VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF ENERGY

VÝMĚNÍK TEPLA
HEAT EXCHANGER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE PETR ČÍPEK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE DOC. ING. JAN FIEDLER, DR.
SUPERVISOR

BRNO 2010

Abstrakt:

Výměník tepla je zařízení zprostředkovávající výměnu tepla mezi dvěma proudícími médii. Tato výměna může probíhat periodicky nebo kontinuálně. O výběru daného typu výměníku rozhoduje jeho určení a parametry vstupujících médií.

V této práci byla zpracována problematika trubkových rekuperačních výměníků a výpočet nového výměníku. Tento výměník má nahradit stávající dodaný Královopolskou roku 1974. Jedná se o výměníky s velkým rozsahem použitelnosti. Nacházejí široké uplatnění ve všech oborech, od energetických zařízení až po farmaceutické provozy.

Přepočet původního výměníku byl proveden dle ČSN EN 13445 pro netopené tlakové nádoby. Výpočet byl proveden pro všechny tlakem zatížené části. Mezi tyto části patří plášť, dna, hrdla, trubkovnice a patky. Veškeré části vyhovují pro všechny způsoby zatížení.

Klíčová slova:

Výměník tepla, rekuperační výměník, trubkovnice, hrdlo, torosférické dno.

Abstract:

Heat exchanger is a device mediating the exchange of heat between two flowing mediums. This exchange can be periodical or continuous. The choice of the type of heat exchanger depends on the usage and parameters of entering medium.

This thesis deals with the tube recuperation (recovery) exchanger and calculation of new one. This new heat exchanger is supposed to replace current one produced by Kralovopolska in 1974. These heat exchangers have wide range of application. They are widely used in all fields, from energy related equipment to the pharmaceutical plants.

The conversion of current heat exchanger was made according to the CSN EN 13 445 for non-heated pressure vessels. The calculation was made for all pressure load parts, among these are the mantle, beds, throats, tube plates and tube feet. All parts are suitable for all the styles of load.

Key words

Heat exchanger, recuperative heat exchanger, tube plate, throat, torispherical end.

Bibliografická citace mé práce:

ČÍPEK, P. Výměník tepla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 40 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

Já, Petr Čípek, prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu.

V Brně dne: 26.5.2010 .....

Poděkování:
Chci poděkovat panu ing. Václavu Nováčkovi, že mi umožnil vypracovat tuto práci ve spolupráci s Královopolskou Brno.

OBSAH:

1. Úvod 10

2. Princip funkce 10

3. Rozdělení výměníků 10

3.1 Dle směru vzájemného proudění médií 10

3.2 Dle pracovního pochodu 10

3.3 Dle způsobu cirkulace 11

3.4 Dle účelu dělíme výměníky 12

3.5 Dle způsobu předávání tepla 12

3.6 Dle druhu používaných teplonosných médií 12

4. Používané druhy rekuperačních výměníků 12

4.1 Trubkové rekuperační výměníky 12

4.2 Deskový rekuperační výměník 14

5. Mechanické poruchy výměníků 15

5.1 Koroze 15

5.2 Zanášení 15

5.3 Abraze 16

6. Výpočet výměníku 16

6.1 Maximální přípustné hodnoty dovoleného namáhání tlakových částí 17

6.2 Návrh torosférického dna: 18

6.3 Hrdlo H1 20

6.3 Návrh torosférického dna 25

6.4 ČSN EN 13445-13 Trubkovnice 28

6.5 ČSN EN 13445: 13.10 Výpočet přírubového okraje trubkovnice s úzkým těsněním. 40

6.6 Návrh patek 42

7. Zhodnocení výpočtu 45

8. Závěr 46

9. Použité zdroje 48

10. Seznam příloh 48

1. Úvod

Tepelný výměník je zařízení, které slouží k výměně tepla mezi dvěma médii o různých parametrech. Výměna tepla může probíhat průběžně nebo přerušovaně. Médium o vyšší teplotě předává svou vnitřní energii kapalině o nižší teplotě. Jako tepelný výměník je bráno kterékoliv zařízení, které zprostředkovává přechod tepla mezi dvěma prostředími.

2. Princip funkce

Výměna tepla je termodynamický děj. Jedná se o děj, při kterém dochází ke změně jedné nebo více stavových veličin. Stavová veličina je základní veličina popisující stav termodynamické soustavy.

Teplo přechází z místa o vyšší teplotě do místa o teplotě nižší. Rozdíl teplot proudících médií je tedy hnací silou výměny tepla mezi nimi.

3. Rozdělení výměníků

3.1 Dle směru vzájemného proudění médií

- Souproudé:

  Kapaliny v tomto typu výměníku proudí ve stejném směru.
- Protiproudé:

  Kapaliny proudí v opačném směru.
- Křížový proud:

  Kapaliny proudí v kolmém směru na sebe.

3.2 Dle pracovního pochodu

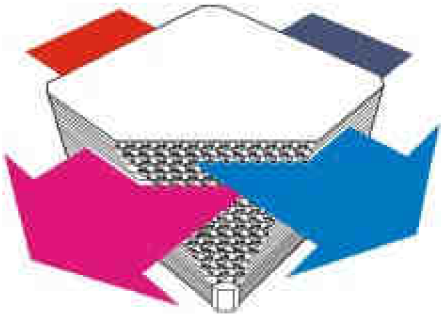
- <u>Rekuperační</u>

  Teplonosná média jsou zde oddělena stěnou, média tedy nejsou v kontaktu.

  Rekuperační výměníky se často používají ke zpětnému získání odpadního tepla. Tyto výměníky mají poměrně široké uplatnění jak v průmyslových provozech, tak i v rodinných domech či bytech. Využívají se ve vzduchotechnických systémech ke zpětnému získání tepla odcházejícího s odpadním vzduchem. Odpadní vzduch sebou nese velké množství energie, která by jinak odešla bez užitku.

  Toho se využívá například v hutnictví. Vzduch, který vstupuje do pecí je předehříván teplem odcházejících plynů.

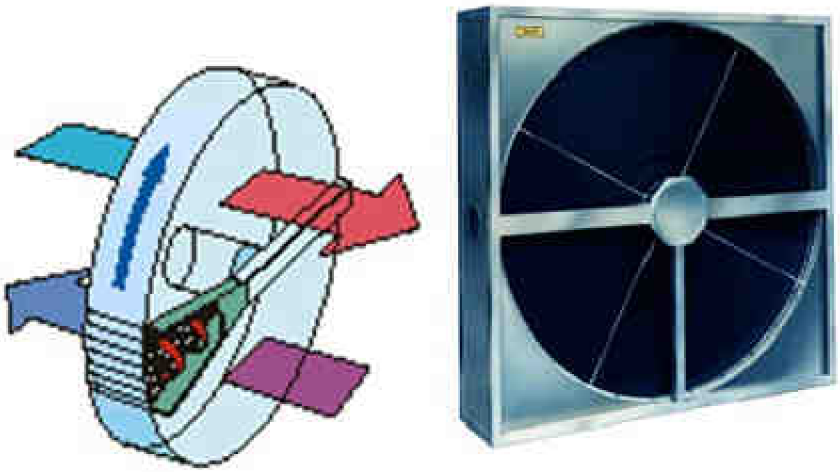
  Další využití je v kancelářských prostorách, rodinných domech a bytech kde je potřeba provádět výměnu znečištěného vzduchu za nový. Při přímém větrání by byly velké tepelné ztráty a použití výměníku slouží k úsporám energie, která by byla potřebná na ohřátí přivedeného vzduchu. Pokud je vzduch ve městech znečištěný kombinuje se výměník s filtrací, která čistí přiváděný vzduch.



Obr.1: Deskový rekuperační výměník [4]

- Regenerační

  Tyto výměníky jsou schopné získávat z odváděného vzduchu jak teplo zjevné tak i teplo latentní. Ohřívané médium vtéká opakovaně do prostoru s teplo zprostředkujícím elementem, ze kterého přijímá teplo. Toto teplo mu předalo médium ohřívající. Nevýhodou těchto výměníků je možné přisávání části odpadního vzduchu do vzduchu přiváděného.



Obr.2: Rotační regenerační výměník [5]

- Směšovací

  V těchto typech výměníků dochází ke kontaktu teplonosných kapalin. Teplonosné kapaliny tedy nejsou odděleny stěnou. Přiváděná média vytvářejí homogenní směs. Výhodou je vyšší teplota ohřátí oproti regeneračnímu výměníku. Rozdíl teplot vystupujících kapalin je nulový. Nevýhodou je nutnost stejného tlaku přiváděných kapalin.

- Kontaktní

  Dochází k přímému kontaktu přiváděných médií. Přiváděná média jsou v různých fázích, předávají teplo přímým kontaktem. Po předání tepla jsou od sebe opět oddělena. Teplosměnná plocha je dána povrchem částic pevné fáze.

3.3 Dle způsobu cirkulace

- S přirozenou cirkulací

  Cirkulace médií je způsobena rozdílem jejich hustot.
- S nucenou cirkulací

Cirkulaci zajišťuje cirkulační čerpadlo nebo ventilátor.
- S nuceným průtokem

3.4 Dle účelu dělíme výměníky

- ohříváky – Slouží ke zvýšení teploty přiváděného média. Médium zůstává ve stejné fázi.
- chladiče – Slouží ke snížení teploty přiváděného média bez změny jeho fáze.
- výparníky a odparky – Slouží ke změně ohřívaného média z kapalné fáze do plynné.
- kondenzátory – Slouží ke změně ohřívaného média z plynné fáze do kapalné. Kapalná fáze je odváděna jako kondenzát.
- přehříváky a přihříváky – Slouží ke zvýšení teploty syté nebo přehřáté páry.
- parní generátory – Slouží k výrobě páry.
- sušárny – Přiváděným teplem se suší (snižuje vlhkost) látky v pevné fázi.
- termické odplyňováky vody – Při parním ohřevu vody kolem bodu varu se z ní vylučují pohlcené plyny.
- topná tělesa ústředního vytápění – Otopné médium ohřívá vzduch v místnosti.

