VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIROMENTAL ENGENEERING

KONSTRUKČNÍ NÁVRH PECE

FURNACE DESIGN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER´S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. MICHAL STŘÍŽ

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. RICHARD NEKVASIL, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student (ka): Bc. Michal Stříž

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Konstrukční návrh pece

v anglickém jazyce:

Furnace design

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na návrh konstrukčního řešení pece dle zadaných procesních požadavků. Zejména bude pozornost věnována návrhům základních částí a to trubkových hadů, závěsů a pláště pece včetně návrhu řešení vyzdívky.

Cíle diplomové práce:

1. Rozbor řešeného problému.
2. Návrh konstrukčního řešení hlavních komponent pece.
3. Pevnostní posouzení jednotlivých částí.
4. Stanovení životnosti hlavních komponent pece.

Seznam odborné literatury:

[1] CSN EN 12 952 – Vodotrubné kotle a pomocná zařízení
[2] Kadrnožka J.: Tepelné elektrárny a teplárny, SNTL, Praha 1982
[3] VDI – Wärmeatlas, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland 1984
[4] Megson, T. H. G.: Structural and Stress Analysis, Butterworth-Heinemann, Oxford 2000
[5] Noda N., Hetnarski R. B., Tanigawa Y.: Thermal Stresses, Taylor & Francis, London 2003

Vedoucí diplomové práce: Ing. Richard Nekvasil, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc. Děkan fakulty

Abstrakt

Předložená diplomová práce se zabývá problematikou trubkových pecí v procesním průmyslu, především konstrukčním návrhem přestupního potrubí, které je jednou z hlavních částí pece. Dle požadavků je navržené potrubí pevnostně posouzeno pomocí dvou potrubních programů Japar a Caesar II, které jsou stručně představeny. Dále je s tímto návrhem provedeno několik variant výpočtů a všechny výsledky jsou porovnány. Porovnání pomůže objasnit rozdílnost obou programů. Například vliv kolen na pevnostní posouzení potrubních systémů. Diplomová práce také popisuje faktory, které ovlivňují životnost pece.

Klíčová slova

Trubková pec, trubkový systém, pevnostní výpočet, potrubí, hrdlo, koleno, uložení, poddajnost kolena, creep - tečení materiálu.

Summary

This master´s thesis deals with issues of tube furnaces in the process industries, especially with a design of a transfer pipeline, which is one of the main parts of the furnace. According to the requirements, designed pipeline is stress analyzed using the two pipeline programs Japar and Caesar II, that are briefly described. In addition to this design several variants of analysis are performed and the results are compared. Comparison helps to explain the diversity of the programs. For example, the effect of elbows on the stress analysis. The master´s thesis also describes the factors that affect the working life of the furnace.

Keywords

Tube furnace, pipe system, stress analysis, pipeline, nozzle, elbow, support, flexibility elbow, creep.

Bibliografická citace

STŘÍŽ, M. *Konstrukční návrh pece.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Richard Nekvasil, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma „Konstrukční návrh pece“ jsem vypracoval samostatně. Použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v přiloženém seznamu literatury.

V Brně dne 25. května 2012

_____

Bc. Michal Stříž

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval: Vedoucímu diplomové práce Ing. Richardu Nekvasilovi, Ph.D. za jeho odborné vedení. Ing. Liboru Horsákovi za inspiraci, poskytnuté informace a čas strávený při konzultacích. Autorovi programu Japar Ing. Jiřímu Soukupovi za poskytnutí cenných informací. Společnosti KRÁLOVOPOLSKÁ STRESS ANALYSIS GROUP s.r.o za poskytnutí softwaru Japar a Caesar II.

Obsah

1 Seznam použitých symbolů 10
2 Úvod 12
3 Pece v procesním průmyslu 13
3.1 Princip 13
3.1.1 Radiační sekce 14
3.1.2 Konvekční sekce 15
3.2 Rozdělení pecí dle konstrukčního uspořádání 16
3.2.1 Válcová pec 16
3.2.2 Šachtová pec 17
3.3 Konstrukční řešení hlavních částí pece 18
3.3.1 Ocelová konstrukce 18
3.3.2 Izolace 18
3.3.3 Trubkový systém 19
3.3.4 Hořáky 19
3.3.5 Pomocné součásti pece 20
3.4 Návrh konstrukčního řešení pece 22
4 Návrh a pevnostní posouzení přestupního potrubí 23
4.1 Zadání 23
4.2 Metoda konečných prvků (MKP) 25
4.2.1 Princip 25
4.2.2 Postup výpočtu 25
4.3 Návrh přestupního potrubí 27
4.4 Program Japar 28
4.4.1 Výpočtový model 28
4.4.2 Zadání vstupních údajů 29
4.4.3 Grafický výstup 31
4.4.4 Textový výstup 32
4.5 Program Caesar 36
4.5.1 Výpočtový model 36
4.5.2 Zadání vstupních údajů 37
4.5.3 Grafický výstup 38
4.5.4 Textový výstup 39
4.6 Porovnání výsledků 41

4.6.1 Hmotnost a těžiště 41
4.6.2 Reakce 41
4.6.3 Posuvy 43
4.6.4 Napětí 44
4.6.5 Zhodnocení porovnání 45
5 Vliv kolen na pevnostní výpočet potrubních systémů 46
5.1 Poddajnosti kolen 46
5.1.1 Vliv kolen v Japaru 46
5.1.2 Vliv kolen v Caesaru 47
5.2 Výpočet se zjednodušeným zahrnutím poddajnosti kolen 48
5.3 Výpočet bez zadání kolen 50
5.4 Zhodnocení vlivu kolen na pevnostní výpočet 51
6 Životnost pece 52
6.1 Faktory ovlivňující životnost 52
6.1.1 Creep 52
6.1.2 Únava 53
6.1.3 Thermal – stress 53
6.1.4 Koroze 54
6.1.5 Eroze 54
6.2 Životnost za působení creepu 55
6.2.1 Larson-Millerův parametr 55
7 Závěr 56
8 Seznam použitých zdrojů 58
9 Seznam příloh 60

1 Seznam použitých symbolů

Symbol	Název	Jednotka
a_1	koeficient pro výpočet poddajnosti kolene	-
a_2	koeficient pro výpočet poddajnosti kolene	-
a_3	koeficient pro výpočet poddajnosti kolene	-
a_4	koeficient pro výpočet poddajnosti kolene	-
b	koeficient pro výpočet poddajnosti kolene	-
bas.	základní vztahy pro výpočet napětí	-
D	vnější průměr trubky	mm
Dx	posuv v ose x	mm
Dy	posuv v ose y	mm
Dz	posuv v ose z	mm
D1	posuvy při zatěžovacím stavu 1	-
E	modul pružnosti v tahu	MPa
elb.	přídavné vztahy pro kolena pro výpočet napětí	-
Fx	síla v ose x	N
Fy	síla v ose y	N
Fz	síla v ose z	N
HP	vnitřní přetlak při tlakové zkoušce	MPa
HYD	tlaková zkouška	-
K_p	součinitel poddajnosti kolene	-
MO	montážní podmínky	-
MPag	vnitřní přetlak	MPa
Mx	moment v ose x	Nm
My	moment v ose y	Nm
Mz	moment v ose z	Nm
OPE	provozní podmínky	-
p	vnitřní přetlak	MPa
PP	provozní podmínky	-
Px	posuv v ose x	mm
Py	posuv v ose y	mm
Pz	posuv v ose z	mm
P_{L-M}	Larson-Millerův parametr	-
P1	vnitřní přetlak při zatěžovacím stavu 1	MPa
r	střední poloměr průřezu trubky	mm
R	poloměr zakřivení osy oblouku	mm
Rx	natočení kolem osy x	deg
Ry	natočení kolem osy y	deg
Rz	natočení kolem osy z	deg
s	tloušťka stěny trubky	mm
(SIG)1	prosté membránové napětí od silových účinků	MPa
(SIG)2	napětí určené ze součtu složek prostých membránových a prostých ohybových napětí od silových účinků	MPa
(SIG)RK	rozkmit napětí určený ze součtu složek membránových, ohybových, základních teplotních a kompenzačních napětí	MPa
t_{DL}	čas do porušení (požadovaná životnost)	h x 10^{-3}
T	teplota	°C
T_c	teplota creepu materiálu	°C

Symbol	Název	Jednotka
T_D	provozní teplota	°C
T_m	teplota tavení materiálu	°C
TZ	tlaková zkouška	-
|u|	výslednice posuvů	mm
ux	posuv v ose x	mm
uy	posuv v ose y	mm
uz	posuv v ose z	mm
W	hmotnost potrubí včetně izolace a média	kg
WW	hmotnost potrubí včetně izolace a média při tlakové zkoušce	kg
λ	bezrozměrný geometrický parametr λ	-
ω	vliv vnitřního přetlaku ω	-

2 Úvod

V odvětvích průmyslu, kde probíhají chemické procesy závislé na teple, jsou trubkové pece nezbytnou součástí. Jedná se především o ropný, petrochemický, chemický a potravinářský průmysl. Pece předávají teplo médiu pomocí spalování paliv a umožňují tak průběh požadovaných procesů. Vzhledem k důležitosti a rostoucím nárokům na tyto zařízení, jedná se především o bezpečnost, pořizovací a provozní náklady a spolehlivost, je potřeba problematiku trubkových pecí neustále zdokonalovat. Což souvisí i s dopadem na životní prostředí, protože spalováním paliva se do ovzduší dostávají nečistoty.

Kapalné, plynné nebo smíšené médium proudící v trubkovém systému uvnitř pece je za vysokého tlaku ohříváno na stovky stupňů Celsia, v krajních případech může teplota trubek dosahovat až kolem 1200 °C. Spalování paliva probíhá v tepelně izolovaném prostoru, kde se médium ohřívá přes stěny trubek. Tímto jsou konstrukce pece a médium chráněny před přímými účinky plamene. Trubkové pece lze rozdělit podle účelu a konstrukčního uspořádání do několika skupin. Každá pec se skládá z několika hlavních částí a jejich návrh patří k základním úkolům. Vzhledem k rozsáhlosti konstrukčního návrhu pece je diplomová práce zaměřena především na trubkový systém, který je jednou z nejdůležitějších částí pece. Toto zaměření umožní detailnější seznámení se zvolenou problematikou.

Namáhání pece je vzhledem k provozním podmínkám značné (vysoká teplota, tlak, agresivnost média a spalin), a proto se při návrhu musí zohlednit všechna možná zatížení. Mimo provozních podmínek musíme brát v úvahu i okolní podmínky v místě provozu (vítr, sníh a jiné) a odlišné vlastnosti materiálů, ze kterých je pec postavena a jejich vzájemné ovlivnění (ocelová konstrukce a izolace). Zvoleným úkolem je návrh přestupního potrubí dle požadavků zadání. Pro pevnostní posouzení návrhu jsou zvoleny programy Japar a Caesar II. Oba programy jsou určeny pro pevnostní posouzení potrubních systémů. Je předpoklad, že pokud vložíme stejné zadání do dvou potrubních programů, tak dostaneme shodné výsledky. Je provedeno několik variant výpočtu návrhu a vzájemné porovnání ukáže, zdali jsou výsledky stejné. Porovnání je zaměřeno na kolena a jejich vliv na pevnostní výpočet potrubních systémů.

Mezi důležité parametry pecí patří i životnost, která především souvisí s náklady, zisky a bezpečností provozu. Na pece působí hned několik faktorů najednou, které ji negativně ovlivňují. Opomenutím některých faktorů může mít za následek poruchovost a tím pádem snížení skutečné, reálné životnosti.

Hlavním cílem této diplomové práce je seznámení s problematikou ohřevných pecí, návrh a pevnostní kontrola přestupního potrubí, objasnění vlivu kolen na pevnostní výpočet potrubních systémů a nalezení faktorů ovlivňujících životnost pece.

3 Pece v procesním průmyslu

Pece předávají teplo médiu pomocí spalování plynných nebo kapalných paliv, které je nezbytné pro řadu dějů např. parní a katalytický reforming, atmosférická a vakuová destilace, výroba páry, pyrolýza, katalytické krakování, hydrokrak a jiné.

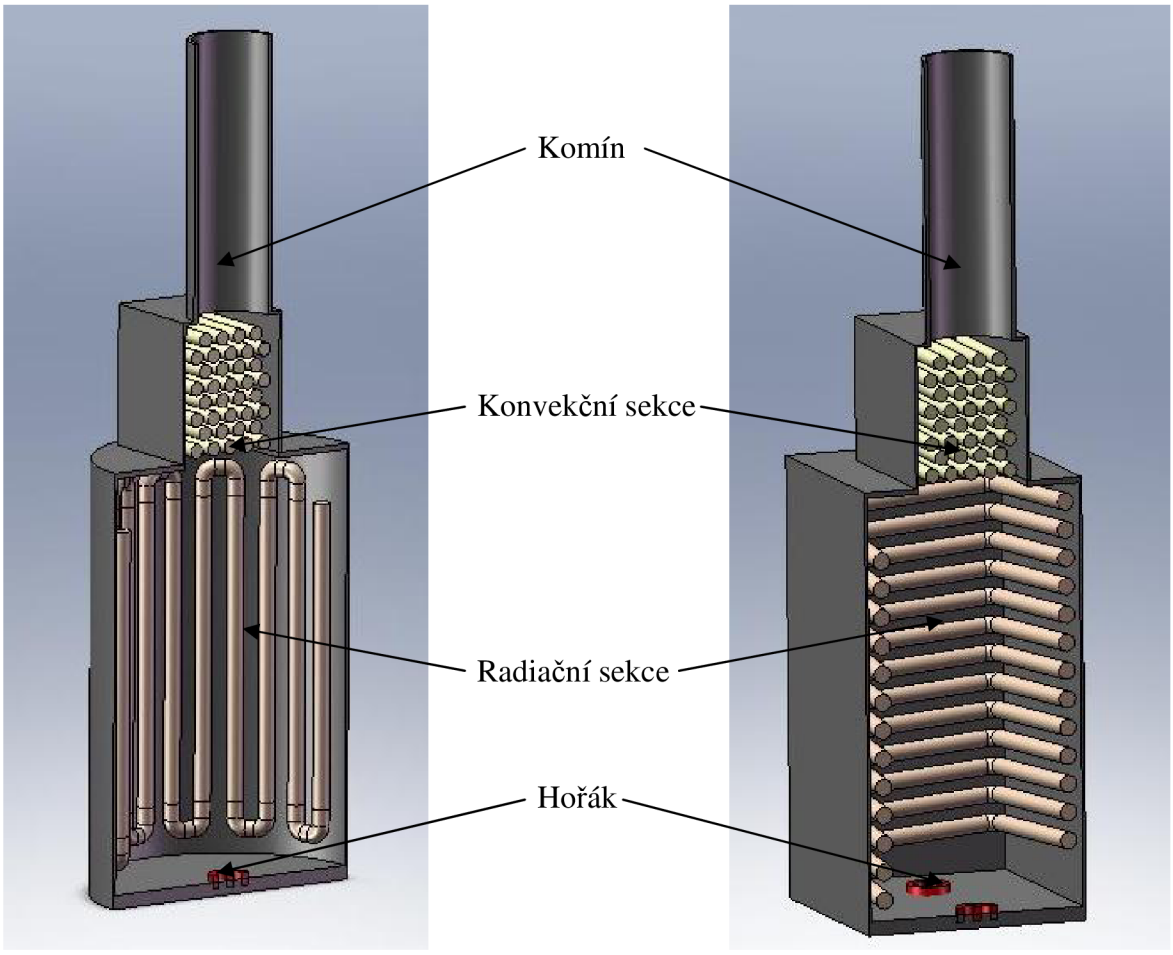
Pece se dělí na dvě základní skupiny:
- ohřevné (slouží pouze k ohřevu média),
- reakční (v peci dochází k ohřevu a požadované reakci).

Rozdělení dle tvaru radiační komory:
- válcová,
- šachtová [1, 2, 3].

3.1 Princip

Spalováním se chemická energie paliva přeměňuje na tepelnou energii, která je dále předávána proudícímu médiu uzavřeném v trubkovém systému (trubkový had). Ohřívaným médiem bývá voda, vodní pára, ropné frakce a jiné. Teplo médiu se předává vedením přes stěny trubek. Vnější povrch trubek je ohříván převážně radiací (zářením) a konvekcí (prouděním).

Z technologického hlediska tvoří pec radiační sekce, konvekční sekce, hořáky, trubkový systém a komín. Schéma válcové a šachtové pece je na obr. 1.

