zprávy dynamické části, se zvolenými výsledky a s možností zopakování zadání
- Grafické zobrazení potrubí dynamicky zatíženého, včetně barevného odlišení napětí, animace vlastních frekvencí apod.

3.3. Laminátová (FRP) potrubí

3.3.1. Možnosti výpočtu programem pro pevnostní výpočty potrubí

Výpočtový program pro výpočet potrubí musí být opatřen speciální aplikací pro solver pro laminátová potrubí korespondující s některou z uvedených norem a některý i databází od velkých výrobců těchto potrubí. Každopádně zde musí být i vstup dat pro materiály menších výrobců a speciální materiály.

Ve výpočtovém programu se provádějí podobné výpočty pro celek, jako dělá výrobce laminátových prvků pro svoje výrobky, kde však některá trvalá zatížení, daná vzdáleností podpěr a všechna příležitostná zatížení pouze předpokládá.

U potrubí z kompozitů, které je nehomogenní, skládá se ze dvou materiálů a trubky se vyrábí v délkách, které bývají omezené a protože jsou nehomogenní, těžko se spojují systémem u kovů a plastů známým jako svařování, musíme brát v úvahu i druhé hlavní napětí.

Přesněji a rozsáhleji je toto téma rozebráno v kapitole 4. Plastová a laminátová potrubí této knihy.

3.3.2. Výpočet potrubního systému z FRP/GRP – všeobecné zásady

Maximální napětí. Obvodové jednotkové síly jsou zachytávány obvodovým vinutím a částečně též šroubovým vinutím. V síťové teorii napětí se zanedbávají napětí, která zatěžují vlákno kolmo na směr vinutí. Osově jednotkové síly jsou zachytávány pouze šroubovým vinutím, neboť v síťové teorii napětí se zanedbávají napětí, která zatěžují vlákno kolmo na směr vinutí. Dále tato vypočtená napětí musí být menší než napětí dovolené, které se vypočítává z podélné pevnosti v tahu materiálu obvodového a šroubovitého vinutí, která se vydělí návrhovým součinitelem K .

Maximální deformace. Kritériem lomu zde nejsou maximální dosažitelná napětí v jednotlivých směrech, ale maximální dovolené deformace. Z jednotlivých vypočítaných napětí v předcházející kapitole se vypočítá poměrná deformace pomocí Hookova zákona. Maximální dovolená poměrná deformace se odvozuje z vlastností pryskyřice, obvykle se stanoví na úrovni 10% poměrné deformace na mezi pevnosti použité pryskyřice.

Výpočet potrubí z FRP/ GRP podle normy ISO, tj. podle ČSN EN ISO 14692-3(450040) Naftový a plynárenský průmysl – Sklolaminátové potrubí (GRP) – část 3. Systém návrhu potrubí, která se stává celosvětovým standardem pro výpočty laminátových potrubí.

3.4. Potrubí z plastů

Protože plasty i kovy jsou potrubí homogenní, je nutné upravit pouze jiné zadání materiálových hodnot a to ve dvou skupinách, tj. pro okamžik zpuštění provozu a pro plánovanou životnost. A dále možnost výpočtu jiných SIFů a koeficientů flexibility. To znamená celkově rozšířit možnosti norem a materiálových databází.

Je zde tak možnost výpočtu podle ruské normy anebo podle celé skupiny norem evropských, které jsou uvedeny v kapitole 4. Plastová a laminátová potrubí této knihy, kde jsou tyto možnosti rozebrány přesněji.

3.5. Potrubí v zemi

3.5.1. Základní podmínky výpočtu

Aby mohla být pevnost potrubí umístěného v zemi počítána výpočtovým programem pro potrubí, musí být program uzpůsoben pro výpočty potrubí v zemi, to znamená, musí mít instalovaný zvláštní procesor pro výpočet náhradního zatížení, který je rozšířením preprocesoru.

Takovéto rozšíření preprocesoru samo spočítá požadované náhradní zatížení od zeminy a může brát v úvahu i jiné charakteristiky, které si může spočítat z již zadaných dat, například příčnou tuhost potrubí.

Přesněji a rozsáhleji je toto téma rozebráno v díle VI. Teorie, potrubí v zemi v této knize.

3.5.2. Výpočtový model potrubí v zemině

Výpočet potrubí v zemi se provádí tak, že výpočtový program nahradí působení zeminy náhradním zatížením. Náhradní zatížení ve všech třech osách simuluje zatížení zeminou. U každé osy působí zatížení proti sobě v kladné i záporné orientaci. Jedná se o tyto osy: ve vertikálním směru kolmém na osu potrubí, ve směru osy potrubí a ve směru horizontálním kolmém na osu potrubí.

V případě, že je potrubí zatěžováno tepelnou roztažností, tj. je teplejší než okolní zemina, pak zemina brání tepelné dilataci potrubí dvěma způsoby:

- v případě dilatace rovné trubky je zde tření mezi zeminou a povrchem trubky.
- v případě ohybu či oblouku (ať přirozenému anebo jako součást U-kompenzátoru, je zemina stlačována, což vytváří velký odpor).

Obojí se však dá nahradit uvedeným systémem náhradního zatížení. Takže, když výpočtový program vypočítá náhradní zatížení, určí si velikost a umístění náhradního zatížení. Každý prvek z náhradního zatížení má bilineární tvar.

3.6. Výpočet maximální velikosti plošné koroze/eroze při provozu

Výpočet je součástí bylíku výpočtů zabývajícím se provozem s názvem „Fitness for service“. Jedná se o výpočet maximální velikosti plošné koroze anebo eroze či jiného plošného úbytku materiálu potrubí.

V provozu může mít potrubí vlastní rezervu proti korozi větší, než předpokládá výpočet koroze v projektu. Důvody jsou takovéto. Po výpočtu teoretické tloušťky stěny se připočítávají přírážky zohledňující korozi (tj. korozní přírážka), záporná výrobní tolerance tloušťky stěny trubky a technologická přírážka zohledňující výrobní úbytky. Tato vypočítaná tloušťka stěny se zaokrouhluje jediné nahoru, a to k nejbližší vyráběné anebo k nejbližší objednatelné tloušťce stěny. Toto zaokrouhlení může mít vzhledem ke korozní přírážce podstatnou velikost. O tloušťku stěny danou tímto zaokrouhlením se může zvýšit korozní životnost potrubí. Dále může být průběh korozního úbytku v čase, může být jiný, než se při výpočtu předpokládalo.

Proto je důležité po změření zbytkové tloušťky stěny potrubí, opětovně výpočtem potvrdit pevnost potrubí. Může to provést jen mírné přizpůsobení původního programu.

4. Přídavné výpočtové moduly, které mohou základní strukturu programu doplňovat

4.1. Společné vlastnosti těchto modulů

Zde jsou vyjmenována rozšíření, která využívají výsledky výpočtu původního programu a mají tak svoji vlastní strukturu. V některých případech se zadávají i dodatečné informace důležité pro jednotlivé moduly.

Mohou být tedy i jiné zde nevyjmenované možnosti modulů.

4.2. Modul pro výpočet přírubového spoje

Jestliže chceme výpočet přírubového spoje provádět na základním výpočtovém programu pro potrubí, musí mít program speciální procesor pro výpočet přírubového spoje. Jde o úplně jiný systém výpočtu, než je systém výpočtu potrubí jako celek, ze základního programu si však může brát zatížení přírubového spoje. Přesněji a rozsáhleji je toto téma rozebráno v příslušných kapitolách v díle II. této knihy.

Kontrola tlaku na těsnění. Velmi často bývá do výpočtových programů zapracován jednoduchý výpočet kontroly tlaku na těsnění v přírubovém spoji od zatížení potrubního systému. Na přírubové těsnění (všeobecně na přírubový spoj) působí: Vnitřní tlak v potrubí, ohybový moment z potrubního systému a osová síla z potrubního systému. Tyto zatěžovací veličiny si program bere přímo z výpočtu a ve výsledcích nám signalizuje, zda je anebo není vypočítaný tlak na těsnění větší, než je tlak dovolený. Smysl tohoto výpočtu je v tom, že výpočtový program kontroluje, zda se těsnění nezmačkne příliš, a to je tak, že ztratí pružnost a po odlehčení se již nevrátí do původního tvaru a netěsní. Je to jednoduchý výpočet a pro úplné zhodnocení šroubového spoje nepostačuje.

Pevnostní výpočet přírubového spoje. Přírubový spoj je vystaven za provozu vysokému namáhání, neboť se zde sečítají různé vlivy. Nejvíce je přírubový spoj namáhán nutným utažením přírubových šroubů, které vyvolává jeho předpětí. Další namáhání vznikne působením vnitřního přetlaku a také působením tepelného šoku stěnou za provozu. K uvedeným namáháním přistupují další namáhání, zejména od sil a momentů vyvolaných teplotní dilatací potrubí, jeho vlastní vahou apod. Za ohřevu a chladnutí se zvyšuje namáhání přírubového spoje, neboť změna teploty přírubového listu a přírubových šroubů je různá. Jde o výpočtovou metodu Taylor-Forgeovu. V současné době je v normách povolena metoda tato jako jedna z alternativ.

Z výpočtu přírubového spoje je nutné jako výstup udávat tyto údaje:

- specifikace nebo potvrzení specifikace těsnění
- specifikace spojovacího materiálu (tj. šroubů, matic, podložek, pružných podložek atd.)
- specifikace maziva či odpovídající koeficient tření

- utahovací moment šroubového spoje. Předpokládáme použití normalizovaných přírub specifikovaných v potrubní třídě. I těsnění a spojovací materiál se poté zanesou do potrubní třídy. Mazivo a utahovací moment se uvádí ve vhodném dokumentu projektu.

Těsnostně-pevnostní výpočet přírubového spoje podle EN1591 je druhá alternativa pro výpočet šroubového spoje. Zdroje emisí by zejména u vybraných anorganických a organických látek neměly překročit předepsané hodnoty. Povolené emise – jinými slovy množství netěsností – jsou tím definovány. Tři třídy netěsností pro měkká těsnění odpovídají množstvím netěsností:

- a) třída L1,0 (1 mg/s.m): požadavkům pro utěsnění většiny kapalin a nízkotlakých plynů, např. u rozvodů tlakového vzduchu;
- b) třída L0,1 (0,1 mg/s.m): která přibližně kopíruje hodnotu 1 ml/min dusíku a je vhodná pro utěsnění kapalin s nízkým povrchovým napětím (např. naftu) a parám a plynům s vyšším přetlakem a teplotou;
- c) třída L0,01 (0,01 mg/s.m): vhodná pro utěsnění nebezpečných látek, definovaných jako hořlavé, výbušné, jedovaté, toxické apod.)

Podmínky pro dosažení vysoké těsnosti jsou:

- Užití těsnění, s vlastnostmi zjištěnými dle norem a s vystaveným certifikátem
- Těsnostně-pevnostní výpočet dle ČSN EN 1591-1
- Montáž přírubového spoje s odborně vyškolenými pracovníky montáže a údržby příp. s měřením utahovacích sil ve spoji.

Úkolem průkazu těsnosti je určit velikost předpětí spoje, která je nutná pro dosažení těsnících vlastností těsnění při montáži a dodržení potřebného tlaku na těsnění v provozu (viz třídy L). Úkolem průkazu pevnosti je určit, zda všechny části přírubového spoje odolají silovému zatížení a to opět při montáži a za provozu.

Z výpočtu přírubového spoje je nutné jako výstup udávat tyto údaje:

- specifikace nebo potvrzení specifikace těsnění
- specifikace spojovacího materiálu (tj. šroubů, matic, podložek, pružných podložek atd.)
- specifikace maziva
- utahovací moment šroubového spoje.

4.3. Modul pro výpočet vlnovcových kompenzátorů

4.4. Modul pro výpočet anebo výběr podpěr a tuhých závěsů

4.5. Modul pro výpočet ocelové konstrukce pod podpěrami

Výpočet ocelové konstrukce umístěné pod podpěrami konstrukce. Pro výpočet potrubí stačí jen znát jen tuhost této konstrukce.

4.6. Modul pro detailní výpočty složitých potrubních prvků metodou FEA

4.6.1. Obecné podmínky

Jak již bylo v úvodních kapitolách psáno, základní výpočtové schéma uvedených programů je zjednodušená metoda MKP. Výpočet potrubního systému je zjednodušen tak, jak je popsáno v kapitole 4.2. tohoto dílu. Zjednodušení se týká především počtu prvků, kdy každý potrubní element znamená jeden potrubní prvek. Následně se zjednodušují i všechny fáze výpočtu, které jsou uvedeny v první kapitole.

Jde o analýzu konečných prvků (FEA), která využívá nezjednodušenou formu MKP, která je popsána v kapitole 4.1. tohoto dílu, a která poskytuje přesnější výsledky. Pomocí FEA lze udělat úplný detailní výpočet tvarovek anebo vypočítat přesnou hodnotu SIF. Tato metoda poskytuje přesnější výsledky. Dále lze FEA dále aplikovat pro výpočty Fitness -For- Service (tj. výpočet maximální velikosti vad v provozu)

4.6.2. Výpočet hrdel a T-kusů

Výpočet hrdel nádob podle WRC Bulletinu, či ustanovení jiných norem

4.6.3. Výpočet SIF a koeficientů flexibility

Problémy nastávají v případě složitějších prvků, např. T-kusů, kdy je normou předepsáno zavedení koncentrátorů napětí (SIFů) podle normy. V těchto místech potom vyjdou napětí, která, jak ukazuje literatura, jsou vyšší a někdy významně, než je realita. Proto je do programu zaveden tento modul.