3.5 Dle způsobu předávání tepla

- konvekční – předané teplo závisí na proudícím médiu
- sálavé – převážná část tepla se předává sáláním
- kombinované – jedná se o kombinaci obou předchozích případů

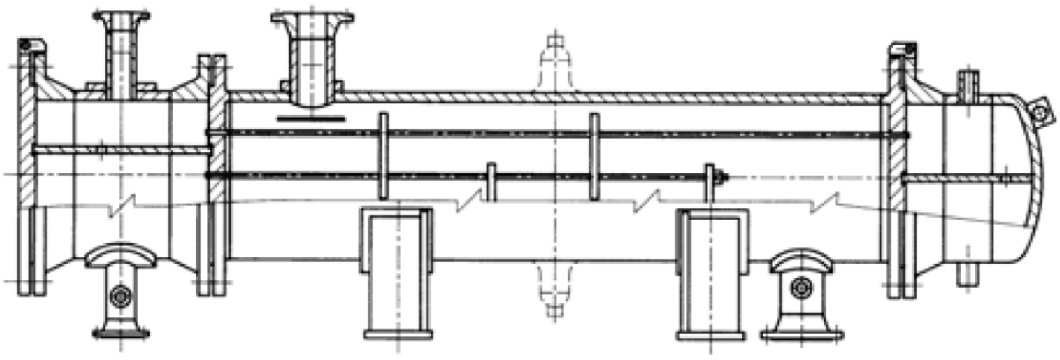
3.6 Dle druhu používaných teplonosných médií

- kapalina-kapalina
- kapalina-plyn
- plyn-plyn

4. Používané druhy rekuperačních výměníků

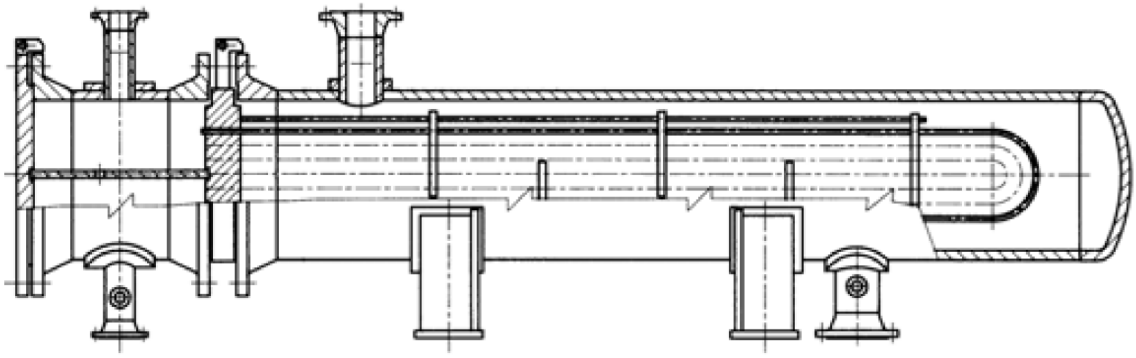
4.1 Trubkové rekuperační výměníky

Tyto výměníky nacházejí široké uplatnění v chemii, petrochemii, energetických zařízeních, průmyslových provozech, potravinářství, farmacii atd. Mají dobrou teplotní a tlakovou odolnost (závisí na druhu použitých materiálů).



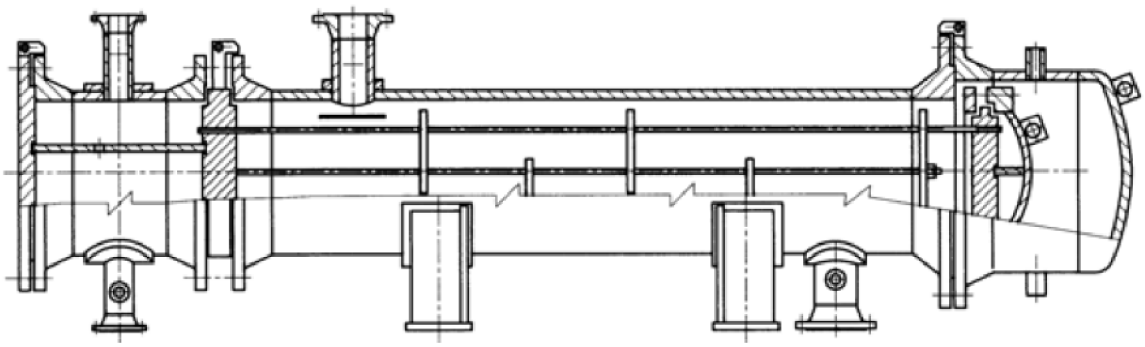
Obr.3: Výměník s pevnými trubkovnicemi, s možným kompenzátorem dilatací v plášti [6]

Jedná se o nenáročnou a odzkoušenou technologii. Oproti deskovým výměníkům mají při stejném výkonu až desetinásobnou hmotnost a horší regulovatelnost. Při použití kapilár, jejichž průměr je menší než 3mm hrozí ucpání mechanickými nečistotami. Skládá se z vnějšího pláště a dvou trubkovnic. V trubkovnicích jsou zaválcovány, zavařeny nebo zaválcovány a zavařeny teplosměnné trubky. Do mezitrubkového prostoru, který je 2-3x větší než průtokový průřez trubek, se často umísťují přepážky. Slouží k rozbití proudu kapaliny proudící v mezitrubkovém prostoru. Jakožto trubkový výměník se rovněž považuje výměník trubka v trubce. Mezi jejich přednosti patří možnost sestavení potřebného počtu výměníků za sebou, možnost výměny poškozené trubky, poměrně méně náročná výroba a dobrá možnost čištění. Dosti značnou nevýhodou je možnost použití pouze pro menší teplotní rozdíly obou médií. Pokud by byl velký rozdíl teplot, hrozí poškození trubek v důsledku teplotní dilatace. Teplotní dilatace se dají kompenzovat pouze v malé míře. Jednou z možností jejich kompenzování je použití kompenzátoru délkové dilatace. Další možností je výměník s plovoucí hlavou, nebo použití svazku U-trubek.



Obr.4: Výměník s U-trubkami [6]

Použití svazku U-trubek má mnoho výhod. Mezi jeho největší přednosti patří to, že trubky jsou umístěny volně a mohou se roztahovat (dilatovat). Výměníky mají nízkou hmotnost a svazek trubek je kompaktní a dobře využívá prostor pláště. Nevýhodou tohoto typu výměníku je nemožnost výměny poškozené trubky a nemožnost čištění svazku trubek. Při vyšších tlacích narůstá znatelně tloušťka trubkovnice.



Obr.5: Výměník s plovoucí hlavou [6]

Další používaný typ výměníku, který má možnost kompenzace délkové dilatace je výměník s plovoucí hlavou. Používají se tam kde roztažnost teplosměnných trubek a pláště výměníku je větší než povolená a docházelo by k nadměrnému zatížení trubkovnice.

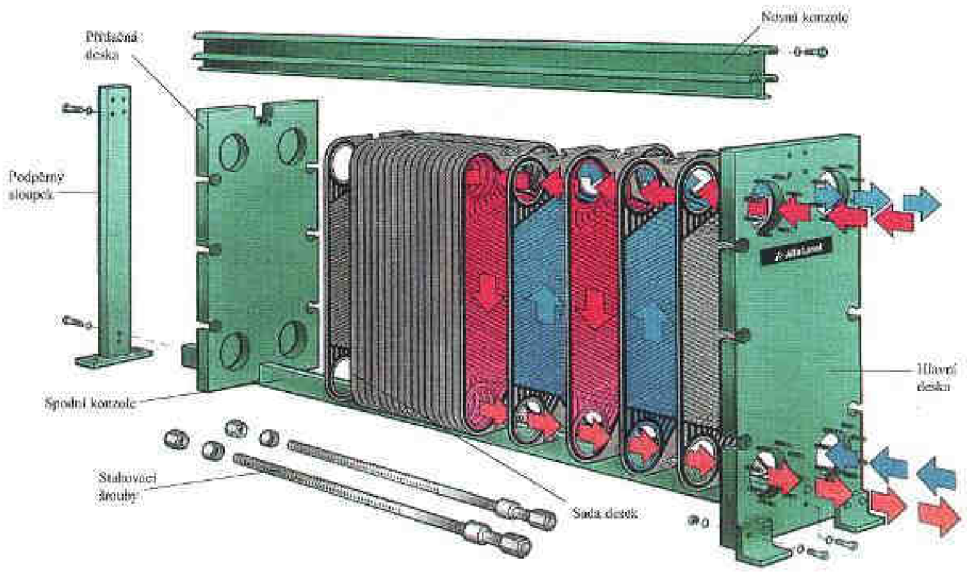
Další používaný typ trubkového výměníku je výměník se šroubovitě vinutými trubkami. Trubky jsou ve výměníku vedeny v jedné nebo více řadách. Jejich výhodou je jednoduchost výroby a dobré přestupy tepla při obtékání trubek. Negativem je horší využití prostoru výměníku a trubka z jednoho kusu, což má za následek výměnu celé trubky při jejím porušení. Tento výměník lze využít i jako parní vyvíječ páry. Ohřívacím médiem mohou být spaliny a ohřívaným voda. Na konci výměníku z něj bude vystupovat sytá pára. V tomto případě by byl vnitřní prostor výměníku využit jako spalovací komora.

4.2 Deskový rekuperační výměník

Teplosměnou plochu tvoří tenké kovové desky, které mají v profilu vylisované kanálky. V těchto kanálcích proudí protiproudně v přilehlých deskách média. Desky mohou být spojeny pájením nebo staženy šroubovými svorníky. Při použití svorníků jsou mezi desky vložena těsnění.

Dobrý přestup tepla je způsoben malou tloušťkou desek. Desky jsou tvořeny z plechů tloušťky 0,4-1mm. Používaný materiál se liší podle proudících médií, teplot a tlaků. Deskové výměníky se nejčastěji používají pro ohřev kapalin při tlacích do 3,5MPa a teplotě do 150°C výjimečně se vyrábí některé typy pro teploty do 270°C.

Tyto výměníky jsou kompaktní a lze jednoduše zvýšit výkon přidáním dalších desek. Nevýhodou je obtížně dosažitelná těsnost pro vyšší tlaky a nutnost čistoty obou médií aby nedocházelo k zanášení.



Obr.6: Deskový rekuperační výměník [7]

5. Mechanické poruchy výměníků

Při provozu výměníků vznikají mechanické poruchy, které způsobují následující faktory. Lze je rozdělit na poruchy způsobené proudícími médii, kterými jsou:

- koroze
- zanášení
- abraze

Dalšími mechanickými poruchami jsou výrobní vady, kterým by se mělo předejít tlakovou zkouškou výměníku. Mezi tyto poruchy patří:

- netěsnost v zaválcování trubek
- špatné svary
- trhliny vzniklé v důsledku vibrací svazku trubek, případně tepelnou roztažností
- kavitační poškození

5.1 Koroze

Korozi způsobují teplonosná média. Snižuje tloušťku stěn trubek a způsobuje jejich zanášení. O zanášení hovoříme spíše u malých průměrů trubek. Korozi způsobuje nejčastěji špatný pH faktor a špatně odplyněná voda. Působení koroze na výměník lze snížit použitím kvalitnějších materiálů teplosměnných trubek.

Další způsob odstranění korozního působení na výměník je katodová ochrana. Kov, který má být chráněn je v přímém styku s kovem, který snadněji podléhá koroznímu působení média. Médium postupně koroduje pouze tento materiál a tím je kov výměníku chráněn.

5.2 Zanášení

Pod pojmem zanášení rozumíme usazování různých materiálů, které obsahují teplosměnná média na teplosměnných plochách. Mezi usazující se materiály patří zejména různé druhy solí, produkty koroze a pevné látky. Usazeniny způsobují zvýšení tepelného odporu teplosměnných ploch a tím snižují přenos tepla čímž i celkovou účinnost výměníku.

