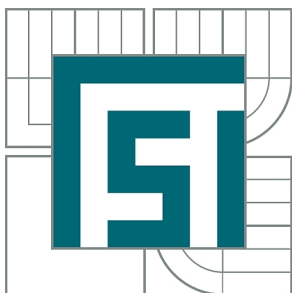


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

TEPELNĚ-HYDRAULICKÝ A PEVNOSTNÍ VÝPOČET VÝMĚNÍKU TEPLA

THERMAL-HYDRAULIC CALCULATION AND STRESS ANALYSIS OF A HEAT EXCHANGER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR FIALA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RICHARD NEKVASIL, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2009/10

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Fiala Petr, Bc.

který/která studuje v **magisterském 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:

Tepelně-hydraulický a pevnostní výpočet výměníku tepla

v anglickém jazyce:

Thermal-hydraulic calculation and stress analysis of a heat exchanger

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na termo-hydraulický výpočet přestupu tepla se zaměřením na stanovení součinitelů přestupu tepla na jednotlivých částech, která jsou dále podrobena důkladným napětovým analýzám.

Cíle diplomové práce:

1. Seznámení se s řešenou problematikou.
2. Základní výpočty přestupu tepla.
3. Vytvoření výpočtového modelu výměníku tepla.
4. Výpočet přestupu tepla pomocí CFD.
5. Pevnostní analýza určitých částí výměníku.
6. Zhodnocení výsledků.

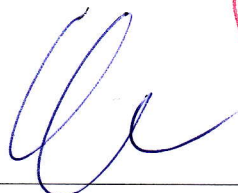
Seznam odborné literatury:

- [1] Schneider P.: Základy konstruování procesních zařízení, PC-DIR Real, s.r.o., Brno 1999
- [2] Stehlík P.: Tepelné pochody. Výpočet výměníku tepla, Brno 1991
- [3] Vejvoda S.: Stavba procesních zařízení, CERM, Brno 2002
- [4] Potřebné manuály k výpočtovým programům

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne



prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Hlavním předmětem práce je napět'ová analýza určitých částí trubkového výměníku tepla použitím MKP. Každá část je posouzena dvěma odlišnými výpočtovými způsoby. Způsobem na základě výpočtových hodnot a způsobem blížícího se skutečným podmínkám provozu zařízení. K přiblížení se skutečnému zatížení jsou v práci provedeny základní výpočty přestupu tepla pro celé zařízení a pro analyzované části jsou vypočteny součinitele přestupu tepla pomocí CFD.

Klíčová slova

Výměník tepla, trubkový, napět'ová analýza, přestup tepla, součinitel přestupu tepla, ANSYS, MKP, CFD

Abstract

Main object of the work is stress analysis of specific parts of tube and shell heat exchanger by using MKP. Each part is judged by two different computation methods. The method based on computation values and the method nearing real condition of operation of device. To approach real load are in the work made basic heat transfer computations for entire device and for analyzed part are computed boundary conductance by using CFD.

Keywords

Heat exchanger, tube and shell, stress analysis, heat transfer, boundary conductance, ANSYS, MKP, CFD

Citace

Fiala, P. *Tepelně-hydraulický a pevnostní výpočet výměníku tepla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 64s. Vedoucí diplomové práce Ing. Richard Nekvasil, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu použité literatury.

V Brně 24. 5. 2010

Petr Fiala

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi byli nápomocní a bez kterých by nebylo možné tuto práci vytvořit.

Především děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Richardovi Nekvasilovi, Ph.D. za seznámení s řešenou problematikou, cenné rady a odborné zázemí.

Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Zdeňku Jeglovi, Ph.D. za konzultaci výpočtů přestupu tepla a Ing. Jiřímu Voldánovi, který mi pomohl svojí znalostí CFD.

Obsah

Obsah.....	8
1 Úvod	10
2 Základní druhy výměníků tepla.....	11
2.1 Trubka v trubce.....	11
2.2 Deskový výměník tepla	12
2.3 Trubkový výměník tepla.....	13
2.3.1 Druhy provedení trubkového výměníku tepla	14
3 Zadání a postup řešení.....	16
4 Základní výpočty přestupu tepla	17
4.1 Zadání parametrů výměníku tepla	17
4.2 Zadání vlastností vstupních proudů	17
Provozní režim I	17
Provozní režim II	18
4.3 Výsledky simulace přestupu tepla	19
Provozní režim I	19
Provozní režim II	20
5 Výpočet součinitelů přestupu tepla pomocí CFD	22
5.1 Oblast hrdel trubkového svazku	22
5.2 Oblast plovoucí hlavy	27
6 Napěťová analýza.....	30
6.1 Vlastnosti materiálu	31
6.2 Oblast hrdel trubkového svazku	33
Výpočtový způsob I.....	33
Výpočtový způsob II	41
6.3 Plášť v místě plovoucí hlavy	47
Výpočtový způsob I.....	47
Výpočtový způsob III	51
6.4 Plovoucí hlava	54
Výpočtový způsob I.....	54
Výpočtový způsob III	57
6.5 Vyhodnocení napěťové analýzy	60

Závěr.....	61
Seznam použité literatury	62
Seznam použitých symbolů.....	63
Seznam příloh.....	64

1 Úvod

Výměníky tepla mají v dnešní době nezastupitelnou roli v procesním inženýrství. Téměř žádný proces se neobejde bez výměny tepla, ať se jedná o potravinářský průmysl, chemický průmysl, výrobu materiálů, klimatizaci, vytápění, získávání energie z odpadu nebo generování elektrické energie. Výměník tepla je zařízení, které slouží k přenosu tepla z jednoho média na druhé. Používá se k přivádění nebo odvádění tepla z procesu. V průmyslových procesech může dojít k plýtvání energií nebo teplé proudy mohou být bezúčelně vypuštěny. Tomu se dá předejít použitím tepelných výměníků k získání tohoto tepla a ohřátí různých proudů v procesu. Tento postup šetří mnoho prostředků, neboť teplo k ohřátí proudů by muselo být dodáno z vnějších zdrojů. Teplo z vnějších zdrojů je nákladnější a také více zatěžující pro životní prostředí.

K navržení a kontrole výměníku tepla se dají v dnešní době použít metody založené na MKP a CFD. Přestože jsou tyto metody známé již delší dobu, k jejich rozšíření došlo až po rozvoji a zpřístupnění výpočetní techniky. Principem metody MKP je rozložení spojitého kontinua do určitého počtu prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. V práci bude MKP využita k pevnostní analýze vytipovaných míst trubkového výměníku tepla s plovoucí hlavou. V těchto místech dochází k extrémnímu namáhání materiálu vlivem teplotních dilatací. K zpřesnění výsledků pevnostní analýzy bude metodou CFD proveden tepelně-hydraulický výpočet. Výpočet metodou CFD probíhá rozdělením média na menší objemy a aplikaci algoritmu řešícího pohybové rovnice.

2 Základní druhy výměníků tepla

V této kapitole jsou popsány vlastnosti několika druhů výměníku tepla.

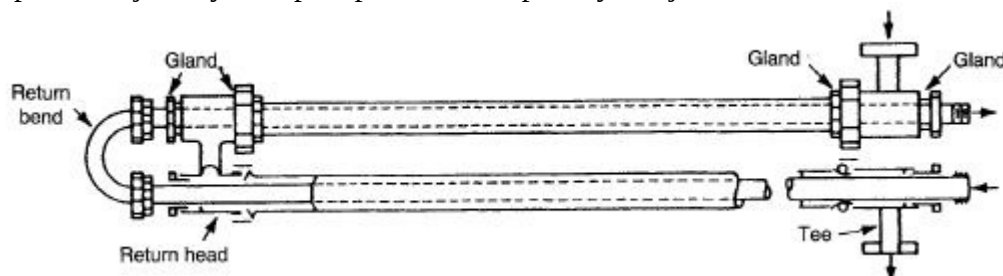
2.1 Trubka v trubce

Trubkou v trubce nazýváme výměník tepla, kdy se uvnitř vnější trubky nachází jediná trubka nebo svazek trubek. Vnější trubka může být zateplená, aby se minimalizovaly tepelné ztráty do okolí. Jedná se o spolehlivý a nejjednodušší druh výměníku. Vnitřní trubka i vnější strana mohou být do procesního potrubí připojené tryskami. Tento typ výměníku dosahuje vysokých hodnot přestupu tepla, ovšem za cenu větších rozměrů a množství potřebného materiálu na jednotku plochy výměny tepla. U malých teplotních rozdílů můžeme použít nerozebíratelné provedení. Nerozebíratelný typ se obtížně čistí, proto může být použitý pouze pro čistou látku. Vláškový výměník trubka v trubce se nachází na obr. 2.1. Výhodou tohoto typu je možnost zapojení do série přesný počet článků pro požadovaný přenos tepla.



Obr. 2.1 Trubka v trubce [3]

Média mohou protékat uvnitř i vně trubek stejným směrem, obvyklejší je tok médií opačným směrem, u kterého dochází na stejné ploše k vyšší výměně tepla. Takovéto uspořádání je nazývané protiproudé. Protiproudý tok je vidět na schématu obr. 2.2.



Obr. 2.2 Funkce výměníku trubka v trubce [4]

Pozn.: gland – těsnící kroužek
return bend – spojovací koleno
return head – spojovací hlava
tee – T kus

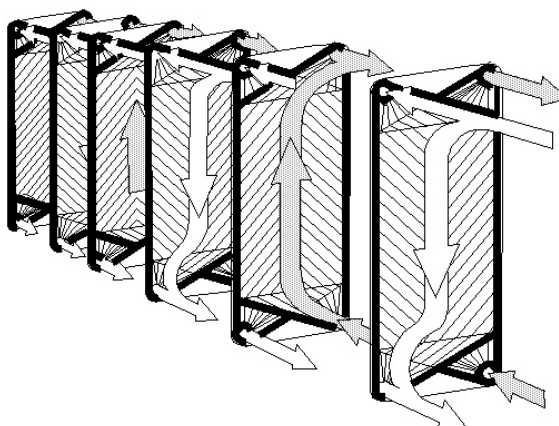
2.2 Deskový výměník tepla

Deskový výměník tepla je soustava tenkých desek uspořádaných za sebou. Na povrchu těchto desek dochází k výměně tepla. Tímto uspořádáním dojde k vytvoření velkého povrchu pro přestup tepla. Výhodou je také kompaktní konstrukce a rozměrová flexibilita. Deskové výměníky se liší použitým materiálem, tvarem a uspořádáním desek. Nejčastěji jsou vyrobeny z nerezavějící oceli, ale desky mohou být také z jiných běžných materiálů. Deskové výměníky jsou snadno čistitelné, jsou použitelné pro vysoké teploty, málo se zanáší a mají nízké náklady na údržbu. Problémy s těsněním lze předejít svařením desek, to ovšem přináší jiné potíže, jako například nutnost chemického čištění. Deskový výměník je znázorněn na obr. 2.3.



Obr. 2.3 Deskový výměník tepla [5]

Každá deska vytváří dva oddělené mezideskové prostory. Média protékají vrchní a spodní části výměníku, část medií střídavě protéká mezideskovými prostory, čímž dochází k efektivní protiproudé výměně tepla. Na obrázku obr. 2.4 je vidět průtok medií deskovým výměníkem.



Obr. 2.4 Funkce deskového výměníku [6]

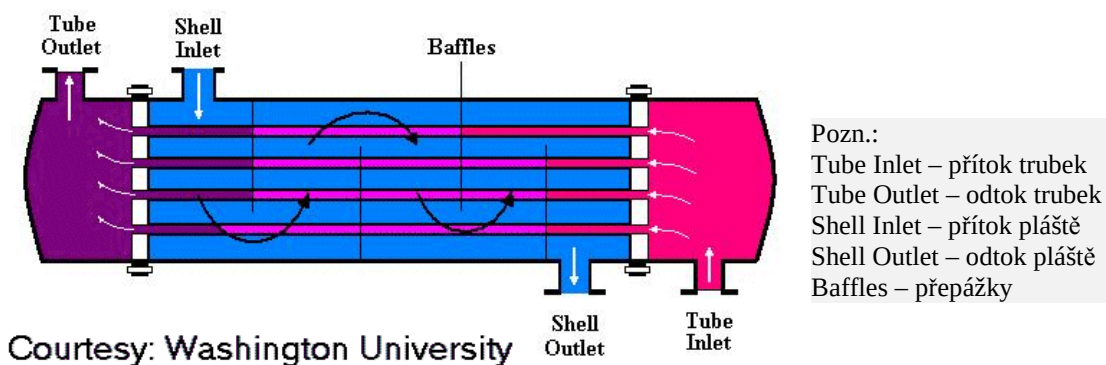
2.3 Trubkový výměník tepla

Trubkový výměník tepla je nejrozšířenější výměník tepla v procesním průmyslu. Teplo si předávají proudící média mezi trubkovým a mezitrubkovým prostorem. Mezitrubkový prostor je tvořen pláštěm, který je rozdělen přepážkami. Přepážky slouží k vedení média napříč k trubkám a také k zmírnění vibrací trubek. Uvnitř pláště se nachází svazek trubek. Trubkový výměník tepla je díky své robustní konstrukci vhodný při vysokotlakých aplikacích. Výměník je levnější, pokud má menší průměr pláště a delší trubky. Cílem je vyrobit výměník co nejdelší, jsou zde ovšem omezení v podobě potřebného prostoru pro zařízení, dostupnosti dostatečně dlouhých trubek a s delšími trubkami se také obtížněji manipuluje. Nejjednodušším a nejlevnějším druhem trubkového výměníku tepla je výměník tepla s pevnými trubkovnicemi. Pokud je nutné řešit teplotní dilataci trubek, můžeme použít výměník tepla s plovoucí hlavou nebo U-trubkami. Na obr. 2.5 je trubkový výměník s jedním chodem v plášti a v trubkách.



Obr. 2.5 Trubkový výměník tepla [3]

Na obr. 2.6 je znázorněna funkce trubkového výměníku s jedním chodem v plášti i trubkách. Vpravo dole vstupuje medium do trubkového prostoru a vystupuje vlevo nahoře. V opačném směru protéká medium pláštěm kolem přepážek a svazku trubek.



Pozn.:

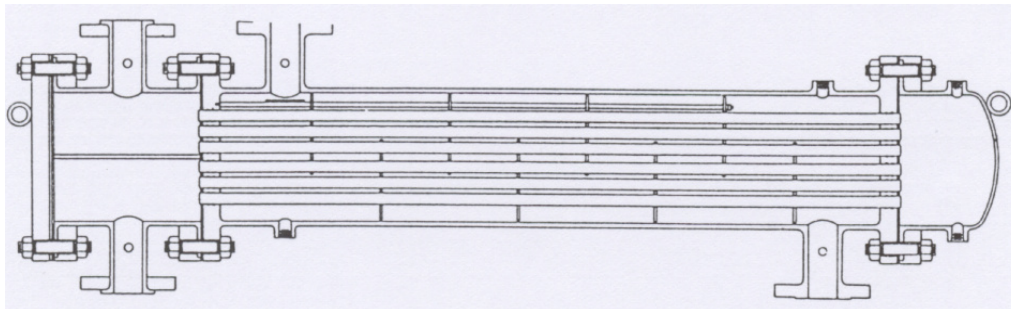
Tube Inlet – přítok trubek
Tube Outlet – odtok trubek
Shell Inlet – přítok pláště
Shell Outlet – odtok pláště
Baffles – přepážky

Obr. 2.6 Funkce trubkového výměníku tepla [7]

2.3.1 Druhy provedení trubkového výměníku tepla

Výměník tepla s pevnou trubkovnicí

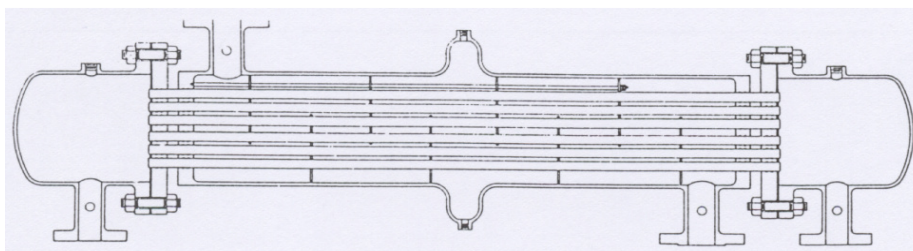
Jedná se o základní typ výměníku (obr. 2.7), veškeré jeho části jsou pevně uloženy a neumožňují větší deformace bez poškození výměníku. Proto jej lze použít pouze pro malé rozdíly teplot medií. Nízké náklady na výrobu výměníku jsou dány jednoduchou konstrukcí. Vnitřek trubek může být mechanicky čištěn odkrytím víka, mezitrubkový prostor mechanicky čistit nelze, neboť trubky jsou připevněné k plášti a nemohou být vyjmuty.



Obr. 2.7 Výměník tepla s pevnou trubkovnicí [8]

Výměník tepla s vlnovým kompenzátorem

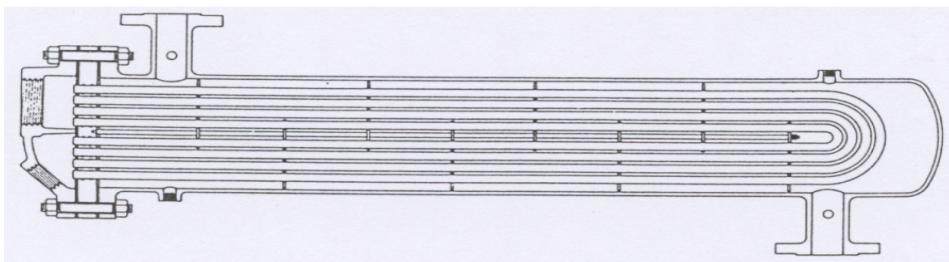
Obdoba výměníku s pevnou trubkovnicí přidáním vlnového kompenzátoru. Vlnový kompenzátor uprostřed pláště vyrovnává posuvy vniklé teplotní roztažností mezi trubkami a pláštěm a snižuje únavu materiálu (obr. 2.8). Toto řešení je nevhodné pro velké průměry pláště a vysokotlaké aplikace.



Obr. 2.8 Výměník tepla s vlnovým kompenzátorem [8]

Výměník tepla s U-trubkami

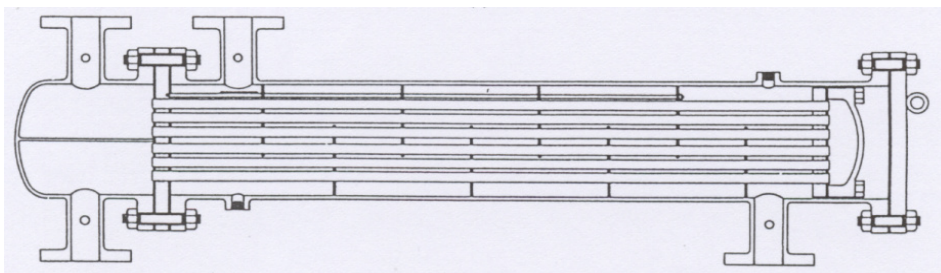
V tomto případě jsou trubky pevně přichyceny k trubkovnici na jedné straně. Kolena ve tvaru “U” na druhé straně se mohou při teplotní dilataci trubek volně pohybovat. Médium se v kolenech obrací a proudí zpět opačným směrem. Jedná se tedy o výměník s dvěma chody v trubkách (obr. 2.9). Výměník s U-trubkami obsahuje pouze jediný svazek trubek. Nižší cena díky použití jediného svazku trubek je vyrovnána nutností většího průměru pláště daným minimálním poloměrem zahnutí trubek. Výhodami je jednoduché čištění mezitrubkového prostoru vyjmutím celého svazku trubek.



Obr. 2.9 Výměník tepla s U-trubkami [8]

Výměník tepla s plovoucí hlavou

Pevně uložené trubky ústí do plovoucí hlavy, která obdobně jako u výměníku s U-trubkami není připevněna. I zde vznikají dva chody v trubkách. (obr. 2.10). Výměník s plovoucí hlavou je nejvíce přizpůsobivý, ale také zároveň nejnákladnější. Použití plovoucí hlavy umožňuje snadné čištění uvnitř i vně trubek, proto může být tento typ provozován i se znečištěnými médii.



Obr. 2.10 Výměník tepla s plovoucí hlavou [8]

3 Zadání a postup řešení

Účelem této práce je provést napěťovou analýzu částí trubkového výměníku tepla, v kterých lze očekávat odlišný charakter proudění než ve zbytku zařízení. Jedná se o oblasti vtokového a výtokového hrdla trubkového svazku a plovoucí hlavy. K získání přesných teplot v těchto částech, budou provedeny výpočty přestupu tepla pro celé zařízení. Na tyto výpočty bude navazovat hydraulicko-tepelný výpočet součinitelů přestupu tepla pomocí metody CFD. Součinitele přestupu tepla budou z důvodu značné velikosti zařízení určeny zvlášť v každé části. Teploty získané z výpočtu přestupu tepla a součinitele přestupu tepla budou použity k napěťové analýze. Výsledky této analýzy, která simuluje reálné provozní podmínky, budou srovnány s výsledky napěťové analýzy provedené na základě výpočtových hodnot. Posuzované zařízení je používáno ve dvou provozních režimech a zároveň jsou rozlišeny teploty chladících médií pro zimní a letní období. Schéma výměníku tepla je v příloze č. 1. Hrdla se nacházejí v pravé části výměníku tepla, plovoucí hlava zaujímá levou část.

Napěťová analýza na základě výpočtových hodnot

Pro výměník tepla je uvedena výpočtová teplota a výpočtový tlak. Tyto hodnoty budou použity k pevnostní analýze.

Napěťová analýza na základě hydraulicko-tepelných výpočtů

K provedení napěťové analýzy je třeba znát tlak působící na plochy výměníku tepla, teploty proudících médií a součinitel přestupu tepla z média na stěnu. Maximální pracovní tlaky v trubkovém i mezitrubkovém prostoru jsou zadány, tlaky na konci zařízení je možné určit pomocí tlakové ztráty. Některé potřebné teploty médií jsou teplotami vstupními, zbylé se získají výpočtem přestupu tepla. Součinitel přestupu tepla pro jednotlivé plochy se určí programem ANSYS CFX.

Za účelem získání součinitele přestupu tepla se nejprve vytvoří prostorový model vybrané části programem SolidWorks 2008. Model se exportuje do simulačního programu ANSYS CFX 11. Zadájí se hodnoty průtoku a určí se vstupní a výstupní plochy. Následnou simulací se získá představa o směrech a rychlostech proudění média a určí hodnoty součinitelů přestupu tepla z média na stěny v dané oblasti.

Nyní budou známy z předcházejících částí veškeré potřebné okrajové podmínky pro napěťovou analýzu. V programu SolidWorks se vytvoří i modely částí, které budou pevnostně analyzované v programu ANSYS Workbench 11. Budou zadány okrajové podmínky, bude spuštěn výpočet a vyhodnotí se výsledky.

4 Základní výpočty přestupu tepla

Byl proveden simulační výpočet zadaného výměníku tepla k ověření jeho dostatečného výkonu a k získání teplotního profilu médií ve výměníku a tlakové ztráty. Z teplotního profilu byla odečtena teplota chladicí vody v místě plovoucí hlavy, ta byla potřebná k následné pevnostní analýze plovoucí hlavy. Výstupní teplota chlazené vody odpovídá teplotě v místě plovoucí hlavy. K výpočtu se použije program HTRI Xchanger Suite 5, který umožňuje detailní vložení parametrů výměníku tepla a vstupních proudů.

4.1 Zadání parametrů výměníku tepla

Jednotlivé rozměry výměníku v tab. 4. 1. jsou odečtené z jeho výkresu.