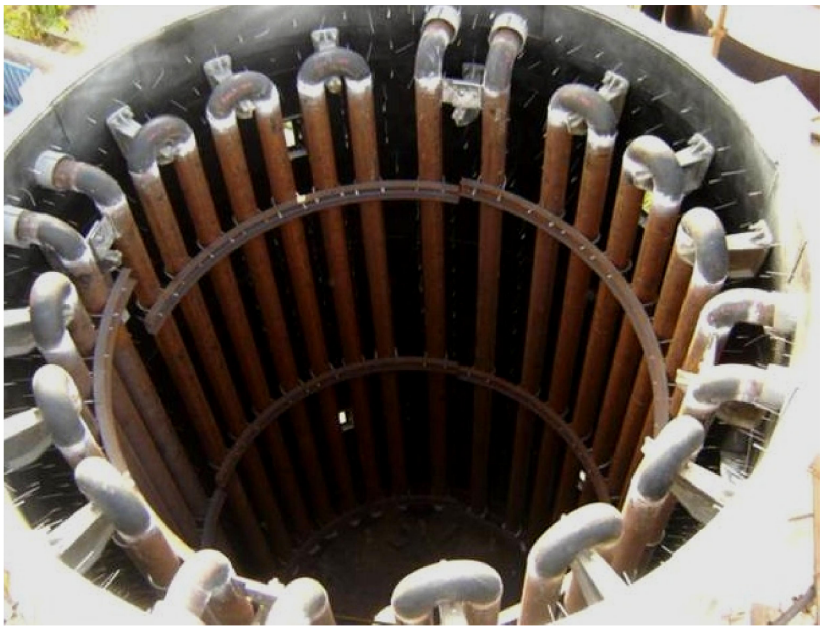


Obr. 1 Schéma válcové a šachtové pece

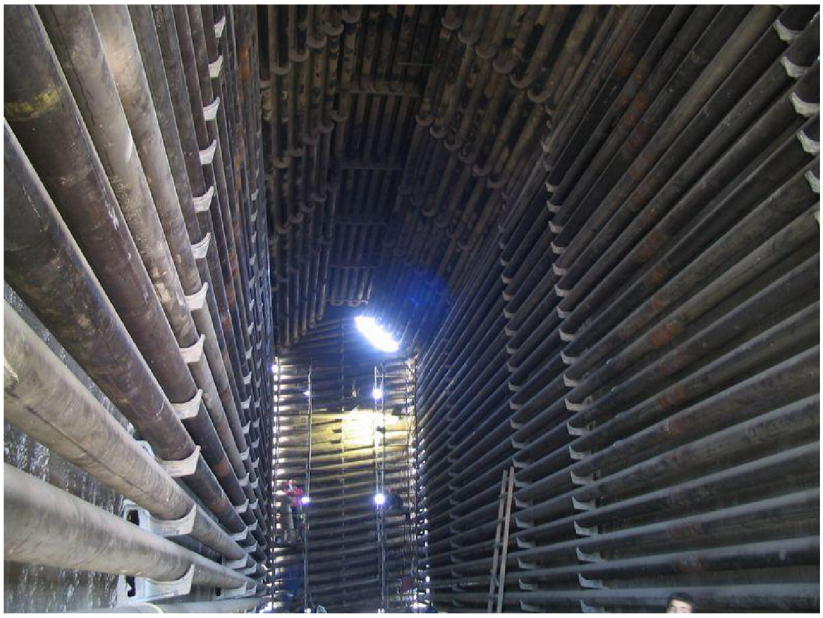
Pec musí být navržena tak, aby médium získalo požadované množství tepla a nedošlo k jeho znehodnocení přehřátím. To je dosaženo vhodnou dispozicí trubkového systému, kontrolou a řízením spalování paliva a proudění média. Různé typy pecí mají své charakteristické maximální výkony. Jejich zvětšováním by docházelo ke snižování účinnosti. Pokud je potřeba vyšších výkonů, staví se několik pecí vedle sebe.

3.1.1 Radiační sekce

V této části pece dochází k přenosu tepla převážně radiací a přenese se zde 50 – 80 % z celkového přeneseného tepla, zbytek v části konvekční. Spalováním paliva se vytváří radiační záření, které dopadá na část trubkového systému a stěny pece. Trubkový systém je zde uložen vertikálně nebo horizontálně. Ukázka radiační sekce válcové pece je na obr. 2 a šachtové na obr. 3.



Obr. 2 Radiační sekce válcové pece [4]



Obr. 3 Radiační sekce šachtové pece [5]

3.1.2 Konvekční sekce

Spaliny vystupující z radiace proudí do konvekční sekce, která je zpravidla umístěna nad radiační sekcí. Zde se teplo přenáší na trubkový systém především konvekcí, využívá se zbytkového tepla spalin a tím se zvýší celková účinnost pece. Trubkový systém v této části pece je méně tepelně namáhán a může se na vnější straně zvětšit přidáním prvků (podélné a příčné žebrování, trny atd.). Trubkový systém konvekční sekce s žebrováním je zobrazen na obr. 4.

Obr. 4 Konvekční sekce pece [6]

3.2 Rozdělení pecí dle konstrukčního uspořádání

Pro různé technologické účely byly vyvinuty konstrukčně rozdílné pece. V současnosti mezi nejpoužívanější patří válcová a šachtová.

3.2.1 Válcová pec

Radiační sekce válcové pece má tvar válce, zobrazeno na obr. 5. Na dně se nachází jeden nebo více hořáků. Přímo nad radiační sekcí je umístěna konvekční sekce a na ni navazuje komín.

Ve válcové peci dochází k rovnoměrnějšímu rozdělení tepelného toku. Maximální výkon tohoto typu pece je okolo 20 MW.

Válcové pece požadují nízké investiční náklady a malé nároky na zastavěnou plochu při zachování dobré tepelné účinnosti.

Obr. 5 Válcová pec [8]

3.2.2 Šachtová pec

Radiační sekce šachtové pece má tvar kvádru, zobrazeno na obr. 6. Na dně je umístěno více hořáků a stejně jako u válcové pece navazuje na radiační sekci přímo sekce konvekční a na ni komín.

Tepelný tok je rozdělen nerovnoměrněji než u válcové pece. Maximální výkon tohoto typu pece dosahuje okolo 50 MW.

Šachtové pece vyžadují vysoké investiční náklady a vyšší nároky na zastavěnou plochu, ale poskytují vyšší výkony [3, 7, 9, 10].

Obr. 6 Šachtová pec [8]

3.3 Konstrukční řešení hlavních částí pece

Ohřevnou pec v podstatě tvoří tyto základní části: ocelová konstrukce, izolace, trubkový systém, hořáky a pomocná zařízení. V následujících kapitolách jsou jednotlivé části pece podrobněji popsány.

3.3.1 Ocelová konstrukce

Ocelová konstrukce slouží k uchycení trubkového systému a dalšího příslušenství. Dále slouží k oddělení spalovacího prostoru od okolí.

Principiálně jsou dva typy ocelové konstrukce. První tvoří nosníkové prvky (sloupy, nosníky), na které jsou připojeny plechy (dnes převážně svařované, dříve i nýtované). Tyto plechy mají ochrannou funkci (oddělují spalovací prostor od okolí). Druhý typ je tzv. samonosná ocelová konstrukce. Zde jsou také nosníkové prvky, ale připojené plechy jsou projektovány jako nosné. Druhý typ umožňuje dosáhnout menšího množství materiálu při stejném zatížení.

3.3.2 Izolace

Izolace odděluje nosnou konstrukci od horkého prostoru, kde dochází ke spalování paliva a brání úniku tepla. Dále díky izolaci není ocelová konstrukce vystavena přímému plamenu a tím pádem vysokým teplotám, a proto tvoří důležitou část pece. Tloušťka izolace se volí tak, aby teplota na vnější straně ocelové konstrukce nepřesahovala 80 °C nebo dle požadavku zákazníka.

Používaná izolace:

- pevná (žáruvzdorné cihly, beton),
- vláknitá (minerální vata sibral).

Při návrhu a instalaci izolace se musí brát ohled na rozdílnou tepelnou roztažnost konstrukce a pevné izolace, aby nedošlo k jejímu poškození. Ukázka vyzdívky (pevné izolace) je na obr. 7.

Obr. 7 Vyzdívka pece [11]

3.3.3 Trubkový systém

Trubkový systém je nejdůležitější a často nejnákladnější část pece a volba jeho materiálu patří k nejobtížnějším problémům při návrhu pece. Většinou se skládá z bezešvých tažených trubek spojených přivařenými spojkami tvaru U nebo našroubovanými spojkami (headry). Rozměr trubek se volí tak, aby ohřívané médium mělo průtok zaručující dostatečně vysoký koeficient přestupu tepla.

Trubkový systém může být společný pro radiační i konvekční sekci nebo pro každou sekci samostatný. Pokud je společný pro obě sekce, tak se tyto sekce navzájem propojují přestupním potrubím. Dále může být jednoproudý nebo víceproudý, což ovlivňuje tlakovou ztrátu a souproudý nebo protiproudý, což ovlivňuje přestup tepla. Ukázka části trubkového systému válcové pece je zobrazena na obr. 8.

Obr. 8 Část trubkového systému válcové pece [4]

3.3.4 Hořáky

Umožňují řízené spalování plynného nebo kapalného paliva. Zajišťují smíchání paliva a spalovacího vzduchu, rozprášení do spalovací komory a včasné zapálení směsi. V jedné peci je umístěn jeden nebo více hořáků dle potřeby.

Hořáky pro trubkové pece můžeme rozdělit do dvou skupin:

- atmosférické,
- přetlakové.

Atmosférické hořáky: přívod spalovacího vzduchu a pohybu spalin je zajištěno přirozeným tahem komínu, kterým vzniká ve spalovací komoře podtlak. Hybnou silou je zde rozdíl tlaků atmosférické vrstvy a vrstvy spalin v komíně. Se zvyšující teplotou výstupních spalin a se zvětšením výšky komína se tato síla zvětšuje.

Přetlakové hořáky: u tohoto typu hořáku zajišťuje přívod spalovacího vzduchu a pohybu spalin v peci ventilátor. Pece s tímto typem hořáku nepotřebují ke svému provozu vysoký komín.

Klade se důraz na dosažení co nejdokonalejšího spalování. Při nedokonalém spalování spaliny zanáší trubkový systém a tím se snižuje přestup tepla. Dále vznikají škodlivé látky (oxid uhelnatý, oxid dusíku a jiné), které nepříznivě působí na ekologii.

3.3.5 Pomocné součásti pece

Jako pomocné součásti pece jsou zde uvedeny: závěsy trubek, APEX, bezpečnostní klapky, plošiny a průhledítka.

Závěsy trubek: slouží k uchycení trubkového systému a jsou uchyceny k ocelové konstrukci pece (prochází izolací). Při návrhu a realizaci pece je na ně kladen velký důraz, protože při jejich nesprávné funkci by mohlo dojít k zhroucení trubkového hadu a tím pádem k nefunkčnosti a poškození pece. Ukázka závěsů je na 9.

Obr. 9 Závěsy trubkového systému [12]

APEX: využívá tepla spalin vypouštěných do komína, které slouží k předehřevu spalovacího vzduchu. Spaliny vystupující z konvekční sekce do komína jsou vedeny do výměníku, kde ohřívají nasávaný vzduch vstupující do hořáků a pak jsou vedeny zpět do komína. Odvod spalin do výměníku u válcové pece je ukázán na obr. 10.

Obr. 10 Odvod spalin do výměníku [5]

Bezpečnostní klapky: chrání pec před tlakovou vlnou vyvolanou explozí. Může nastat havarijní stav, kdy se nahromadí výbušná směs paliva a spalovacího vzduchu, která může iniciací horkých částí pece nebo vnějším podmětem vyvolat explozi. Explozí dojde k nárůstu tlaku a mohlo by dojít k poškození pece. Bezpečnostní klapky snižují tlak uvnitř pece na bezpečnou hodnotu. Umisťují se tak, aby nedošlo k ohrožení obsluhy v případě její činnosti.

Plošiny: na peci zpřístupňují místa, kde je potřeba obsluhy. Umožňují přístup k ovládacím prvkům. Jsou to např. činnosti: obsluha hořáků, klapek, ventilů, kontrola vnitřku pece průhledítky, čištění trubek.

Průhledítka: umožňují náhled dovnitř pece a následnou kontrolu hořáků, průběhu hoření a trubkového hadu [3, 7].

3.4 Návrh konstrukčního řešení pece

Konstrukční návrh celé pece vychází z technologického návrhu, který dle požadavků zákazníka stanovuje základní parametry (teploty, průtoky média, množství paliva, počet proudů, základní rozměry, dimenze potrubí, vyzdívku, atd.). Na základě těchto parametrů se navrhne konstrukční řešení, které je ověřeno, zda splňuje technologické a pevnostní požadavky. Prakticky všechny pece jsou v jednotlivých zemích klasifikovány dle národních bezpečnostních norem jako tlakové zařízení (v Evropské unii PED) a musí splňovat všechny jejich nároky.

Z navržených parametrů se volí typ ocelové konstrukce a dále jako jednodílná nebo vícedílná a to z důvodu přepravních rozměrů, což platí i pro její ostatní části. Pec je většinou vyráběna na jiném místě, než je její skutečné provozní umístění. Konstrukce je navržena tak, aby vydržela všechny možné způsoby namáhání (vlastní tíha pece, provozní podmínky, klimatické podmínky, atd.).

Uvnitř je vhodným způsobem uložena izolace, tak aby nedošlo vlivem rozdílné teplotní roztažnosti materiálů k jejímu poškození. Z tohoto důvodu jsou vhodnější vláknité izolace, které se přizpůsobí, ale nedají se vždy použít. Při použití pevné je třeba vhodně navrhnout dilatační spáry, které tento problém vyřeší. Možná je i kombinace pevné a vláknité, kdy pevná izolace je ve spodní části pece a na ni navazuje vláknitá.

Nesložitějším úkolem je navržení trubkového systém vzhledem k jeho náročným provozním podmínkám. Trubkový systém může být horizontální nebo vertikální a mezi jeho jednotlivé prvky patří trubka, koleno, kolektor, redukce, příruba, t-kus a dno. Především u trubek je důležitá správně navržená dimenze (rozměr), vzhledem ke správné funkci a vysoké pořizovací ceně. Dále je třeba navrhnout trasu potrubí tak, aby dosahovala přípustnou tlakovou ztrátu. Také uchycení trubkového systému ke konstrukci uvnitř pece nepatří mezi jednoduché úkoly. Jsou to kritická místa, kde mohou vznikat poškození, protože spojují místa s rozdílnou teplotou a přenáší celou hmotnost trubkového systému na konstrukci.

Ostatní části pece se navrhují dle požadavků, předpisů a zkušeností (pomocné součásti pece), tak aby splňovala všechna kritéria.

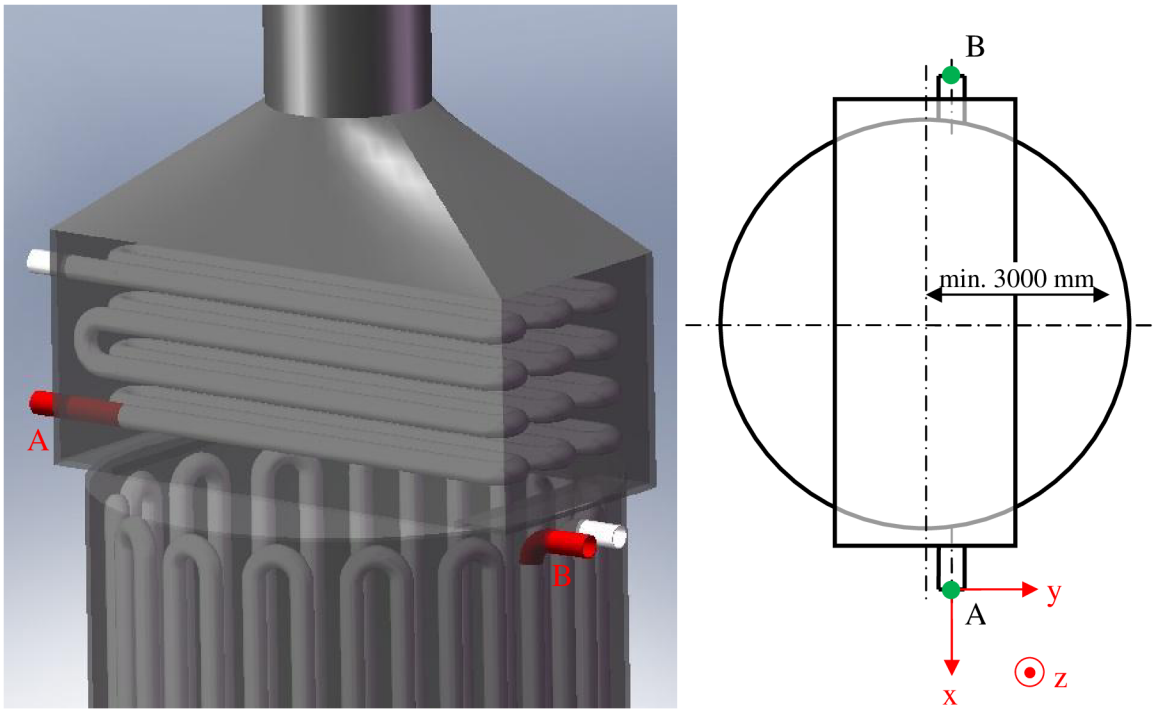
Vzhledem k důležitosti trubkového systému je v diplomové práci řešen návrh a pevnostní posouzení přestupního potrubí. Tato část spojuje radiační a konvekční sekci a je umístěno vně pece. Dále je zaměřeno na kolena a jejich vliv na pevnostní posouzení potrubních systémů.

4 Návrh a pevnostní posouzení přestupního potrubí

Následující část práce se zabývá návrhem a pevnostním posouzením přestupního potrubí, které spojuje trubkový systém konvekční a radiační sekce pece. Je navrženo jedno řešení a pro pevnostní posouzení je použito programů pro výpočet potrubí Japar a Caesar, pracujících na principu metody konečných prvků (MKP). MKP i oba programy jsou stručně popsány (všeobecné informace, zadávání a výstupy). Jsou provedeny dva výpočty se stejným zadáním, které jsou porovnány. Pro výpočtáře potrubních systémů jsou důležité především reakce na hrdla a uložení, posuvy a napětí.

4.1 Zadání

Navrhněte přestupní potrubí trubkového systému válcové pece dle zadaných podmínek. Zvolte vhodně rozměry trubek, parametry kolen a uložení. Zadání je zobrazeno na obr. 11.