Další negativní působení nánosů je zmenšení průtočného průměru, což má za následek zvýšení rychlosti proudícího média, z tohoto plynoucí zvýšení tlakové ztráty a dále nárůst výkonu čerpadla nebo ventilátoru, dle druhu použitého výměníku. Pokud dojde k úplnému zanesení výměníku, začne narůstat tlak a může dojít i k prasknutí trubek, vytržení trubky z trubkovnice, prasknutí svarů.

Způsoby ovlivnění zanášení:

- konstrukční opatření
- snížení množství solí v médiích
- snížení množství popílku ve spalinách
- mechanické čištění trubek výměníku
- chemické čištění

5.3 Abraze

Opotřebení teplosměnných ploch otěrem (abrazí) nastává tam kde teplonosná média obsahují tuhé částice. Toto nastává převážně popílkem ze spalování, tzv. popílkovým otěrem. Další možný způsob abraze usazeninami ve výměníku. Tyto usazeniny způsobí zvýšení rychlosti proudícího média, které je pak strhává sebou. Opotřebení je dále podobné jako u spalin.

6. Výpočet výměníku

Jedná se trubkový rekuperační výměník pracující při teplotách do 150°C a tlacích do 0,3MPa. Vzhledem k poměrně nízkým teplotám má výměník pevnou trubkovnici. Trubkový svazek tvoří 85 trubek. Obě média proudící ve výměníku tvoří voda.

Tento výměník nahradí stávající trubkový výměník.

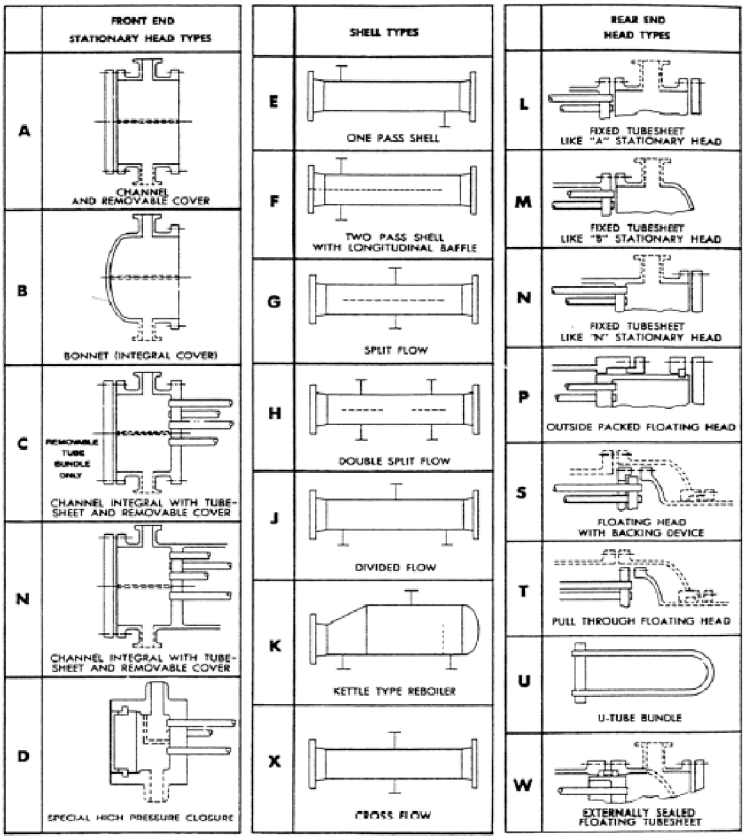
Vstupní hodnoty:

		plášťový prostor	trubkový prostor	
Největší pracovní tlak	P	0,3	0,17	MPa
Výpočtová teplota	t	150	100	°C
Zkušební tlak vodou	Ptest	0,43	0,25	Mpa
Přídavek na korozi	c	1	2	mm
Počet trubek		85		
Objem	V	56	57	l
Teplosměnná plocha		6,18		m2
Součinitel hodnoty svarového spoje	z	0,85		
Vnitřní průměr skořepiny	Di	361		mm
Minimální horní mez kluzu	ReH	265		MPa
Minimální smluvní mez kluzu při t=150°C	Rp0,2/150	223		MPa
Minimální mez pevnosti v tahu	Rm	410-530		MPa
Maximální hodnota dovoleného namáhání pro běžné provozní zatížení	fd	148,67		MPa

Dovolené namáhání	f	148,67		MPa
Poloměr torosférického dna	R	302		mm
Vnitřní poloměr anuloidového přechodu	r	58		mm
Vnitřní průměr skořepiny	Di	361		mm
Vnější průměr skořepiny	De	377		mm

tab.1: Vstupní parametry

Použitý typ výměníku:



Obr.7: Používané typy trubkových výměníků dle TEMA Standard [8]

Dle TEMA Standardu se jedná o výměník typu BEN. Je to výměník s pevnými integrálními trubkovnicemi s pláštěm.

6.1 Maximální přípustné hodnoty dovoleného namáhání tlakových částí

Případy normálního provozního zatížení

Určení maximální hodnoty dovoleného namáhání pro běžné provozní zatížení:

-Nejmenší vypočtená hodnota dle použitého materiálu

$fd=Min(R_{p0,2/t}/1,5;R_{m/20}/2,4)=148,67MPa$

Skořepina zatížená vnitřním tlakem.

Válcová skořepina

Požadovaná tloušťka skořepiny:

emin=P*Di/(2*f*z-P)= 0,3*361/(2*148,67*0,85-0,3)=<u>0,43mm</u>

emina=emin+c+th=0,43+1+0,5=<u>1,93mm</u>

Rozbor tloušťky
ea=en-c-th=8-1-0,5=6,5mm
Podmínka platnosti
e/De=0,0011<0,16=> platí
emin=1,93=>en=8[mm]

Maximální přípustný pracovní tlak Pmax

Vnitřní průměr skořepiny
Di=De-2*ea=377-2*6,5=364mm
Střední průměr skořepiny
Dm=(De+Di)/2=(377+364)/2=370,5mm
Pmaxtk(korozní stav při výpočtové teplotě)
Pmaxtk=2*f*z*ea/Dm=2*148,67*0,85*6,5/370,5=4,43MPa
Pmaxtn(nekorozní stav při teplotě okolí)
Pmaxtn=2*f20*z*(ea+c)/Dm=2*170,83*0,85*(6,5+1)/370,5=5,88MPa

Maximální zkušební tlak Ptmax

Ptmax=2*ftest*ztest*(ea+c)/Dm=2*252,38*1*(6,5+1)/370,5=10,22MPa

Minimální hydrostatický zkušební tlak Ptmin

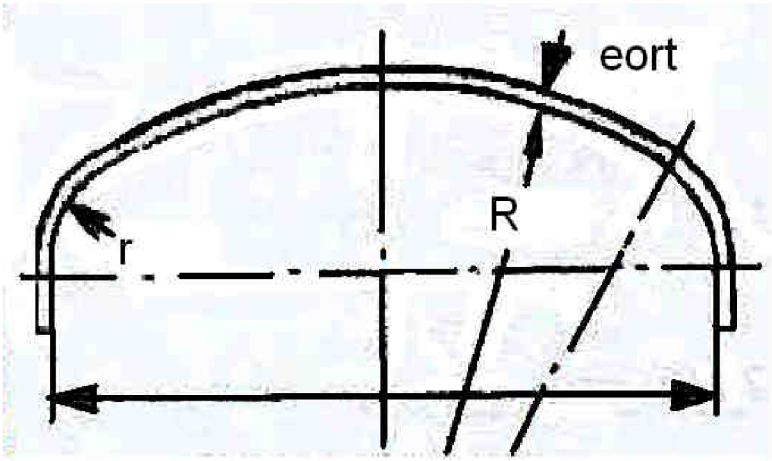
Ptmin=1,25*Pd*f20/f=1,25*0,3*170,83/148,67=0,431MPa
Ptmin=1,43*Pd=1,43*0,3=0,429MPa

Největší nevystužený průměr skořepiny

Vnitřní poloměr skořepiny:
ris=Di/2=364/2=182mm

Délka skořepiny s přídavkem na zpevnění
Is=Sqr((2*ris+ea)*ea)=Sqr((2*182+6,5)*6,5)=49,07mm
dmax1=(ea*Is*(f-0,5*P)/P-ris*Is)/(0,5*ris+0,5*ea) =
=(6,5*49,07*(148,67-0,5*0,3)/0,3-182*49,07)/(0,5*182+0,5*6,5)=182mm
dmax2=0,15*Sqr((2*ris+ea)*ea)=0,15*Sqr((2*182+6,5)*6,5=7,36mm
Největší nevystužený průměr skořepiny
dmax=MAX(dmax1;dmax2)=MAX(182;7,36)=182mm

6.2 Návrh torosférického dna:



Obr.8: Torosférické dno

Minimální požadovaná tloušťka dna

es=P*R/(2*f*z-0,5*P)=0,187*302/(2*166,67*1-0,5*0,187)=0,1695mm
fb=Rp0,2/1,5=205/1,5=136,67N/mm2
eb=(0,75*R+0,2*Di)*((P/(111*fb)*(Di/r)^0,825)^(0,667)=
=(0,75*302+0,2*361)*((0,187/(111*136,67)*(361/58)^0,825)^(0,667)=0,434mm

Parametr bpro torosférická dna
Y=MIN(emin/R;0,04)=MIN(0,1695/302;0,04)=0,00056126
Z=LOG(1/Y)=LOG(1/0,00056126)=3,2508
X=r/Di=58/371
N=1,006-1/(6,2+(90*Y)^4)= 1,006-1/(6,2+(90*0,00056126)^4)=0,8681
beta01=N*(-0,1833*Z^3+1,0383*Z^2-1,2943*Z+0,837)=
=0,8618*(-0,1833*3,2508^3+1,0383*3,2508^2-1,2943*Z+0,837)=1,1023
beta02=MAX(0,5;0,95*(0,56-1,94*Y-82,5*Y^2))=
=MAX(0,5;0,95*(0,56-1,94*0,00056126-82,5*0,00056126^2))=0,5309
beta=10*((0,2-X)*beta01+(X-0,1)*beta02)= 10*((0,2-X)*1,1023+(X-0,1)*0,5309)=0,7804

Minimální tloušťka dna bez přídavků:
emin01=MAX(es;eb)=(0,1659;0,434)=0,434mm
Minimální tloušťka dna s přídavky:
emin=emin01+c+th=0,434+2+0,5=2,934mm

Zvoleno en=5mm

Analyzovaná tloušťka:
ea=en-c-th=5-2-0,5=2,5mm
Vnitřní průměr dna:
Di=De-2*(en-c)=377-2*(2,5-2)=371mm
Střední průměr dna:
Dm=(De+Di)/2=(377+371)/2=374mm

Požadovaná minimální tloušťka válcové příruby

Llim=0,2*SQR(Di*emin01)=0,2*SQR(371*0,434)=2,54mm
Lcyl>Llim
ecyl=P*Di/(2*f*z-P) =0,187*371/(2*166,67*1-0,187)=2,0824mm

Musí být splněny všechny následující vztahy:

$r \leq 0{,}2D_i$ 58≤74,2=>vztah platí
$r \geq 0{,}06D_i$ 58≥22,26=>vztah platí
$r \geq 2e$ 58≥16=>vztah platí
$e \leq 0{,}08D_e$ 0,46≤30,16=>vztah platí
$e_a \geq 0{,}001D_e$ 8≥0,377=>vztah platí
$R \leq D_e$ 302≤377=>vztah platí

MAXIMÁLNÍ PŘÍPUSTNÝ PRACOVNÍ TLAK: NOVÝ A STUDENÝ

Ps=2*f*z*ea/(R+0,5*ea)= 2*180*1*4,5/(302+0,5*4,5)=5,32MPa
Py=f*ea/(beta*(0,75*R+0,2*Di))=180*4,5/(0,7804*(0,75*302+0,2*371))=3,45MPa
PB=111*fb*(ea/(0,75*302+0,2*371))^1,5*(r/Di)^0,825=
=111*138,46*(4,5/(0,75*302+0,2*371))^1,5*(58/371)^0,825=6,08MPa
Pmax=MIN(Ps;Py;PB)=(5,23;3,45;6,08)=3,45MPa

MAXIMÁLNÍ PŘÍPUSTNÝ PRACOVNÍ TLAK: TEPLÝ A ZKORODOVANÝ

Ps=2*f*z*ea/(R+0,5*ea)= 2*166,67*1*2,5/(302+0,5*2,5)=2,748MPa
Py=f*ea/(beta*(0,75*R+0,2*Di))=166,67*2,5/(0,7804*(0,75*302+0,2*371))=1,77MPa
PB=111*fb*(ea/(0,75*302+0,2*371))^1,5*(r/Di)^0,825=
=111*136,67*(2,5/(0,75*302+0,2*371))^1,5*(58/371)^0,825=2,487MPa
Pmax=MIN(Ps;Py;PB)=(5,748;1,77;2,487)=1,77MPa

MAXIMÁLNÍ ZKUŠEBNÍ TLAK(Nezkorodovaný, za normální teploty)

Ps=2*f*z*ea/(R+0,5*ea)= 2*265*1*4,5/(302+0,5*4,5)=7,839MPa
Py=f*ea/(beta*(0,75*R+0,2*Di))=265*4,5/(0,7804*(0,75*302+0,2*371))=5,08MPa
PB=111*fb*(ea/(0,75*302+0,2*371))^1,5*(r/Di)^0,825=
=111*197,8*(4,5/(0,75*302+0,2*371))^1,5*(58/371)^0,825=8,694MPa
Pmax=MIN(Ps;Py;PB)=(7,839;5,08;8,694)=5,08MPa

MINIMÁLNÍ POŽADOVANÝ HYDROSTATICKÝ ZKUŠEBNÍ TLAK:Ptmin

Ptmin=1,25*Pd*f20/f=1,25*0,17*180/166,67=0,2945MPa
Ptmin=1,43*Pd=1,43*0,17=0,2431MPa

MAXIMÁLNÍ PRŮMĚR NEZPEVNĚNÉHO OTVORU, dmax

ris=R=302mm

Příspěvek délky skořepiny ke zpevnění
Is=Sqr((2*ris+ea)*ea)=Sqr((2*302+2,5)*2,5=38,94mm
dmax1=(ea*Is*(f-0,5*P)/P-ris*Is)/(0,5*ris+0,5*ea)=
=(2,5*38,94*(166,67-0,5*0,187)/0,187-302*38,94)/(0,5*302+0,5*2,5)=185,5mm
dmax2=0,15*Sqr((2*ris+ea)*ea=0,15*Sqr((2*302+2,5)*2,5)=5,84mm

Maximální průměr nezpevněného otvoru
dmax=Max(dmax1,dmax2)=Max(185,5;5,84)=185,5mm

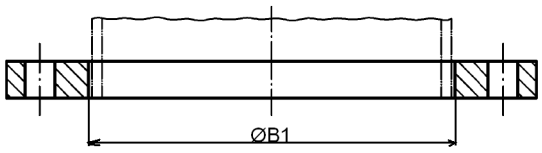
Žádný otvor ve skořepině nepřesahuje tento rozměr. Díky tomuto není nutné vystužení žádného z nich.

Tlak ve druhém torosférickém dně je nižší proto jsou voleny stejné tloušťky stěn jako v prvním případě. Pro tyto parametry druhé dno vyhovuje.

6.3 Hrdlo H1

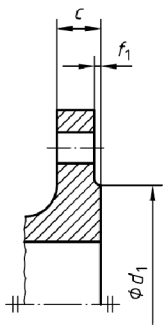
Návrh příruby:

Příruba dle normy: EN1092-1:2007 Flanges
Tlaková třída: EN1092: třída PN 16

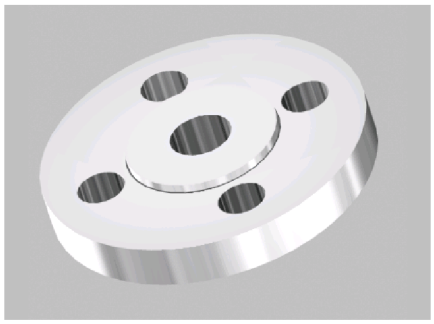


Obr.9: Příruba [9]

Typ příruby: Typ 01 Plochá přivařovací příruba (Type 01 Plate flange for welding)



Obr.10: Plochá příruba [9]



Obr.11: Plochá příruba-model [10]

Materiál příruby: 3E0, P245GH, EN10222-2, 1.0325, výkovek

Analyzovaná tloušťka skořepiny eas

eas=en-c-th=5-2-0,5=2,5mm
Analyzovaná tloušťka hrdla eab
eab=enb-c-NegDev=5-2-0,625=2,38mm
ris=R=302mm
dib=deb-2*eab=108-2*2,38=103,25mm
ebp=P*deb/(2*fb*z+P)=0,174*108/(2*166,67*1+0,174)=0,06mm
fob=Min(fs;fb)=Min(166,67;166,67)=166,67N/mm2

Oblast skořepiny Afs(Area of Shell)

Mezní zpevnění podél skořepiny
Is=Sqr((2*ris+eas)*eas)=Sqr((2*302+2,5)*2,5)=38,91mm
Dosedací plocha hrdla
Afs=eas*Is=2,5*38,91=97,28mm2

Oblast hrdla Afb

Mezní zpevnění podél hrdla
Ibo= Sqr((deb-eb)*eb)=Sqr((108-2,38)*2,38)=15,85mm
Dosedací plocha hrdla
Afb=eb*(Ibo+Ibi+eas)=2,38*(15,84+0+2,5)=43,55mm2

Výpočet tlakově zatížené zóny

V hrdle Apb
Apb=0,5*did*(Ibo+eas)=0,5*103,25*(15,84+2,5)=946,73mm2
Pro klenuté dno Aps
Aps=0,5*ris^2*(Is+a)/(0,5*eas+ris)=0,5*302^2*(38,91+54,29)/(0,5*2,5+302)=13997,1mm2

Obecný vzorec pro vystužení osamoceného otvoru

pAReq=P*(Aps+Apb+0,5*Apphi)=0,174*(13997,1+946,73+0,5*0)=2,6kN
pAAval=(Afs+Afw)*(fs-0,5*P)+Afp*(fop-0,5*P)+Afb*(fob-0,5*P)=
=(97,28+0)*(166,67-0,5*0,174)+0*(0-0,5*0,174)+43,55*(166,67-0,5*0,174)=23,46kN
pAAval≥pAReq=> vyhovuje

Maximální přípustný tlak Pmax
Pmax=(Afs+Afw)*fs+Afb*fob/((Aps+Apb+0,5*Apphi)+0,5*(Afs+Afw+Afb+Afp))=
=(97,28+0)*166,67+43,55*166,67/((13997,1+946,73+0,5*0)+0,5*(97,28+0+43,55+0))=1,56MPa

Maximální přípustní zkušební tlak Ptmax
Ptmax=4,49MPa

LOKÁLNÍ ZATÍŽENÍ HRDLA V KULOVÉ SKOŘEPINĚ

PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET
Analyzovaná tloušťka skořepiny eas
eas=en-c-th=5-2-0,5=2,5mm
Analyzovaná tloušťka hrdla eb
eb=enb-c-NegDev=5-2-0,625=2,38mm
Průměr skořepiny
D=De-ea=377-2,5=374,5mm
Poloměr skořepiny
R=R+ea=302+2,5=304,5mm

PODMÍNKY PLATNOSTI
eas/R=0,0082≥0,001
eas/R=0,0082≤0,1
Celkový moment
MB=Sqr(Mx^2+My^2)=Sqr(0,3^2)=Sqr(0,3^2+0,3^2)=0,4243kNm

VÝPOČET PRO VNEJŠÍ PRŮMĚR HRDLA

Průměr hrdla
d=deb-eb=108-2,375=105,63mm

Kombinovaná analyzovaná tloušťka
ec=ea=2,5mm
LamdaS=d/Sqr(R*ec)=105,63/Sqr(304,5*2,5)=3,83

Posílený poměrný činitel
Kappa=Min(2*fb/f*eb/ec*Sqr(eb/d);1)=Min(2*166,67/166,67*2,375/2,5Sqr(2,375/105,63);1)=0,2849

MAXIMÁLNÍ PŘÍPUSTNÉ JEDNOTLIVÉ ZATÍŽENÍ
Dovolený tlap Pmax:
Pmax z výpočtu hrdla Pmax=1,56MPa
Tmp=0,91*Kappa*LambdaS^2=0,91*0,2849*3,83^2=3,8

Dovolené axiální zatížení Fzmax:
Fzmax=f*ec^2*(1,81+2,4*Sqr(1+Kappa)*LambdaS+Tmp)=
=166,67*2,5^2*(1,81+2,4*Sqr(1+0,2849)*3,83+3,8)=16,70kN

Dovolený ohybový moment MBmax:
MBmax=f*ec^2*d/4*(4,9+2*Sqr(1+kappa)*LambdaS+Tmp)=
=166,67*2,5^2*105,63/4*(4,9+2*Sqr(1+0,2849)*3,83+3,8)=0,4783kNm

SMYKOVÁ NAPĚTÍ

Smykové napětí od podélného zatížení TauFl:
TauFl=2*Fl/(PI*deb*ec)=2*1,2/(3,14*108*2,5)=2,83N/mm2
Smykové napětí od obvodového zatížení TauFc:
TauFc=2*Fc/(PI*deb*ec)=2*1,2/(3,14*108*2,5)=2,83N/mm2

Smykové napětí od krouticího momentu TauMt:

TauMt=2*Mt/(PI*deb^2*ec)=2*0,45/(3,14*108^2*2,5)=9,82N/mm2

Celkové smykové napětí Tau:
Tau=Sqr(TauFc^2+TauFl^2)+TauMt=Sqr(2,83^2+2,83^2)+9,82=13,83N/mm2

KOMBINACE VNĚJŠÍHO ZATÍŽENÍ A VNITŘNÍHO TLAKU

PhiP=P/Pmax=0,174/1,56=0,1087
PhiZ=Fz/Fzmax=1/16,7=0,0599
PhiTau=Tau/(0,5*f)=13,83/(0,5*166,67)=0,1659
PhiB=MB/MBmax=0,4243/0,4783=0,8870
MaxA11=MAX(Abs(PhiP+PhiZ),Abs(PhiZ),Abs(PhiO-0,2*PhiZ)=
=Max(abs(0,1087+0,0599),Abs(0,0599),Abs(0,1087-0,2+0,0599)=0,1686
PhiA111=MAXA11+Abs(PhiB)+Abs(PhiTau)=0,1687+Abs(0,887)+Abs(0,1659)=1,22
PhiA112=Sqr(MaxA11^2+PhiB^2+PhiTau^2)=Sqr(0,1686^2+0,887^2+0,1659^2)=0,918
PhiA11=MIN(PhiA111, PhiA112)=MIN(1,22;0,918)=0,918

PhiP≤1=>vyhovuje
PhiZ≤1=>vyhovuje
PhiTau≤1=>vyhovuje
PhiB≤1=>vyhovuje
PhiA11≤1=>vyhovuje

Kontrolou kombinace vnějšího zatížení a vnitřního tlaku bylo zjištěno, že jejich kombinace je menší než maximální zatížení. Pokud by kombinace zatížení nevyhověla museli by se změnit parametry hrdla.