4.6.4. Výpočet vzpěru, boulení stěny a jiné stabilitní problémy

4.7. Modul pro výpočty FFS metodou FEA

4.7.1. Obecné podmínky

Jedná se o výpočtový modul pro „Fitness for service“ tj. jde o výpočet maximální velikosti vad, např. koroze, trhliny v provozu potrubí.

I zde se využívá výpočetní aparát FEA, její princip byl posán v kapitole 7.4.6.1. Obecné podmínky.

4.7.2. Výpočet maximální lokální či důlkové koroze

Jednoduše řečeno, jde o aplikaci FEA pro skutečný tvar potrubí po změření úbytku materiálu.

4.7.3. Výpočet progresu únavového poškození

Má v principu tyto etapy:

- a) Zpracování účinků zatížení způsobující poškození na únavu (např. metodou stékajícího deště)
- b) Provedení analýzy FEA a Neuberovy korekce pro plasticitu
- c) Aplikace vztahů pro výpočet únavy a únavové křivky
- d) Určení únavového poškození jedním cyklem
- d) Odvození počtu cyklů do poruchy.

Je tedy vidět, že je kromě analýzy FEA je třeba ještě přidat poměrně rozsáhlý program.

4.7.4. Výpočet limitního rozměru trhliny lomovou mechanikou

Má v principu tyto etapy:

- a) Vypracování Diagramu hodnocení poruch,
- b) Výpočet referenčního napětí a faktoru intenzity napětí metodou FEA
- c) Získání či výpočet lomové houževnatosti a meze kluzu materiálu
- d) Dosazení materiálových vlastností pro lomovou mechaniku do diagramu hodnocení poruch
- e) Výpočet kritické velikosti trhliny

Je tedy i zde vidět, že je kromě analýzy FEA je třeba ještě přidat poměrně rozsáhlý program.

4.7.5. Výpočet progresu creepu

5. Hodnocení výpočetních programů pro pevnostní výpočty potrubí a jejich výčet

5.1. Druhy výpočetních programů potrubí

Protože tato publikace nechce dělat žádnému z výpočetních programů reklamu, omezíme se jen na jejich výčet a řekneme požadavky, které by měly tyto výpočetní programy splňovat a necháme tak na uživateli, aby si sám mohl jednotlivé programy vyhodnotit.

Uvedeme zde programy ve dvou kapitolách, to je programy, které si daly za úkol hodnotit potrubní systém jako celek. A v druhé kapitole uvedeme programy, které hodnotí jenom část, tj. jednotlivé části potrubí.

5.1.1. Výčet nejznámějších programů počítající potrubní systém jako celek

a) Americké programy

Caesar II

Hexagon PPM, dříve Intergraph CADWorx & Analysis Solutions, Inc., 7840 N. Sam Houston Pkwy. W., Suite 100, Houston, Texas 77064, USA, www.intergraph.com , www.coade.com

Distributor programu v ČR a SR: Cadvision s.r.o., Československej armády 3, 036 01 Martin, Slovensko, www.cadvision.sk

AutoPIPE

BENTLEY SYSTEMS INC., USA, www.bentley.com

Distributor programu v ČR a SR: QUEST CENTRAL EUROPE, spol. s r.o., Kanice 347, 664 01 Kanice, www.quest.cz

Caepipe

SSTSystems, Inc. 1641N.First Street, Suite 275, San José, California 95112, USA, www.sstusa.com , www.caepipe.com

Distributor programu v ČR a SR: Techsoft Engineering s.r.o., Na Pankráci 322/26 140 00 Praha 4 – Nusle, www.techsoft-eng.cz

b) Evropské programy

Rohr2,

SIGMA Ingenieurgesellschaft mbH, Bertha-von-Suttner-Allee 19, D-59423 Unna, Germany, www.rohr2.com

Distributor programu v ČR a SR: SmartCAD, s.r.o., Čajakova 19, SK-81105 Bratislava, www.smartcad.sk

Pipestress,

Hexagon PPM, dříve DST, Computer Services S.A., 81, Avenue Louis-Casai, CH-1216 Geneva Switzerland, www.dst.ch ,

Distributor programu v ČR a SR: Cadvision s.r.o., Československej armády 3, 036 01 Martin, Slovensko, www.cadvision.sk

Moduly RFEM, RF – Piping, RF-Piping Design, Dlubal Software

RFEM je základní výpočtářský modul, RF-Piping - modelování speciálních potrubních prvků, RF-Piping Design - posouzení potrubních prvků

Dlubal Software s.r.o., Anglická 28, 120 00 Praha 2, Česká republika, www.dlubal.cz

c) Ruské programy

dPipe

CKTI-Vibroseism, ul. Gžatskaja 9A, Sankt-Peterburg 195220, Rusko, www.cvs.spb.ru

Distributor programu v ČR a SR: neuváděn

PASS Start-Prof

PSRE (NTO Truboprovod), ul. Plechanova 7, Moskva 111141, Rusko, www.passuite.com

Distributor programu v ČR a SR: neuváděn

Změny v údajích této kapitoly se mohou měnit rychle, a proto jsou vyhrazeny.

5.1.2. Výčet programů počítající jednotlivé části potrubí

Tvarovky, hrdla anebo i celou potrubní větev – klasický trojrozměrný program MKP, zatížení se bere z programů uvedených v předchozí kapitole a ověřuje mezní stavy a vypočítává koeficient poddajnosti a SIF.

ANSYS Mechanical, ANSYS Professional,

ANSYS, Inc., Southpointe, 2600 ANSYS Drive, Canonsburg, PA 15317, USA, www.ansys.com ,

Distributor programu v ČR a SR: Techsoft Engineering s.r.o., Na Pankráci 322/26, 140 00 Praha 4 – Nusle, www.techsoft-eng.cz

FEA Tools, NozzlePRO,

Hexagon PPM, dříve Intergraph CADWorx & Analysis Solutions, Inc., 7840 N. Sam Houston Pkwy. W., Suite 100, Houston, Texas 77064, USA, www.intergraph.com , www.coade.com ,

Distributor programu v ČR a SR: Cadvision s.r.o., Československej armády 3, 036 01 Martin, Slovensko, www.cadvision.sk

Změny v údajích této kapitoly se mohou měnit rychle, a proto jsou vyhrazeny.

5.1.3. Výčet programů počítající potrubní přírubový spoj

Potrubní přírubový spoj – programy nejsou založeny na MKP, ale na technické normě ČSN EN 1591-1 Příruby a přírubové spoje. Pravidla pro navrhování těsněných kruhových

přírubových spojů, Část 1 – Výpočtová metoda. V této normě je předepsán přímo postup výpočtu.

Europartner

C.S.U.T. Spetech Sp. z o.o., 43-382 Bielsko-Biala, ul. Szyprów 17, Polsko, www.europartner.spetech.eu, www.spetech.com.pl, www.europartner.info.pl

Distributor programu v ČR a SR: neuváděn

TEMES fl.cal

AMTEC GmbH, Hoher Steg 13, 74348 Lauffen am Neckar, Germany, www.amtec.de

Distributor programu v ČR a SR: neuváděn

Změny v údajích této kapitoly se mohou měnit rychle, a proto jsou vyhrazeny.

5.2. Kritéria pro hodnocení programů

Kontrolujeme a ověřujeme tyto vlastnosti, které obsahují následující kapitoly:

Výpočtářské normy a kódy zabudované v programu. Výpočtářské normy a kódy, pro které je program vhodný. Musí mít zabudované i výpočtářské postupy z těchto norem a pro různé materiály. Například je to výpočet dovoleného napětí, vzorce pro výpočet SIF, vzorce pro vyhodnocení napětí pro jednotlivé materiály. V našem prostředí je důležité, aby byl výpočet umožněn podle EN 13480. Ve světě je však rozšířenější systém americký ANSI/ASME B31 Code for Pressure Piping (blíže viz kapitola 6.1.).

Databáze zabudované v programu. Databáze, které program obsahuje, mohou být například tyto:

- materiály z různých norem a materiály, k nim vztažené a jejich materiálové konstanty
- armatury a příruby (tj. prvky typu „rigid“), a to zástavbový rozměr a hmotnost
- pružných a konstantních závěsů a podpěr
- databáze vlnovcových kompenzátorů.

Též je důležité, zda je možné tyto databáze vyměňovat v závislosti na použité výpočtářské technické normy či kódu. Dále je nutná možnost vytvářet své databáze všech druhů a existence doplnění a výměny všech databází v jednom modulu.

Hodnocení systému tvorby a rychlosti tvorby modelu. Důležitá je rychlost tvorby výpočtového modelu tj. vkládání jednotlivých konstrukčních prvků do výpočtového modelu podle typu konstrukčních prvků, rozměrů či souřadnic. Velice výhodné je, jestliže je možné přjmout výpočtový model z jiné dokumentace, např. z programů modelujících 3D modely. V takovém případě je nutné zhodnotit rozsah kontroly při importu takového modelu a případnou pracnost takovéto kontroly. Jednoduchý převod bývá v případě, když sekoupí oba typy programů z jednoho zdroje.

Systém vkládání a specifikace podpěr a závěsů. Databáze podpěr a závěsů (a to zejména konstantních a pružných) mohou být do programu zabudovány v závislosti na výrobci těchto podpěr. Některé programy potom přímo vybírají podpěru ze zvolené databáze. Je však důležité, aby zde byla možnost zadat údaje podpěry či závěsy jiné, tj. bez výběru ze zabudovaného katalogu. Při dalším kole výpočtu je pak při hodnocení všech mezních stavů potvrzeno, zda uvedená podpěra či závěs vyhovuje.

Systém vkládání a specifikace vlnovcových kompenzátorů. Databáze vlnovcových kompenzátorů mohou být do programu zabudovány v závislosti na výrobci těchto podpěr. Je však důležité, aby zde byla možnost zadat výpočtová data vlnovcového kompenzátoru jiné, tj. bez výběru ze zabudovaného katalogu. Při dalším kole výpočtu je pak při hodnocení všech mezních stavů potvrzeno, zda uvedený vlnovcový kompenzátor vyhovuje.

Možnost výpočtu a hodnocení systému výpočtu pro potrubí v zemi. Už samotný přínos je to, že program umožňuje tento výpočet. Výpočtové programy však mohou být různé. V našem prostředí je důležité, aby byl výpočet umožněn podle EN 13480-6.

Stabilita celého potrubí a potrubní stěny. Je třeba zkontrolovat, zda program kontroluje stabilitu potrubí jako celku, tj. vzpěr potrubí. A také zda program kontroluje stabilitu potrubní stěny (tj. boulení) a to zejména při podtlaku a nad podpěrami (tj. zatížení svislou částí reakce). Výpočet všech těchto mezních stavů nemusí být předepsán ve výpočtářských programech či kódech, proto ani některé z programů toto neobsahují, je to však důležité. Jak počítat stabilitu potrubí a potrubní stěny, když není předepsána ve výpočtářské normě, najdeme v literatuře na konci kapitoly.

Možnost výpočtu a hodnocení výpočtu laminátového potrubí. Některé výpočtové programy umožňují výpočet sestavy laminátových potrubí. Jednotlivé prvky tj. potrubí a tvarovky konstruuje výrobce a dává k dispozici materiálové konstanty své produkce, právě pro možnost výpočtu sestav. Je proto možné uspořádat tyto materiálové vlastnosti do databáze podle výrobce a existuje-li technická norma, i podle normy. V každém případě musí být umožněno tato materiálová data zadávat i bez vztahu k databázi.

Zadávaní zatížení a možnost dostatečného množství kombinací zatížení. Výpočtový program musí umožňovat zadání těchto dat odpovídající:

- trvalým zatížením, do toho patří tlak v několika hodnotách, a dále hustotu tekutiny minimálně tu, která se součástí výpočtu a hustotu vody pro zadání tlakové zkoušky, a dále hustotu izolace a potrubí, a to v případě, jestli již nejsou součástí základní databáze.
- zadávání dat dočasných a mimořádných, tj. například zatížení klimatická a seizmická
- zadávání teploty média (zda umožňuje dostatečný počet kombinací zatížení).
- zadávání jednorázového posunu podpěry

Zadávaní a výpočet klimatických zatížení. Zda a jak je možné zadávat zatížení klimatická, a to může to být přímo data pro výpočet těchto zatížení na základě technických norem – u nás na základě příslušných Eurokódů. Anebo musí umožňovat zadat spojitá zatížení směrem svislým a směrem vodorovným pro využití v případě do programu nezpracovaných norem.

Zadávaní a výpočet seizmicity. Výpočet seizmicity je dvojitý:

- Zjednodušený kvazistatický. Pro tento výpočet se zadává pouze zrychlení: tj. jedno vertikální a dvě na sebe kolmé, horizontální. Zde proto musí být možnost někde tato zrychlení zadat.
- Úplný dynamický. Pro toto bývá instalován celý dynamický preprocesor, takže se zadává seizmická spektra, které musí mít možnost kombinace vzájemné a se statickými zatíženími.

Výpočet seizmicity se v našich podmínkách počítá na základě příslušných Eurokódů.

Modální dynamický výpočet. Tento výpočet je výpočet vlastních frekvencí potrubí, což umožňuje porovnat tyto frekvence s frekvencemi budícími a vyvarovat se tak rezonanci.