Parametr	Hodnota
průměr pláště	1,6 m
délka pláště	7,726 m
počet trubek	2958
vnější průměr trubek	0,02 m
tloušťka trubek	0,002 m
délka trubek	5,9 m
rozteč trubek	0,026 m
úhel uspořádání trubek	60°
rozestup přepážek uprostřed	0,6 m
rozestup přepážek na vstupu	0,87 m
rozestup přepážek na výstupu	0,9 m

Tab. 4.1 Použité rozměry výměníku tepla

4.2 Zadání vlastností vstupních proudů

Řešeny byly 2 různé provozní režimy. V obou případech je médiem voda. Chladicí voda proudí trubkovým prostorem, chlazená mezitrubkovým. Tyto režimy se liší průtokem, maximálním pracovním tlakem a maximální pracovní teplotou chlazeného média. Byly uvažovány dvě rozdílné teploty vody společně s různými průtoky chlazeného média v závislosti na ročním období pro oba režimy. Byly tedy modelovány celkem 4 stavy.

Provozní režim I

V následujících tabulkách jsou shrnuty zadané hodnoty maximálních pracovních tlaků a teplot, informace o médiích a jejich průtocích provozního režimu I zvlášť pro mezitrubkový prostor (tab. 4.1) a pro trubkový prostor (tab. 4.2).

Parametr	Hodnota
max. pracovní tlak	1,5 MPa
max. pracovní teplota - léto	140°C
max. pracovní teplota - zima	140°C
médium	voda
měrná hustota média	1000 kg/m ³
průtok – léto	290 t/hod
průtok – zima	230 t/hod

Tab. 4.2 Mezitrubkový prostor – chlazená voda

Parametr	Hodnota
max. pracovní tlak	0,90 MPa
max. pracovní teplota - léto	33°C
max. pracovní teplota - zima	5°C
médium	voda
měrná hustota média	1000 kg/m ³
průtok	1200 t/hod

Tab. 4.3 Trubkový prostor – chladicí voda

Provozní režim II

Obdobně i zde jsou zadány hodnoty pro provozní režim II zvlášť pro mezitrubkový prostor (tab. 4.4) a pro trubkový prostor (tab. 4.5).

Parametr	Hodnota
max. pracovní tlak	0,27 MPa
max. pracovní teplota - léto	125°C
max. pracovní teplota - zima	125°C
médium	voda
měrná hustota média	1000 kg/m ³
průtok – léto	900 t/hod
průtok – zima	900 t/hod

Tab. 4.4 Mezitrubkový prostor – chlazený roztok

Parametr	Hodnota
max. pracovní tlak	0,90 MPa
max. pracovní teplota - léto	33°C
max. pracovní teplota - zima	5°C
médium	voda
měrná hustota média	1000 kg/m ³
průtok	1500 t/hod

Tab. 4.5 Trubkový prostor – chladicí voda

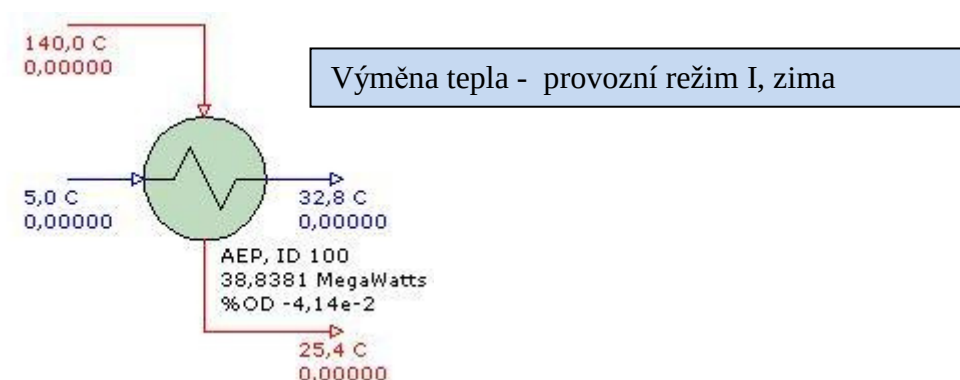
4.3 Výsledky simulace přestupu tepla

Výsledné teploty jsou uvedené zvlášť pro provozní režim I a režim II.

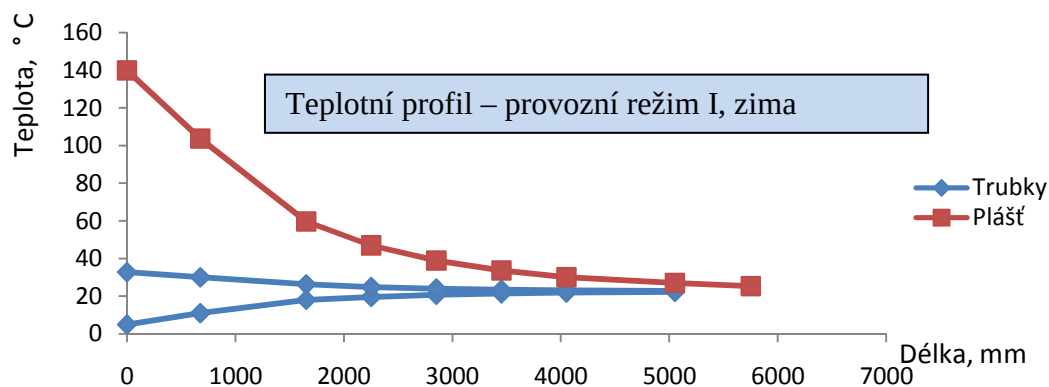
Provozní režim I

V příložených tabulkách jsou pro provozní režim I odečteny vstupní a výstupní teploty a teploty médií v místě plovoucí hlavy. V tab. 4.6 se jedná o stav v zimním období, v tab. 4.7 o stav v letním období.

Přestup tepla v zimním období ukazuje obr. 4.1. Graf 4.1 znázorňuje teplotní profil výměníku tepla pro provozní režim I v zimním období. Teplotní profily pro ostatní stavy vypadají obdobně.



Obr. 4.1 Ukázka výměny tepla získané programem HTRI Xchanger Suite



Graf 4.1 Ukázka teplotního profilu získaného programem HTRI Xchanger Suite

Parametr	Hodnota
teplota chladící vody na vstupu	33°C
teplota chladící vody v místě plovoucí hlavy	47,1°C
teplota chladící vody na výstupu	55,2 °C
tlaková ztráta trubkového svazku	19,8 kPa
teplota chlazené vody na vstupu	140°C
teplota chlazené vody na výstupu	48,7 °C
tlaková ztráta pláště	8,7 kPa

Tab. 4.6 Teploty – léto

Parametr	Hodnota
teplota chladící vody na vstupu	5°C
teplota chladící vody v místě plovoucí hlavy	22,5°C
teplota chladící vody na výstupu	32,8 °C
tlaková ztráta trubkového svazku	21 kPa
teplota chlazené vody na vstupu	140°C
teplota chlazené vody na výstupu	25,4 °C
tlaková ztráta pláště	8,8 kPa

Tab. 4.7 Teploty – zima

Provozní režim II

Zde jsou pro provozní režim II odečteny vstupní a výstupní teploty a teploty médií v místě plovoucí hlavy. Tab. 4.8 znázorňuje stav v zimě, tab. 4.9 stav v létě.

Parametr	Hodnota
teplota chladící vody na vstupu	33°C
teplota chladící vody v místě plovoucí hlavy	57,4°C
teplota chladící vody na výstupu	70,8°C
tlaková ztráta trubkového svazku	27 kPa
teplota chlazené vody na vstupu	125°C
teplota chlazené vody na výstupu	62,4°C
tlaková ztráta pláště	27,9 kPa

Tab. 4.8 Teploty – léto

Parametr	Hodnota
teplota chladící vody na stupu	5°C
teplota chladící vody v místě plovoucí hlavy	36°C
teplota chladící vody na výstupu	53,7°C
tlaková ztráta trubkového svazku	28,1 kPa
teplota chlazené vody na vstupu	125°C
teplota chlazené vody na výstupu	44,2°C
tlaková ztráta pláště	28,4 kPa

Tab. 4.9 Teploty – zima

Byl získán teplotní profil po délce výměníku tepla. Z vystupujících teplot lze usoudit, že tepelný výkon výměníku je dostatečný.

5 Výpočet součinitelů přestupu tepla pomocí CFD

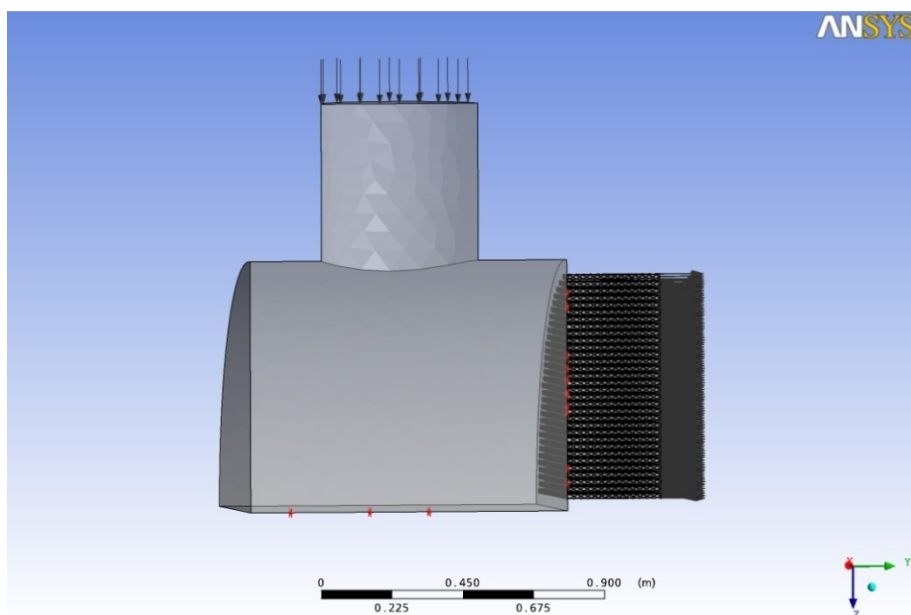
V této kapitole byla provedena simulace proudění médií v oblasti hrdel trubkového svazku a v místě plovoucí hlavy. Výsledkem této simulace bylo určení součinitele přestupu tepla z média na jednotlivé plochy.

5.1 Oblast hrdel trubkového svazku

V oblasti vtokového a výtokového hrdla bylo simulováno proudění pouze v trubkovém prostoru. V oblasti vtokového hrdla médium přitéká hrdlem a odtéká trubkami. V oblasti výtokového hrdla médium naopak trubkami přitéká a hrdlem výměník opouští. Pro oba dva případy postačí vytvořit v programu SolidWorks pouze jeden model, zda se jedná o vtokovou či výtokovou oblast, je rozlišeno v jednotlivých simulacích okrajovými podmínkami. Pro výpočet byl zvolen provozní režim II v letním období. Provozní režim II má vyšší průtok, lze tedy předpokládat vyšší přestup tepla. Chladicí médium protéká výměníkem rychlostí 1500 t /hod a jeho teplota na vstupu je 33°C, na výstupu 71°C (určeno v kapitole 4). Tlak má hodnotu 0,9 MPa.

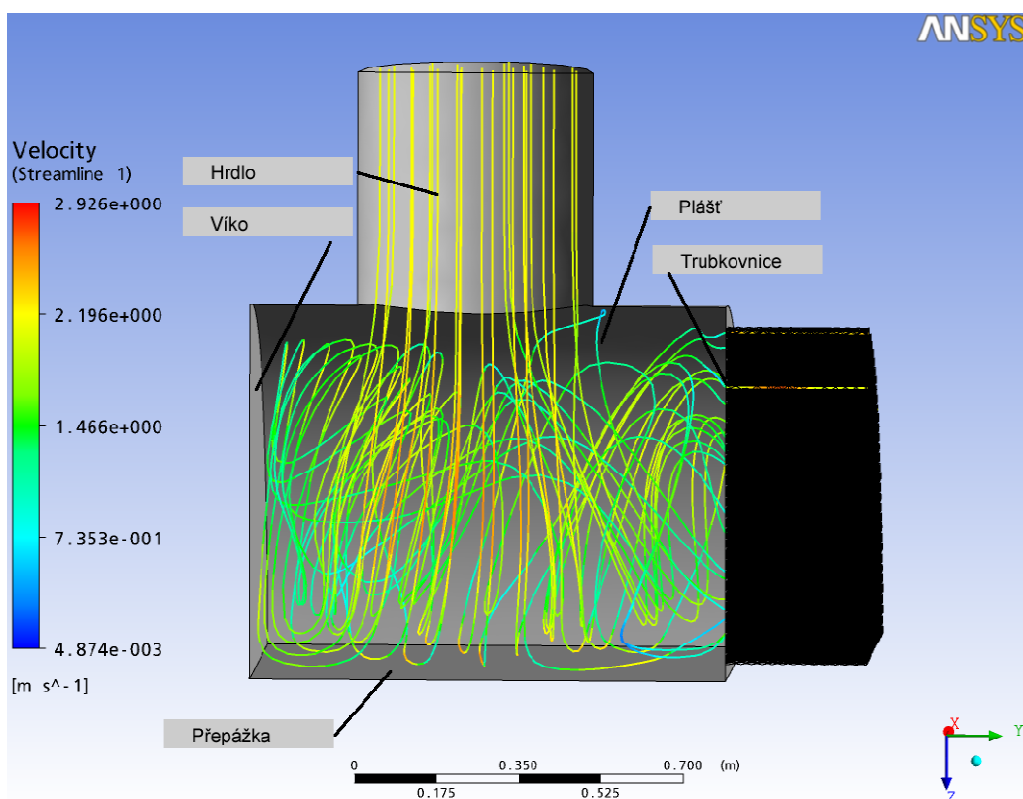
Proudění v oblasti vtokového hrdla

Nejprve byl vytvořený model v programu SolidWorks importován do programu ANSYS Workbench, zde byla vytvořena CFX-sít' o počtu 12000 uzlů se třemi zjemňujícími pruhy podél stěn. Model s výpočtovou sítí byl otevřen v programu ANSYS CFX. Obr. 5.1 znázorňuje zadané okrajové podmínky pro výpočet. Na rovinu symetrie byla zadána podmínka symetrie (červené šipky), vstup média byl zadán na vtokové hrdlo (šipky v horní části) a byl zadán poloviční průtok, tedy 750 t /hod. Konce trubek byly označeny jako výstup (šipky vpravo). Zde byla zadána volná podmínka na výstupu, což znamená, že veškeré parametry (p, T, v atd.) budou počítány ze vstupních podmínek. Jako pracovní médium byla zadána voda a do osy z bylo zadáno gravitační zrychlení.

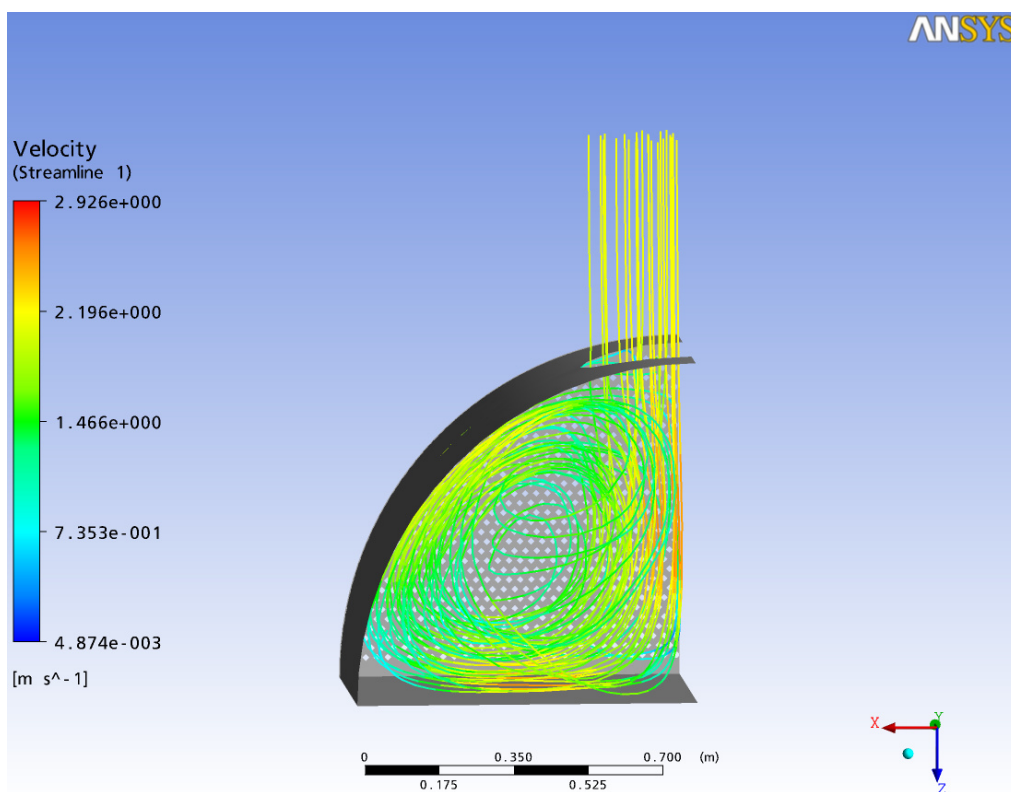


Obr. 5.1 Model oblasti vtokového hrdla

Výsledné proudění znázorňuje obr. 5.2 v pohledu z roviny symetrie a obr 5.3 v pohledu ze směru víka. Popisky s názvy jsou připojeny k plochám, pro které jsou v tab. 5.1 vypsány průměrné součinitele přestupu tepla.



Obr. 5.2 Výsledek simulace proudění oblasti vtokového hrdla – pohled z roviny symetrie



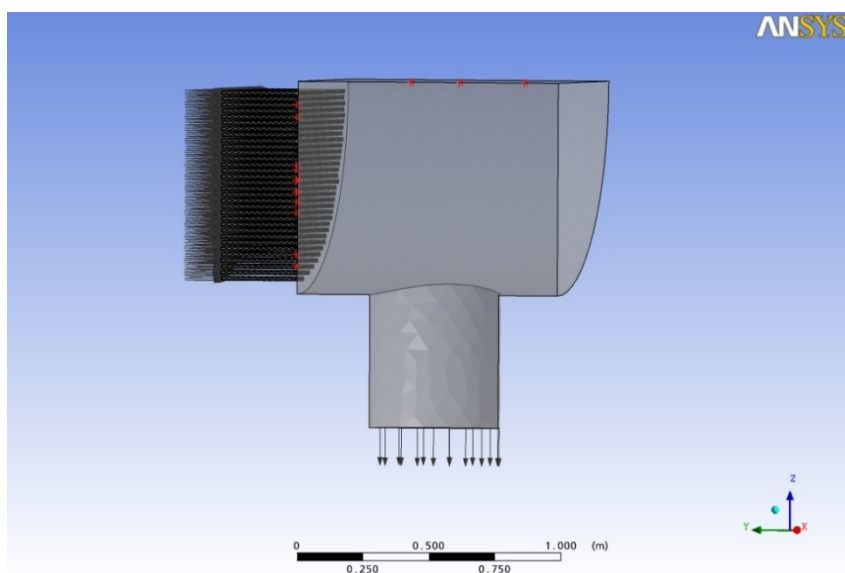
Obr. 5.3 Výsledek simulace proudění oblasti vtokového hrdla – pohled ze směru víka

Plocha	Hodnota koeficientů přestupu tepla [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
hrdlo	9100
víko	7320
plášť	6730
trubkovnice	5260
přepážka	7790

Tab. 5.1 Hodnoty součinitelů přestupu tepla oblasti vtokového hrdla

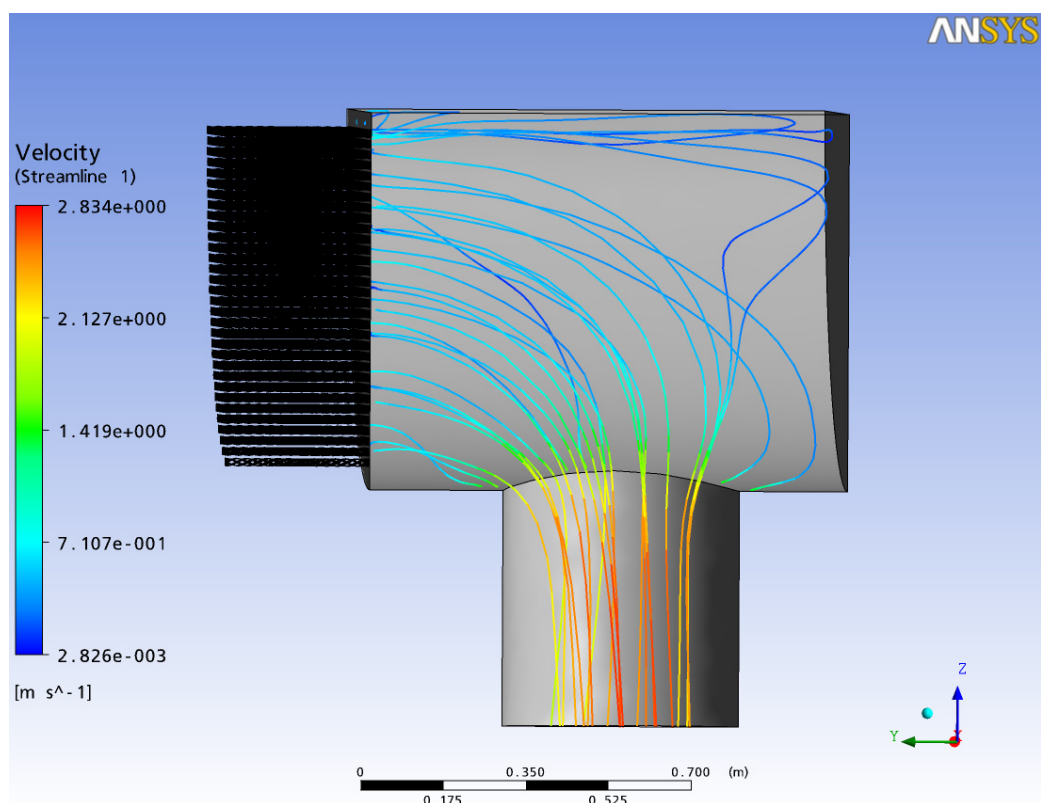
Proudění v oblasti výtakového hrdla

Chladicí médium opouští výměník o stejném průtoku. Jeho teplota je zvýšena na 71°C. Tlak byl uvažovaný shodný jako na vstupu. Gravitace v tomto případě působí proti směru osy z.

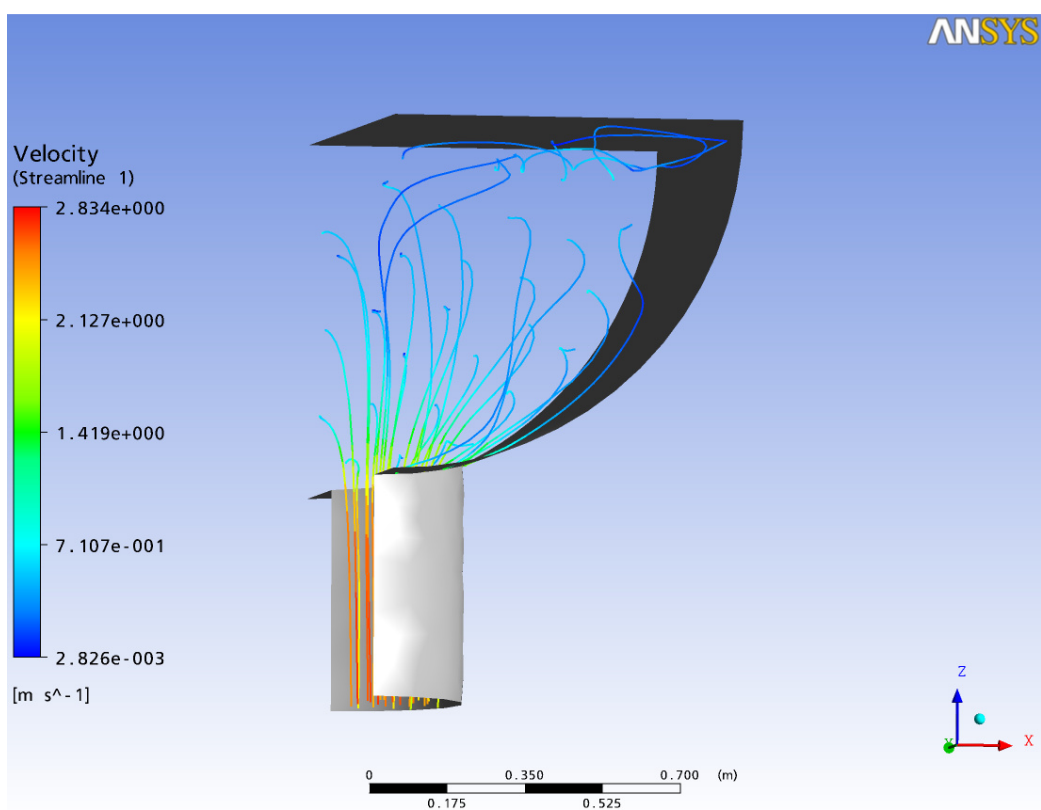


Obr. 5.4 Model oblasti výtakového hrdla

Na proudnicích na obr. 5.5 a obr. 5.6 je vidět, že proudění ve výtakovém hrdle je značně odlišné oproti hrdlu vtokovému. Méně turbulentní charakter se odrazil i na hodnotách součinitele přestupu tepla v tab. 5.2, které se celkově snížily.