ROZMEZÍ A JEJICH KOMBINACE

ROZMEZÍ ZATÍŽENÍ

DeltaP=Max(Pmax,0)-Min(Pmin,0)=0,17MPa
DeltaFz=Max(Fzmax,0)-Min(Fzmin,0)=1kN
DeltaMx=Max(Mxmax,0)-Min(Mxmin,0)=Max(0,3;0)-Min(0;0)=0,3kNm
DeltaMy=Max(Mymax,0)-Min(Mymin,0)=Max(0,3;0)-Min(0;0)=0,3kNm
DeltaMB=Sqr(DeltaMx^2+DeltaMy^2)=Sqr(0,3^2+0,3^2)=0,4243kNm
DeltaFl=Max(Flmax,0)-Min(Flmin;0)=Max(1,2;0)-Min(0;0)=1,2kN
DeltaFc=Max(Fcmax,0)-Min(Fcmin;0)=Max(1,2;0)-Min(0;0)=1,2kN
DeltaFshear=Sqr(DeltaFl^2+DeltaFc^2)=Sqr(1,2^2+1,2^2)=1,7kN
DeltaMt=Max(Mtmax;0)-Min(Mtmin;0)=Max(0,45;0)-Min(0,0)=0,45kNm

EKVIVALENTNÍ TLOUŠŤKA SKOŘEPINY

eeq=ec=2,5mm

NAPĚTÍ

scfP=3,895
scfZ=1,806
scfM=1,705

Napětí díky tlakovému rozpětí
SigP=scfP*DeltaP*R/(2*eeq)=3,9*0,17*304,1/(2*2,5)=40,28N/mm2

Napětí díky axiálnímu rozpětí zatížení
SigFz=scfz*DeltaFz/PI*d*eeq)*Sqr(R/eeq)=

=1,81*1/(3,14*105,63*2,5)*Sqr(304,1/2,5)=402,047N/mm2

Napětí díky obvodovému rozpětí momentů
SigMB=scfM*4*DeltaMB/(PI*d^2*eeq)*Sqr(R/eeq)=1,7*4*0,4243/(3,14*105,63^2*2,5)*Sqr(304,1/2,5)==24,01N/mm2

Napětí díky smykovému zatížení
SigS=scfS*2*(Sqr(DeltaFl^2+DeltaFc^2)/(PI*deb*eeq)+DeltaMt/(PI*deb^2*eeq))=
=0,206*2*(Sqr(1,2^2+1,2^2)/(3,14*108*2,5)+0,45/(3,14*108^2*2,5))=2,85N/mm2

Celkové intenzita napětí díky rozmezí zatížení
SigTot=Abs(SigT+Sqr(SigP^2+(SigFz+SigMB)^2+SigS^2))=
=Abs(0+Sqrt(40,28^2+(24,01+364,17)^2+2,85^2))=390,28N/mm2

Celkové napětí ve skořepině
SigTot=390,28≤3*f=500,01=>vyhovuje

PODÉLNÁ NAPĚTÍ U HRDLA

Maximální podelné napětí v hrdle
SigLong=P*d/(4*eb)+4MB/(PI*d^2*eb)+Fz/(PI*d*eb)=
=0,174*105,63/(4*2,375)+4*0,4243/(3,14*105,63^2*2,375)+1000/(3,14*105,63*2=23,55N/mm2
Podélné napětí v hrdle SigLong=23,55≤fb=166,67N/mm2=>vyhovuje

Limitní tlakové napětí
K=1,21*E*ea/(Sige*D)=1,21*193180*2,375/(164*105,63)=32,05
alfa=0,83/Sqr(1+0,005*D/ea)=0,83/Sqr(1+0,005*105,63/2,375)=0,7507
delta=(1-0,4123/(alfa*K)^0,6/S=(1-0,4123/(0,7507*32,05)^0,6)/1,5=0,6259
Maximální přípustné tlakové napětí
Sigcall=Sige*delta=164*0,6259=102,65N/mm2

Přípustné individuální napětí
Maximální tahová síla Ftmax
Ftmax=PI*D*ea*f=3,14*105,63*2,375*166,67=131,35kN

Maximální tlaková síla Fcmax
Fcmax=PI*D*ea*Sigcall=3,14*105,63*2,375*102,65=80,9kN

Maximální ohybový moment Mmax
Mmax=PI/4*D^2*ea*Sigcall=3,14/4*105,63^2,375*102,65=2,14kNm

Ověření podélné stability
LongStab=MB/Mmax+Abs(Fzmin)/Fcmax=0,42543/2,14+Abs(0)/80,9=
=0,1986

Normální hrdlo ve skořepině, s nebo bez výstužné podložky

Mez vyztužení podél skořepiny
Iso=Sqr((2*ris+eas)*eas)=Sqr((2*301,6+2,5)*2,5=38,91mm
Mez vyztužení podél hrdla
Ibo=Min(Sqr((deb-eb)*eb);ho)=Min(Sqr((108-2,375)*2,375);126)=15,84mm

Požadovaná oblast tlaku pAReq
pAReq=P*(Aps+Apb+0,5*Apphi)=0,174*(13997,1+946,73+0,5*0)=2,6kN

Oblast tlaku k dispozici pAAval
pAAval=(Afs+Afw)*(fs-0,5*P)+Afp*(fop-0,5*P)+Afb*(fob-0,5*P)=
=(97,28+0)*(166,67-0,5*0,174)+0*(0-0,5*0,174)+43,55*(166,67-0,5*0,174)=23,46kN
Vyztužení hrdla pAAval=23,46kN≥pAReq=2,6kN=>vyhovuje

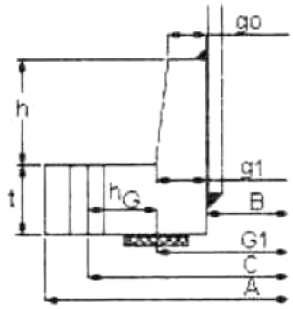
Maximální přípustný tlak Pmax
Pmax=(Afs+Afw)*fs+Afb*fob/((Aps+Apb+0,5*Appihi)+0,5*(Afs+Afw+Afb+Afp))=
=(97,28+0)*166,67+43,55*166,67/((13997,1+946,73+0,5*0)+0,5*(97,28+0+43,55+0)=1,56MPa
Tlak na přírubu při 100°C P=0,174≤Pmax(příruba)=1,56MPa=>vyhovuje

Ostatní hrdla jsou počítány stejným způsobem a pro dané rozměry a parametry vyhovují.

6.3 Návrh torosférického dna

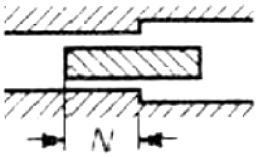
Teplota=100°C
P=0,17MPa
c=2mm

TYP PŘÍRUBY A TĚSNĚNÍ
Standartní příruba: Upřesnění příruby



Obr.12: Příruba torosférického dna

Typ příruby: Příruba s nákružkem a úzkým těsnící plochou



Obr.13: Způsob utěsnění

Hodnoty skořepiny:
Použitý materiál: EN 10028-7:2007, 1.4539 X1NiCrMoCu25-20-5
Hodnoty při teplotě 100°C: Rm=530MPa, Rp=270MPa, Rpt=235MPa, fs20=180MPa, ftest=265MPa, E=193180N/mm2
Vnější průměr skořepiny:Do=377mm

Parametry příruby:
Vnitřní průměr příruby: B=382mm
Vnější průměr příruby: A=485mm
Tloušťka příruby: e=30mm
Použitý materiál: EN 10028-7:2007, 1.4539 X1NiCrMoCu25-20-5

Parametry šroubů:
Použité šrouby: M20x2,5
Počet šroubů: n=12
Účinná plocha šroubů: Ae=225,2mm2
Doporučená minimální vzdálenost od středu šroubu k okraji: Bce=21mm
Doporučená minimální vzdálenost od středu šroubu k poloměru: Bcr=29mm
Průměr děr pro šrouby v přírubě: d=22mm
Průměr roztečné kružnice šroubů: C=445mm
Materiálové parametry šroubů: Rm=500MPa, Rp=300MPa, Rpt=250MPa, Sb=88,33mm2, Sa=100mm2, Ftest=150N/mm2

Parametry těsnění:
Faktor těsnění: m=2,75
Faktor společného kontaktu ploch, celkový dosedací tlak: y=25N/mm2
Typ těsnění: Temacarb
Vnější průměr těsnění: Go=415mm
Vnitřního průměr: A1=379mm
TEMA RGP-RCB-11.7

Jedná těsnění ze speciálního materiálu na bázi uhlíkových vláken a speciálních přísad spojených kvalitním NBR. Tato těsnění se používají převážně pro vyšší teploty a tlaky, hlavně pro přehřátou páru. Těsnění temacarb jsou vhodná i pro zásaditá média. Maximální pracovní teplota se pohybuje do 250°C a krátkodobě snesou i teplotu 450°C. Maximální tlak je až 140 barů.