Obr. 11 Zadání

Vstupní údaje

Hodnocení dle normy: NTD A.S.I. SEKCE III (Japar)
ASME B31.3 (Caesar)

Zatěžovací stavy dle tab. 1:

Zatěžovací stav	teplota [°C]	přetlak [MPag]
montážní podmínky	20	0.0
provozní podmínky	300	1.0
tlaková zkouška	20	1.3

Tab. 1 Zatěžovací stavy

Materiál potrubí: 12022.1 (dle ČSN)
A106 Gr. B (dle ASTM)

Rozměr potrubí: 168,3 mm x 7,112 mm
6“ Sch 40

Korozní přídavek: 3 mm

Výrobní tolerance: 12,5%

Izolace: tloušťka 100 mm
hmotnost 100 kg/m^3

Médium: voda
hustota 1000 kg/ m^3

Souřadnice, posuvy a natočení hrdel pro provozní podmínky dle tab. 2:

bod	osa	souřadnice [mm]	posuvy [mm]	natočení [°]
A	x	0	10	0
	y	0	0	0
	z	0	1	0
B	x	-4000	-10	0
	y	0	0	0
	z	-500	-1	0

Tab. 2 Souřadnice, posuvy a natočení hrdel

NTD A.S.I. SEKCE III - Normativně technická dokumentace vypracovaná Asociací strojních inženýrů. Vychází z východních předpisů a hodnotí pevnost zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER.

ASME B31.3 (ASME Code for Pressure Piping) – Vytvořená společností American Society of Mechanical Engineers na základě amerických předpisů. Hodnotí tlaková potrubí pro petrochemické, chemické, farmaceutické, textilní, papírenské, kryogenní a s tímto související zařízení.

Protože každý předpis používá vlastní materiálové charakteristiky, jsou charakteristiky v Japaru upraveny podle Caesaru. V Japaru lze hodnoty jednodušeji měnit, proto je jako vzor použit Caesar. Následující úprava eliminuje možnou rozdílnost ve výpočtu na základě materiálových charakteristik. Hustoty materiálu a média jsou použity při teplotě 20 °C, neuvažuje se změna hustoty v závislosti na teplotě.

4.2 Metoda konečných prvků (MKP)

Metoda konečných prvků (dále MKP) je moderní metoda používaná v různých oblastech inženýrských výpočtů (napěťově-deformační analýza, vedení tepla, proudění kapalin, elektřina, magnetismus a jiné). Pro potřebu diplomové práce je využito napěťově-deformační analýzy, která umožňuje řešit tyto základní typy úloh:

- napěťově deformační analýza při statickém, cyklickém i dynamickém zatěžování, včetně nelineárních úloh,
- vlastní i vynucené kmitání soustav s tlumením i bez tlumení,
- kontaktní úloha pružnosti (rozložení stykového tlaku),
- stabilitní problémy (ztráta tvarové stability konstrukcí),
- analýza stacionárního i nestacionárního vedení tepla a určení teplotní napjatosti (včetně zbytkové).

4.2.1 Princip

MKP je založena na variačním počtu, zatím co analytické metody pružnosti jsou založeny na diferenciálním a integrálním počtu. Což jsou dva zcela rozdílné principy.

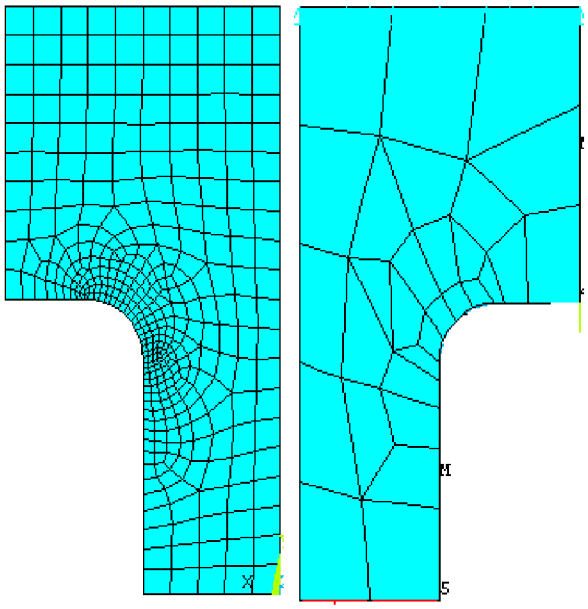
4.2.2 Postup výpočtu

Praktický postup výpočtu MKP probíhá za pomoci počítačového programu. Lze jej rozdělit do třech na sebe navazujících částí: preprocesing, solver a postprocesing.

Preprocesing: (příprava vstupních dat) vytvoří se geometrický model tělesa, který se spojitě rozdělí na prvky konečných rozměrů. Mezi základní prvky patří:

- 2D prvky (rovinné, rotačně symetrické),
- 3D prvky (prostorové),
- prutové prvky,
- skořepinové prvky,
- deskostěnové prvky,
- speciální prvky (kontaktní, trhlinové apod.).

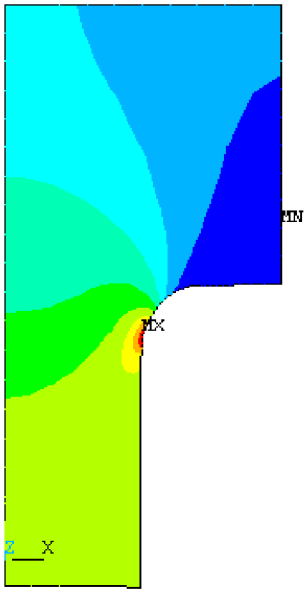
Rohy těchto prvků, eventuálně některé další charakteristické body, jsou uzlovými body, pro které se určují neznámé hodnoty posuvů. Jednotlivé prvky vytvářejí síť, jejíž hustota je rozhodující pro přesnost výsledků. Hrany prvků jsou obvykle přímé, ale použitím kvadratických prvků lze realizovat zakřivené. Kvadratické prvky lépe vystihují lokální koncentraci napětí i při použití hrubé sítě. Hustota sítě má vliv na rychlost a přesnost výpočtu, ukázka je zobrazena na obr. 12. Výpočtář ji volí na základě svých zkušeností. Všem prvků je třeba zadat konstitutivní parametry materiálu a dále zadat okrajové podmínky (vazby, zatížení).



Obr. 12 Jemná a hrubá síť [13]

Solver: (řešič) následuje spuštění řešiče, který na základě vstupních dat vyřeší neznámé posuvy a z nich spočítá přetvoření a napětí. MKP není možno řešit nepřímé úlohy, protože řešič nelze spustit bez zadání všech vstupních údajů.

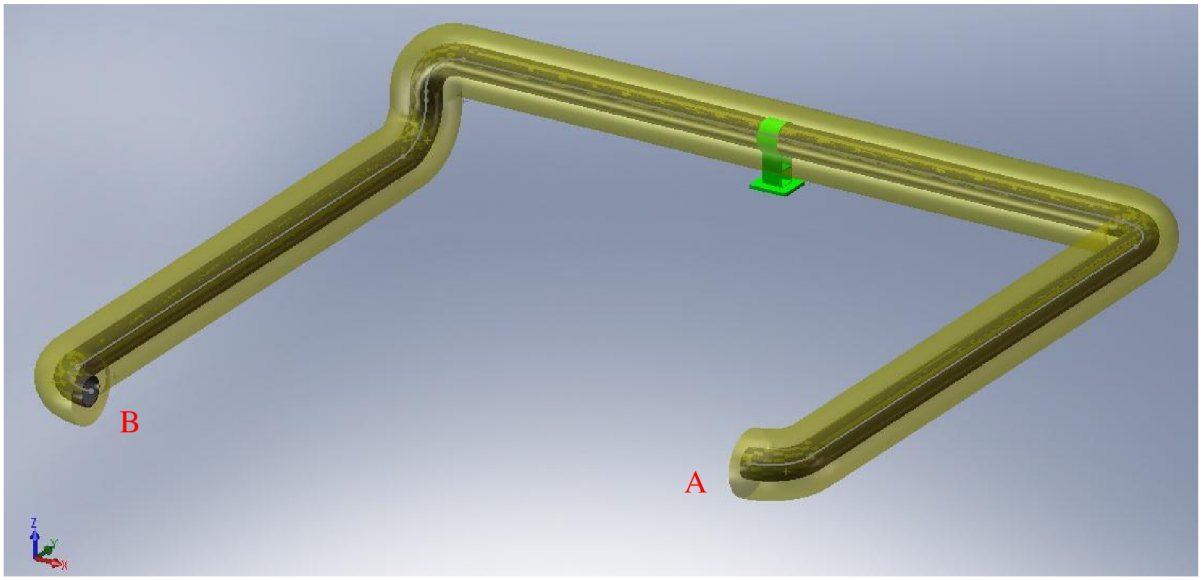
Postprocesing: (zpracování výsledků) umožňuje zpracovat výsledky v nejrůznějších podobách (rozložení neznámých parametrů v tělese nebo zvolené podoblasti, počítat redukovaná napětí potřebné pro posuzování mezních stavů [13, 14]. Výsledek MKP je ukázán na obr. 13.



Obr. 13 Rozložení hlavního napětí (červená = max.) [13]

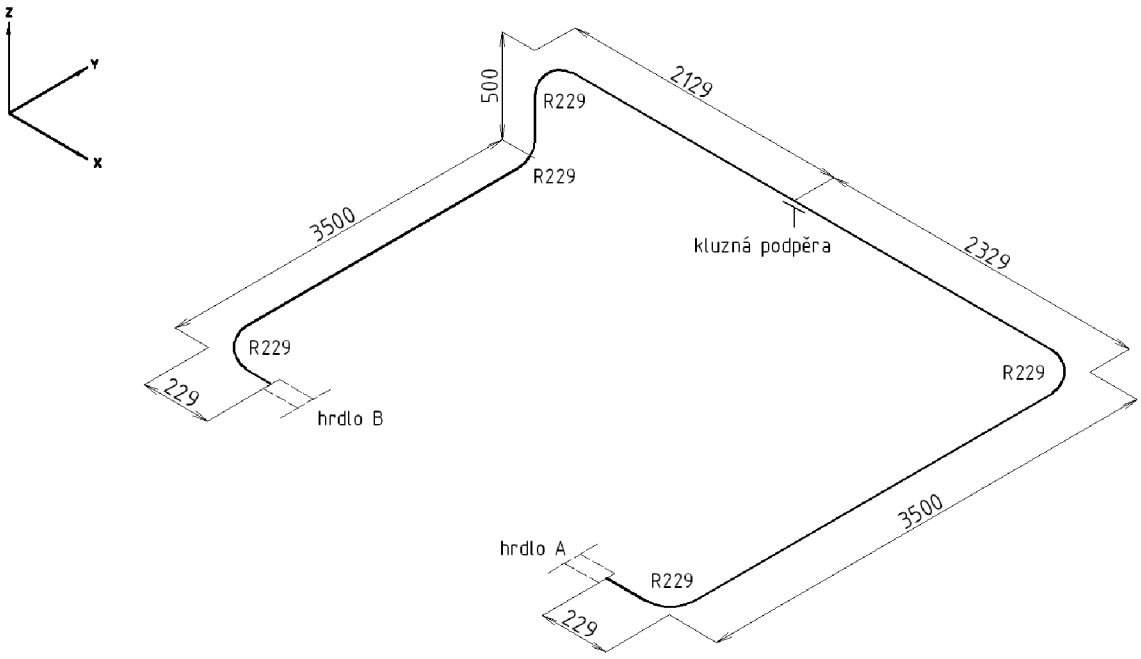
4.3 Návrh přestupního potrubí

Přestupní potrubí je navrženo dle požadavků zadání, zobrazeno na obr. 14. Je navrženo i jedno uložení (kluzná podpěra) a to z důvodu snížení reakcí (síly a momenty) na jednotlivá hrdla. Pro tento návrh bude proveden pevnostní výpočet.



Obr. 14 Návrh přestupního potrubí

Rozměry potrubí a kolen jsou voleny na základě normalizovaných rozměrů. Navržené uložení je kluzná podpěra, která dovolí posuvy ve vodorovné rovině a natočení kolem všech os. Kluzná podpěra je objímka s nosníkem, pěvně připevněná k potrubí, volně položená na nosné desce. Při odstranění nebo navržení jiného druhu uložení (vedení, pevný bod) je zjištěno, že vznikají příliš velké reakce (síly a momenty) na jednotlivá hrdla a samotné uložení, což není žádoucí. Rozměry přestupního potrubí jsou zobrazeny v axonometrii na obr. 15.



Obr. 15 Rozměry přestupního potrubí v axonometrii

4.4 Program Japar

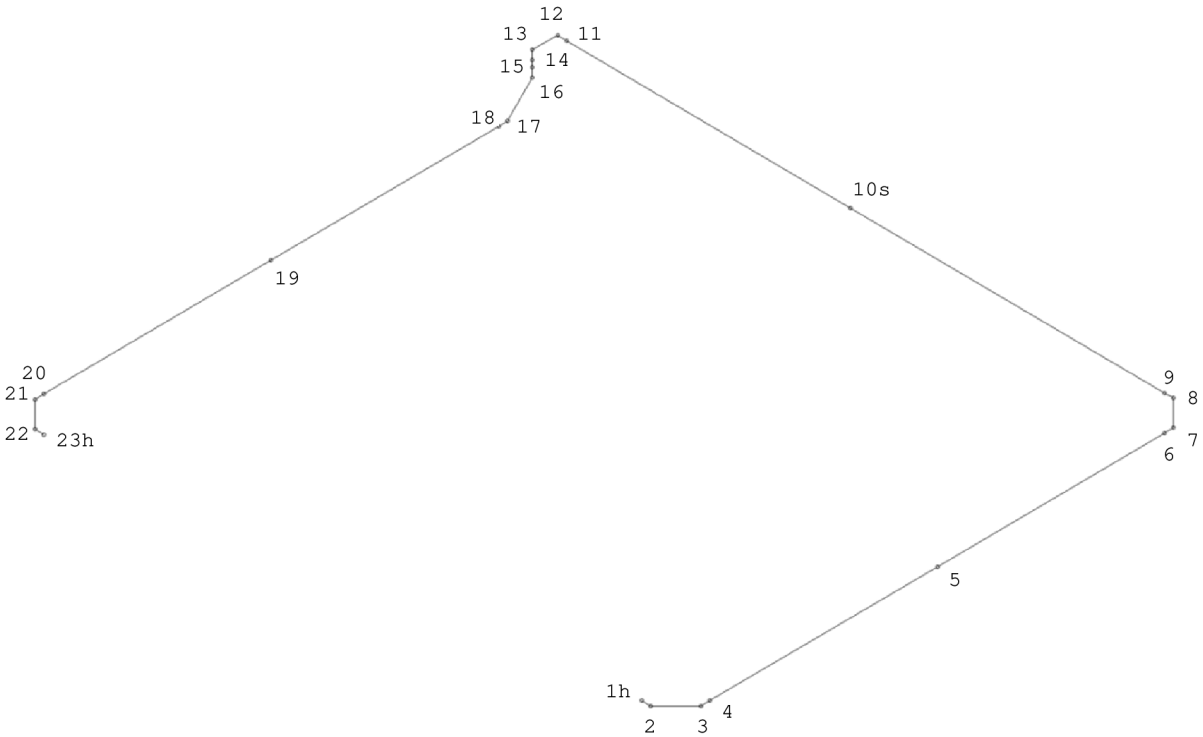
Japar je dosti obecný a rozsáhlý potrubní program, pracující na bázi MKP, který je určen pro pevnostní výpočty potrubních systémů, rámových konstrukcí a jejich kombinací v lineární oblasti s hodnocením podle RTM 108.020.01-75, PNAE G-7-002-86 (ruské normy pro jaderné elektrárny) a NTD A.S.I. (normativně technická dokumentace). Umožňuje stanovit odezvu na všechny typy statického zatížení a libovolné okrajové podmínky. V oblasti dynamiky provádí program modální analýzu (výpočet vlastních hodnot a tvarů kmitu). Odezvu na seizmické buzení řeší program metodou spekter odezvy.

Potrubní program má jeden vstupní soubor (*.ji) a tři výstupní soubory. Dva z nich jsou textové (*.jo a *.602) a třetí je grafický výstup (*.jg).

Potrubní systém je v souladu s metodou konečných prvků rozdělen na prvky, nazývané výpočtové větve. Každá větev začíná a končí ve výpočtovém uzlu. Uzly jsou vloženy do všech míst, kde je potrubí zakotveno, zavěšeno, podepřeno, osově vedeno nebo jinak uloženo, zatíženo osamělým břemenem, kde dochází k větvení, změně materiálu, průřezu nebo pracovních parametrů. Ve větvi se předpokládají konstantní materiálové a průřezové charakteristiky, konstantní teplota, tlak a spojité zatížení. Armatury jsou nahrazeny modely potrubních elementů tak, aby byla vystižena jejich relativní tuhost a jejich rozložení hmoty.

4.4.1 Výpočtový model

Potrubní systém je rozdělen na prvky s uzlovými body dle obr. 16. Pro účely diplomové práce je dělení jemnější (oblast kolen, půlení dlouhých rovných úseků).