Obr. 5.5 Výsledek simulace proudění oblasti výtokového hrdla – pohled z roviny symetrie



Obr. 5.6 Výsledek simulace proudění oblasti vtokového hrdla – pohled ze směru víka

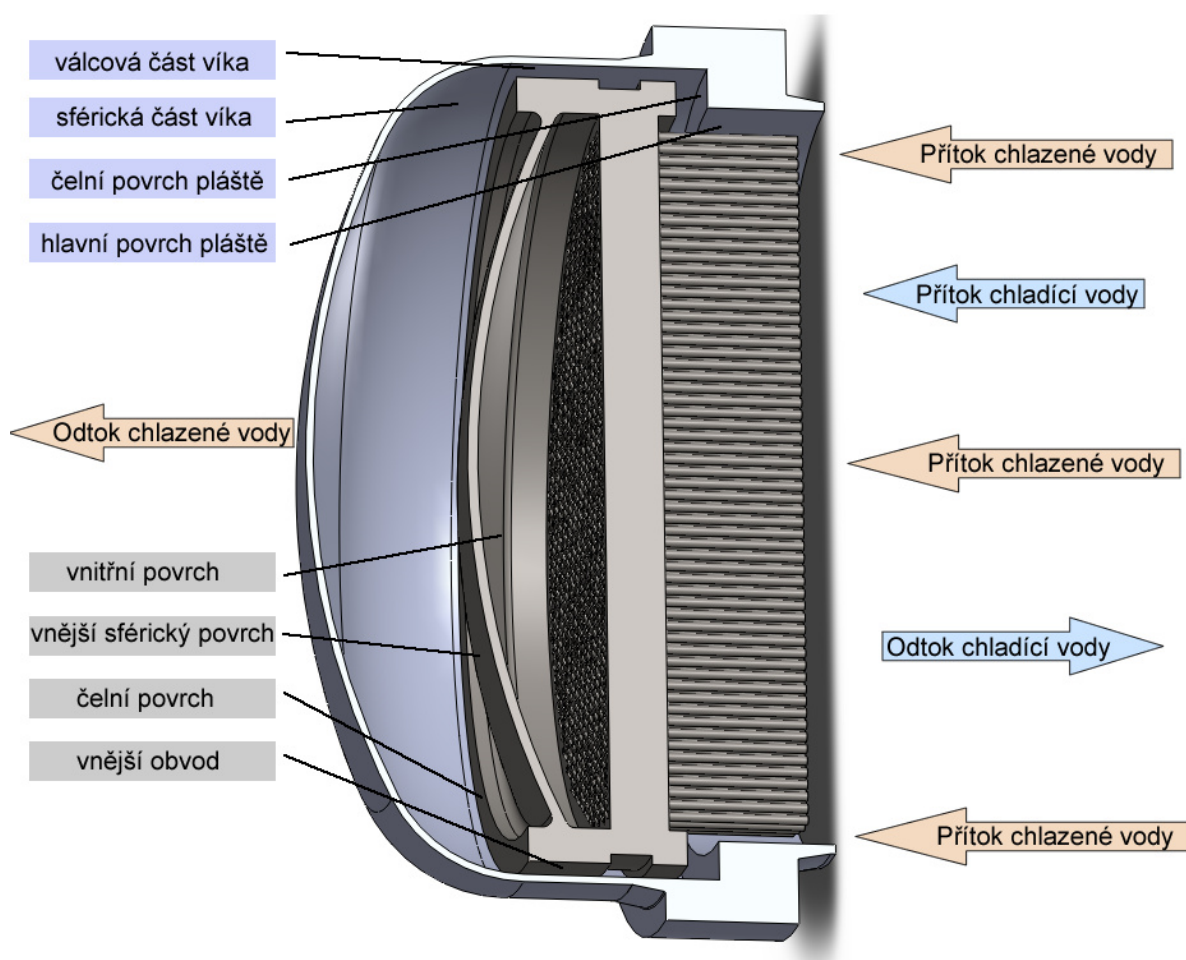
Plocha	Hodnota koeficientů přestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
hrdlo	6770
víko	1340
plášť	2360
trubkovnice	7560
přepážka	1380

Tab. 5.2 Hodnoty součinitelů přestupu tepla oblasti výtakového hrdla

5.2 Oblast plovoucí hlavy

Bylo simulováno proudění uvnitř plovoucí hlavy a zároveň v mezitrubkovém prostoru v jejím nejbližším okolí. Byly vybrány podmínky provozního režimu I v létě. Médium protéká trubkovým prostorem rychlostí 1200 t/hod při tlaku 0,9 MPa a mezitrubkovým prostorem rychlostí 290 t/hod při tlaku 1,5 MPa. Základní výpočet tepla v kapitole 4 ukázal, že teploty médií jsou v místě plovoucí hlavy téměř vyrovnané. 47°C vychází uvnitř plovoucí hlavy, 49°C v jejím okolí.

Z důvodu obrovského množství trubek (i na symetrickém modelu je jich téměř 1500) bylo nutné model zjednodušit a výpočet provést na školním serveru v programu Fluent. V modelu bylo vynecháno výtokové hrdlo mezitrubkového prostoru a chlazené médium vystupuje víkem výměníku. Chladicí médium již bez použití zjednodušení přitéká polovinou trubek do plovoucí hlavy a druhou polovinou trubek ji opouští. Obr. 5.5 zobrazuje zadané vstupy a výstupy médií včetně názvů ploch. Pro tyto plochy jsou v tab. 5.3 a 5.4 zvlášť pro plovoucí hlavu a plášť vypsány výsledné součinitele přestupu tepla.



Obr. 5.5 Model oblasti plovoucí hlavy

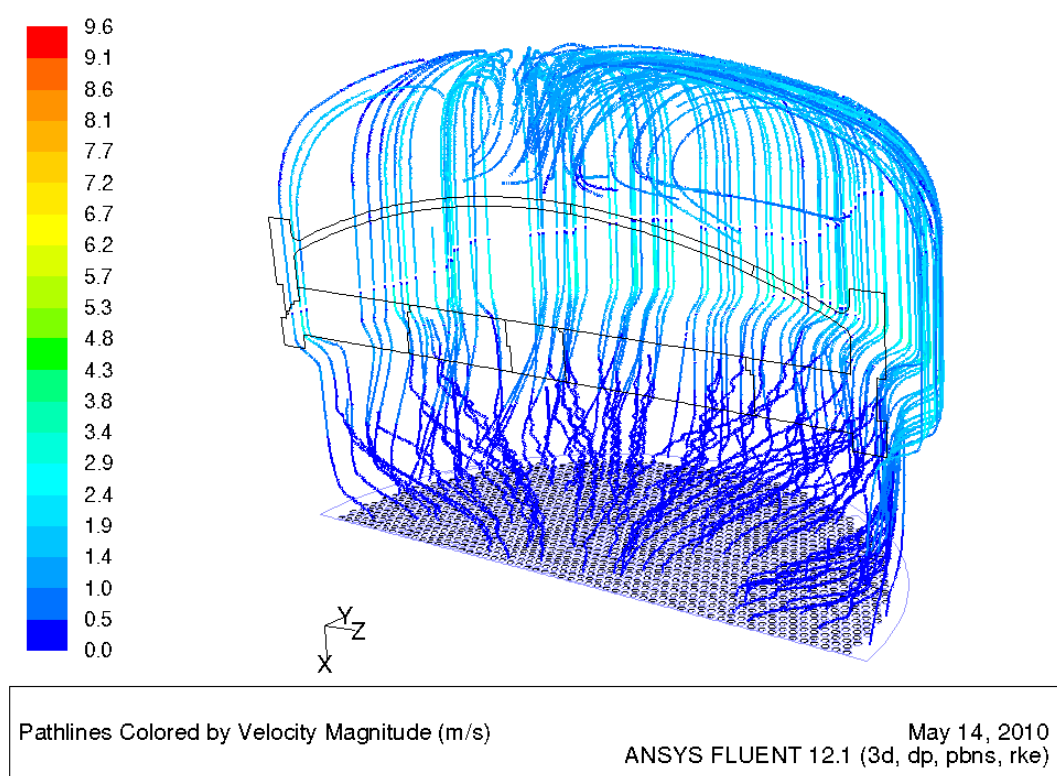
Plocha plovoucí hlavy	Hodnota koeficientů přestupu tepla [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
vnitřní povrch	2153
vnější sférický povrch	675
čelní povrch	300
vnější obvod	2162

Tab. 5.3 Hodnoty součinitelů přestupu tepla plovoucí hlavy

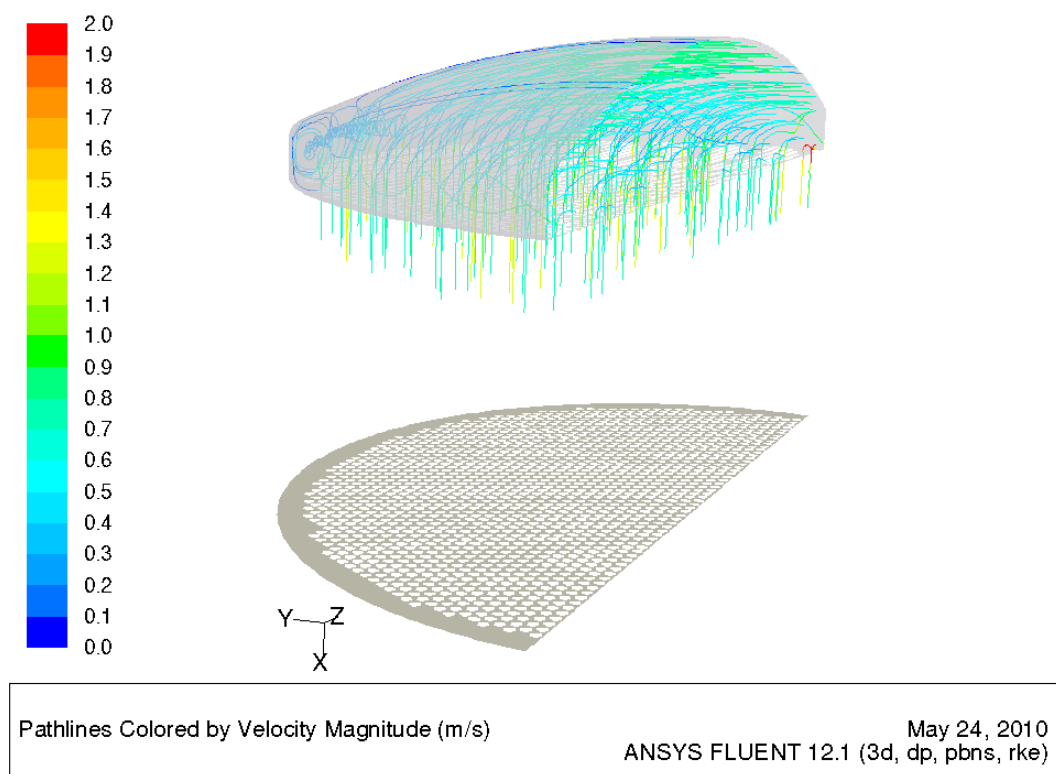
Plocha pláště	Hodnota koeficientů přestupu tepla [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
válcová část víka	1048
sférická část víka	752
čelní povrch pláště	1327
hlavní povrch pláště	1950

Tab. 5.4 Hodnoty součinitelů přestupu tepla pláště

Výsledné proudění v mezitrubkovém prostoru v oblasti plovoucí hlavy je vidět na obr. 5.6, v trubkovém prostoru na obr. 5.7.



Obr. 5.6 Výsledek simulace proudění oblasti plovoucí hlavy – mezitrubkový prostor



Obr. 5.7 Výsledek simulace proudění oblasti plovoucí hlavy – trubkový prostor

6 Napět'ová analýza

Jednotlivé části výměníku byly současně pevnostně posouzeny dvěma výpočtovými způsoby. Jeden je za použití výpočtových hodnot, druhý vychází z hydraulicko-tepelného výpočtu pro určitý provozní režim, u kterého lze předpokládat vyšší namáhání dané analyzované části.

V programu ANSYS bylo v místech s největší napjatostí stanoveno napětí po tloušťce stěny. Následně byla provedena kategorizace napětí. Membránové a membránové+ohybové napětí bylo porovnáno s jejich přípustnými hodnotami.

Výpočtový způsob I

Způsobem I je označena pevnostní analýza při použití výpočtových hodnot. Pro **trubkový prostor je uvedena výpočtová teplota 60°C a výpočtový tlak 0,9 MPa**, pro **mezitrubkový prostor teplotu 160°C a tlak 1,5 MPa**. Tento výpočtový způsob bude aplikován na všechny analyzované části.

Výpočtový způsob II

Pevnostní výpočet oblasti hrdel trubkového svazku, kterému předcházela hydraulicko-tepelný výpočet je označen jako způsob II. V kapitole 4 byly získány zpřesněné teploty a tlaky. Pro posouzení byl zvolen **provozní režim II v létě** (tab. 4.8), v kapitole 5.1 byly následně určeny součinitele přestupu tepla přímo pro tento způsob.

Výpočtový způsob III

Tímto způsobem je opět označena pevnostní analýza, které přecházela hydraulicko-pevnostní výpočet. Tento výpočtový způsob byl použit pro pevnostní analýzu plovoucí hlavy a pláště v jejím okolí. Pro tento způsob byly zvoleny parametry **provozního režimu I v létě** (tab. 4.6). Součinitele přestupu tepla byly získány v kapitole 5.2.

6.1 Vlastnosti materiálu

Plášť výměníku a jeho součásti jsou vyrobeny z korozivzdorné oceli ČSN 41 7247 (tab. 6.1), trubková část z nízkouhlíkové oceli obvyklých vlastností ČSN 41 1416 (tab. 6.2).

Ocel ČSN 41 7247

Parametr	Hodnota
modul pružnosti $E_{100^{\circ}\text{C}}$	194 GPa
modul pružnosti $E_{200^{\circ}\text{C}}$	186 GPa
mez kluzu $R_{p0,1/100^{\circ}\text{C}}$	202 MPa
mez kluzu $R_{p0,1/200^{\circ}\text{C}}$	182 MPa
mez pevnosti R_m	500 MPa
teplotní součinitel roztažnosti α	$16,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
tepelná vodivost λ_t	$15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Tab. 6.1 použité vlastnosti oceli ČSN 41 7247

Maximální přípustné hodnoty dovoleného namáhání oceli ČSN 41 7247 pro jednotlivé teploty se určí dle normy ČSN 13445-3 [9] části týkající se austenitické oceli ($A \geq 35\%$). Zde následuje výpočet konkrétně pro teplotu 160°C .

mez kluzu $R_{p0,1/160^{\circ}\text{C}} = 194 \text{ MPa}$

$$f_d = \left[\max\left(\frac{R_{p0,1,t}}{1,5}\right); \min\left(\frac{R_{p0,1,t}}{1,2}; \frac{R_{m,t}}{3}\right) \right] \quad (6.1)$$
$$f_d = [\max(129,3); \min(161,7; 166,7) \text{ MPa}]$$
$$f_d = 161,7 \text{ MPa}$$

Ocel ČSN 41 1416

Parametr	Hodnota
modul pružnosti $E_{100^{\circ}\text{C}}$	201 GPa
modul pružnosti $E_{200^{\circ}\text{C}}$	191 GPa
mez kluzu $R_{p0,2/100^{\circ}\text{C}}$	196 MPa
mez kluzu $R_{p0,2/200^{\circ}\text{C}}$	172 MPa
mez pevnosti R_m	400 MPa
teplotní součinitel roztažnosti α	$11,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
tepelná vodivost λ_t	$53,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Tab. 6.2 použité vlastnosti oceli ČSN 41 1416

Maximální přípustné hodnoty dovoleného namáhání oceli ČSN 41 1416 pro jednotlivé teploty se určí dle normy ČSN 13445-3 [9] části týkající se jiných než austenitických ocelí ($A < 30\%$). Zde následuje výpočet konkrétně pro teplotu 160°C .

mez kluzu $R_{p0,2/160^{\circ}\text{C}} = 181,6 \text{ MPa}$

$$f_d = \min\left(\frac{R_{p0,2,t}}{1,5}; \frac{R_{m,20}}{2,4}\right) \quad (6.2)$$

$$f_d = \min(120,7; 166,7 \text{ MPa})$$

$$f_d = 120,7 \text{ MPa}$$

Stanovení efektivního modulu pružnosti trubkovnice

Pro účel nahrazení skutečné trubkovnice, trubkovnicí neobsahující díry, byl určen efektivní modul pružnosti. Efektivní modul pružnosti je vypočtený dle normy ČSN 13445-3 [9].

$$l_{t,x} = 90 \text{ mm}$$

$$e = 130 \text{ mm}$$

$$D_0 = 1528 \text{ mm}$$

$$\frac{E_t}{E} = 1$$

$$\frac{f_t}{f} = 1$$

$$\rho = \frac{l_{t,x}}{130}$$

$$\rho = \frac{90}{130}$$

$$\rho = 0,6923$$

$$d^* = \max\left\{\left[d_1 - 2e_t \frac{E_t}{E} \frac{f_t}{f} \rho\right]; [d_t - 2e_t]\right\}$$

$$d^* = \max\{[20 - 2 * 2 * 1 * 1 * 0,6923]; [20 - 2 * 2]\} \text{ mm}$$

$$d^* = 17,23 \text{ mm}$$

$$p^* = \frac{p}{\sqrt{1 - \frac{4U_L}{\pi D_0}}}$$

$$p^* = \frac{26}{\sqrt{1 - \frac{4 * 70}{\pi * 1528}}} \text{ mm}$$

$$p^* = 28,8 \text{ mm}$$

$$\mu^* = \frac{p^* - d^*}{p^*}$$

$$\mu^* = \frac{28,8 - 17,23}{28,8} \text{ mm}$$

$$\mu^* = 0,4$$

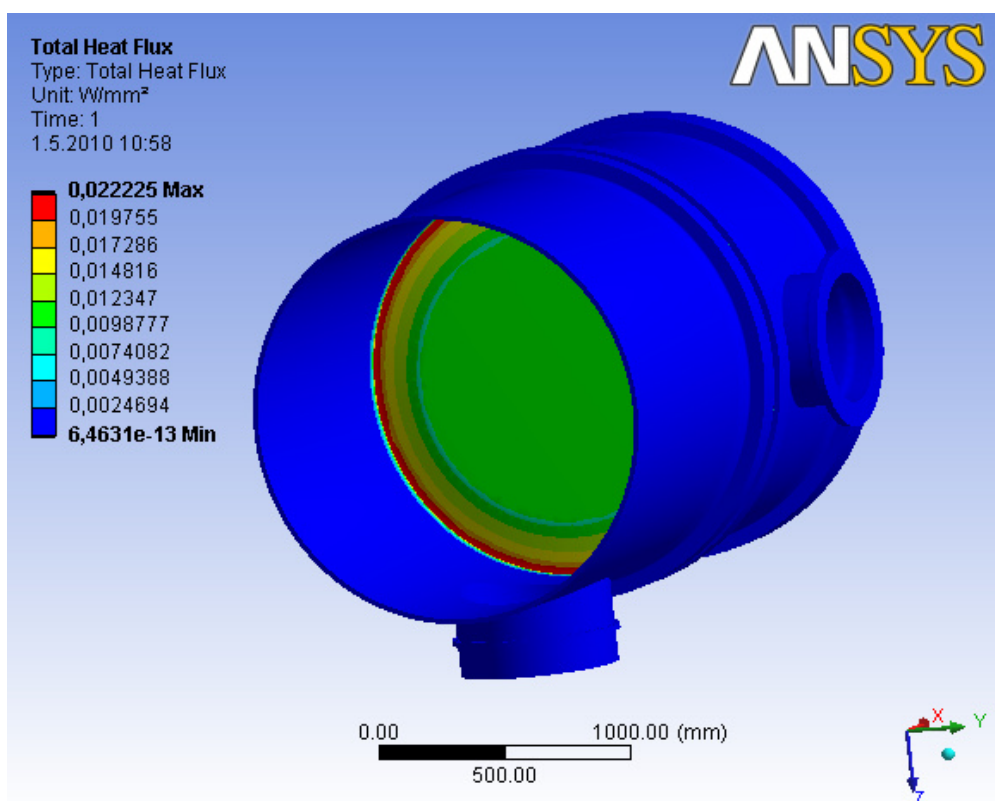
Této hodnotě odpovídá v normě pro trojúhelníkové uspořádání trubek $E^*/E = 0,41$.

6.2 Oblast hrdel trubkového svazku

Analýzovaný model se skládá z části pláště, dna, hrdel trubkového prostoru, z hrdla mezitrubkového prostoru a trubkovnice. Na hrdlo mezitrubkového prostoru je připojena část trubky, aby zohlednila porušení membránové napjatosti způsobeného silovým zatížením hrdla. Hrdla trubkového prostoru jsou zakončena přírubami. Materiál je korozivzdorná ocel ČSN 41 7247. Trubkovnice i víko jsou pevně namodelovány s pláštěm, je zanedbáno předpětí vyvolané šrouby přírub, které trubkovnici svírají. Trubkovnice také neobsahuje díry a trubky. Změna mechanických vlastností, které by jejich přítomnost vyvolala, je zohledněna vypočtením efektivního modulu pružnosti trubkovnice.

Výpočtový způsob I

Model vytvořený v programu SolidWorks byl importován do programu ANSYS Workbench. Byla vytvořena síť s rozměry prvků 50 mm. Byl zadán modul pružnosti pro celý model, kromě trubkovnice, kde byl použit efektivní modul pružnosti. Poissonova konstanta měla hodnotu 0,3. Bylo vloženo teplotní zatížení. Na otevřenou část modelu působí výpočtová teplota mezitrubkového prostoru (160°C), na část uzavřenou víkem výpočtová teplota trubkového prostoru (60°C). Tepelný tok je na obrázku 6.1.



Obr. 6.1 Tepelný tok v oblasti hrdel trubkového svazku – výpočtový způsob I

Dále bylo zadáno statické zatížení a uchycení modelu. Zatížení se skládalo z tlakového výpočtového zatížení a osových sil působících na hrdla. Aplikace těchto sil je nutná, neboť plocha hrdel je neuzavřená a není na ní zadán žádný tlak. Zadáním síly, která tomuto tlaku odpovídá přímo na průřez stěny hrdla (obr. 6.2) je působení tohoto tlaku zohledněno.