Jiné dynamické výpočty. Ostatní dynamické výpočty, které program umožňuje, může být např. harmonický výpočet včetně výpočtu únavy, jestliže se nepodaří vyladit potrubí a určité kmitání zůstává, akce pojišťovacího ventilu jako dynamického rázu, výbuch v blízkosti potrubí jako dynamický ráz.

Dále výpočet hydraulického rázu může být rozveden i časově, to znamená, že na základě rychlosti šíření hydraulického rázu může rozložit jednotlivé rázy do kolen časově za sebou.

6. Zadávání všeobecných dat do programu

6.1. Určení kódu či normy výpočtu

Nejčastěji používané technické normy pro výpočet jsou uvedeny v následující kapitole o použitých normách odstavec a) a b).

6.2. Výpočtové databáze

Ve většině programů pro pevnostní výpočet potrubí jsou zabudovány databáze. Jedná se o databáze materiálů, ventilů, přírub, seizmických spekter apod. Také máme na výběr několik norem anebo kódů pro výpočet potrubí. Je nutné znát aspoň základní informace o těchto databázích.

6.3. Zásady číslování uzlů (nodes)

Velká většina výpočetních programů automaticky čísluje uzly, které oddělují jednotlivé potrubní komponenty, avšak zásady tohoto číslování určuje vždy výpočtář. Zde je pár rad, jak postupovat při číslování těchto uzlů.

1. Je výhodné číslování ve směru toku tekutiny
2. První bod potrubní větve (node 10) je na tělese aparátu, na němž je přivařeno hrdlo. tedy node 10 je z hlediska projektu potrubí na aparátu nikoli na potrubí.
3. V určeném bodě působí zatěžovací síly hrdel a pohyby hrdla způsobené např. tepelnou roztažností aparátu
4. Je výhodné mít ve výpočtovém modelu i aparáty, tyto se však číslují výrazným číselným oddělením např. řádově jinak.
5. V místě, kde chceme znát nějakou pružnostně-pevnostní veličinu (deformaci, napětí, vnitřní síly apod.), umístíme uzel a očíslováme ho.

7. A něco jde i bez počítače: Zjednodušená výpočtová analýza potrubí – nosníková metoda

7.1. Použité veličiny a jednotky

Značka	Zkratka a jednotka	Název	Značka	Zkratka a jednotka	Název
F	N	síla (všeobecně)	l, l_1	mm	celková délka potrubí, vzdálenost potrubí mezi podpěrami
F_{max}	N	maximální síla na podpěru	$L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6$	m	vzdálenosti podpěr
F_{tr}	N	třecí síla	Δl	m	prodloužení potrubí
F_{sv}	N	zatížení podpěry svislou silou	α	$1/K$	koeficient tepelné roztažnosti trubky
F_{celk}	N	celková síla	Δt	$^{\circ}C$	rozdíl dvou teplot (současné a srovnávací)
M	Nm	moment síly (všeobecně)	l_f	mm	nárůst délky trubky, pro který se navrhuje kompenzace
M_1, M_2, M_x	Nm	ohybové momenty	a	m	rozměr vyložení pro U-kompensátor
σ	MPa	napětí (všeobecně)	q	N/m	tíha od hmotnosti trubky s izolací a tekutinou na 1m délky potrubí
σ_1, σ_o	MPa	hlavní napětí (osové napětí v trubce)	y	mm	průhyb potrubí
σ_2, σ_t	MPa	hlavní napětí (obvodové či tečné napětí v trubce)	SIF, i	-	součinitel intenzifikace napětí
R_e	MPa	mez kluzu materiálu při pokojové teplotě	ρ	kg/m^3	hustota tekutiny či jiná hustota
R_m	MPa	pevnost materiálu při pokojové teplotě	g	m/s^2	gravitační zrychlení $9,81 m/s^2$
μ	.	Poissonova konstanta	f_{tr}	-	koeficient tření
f, σ_{dov}	MPa	dovolené namáhání	m	kg	hmotnost (všeobecně)
p	bar, g	tlak tekutiny v potrubí	m_{po}	kg	hmotnost potrubí připadající na jednu podpěru
s	mm	tloušťka stěny trubky	m_{te}	kg	hmotnost tekutiny v potrubí připadající na jednu podpěru
D	mm	vnější průměr trubky	m_{izo}	kg	hmotnost izolace potrubí připadající na jednu podpěru

d	mm	vnitřní průměr potrubí	J	mm^4	moment setrvačnosti průřezu (všeobecně)
z	-	koeficient únosnosti svaru	Z	mm^3	průřezový modul potrubí pro ohyb
h	mm	pokles podpěry			
h_{max}	mm	maximální pokles podpěry			

tab. 7.1. Jednotky této kapitoly

7.2. Zjednodušení používání nosníkové metody

Řízená nosníková metoda je jednou z přibližných metod pro kontrolu potrubí. Tuto metodu široce používají návrháři potrubí ke kontrole jednoduchých konfigurací potrubí. Tato metoda je tedy vhodná pouze na jednoduché geometrie potrubní větve. U složitých tvarů potrubní větve ji nelze použít.

Tuto metodu lze použít jen pro výpočet průběhu vnitřních ohybových momentů (z nich je možné vypočítat i napětí), průhybů a zatížení podpěr.

Tuto metodu je možné používat jen za těchto podmínek:

- Potrubní systém má pouze dva koncové body
- Všechna ramena potrubí jsou rovnoběžná se souřadnicemi x , y , z
- V případě kluzné podpěry jsou povoleny pouze posuvy
- Otáčení nosníku podle své osy se zanedbává.

V případě použití pro výpočet tepelné expanze je nutné vzít v úvahu ještě tyto podmínky:

- Tepelná roztažnost je absorbována pouze potrubím v kolmém směru
- Velikost tepelné roztažnosti, kterou může daná délka absorbovat, je nepřímo úměrná její tuhosti.

7.3. Veličiny, které se získávají pomocí této metody

7.3.1. Zatížení a vnitřní síly a momenty

Zatíženími se zabývá díl 1 této série. Zatížení trvalá, tj. zatížení od vlastní hmotnosti trubky, média a izolace a zatížení příležitostná klimatická, tj. zatížení větrem a sněhem způsobují na vodorovných potrubích spojitá zatížení. Zatímco zatížení od vlastní hmotnosti a od sněhu působí ze shora dolů, zatížení potrubí od větru působí vodorovně. Je proto nutné je vektorově sečíst. Tato zatížení působí na potrubí s podpěrami, které lze chápat jako spojitý nosník a má taky průměry momentů a sil stejné jako klasický spojitý nosník popsany už mnohokrát v učebnicích. V této publikaci vycházíme z knihy: Novák O.: Spojitý nosník ve vzorcích, viz kapitola použitá literatura.

Existuje však ještě jedno zatížení způsobující osově napětí a je to tepelná roztažnost. Výchozí místo pro tepelnou roztažnost je pevný bod. Roztažnost potrubí narůstá

až ke změně směru trasy potrubí, a tím spíš, jestliže je změna směru součástí U-kompensátoru. Konec narůstání roztažnosti může existovat u osového vlnovcového kompensátoru.

Musíme dále určit síly, které tepelné roztažnosti brání. Jsou to:

- Třecí síly v kluzných podpěrách od místa měření až k místu změny směru trasy potrubí.
- Odpor proti ohnutí kolmému potrubí po změně směru potrubí.

Tyto uvedené síly bereme, jako by působily v ose potrubí.

7.3.2. Osová napětí

V prvním díle této série bylo vysvětleno, jak působí vnitřní tlak tekutiny v potrubí a jaké jsou druhy a velikosti napětí, která vznikají od vnitřního tlaku. Je to především obvodové napětí a osová napětí, které je svou velikostí poloviční. Zde šlo o primární napětí.

V této kapitole budeme v dalším počítat jen napětí osová, způsobená trvalými zatíženími a zatíženími příležitostnými klimatickými, která jsou též primární. Takže nesmíme zapomenout přičíst i tato napětí k osovému napětí způsobeného vnitřním tlakem tekutiny.

Napětí od těchto zatížení získáme tak, že vydělíme vnitřní ohybový moment průřezovým modulem, jehož výpočet je uveden v prvním díle této série. Průběh napětí průřezem trubky je takový, že maximální napětí v tahu je dole, maximální napětí v tlaku je na vršku trubky a neutrální osa je uprostřed. Působení větru je však kolmé na směr působení všech ostatních zatížení, jež způsobují dříve popsaný průběh napětí.

Dále se budeme věnovat výpočtům osových napětí od tepelné roztažnosti, kde se oba druhy sil od tepelné roztažnosti sečtou a vydělí plochou průřezu potrubí, jehož výpočet je uveden v prvním díle této série. Tyto uvedené síly působí v ose potrubí.

7.3.3. Průhyby a deformace

Mezní stav dovoleného průhybu je používán, jestliže je nutné potrubí odvodušňovat nebo odvodňovat, tedy v našem případě. Vzdálenosti podpěr potrubí se volí tak, aby průhyb potrubí mezi dvěma podpěrami nezabraňoval volnému odtoku kapaliny při vypouštění kapaliny z potrubí, vypouštění kondenzátu za provozu parovodu anebo neumožňoval hromadění vzduchu při odvodušňování.

Výše popsaná zatížení trvalá a příležitostná působí na potrubí s podpěrami, které lze chápat jako spojitý nosník a má taky průměry momentů a sil stejné jako klasický spojitý nosník popsaný už mnohokrát v učebnicích a různých příručkách z pružnosti a pevnosti. Tyto průběhy sil a momentů způsobují průhyby, které jsou dány vzorci odvozenými ve stejných učebnicích. V této publikaci vycházíme z knihy: Novák O.: Spojitý nosník ve vzorcích, viz kapitola o použité literatuře v tomto dílu.

Dále musíme vzít v úvahu i tepelnou roztažnost, která způsobuje především posuvy. Určení prodloužení potrubí od pevného bodu ke zkoumanému bodu potrubí se vypočítá podle klasického vzorce:

$$\Delta l = \alpha \Delta t \cdot l$$

7.3.4. Zatížení podpěr

Svislá síla je tvořená hmotnostmi potrubí, tekutiny a izolace připadající na jednu podpěru, ať už s vedením do strany anebo ne. Matematicky tedy vyjádřeno:

$$F_{sv} = (m_{po} + m_{te} + m_{izo}) \cdot g.$$

kde m_{po} je hmotnost potrubí připadající na jednu podpěru,

m_{te} je hmotnost tekutiny v potrubí připadající na jednu podpěru,

m_{izo} je hmotnost izolace potrubí připadající na jednu podpěru,

Podobným postupem můžeme vypočítat zatížení podpěry od klimatických zatížení.

Určení síly od tření způsobených tepelnou roztažností v třecích podpěrách. Třecí síla v podpěře je rovná svislé síle vynásobené koeficientem tření v podpěře.

$$F_{tr} = F_{sv} \cdot f_{tr}$$

f_{tr} je koeficient tření mezi částmi třecí podpěry.

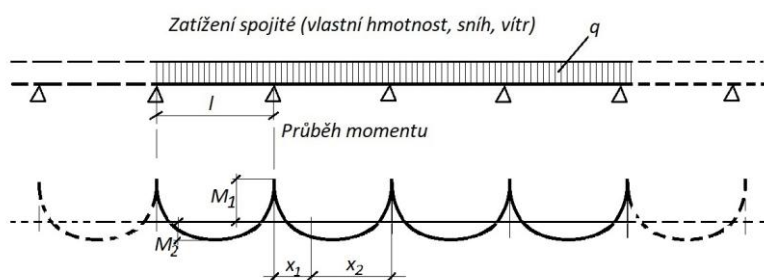
Je nutné zde počítat s hodnotami většími, neboť jde o nezastřešená potrubí a korozi podléhající třecí plochy, proto volíme koeficient tření pro materiály ocel na ocel o velikosti 0,3. Maximální vodorovná síla pro kluznou podpěru tak bude mít velikost 30% síly svislé. Její směr a orientace bude vždy proti směru pohybu kluzné podpěry.

7.4. Příklady používání zjednodušené výpočtové analýzy

7.4.1. Potrubí zatížená vlastní hmotností

7.4.1.1. Rovné dlouhé potrubí

Jestliže je potrubí uložené nad terénem na podpěrách, jde o spojitý nosník na podpěrách, zatížený spojitým zatížením, viz obr. 8.1.



Obr. 7.1. Průběh momentů na spojitém nosníku od spojitého zatížení

Průběh momentů je vidět na obrázku nahoře. Je zde vidět, že největší moment je M_1 , který je umístěn vždy nad potrubní podpěrou. Druhý největší moment je M_2 , který je umístěn uprostřed mezi podpěrami. My však potřebujeme určit též velikost momentu někde mezi, kde měříme napadení potrubí korozí tento bod je určen souřadnicemi x_1 a x_2 .

$$M_1 = \frac{ql^2}{10} \qquad M_2 = \frac{ql^2}{40}$$

Pro moment v místě x_1 platí:

$$M_x = \frac{q}{2} \left(\frac{l^2}{5} - x_1^2 \right)$$

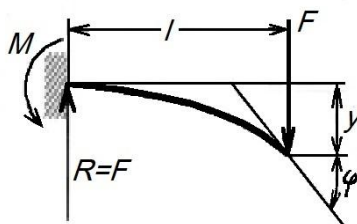
Průhyb můžeme vypočítat podle vzorce:

$$y = \frac{1}{384} \cdot \frac{ql^4}{EJ}$$

Svislé zatížení podpěr podle vzorce: $F_{1sv} = ql$

7.4.1.2. Jednoduchý vetknutý nosník

Jednoduchý vetknutý nosník je nosník, jehož jeden konec je pevný a druhý konec je pomocný rovnoběžně s jeho původní polohou.