Obr. 16 Výpočtový model s jednotlivými uzly

4.4.2 Zadání vstupních údajů

Vstupní údaje se zadávají do programu pomocí textového souboru (*.ji), který se píše dle požadované struktury. Zadávací soubor pro výpočet přestupního potrubí:

```
PNAE

ASI

12345 -3
70 3  TL.ZK 3 20 1 1

2222
1     20   2.0344E5  441  241  0.40  1.10E-5  7.833E-6
2     50   2.0179E5  430  235  0.40  1.10E-5  7.833E-6
3    100   1.9815E5  410  220  0.38  1.15E-5  7.833E-6
4    150   1.9504E5  390  214  0.38  1.19E-5  7.833E-6
5    200   1.9131E5  370  206  0.38  1.22E-5  7.833E-6
6    250   1.8872E5  350  198  0.38  1.26E-5  7.833E-6
7    300   1.8525E5  330  186  0.39  1.29E-5  7.833E-6
8    350   1.7896E5  320  177  0.39  1.32E-5  7.833E-6

3333
1   1    168.3   7.112   3.9   0      (pipe)
2   1    168.3   7.112   3.9   0      (elbow, R 229)

4444
1 1.0  0 1 1 1 1 1 1

5555
1   20    0.0   1000E-9   8.4288931E-3   0 0 0   (assembly)
2   300   1.0   1000E-9   8.4288931E-3   0 0 0   (operating conditions)
3   20    1.3   1000E-9   8.4288931E-3   0 0 0   (pressure test)

6666
1h   2      1 1 1 1      229      0        0        (elbow)
2    3      1 2 1 1           r 229                 (elbow)
3    4      1 1 1 1      0        229      0        (elbow)
4    5      1 1 1 1      0        1521     0
5    6      1 1 1 1      0        1521     0
6    7      1 1 1 1      0        229      0        (elbow)
7    8      1 2 1 1           r 229                 (elbow)
8    9      1 1 1 1      -229     0        0        (elbow)
9    10s    1 1 1 1      -2100    0        0
10s  11     1 1 1 1      -1900    0        0
11   12     1 1 1 1      -229     0        0        (elbow)
12   13     1 2 1 1           r 229                 (elbow)
13   14     1 1 1 1      0        0        -229     (elbow)
14   15     1 1 1 1      0        0        -42
15   16     1 1 1 1      0        0        -229     (elbow)
16   17     1 2 1 1           r 229                 (elbow)
17   18     1 1 1 1      0        -229     0        (elbow)
18   19     1 1 1 1      0        -1521    0
19   20     1 1 1 1      0        -1521    0
20   21     1 1 1 1      0        -229     0        (elbow)
21   22     1 2 1 1           r 229                 (elbow)
22   23h    1 1 1 1      229      0        0        (elbow)
```

určení souřadného systému a počtu zatěžovacích stavů

materiálové charakteristiky

parametry trubek a kolen

zatěžovací stavy, vlastnosti média a izolace

zadání geometrie potrubní trasy pomocí přírůstku na osách x, y, a z, přiřazení vlastností prvkům

```
7777
0555333    0   10   0
           0   0    0
           0   1    0      1 [@A-convection] 999

0555333    0  -10   0
           0   0    0
           0  -1    0      12 [@B-radiation] 999

0003000   5a [%sliding support] 999

7802
TABNAP
1 MO 0
2 PP  0
3 TZ  0

TAB602
MO  1 0   :MONTAZNI PODMINKY/ASSEMBLY
PP   2 0   :PRACOVNI PODMINKY/OPERATING CONDITIONS
TZ   3 0   :TLAKOVA ZKOUSKA/PRESSURE TEST

9999
```

zatížení uzlů, posuvy

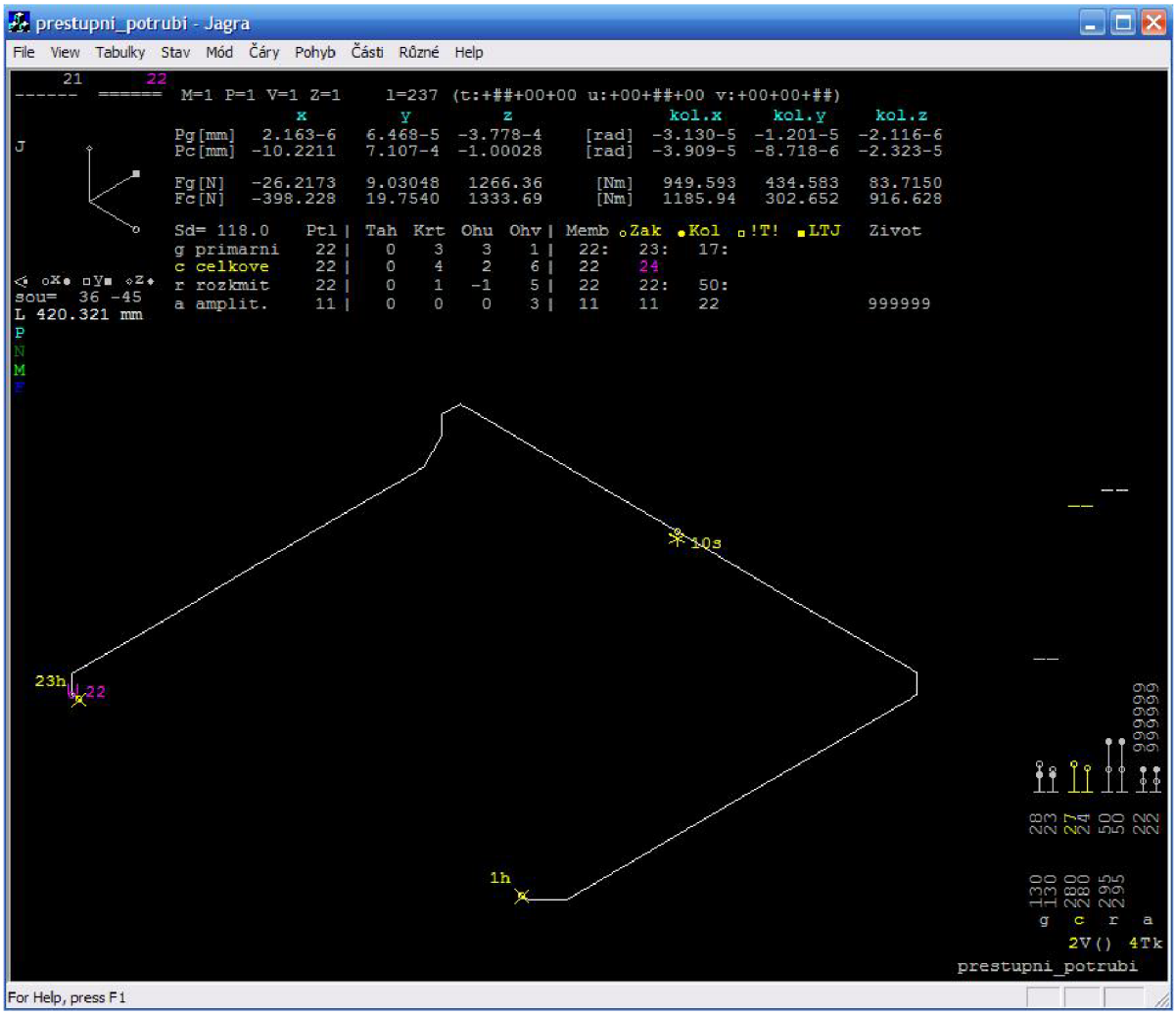
údaje pro výstupní soubor

Program Japar vznikal v době vývoje prvních počítačů. Zadávání pomocí textového souboru se může zdát zastaralé, ale umožňuje zadat nejrůznější modely např. náhradní model nádrží, výměníků, uložení, konstrukcí a jiné. Toto ovšem vyžaduje podrobnější znalost dané problematiky a programu. Samozřejmostí je aktualizace programu dle nových požadavků, které provádí sám autor programu. V novějších programech může být výpočtář podle těchto zadávacích možností omezen. Program řeší i mnohem více problému, avšak ty nebudou uvedeny v diplomové práci.

Po dokončení vstupního souboru se spustí program, který vygeneruje jeden grafický (*.jg) a dva textové výstupy (*.jo a *.602). Ty slouží k vyhodnocení potrubního systému.

4.4.3 Grafický výstup

Znázorňuje vstupních data a výsledky, ale pro samotné hodnocení potrubního systému je možné využít i textové výstupy (*.jo a *.602). Grafický výstup výpočtu je zobrazen na obr. 17.



Obr. 17 Grafický výstup Japaru

Grafický výstup popisuje více kategorií napětí (zatěžovacích účinků). Různé kategorie mají různou důležitost vzhledem ke vzniku trvalých plastických deformací.

Kategorie g: (gravitace, přetlak) zahrnuje pouze silové účinky ze zadaného zatěžovacího stavu - gravitaci, přetlak media a ostatní silové účinky na větve a na uzly.

Kategorie c: (celkové zatížení) představuje celkový zatěžovací stav.

Kategorie r: (rozkmit) představuje rozdíl (změnu) mezi zadaným zatěžovacím stavem (kategorie c) a jemu příslušným stavem studeným a beztlakovým. Zahrnuje tedy účinek dilatace, nucených posuvů uzlů.

Kategorie a: (amplituda) představuje amplitudu změny mezi zadaným zatěžovacím stavem a jemu příslušným stavem studeným a beztlakovým.

V případě seizmického zatížení jsou k dispozici *kategorie s* (seizmické zatížení) a *d* (primární zatížení doplněné o seizmiku).

4.4.4 Textový výstup

Program vytváří dva výstupní soubory *.jo a *.602. Oba soubory lze otevřít v textových editorech a dále upravovat. První soubor vypisuje kompletní výsledky včetně vstupních údajů, ale pro hodnocení je velmi rozsáhlý a méně přehledný. Je uveden v příloze 1. Druhý soubor je méně obsáhlý a přehlednější, a proto je vhodnější k hodnocení. Slouží také ke tvorbě výpočtové zprávy o potrubním systému. Výstupní soubor (*.602) přestupního potrubí:

```
          JAPAR
File: prestupni_potrubi
Number of nodes:   13
```

```
Load Cases to print off forces
```

```
  LC     No.LC  koef.Sei
  MO     C  1     0.000 :MONTAZNI PODMINKY/ASSEMBLY
  PP     C  2     0.000 :PROVOZNI PODMINKY/OPERATING CONDITIONS
  TZ     C  3     0.000 :TLAKOVA ZKOUSKA/PRESSURE TEST
```

```
Restraint summary
```

```
Coordinate system xyz right handed, +z vertical upwards
Abbreviations in LC column:
   MO     - MONTAZNI PODMINKY/ASSEMBLY
   PP     - PROVOZNI PODMINKY/OPERATING CONDITIONS
   TZ     - TLAKOVA ZKOUSKA/PRESSURE TEST
```

Node: 1h boundary condition: 0555333
Nozzle: A-convection

LC kSei	T [C]	p [MPa]	Displ. [mm] Px	Py	Pz	Forces [N] Fx	Fy	Fz	Moments [Nm] Mx	My	Mz
MO 0.0	20	0.00	-0.00	0.00	-0.00	-26	9	-1258	-860	514	47
PP 0.0	300	1.00	10.0	0.00	1.00	-394	20	-1358	-1203	489	827
TZ 0.0	20	1.30	-0.00	0.00	-0.00	-26	9	-1258	-860	514	47
maximum static			10.0	0.00	1.00	-394	20	-1358	-1203	514	827

Node: 23h boundary condition: 0555333
Nozzle: B-radiation

LC kSei	T [C]	p [MPa]	Displ. [mm] Px	Py	Pz	Forces [N] Fx	Fy	Fz	Moments [Nm] Mx	My	Mz
MO 0.0	20	0.00	0.00	-0.00	-0.00	26	-9	-1300	-950	-513	-83
PP 0.0	300	1.00	-10.0	-0.00	-1.00	394	-20	-1366	-1183	-387	-905
TZ 0.0	20	1.30	0.00	-0.00	-0.00	26	-9	-1300	-950	-513	-83
maximum static			-10.0	-0.00	-1.00	394	-20	-1366	-1183	-513	-905

Node: 10s boundary condition: 0003000
Designation: sliding support

LC kSei	T [C]	p [MPa]	Displ. [mm] Px	Py	Pz	Forces [N] Fx	Fy	Fz	Moments [Nm] Mx	My	Mz
MO 0.0	20	0.00	-0.14	0.04	-0.00	0	0	-3907	0	0	0
PP 0.0	300	1.00	-0.33	12.3	-0.00	0	0	-3741	0	0	0
TZ 0.0	20	1.30	-0.14	0.04	-0.00	0	0	-3907	0	0	0
maximum static			-0.33	12.3	-0.00	0	0	-3907	0	0	0

Tabulky zobrazují reakce (síly a momenty) a posuvy zatížených uzlů (hrdla, uložení apod.) ve zvoleném souřadném systému a v jednotlivých zatěžovacích stavech (montážní podmínky, provozní podmínky a tlaková zkouška). Pokud je potřeba, lze vyžádat výpis dalších uzlů. Pro hodnocení potrubního systému jsou důležité především reakce na hrdla a uložení, které se pak porovnávají s jejich dovolenými účinky.

Maximum displacements – DW

LC		node	displacements[mm] ux	uy	uz	|u|
1	MO	16	0.182	0.049	-1.685	1.695
		15	0.126	0.063	-1.685	1.690
		14	0.087	0.073	-1.685	1.688
		13	0.031	0.087	-1.684	1.687
		17	0.312	0.005	-1.641	1.671
2	PP	16	0.182	0.049	-1.685	1.695
		15	0.126	0.063	-1.685	1.690
		14	0.087	0.073	-1.685	1.688
		13	0.031	0.087	-1.684	1.687
		17	0.312	0.005	-1.641	1.671
3	TZ	16	0.182	0.049	-1.685	1.695
		15	0.126	0.063	-1.685	1.690
		14	0.087	0.073	-1.685	1.688
		13	0.031	0.087	-1.684	1.687
		17	0.312	0.005	-1.641	1.671

Maximum displacements – DW+TH

LC		node	displacements[mm] ux	uy	uz	|u|
1	MO	16	0.182	0.049	-1.685	1.695
		15	0.126	0.063	-1.685	1.690
		14	0.087	0.073	-1.685	1.688
		13	0.031	0.087	-1.684	1.687
		17	0.312	0.005	-1.641	1.671
2	PP	13	-7.884	12.857	-2.052	15.220
		14	-7.837	12.829	-2.274	15.204
		15	-7.805	12.809	-2.425	15.195
		16	-7.759	12.781	-2.647	15.184
		12	-7.418	12.846	-1.305	14.891

3	TZ	16	0.182	0.049	-1.685	1.695
		15	0.126	0.063	-1.685	1.690
		14	0.087	0.073	-1.685	1.688
		13	0.031	0.087	-1.684	1.687
		17	0.312	0.005	-1.641	1.671

Tato část výstupu zobrazuje maximální posuvy uzlů (automaticky generované programem) od tíhy a od tíhy + teplotní dilatace pro jednotlivé zatěžovací stavy.

```
Code compliance and highest stresses
------------------------------------

Stresses have been calculated in line with maximal shear stress
theory (Tresca) and assigned to groups of stress categories (SIG)1
 (SIG)2 (SIG)RK in line with NTD A.S.I. Section III.

  (SIG)1   global membrane stress due to mechanical load
           (SIG)1 < 1.0 [SIG]  for NPP
           (SIG)1 < 1.35[SIG]  for pressure test

  (SIG)2   global or local membrame stress + global bending stress
           due to mechanical load
           (SIG)2 < 1.3 [SIG]  for NPP
           (SIG)2 < 1.7 [SIG]  for pressure test

  (SIG)RK  stress range given by global or local membrane stress,
           global and local bending stress and thermal and expansion
           stress
           (SIG)RK < min(2.5-Rp0.2/Rm ; 2) * Rp0.2

  where [SIG] is allowable stress in line with chapter 4 of NTD A.S.I.
  Section III

Attributes "bas. elb. !T! LTJ" indicate used appropriate equations
to calculate stresses for given categories and pipe components

  bas.     basic equations for all pipe components
  elb.     additional equations for elbows
  !T!      additional equations for for all Tees
  LTJ      additional equations for equel (not reducing Tees)

If the most stressed point is located at a node of branch,
a dot is printed out behind the node.
The maximum calculated stress ratio of allowable for each category (S/L)
shal not exceed 1.0 .
```

LCs	Group of stress category	Most stressed element (branch.)	Calculated stress S [MPa]	Allovable stress L [MPa]	S/L []
LC 1 MO	(SIG)1	12 13.	0.2	160.7	0.001
	(SIG)2 bas.	10s. 11	19.8	208.9	0.095
	elb.	21 22.	19.9	208.9	0.095
LC 2 PP	(SIG)1	1h. 2	25.7	124.0	0.207
	(SIG)2 bas.	10s. 11	32.6	161.2	0.202
	elb.	21 22.	20.4	161.2	0.127
	(SIG)RK bas.	15 16.	25.9	360.2	0.072
	elb.	21 22.	58.4	360.2	0.162
pr.test TZ	(SIG)1	7. 8	33.4	216.9	0.154
	(SIG)2 bas.	10s. 11	36.5	273.1	0.134
	elb.	21 22.	20.4	273.1	0.075
	(SIG)RK bas.	1h. 2	33.4	470.8	0.071
	elb.	2. 3	42.5	470.8	0.090

Následující tabulka zobrazuje maximální spočtená a dovolená napětí pro uvažované zatěžovací stavy v kritických uzlech. Kde [SIG] je dovolené napětí ve smyslu kapitoly 4 NTD A.S.I. SEKCE III. Význam jednotlivých kategorií napětí:

(SIG)1: prosté membránové napětí od silových účinků
(SIG)1 < 1.0 [SIG] pro normální provozní podmínky
(SIG)1 < 1.35[SIG] pro tlakovou zkoušku

(SIG)2: napětí určené ze součtu složek prostých membránových a prostých ohybových napětí od silových účinků
(SIG)1 < 1.0 [SIG] pro normální provozní podmínky
(SIG)1 < 1.35[SIG] pro tlakovou zkoušku

(SIG)RK: rozkmit napětí určený ze součtu složek membránových, ohybových, základních teplotních a kompenzačních napětí
(SIG)RK < min (2.5-$Rp_{0.2}$/Rm ; 2) * $Rp_{0.2}$

Zkratky bas., elb. rozlišují v případě některých z kategorií napětí sadu použitých vztahů pro výpočet napětí takto:

bas. pro všechny průřezy (tzv. základní vztahy)

elb. přídavné vztahy pro kolena

Pokud je kritické místo v krajním bodě větve, tiskne se za uzlem tečka. Pokud max. vypočtené napětí v jednotlivých skupinách kategorií napětí se označí znakem S, příslušný limit znakem L, potom poměr S/L nesmí překročit hodnotu 1.0.