Výpočet sil působících na hrdla:

(6.3)

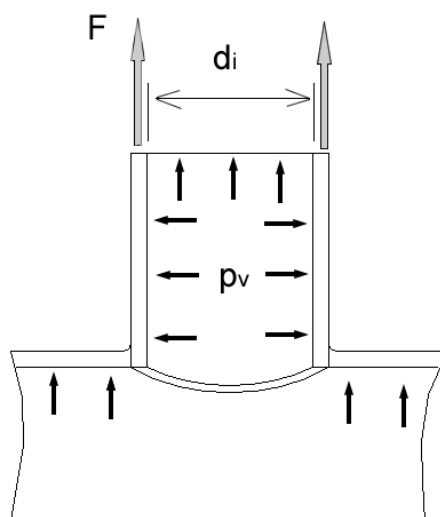
$$F = p_v \cdot \pi \cdot \frac{d_i^2}{4}$$

$$F_{1,2} = 0,9 \cdot \pi \cdot \frac{500^2}{4} N$$

$$F_{1,2} = 177 \text{ kN}$$

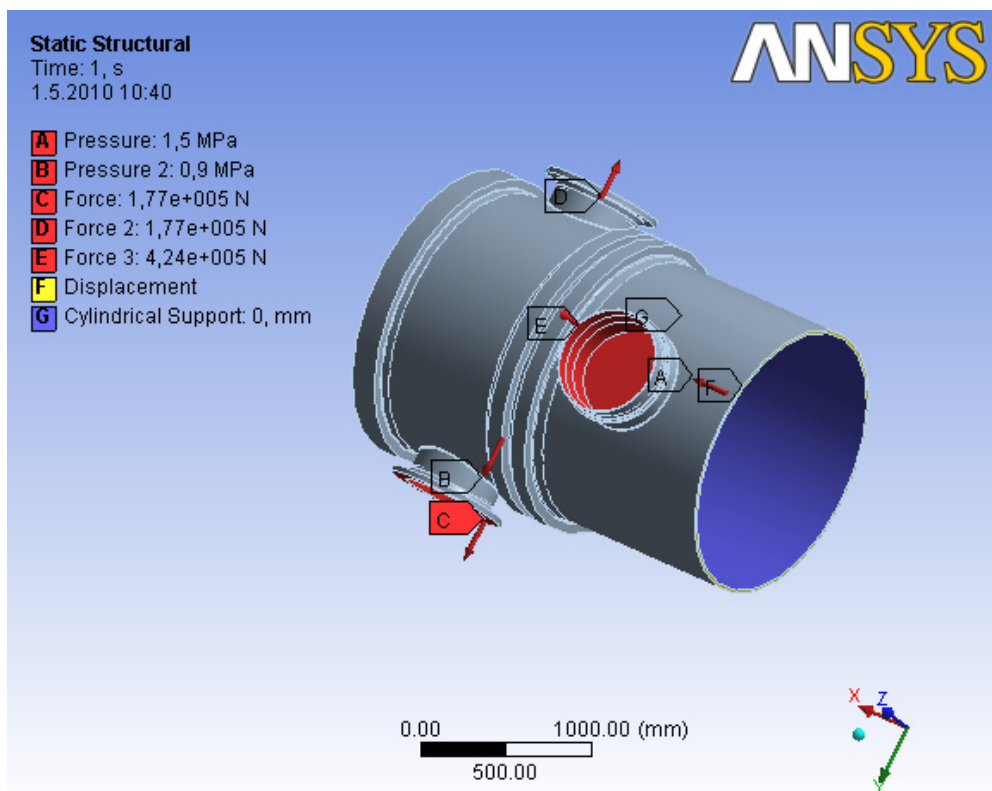
$$F_3 = 1,5 \cdot \pi \cdot \frac{600^2}{4} N$$

$$F_3 = 424 \text{ kN}$$



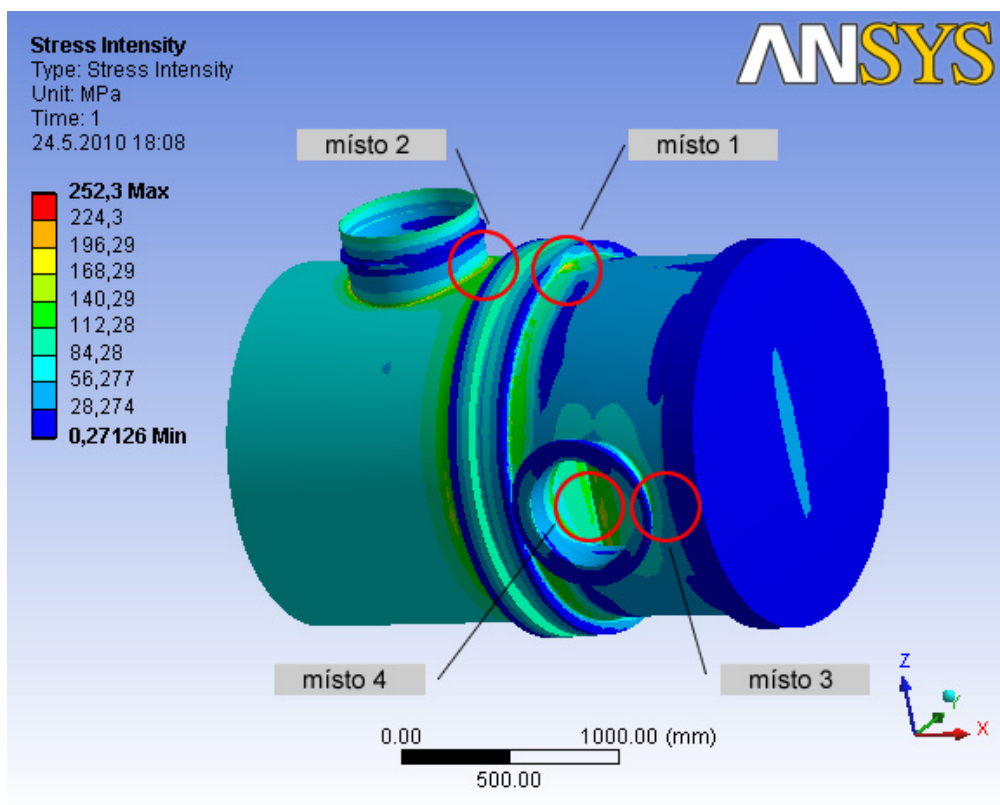
Obr. 6.2 Výpočet síly působící na hrdla

Na otevřenou část modelu, který je vidět vpravo na obr. 6.3, byl vložen výpočtový tlak pro mezitrubkový prostor (A), dovnitř levé části tlak pro trubkový prostor (B). Na konce hrdel pro trubkový svazek byla vložena síla 177 kN (C, D), na hrdlo mezitrubkového prostoru síla 424 kN (E). Modelu byl zamezen posuv ve směru osy x v průřezu otevřeného konce pláště (F) a také byl uchycen ve vnitřním povrchu otevřené části pláště válcovou okrajovou podmínkou s volnou deformací v axiálním a radiálním směru (G).



Obr. 6.3 Statické zatížení oblasti hrdel trubkového svazku – výpočtový způsob I

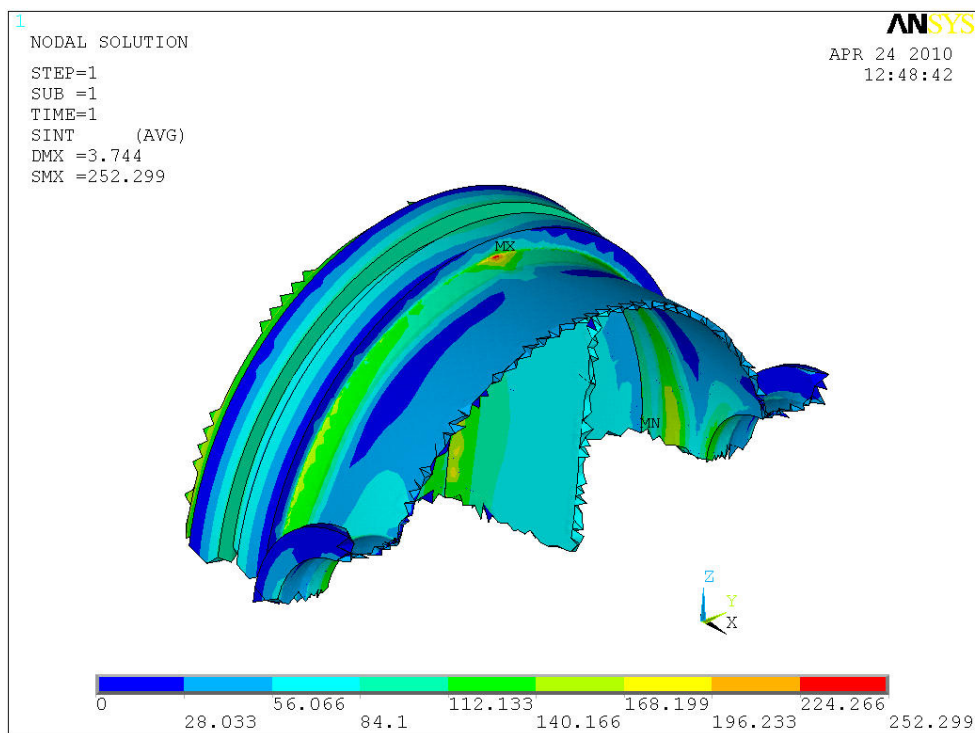
Výsledná intenzita napětí je na obr. 6.4. Na obrázku jsou zakroužkovaná místa s vyšším napětím, v kterých bylo detailně hodnoceno napětí.



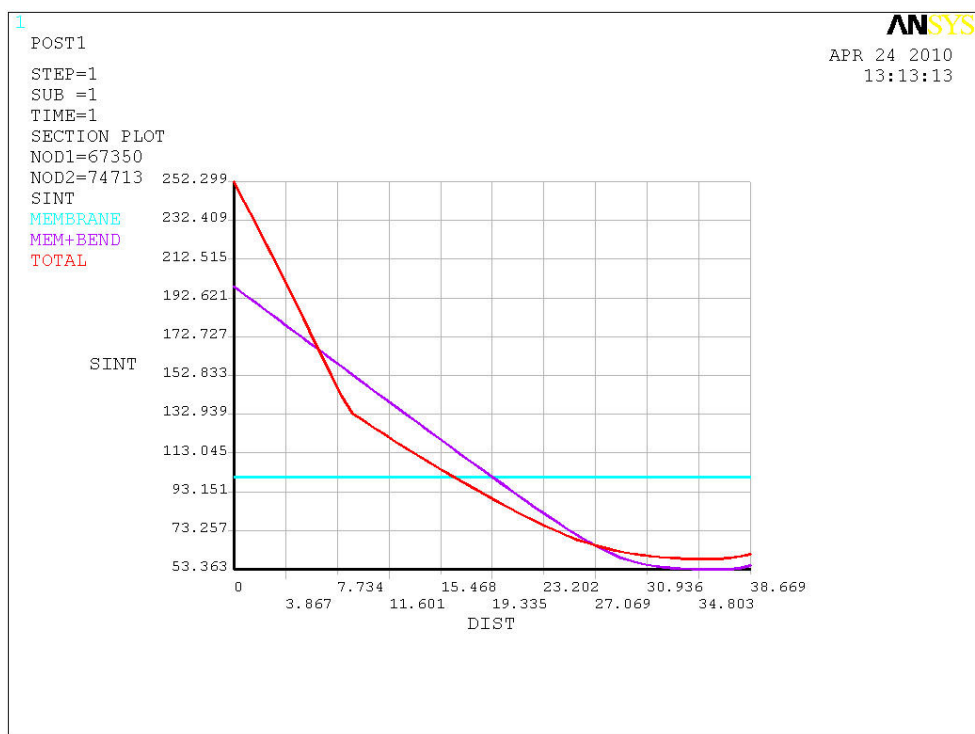
Obr. 6.4 Intenzita napětí v oblasti hrdel trubkového svazku – výpočtový způsob I

Místo 1

Nejvyšší intenzita napětí se nacházela v místě napojení pláště na trubkovnici a přepážku oddělující vtokový a výtokový prostor trubek (obr. 6.5). Vykreslení kategorizovaného napětí po tloušťce stěny je vidět na obr. 6.6.



Obr. 6.5 Intenzita napětí v místě napojení pláště na přepážku – výpočtový způsob I



Obr. 6.6 Napětí po tloušťce stěny v místě napojení pláště na přepážku – výpočtový způsob I

Maximální hodnota membránového σ_m a ohybového+membránového $\sigma_{mL}+\sigma_b$ (6.4) napětí byla srovnána s maximální hodnotou dovoleného napětí určenou pro plášť dle výpočtu 6.1.

$$\begin{aligned}\sigma_m &\leq f_D \\ \sigma_{mL} + \sigma_b &\leq 1,5f_D\end{aligned}\tag{6.4}$$

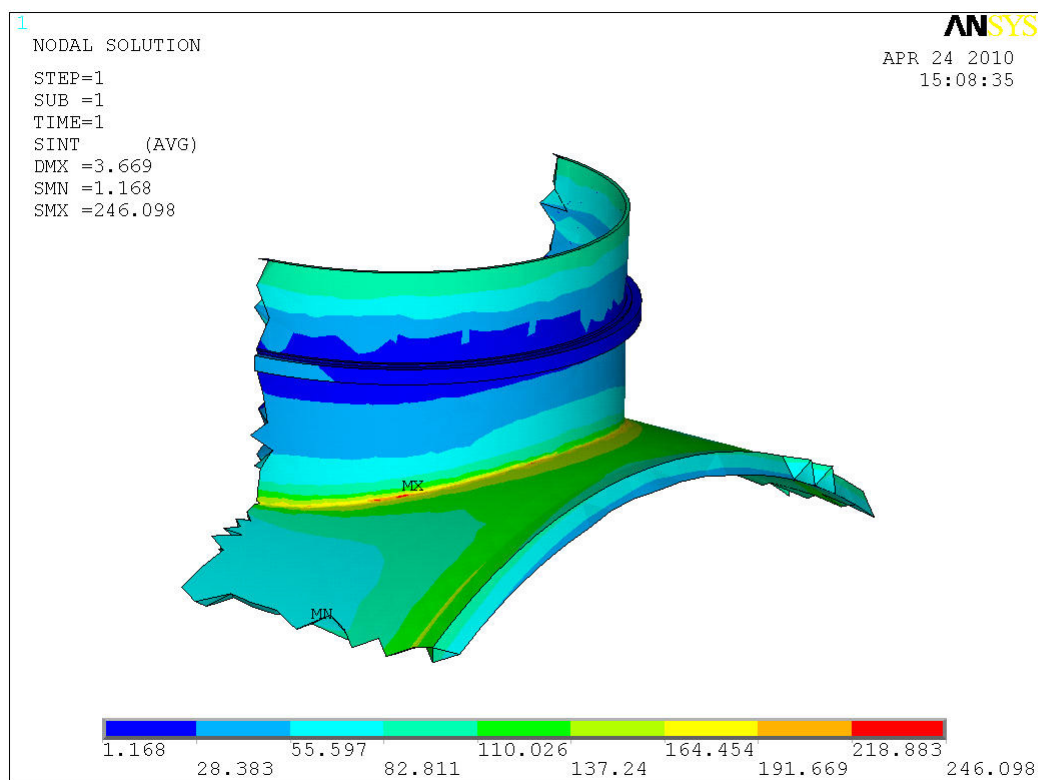
$$106 \text{ MPa} \leq 161,7 \text{ MPa}$$

$$200 \text{ MPa} \leq 251,6 \text{ MPa}$$

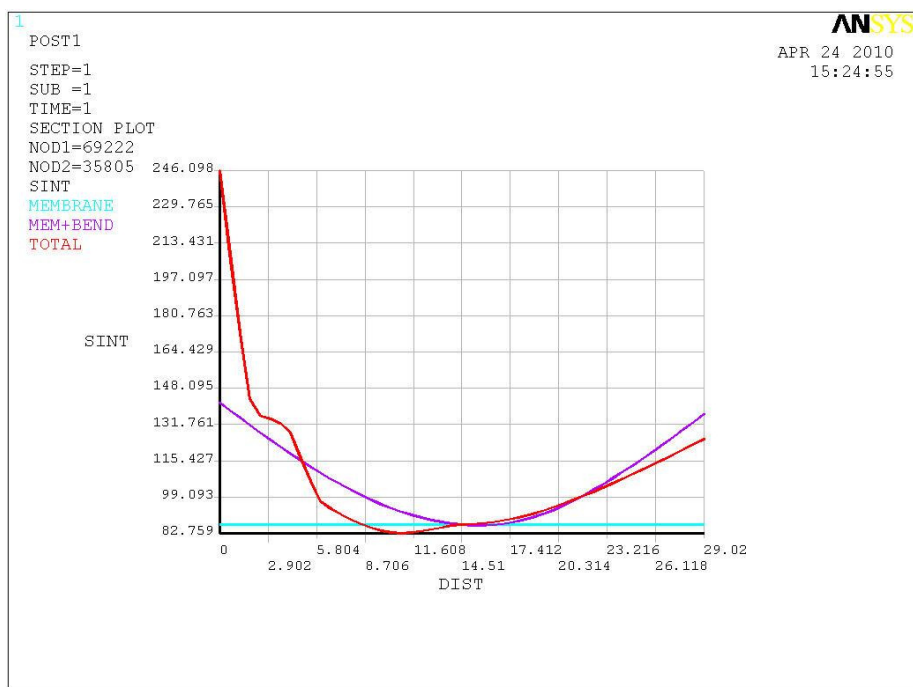
vyhovuje

Místo 2

Další silně namáhanou částí je napojení hrdla mezitrubkového prostoru na plášť (obr. 6.7). Napětí po tloušťce stěny je vykresleno na obr. 6.8.



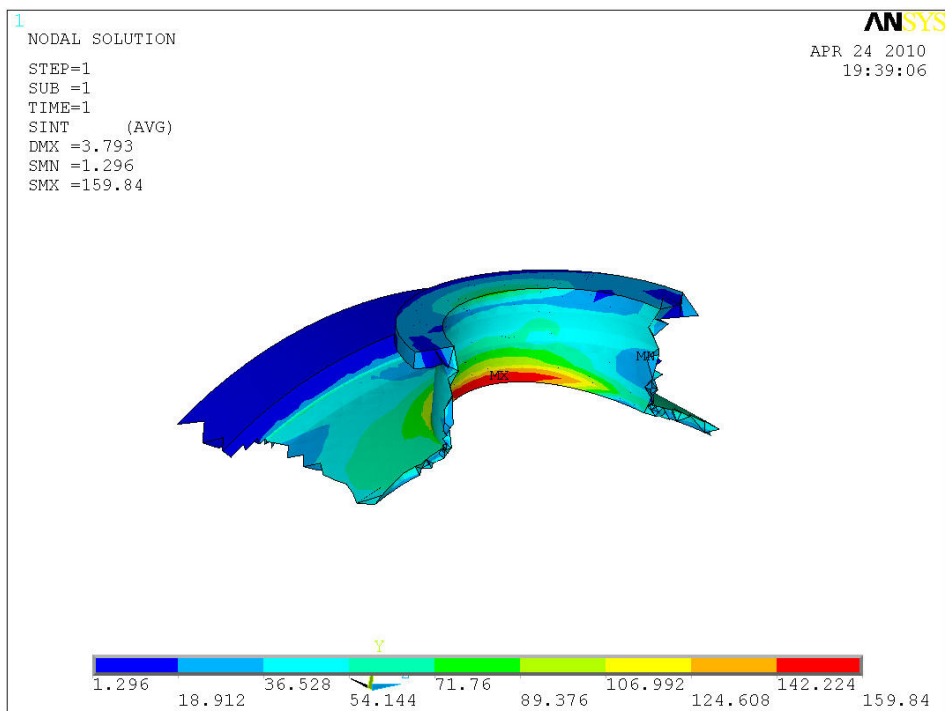
Obr. 6.7 Intenzita napětí v místě napojení hrdla mezitrubkového prostoru na plášť – výpočtový způsob I



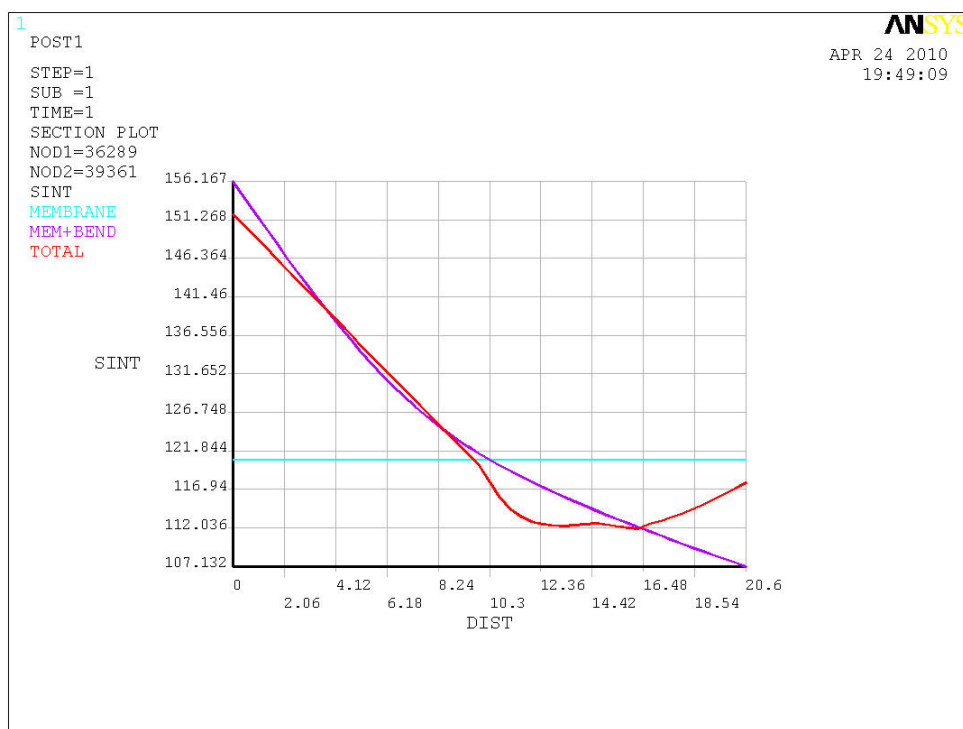
Obr. 6.8 Napětí po tloušťce stěny v místě napojení hrdla mezitrubkového prostoru na plášť - výpočtový způsob I

Místo 3

Dalším kritickým místem je napojení hrdla trubkového prostoru na plášť. V tomto místě byla intenzita napětí nejvyšší z vnitřní strany hrdla (obr. 6.9). Na obr. 6.10 je vidět výrazně nižší napětí než u hrdla mezitrubkového prostoru



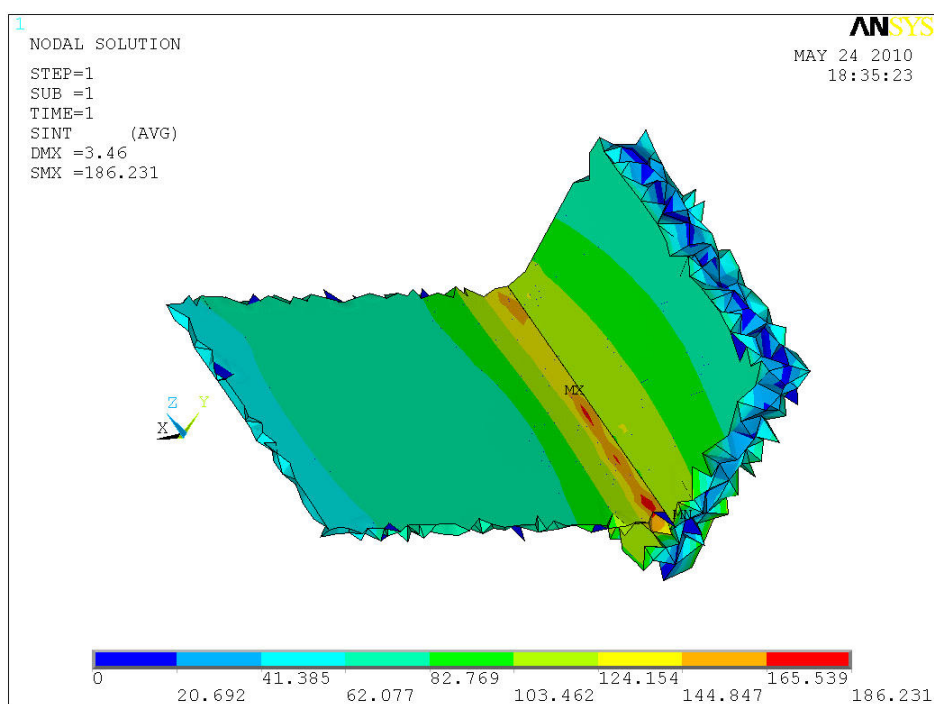
Obr. 6.9 Intenzita napětí v místě napojení hrdla trubkového prostoru na plášť -- výpočtový způsob I



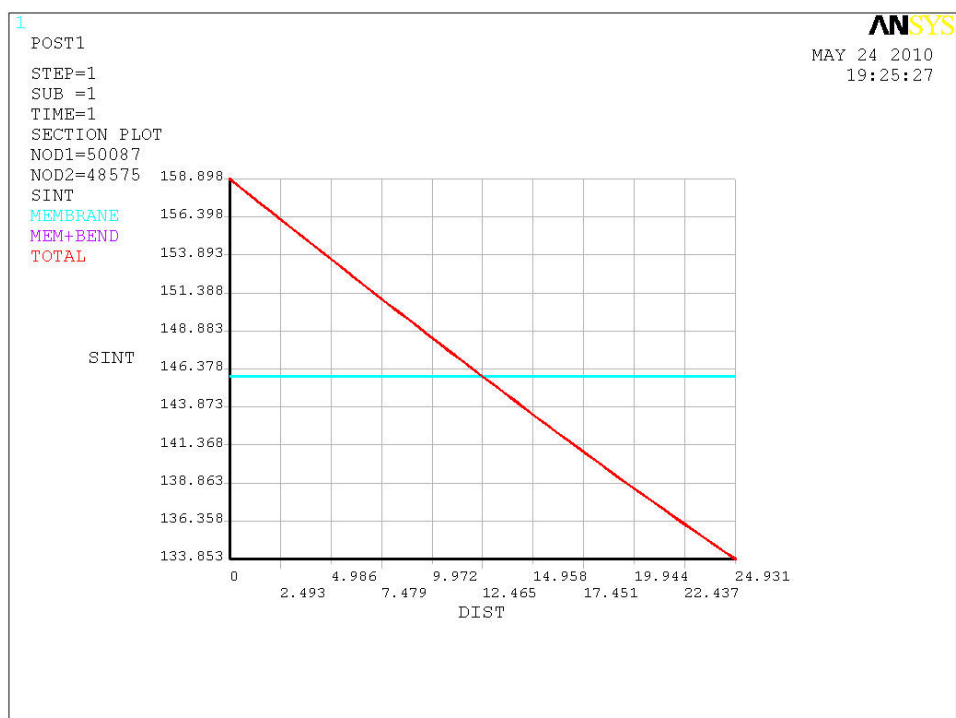
Obr. 6.10 Napětí po tloušťce stěny v místě napojení hrdla trubkového prostoru na plášť -- výpočtový způsob I

Místo 4

Jedná se o místo napojení přepážky na trubkovnici (obr. 6.11). Vyhodnocení kategorizovaného napětí v tomto místě je na obr. 6.12.