Obr. 8.2. Průběh momentů na spojitém nosníku od spojitého zatížení

Uvedený nosník může být využíván pro výpočet vyložení potrubí bez podpěry. Platí zde tyto vzorce:

$$y = \frac{F \cdot l^3}{3EJ} \qquad F = \frac{3EJy}{l^3}$$

$$\varphi = \frac{Fl^2}{2EJ} \qquad M = Fl = \frac{3EJy}{l^2}$$

7.4.1.3. Výpočet vzdálenosti podpěr

Zjednodušená analýza potrubí je využita pro výpočet vzdálenosti podpěr v ČSN EN 13480-3 Příloha Q. Pro určení vzdálenosti podpěr je vždy limitní jeden ze tří druhů mezních stavů:

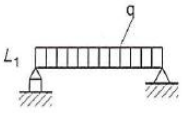
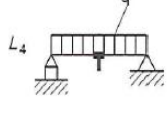
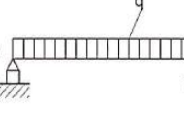
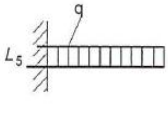
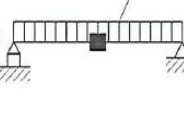
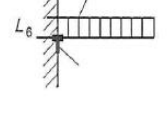
- mezní stav dovoleného napětí v materiálu potrubí
- mezní stav dovoleného průhybu
- mezní stav dovolené únosnosti konkrétních uložení

Pro mezní stav a) je tam uvedeno dovolené napětí o velikosti 40 MPa. Pro mezní stav b) je zde udáván povolený průhyb potrubí do DN 50 3mm nad DN 50 5mm. Mezní stav c) zde není řešen, předpokládá se, že je možné zkonstruovat podpěru potrubí i pro velká zatížení. V praxi sesetkáváme s tímto problémem u velkých průměrů potrubí s obsahem kapaliny.

Podle uvedené přílohy se používají tato trvalá zatížení: hustota kapaliny 1000 kg/m^3 , hustota ocelové trubky 7900 kg/m^3 , hustota izolace 120 kg/m^3 a hmotnost ocelového opláštění na plochu 10 kg/m^2 .

Na obrázku dole jsou uvedena schémata podle níž se vypočítávají vzdálenosti podpěr, eventuálně maximální velikost vyložení.

Table Q.2

L_1		L_4	 Welded Tee
L_2		L_5	
L_3	 Forged Tee	L_6	 Welded Tee

Obr. 8.3. Schémata pro výpočet vzdálenosti podpěr

Jednotlivé případy znamenají:

L_1 - vzdálenost podpěr při omezení průhyben potrubí (do DN50 - průhyb 3mm, nad DN50 - průhyb 5mm)

L_2 - vzdálenost podpěr při omezení namáháním, potrubí hladké, bez koncentrátoru napětí

L_3, L_4 - vzdálenost podpěr při omezení namáháním, mezi podpěrami téčko anebo odbočka

L_5 - vzdálenost podpěry od letmo uloženého konce potrubí, potrubí hladké, bez koncentrátoru namáhání, omezeno dovoleným namáháním

L6 - vzdálenost podpěry od letmo uloženého konce potrubí, vložené téčko anebo odbočka, omezeno dovoleným namáháním

Vzorce pro maximální vzdálenost podpěr anebo maximální vyložení jsou tyto:

L1 – vzorec pro výpočet průhybu: $y = \frac{5}{384} \cdot \frac{ql^4}{EJ}$

L2 – vzorec pro výpočet napětí $\sigma = \frac{M}{Z}$ $M = \frac{ql^2}{8}$

L3, L4 – vzorec pro výpočet napětí $\sigma = i \frac{M}{Z}$ $M = \frac{ql^2}{8}$

L5 – vzorec pro výpočet napětí $\sigma = \frac{M}{Z}$ $M = \frac{ql^2}{2}$

L6 – vzorec pro výpočet napětí $\sigma = i \frac{M}{Z}$ $M = \frac{ql^2}{2}$

i je intenzifikátor napětí a vzorce pro jeho výpočet jsou uvedeny v příloze H ČSN EN 13480-3

Dále uvádíme:

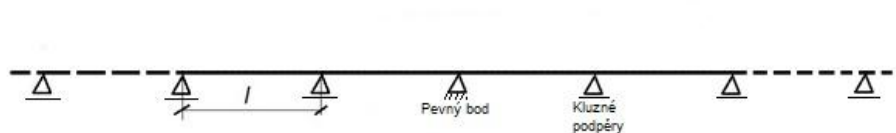
- Průhyb pro případ L2: $y = \frac{5}{384} \cdot \frac{ql^4}{EJ}$

- Průhyb pro případ L5: $y = \frac{ql^4}{8EJ}$

7.4.2. Potrubí zatížené tepelnou expanzí

7.4.2.1. Rovné dlouhé potrubí

Potrubí se roztahuje od pevného bodu směrem k okrajům obrázku.



Obr. 8.4. Schemata pro výpočet vzdálenosti podpěr

Určení prodloužení potrubí od pevného bodu ke zkoumanému bodu potrubí se

vypočítá podle klasického vzorce: $\Delta l = \alpha \Delta t \cdot l$

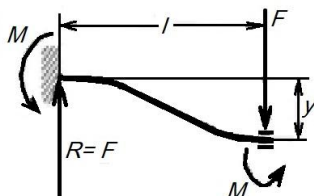
Svislé zatížení kluzné podpěry: $F_{1sv} = ql$

Vodorovné zatížení kluzné podpěry: $F_{1vod} = f_{tr} \cdot F_{1sv}$

f_{tr} je koeficient tření mezi částmi třecí podpěry

7.4.2.2. Jednoduchý vetknutý nosník

Jednoduchý vetknutý nosník je nosník, jehož jeden konec je pevný a druhý konec je vedený rovnoběžně s jeho původní polohou.



Obr. 7.5. Příklad konzolového nosníku s průvodcem

Nosník zobrazený na obr. 7.5. je v podstatě polovina pevného nosníku vystaveného zatížení od tepelné roztažnosti kolmo připojeného potrubí. K výpočtu přibližných sil a momentů v dané délce potrubí v důsledku tepelné roztažnosti se často používají tyto modely paprsků. Hlavní aplikací metody vedené konzoly je však výpočet délky absorbního vyložení potřebné pro daný tepelný posun U-kompensátoru anebo délky kolmého potrubí u kompenzace přirozeným tvarem. Platí zde tyto vzorce:

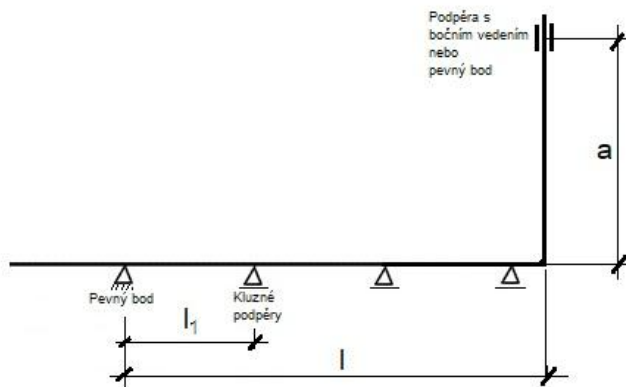
$$y = \frac{F \cdot l^3}{12EJ} \qquad F = \frac{12EJy}{l^3} \qquad M = \frac{Fl}{2} = \frac{6EJy}{l^2}$$

7.4.2.3. Výpočet kompenzace pro přirozený tvar potrubí

Budeme dodržovat tento postup:

Určíme síly, které brání tepelné roztažnosti. Jsou to:

- A) Třecí síly v kluzných podpěrách od místa měření až k místu změny směru trasy potrubí. Tyto síly jsou uvedeny v kapitole 7.4.2.1. pro jednu podpěru. Je třeba však sečíst síly ve všech zúčastněných podpěrách.
- B) Odpor proti deformování kolmého potrubí po změně směru potrubí. Tato síle je uvedena v kapitole 7.4.2.2.. Zde chybí jen dodat hodnotu deformace, tj. y . Tuto hodnotu je možné najít též v kapitole 7.4.2.2.



Obr. 7.6. Příklad

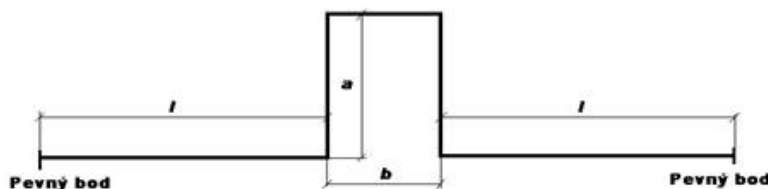
Celková síla v potrubí od tepelné roztažnosti v místě pevného bodu tak je:

$$F_{celk} = \sum f_{tr} \cdot q l_1 + \frac{12EJ\alpha\Delta t l}{a^3}$$

Napětí od tepelné roztažnosti pak bude

$$\sigma = \frac{F_{celk}}{A}$$

7.4.2.4. Výpočet vyložení U-kompenzátoru



Obr. 7.7. U – kompenzátor

Tepelnou roztažnost délky l potrubí (tj délka, kterou kompenzujeme) vypočítáme takto:

$$y = l_f = \alpha \cdot \Delta t \cdot l$$

A porovnáme s průhybem vyložení kompenzátoru délky a . Dále si vezmeme z kapitoly 7.4.2.2. vzorec pro ohybový moment, který by byl nutný k deformaci vyložení kompenzátoru a . Tento vzorec doporučuje pro tento výpočet ČSN EN 13 480-3 Příloha Q. Tato deformace je stejná jako již vypočítaná roztažnost $y=l_f$. Uvedený ohybový moment tedy je roven:

$$M = \frac{6EJl_f}{a^2}$$

Dále si určíme maximální možný moment daný dovoleným napětím při ohybu trubky, tedy:

$$M = f \cdot z \cdot Z$$

Obě vyjádření ohybového momentu porovnáme, dosadíme již uvedený vzorec pro moment setrvačnosti J a průřezový modul Z a vyjde vzorec pro výpočet velikosti vyložení U-kompensátoru a :

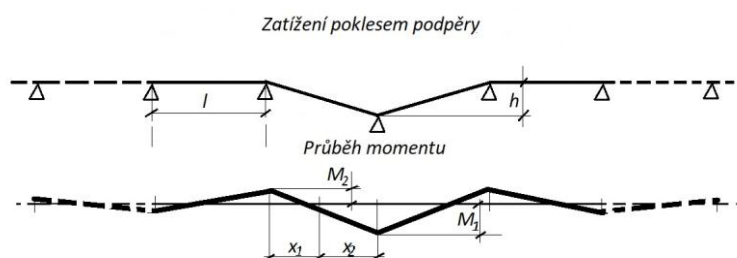
$$a = \sqrt{\frac{3EDl_f i}{fz}}$$

Který je uvedený též v normě ČSN EN 13 480-3 Příloha Q. Napětí, které je v U-kompensátoru způsobené tepelnou roztažností, je sekundární. Chceme-li uvedený vzorec ještě zjednodušit, dosadíme materiálové konstanty pro uhlíkovou ocel a konstanty $i=1,0$ a $z=1,0$, potom vyjde přibližně vzorec $a = 70\sqrt{Dl_f}$, který může být použit pouze pro primární návrh potrubní trasy.

7.4.3. Potrubí zatížené pohybem podpěry

7.4.3.1. Prostý pohyb podpěry bez započítání vlastní hmotnosti potrubí

Pokles podpěry potrubí může být způsoben např. změnami vlastností zeminy pod betonovou patkou anebo zemětřesením.



Obr. 7.8. Průběh momentů na spojitém nosníku od poklesu podpěry

Průběh momentů je vidět na obrázku 8.8. Je zde vidět, že největší moment je M_1 , který je umístěn vždy nad potrubní podpěrou, která se pohnula. Druhý největší moment je M_2 , který je umístěn nad sousedními podpěrami. Z takto získaného momentu pak se vypočítá napětí vydělením průřezovým modulem.

$$M_2 = \frac{18}{7} \cdot EJ \cdot \frac{h}{l^2} \qquad M_1 = \frac{30}{7} \cdot EJ \cdot \frac{h}{l^2}$$

Těmito momenty je zatíženo potrubí od pohybu podpěry. Působí tedy svisle.

Tedy pro moment uprostřed odvodíme:

$$M_x = \frac{x_1}{l}(M_1 + M_2) - M_2$$

Jestliže máme ohybový moment, napětí získáme vydělením průřezovým modulem trubky, který má zeslabenou stěnu naměřenou korozí. Moment způsobuje sekundární napětí (jde o napětí způsobené deformací). V normě ČSN EN 13480-3 je uveden vzorec pro výpočet napětí:

$$\sigma_6 = \frac{iM_D}{Z} \leq \min(2R_{p0,2t}; R_m)$$

Za předpokladu neopakující se deformace můžeme u potrubí využít efektu shake-down při výpočtu dovoleného napětí využíváme redistribuci napětí v průřezu a povolit napětí vyšší než je mez plasticity. My však v dalším nebudeme mez kluzu překračovat a intenzifikátor napětí i bude roven $i=1,0$. V tomto případě maximálně dovolený pokles podpěry

$$h_{max} = \frac{7}{30} \cdot \frac{R_e Z l^2}{EJ}$$

je dán vzorcem:

Dosadíme-li reálné hodnoty do tohoto vzorce, vyjde relativně velké číslo.