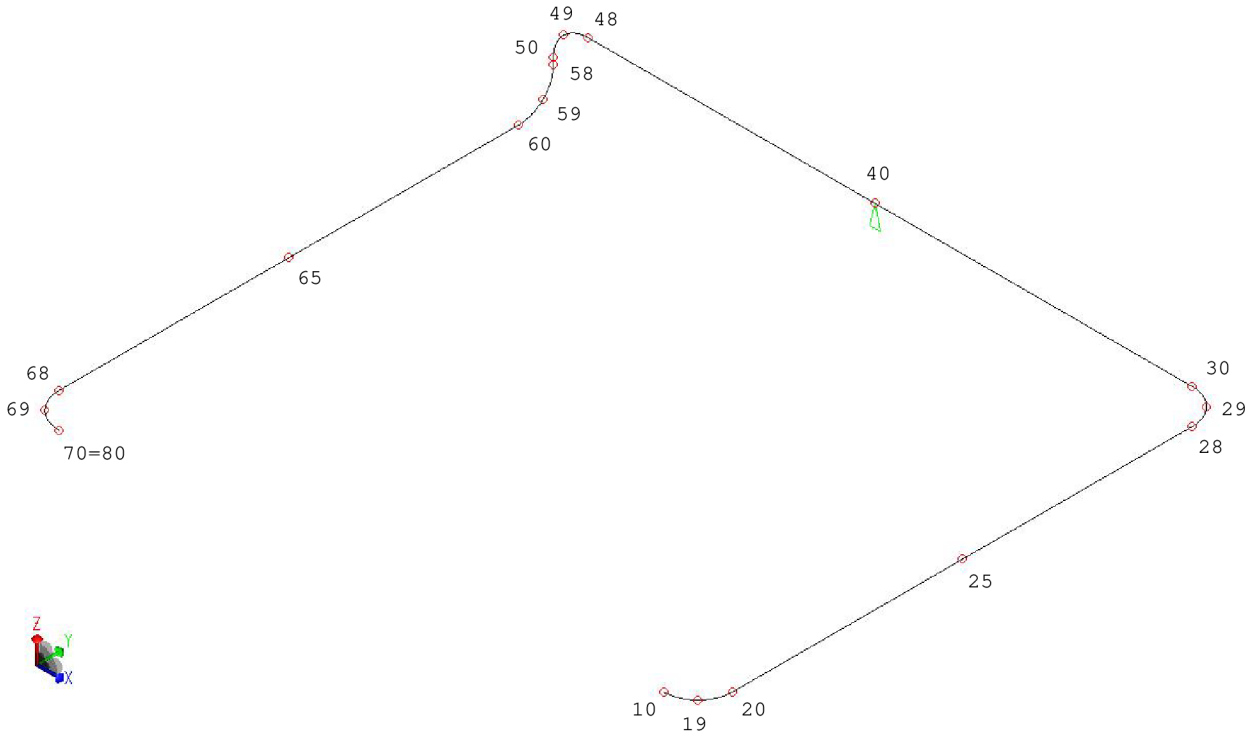
4.5 Program Caesar

Caesar představuje světový standart pro kompletní analýzu napětí potrubí, který pracuje na bázi MKP. Umožňuje statickou a dynamickou analýzu potrubních systémů, potrubí uložené v zemi, zatížení větrem, vlnami a zemětřesením, potrubní dílce, vložené kompenzátory, armatury, příruby, hrdla aparátů a poddajnost hrdel. Dále umožňuje modelování ocelových konstrukcí, odezvu systému na dynamické zatížení řeší metodou spekter odezvy či analýzou odezvy systému v závislosti na čase, provádí automatický návrh pružinových závěsů. Je možné zahrnout i tření v podporách. Výsledky jsou pak hodnoceny podle nejnovějších světových norem (ASME B31, ASME Section VIII, ČSN EN 13480 a jiné).

Podobně jak u Japaru se vytvoří jednoduchý nosníkový model potrubního systému, který je tvořen prvky s uzlovými body. Dále se definují zatěžující podmínky dle možností programu. Po zadání všech vstupních údajů se spustí výpočet a po výpočtu si uživatel volí výstupní soubor dle možností programu. Program obsahuje databázi potrubních dílů a materiálů.

4.5.1 Výpočtový model

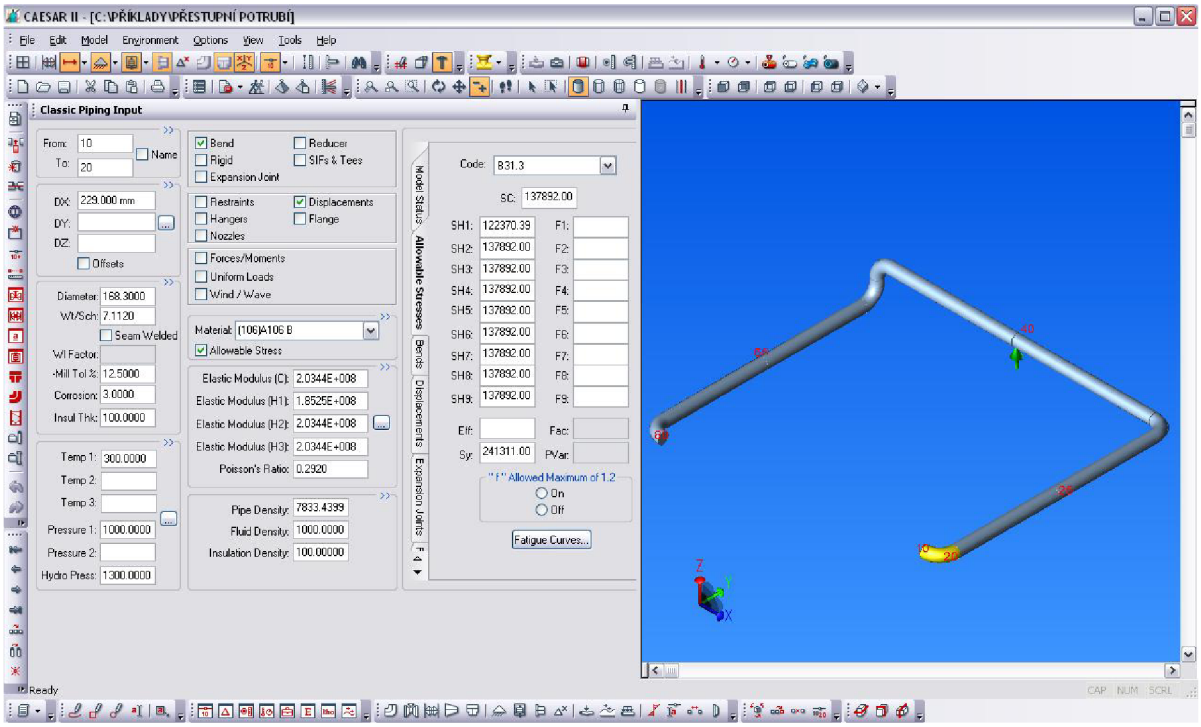
Potrubní systém je rozdělen na prvky s uzlovými body dle obr. 18. Dělení je podobné jako u Japaru, změny se týkají především oblasti kolen. Změna je způsobena rozdílným zadáváním vstupních údajů.



Obr. 18 Výpočtový model s jednotlivými uzly

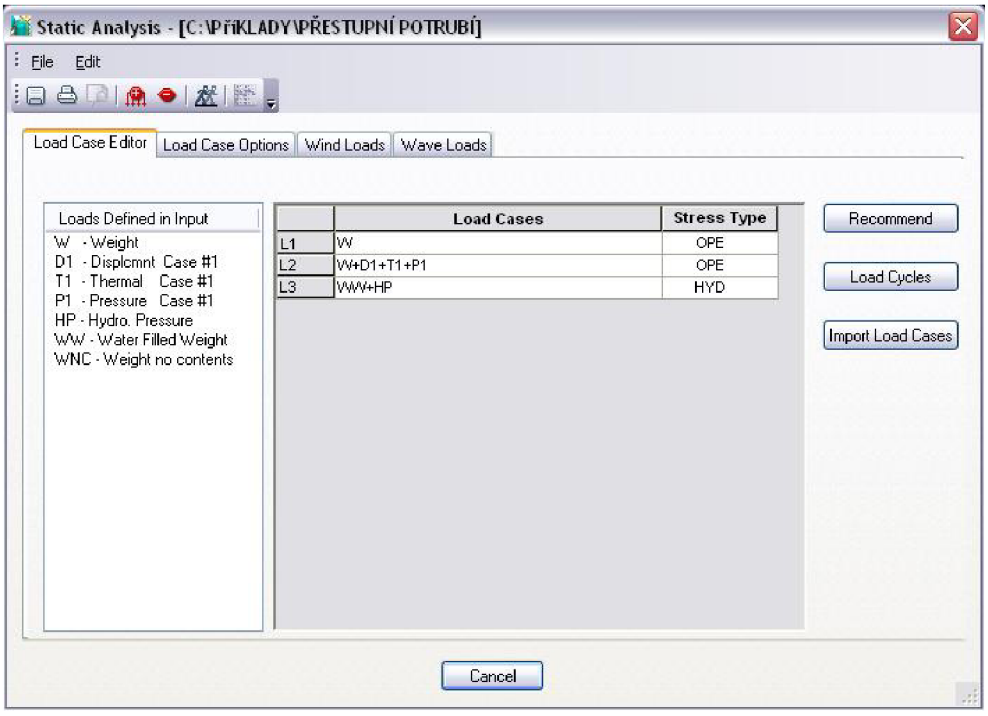
4.5.2 Zadání vstupních údajů

Vstupní údaje se zadávají pomocí programového okna. Současně program vytváří grafický model potrubního systému. Programové okno je zobrazeno na obr. 19.



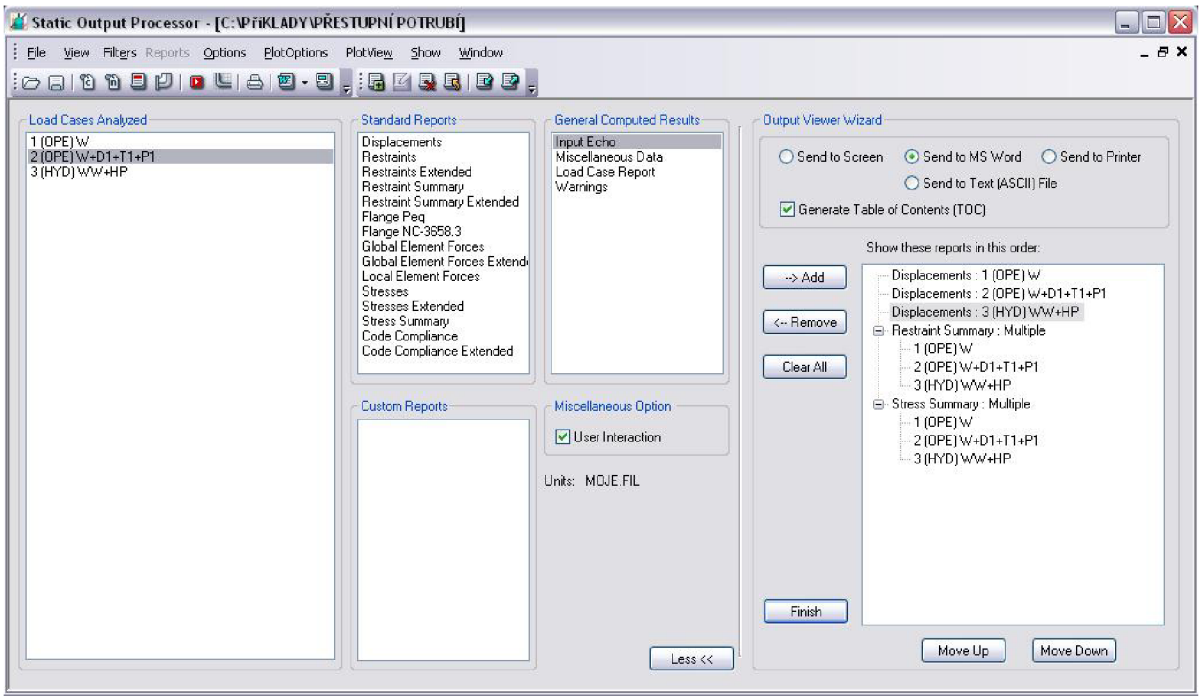
Obr. 19 Programové okno

Po zadání vstupních údajů se spustí řešič, kde se nejprve definuje zatížení, pro které má být provedena pevnostní analýza (hmotnost, teplota, tlak, posuvy a jiné). Definice zatížení je zobrazena na obr. 20.



Obr. 20 Definice zatížení

Po definování zatížení provede řešič výpočet pro všechny požadované stavy. Následuje nastavení výpisu výsledků, zobrazeno na obr. 21.

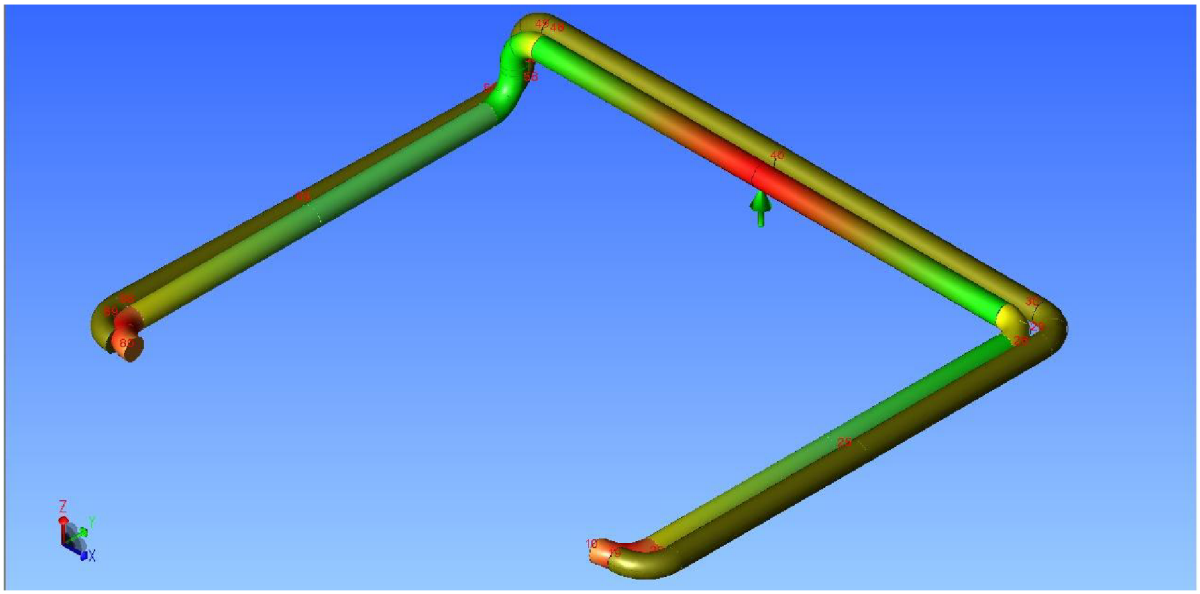


Obr. 21 Nastavení výpisu výsledků

Stejně jako Japar i Caesar je schopen řešit mnohem více problému, avšak ty nebudou uvedeny v diplomové práci.

4.5.3 Grafický výstup

Propracovaný grafický výstup umožňuje zobrazit vstupní data, výsledky, vytvořit animaci. Na obr. 22 je grafický výstup přestupního potrubí, kde je vidět nedeformované potrubí s barevně vyznačeným napětím (velikosti jdou sestupně: červená, žlutá a zelená) a deformované potrubí při zatížení provozními podmínkami (žlutohnědá).