Výpočet těsnění:
Faktor korekce tlaku K
K=1 (pro D<1000mm)
b=7,56mm

Zatížení příruby
H=0,785*G^2*p=0,785*399,88^2*0,1853=23,26kN
HG=(2*PI*b*G*m)*p=(2*3,14*7,56*399,88*2,75)*0,1853=9,68kN
HD=0,785*B^2*p=0,758*382^2*0,1853=21,23kN
HT=H-HD=23,26-21,23=2,03kN

Velikost ramen momentů
hG=(C-G)/2=(445-399,88)/2=22,56mm
hD=(C-B)/2=(445-382)/2=31,5mm
hT=(2*C-B-G)/4=(2*445-382-399,88)/4=27,03mm

Zatížení šroubů
Provozní stav
Wop=H+HG=23,26+9,68=<u>32,94kN</u>
Horní stav
Wamb=PI*b*G*y=3,14*7,56*399,88*25=<u>237,43kN</u>
Oblast šroubového spoje
Am1=Wop/Sb=32938,92/83,33=<u>395.28mm2</u>
Am2=Wamb/Sa=2,3743E5/100=<u>2374,33mm2</u>

Požadovaná plocha šroubového spoje Am
Am=Max(Am1;Am2)=<u>2374,33mm2</u>

Možná plocha šroubového spoje
Ab=n*Ae=12*225,2=2702,4mm2
Ab≥Am=>vyhovuje
W=0,5*(Ab+Am)*Sa=0,5*(2702,4+2374,33)*100=253,84kN

Výpočet šroubů zahrnuje zjištění velikosti jednotlivých sil na nich. Velikost největší zátěžné síly je 237,43kN. Tato síla odpovídá hornímu meznímu stavu zatížení. Pro ni je spočtena nutná plocha šroubového spoje. Skutečná plocha šroubového spoje je vypočtena jako plocha jednoho šroubu násobená jejich počtem. Skutečná plocha šroubového spoje je větší než požadovaná. Šrouby tedy vyhovují.

MOMENTY ZATĚŽUJÍCÍ PŘÍRUBU
Mop=HD*hD+HT*hT+HG*hG=21,23*31,5+2,03*27,03+9,68*22,56=941,95Nm
Mamb=W*hG=253,84*22,56=5726,55Nm

Rozložení šroubů
Bspc=C*PI/n=445*3,14/12=116,5mm

Polohový korekční faktor šroubů
CF=Max(Sqr(Bspc/(2*db+6*e/(m+0,5));1)=Max(Sqr(116,5/(2*20+6*30/(2,75+0,5));1)=1,11
Mo=Mop*CF/B=941,95*1,11/382=2,74Nm
Ma=Mamb*CF/B=5726,55*1,11/382=16,64Nm

TVAROVÉ KONSTANTY
K=A/B=485/382=1,27
Lo=Sqr(B*go)=Sqr(382*3)=33,85
BetaT=1,81, BetaZ=4,268, BetaY=8,269, BetaU=9,087

PROVOZNÍ STAV
M=Mo=2,74Nm

Napětí příruby pro tloušťku (maximální) e=30mm
Tangenciální napětí
SigTeta=BetaY*M/e^2=8,269*16,64/30^2=152,88N/mm2
Podélné napětí
SigH=0N/mm2
Radiální napětí
Sigr=0N/mm2

SigTeta=152,88N/mm2≤f=173,33N/mm2=>vyhovuje

Velikost tangenciálního napětí je menší než velikost dovoleného napětí pro daný materiál. Příruba tedy vyhovuje.

Požadovaný minimální zkušební hydrostatický tlak: Ptmin
Ptmin=1,25*Pd*f20/f=1,25*0,17*173,33/156,67=0,2351MPa
Ptmin=1,43*Pd=1,43*0,17=0,2431MPa

Zkušební tlak Ptmin=0,2351MPa≤Ptmax=1,901MPa=>vyhovuje

Minimální zkušební tlak musí vyjít nižší než maximální tlak. Pokud by velikost minimálního zkušebního tlaku vyšla větší než maximálního znamenalo by to, že zkušební tlak musí byt větší než maximální a nádoba nevyhoví.

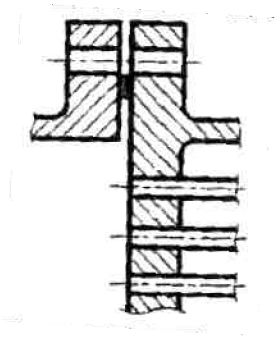
Napětí příruby pro tloušťku (pracovní) e=30mm
Tangenciální napětí
SigTeta=BetaY*M/e^2=8,269*2,74/30^2=25,15N/mm2
Podélné napětí
SigH=0N/mm2
Radiální napětí
Sigr=0N/mm2

Tangenciální napětí při pracovním momentu je menší než maximální. A proti dovolenému napětí je znatelně menší. Příruba tedy vyhovuje.

6.4 ČSN EN 13445-13 Trubkovnice

(položka 3)

Jedná se o výměník s pevnými trubkovnicemi.



Obr.14: Způsob sestavení trubkovnice

Typ sestavy: sestava b
Trubkovnice integrální s pláštěm a utěsněná přírubovým okrajem ke komoře.

Případy zatížení

Popis	Značka	pouze Pt	pouze Ps	Ps+Pt
Vnitřek skořepiny (Mpa)	Ps	0	0,3	0,3
Vnitřek trubek (Mpa)	Pt	0,17	0	0,17
Skořepina dovolená koreze (mm)	cs	1	1	1
Trubkovnice dovolená koreze (mm)	ct	2	2	2
Dovolené napětí M faktor	Mf	1	1	1
Teplotní napěťový faktor	MdT	0	0	0

tab.2: Případy zatížení

Popis	pouze dT	Pt+dT	Ps+dT	Ps+Pt+dT
Vnitřek skořepiny (Mpa)	0	0	0,3	0,3
Vnitřek trubek (Mpa)	0	0,17	0	0,17
Skořepina dovolená koreze (mm)	1	1	1	1
Trubkovnice dovolená koreze (mm)	2	2	2	2
Dovolené napětí M faktor	1	1	1	1
Teplotní napěťový faktor	1	1	1	1
Střední teplota trubek (°C)	143	143	143	143
Střední teplota skořepiny (°C)	109	109	109	109

tab.3: Případy zatížení

HODNOTY TRUBKOVNICE
Materiál: 10028-7:2007, 1.4539 X1NiCrMoCu25-20-5
Materiálové parametry: Rm=520MPa, Rp=260MPa, Rpt=235MPa, f=166,67, f20=173,33MPa, ftest=260MPa, E=193180N/mm2, ro=7,93
Vnější průměr trubkovnice: A=485mm
Tloušťka trubkovnice: en=40mm
Tlakový poměr pro materiál trubkovnice: v=0,3

TRUBKY
Materiál: 10216-5:2004/AC:08, 1.4539 X1NiCrMoCu25-20-5
Materiálové parametry: Rm=520MPa, Rp=250MPa, Rpt=235MPa, f20=166,67, ft=156,67MPa, ftest=238,1MPa, E=193180N/mm2, ro=7,93
Modul pružnosti: Et=1,9318E05N/mm2

Parametry trubek:
Vnější průměr trubek: dt=25mm
Tloušťka stěny trubky: et=2mm
Poloha trubky: p=32mm
Průměr díry v trubkovnici: dh=25,2mm
Průměr otrubkované plochy trubkovnice: Do=344,96
Počet trubek v trubkovnici: Nt=85 trubek
Koeficient tepelné roztažnosti trubek: atm=1,58E-05mm/mmC
Délka trubek mezi čely trubkovnice: L=926mm
Poisonova konstanta pro materiál trubek: vt=0,3

PARAMETRY SKOŘEPINY:
Použitý materiál: EN 10028-2:2003, 1.0425 P265GH
Hodnoty při teplotě 150°C: Rm=410MPa, Rp=265MPa, Rpt=223MPa, fs=148,67MPa, ftest=252,38MPa, f20=170,83MPa, E=202384N/mm2, ro=7,85
Vnitřní průměr skořepiny (zkorodované): Ds=363mm
Tloušťka stěny skořepiny (nezkorodované): es=8mm
Modul pružnosti: Es=1,9318E05N/mm2
Poisonova konstanta pro materiál skořepiny: vs=0,3
Koeficient tepelné roztažnosti pláště: asm=1,2235E-05mm/mmC

PARAMETRY KOMORY:
Materiál: 10028-7:2007, 1.4539 X1NiCrMoCu25-20-5
Materiálové parametry při teplotě 100°C: Rm=530MPa, Rp=270MPa, Rpt=235MPa, fc=166,67, f20=180MPa, ftest=265MPa, E=193180N/mm2, ro=7,93
Vnitřní průměr komory:Dc=371mm
Tloušťka stěny komory:ec=5mm
Modul pružnosti komory: Ec=1,9318E05N/mm2
Poisonova konstanta pro materiál komory: vc=0,3

PARAMETRY PŘÍRUBY:
Tloušťka stěny příruby: e=30mm
Efektivní dosedací šířka dosedací plochy těsnění: b=7,56mm
Těsnící faktor: m=2,75
Počet šroubů: n=12
Průměr roztečné kružnice šroubů: C=445mm
Průměr díry pro šrouby: d=22mm
Průměr kružnice reakce zatížení těsnění komory: Gc=399,88mm
Zatížení šroubů příruby ve smontovaném stavu: W=253,84kN

Trubkovnice musí být navržena pro všechny možné způsoby zatížení. Působení tlaku pouze v trubkách, působení tlaku pouze v plášti a jejich kombinace. Další zatížení trubkovnice je od teploty proudících médií. Toto zatížení také musí být vzato v potaz a zkombinováno se způsoby zatížení tlaky.

ZATÍŽENÍ: pouze Pt (Ps=0;dT=0)

PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET
Analyzovaná tloušťka trubkovnice ea
ea=en-ct-cs=40-2-1=37mm

Určení základní vazbové schopnosti pro střih
my=(p-dt)/p=(32-25)/32=0,2188

Určení základní vazbové schopnosti na ohyb
Poměr roztažnosti trubek
ro=Itx/ea=0/37=0
Efektivní průměr díry pro trubku
dstar=Max(dt-2*et*(Et/E)*(ft/f)*ro; dt-2*et)=
=Max(25-2*2*(19318/193180)*(156,67/166,67)*7,93;0,25-2*2)=25mm
Efektivní diametr polohy
pstar=p/Sqr(1-4*Min(S;4*Do*p)/(PI*Do^2))=32/Sqr(1-4*Min(0,4*344,96*32)/(3,14*344,96^2))=32mm
Mystar=(star-dstar)/pstar=(32-25)/32=0,218

Určení základní efektivní konstanty pružnosti
Estar/E=0,2046 (pro e/p=1,16)
Estar=E*0,2046=19318*0,2046=39518,99N/mm2
vstar=0,3938

Určení efektivního ohybové tuhosti
Dstar=(Estar*ea^3)/(13*(1-vstar^2))=(39518,99*37^3)/(12*(1-0,3938^2))=1,9743*10^8Nmm

Maximální dovolené společné napětí trubek v trubkovnici
fmin=Min(f;ft)=Min(166,67;156,67)=156,67N/mm2
ftj=0,8*fmin=0,8*156,67=125,34N/mm2