Prostřední podpěra se pohybuje a její zatížení se mění. Prostřední podpěra se odlehčuje. Vzniká síla reakční na sílu, která způsobuje pohyb podpěry. Podpěra se pohybuje dokud se síly nevyrovnají. A vedlejší podpěry se přitěžují.

Prostřední pohybující se podpěra:

$$F_{pr} = -\frac{14EJh}{l^3}$$

Podpěry vedlejší:

$$F_{kr} = \frac{66EJh}{7l^3}$$

7.4.3.2. Pokles potrubí volně položené na konstrukci

Při poklesu podpěry (tedy při pohybu podpěry směrem dolů) je nutné počítat kombinaci zatížení poklesu podpěry a zatížením vlastní hmotností od hmotnosti kapaliny, trubky a izolace, které je spojitě a označíme ho q . Podpěra volně položená na konstrukci znamená, že potrubí je podepřené podpěrrou umožňující klouzáni na podložce bez jiné vazby na konstrukci. Podpěra pak zůstává v tomto bodě v případě velkého poklesu konstrukce nijak nepodepřena, potrubí zůstává „ve vzduchu“. Konstrukcí je v našem případě míněna ocelová konstrukce anebo betonová či zděná konstrukce, eventuálně betonová patka, které za normální situace podpírají potrubí.

Jestliže je pokles podpěry takový, že prostřední podpěra neopustí konstrukci, musíme započítat i spojitě zatížení q . Napětí v trubce, průhyb a zatížení podpěr je pro takovýto případ uveden v kapitole 7.4.1.1. Rovné dlouhé potrubí.

Napětí, které způsobuje toto trvalé zatížení q je napětí primární. Momenty nad podpěrami jsou uvedeny v kapitolách 7.4.1.1. a 7.4.3.1.. Napětí získané z těchto momentů se získá vydělením průřezovým modulem. Podle vyhodnocování napětí uvedené v ČSN EN 13480-3 primární a sekundární napětí nelze kombinovat a vyhodnocují se každé zvlášť.

Každé napětí má jinou dovolenou hodnotu a napětí od stálých zatížení q je nutné ještě zkombinovat s napětím od vnitřního tlaku.

Avšak reakce na podpěry můžeme s výhodou porovnávat a kombinovat. Tedy zopakujeme

$$F_{pr} = -\frac{14EJh}{l^3} \quad \text{a} \quad F_{1sv}=ql$$

V případě, že se budou tyto síly sobě rovnat, potrubí v ten moment se potrubí odtrhne od konstrukce. Z toho vypočítáme velikost poklesu h_{max} , to je hodnota, kdy potrubí už vůbec nezatěžuje prostřední podpěru.

$$h_{max} = \frac{ql^4}{14EJ}$$

Po odtrhnutí podpěry je potrubí zatíženo vlastní vahou potrubí. U spojitěho zatížení q bereme dvojnásobnou vzdálenost mezi podpěrami na místě chybějící podpěry, tj $2l$. Potom moment nad podpěrou bude $M_2 = -0,184ql^2$. Ale maximální moment bude uprostřed, a to je $M_1 = 0,316ql^2$. Jestliže vypočítáme z tohoto vzorce napětí, musíme při jeho vyhodnocování přidat napětí od vnitřního tlaku. Zatížení krajní podpěry tak je $F_{1sv} = 1,5ql$.

Změříme-li průhyb a chceme-li vědět, zda nezpůsobuje v trubce nedovolené napětí, nejprve zjistíme, zda podpěra leží na svém základě anebo zda se již odtrhla, podle toho se vybere patřičný vzorec pro výpočet momentu a následně napětí.

7.4.3.3. Pokles potrubí pevně spojené s konstrukcí

Při poklesu potrubí (tedy při pohybu podpěry směrem dolů) je nutné brát v úvahu i kombinaci zatížení poklesu podpěry a zatížení vlastní hmotností od hmotnosti kapaliny, trubky a izolace, které je spojitě a označíme ho q . Navíc musíme započítat i sílu, která působí na klesající podpěru od pohybu konstrukce. Jestliže je pevně spojená s konstrukcí, musíme brát v úvahu i zatížení vlastní hmotností a vynucenou deformaci od konstrukce. Maximální moment nad prostřední podpěrou při poklesu zmenšován momentem od spojitěho zatížení způsobené vlastní vahou a vynucenou deformací způsobenou deformací, případně vynuceným posunem konstrukce.

Prostřední podpěra tedy klesá a okolní podpěry vedle pokleslé podpěry přebírají její funkci a přitěžují se. Takže se jejich únosnost může vyčerpat dříve, než napětí v potrubí. Musí se tedy v takovémto případě vždy kontrolovat i únosnost okolních podpěr. Jejich zatížení se musí řešit individuálně s ohledem na druh konstrukce a druh posunu a deformace této konstrukce.

Při vyhodnocování napětí se i zde musí dodržet vzorce z normy ČSN EN 13 480-3 a zvlášť vyhodnocovat primární a sekundární napětí.

8. A zase bez počítače: Grafy a nomogramy

8.1. Veličiny, které se získávají pomocí této metody

8.1.1. Síly a momenty

Zatížení trvalá, tj. zatížení od vlastní hmotnosti trubky, média a izolace a zatížení příležitostná klimatická, tj. zatížení větrem a sněhem způsobují na vodorovných potrubích spojitá zatížení. Zatímco zatížení od vlastní hmotnosti a od sněhu působí ze shora dolů, zatížení potrubí od větru působí vodorovně. Je proto nutné je vektorově sečíst.

Existuje však ještě jedno zatížení způsobující osově napětí a je to tepelná roztažnost. Výchozí místo pro tepelnou roztažnost je pevný bod. Roztažnost potrubí narůstá až ke změně směru trasy potrubí, a tím spíše, jestliže je změna směru součástí U- kompenzátoru..

Musíme dále určit síly, které tepelné roztažnosti brání. Jsou to:

- Třecí síly v kluzných podpěrách od místa měření až k místu změny směru trasy potrubí.
- Odpor proti ohnutí kolmého potrubí po změně směru potrubí.

Tyto uvedené síly bereme, jako by působily v ose potrubí.

8.1.2. Osová napětí

Od vnitřního tlaku vzniká obvodové napětí a osově napětí. Osově napětí je svou velikostí poloviční. Jde o primární napětí od trvalého zatížení.

Osově primární napětí od trvalého zatížení ještě způsobuje vlastní váha potrubí, izolace a tekutiny.

Osově primární napětí od příležitostných zatížení jsou zatížení klimatická (sněhu a větru) a dynamická (odpuštění pojist ventilu).

Dále se budeme věnovat výpočtům osových napětí od tepelné roztažnosti (zabráněné), která způsobují sekundární napětí. Toto napětí působí též v ose potrubí.

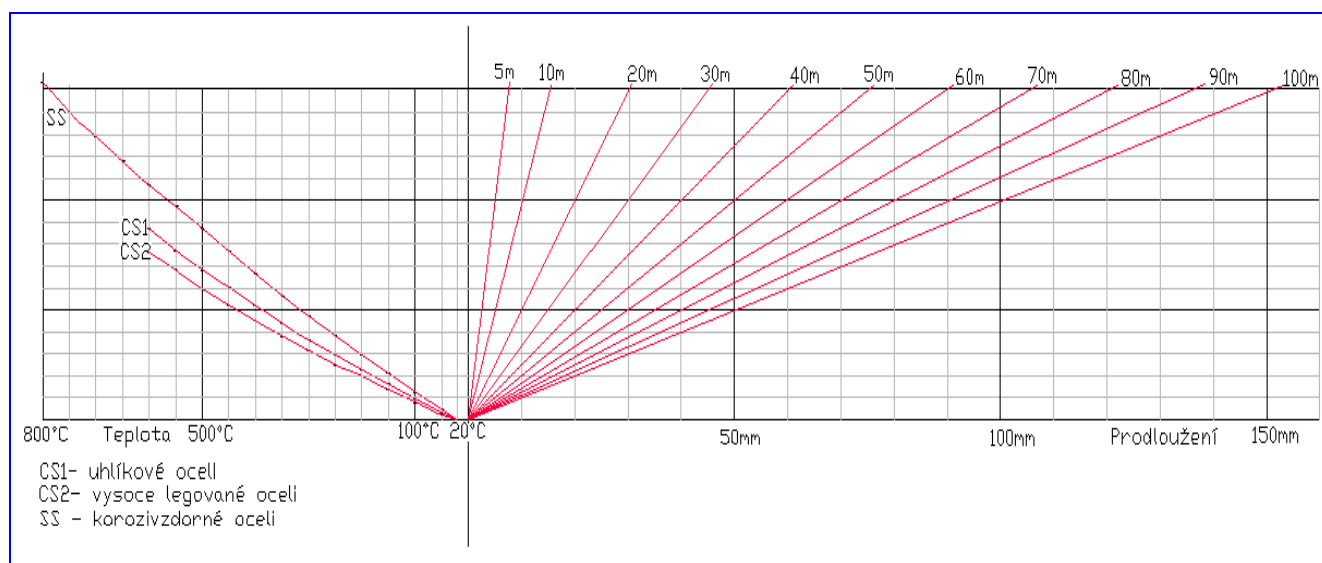
8.1.3. Průhyby a deformace

Mezní stav dovoleného průhybu je používán, jestliže je nutné potrubí odvzdušňovat nebo odvodňovat, tedy v našem případě. Vzdálenosti podpěr potrubí se volí tak, aby průhyb potrubí mezi dvěma podpěrami nezabraňoval volnému odtoku kapaliny při vypouštění kapaliny z potrubí, vypouštění kondenzátu za provozu parovodu anebo neumožňoval hromadění vzduchu při odvzdušňování.

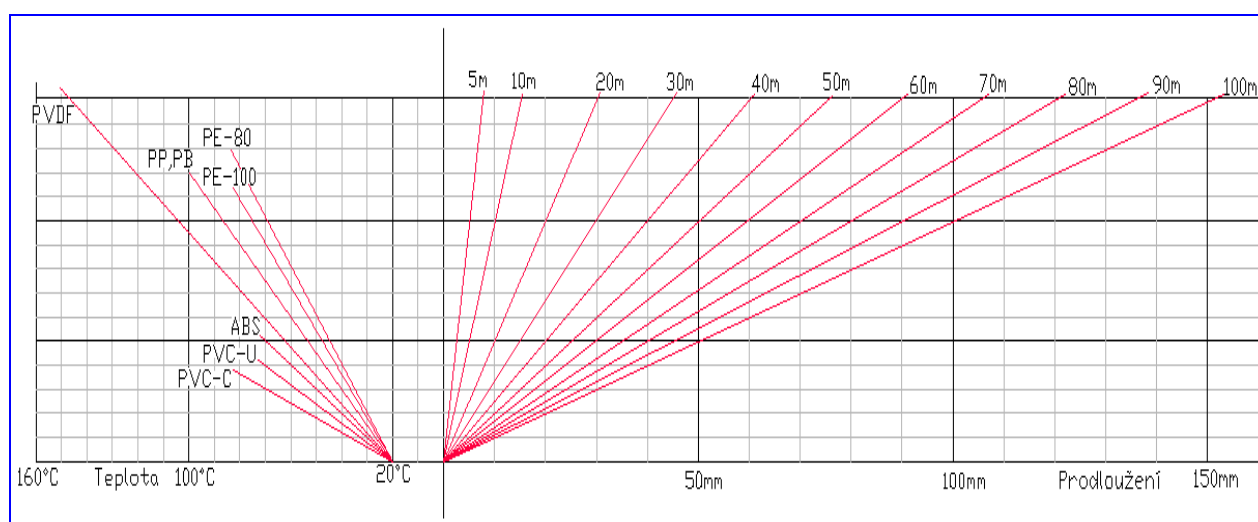
Výše popsaná zatížení trvalá a příležitostná působí na potrubí s podpěrami, které lze chápat jako spojitý nosník.

Dále musíme vzít v úvahu i tepelnou roztažnost, která způsobuje především posuvy.