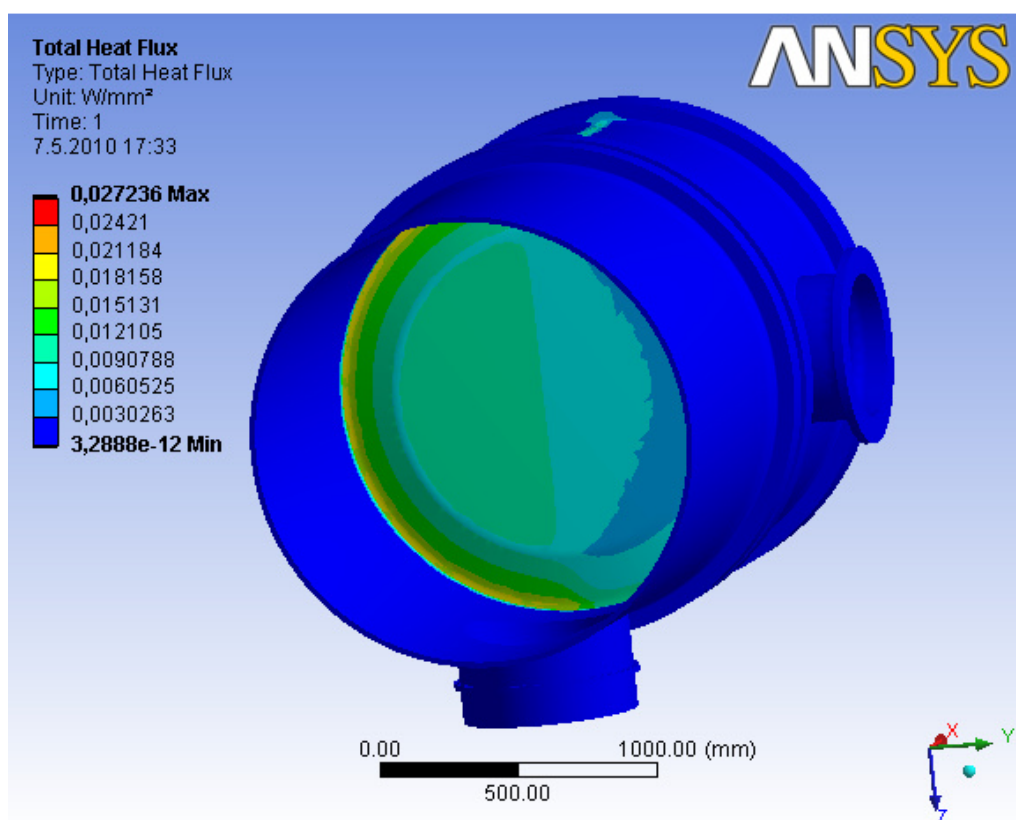
Obr. 6.11 Intenzita napětí v místě napojení přepážky na trubkovnici-- výpočtový způsob I



6.12 Napětí po tloušťce stěny v místě napojení přepážky na trubkovnici-- výpočtový způsob I

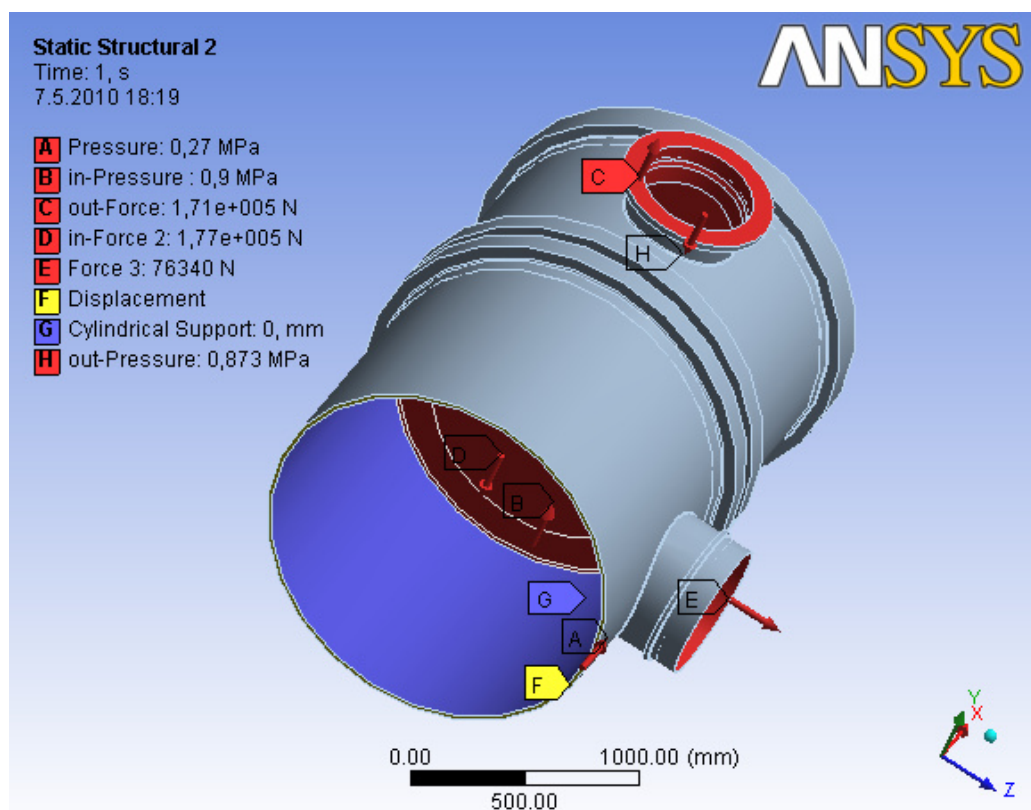
Výpočtový způsob II

Byl použit stejný model (včetně sítě) se shodnými materiálovými vlastnostmi. Hlavními rozdíly oproti výpočtovému způsobu I jsou difference teplot na vstupu (33°C) a na výstupu (71°C) trubkového prostoru a vložení součinitelů přestupu tepla na plochy v této oblasti. Zadáním rozdílných teplot na blízké oblasti se dá očekávat nárůst napětí způsobeného tepelným zatížením. Součinitele přestupu tepla fungují jako tepelný odpor. Na výstupu je také snížen tlak o hodnotu tlakové ztráty. Mezitrubkový prostor je zatížený jedinou teplotou (125°C) a provozním tlakem pouze 0,27 MPa. V praxi jsou běžně používány doporučené hodnoty součinitelů přestupu tepla pro jednotlivé části výměníků a průtoky. Pro mezitrubkový prostor byla použita hodnota $8200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Výsledný tepelný tok je vidět na obr. 6.13.



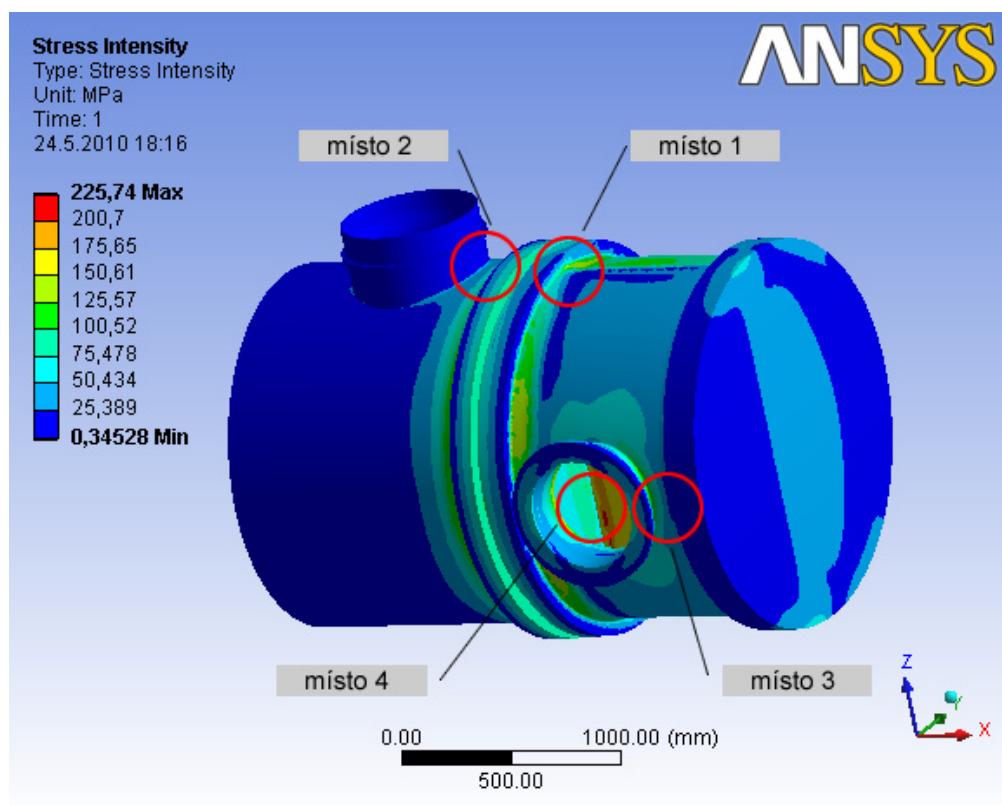
Obr. 6.13 Tepelný tok v oblasti hrdel trubkového svazku – výpočtový způsob II

Obr. 6.14 znázorňuje statické zatížení při použití výpočtového způsobu II. Tlakovému zatížení mezitrubkového prostoru (A) odpovídá silové působení na hrdlo 76340 N (E). Tlak na vstupu a síla působící na hrdlo jsou shodné s výpočtovým způsobem I 0,9 MPa (B) a 177 kN (D). Tlak na výstupu má hodnotu 0,873 MPa (H), síla 171 kN (C). Uchycení modelu (F, G) zůstalo identické jako u výpočtového způsobu I.



Obr. 6.14 Statické zatížení oblasti hrdel trubkového svazku – výpočtový způsob II

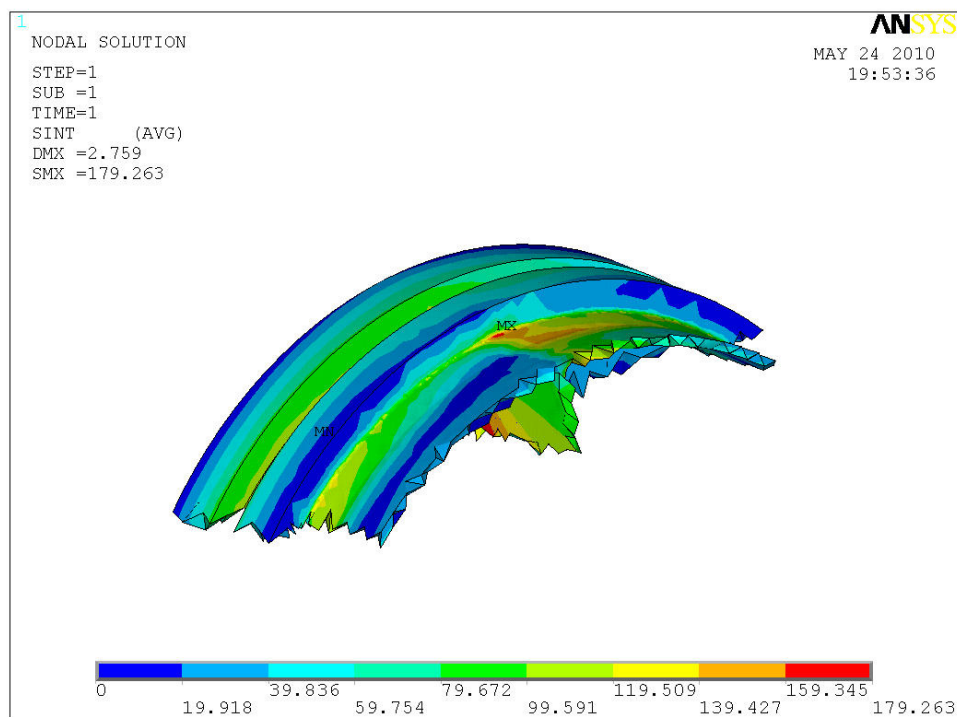
Obr. 6.15 znázorňuje výslednou intenzitu napětí, červeně je opět zakroužkováno místo s nejvyšší intenzitou napětí.



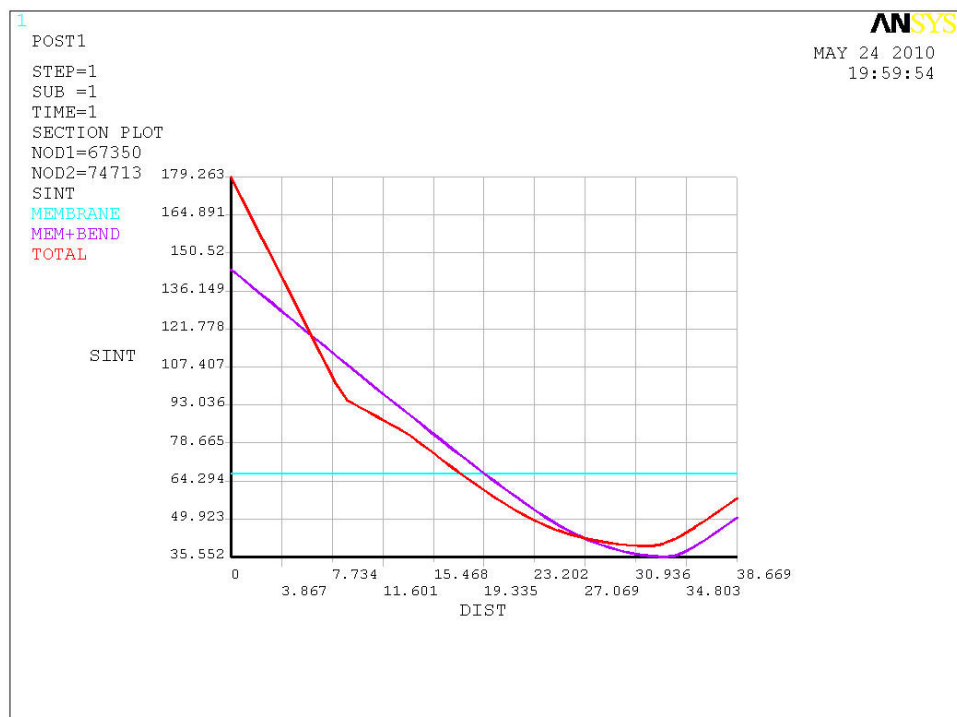
Obr. 6.15 Intenzita napětí v oblasti hrdel trubkového svazku – výpočtový způsob II

Místo 1

Obdobně i zde je vyhodnoceno napětí v místě napojení pláště na přepážku (obr. 6.16) a vykresleno kategorizované napětí (obr. 6.17).



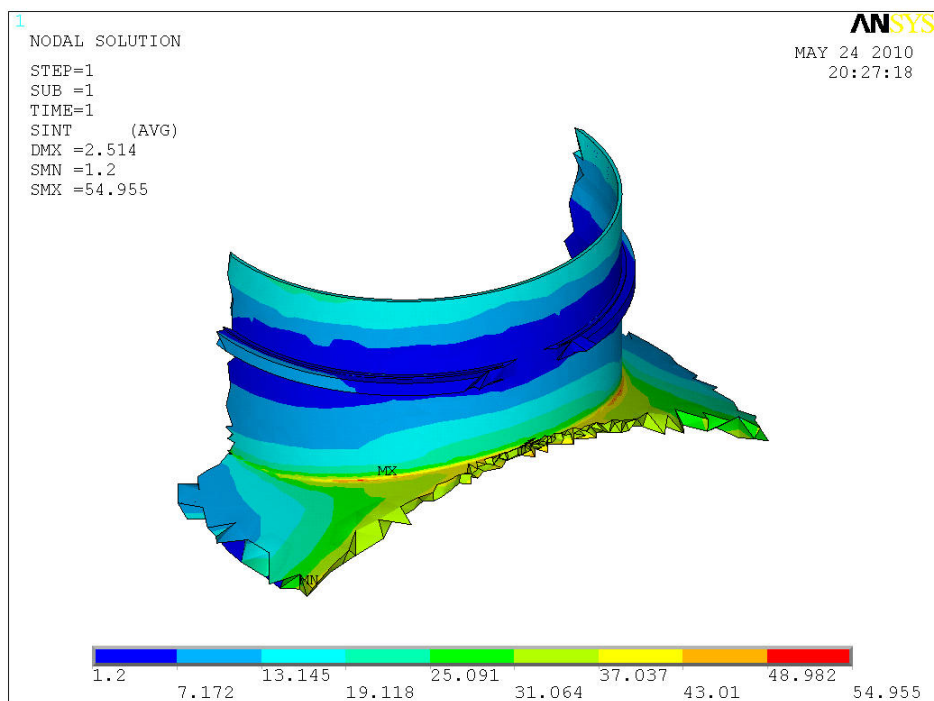
Obr. 6.16 Intenzita napětí v místě napojení pláště na přepážku – výpočtový způsob II



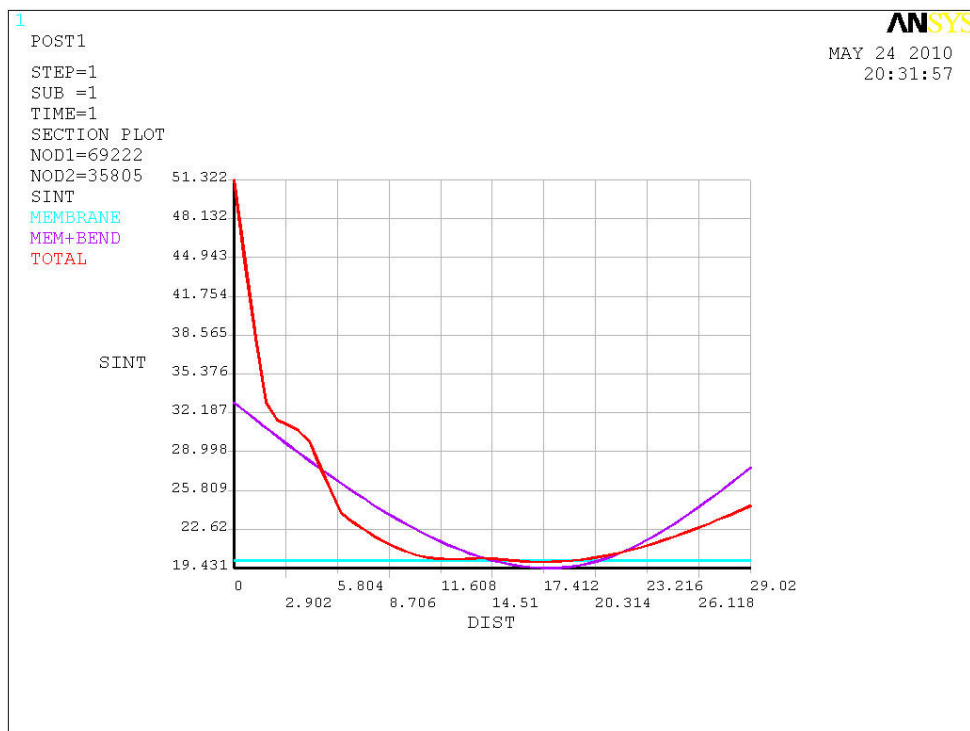
Obr. 6.17 Napětí po tloušťce stěny v místě napojení pláště na přepážku – výpočtový způsob II

Místo 2

Poměrně nízký tlak mezitrubkového prostoru se odrazil i na napětí v místě napojení hrdla na plášť (obr. 6.18). Napětí po tloušťce stěny je vykresleno na obr. 6.19.