Maximální dovolené podélné napětí trubek
Sigtp=(Ps*dt^2-Pt*(dt-2*et)^2/(dt^2-(dt-2*et)^2)=(0*25^2-0,17*(25-2*2)^2)(25^2-(25-2*2)^2)=
=-0,4075N/mm2
Sigtcr=PI^*Et/Itbk^2*(dt^2+(dt-2*et)^2)/15=3,14^2*193180/926^2*(25^2+(25-2*2)^2)/16=
=148,14N/mm2
bo=0,206*Sqr(Sigtcr/Rpt)*(1-0,2*Sqr(Sigtcr/Rpt))=0,260*Sqr(148,14/235)*(1-0,2Sqr(148,14/235))=
=0,1376
ftbk=(x*Sigtp+(Rpt-Abs(x*Sigtp))/Sqr(1+(((1+bo)*Rtp-Abs(x*Sigtp))/Sigtcr)^2))/x=
=1,1*(-0,4074)+(235-Abs(1,1*(-0,4075)))/Sqr(1+(((1+0,1376*235-Abs(1,1*(-0,4074)))/148,14^2))/1,1=
=103,08N/mm2

Efektivní průměr trubkovnice De
De=(Ds+Gc)/2=(363+399,88)/2=381,44mm

Součinitel rozvrtání trubkovnice na plášťové straně
xs=1-Nt*(dt/De)^2=1-85*(25/381,44)^2=0,6349

Součinitel rozvrtání trubkovnice na straně trubkové
xt=1-Nt*((dt-2*et)/De)^2=1-85*((25-2*2)/381,44)^2=0,7424

Axiální tuhosti
Axiální tuhost trubky
Kt=PI*et*(dt-et)*Et/L=3,14*2*(25-2)*193180/926=30148,03N/mm
Axiální tuhost pláště
Ks=PI*es*(Ds+es)*Es/L=3,14*7*(363+7)*193180/926=1,6975*10^6N/mm
Poměr axiálních tuhostí pláště k axiální tuhosti trubkového svazku
Kst=Ks/(Nt*Kt)=1,6975E6/(85*30148,03)=0,6624
Modul pružného podkladu ekvivalentního trubkového svazku
Kw=8*Nt*Kt/(PI*De^2)=8*85*30148,03/(3,14*381,44^2)=44,85N/mm3
Součinitel tuhosti trubkového svazku k tuhosti trubkovnice
X=(Kw/Dstar)^0,25*De/2=(44,85/1,9743E8)^0,25*318,44/2=4,16
Okrajový moment potřebný pro natočení pláště o jednotkový úhel
ks=2*Es*(es)^2,5/((12*(1-vs^2))^0,75*(Ds+es)^0,5)=
=2*193180*(7)^2,5/((12*(1-0,3^2))^0,75*(363+7)^0,5)=4,3348*10^5N/mm2
Součinitel vetknutí okraje trubkovnice vzhledem k plášti a komoře
Z=(ks+kc)/(Kw^0,25*Dstar^0,75)=(1,3348E5+0)/(44,85^0,25*1,9743E8^0,75)=0,1006

Součinitel daný jako funkce X (z obrázku 13.5.4-1a2)
Fq=3,0245
Součinitel daný jako funkce X (z obrázku 13.5.5-1a2)
H=3,2560
Součinitel daný jako funkce X (z obrázku 13.5.6-1a2)
Fi=-0,6714

Efektivní tlak působící na trubkovnici Pe
Axiální diferenční teplotní dilatace mezi trubkami a pláštěm
Gamma=(atm*(ttm-20°C)-asm*(tsm-20°C))*L*Mdt=(1,589E-5*(0-20)*-1,223E-5*(0-20))*926*0=0mm
Pe=(J*Kst/(1+J*Kst*Fq))*(xs+2*vt*(1-xs)+(2*vs/Kst)-(1-J)/(2*J*Kst)*((Dj+2*wj)^2-Ds^2)/Ds^2)*Ps-
(J*Kst/(1+J*Kst*Fq)*(xt+2vt*(1-xt)+1/(J*Kst))*Pt+(J*Kst/(1+J*Kst*Fq)*(Kw/2)*Gamma=-0,0902MPa

Ohybové napětí v trubkovnici Sigma
Fm=1/(6*H)=1/(6*3,26)=0,0512
Sigma=1,5*Fm/Mystar*(De/(ea-hg))^2*Pe=1,5*0,0512/0,2188*(381,44/(37-0))^2*(-0,0902)=
=-3,37N/mm2
Sigma=3,37N/mm2≤1,5*f=250N/mm2=>vyhovuje

Smykové napětí v trubkovnici Tau
Tau=0,25*Do/(my*ea)*Pe=0,25*344,96/(0,2188*37)*(-0,9202)=-0,9614N/mm2
Tau=0,9614N/mm2≤0,8*f=133,34N/mm2=>vyhovuje
Pro všechny uvažované stavy nesmí smykové napětí v trubkovnici překročit 0,8*f.

VÝPOČET TRUBEK
Axiální membránové napětí
Pro vnější řadu trubek
Sigto=((Ps*xs-Pt*xt)-Pe*Fq)/(xt-xs)=((0*0,6349-0,17*0,7424)-(-0,0902)*3,02)/(0,7424-0,6349)=
=1,36N/mm2
Sigto=1,36N/mm2≤ftbk=104,06N/mm2=>vyhovuje

Pro vnitřní řadu trubek
Sigti=((Ps*xs-Pt*xt)-Pe*Fi)/(xt-xs)=((0*0,6349-0,17*0,7424)-(-0,0902)*(-0,6714))/(0,7424-0,6349)=
=-1,74/mm2
Sigti=1,74N/mm2≤ftbk=103,08N/mm2=>vyhovuje

Ekvivalentní napětí
Střední hodnota obvodového napětí v trubkách
Sigtteta=(Pt*(dt-2*et)-Ps*dt)/(2*et)=(0,17*(25-2*2)-0*25)/(2*2)=0,8925N/mm2
Střední hodnota radiálního napětí v trubkách
Sigtr=-(Pt+Ps)/2=-(0,17+0)/2=-0,085N/mm2
Maximální ekvivalentní napětí v trubkách
Sigteq=Max(Sigti-Sigtteta; Sigti-Sigtr; Sigtteta-Sigtr; Sigto-Sigtteta; Sigto-Sigtr)
Sigteq=2,63N/mm2
Sigteq=2,63N/mm2≤ft=156,67N/mm2=>vyhovuje

VÝPOČET PLÁŠTĚ
Axiální membránové napětí v plášti
Sigsm=Ds^2*(Pt+Pe)/(4*es*(Ds+es))=362^2*(0,17+(-0,0902)/(4*7*(363+7))=1,01N/mm2

Ekvivalentní napětí
Střední obvodové napětí v plášti
Sigsteta=Ps*Ds/(2*es)=0*363/(2*7)=0N/mm2
Střední radiální napětí v plášti
Sigsr=-Ps/2=-0/2=0N/mm2
Maximální ekvivalentní napětí
Sigeq=Max(Sigsm-Sigsteta; Sigsm-Sigsr; Sigsteta-Sigsr)=Max(1,01-0; 1,01-0; 0-0)=1,01N/mm2
Sigeq=1,01N/mm2≤fs=148,67N/mm2=>vyhovuje

VÝPOČET PLÁŠTĚ V MÍSTĚ SPOJENÍ S TRUBKOVNICÍ
Axiální ohybové napětí Sigsb
I1=Hnek*(2*Fqnek/(X*Z)+(1-(1-vstar)/(X*Z)))=2,02*(2*1,74/(4,16*0,1006)+(1-(1-0,3938)/(4,16-0,1006)))=15,83
Sigsb=ks/(ks+kc)*(De/(2*es))^2*Pe/I1=4,3348E5/(4,3348E5+0)*(381,44/(2*7))^2*(-0,0902)/15,83=
=-4,23N/mm2

Maximální ekvivalentní napětí v plášti v místě připojení k trubkovnici
Sigseq1=Max(Sigsm-Sigsb+Ps; Sigsm+Sigsb)=Max(1,01-(-4,23)+0; 1,01+(-4,23))=5,24N/mm2
Sigseq1=5,24N/mm2≤3*fs=446,01N/mm2=>vyhovuje

ZATÍŽENÍ: pouze Ps (Pt=0;dT=0)

PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET

Maximální dovolené podélné napětí trubek
Sigtp=(Ps*dt^2-Pt*(dt-2*et)^2/(dt^2-(dt-2*et)^2)=(0,3*25^2-0*(25-2*2)^2)(25^2-(25-2*2)^2)=
=1,02N/mm2
ftbk=(x*Sigtp+(Rpt-Abs(x*Sigtp))/Sqr(1+(((1+bo)*Rtp-Abs(x*Sigtp))/Sigtcr)^2))/x=
=(1,1*1,02+(235-Abs(1,1*1,02))/Sqr(1+(((1+0,1376)*235-Abs(1,1*1,02))/148,14^2))/1,1=
=104,41N/mm2

Efektivní tlak působící na trubkovnici Pe
Pe=(J*Kst/(1+J*Kst*Fq))*(xs+2*vt*(1-xs)+(2*vs/Kst)-(1-J)/(2*J*Kst)*((Dj+2*wj)^2-Ds^2)/Ds^2)*Ps-
(J*Kst/(1+J*Kst*Fq)*(xt+2vt*(1-xt)+1/(J*Kst))*Pt+(J*Kst/(1+J*Kst*Fq)*(Kw/2)*Gamma=0,1164MPa

Ohybové napětí v trubkovnici Sigma
Sigma=1,5*Fm/Mystar*(De/(ea-hg))^2*Pe=1,5*0,0512/0,2188*(381,44/(37-0))^2*0,1164=
=4,34N/mm2
Sigma=4,34N/mm2≤1,5*f=250N/mm2=>vyhovuje

Smykové napětí v trubkovnici Tau
Tau=0,25*Do/(my*ea)*Pe=0,25*344,96/(0,2188*37)*0,1164=1,24N/mm2
Tau=1,24N/mm2≤0,8*f=133,34N/mm2=>vyhovuje
Pro všechny uvažované stavy nesmí smykové napětí v trubkovnici překročit 0,8*f.