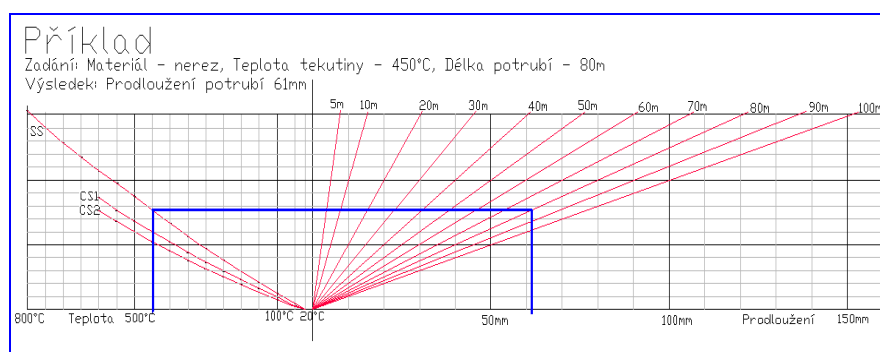
8.2. Nomogramy pro určení tepelné roztažnosti



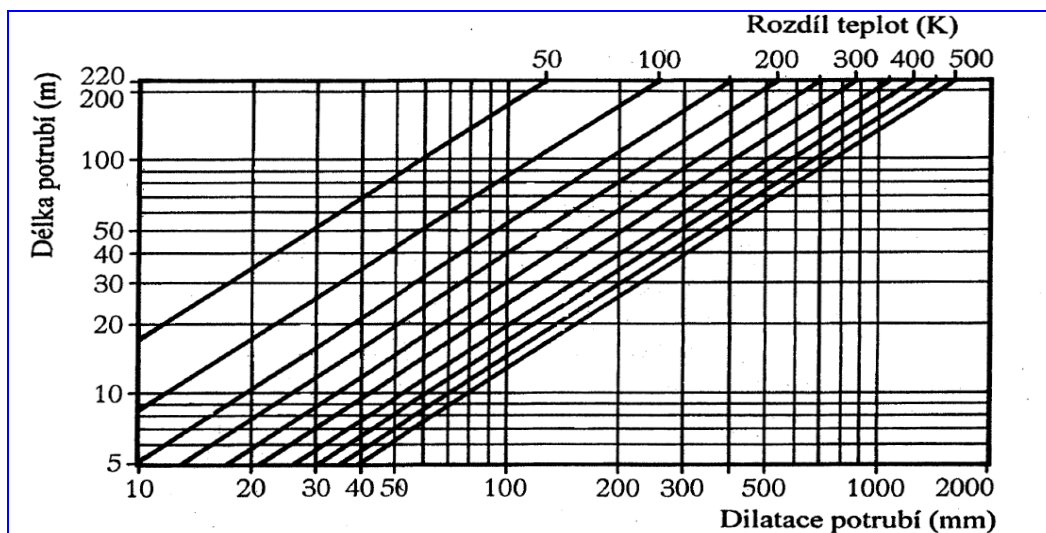
Obr. 8.1.



Obr. 8.2.

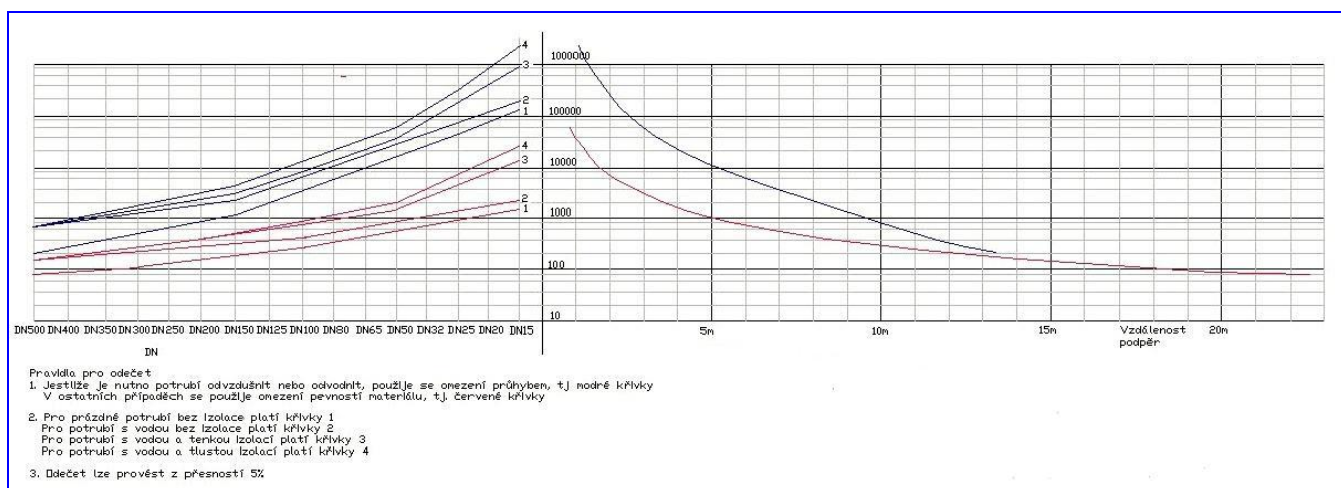


Obr. 8.3 Příklad pro odečet délkové roztažnosti

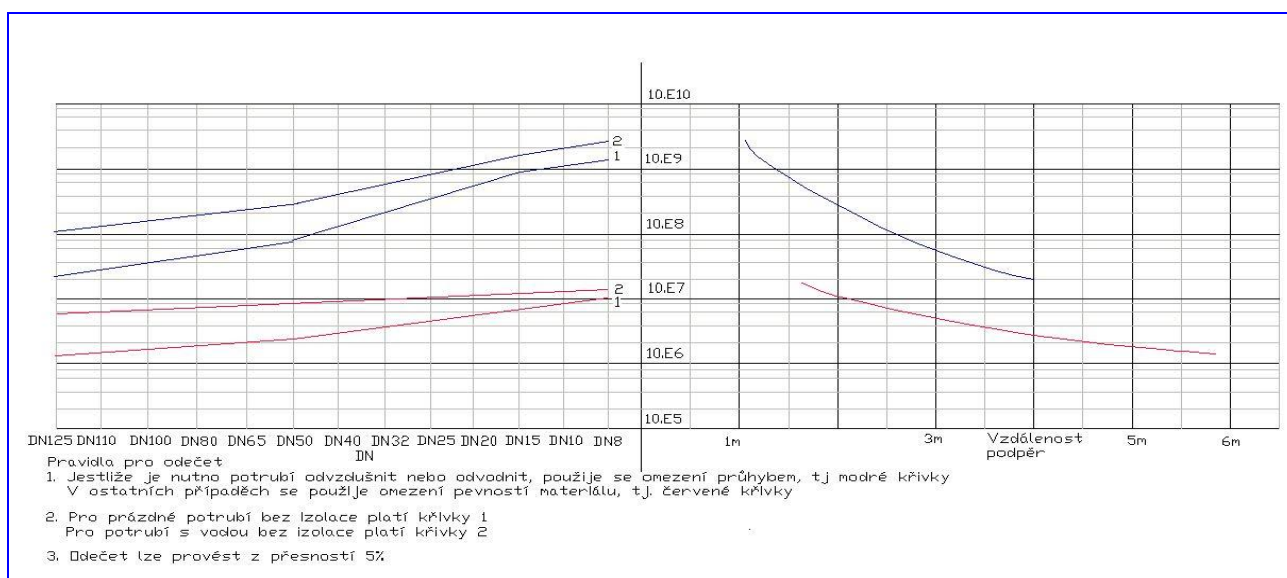


Obr. 8.4. Odečet délkové roztažnosti oceli pro parovody

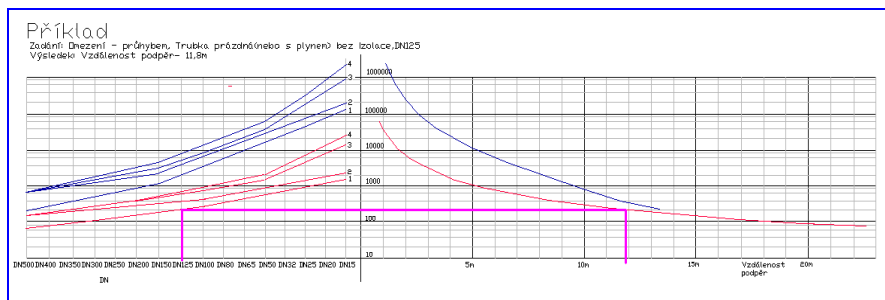
8.3. Nomogramy pro určení vzdálenosti podpěr



Obr. 8.5.



Obr. 8.6.

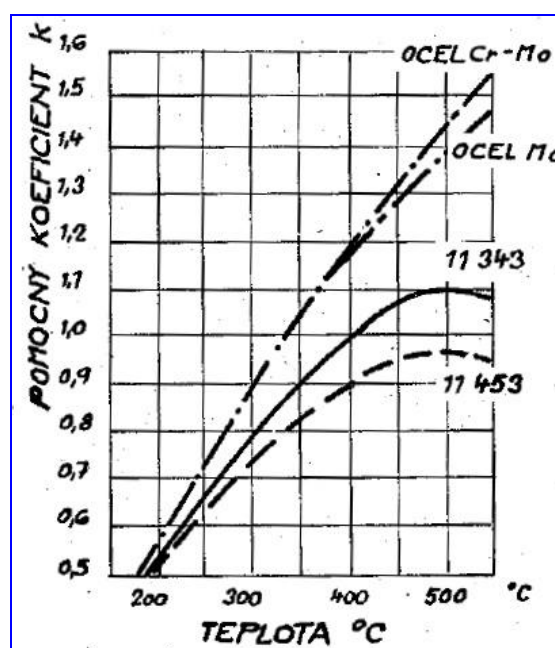


Obr. 8.7. Příklad odečtu vzdálenosti podpěr

8.3. Nomogramy pro určení vnitřních napětí a reakčních sil

8.3.1. Výpočet pomocných koeficientů N a S

Koeficienty N a S se vypočítají podle grafu a vzorců dále:



Obr.8.8. Graf k určení koeficientu k

$$N = k.m.D/L$$

$$S = k.m.J/L^2$$

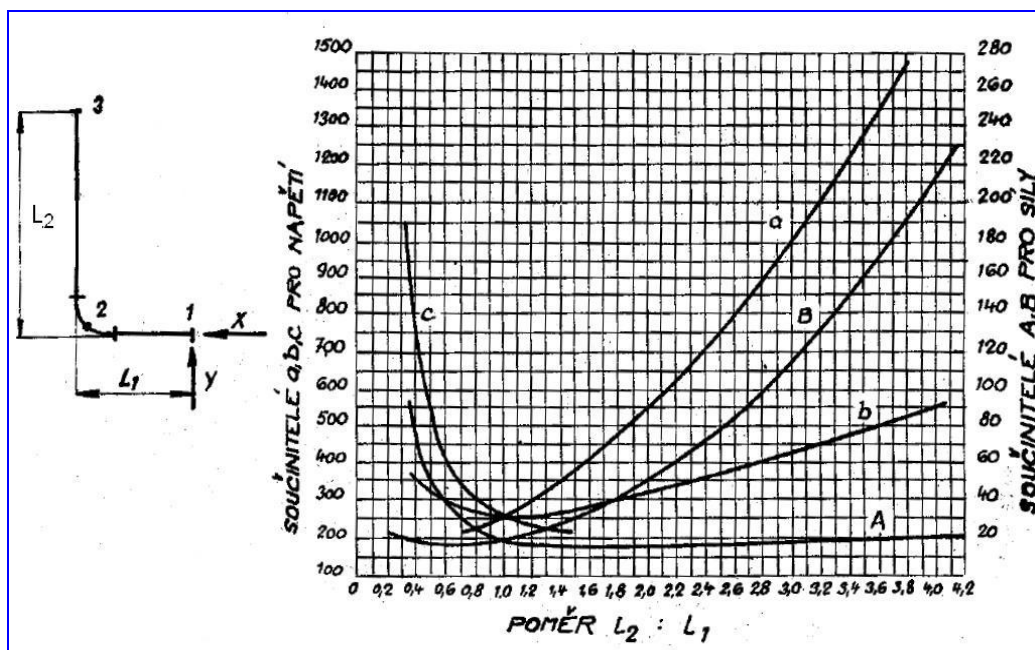
$$L = L_1 + L_2$$

$$m = (100-V)/50$$

kde D je vnější průměr potrubí (v m)
 J moment setrvačnosti průřezu (v cm^4)
 L_i délky ramen potrubí (v m)
 V předpětí v %
 k koeficient z grafu

8.3.2. Potrubí tvaru L

Toto potrubí se počítá na základě vztahů a koeficientů odečtených z nomogramu dále:



Obr. 8.9. Nomogram č.1

Napětí v bodě 1 (v MPa): $\sigma_1 = 0,1 \cdot a \cdot N$

Napětí v bodě 2 (v MPa): $\sigma_2 = 0,1 \cdot a \cdot N$

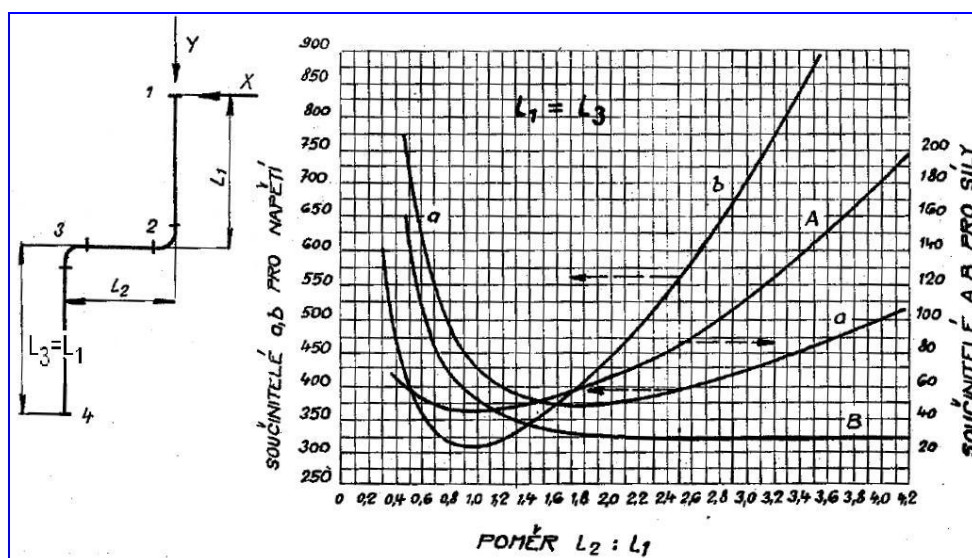
Napětí v bodě 3 (v MPa): $\sigma_3 = 0,1 \cdot a \cdot N$