Obr. 22 Grafický výstup Caesaru

4.5.4 Textový výstup

Caesar umožňuje uživateli zobrazit vstupní údaje a vybrat, jaký parametr požaduje v textové podobě (posuvy, reakce, napětí). Libovolně je lze jednoduše měnit a používat při tvorbě zprávy. Číselné hodnoty jsou zapsány přehledně v tabulce, kterou může zadavatel upravovat. Ukázka textového výstupu reakcí, posuvů a napětí:

```
CASE 1  (OPE)  W
CASE 2  (OPE)  W+D1+T1+P1
CASE 3  (HYD)  WW+HP
```

NODE	Load Case	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [N.m]	My [N.m]	Mz [N.m]	Dx [mm]	Dy [mm]	Dz [mm]
10	1	-23	7	-1247	-824	510	41	-0.000	0.000	-0.000
nozzle A	2	-346	12	-1333	-1127	493	743	10.000	0.000	1.000
	3	-32	2	-1243	-824	513	100	-0.000	0.000	-0.000
	MAX	-346/2	12/2	-1333/2	-1127/2	513/3	743/2	10.000/2	0.000/2	1.000/2
40	1	0	0	-3925	0	0	0	-0.147	0.038	-0.000
support	2	0	0	-3778	0	0	0	-0.397	12.376	-0.000
	3	0	0	-3924	0	0	0	-0.197	0.103	-0.000
	MAX			-3925/1				-0.397/2	12.376/2	-0.000/1
NODE	Load Case	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [N.m]	My [N.m]	Mz [N.m]	Dx [mm]	Dy [mm]	Dz [mm]
80	1	23	-7	-1293	-923	-505	-69	0.000	-0.000	-0.000
nozzle B	2	346	-12	-1355	-1134	-389	-791	-10.000	-0.000	-1.000
	3	32	-2	-1298	-928	-484	-107	0.000	-0.000	-0.000
	MAX	346/2	-12/2	-1355/2	-1134/2	-505/1	-791/2	-10.000/2	-0.000/2	-1.000/2

Reakce (síly a momenty) a posuvy hrdel a uložení v jednotlivých zatěžovacích stavech zobrazuje upravená tabulka, kde:

- case 1: montážní stav (MO)
- case 2: provozní podmínky (PP)
- case 3: tlaková zkouška (TZ)

NODE	Dx [mm]	Dy [mm]	Dz [mm]	Rx [deg]	Ry [deg]	Rz [deg]
Montážní podmínky						
29	-0.146	0.002	-1.418	-0.0102	0.0484	0.0010
48	-0.147	0.113	-1.512	-0.0125	-0.0620	-0.0026
49	-0.076	0.105	-1.686	-0.0127	-0.0590	-0.0027
58	0.121	0.062	-1.753	-0.0133	-0.0528	-0.0026
59	0.258	0.024	-1.737	-0.0146	-0.0473	-0.0043
65	0.139	0.006	-1.045	-0.0321	-0.0346	-0.0056
Provozní podmínky						
29	7.828	12.442	-1.385	-0.0314	0.0479	0.0328
48	-7.281	12.868	-1.336	-0.0344	-0.0548	-0.0246
49	-7.805	12.913	-1.727	-0.0316	-0.0491	-0.0344
58	-7.889	12.849	-2.519	-0.0295	-0.0416	-0.0388
59	-7.829	12.524	-3.070	-0.0291	-0.0352	-0.0437
65	-9.422	6.396	-2.266	-0.0427	-0.0272	-0.0559

Tlaková zkouška						
29	-0.167	0.041	-1.433	-0.0111	0.0489	0.0013
48	-0.223	0.176	-1.508	-0.0154	-0.0622	-0.0024
49	-0.153	0.165	-1.679	-0.0158	-0.0573	-0.0022
58	0.034	0.109	-1.745	-0.0168	-0.0493	-0.0020
59	0.163	0.063	-1.726	-0.0161	-0.0444	-0.0035
65	0.078	0.023	-1.040	-0.0319	-0.0329	-0.0040

Jako další část výstupu byly vyžádány posuvy a natočení některých uzlů v jednotlivých zatěžovacích stavech. Tabulka zobrazuje výběr několika uzlů dle úpravy zadavatele, protože přímý výstup z Caesaru obsahuje všechny uzly.

```
                    CASE 1 (OPE) W
                CASE 2 (OPE) W+D1+T1+P1
                  CASE 3 (HYD) WW+HP

                  Piping Code: B31.3

   NO CODE STRESS CHECK PROCESSED: LOADCASE 1 (OPE) W

    Highest Stresses: (N./sq.mm.) LOADCASE 1 (OPE) W
     OPE Stress Ratio (%):          0.0  @Node     40
 OPE  Stress:                  20.0  Allowable:        0.0
     Axial Stress:                  0.2  @Node     50
     Bending Stress:               20.0  @Node     40
     Torsion Stress:                3.3  @Node     70
     Hoop Stress:                   0.0  @Node     19
     3D Max Intensity:             32.8  @Node     40

NO CODE STRESS CHECK PROCESSED: LOADCASE 2 (OPE) W+D1+T1+P1

 Highest Stresses: (N./sq.mm.) LOADCASE 2 (OPE) W+D1+T1+P1
     OPE Stress Ratio (%):          0.0  @Node     40
 OPE  Stress:                  24.4  Allowable:        0.0
     Axial Stress:                  5.4  @Node     49
     Bending Stress:               19.1  @Node     40
     Torsion Stress:                4.1  @Node     70
     Hoop Stress:                  11.8  @Node     19
     3D Max Intensity:             41.6  @Node     40

  CODE STRESS CHECK PASSED      : LOADCASE 3 (HYD) WW+HP

   Highest Stresses: (N./sq.mm.) LOADCASE 3 (HYD) WW+HP
     CodeStress Ratio (%):         11.1  @Node     40
 Code Stress:                  26.8  Allowable:      241.3
     Axial Stress:                  6.9  @Node     50
     Bending Stress:               20.0  @Node     40
     Torsion Stress:                3.3  @Node     70
     Hoop Stress:                  15.4  @Node     19
     3D Max Intensity:             26.8  @Node     40
```

Následující text vypisuje maximální a dovolené celkové napětí v jednotlivých zatěžovacích stavech. Dále jsou zde jednotlivé složky maximálního napětí (osové, ohybové, v krutu a obvodové). U provozních stavů (OPE) nejsou uvedeny dovolené napětí, protože norma B31.3 provozní stavy nehodnotí.

4.6 Porovnání výsledků

Následující kapitola porovnává výsledky z obou programů (hmotnost, těžiště, reakce, posuvy a napětí). Porovnání je provedeno pouze pro jeden stav, provozní podmínky. Z vypočtených hodnot je stanovena průměrná hodnota a dále spočtena odchylka od této průměrné hodnoty.

4.6.1 Hmotnost a těžiště

Je důležité, aby oba programy počítaly se stejnými parametry potrubí a bylo tak možno porovnávat výsledky dvou rozdílných programů. Vypočtené hodnoty jsou v tab. 3.

program	hmotnost [kg]	souřadnice těžiště [mm]		
		x	y	z
Japar	659,234	-2075,090	2395,977	-158,598
Caesar	659,216	-2075,100	2396,000	-158,600

Tab. 3 Vypočtené hodnoty hmotnosti a souřadnic těžiště

Z tabulky je patrné, že bylo dosaženo téměř shodných hodnot hmotnosti a těžiště. Menší odchylky jsou způsobeny zaokrouhlením zadavatele a samotných programů. Odchylka se na výsledcích projeví velmi nepatrně až zanedbatelně.

4.6.2 Reakce

Vypočtené reakce na hrdla a uložení slouží k porovnání s maximálními dovolenými reakcemi, které musí výpočtář dodržet. Reakce na hrdla (A, B) a uložení jsou v tab. 4, tab. 5 a tab. 6.

provozní podmínky: 300 °C, 1 MPag hrdlo konvekce A							
program	název uzlu	síly [N]			momenty [Nm]		
		Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
Japar	1h	-394	20	-1358	-1203	489	827
Caesar	1	-346	12	-1333	-1127	493	742
průměrná hodnota		-370	16	-1345,5	-1165	491	784,5
odchylka		6,49%	25%	0,93%	3,26%	0,41%	5,42%

Tab. 4 Reakce na hrdlo A

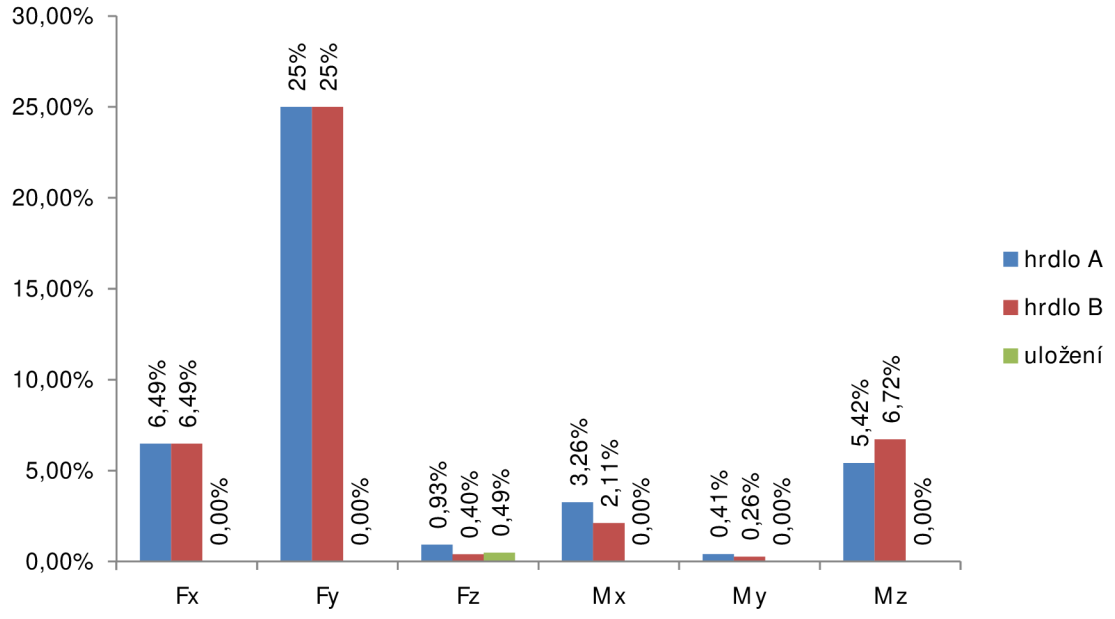
provozní podmínky: 300 °C, 1 MPag hrdlo radiace B							
program	název uzlu	síly [N]			momenty [Nm]		
		Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
Japar	23h	394	-20	-1366	-1183	-387	-905
Caesar	80	346	-12	-1355	-1134	-389	-791
průměrná hodnota		370	-16	-1360,5	-1158,5	-388	-848
odchylka		6,49%	25%	0,40%	2,11%	0,26%	6,72%

Tab. 5 Reakce na hrdlo B

provozní podmínky: 300 °C, 1 MPag kluzná podpěra							
program	název uzlu	síly [N]			momenty [Nm]		
		Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
Japar	10s	0	0	-3741	0	0	0
Caesar	40	0	0	-3778	0	0	0
průměrná hodnota		-	-	-3759,5	-	-	-
odchylka		-	-	0,49%	-	-	-

Tab. 6 Reakce na uložení

Z následujícího porovnání výsledků jsou vidět různě velké odchylky. Při kontrole vypočtených účinků s maximálními dovolenými účinky může nastat situace, že pro stejné zadání může kontrola v obou programech vyjít rozdílně (Japar nesplňuje, Caesar splňuje). Odchylky vypočtených reakcí jsou přehledně ukázány v graf 1.



Graf 1 Odchylky reakcí na hrdla (A, B) a uložení

4.6.3 Posuvy

Hodnoty vypočtených posuvů vybraných uzlů jsou v tab. 7 a tab. 8. Můžou být například použity k hodnocení, zda při provozu má zvolené uložení dostatečný rozsah (rozměry nosné desky, na které se pohybuje podpora) nebo nedochází-li v některé části potrubního systému ke kolizi s dalším zařízením.

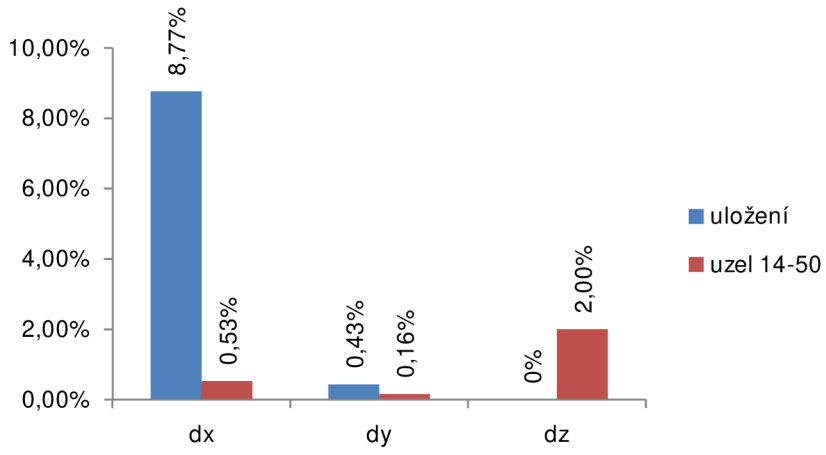
provozní podmínky: 300 °C, 1 MPag kluzná podpěra				
program	název uzlu	posuvy [mm]		
		dx	dy	dz
Japar	10s	-0,333	12,270	0,000
Caesar	40	-0,397	12,376	0,000
průměrná hodnota		-0,365	12,323	-
odchylka		8,77%	0,43%	-

Tab. 7 Posuvy v místě uložení

provozní podmínky: 300 °C, 1 MPag				
program	název uzlu	posuvy [mm]		
		dx	dy	dz
Japar	14	-7,837	12,830	-2,274
Caesar	50	-7,920	12,870	-2,367
průměrná hodnota		-7,8785	12,850	-2,3205
odchylka		0,53%	0,16%	2,00%

Tab. 8 Maximální vypočtené posuvy

Rozdíl obou výpočtů posuvů je v řádech desetin až setin milimetru a pro tento případ ho můžeme považovat za zanedbatelný. Odchylky vypočtených posuvů jsou přehledně ukázány v graf 2.



Graf 2 Odchylky vybraných posuvů

4.6.4 Napětí

Zde jsou porovnávány některé složky napětí (ohyb, přetlak radiálně) vybraných uzlů. Ostatní složky napětí mají minimální hodnotu, proto zde nejsou uvedeny (součástí přílohy). Ty dále slouží k výpočtu redukovaných napětí dle jednotlivých předpisů (kategorizace napětí) a následnému porovnání s dovoleným napětím. Ohybové napětí a napětí od přetlaku pro vybrané uzly je v tab. 9, tab. 10 a tab. 11.

provozní podmínky: 300 °C, 1 MPag koleno hrdla A			
program	název uzlu	napětí [MPa]	
		ohyb	přetlak
Japar	4	8,60	26,00
Caesar	20	7,74	23,66
průměrná hodnota		8,17	24,83
odchylka		5,26%	4,71%

Tab. 9 Napětí v místě svaru kolene hrdla A a přímé trubky

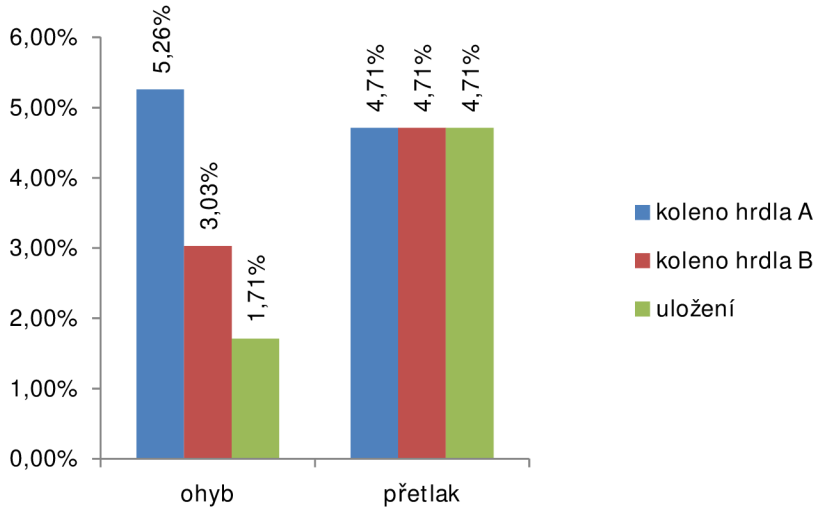
provozní podmínky: 300 °C, 1 MPag koleno hrdla B			
program	název uzlu	napětí [MPa]	
		ohyb	přetlak
Japar	20	8,49	26,00
Caesar	68	7,99	23,66
průměrná hodnota		8,24	24,83
odchylka		3,03%	4,71%

Tab. 10 Napětí v místě svaru kolene hrdla B a přímé trubky

provozní podmínky: 300 °C, 1 MPag kluzná podpěra			
program	název uzlu	napětí [MPa]	
		ohyb	přetlak
Japar	10s	18,44	26,00
Caesar	40	19,08	23,66
průměrná hodnota		18,76	24,83
odchylka		1,71%	4,71%

Tab. 11 Napětí v místě uložení

Z výsledků vyplívá, že největší složka napětí je obvodové napětí od přetlaku. Toto napětí je po celé délce potrubí konstantní, rozdíl ve výsledcích Japaru a Caesaru je způsoben odlišným výpočtem dle předpisů. Jako druhé největší napětí je ohybové, které je maximální v místě uložení. Odchylky vypočtených vybraných napětí jsou přehledně ukázány v graf 3.



Graf 3 Odchylky napětí ohybového a od přetlaku

Aby bylo možno pevnostně zhodnotit potrubní systém, porovná se vypočtené redukované napětí (dle požadovaného předpisu) s dovoleným namáháním. V tab. 12 je pevnostní posouzení v Japaru a Caesaru dle jednotlivých norem při tlakové zkoušce.

tlaková zkouška: 20 °C, 1,3 MPag kluzná podpora					
program	název uzlu	norma	napětí [MPa]		poměr [%]
			vypočtené	dovolené	
Japar	10s	NTD A.S.I SEKCE III	36,40	273,10	13,33
Caesar	40	B31.3	26,77	241,31	11,09

Tab. 12 Pevnostní posouzení při tlakové zkoušce dle norem

4.6.5 Zhodnocení porovnání

Návrh přestupního potrubí pevnostně vyhovuje dle Japaru i Caesaru. Porovnáním je zjištěno, že pro stejné zadání dostaneme různě rozdílné výsledky. V našem případě to neovlivní pevnostní posouzení, protože navržené přestupní potrubí je ve všech provozních podmínkách hluboko pod mezí dovoleného namáhání. V jiných případech, kdy se nacházíme blízko meze dovoleného namáhání, může odchylka zapříčinit vyšší hodnoty vypočtené než dovolené a tedy výpočet v jednom programu vyhovuje a v druhém ne (především v kontrole napětí a dovolených reakcí na hrdla a uložení).

5 Vliv kolen na pevnostní výpočet potrubních systémů

Následující kapitola je věnována faktorům, které ovlivňují výpočet potrubního systému, především kolen. V obou programech je znovu proveden pevnostní výpočet přestupního potrubí, ale se zjednodušeným posuzováním kolen.