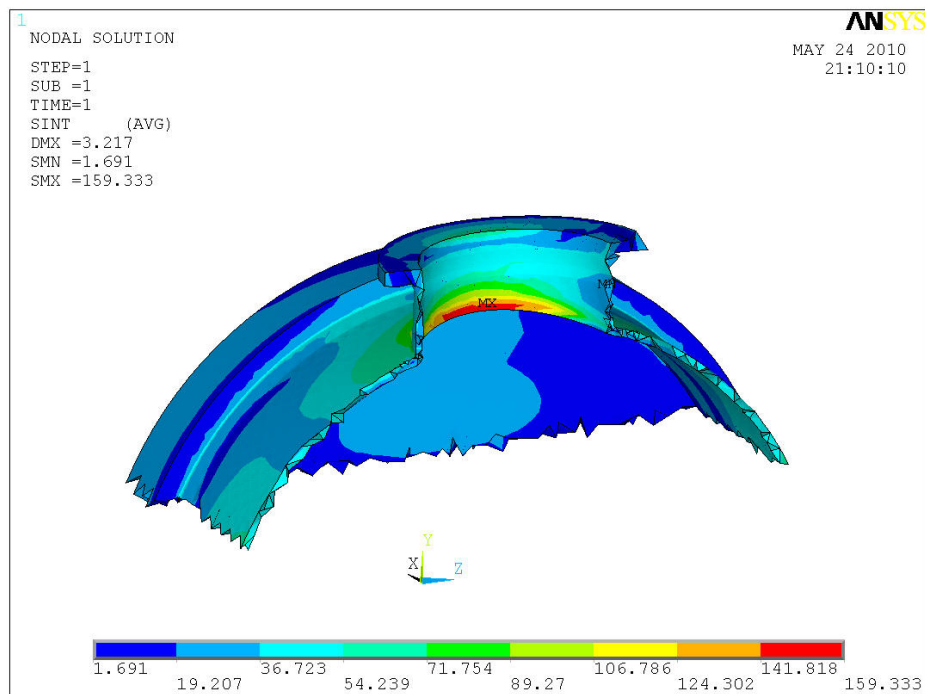
Obr. 6.18 Intenzita napětí v místě napojení hrdla mezitrubkového prostoru na plášť – výpočtový způsob II



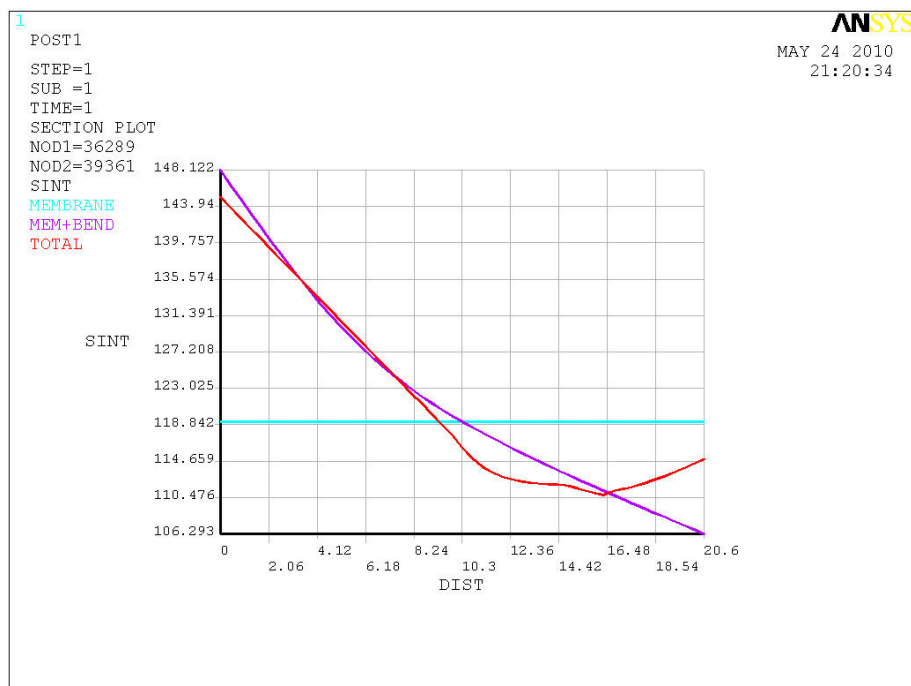
Obr. 6.19 Napětí po tloušťce stěny v místě napojení hrdla mezitrubkového prostoru na plášť – výpočtový způsob II

Místo 3

V místě napojení hrdla trubkového prostoru na plášť byla intenzita napětí pro výpočtový způsob II opět nejvyšší z vnitřní strany hrdla (obr. 6.20). Napětí po tloušťce stěny je na obr. 6.21.



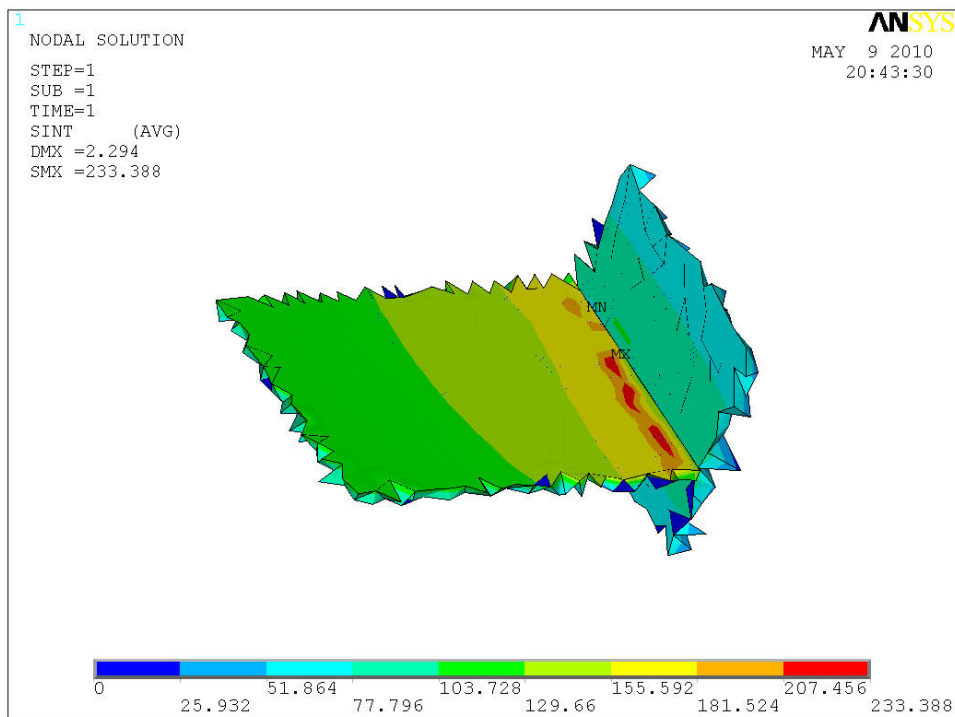
Obr. 6.20 Intenzita napětí v místě napojení hrdla trubkového prostoru na plášť – výpočtový způsob II



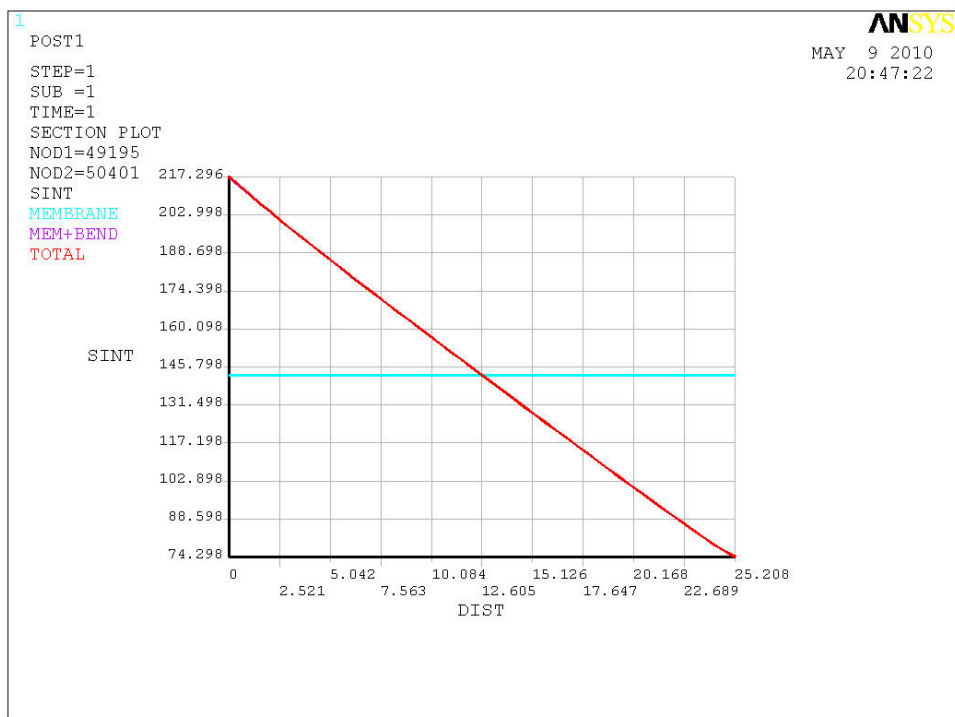
Obr. 6.21 Napětí po tloušťce stěny v místě napojení hrdla trubkového prostoru na plášť – výpočtový způsob II

Místo 4

Maximální hodnota napětí se nacházela v místě napojení přepážky na trubkovnici (obr 6.22). Obr. 6.23 ukazuje velikosti kategorizovaného napětí.



Obr. 6.22 Intenzita napětí v místě napojení přepážky na trubkovnici – výpočtový způsob II



6.23 Napětí po tloušťce stěny v místě napojení přepážky na trubkovnici – výpočtový způsob II

Maximální hodnota membránového σ_m a ohybového+membránového $\sigma_{mL} + \sigma_b$ napětí byla porovnána s maximální dovolenou mezí (rovnice 6.1).

$$\begin{aligned}\sigma_m &\leq f_D \\ \sigma_{mL} + \sigma_b &\leq 1,5f_D\end{aligned}\quad (6.5)$$

$$145 \text{ MPa} \leq 161,7 \text{ MPa}$$

$$218 \text{ MPa} \leq 251,6 \text{ MPa}$$

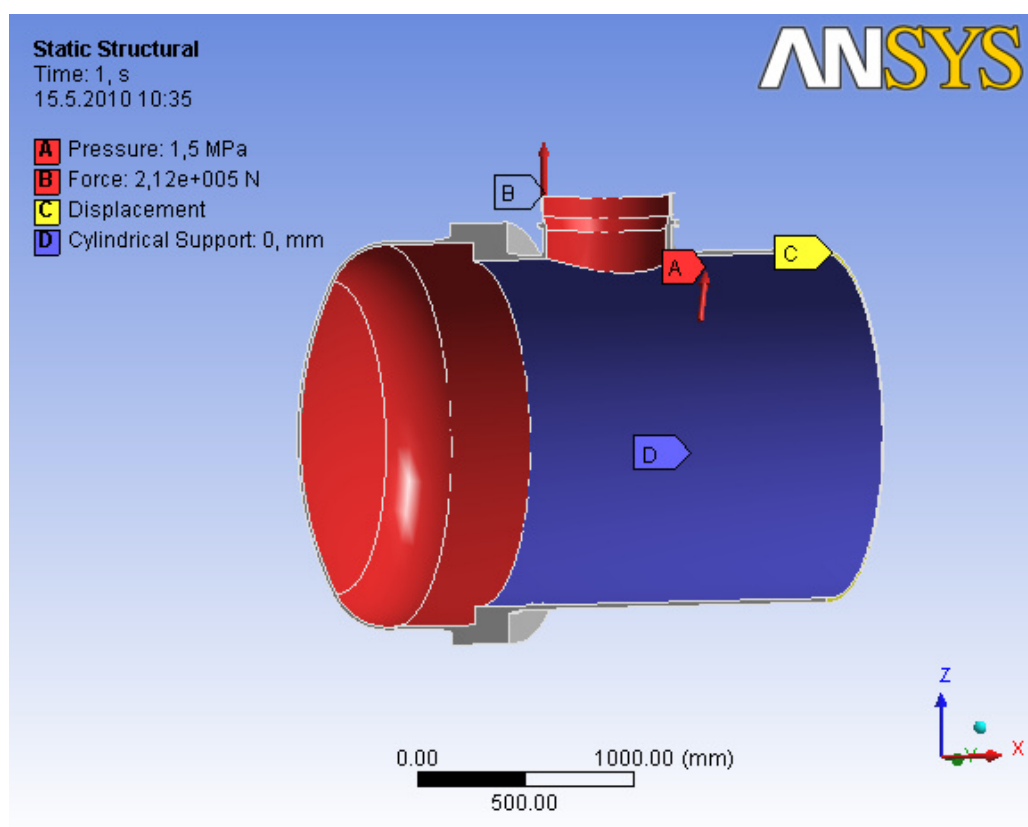
vyhovuje

6.3 Plášť v místě plovoucí hlavy

Model vznikl pevným spojením části pláště v místě plovoucí hlavy s víkem, opět tedy bylo zanedbáno šroubové spojení přírub. Materiálem je shodně ocel ČSN 41 7247. V této části se také nachází výtokové hrdlo mezitrubkového svazku. Na polovinu modelu části pláště je umístěna symetrie. Obdobně byla vytvořena síť, zadáno zatížení a uchycení jako na oblast hrdel trubkového svazku v kapitole 6.2.

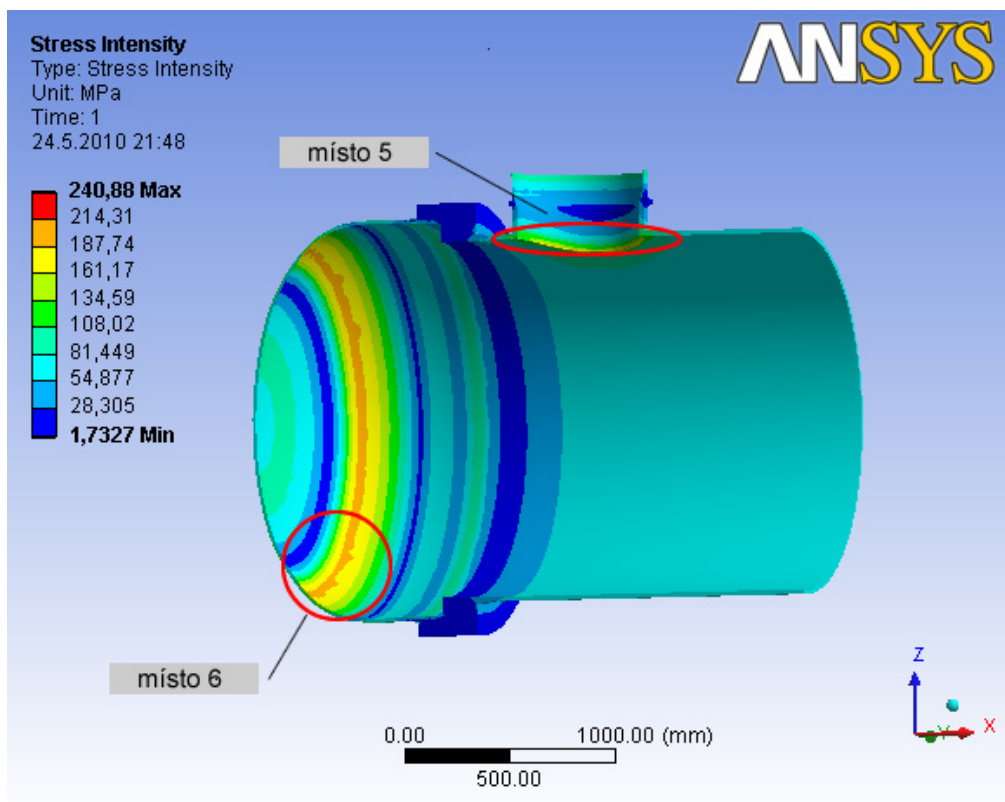
Výpočtový způsob I

Tento případ obsahuje pouze výpočtový tlak a teplotu mezitrubkového prostoru. Z použití jednotné teploty plyne i nepřítomnost tepelného toku. Neboť se jedná o poloviční model (obr. 6.24), síla působící na hrdlo byla vložena rovněž poloviční, tedy 212 kN.



Obr. 6.24 Statické zatížení pláště v oblasti plovoucí hlavy – výpočtový způsob I

Obr. 6.25 ukazuje výslednou intenzitu napětí.

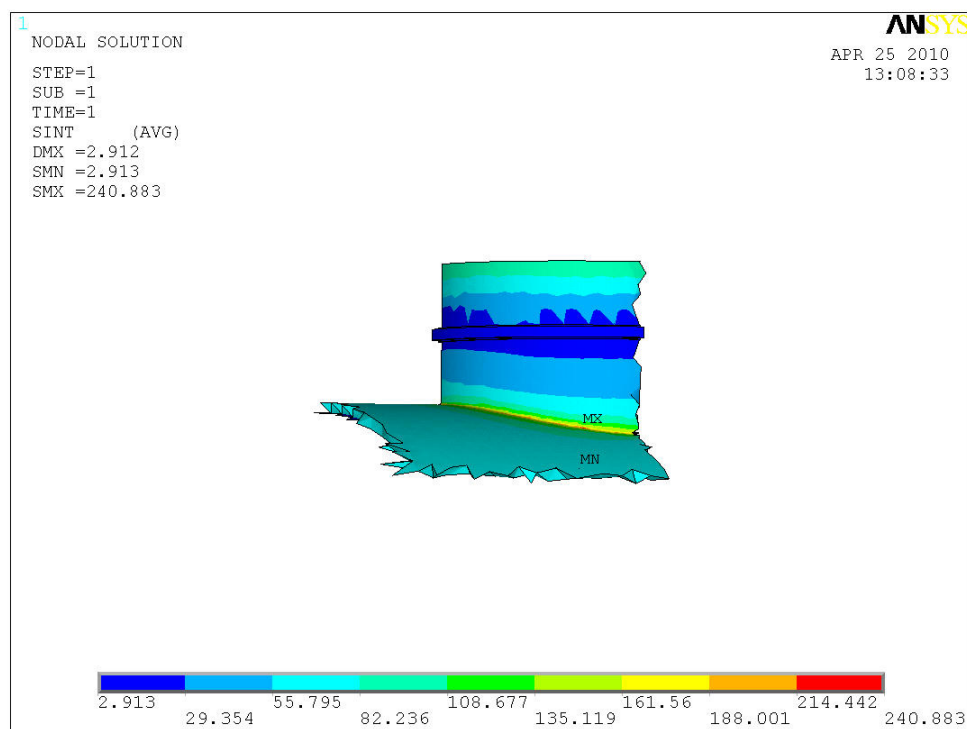


Obr.

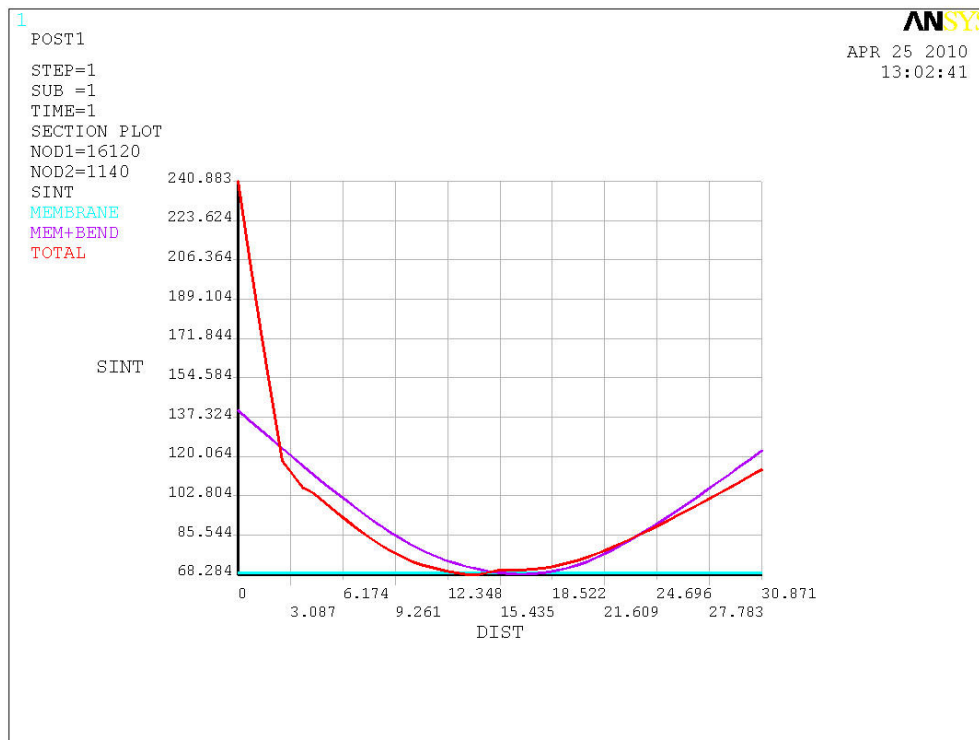
6.25 Intenzita napětí pláště v oblasti plovoucí hlavy – výpočtový způsob I

Místo 5

Nejvyšší intenzita napětí se nacházela v místě napojení hrdla na plášť (obr. 6.26), napětí po tloušťce stěny je na obr. 6.27.



Obr. 6.26 Intenzita napětí v místě napojení hrdla na plášť – výpočtový způsob I



Obr. 6.27 Napětí po tloušťce stěny v místě napojení hrdla na plášť – výpočtový způsob I

I zde byla maximální hodnota membránového σ_m a ohybového+membránového $\sigma_{mL} + \sigma_b$ napětí srovnána s maximální hodnotou dovoleného napětí vypočtenou pro plášť dle rovnice 6.1.

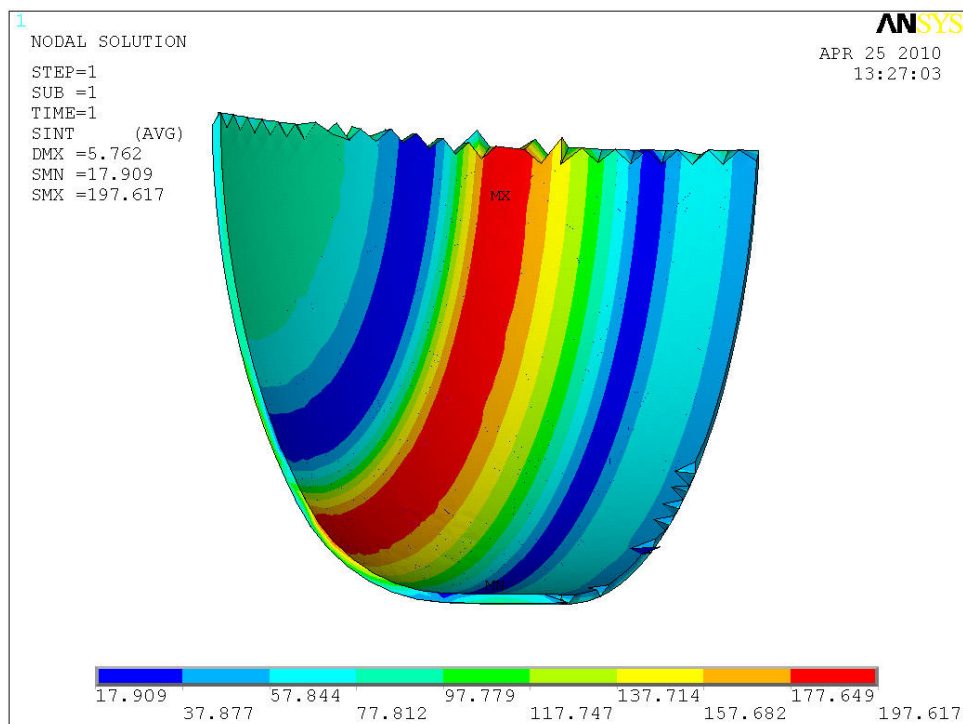
$$\begin{aligned} \sigma_m &\leq f_D \\ \sigma_{mL} + \sigma_b &\leq 1,5f_D \end{aligned} \quad (6.6)$$

$$\begin{aligned} 68 \text{ MPa} &\leq 161,7 \text{ MPa} \\ 139 \text{ MPa} &\leq 251,6 \text{ MPa} \end{aligned}$$

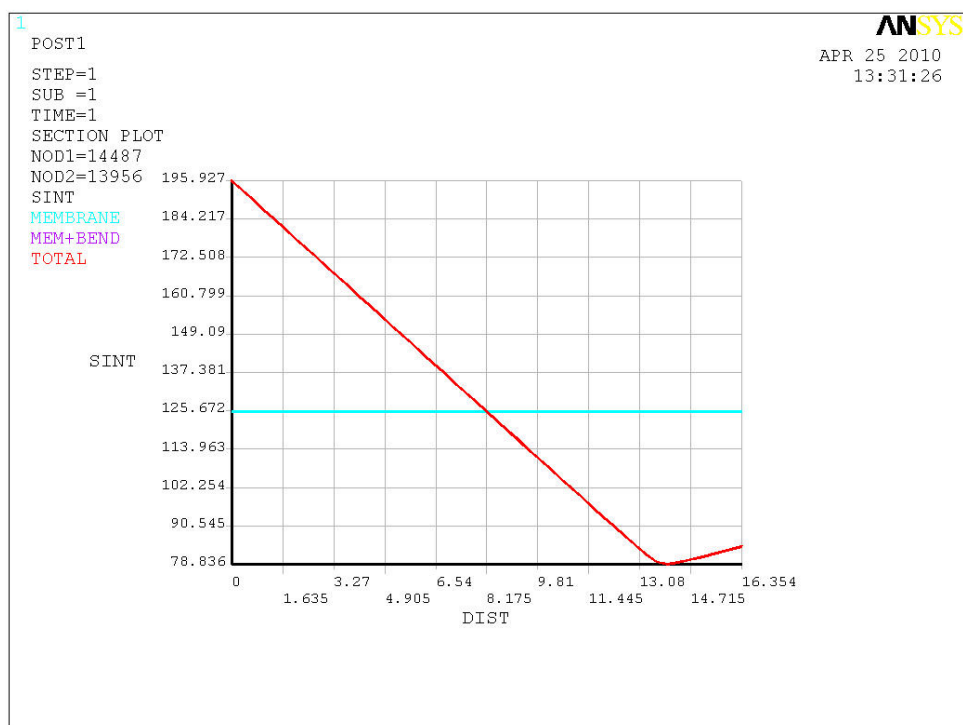
vyhovuje

Místo 6

Vysoké hodnoty napětí vykazovala i část víka (obr. 6.28). I zde byla provedena analýza napětí po tloušťce stěny (obr. 6.29).