Síla X (v N): $X = 10 \cdot A \cdot S$

Síla Y (v N): $Y = 10 \cdot B \cdot S$

8.3.3. Potrubí tvaru Z

Toto potrubí se počítá na základě vztahů a koeficientů odečtených z nomogramu dále:



Obr. 8.10. Nomogram č.2

Napětí v bodě 1 a 4 (v MPa): $\sigma_1 = \sigma_4 = 0,1 \cdot a \cdot N$

Napětí v bodě 2 a 3 (v MPa): $\sigma_2 = \sigma_3 = 0,1 \cdot a \cdot N$

Síla X (v N): $X = 10 \cdot A \cdot S$

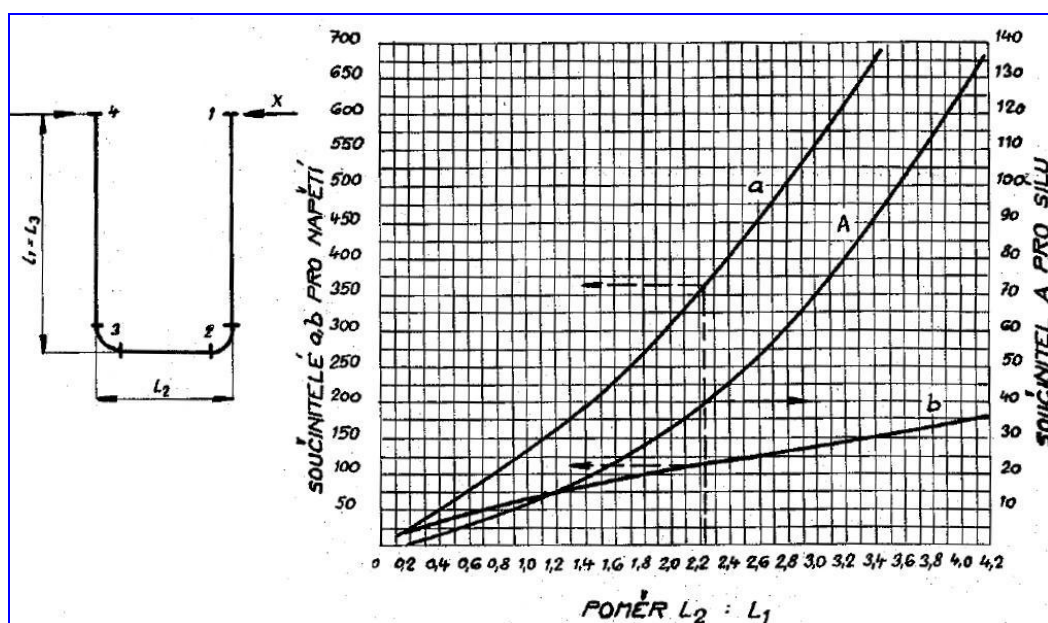
Síla Y (v N): $Y = 10 \cdot B \cdot S$

Koeficienty N a S se vypočítají podle grafu a vzorců jako v případě prvním, pouze:

$$L = L_1 + L_2 + L_3$$

8.3.4. Potrubí tvaru U

Toto potrubí se počítá na základě vztahů a koeficientů odečtených z nomogramu dále:



Obr. 8.4.

Obr. 8.11. Nomogram č.3

Napětí v bodě 1 a 4 (v MPa): $\sigma_1 = \sigma_4 = 0,1 \cdot a \cdot N$

Napětí v bodě 2 a 3 (v MPa): $\sigma_2 = \sigma_3 = 0,1 \cdot a \cdot N$

Síla X (v N): $X = 10 \cdot A \cdot S$

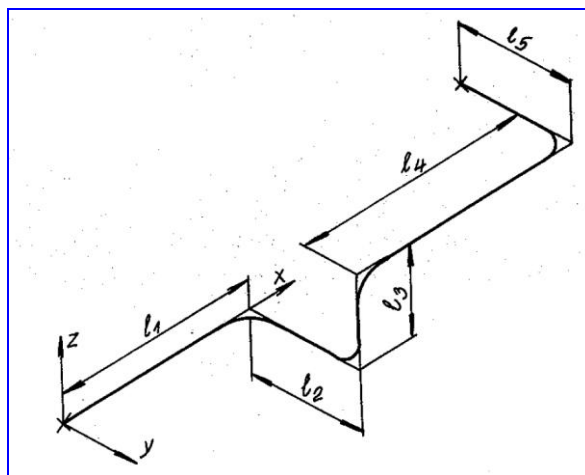
Síla Y (v N): $Y = 10 \cdot B \cdot S$

Koeficienty N a S se vypočítají podle grafu a vzorců jako v případě prvním, pouze:

$$L = L_1 + L_2 + L_3$$

8.3.5. Potrubí složené

V tomto případě je potrubí složené z několika větví tvaru L a to za sebou.



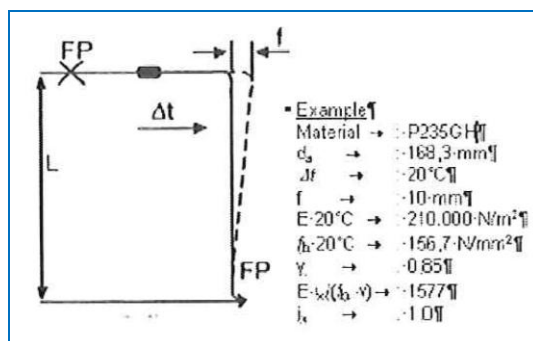
Obr. 8.12. Složené potrubí

Nejprve se vyhledá součet délek jednotlivých ramen ve směru jednotlivých os. Největší ze součtů se pak považuje za delší rameno větve a ostatní ramena na něj kolmá by měla vydilatovat jako tepelné roztažení.

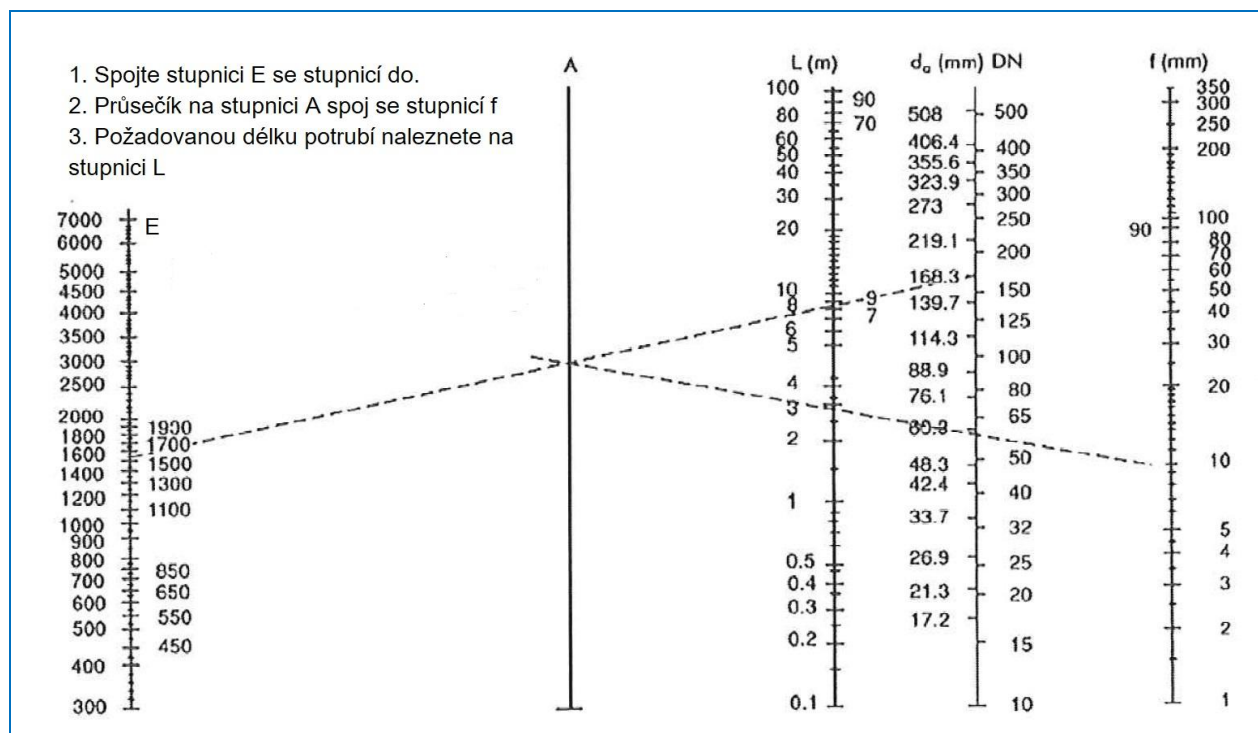
Na obrázku naznačená větev má ramena l_1 až l_5 . Největší tepelná dilatace je ve směru osy x a je dána tepelnou dilatací ramen l_1 a l_4 . Úseky na něj kolmé (l_2 , l_3 a l_5) musí tuto dilataci vyeliminovat svým průhybem. Postupujeme proto podle předchozího nomogramu.

8.4. Nomogramy pro určení minimálních délek potrubí nutných ke kompenzaci

8.4.1. Potrubí tvaru L , výpočet minimální délky delšího ramene podle Přílohy Q, ČSN EN 13480-3



Obr. 8.13 Zadávací údaje



Obr. 8.14

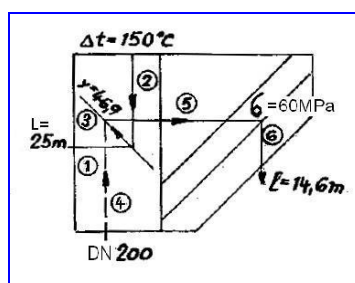
8.4.2. Potrubí tvaru L , výpočet minimální délky kratšího ramene

Toto potrubí se počítá na základě vztahů a koeficientů odečtených z nomogramu dále. Na tomto nomogramu se řeší především tyto dvě varianty úlohy:

Hledá se minimální délka kratšího ramene, která je schopna vydilatovat tepelnou roztažnost delšího ramene za daných podmínek, aniž by v některém místě bylo překročeno dovolené namáhání. Je dáno:

- délka delšího ramene
- rozdíl mezi výpočtovou a montážní teplotou
- vnější průměr trubky
- velikost dovoleného napětí

Použijeme klíč č.1 k nomogramu viz obrázek:



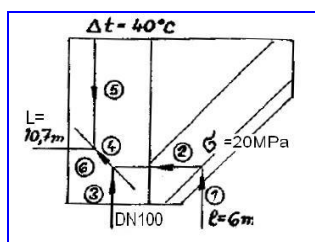
Obr. 8.15. Klíč 1

8.4.3. Potrubí tvaru L , výpočet minimální délky delšího ramene

Hledá se délka delšího ramene, která je schopna vydilatovat tepelnou roztažnost kratšího ramene za daných podmínek, aniž by v některém místě bylo překročeno dovolené namáhání. Je dáno:

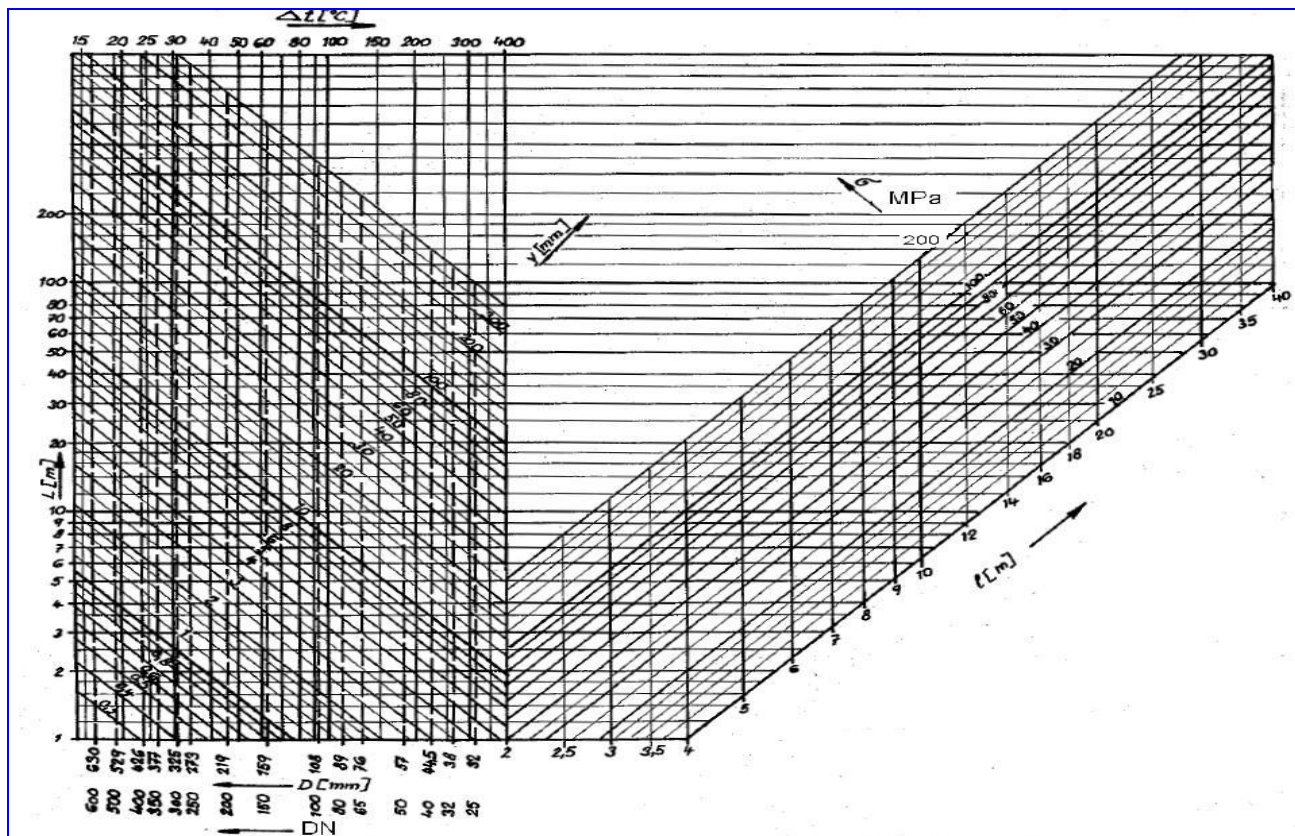
- délka kratšího ramene
- rozdíl mezi výpočtovou a montážní teplotou
- vnější průměr trubky
- velikost dovoleného napětí