5.1 Poddajnosti kolen

Poddajnost kolen, která se uvažuje při pevnostním výpočtu, je ovlivněna několika faktory:

- přetlak,
- oválný průřez kolene,
- navazující rovná část potrubí.

Přetlak v potrubním systému způsobuje zpevnění potrubí (ztužení) především u trubek velkého průměru a malé tloušťky stěny. Oválný průřez kolene je způsoben při výrobě, přičemž se oválný průřez snaží změnit na kruhový průřez (Bourdonův efekt). Navazující rovné části potrubí zpevňují koleno. Faktory, jaké máme uvažovat ve výpočtu, jsou dané normou nebo samotným programem.

5.1.1 Vliv kolen v Japaru

Japar zahrnuje všechny tři vlivy. Výpočet součinitele poddajnosti kolen je stanoven podle následujícího algoritmu dle normy RTM:

1. střední poloměr průřezu trubky r:

$$r = \frac{(D-s)}{2} \tag{1}$$

kde: D – vnější průměr trubky
s – tloušťka stěny trubky

2. bezrozměrný geometrický parametr λ:

$$\lambda = \frac{R*s}{r^2} \tag{2}$$

kde: R – poloměr zakřivení osy oblouku

3. vliv vnitřního přetlaku ω:

$$\omega = 1{,}82 * \frac{p*R^2}{E*s*r} \tag{3}$$

kde: p – vnitřní přetlak
E – modul pružnosti v tahu

4. koeficienty a_1, a_2, a_3, a_4, b:

$$a_1 = 1{,}01 + 1633{,}5 * \lambda^2 + 99 * \omega \tag{4}$$

$$a_2 = 1{,}0156 + 661{,}5 * \lambda^2 + 63 * \omega - \frac{0{,}2316}{a_1} \tag{5}$$

$$a_3 = 1{,}0278 + 204{,}2 * \lambda^2 + 35 * \omega - \frac{0{,}2197}{a_2} \tag{6}$$

$$a_4 = 1{,}0625 + 37{,}5 * \lambda^2 + 15 * \omega - \frac{0{,}1914}{a_3} \tag{7}$$

$$b = 0{,}125 + 1{,}5 * \lambda^2 + 3 * \omega - \frac{0{,}09766}{a_4} \quad (8)$$

5. součinitel poddajnosti kolene:

$$K_p = 1 + \frac{1{,}125}{b} \quad (9)$$

V potrubních systémech se setkáváme s hladkými a segmentovými oblouky, pro oba typy uvažujeme stejný součinitel.

Japar a Caesar počítá poddajnost kolen odlišným způsobem (Japar vychází z východního výpočtového přístupu a Caesar vychází z přístupu používaného v západní části světa). Aby bylo možné adekvátně porovnat výsledky obou programů, byl vytvořen požadavek na změnu programu tak, aby výpočtové přístupy byly v požadovaných oblastech shodné. Autor programu Japar - Jiří Soukup, tento požadavek splnil a provedl jeho modifikaci, za to mu právem patří dík. Modifikace umožňuje zadat, aby program počítal poddajnosti kolen klasickým způsobem nebo naopak zjednodušeným způsobem dle americké normy ASME:

$$K_p = \frac{1{,}65}{\lambda} \quad (10)$$

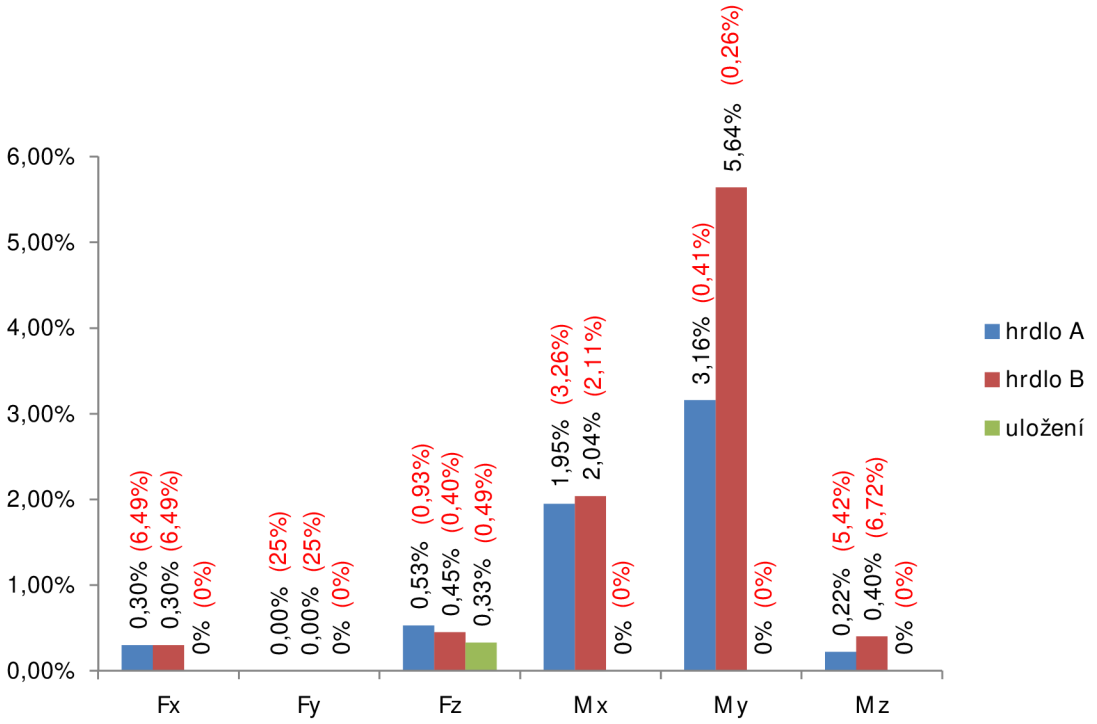
Při zjednodušeném výpočtu poddajnosti kolen v Japaru není zahrnut vliv přetlaku, oválného průřezu a navazující rovné části potrubí [15].

5.1.2 Vliv kolen v Caesaru

Caesar dle požadavku výpočtáře může zahrnovat vliv přetlaku a oválného průřezu (Bourdonův efekt). Jak bylo výše zmíněno, výpočet poddajnosti kolene počítá podle amerických předpisů.

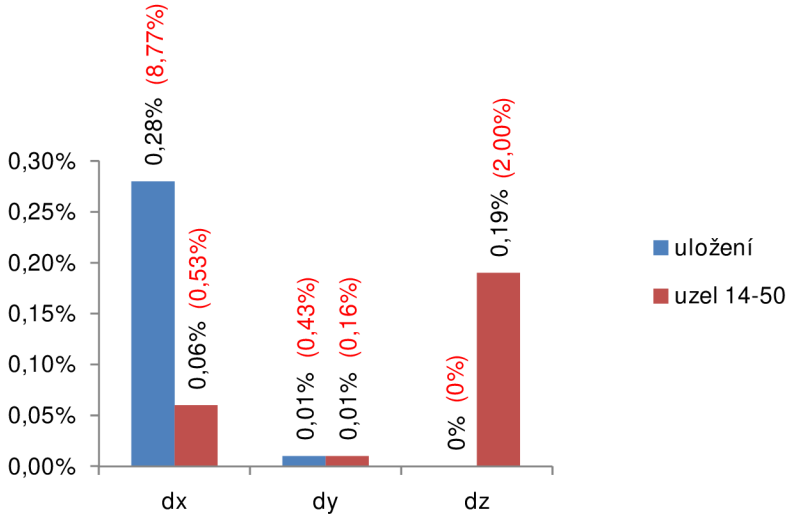
5.2 Výpočet se zjednodušeným zahrnutím poddajnosti kolen

V Japaru je nastaven zjednodušený výpočet poddajnosti kolen dle ASME a v Caesaru není zahrnut vliv přetlaku, Bourdonův efekt. Výsledky jsou opět porovnány. Odchylky pro reakce, posuvy a napětí jsou zobrazeny v graf 4, graf 5 a graf 6, kde červená hodnota v závorce ukazuje hodnotu z klasického výpočtu. Kompletní výsledky jsou v příloze 2.



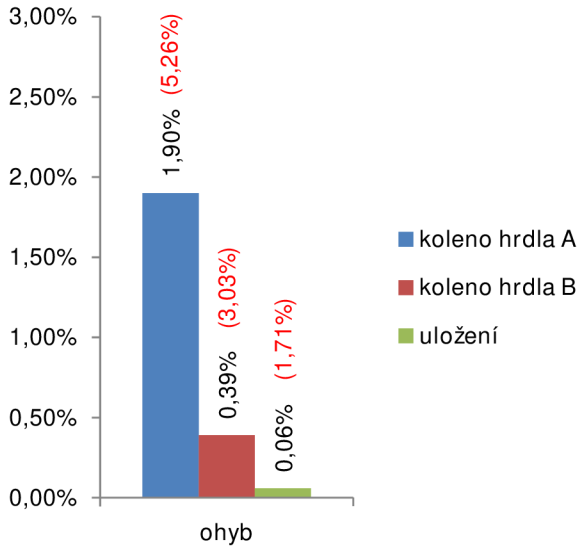
Graf 4 Odchylky reakcí na hrdla (A, B) a uložení

Vypočtené reakce na hrdla se v obou programech v jednotkách procent snížily, zatím co reakce na uložení se o necelé 2 % zvýšila. Celkově je dosaženo podobnějších výsledků, než v předchozím výpočtu.



Graf 5 Odchylka vybraných posuvů

Posuvy se nepatrně zvětšily (méně než 1 %) a podařilo se dosáhnout téměř shodných výsledků.



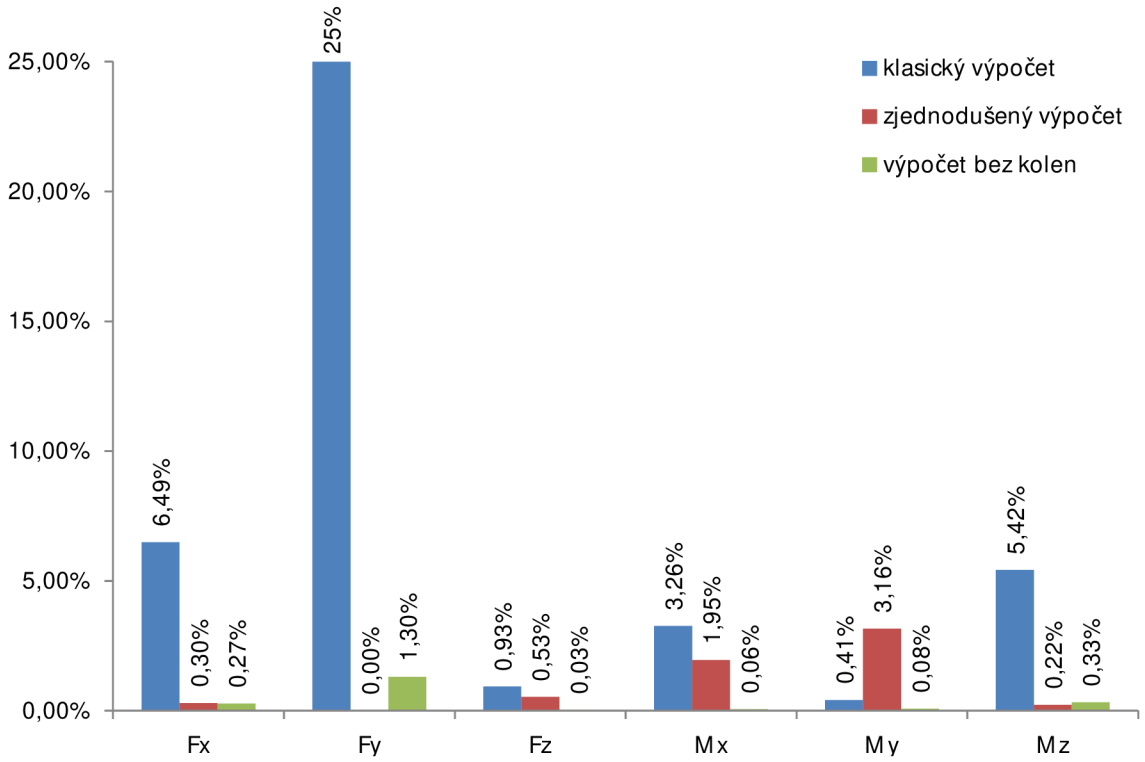
Graf 6 Odchylky ohybového napětí

Napětí od přetlaku je stejné jako u předchozích výpočtů, protože je závislé pouze na vnitřním přetlaku. U dalších složek napětí došlo k nepatrné změně. Jako u reakcí a posuvů je dosaženo podobnějších výsledků. Díky změně složek napětí došlo i k nepatrné změně redukovaného napětí.

Pokud srovnáme klasický a zjednodušený výpočet, zjednodušený nám dává shodnější výsledky, ale méně konzervativnější. Především se jedná o reakce na hrdla a uložení, kdy při klasickém výpočtu vychází větší reakce pro porovnání s dovolenými. Právě z reakcí se počítají jednotlivé složky napětí s výjimkou napětí od přetlaku. Tyto složky pak slouží ke stanovení redukovaného napětí dle požadovaného předpisu (kategorizace napětí), které je porovnáno s dovoleným namáháním. Jednotlivé předpisy také určují, jaký faktor ovlivňující poddajnost kolen je třeba zahrnout ve výpočtu.

5.3 Výpočet bez zadání kolen

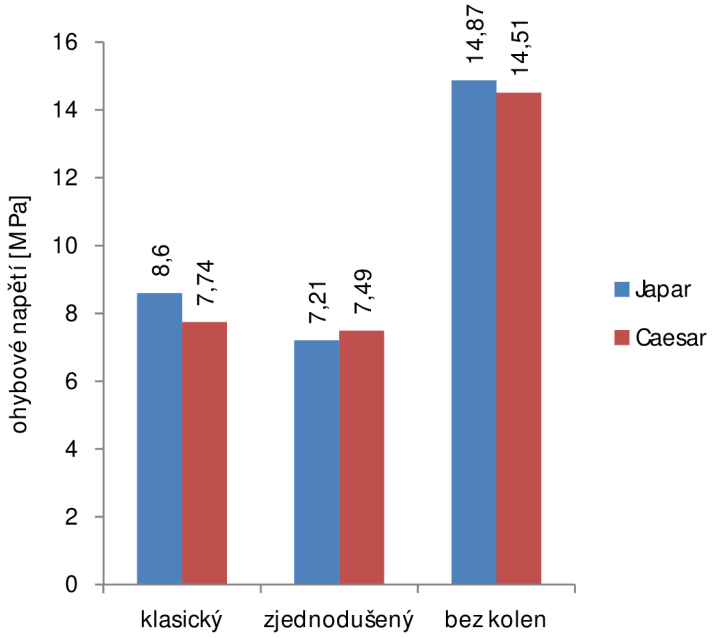
V Japaru a Caesaru je proveden výpočet přestupního potrubí bez zadání kolen, kdy jsou zadány pouze rovné úseky potrubí. Výsledek je porovnán s klasickým a zjednodušeným výpočtem. Došlo k výraznému zvětšení některý složek reakcí na hrdla, v některých případech i více jak dvojnásobně. Co se týče reakcí na uložení, zmenšilo se o necelé 3 %. To má za následek zvětšením napětí v blízkosti hrdel pece a zároveň malé snížení v oblasti uložení. Největší složkou napětí zůstává napětí od přetlaku, které se nemění. Porovnáním výsledků z obou programů je zjištěno, že výsledky reakcí, posuvů a napětí jsou téměř shodné. Nejlépe je to vidět u reakcí, kde např. u reakcí na hrdlo A je dosažena maximální odchylka pouze 1,3 % dle graf 7. Odchylky posuvů a napětí se pohybují maximálně kolem 1 %. Kompletní výsledky tohoto výpočtu jsou v příloze 3.



Graf 7 Odchylky reakcí na hrdlo A

5.4 Zhodnocení vlivu kolen na pevnostní výpočet

Z provedených výpočtů je zjištěno, že kolena zásadně ovlivňují poddajnost (tuhost) potrubních systémů a tím pádem pevnostní posouzení (vliv na reakce, posuvy a napětí). Celkově změkčují celý systém. Rozdílnost ve výsledcích Japaru a Caesaru je právě způsobena odlišným přístupem k výpočtu kolen. Dále z porovnání vyplívá, že Japar je při pevnostním posouzení konzervativnější než Caesar (při zadání shodných vstupních údajů). V graf 8 je ukázáno vypočtené ohybové napětí z Japaru a Caesaru v místě spojení kolene hrdla A s navazující rovnou částí potrubí při klasickém, zjednodušeném výpočtu a výpočtu bez zadání kolen. Ze kterého je vidět vliv na napětí (dojde téměř k dvojnásobnému zvětšení).



Graf 8 Ohybové napětí v místě svaru kolene hrdla A a přímé trubky

Při výběru vhodného softwaru pro pevnostní výpočet potrubních systému musíme vzít v úvahu, podle kterého předpisu je tento výpočet požadován. Dále je třeba zvolit, s jakými faktory ovlivňujícími poddajnost kolen je třeba počítat.

6 Životnost pece

Projekční životnost pece je stanovena na základě požadavků zákazníka (údaj ve stovkách tisíc hodin) a je to rozhodující parametr, který ovlivňuje její konstrukční řešení. Celková životnost pece se odvíjí od životnosti potrubního systému, protože tato část pece je nejvíce namáhána. Tato část diplomové práce se zabývá faktory, které ji ovlivňují a jedním z možných postupů, jak posoudit životnost za působení creepu (Larson-Millerův parametr).