Obr. 6.28 Intenzita napětí v části víka – výpočtový způsob I



Obr. 6.29 Napětí po tloušťce stěny v části víka – výpočtový způsob I

Přestože celkové napětí je nižší než napětí v místě napojení hrdla na plášť, je hodnota membránového napětí téměř dvojnásobná. Je třeba i tuto část ověřit na bezpečnost. Hodnota membránového a ohybového+membránového napětí byla porovnána s dovolenou maximální hodnotou.

$$\sigma_m \leq f_D \quad (6.7)$$

$$\sigma_{mL} + \sigma_b \leq 1,5f_D$$

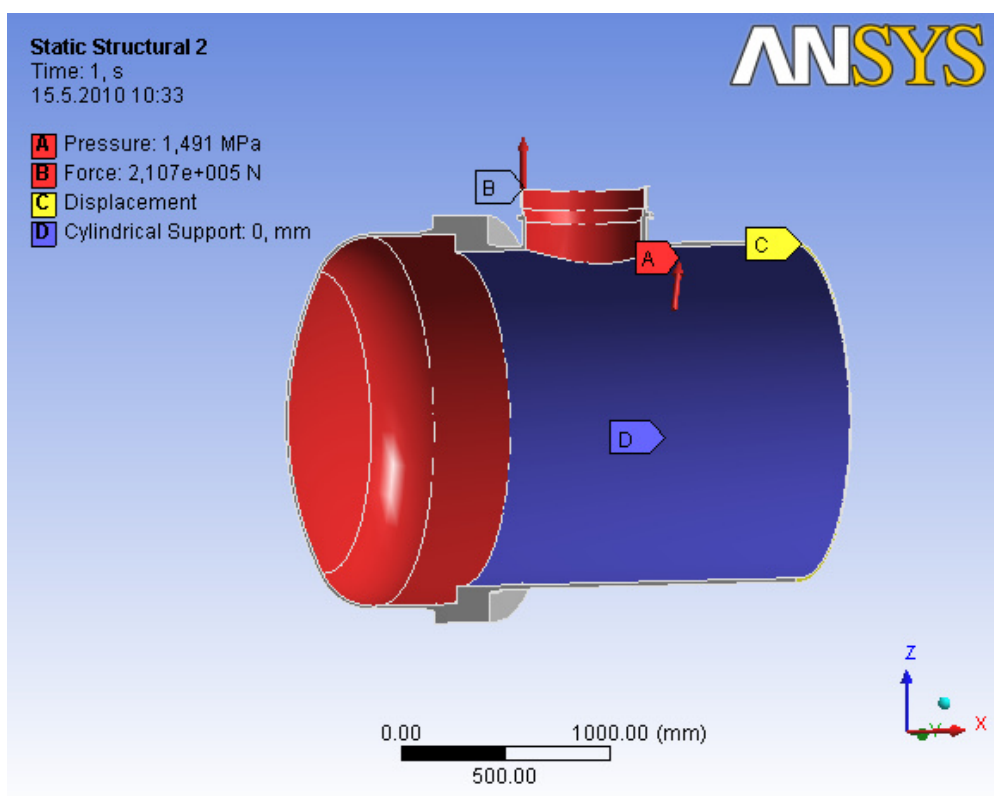
$$126 \text{ MPa} \leq 161,7 \text{ MPa}$$

$$196 \text{ MPa} \leq 251,6 \text{ MPa}$$

vyhovuje

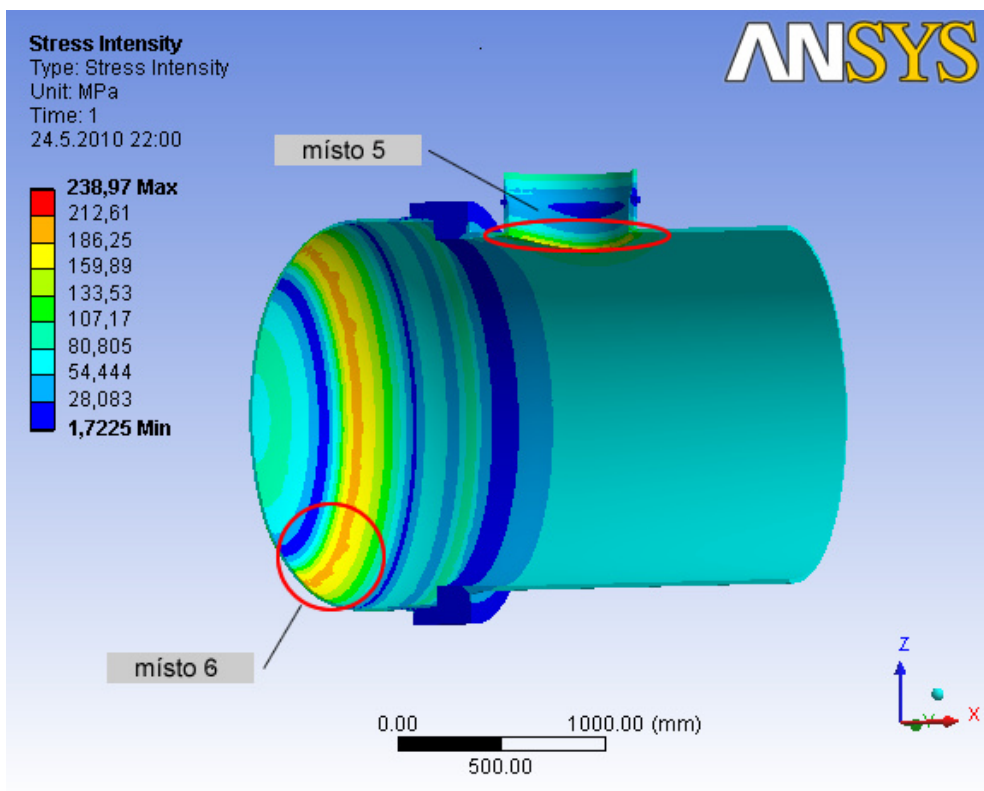
Výpočtový způsob III

Od maximálního tlaku mezitrubkového prostoru je odečtena tlaková ztráta. Díky tomu působí i o něco menší síla na hrdlo, než při aplikaci výpočtového tlaku. Teplota odpovídá teplotě chlazené vody na výstupu (49°C). Na plochy jsou vloženy součinitele přestupu tepla získané v kapitole 5.2, ovšem i zde se nachází jednotné teplotní zatížení, nelze tedy očekávat jejich velký vliv na výsledek pevnostní analýzy. Statické zatížení pláště je na obr. 6.30.



Obr. 6.30 Statické zatížení pláště v oblasti plovoucí hlavy svazku – výpočtový způsob III

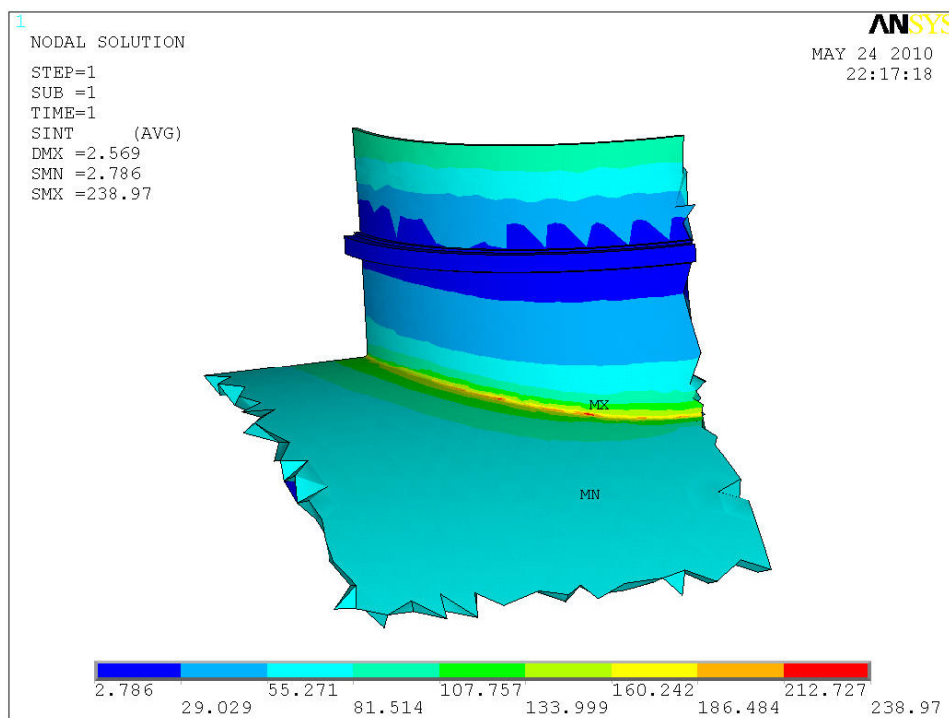
Výsledná intenzita napětí (obr. 6.31) téměř odpovídá intenzitě napětí výpočtového způsobu I. Mírnější zatížení se projevilo snížením maximální hodnoty napětí zhruba o 1,5 MPa. Distribuce napětí je prakticky identická.



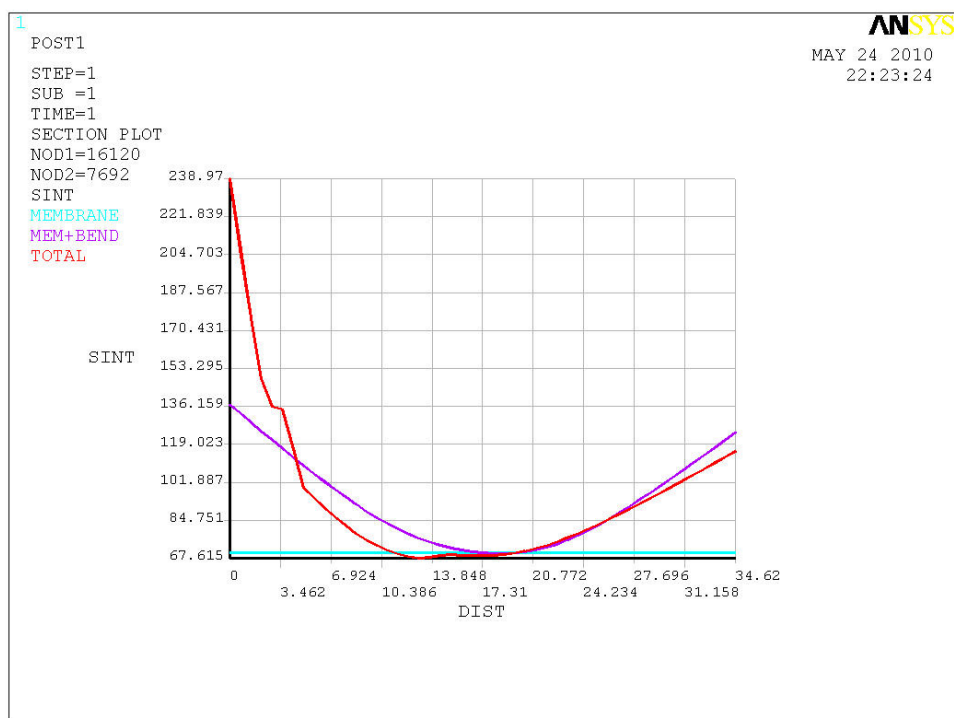
Obr. 6.31 Intenzita napětí pláště v oblasti plovoucí hlavy – výpočtový způsob III

Místo 5

Intenzita napětí v místě napojení hrdla na plášť (obr. 6.32) je téměř shodná jako při aplikaci výpočtového způsobu I, napětí po tloušťce stěny je na obr. 6.33.



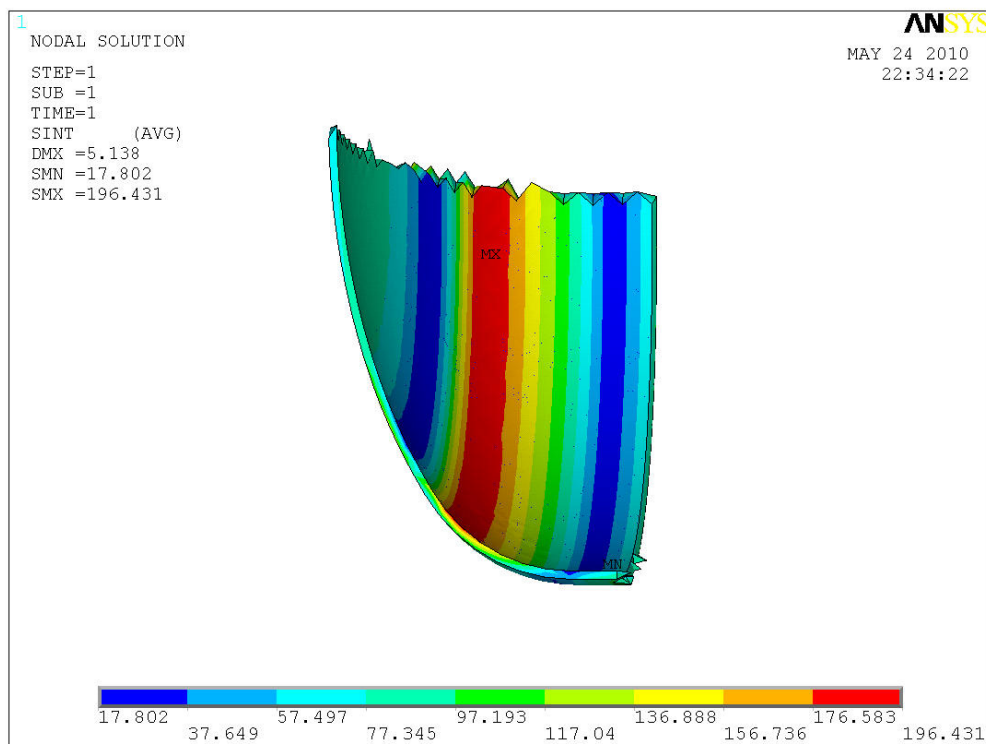
Obr. 6.32 Intenzita napětí v místě napojení hrdla na plášť – výpočtový způsob III



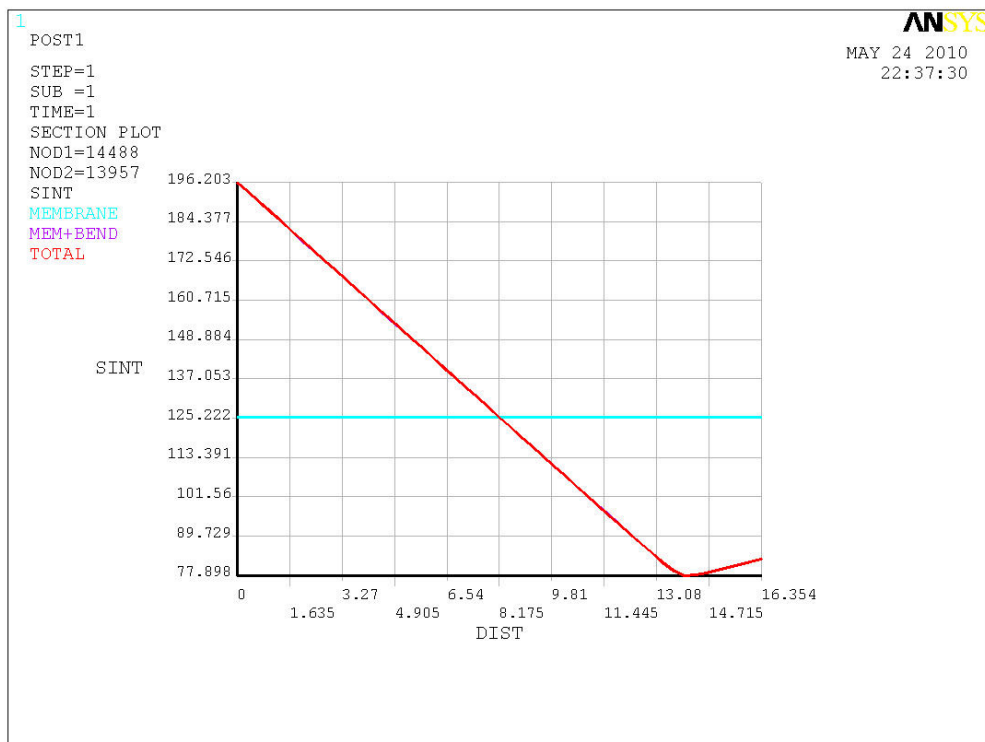
Obr. 6.33 Napětí po tloušťce stěny v části víka – výpočtový způsob III

Místo 6

Na obr. 6.34 je napětí v části víka, jeho průběh po tloušťce stěny na obr. 6.35



Obr. 6.34 Intenzita napětí v části víka – výpočtový způsob III



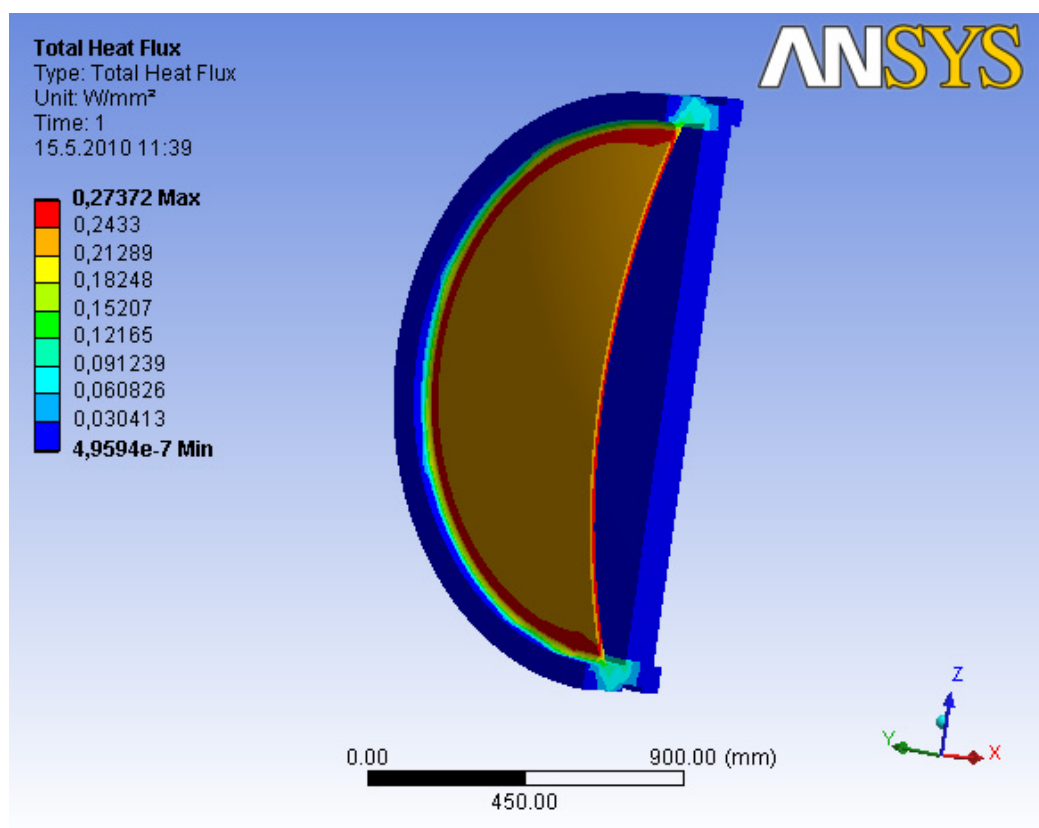
Obr. 6.35 Napětí po tloušťce stěny v části víka – výpočtový způsob III

6.4 Plovoucí hlava

Plovoucí hlava je vyrobena z nízkouhlíkové oceli obvyklých jakostí pro vyšší teploty ČSN 11 416, pouze trubkovnice je z oceli ČSN 41 7247. V analýze byl pro trubkovnici opět použit efektivní modul pružnosti.

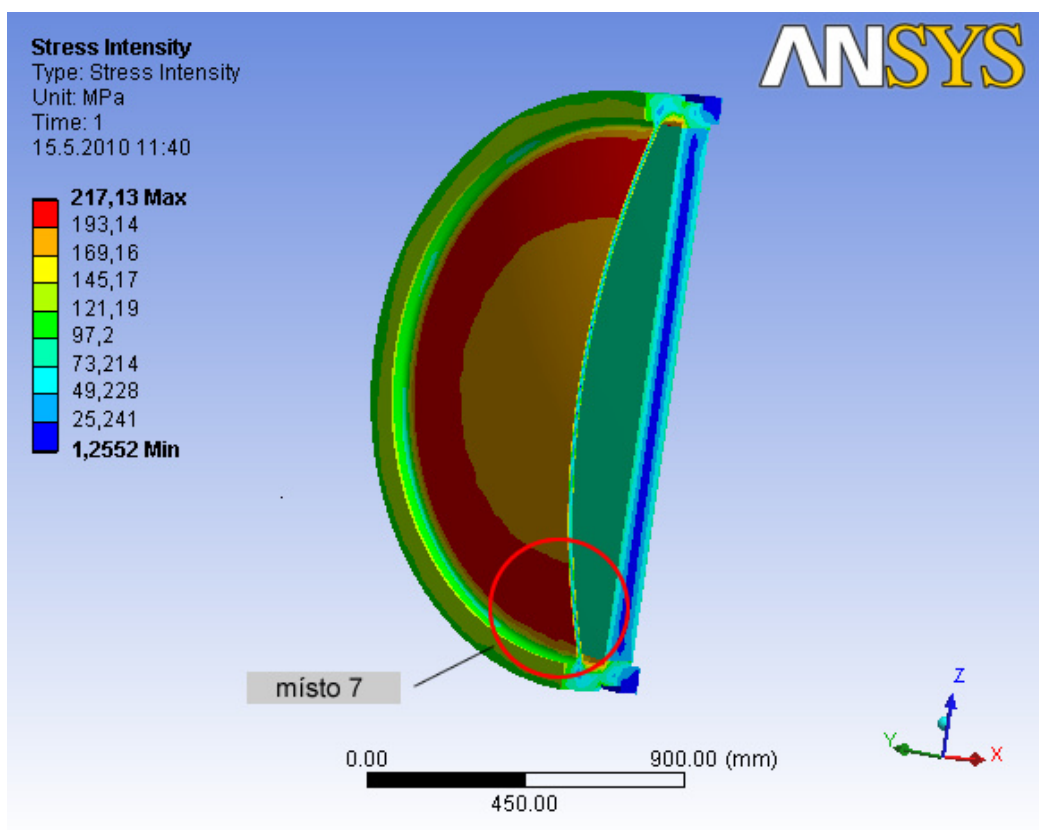
Výpočtový způsob I

Model byl zatížen pouze výpočtovou teplotou a tlakem. Vně plovoucí hlavy byly zadány hodnoty pro mezitrubkový prostor, dovnitř hodnoty pro trubkový prostor. Uchycení nebylo nutné. Na model byla opět zadána symetrie. Rozdílné teploty v bezprostřední blízkosti vytvářejí poměrně vysoký tepelný tok ve sférické části plovoucí hlavy (obr. 6.36)



Obr. 6.36 Tepelný tok plovoucí hlavy – výpočtový způsob I

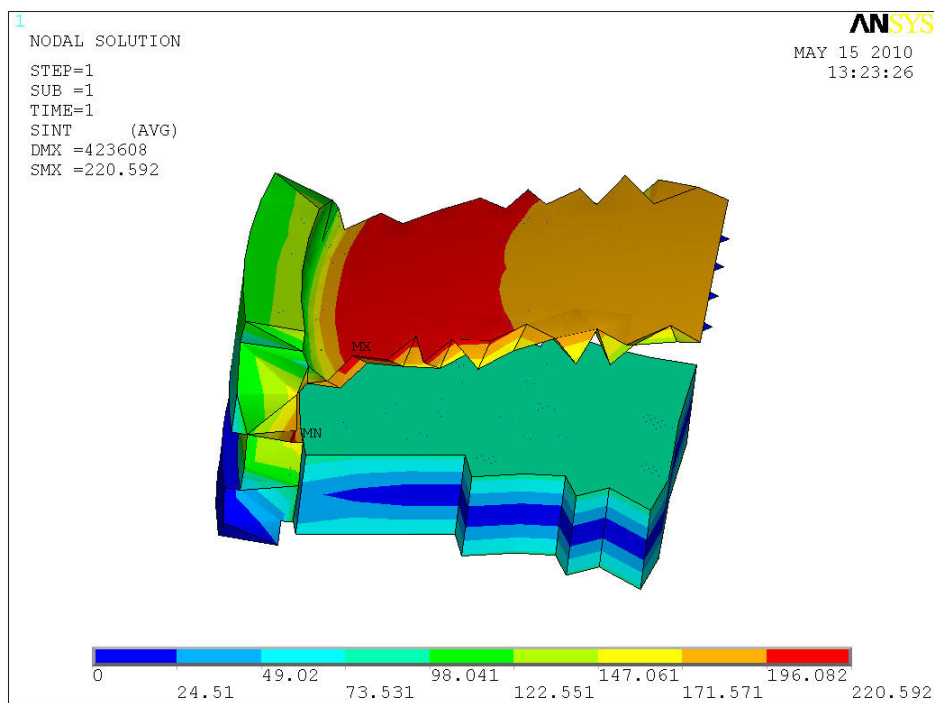
Výsledná intenzita napětí je na obr. 6.37.