Použijeme klíč č.2 k nomogramu viz obrázek:



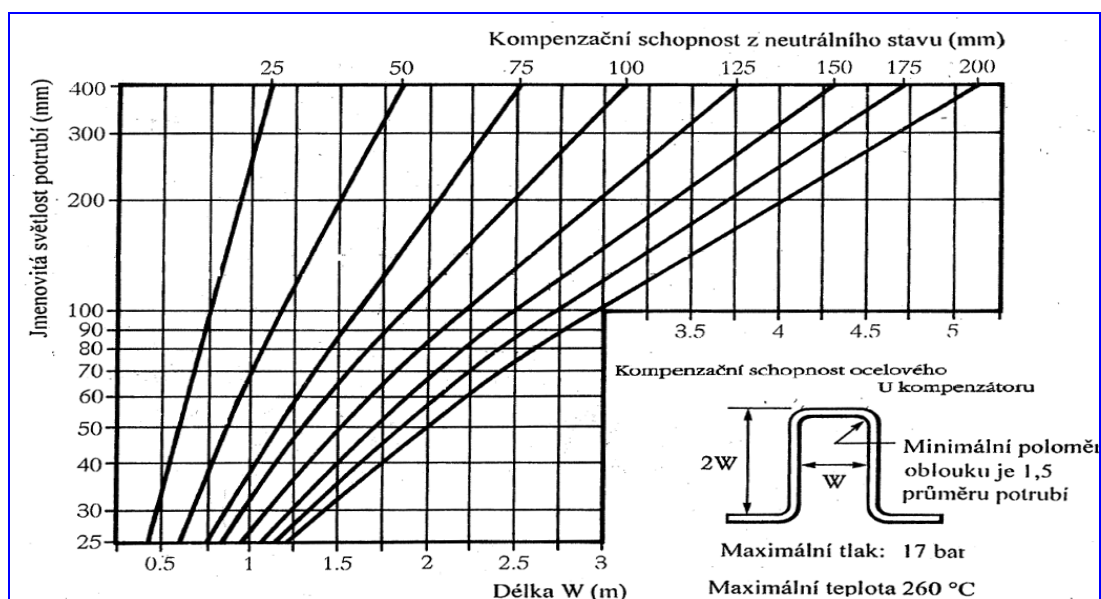
Obr. 8.16. Klíč 2

Nomogram nebere v úvahu vliv ohybů, zanedbání tohoto vlivu posouvá výsledky výpočtu na stranu bezpečnosti. Při kontrole se může stát, že původně kratší rameno vyjde jako delší. To se stává tehdy, když obě ramena jsou příliš krátká a příliš tuhá. Zde je nutno zvětšovat délku delšího ramene a pro ni hledat délku ramene kratšího.

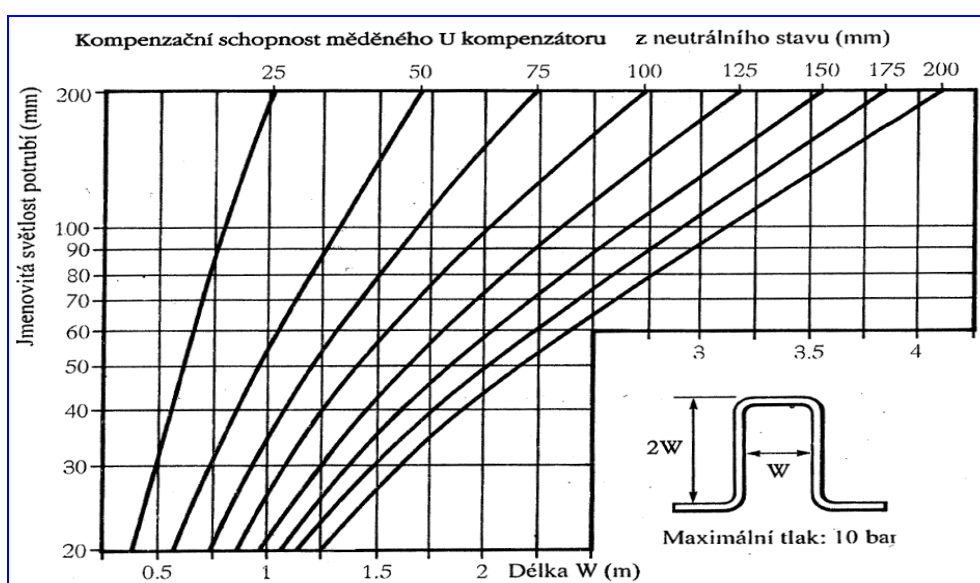


Obr. 8.17. Nomogram pro určení namáhání a deformace potrubí

8.5. Nomogramy pro určení rozměrů U-kompenzátoru



Obr. 8.18. Kompenzační schopnost ocelového parního U kompenzátoru



Obr. 8.19. Kompenzační schopnost měděného parního U kompenzátoru

9. Použitá literatura a literatura pro další studium

9.1. Odborná literatura

1. Černoch S. a kol.: Strojně technická příručka, SNTL Praha, 1977
2. Hájek E. a kol.: Pružnost a pevnost I. díl, Ediční středisko ČVUT, Praha 1984
2. Hájek E. a kol.: Pružnost a pevnost II. díl, Ediční středisko ČVUT, Praha 1981
3. Höschl C.: Ohyb a krut ve složitých soustavách, ČSVTS Praha, 1985
4. Höschl C.: Pružnost a pevnost, In: Černoch S.: Strojně technická příručka, 13. upravené vydání, SNTL Praha, 1977
5. Leinveber J., Vávra P.: Strojnické tabulky, Albra 2005
6. Němec J.: Výpočty pevnosti tlakových nádob, SNTL Praha, 1962
7. Novák O.: Spojitý nosník ve vzorcích, Práce Praha, 1956
8. Pekař V.: Jak na potrubí? Kniha nejen o pevnostních výpočtech potrubí, I. Vydání, APTI Líbeznice, 2021
9. Timošenko Š.: Pružnost a pevnost I.díl, Technicko-vědecké vydavatelství, Praha, 1951
10. Timošenko Š.: Pružnost a pevnost II.díl, Technicko-vědecké vydavatelství, Praha, 1951
11. Vrzal B. a kol.: Strojnické tabulky, SNTL Praha, 1970

9.2. *Související technické normy včetně norem, které je nutno zadávat ve výpočtovém programu*

Situace týkající se technických norem se vyvíjí, proto to, co je uvedeno v následujících kapitolách nemusí být platné a beze změn v době, kdy tento text čtete.

9.2.1. Pro ocel, kovy a ostatní houževnaté homogenní materiály

ČSN EN 12952-3 Vodotrubné kotle a pomocná zařízení – část 3: Konstrukce a výpočet částí namáhaných tlakem

ČSN EN 13480-3 Kovová průmyslová potrubí. Část 3: Konstrukce a výpočet

AD-2000 Merktblatt, HP100R – Konstrukční pravidla – Kovová potrubí

AD-2000 Merktblatt, HP120R – Konstrukční pravidla – Potrubí z termoplastu

ANSI/ASME B31 Code for Pressure Piping, B31.1 Power piping

ANSI/ASME B31 Code for Pressure Piping, B31.2 Fuel gas piping

ANSI/ASME B31 Code for Pressure Piping, B31.3 Chemical plant and petroleum refinery piping

ANSI/ASME B31 Code for Pressure Piping, B31.4 Liquid-petroleum transportation piping systém

ANSI/ASME B31 Code for Pressure Piping, B31.5 Refrigeration piping

ANSI/ASME B31 Code for Pressure Piping, B31.7 Nuclear power piping

ANSI/ASME B31 Code for Pressure Piping, B31.8 Gas transmission and distribution piping

ANSI/ASME B31 Code for Pressure Piping, B31.9 Building services piping

ANSI/ASME B31 Code for Pressure Piping, B31.11 Slurry Transportation Piping Systems

ANSI/ASME NB/NC/ND Nuclear piping code

CAN/CSA Z662 Oil and gas pipeline systems (Canada)

BS 806 Specification for design and construction of ferrous piping installations for and in connection with land boilers (british standard)

IGE/TD/12 Institution of Gas Engineers: Pipework stress analysis for gas industry plant (British)

PD 8010-1 Pipeline systems. Steel pipelines on land. Code of practice

PD 8020-2 Pipeline systems. Subsea pipelines. Code of practice

Swedish Piping Code (SPC) Method 1

Swedish Piping Code (SPC) Method 2

STOOMWEZEN D1101 – Dutch – steam and its application

RCC-M Code Règles de conception et de construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires

Codeti Code de Construction des Tuyauteries Industrielles

SNCT

DNV Det Norske Veritas

Norwegian TBK5, 6 Norwegian Piping Code

FDBR Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e.V.

HPGSL High Pressure Gas Safety Law, japonský kód

JPI Japan petroleum Institute – standards

KHK. Japan

MITI class 3, General Fire Protection code, Japan

SNIP 2.05.06-85 Russian Oil and Gas Code

9.2.2. Normy pro lamináty

ČSN EN ISO 14692 (450040) Naftový a plynárenský průmysl – Sklolaminátové potrubí (GRP)

AD-2000 Merkblatt, HP110R – Konstrukční pravidla – Laminátová potrubí s anebo bez vyložování

BS 7159 Design and Construction of Glass Reinforced Plastics (GRP) Piping Systems for Individual Plants or Sites

UKOOA Oil&Gas (UK) United Kingdom Offshore Operators Association Oil&Gas (UK)

KRV Verlegerichtlinien für Rohrleitungen aus textilglasfaserverstärkten

Reaktionsformharzen

WAVI-STRONG Engineering Guide for Wavistrong glass fobet reinforced pipe systems

9.2.3. Další využívané normy

ČSN EN ISO 5199, Příloha B „Vnější síly a momenty na přírubách hrdel čerpadla“

ANSI/API – American Petroleum Institute

API 610 Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries

API 611 General-Purpose Steam Turbines for Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services

API 685 Sealless Centrifugal Pumps for Petroleum, Heavy Duty Chemical, and Gas Industry Services

NEMA – National Electrical Manufacturers Association

NEMA SM23 Steam Turbines for Mechanical Drive Service

NEMA SM24 Land Based Steam Turbine Generator Sets 0 to 33,000 kW

EJMA – Expansion Joints Manufacturers Association

EJMA Standards: The Authority on Expansion Joints

GOST 32388-2013 Truboprovody technologičeskije (Process piping)

GOST R 555596-2013 Seti teplovye. Normy i metody rasčjota na pročnost i seismičeskije vzdějstvija

RD 10-249-98 Normy rasčjota na pročnost stacionarnych kotlov i truboprovodov para i gorjačej vody

9.3. Firemní literatura

1. CAEPIPE, User's Manual, SST Systems, Inc., 2003
2. CAESAR II Version 5.00 Applications Guide, COADE/ Engineering Physics Software, Inc, 2005
3. CAESAR II, User's Guide, COADE/ Engineering Physics Software, Inc, 2004
4. COADE: Technical reference manual, Houston, Texas, USA, 2007
5. CKTI – Vibroseism: Piping Flexibility and Stress Analysis software, St. Petersburg, Rusko, 2017
6. AUTOPIPE, User's manual, Bentley, Exton, PA 19341, USA
7. ROHR2 Feature list, SIGMA GmbH, Unna, Německo

8. PIPESTRESS Training, DST Computer Services S.A., Ženeva, Švýcarsko
9. Chemoprojekt s.p.: Pevnostní kontrola potrubních větví, 1970

9.4. Zajímavé internetové adresy

Adresa stránek	Téma stránek
https://ipotrubi.cz	Plno informací o potrubí pro profesionály
https://www.technicka-zarizeni.cz	O vybraných technických zařízeních
https://www.apti.cz	Asociace poskytovatelů technických informací
https://www.ticr.eu/	Technická inspekce České republiky
https://www.unmz.cz/	Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
https://www.cadvision.sk	Distributor pro výpočetní programy Caesar II, Pipestress, FEAtools, NozzlePro
https://www.quest.cz	Distributor pro výpočetní program AutoPIPE
https://www.techsoft-eng.cz	Distributor pro výpočetní programy Caepipe, Ansys
https://www.smartcad.sk	Distributor pro výpočetní program Rohr2