6.1 Faktory ovlivňující životnost

Během provozu na pec působí současně faktory, které tuto životnost ovlivňují, a proto jsou při návrhu tyto faktory zohledňovány.

6.1.1 Creep

Některé pece jsou projektovány tak, že pracovní teplota trubkového systému je natolik vysoká, že se u zvoleného materiálu projeví tzv. Creep (tečení). Můžeme ho definovat jako časově závislou plastickou deformaci materiálu za působení zvýšené teploty při zatížení. Creepové chování materiálu bereme v úvahu zhruba od teploty T dle vztahu:

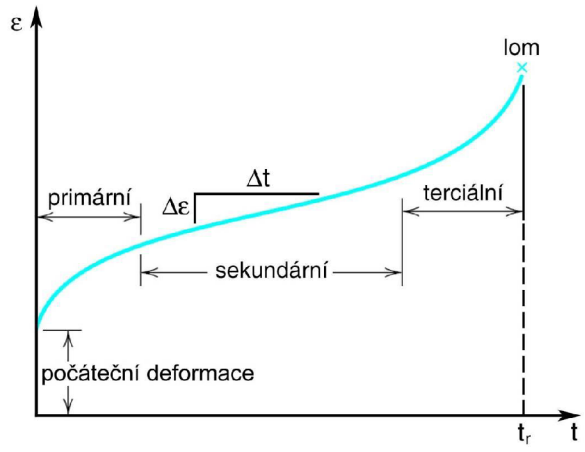
$$T > T_c \approx 0{,}4 * T_m \qquad (11)$$

kde: T – provozní teplota materiálu
T_c – teplota creepu materiálu
T_m – teplota tavení materiálu

Příčinou creepu je difuze atomů mřížky, při které dochází k pohybu vakancí a dislokací (poruchy krystalické mřížky) v krystalické mřížce materiálu. Čímž se mění jeho mechanické vlastnosti a dochází ke křehnutí a ztrátě houževnatosti. Creep můžeme rozdělit do třech navazujících stádií:

1. primární (přechodové): rychlost deformace klesá
2. sekundární (ustálené): rychlost deformace je konstantní
3. terciální (nestabilní): rychlost deformace roste do lomu

Creepové chování graficky znázorňuje creepová křivka (závislost poměrného prodloužení na čase), která se získá sérií zkoušek pro konkrétní materiál a konkrétní podmínky. Nejčastější pozorovaný tvar křivky je na obr. 23.



Obr. 23 Creepová křivka [16]

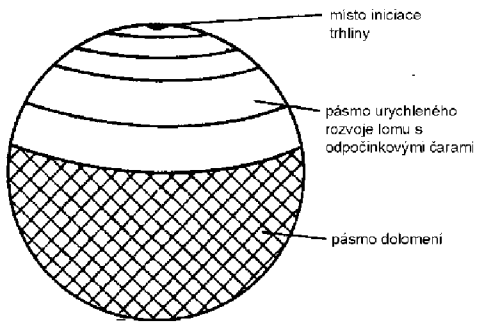
Aby byla zajištěna garantovaná životnost součástí vystavených creepu, musí být rychlost deformace natolik nízká, aby nepřekročila deformaci dovolenou [17, 18].

6.1.2 Únava

Pec nepracuje po celou dobu své životnosti nepřetržitě, ale po určitých časových intervalech nebo při poruše dochází k odstávce a pak k následnému spuštění. A to z důvodu údržby nebo případné opravy poškozených součástí. Během spouštění a odstavení se mění teplota a zatížení (napuštění a vypuštění média trubek) součástí pece. Taktéž při provozu dochází k jisté oscilaci provozních parametrů. To je časově proměnlivé zatěžování a musí se brát v úvahu únava materiálu.

Únava materiálu je proces vzniku a šíření trhlin při časově proměnlivém zatěžování. Toto proměnlivé zatěžování může způsobit nevratné změny ve struktuře materiálu (hromadění poškození), které se v závěru projeví vznikem a růstem trhliny ukončené únavovým lomem. Schéma únavového lomu je zobrazeno na obr. 22. Proces únavy materiálu můžeme rozdělit do třech plynule po sobě následujících stádií:

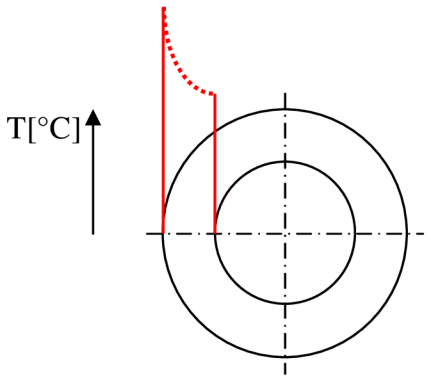
1. změna mechanických vlastností
2. vznik únavových trhlin
3. šíření únavových trhlin a možným náhlým lomem [17, 19]



Obr. 24 Schéma únavového lomu [20]

6.1.3 Thermal – stress

Při ohřívání média má vnější a vnitřní povrch trubkového hadu rozdílnou teplotu. Vnější povrch je ohříván spalováním paliva a zároveň vnitřní ochlazován proudícím médiem. To má za následek, že se vnější povrch vlivem zvýšené teploty více roztahuje než vnitřní a vzniká nežádané vnitřní pnutí. Tento jev se označuje jako thermal-stress (tepelné pnutí) a může způsobit porušení materiálu. Průběh teploty ve stěně trubkového hadu je na obr. 25.



Obr. 25 Průběh teploty ve stěně trubkového hadu

6.1.4 Koroze

Všechny části pece jsou vystaveny různým okolním vlivům. Ocelová konstrukce je vystavena atmosféře, vnitřní prostor pece horkými spalinami a trubkový had uvnitř proudícím médiem a zvenčí horkými spalinami. Díky působení těchto vlivů vzniká koroze, a proto s ní v návrhu pece musíme počítat.

Koroze je proces zhoršování mechanických vlastností materiálů vyvolaný působením vnějších vlivů (voda, vzduch, roztoky, spaliny a jiné), který výrazně omezuje životnost. Může se projevit úbytkem materiálu nebo křehnutím. Účinky koroze jsou závislé na agresivitě prostředí a na chemických účincích pracovního média.

Proces koroze můžeme omezit vhodnou volbou materiálu nebo různými povrchovými úpravami. Při návrhu trubkového hadu musíme zvolit vhodný materiál tak, aby vlivem koroze nedošlo k znehodnocení média v něm proudícím.

6.1.5 Eroze

Úkolem pece je předávat teplo médiu proudícímu v trubkovém hadu. Při proudění média dochází k obrušování vnitřního povrchu trubek, protože médium není dokonale čisté a obsahuje pevné částice.

Eroze je poškozování povrchu dopadajícími částicemi unášenými v plynu nebo kapalině. Dochází při ní k zmenšování tloušťky materiálu, především v lokálních oblastech (např. kolen) [17, 21].

6.2 Životnost za působení creepu

Faktor, který nejvíce ovlivňuje životnost pece je zvolen na základě její provozní teploty. Při provozních teplotách, které jsou v creepové oblasti, je rozhodující poškození od creepu. Při nižších teplotách je rozhodující koroze. Poškození od únavy je okrajové, jelikož je dosahováno řádově stovek ekvivalentních cyklů, během celé doby provozu. K posouzení životnosti za působení creepu se může použít Larson-Millerův parametr.

6.2.1 Larson-Millerův parametr

Běžná životnost pece se pohybuje kolem 100 000 hodin a na tuto životnost jsou známy materiálové hodnoty, díky kterým stanovíme maximální dovolené namáhání trubkového systému. Pokud zákazník požaduje delší počet hodin, než pro kterou jsou stanoveny materiálové hodnoty, lze použít Larson-Millerův parametr, který přepočítá maximální dovolené namáhání i pro větší počet hodin. Tento postup využívá zahraniční norma pro petrolejářský průmysl API 530 (American Petroleum Institute). Larson-Millerův parametr dle normy API 530:

$$P_{L-M} = (T_d + 273)(20 + lg\ t_{DL}) \times 10^{-3} \qquad (12)$$

kde: T_D – provozní teplota materiálu
t_{DL} – čas do porušení (požadovaná životnost)

Na základě vypočteného parametru je pro určitý materiál stanoveno maximální dovolené namáhání po dobu požadované životnosti, které musí být správným konstrukčním řešením dodrženo. V případě překročení této hodnoty se životnost zkrátí [22].

7 Závěr

Úvodní část diplomové práce je zaměřena na seznámení s problematikou trubkových pecí v průmyslu. Je zde popsán princip, použití, základní rozdělení a konstrukční řešení hlavních částí pece. Detailní porozumění problematiky umožňuje navrhnout spolehlivou, bezpečnou a ekonomicky výhodnou pec, která poskytuje teplo pro chemické procesy závislé na teple. Špatně navržená pec může způsobit řadu problémů (znehodnocení média, omezení nebo zastavení provozu, havárii a tím i poškození celé výrobní linky). Správně navržená pec znamená i menší dopad na životní prostředí, protože se sníží množství spotřebovaného paliva a spalin vypuštěných do ovzduší. Většinou se navrhují individuálně, tak aby nejlépe plnily svoji požadovanou funkci.

Mezi nejdůležitější a nejnákladnější části pece patří trubkový systém uvnitř pece, ve kterém proudí ohřívané médium za vysoké teploty a tlaku. Ve spalovací komoře dochází k ohřevu vnější strany trubek radiací a konvekcí a následnému předání tepla vedením přes stěny trubek na médium. Tímto je médium chráněno před přímými účinky plamene, protože to může být nebezpečná látka jako např. vodní pára, ropné produkty a vodík. Pec je většinou rozdělena na radiační a konvekční část, název dle převládajícího způsobu přenosu tepla. Toto umožní lepší využití tepla vzniklého spálením paliva. Dále se zbytkové teplo spalin může využít k předehřevu spalovacího vzduchu (systém APEX).

Vysoké nároky na odolnost vůči vysokým teplotám, tlaku a agresivnosti média a okolí dělají z návrhu trubkové pece velmi složitý úkol. Vzhledem k vysokým provozním teplotám je nutné při návrhu provést tepelně-dilatační výpočet. Pro pevnostní výpočet návrhu přestupního potrubí je použito potrubních programů pracujících na bázi metody konečných prvků Japar a Caesar II. Oba programy jsou stručně představeny a je ukázáno zadávání vstupních dat a výpis výsledků. Rozdílnost v programech je především v tom, že Japar vychází z východních předpisů a Caesar ze západních, dále v hodnocení výsledků dle norem. Vzhledem k vysokým reakcím na hrdla konvekce a radiace, což není žádoucí, je navrženo i jedno uložení (kluzná podpěra). To umožňuje natočení, vodorovné posuvy a zabraňuje svislému posuvu. Dále je provedeno vyhodnocení dle požadovaných norem, což návrh splňuje v obou programech. Porovnáním vybraných výsledků je zjištěno, že se vypočtené hodnoty (reakce na hrdla a uložení, posuvy, napětí) z Japaru a Caesaru více nebo méně liší. Nejvíce se to týká reakcí na hrdla, kde dochází k rozdílu vypočtených momentů o více jak 100 Nm, což může způsobit rozdílné hodnocení v porovnání s dovolenými účinky. Rozdíly u posuvů a napětí jsou vzhledem k velikostem malé, ale jejich odchylky od průměrné hodnoty se pohybují v řádech jednotek procent. V případech, kdy se řešení nachází na hranici bezpečnosti, může dojít k situaci, kdy potrubní systém v jednom programu vyhoví a v druhém ne.

Jsou provedeny a porovnány další dvě dvojice výpočtů, přičemž se změna týká v zadávání kolen. Kdy jsou zjištěny faktory, ovlivňující tuhost kolen, se kterými jednotlivé programy počítají. V prvním případě jsou vypnuty faktory ovlivňující tuhost kolen, jako zpevnění od přetlaku a navazující rovné části, Bourdonův efekt. Srovnáním je zjištěno, že došlo ke snížení reakcí na hrdla a zvýšení u uložení, zvětšení posuvů, snížení napětí v oblasti hrdel a zvýšení u uložení. Celkově jsou výsledky shodnější, než v základním výpočtu. V druhém případě je zadané přestupní potrubí pouze pomocí rovných trubek a tudíž bez kolen. Zde došlo k velkému nárůstu reakcí na hrdla a malému snížení u uložení, zmenšení posuvů, zvětšení napětí v oblasti hrdel a zmenšení u uložení. Výsledky z obou programů jsou téměř shodné, pouze s malými odchylkami. Tímto srovnáním je zjištěno, že kolena zásadně ovlivňují pevnostní výpočet potrubních systému a celkově ho změkčují. Zahrnutím faktorů ovlivňujících tuhost kolen lze vypočtené hodnoty snížit nebo zvýšit a tím pádem

si v některých případech pomoci. Ale faktory jaké zahrnout do výpočtu určuje předpis nebo omezení programu, proto je důležité i vhodné zvolení výpočetního programu.

Projekční životnost pece je důležitý parametr a její dodržení složitý úkol. Je třeba najít a zahrnout všechny faktory, které ji ovlivňují. Problém je v nalezení postupu, který dokáže zahrnout současné působení všech těchto faktorů, protože se navzájem ovlivňují. V praxi se postupuje dle zkušeností a stanovených předpisů.

8 Seznam použitých zdrojů

[1] HEWITT, G. F., SHIRES, G. L., BOTT, T. R.: *Process Heat Transfer.* 1. vydání, USA: CRC Press, 1994, 640 s. ISBN 0-8493-9918-1

[2] KADRNOŽKA, J.: *Tepelné elektrárny a teplárny.* 1. vydání, Praha: SNTL, 1984, 608s.

[3] KOTÍŠEK, J., ROD, V.: *Trubkové pece v chemickém průmyslu.* 1. vydání, Praha: SNTL, 1961, 142s.

[4] *PETRON – heaters and furnaces* [online]. [cit. 2. ledna 2012]. Dostupné z <http://www.petronemirates.com/servheaters.htm>.

[5] *PROKOP ENGINEERING – výstavba investičních celků* [online]. [cit. 2. ledna 2012]. Dostupné z <http://www.prokop-engineering.cz>.

[6] *TUBUTECH INTERNATIONAL – cleaning tube* [online]. [cit. 3. ledna 2012]. Dostupné z <http://www.tubetech.com/case-studies/refineries-case-studies/finned-convection-bank-clean>.

[7] HORSÁK, L.: *Optimalizace tvaru háku v pecích petrochemického průmyslu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, 2010. 87 s. Diplomová práce. Vedoucí diplomové práce Ing. Richard Nekvasil, Ph.D.

[8] *SVĚT ROPY – fotogalerie, rafinérie Kralupy a Litvínov* [online]. [cit. 2. ledna 2012]. Dostupné z <http://www.petroleum.cz/fotogalerie.aspx>.

[9] JEGLA, Z.: *Ohřevné trubkové pece v procesním průmyslu – výzkum, vývoj a aplikace.* Zkrácená verze habilitační práce. Brno: VUTIUM, 2004, 40 s. ISBN 80-214-2728-0

[10] SKOBLO, A. I., TREGUBOVOVÁ, I. A., MOLOKANOV, J. K.: *Procesy a zařízení pro průmyslové zpracování ropy.* Překlad, Praha: SNTL, 1989, 573s.

[11] *GL CONTRACTING – refraktory installation specialists* [online]. [cit. 2. ledna 2012]. Dostupné z < http://www.glcontracting.no/en/About-us>.

[12] *XIANG YU – petrochemical machinery* [online]. [cit. 4. ledna 2012]. Dostupné z <http://www.xyshjx.com/SEO/en/ProductShow-104.html>.

[13] Ing. Dušan Vincour, Ph.D.: *Přednášky - Konstrukce procesních zařízení I. – Metoda konečných prvků.* Brno: VUT FSI, 2010.

[14] *ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ VUT – 2. přednáška, Metoda konečných prvků* [online]. [cit. 11.2.2012]. Dostupné z <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska2_mkp.pdf>

[15] SOUKUP, J.: *JAPAR – Program pro pevnostní výpočet potrubních systémů a rámových konstrukcí s hodnocením přípustného namáhání podle norem.* 1981, 81s.

[16] *ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ VUT – podklady pro výuku, creep* [online]. [cit. 7. ledna 2012]. Dostupné z < http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0-K/07_MS6K.ppt>.

[17] VEJVODA, S.: *Stavba procesních zařízení.* Učební texty vysokých škol, Brno: CERM, 2002, 107s. ISBN 80-214-2302-1

[18] ČADEK, J.: *Creep kovových materiálů.* 1. vydání, Praha: Academia, 1984, 107s.

[19] LAUSCHMANN, H.: *Mezní stavy I – únava materiálů.* 1. vydání, Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 71s. ISBN 978-80-01-03671-6

[20] *MARTIN STANISLAV JANIREK – můj web ve flashi, únava* [online]. [cit. 7. ledna 2012]. Dostupné z <http://jaja.kn.vutbr.cz/~janirek2/dok/materiály/7tunava.doc>.

[21] KIZLINK, J.: *Chemická technologie.* 1. vydání, Brno: VUT v Brně, 1997, 107s. ISBN 80-214-0899-5

[22] *SCRIBD: Reading and Publishing - Calculation of heater-tube thickness in petroleum refineries* [online]. [cit. 18. května 2012]. Dostupné z <http://www.scribd.com/panchitasi/d/36686383-api-530>.

9 Seznam příloh

PŘÍLOHA 1: Textový výstup (*.602) klasického výpočtu z Japaru

PŘÍLOHA 2: Tabulky výsledků zjednodušeného výpočtu

PŘÍLOHA 3: Tabulky výsledků výpočtu bez kolen

PŘÍLOHA 4: Axonometrie přestupního potrubí

PŘÍLOHA 5: CD s elektronickou verzí