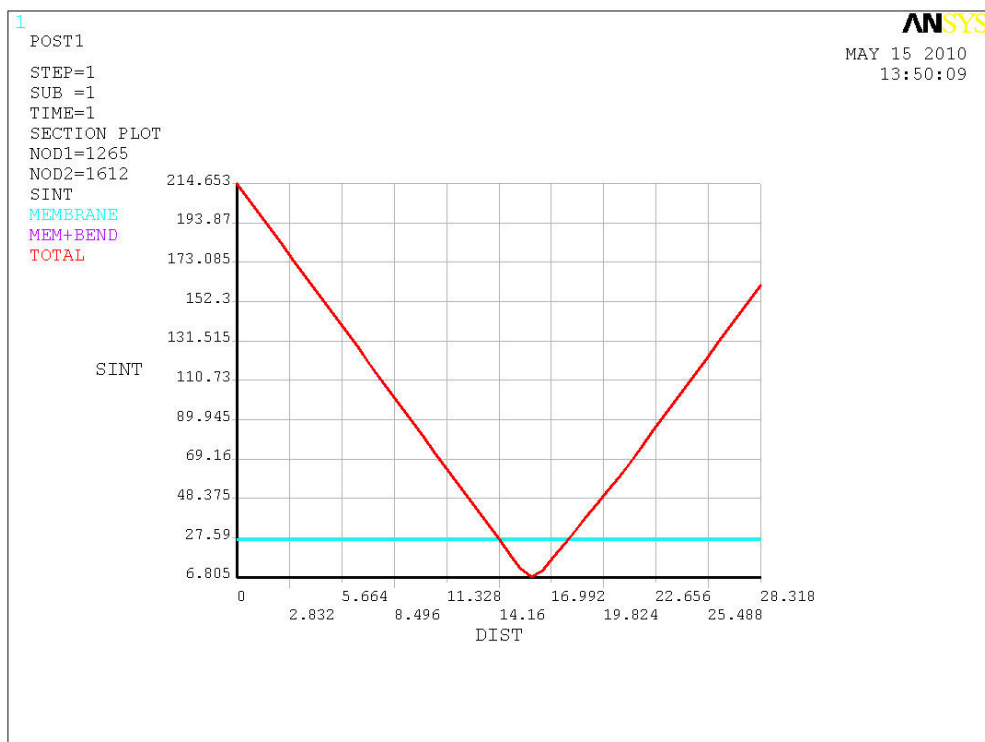
Obr. 6.37 Intenzita napětí plovoucí hlavy – výpočtový způsob I

Místo 7

Nejvyšší intenzita napětí se nacházela na vnější straně u přechodu obvodu a sférické části plovoucí hlavy (obr. 6.38). Napětí po tloušťce stěny znázorňuje obr. 6.39.



Obr. 6.38 Intenzita napětí v místě napojení obvodu na sférickou část – výpočtový způsob I



Obr. 6.39 Napětí po tloušťce stěny v místě napojení obvodu na sférickou část – výpočtový způsob I

Maximální složky napětí byly srovnány s maximální hodnotou dovoleného napětí určenou pro plovoucí hlavu při teplotě 160°C dle výpočtu 6.2.

$$\sigma_m \leq f_D \quad (6.8)$$

$$\sigma_{mL} + \sigma_b \leq 1,5f_D$$

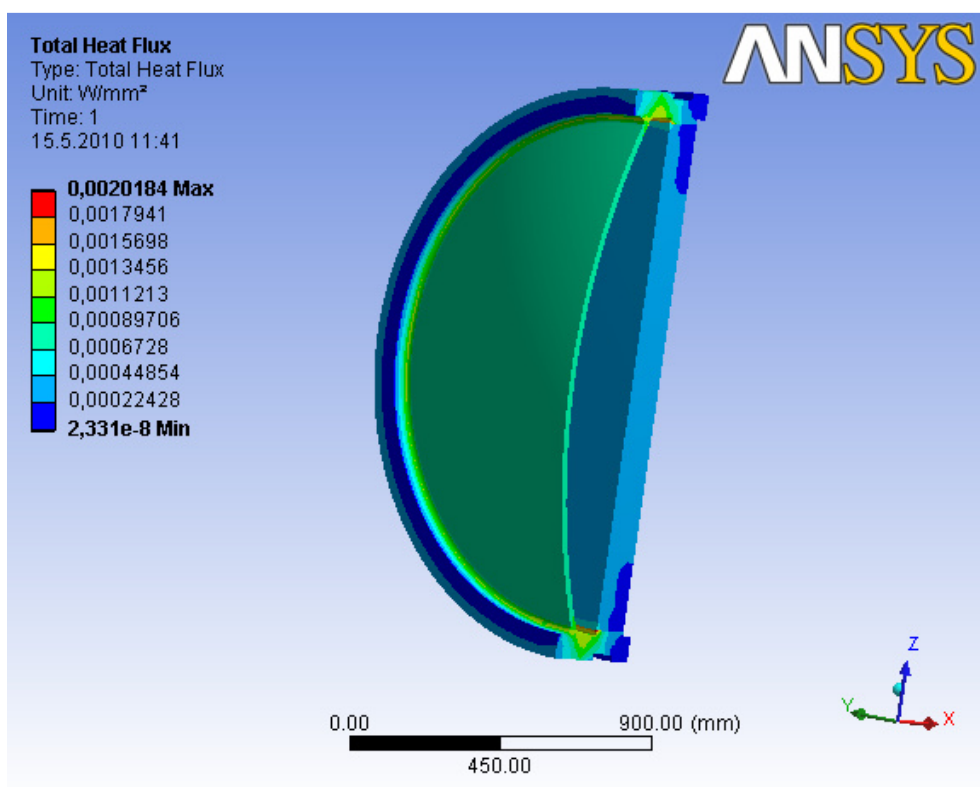
$$28 \text{ MPa} \leq 120,7 \text{ MPa}$$

$$215 \text{ MPa} \leq 181 \text{ MPa}$$

nevyhovuje

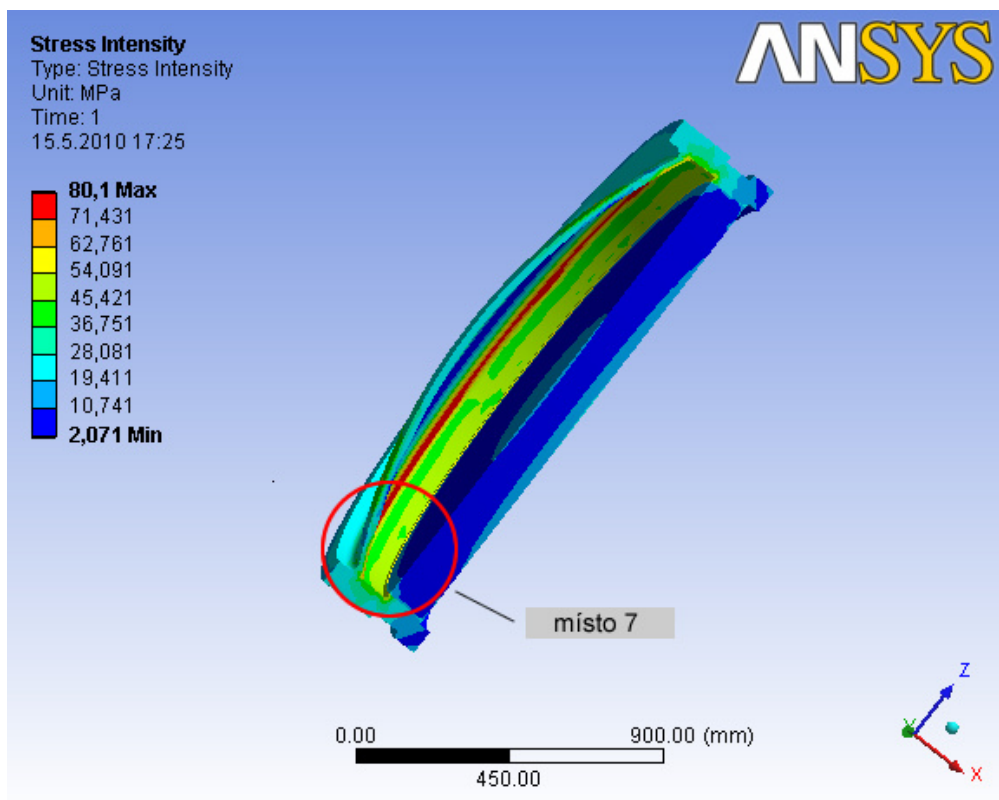
Výpočtový způsob III

Mezitrubkový tlak byl opět snížen o hodnotu tlakové ztráty na 1,491 MPa. Jelikož se plovoucí hlava nachází v polovině celkové délky trubkového prostoru je maximální hodnota jeho tlaku snížena o polovinu tlakové ztráty na 0,89 MPa. Teploty byly v místě plovoucí hlavy téměř vyrovnané, teplota mezitrubkového prostoru měla hodnotu přibližně 49°C, teplota trubkového prostoru byla 47°C. Součinitelé přestupu tepla z kapitoly 5.2 byly také zadány na příslušné plochy. Na obr. 6.40 je vidět poměrně malý výsledný tepelný tok.



Obr. 6.40 Tepelný tok plovoucí hlavy – výpočtový způsob III

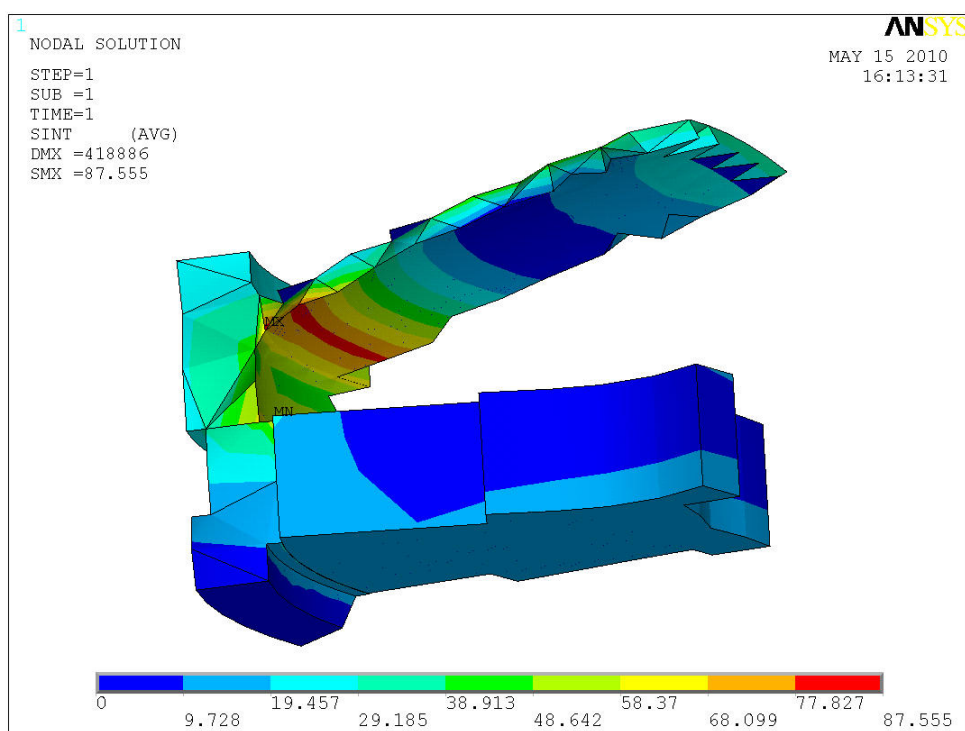
Minimální teplotní zatížení se významně podepsalo na intenzitě napětí plovoucí hlavy (obr. 6.41).



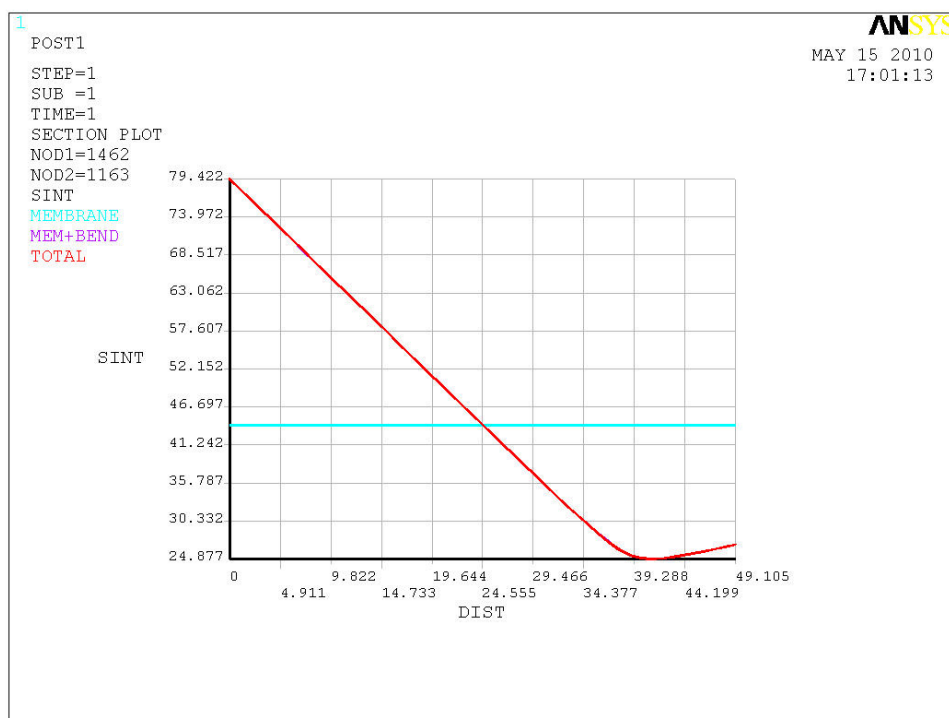
Obr. 6.41 Intenzita napětí plovoucí hlavy – výpočtový způsob III

Místo 7

Nejvyšší intenzita napětí se nachází na vnitřní straně u přechodu obvodu a sférické části plovoucí hlavy (obr. 6.42). Napětí po tloušťce stěny v tomto místě se nachází na obr. 6.43.



Obr. 6.42 Intenzita napětí v místě napojení obvodu na sférickou část – výpočtový způsob III



Obr. 6.43 Napětí po tloušťce stěny v místě napojení obvodu na sférickou část – výpočtový způsob III

Maximální složky napětí byly opět srovnány s maximální dovolenou hodnotou dle výpočtu 6.2.

$$\sigma_m \leq f_D \quad (6.9)$$

$$\sigma_{mL} + \sigma_b \leq 1,5f_D$$

$$44 \text{ MPa} \leq 120,7 \text{ MPa}$$

$$80 \text{ MPa} \leq 181 \text{ MPa}$$

vyhovuje

6.5 Vyhodnocení napět'ové analýzy

Oblast hrdel trubkového svazku

Tab. 6.3 shrnuje hodnoty kategorizovaných napětí pro vybraná místa. Část vyhovuje, je-li hodnota membránového napětí σ_m nižší než maximální přípustná hodnota pro ocel ČSN 41 1416 při 160°C, tedy než 161,7 MPa, hodnota membránové+ ohybového napětí $\sigma_{mL} + \sigma_b$ je-li nižší než 251,6 MPa.

	Výpočtový způsob I			Výpočtový způsob II		
Místo	σ_m [MPa]	$\sigma_{mL} + \sigma_b$ [MPa]	vyhovuje	σ_m [MPa]	$\sigma_{mL} + \sigma_b$ [MPa]	vyhovuje
1 napojení pláště na přepážku	106	200	Ano	67	143	Ano
2 napojení hrdla mezitrubkového prostoru na plášť	86	140	Ano	20	33	Ano
3 napojení hrdla trubkového prostoru na plášť	121	157	Ano	119	149	Ano
4 napojení přepážky na trubkovnici	146	159	Ano	146	218	Ano

Tab. 6.3 Vyhodnocení napětí v oblasti hrdel trubkového svazku

Plášť v místě plovoucí hlavy

Tab. 6.4 opět porovnává hodnoty kategorizovaných napětí s maximálními přípustnými hodnotami pro ocel ČSN 41 1416 při teplotě 160°C.

	Výpočtový způsob I			Výpočtový způsob III		
Místo	σ_m [MPa]	$\sigma_{mL} + \sigma_b$ [MPa]	vyhovuje	σ_m [MPa]	$\sigma_{mL} + \sigma_b$ [MPa]	vyhovuje
5 napojení hrdla na plášť	69	139	Ano	68	137	Ano
6 části víka	126	196	Ano	126	197	Ano

Tab. 6.4 Vyhodnocení napětí pláště v místě plovoucí hlavy

Plovoucí hlava

V tabulce 6.5 jsou porovnány hodnoty kategorizovaných napětí s maximálními přípustnými hodnotami pro ocel ČSN 41 1416 při teplotě 160°C. Pro membránové napětí se jedná o maximální hodnotu 120,7 MPa, pro membránové+ohybové napětí hodnotu 181 MPa.

	Výpočtový způsob I			Výpočtový způsob III		
Místo	σ_m [MPa]	$\sigma_{mL} + \sigma_b$ [MPa]	vyhovuje	σ_m [MPa]	$\sigma_{mL} + \sigma_b$ [MPa]	vyhovuje
7 napojení obvodu na sférickou část	28	215	Ne	44	80	Ano

Tab. 6.5 Vyhodnocení napětí v plovoucí hlavě

Závěr

Cílem práce bylo provést tepelně-hydraulický a na něj navazující pevnostní výpočet jednotlivých částí výměníku tepla. Tedy výpočet co nejvíce odpovídající skutečným podmínkám. Tento cíl byl splněn a zároveň výsledky tohoto výpočtu byly porovnány s výsledky pevnostního výpočtu při použití výpočtových hodnot.

Napěťová analýza byla rozdělena na tři samostatné části. Zvlášť bylo hodnoceno napětí v místě hrdel trubkového svazku, pláště v okolí plovoucí hlavy a napětí plovoucí hlavy. Napětí v každé části bylo simulováno jednak použitím výpočtových hodnot a jednak výpočtovým způsobem, který byl založen na výsledcích přestupu tepla a součinitelích přestupu tepla získaných simulací proudění.

Oblast hrdel trubkového svazku splnila maximální přípustné namáhání jak při použití výpočtových hodnot, tak při použití skutečných hodnot zatížení. Rozdíl byl ovšem v místech, v kterých se projevila nejvyšší napjatost. Výpočet při použití výpočtových hodnot označil jako nejvíce namáhanou část místo napojení pláště na přepážku na vnějším obvodu zařízení, zatímco výpočet založený na skutečných podmínkách označil místo napojení přepážky na trubkovnici uprostřed zařízení.

Plášť v místě plovoucí hlavy taktéž dodržel maximálně přípustné namáhání pro oba výpočtové způsoby, navíc ani mezi výslednými hodnotami napětí nebyl významný rozdíl.

Napětí plovoucí hlavy nesplnilo maximální přípustnou mez při použití výpočtových hodnot. Ovšem toto zatížení počítalo s teplotním rozdílem mezi vnitřkem a vnějškem plovoucí hlavy 100°C, přitom jak ukázal základní výpočet přestupu tepla, teplotní rozdíl je v tomto místě pro provozní režim I i II o řád nižší. Pevnostní výpočet při použití skutečných hodnot zobrazil výsledné napětí několikrát nižší.

Seznam použité literatury

[1] Heat Exchanger. Dostupný z WWW:
http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_exchanger

[2] Metoda konečných prvků. Dostupný z WWW:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF

[3] Reynolds. Shell and Tube Heat Exchangers. Dostupný z WWW:
http://www.reynoldsindia.com/chemequip/index.php?option=com_content&view=article&id=64

[4] Kern, D. Q., A. D. Kraus: *Extended Surface Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York, 1972.

[5] Abletech engineering. Plate & Frame heat exchanger. Dostupný z WWW:
<http://abletechengineering.com/products>

[6] Heat Exchanger. Dostupný z WWW:
<http://instrumentations.blogspot.com/2008/02/heat-exchanger.html>

[7] HASLEGO, Christopher. Shell and Tube Heat Exchanger Technologies. Dostupný z WWW:
http://www.cheresources.com/heat_transfer_basics.shtml

[8] Hewitt, G.F., Shires, G.L., Bott, T.R.: *Process Heat Transfer*. CRC Press, Boca Raton. New York, 1994

[9] Český normalizační institut: Česká technická norma, Netopené tlakové nádoby. 2003

Seznam použitých symbolů

E_t	modul pružnosti při teplotě t
$R_{p0,1/t}$	smluvní mez kluzu pro předepsanou deformaci 0,1% při teplotě t
$R_{p0,2/t}$	smluvní mez kluzu pro předepsanou deformaci 0,2% při teplotě t
R_m	mez pevnosti
λ_t	tepelná vodivost
F	síla působící na hrdlo
p_v	tlak v okolí hrdla
d_i	vnitřní průměr hrdla
α	teplotní součinitel roztažnosti
σ_m	membránové napětí
σ_{mL}	místní membránové napětí
σ_b	ohybové napětí
f_d	maximální hodnota dovoleného namáhání pro běžné provozní zatížení
E	modul pružnosti materiálu
E^*	efektivní modul pružnosti trubkovnice při konstrukční teplotě
$l_{t,x}$	délka zaválcování trubky v trubkovnici
e	tloušťka pevné trubkovnice
ρ	poměr hloubky zaválcování trubky
E_t	modul pružnosti materiálu trubek při konstrukční teplotě
E	modul pružnosti materiálu trubkovnice při konstrukční teplotě
f_t	dovolené namáhání trubek při konstrukční teplotě
f	dovolené namáhání trubkovnice při konstrukční teplotě
d^*	efektivní průměr otvoru pro trubky
D_0	ekvivalentní průměr kružnice opsané vnějším trubkám
p	rozteč trubek
p^*	efektivní rozteč trubek
U_L	největší vzdálenost mezi středy trubek v sousedících řadách
μ^*	efektivní součinitel zeslabení děrované trubkovnice v ohybu

Seznam příloh

- [1] Schéma analyzovaného výměníku tepla
- [2] CD obsahující elektronickou verzi diplomové práce a soubory řešených simulací a modelů