VÝPOČET TRUBEK
Axiální membránové napětí
Pro vnější řadu trubek
Sigto=((Ps*xs-Pt*xt)-Pe*Fq)/(xt-xs)=((0,3*0,6349-0*0,7424)-(-0,0902)*3,02)/(0,7424-0,6349)=
=-1,5N/mm2
Sigto=1,5N/mm2≤ftj=125,34N/mm2=>vyhovuje

Pro vnitřní řadu trubek
Sigti=((Ps*xs-Pt*xt)-Pe*Fi)/(xt-xs)=((0,3*0,6349-0*0,7424)-0,1164*(-0,6714))/(0,7424-0,6349)=
=2,5N/mm2
Sigti=2,5N/mm2≤ftj=125,34N/mm2=>vyhovuje

Ekvivalentní napětí
Střední hodnota obvodového napětí v trubkách
Sigtteta=(Pt*(dt-2*et)-Ps*dt)/(2*et)=(0*(25-2*2)-0,3*25)/(2*2)=-1,87N/mm2
Střední hodnota radiálního napětí v trubkách
Sigtr=-(Pt+Ps)/2=-(0+0,3)/2=-0,15N/mm2
Maximální ekvivalentní napětí v trubkách
Sigteq=Max(Sigti-Sigtteta; Sigti-Sigtr; Sigtteta-Sigtr; Sigto-Sigtteta; Sigto-Sigtr)
Sigteq=4,37N/mm2
Sigteq=4,37N/mm2≤ft=156,67N/mm2=>vyhovuje

VÝPOČET PLÁŠTĚ
Axiální membránové napětí v plášti
Sigsm=Ds^2*(Pt+Pe)/(4*es*(Ds+es))=362^2*(0+0,01164/(4*7*(363+7))=1,48N/mm2

Ekvivalentní napětí
Střední obvodové napětí v plášti
Sigsteta=Ps*Ds/(2*es)=0,3*363/(2*7)=7,78N/mm2
Střední radiální napětí v plášti
Sigsr=-Ps/2=-0,3/2=-0,15N/mm2
Maximální ekvivalentní napětí
Sigeq=Max(Sigsm-Sigsteta; Sigsm-Sigsr; Sigsteta-Sigsr)=Max(1,48-7,78; 1,48-(-0,15); 7,78-(-0,15))=
=7,93N/mm2
Sigeq=7,93N/mm2≤fs=148,67N/mm2=>vyhovuje

VÝPOČET PLÁŠTĚ V MÍSTĚ SPOJENÍ S TRUBKOVNICÍ
Axiální ohybové napětí Sigsb
Sigsb=ks/(ks+kc)*(De/(2*es))^2*Pe/I1=4,3348E5/(4,3348E5+0)*(381,44/(2*7))^2*0,1164/15,83=
=5,46N/mm2
Maximální ekvivalentní napětí v plášti v místě připojení k trubkovnici
Sigseq1=Max(Sigsm-Sigsb+Ps; Sigsm+Sigsb)=Max(1,48-5,46+0,3; 1,48+5,46)=6,94N/mm2
Sigseq1=6,94N/mm2≤3*fs=446,01N/mm2=>vyhovuje

ZATÍŽENÍ: pouze Ps+Pt (dT=0)

PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET
Maximální dovolené podélné napětí trubek
Sigtp=(Ps*dt^2-Pt*(dt-2*et)^2/(dt^2-(dt-2*et)^2)=(0,3*25^2-0,17*(25-2*2)^2)(25^2-(25-2*2)^2)=
=0,6116N/mm2
ftbk=(x*Sigtp+(Rpt-Abs(x*Sigtp))/Sqr(1+(((1+bo)*Rtp-Abs(x*Sigtp))/Sigtcr)^2))/x=
=1,1*0,6116+(235-Abs(1,1*0,6116))/Sqr(1+(((1+0,1376*235-Abs(1,1*0,6116))/148,14^2))/1,1=
=104,06N/mm2

Efektivní tlak působící na trubkovnici Pe
Axiální diferenční teplotní dilatace mezi trubkami a pláštěm
Pe=(J*Kst/(1+J*Kst*Fq))*(xs+2*vt*(1-xs)+(2*vs/Kst)-(1-J)/(2*J*Kst)*((Dj+2*wj)^2-Ds^2)/Ds^2)*Ps-
(J*Kst/(1+J*Kst*Fq)*(xt+2vt*(1-xt)+1/(J*Kst))*Pt+(J*Kst/(1+J*Kst*Fq)*(Kw/2)*Gamma=0,0262MPa

Ohybové napětí v trubkovnici Sigma
Sigma=1,5*Fm/Mystar*(De/(ea-hg))^2*Pe=1,5*0,0512/0,2188*(381,44/(37-0))^2*0,0262=
=0,9774N/mm2
Sigma=0,9774N/mm2≤1,5*f=250N/mm2=>vyhovuje

Smykové napětí v trubkovnici Tau
Tau=0,25*Do/(my*ea)*Pe=0,25*344,96/(0,2188*37)*(-0,9202)=0,2792N/mm2
Tau=0,2792N/mm2≤0,8*f=133,34N/mm2=>vyhovuje
Pro všechny uvažované stavy nesmí smykové napětí v trubkovnici překročit 0,8*f.

VÝPOČET TRUBEK
Axiální membránové napětí
Pro vnější řadu trubek
Sigto=((Ps*xs-Pt*xt)-Pe*Fq)/(xt-xs)=((0,3*0,6349-0,17*0,7424)-0,0262*3,02)/(0,7424-0,6349)=
=-0,1394N/mm2
Sigto=0,1394N/mm2≤ftbk=104,06N/mm2=>vyhovuje

Pro vnitřní řadu trubek
Sigti=((Ps*xs-Pt*xt)-Pe*Fi)/(xt-xs)=((0,3*0,6349-0,17*0,7424)-0,0262*(-0,6714))/(0,7424-0,6349)=
=0,7614/mm2

Sigti=0,7614N/mm2≤ftj=125,34N/mm2=>vyhovuje

Ekvivalentní napětí
Střední hodnota obvodového napětí v trubkách
Sigtteta=(Pt*(dt-2*et)-Ps*dt)/(2*et)=(0,17*(25-2*2)-0,3*25)/(2*2)=-0,9825N/mm2
Střední hodnota radiálního napětí v trubkách
Sigtr=-(Pt+Ps)/2=-(0,17+0,3)/2=-0,235N/mm2
Maximální ekvivalentní napětí v trubkách
Sigteq=Max(Sigti-Sigtteta; Sigti-Sigtr; Sigtteta-Sigtr; Sigto-Sigtteta; Sigto-Sigtr)
Sigteq=1,74N/mm2
Sigteq=1,74N/mm2≤ft=156,67N/mm2=>vyhovuje

VÝPOČET PLÁŠTĚ
Axiální membránové napětí v plášti
Sigsm=Ds^2*(Pt+Pe)/(4*es*(Ds+es))=362^2*(0,17+0,0262)/(4*7*(363+7))=2,5N/mm2

Ekvivalentní napětí
Střední obvodové napětí v plášti
Sigsteta=Ps*Ds/(2*es)=0,3*363/(2*7)=7,78N/mm2
Střední radiální napětí v plášti
Sigsr=-Ps/2=-0,3/2=-0,15N/mm2
Maximální ekvivalentní napětí
Sigeq=Max(Sigsm-Sigsteta; Sigsm-Sigsr; Sigsteta-Sigsr)=
=Max(2,5-7,78; 2,5-(-0,15); 7,78-(-0,15))=7,93N/mm2
Sigeq=7,93N/mm2≤fs=148,67N/mm2=>vyhovuje

VÝPOČET PLÁŠTĚ V MÍSTĚ SPOJENÍ S TRUBKOVNICÍ
Axiální ohybové napětí Sigsb
Sigsb=ks/(ks+kc)*(De/(2*es))^2*Pe/I1=4,3348E5/(4,3348E5+0)*(381,44/(2*7))^2*0,0262/15,83=
=1,23N/mm2
Maximální ekvivalentní napětí v plášti v místě připojení k trubkovnici
Sigseq1=Max(Sigsm-Sigsb+Ps; Sigsm+Sigsb)=Max(2,5-1,23+0,3; 2,5+1,23)=3,72N/mm2
Sigseq1=3,72N/mm2≤3*fs=446,01N/mm2=>vyhovuje

ZATÍŽENÍ: pouze dT (Ps=0;Pt=0)
PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET

Maximální dovolené podélné napětí trubek
Sigtp=(Ps*dt^2-Pt*(dt-2*et)^2/(dt^2-(dt-2*et)^2)=0N/mm2
ftbk=(x*Sigtp+(Rpt-Abs(x*Sigtp))/Sqr(1+(((1+bo)*Rtp-Abs(x*Sigtp))/Sigtcr)^2))/x=
=1,1*0+(235-Abs(1,1*0))/Sqr(1+(((1+0,1376)*235-Abs(1,1*0))/148,14^2))/1,1=
=103,55N/mm2

Efektivní tlak působící na trubkovnici Pe
Axiální diferenční teplotní dilatace mezi trubkami a pláštěm
Gamma=(atm*(ttm-20°C)-asm*(tsm-20°C))*L*Mdt=(1,589E-5*(109-20)*-1,223E-5*(143-20))*926*0=
=-0,084mm
Pe=(J*Kst/(1+J*Kst*Fq))*(xs+2*vt*(1-xs)+(2*vs/Kst)-(1-J)/(2*J*Kst)*((Dj+2*wj)^2-Ds^2)/Ds^2)*Ps-
(J*Kst/(1+J*Kst*Fq)*(xt+2vt*(1-xt)+1/(J*Kst))*Pt+(J*Kst/(1+J*Kst*Fq)*(Kw/2)*Gamma=-0,4154MPa

Ohybové napětí v trubkovnici Sigma
Sigma=1,5*Fm/Mystar*(De/(ea-hg))^2*Pe=1,5*0,0512/0,2188*(381,44/(37-0))^2*(-0,4154)=

=-15,5N/mm2
Sigma=15,5N/mm2≤2,25*f=375,01N/mm2=>vyhovuje

Smykové napětí v trubkovnici Tau
Tau=0,25*Do/(my*ea)*Pe=0,25*344,96/(0,2188*37)*(-0,4154)=-4,43N/mm2
Tau=4,43N/mm2≤0,8*f=133,34N/mm2=>vyhovuje
Pro všechny uvažované stavy nesmí smykové napětí v trubkovnici překročit 0,8*f.

VÝPOČET TRUBEK
Axiální membránové napětí
Pro vnější řadu trubek
Sigto=((Ps*xs-Pt*xt)-Pe*Fq)/(xt-xs)=((0*0,6349-0*0,7424)-(-0,4154)*3,02)/(0,7424-0,6349)=
=11,69N/mm2
Sigto=11,69N/mm2≤ftj=125,34N/mm2=>vyhovuje

Pro vnitřní řadu trubek
Sigti=((Ps*xs-Pt*xt)-Pe*Fi)/(xt-xs)=((0*0,6349-0*0,7424)-(-0,4154)*(-0,6714))/(0,7424-0,6349)=
=-2,59N/mm2
Sigti=2,59N/mm2≤ftbk=103,08N/mm2=>vyhovuje

Ekvivalentní napětí
Střední hodnota obvodového napětí v trubkách
Sigtteta=(Pt*(dt-2*et)-Ps*dt)/(2*et)=0N/mm2
Střední hodnota radiálního napětí v trubkách
Sigtr=-(Pt+Ps)/2=0N/mm2
Maximální ekvivalentní napětí v trubkách
Sigteq=Max(Sigti-Sigtteta; Sigti-Sigtr; Sigtteta-Sigtr; Sigto-Sigtteta; Sigto-Sigtr)
Sigteq=11,69N/mm2
Sigteq=11,69N/mm2≤1,5*ft=235N/mm2=>vyhovuje

VÝPOČET PLÁŠTĚ
Axiální membránové napětí v plášti
Sigsm=Ds^2*(Pt+Pe)/(4*es*(Ds+es))=362^2*(0+(-0,4154)/(4*7*(363+7))=-5,28N/mm2
fsbk=K*es*Es/(4*(Ds+es))=1*7*193180/(4*(363+7))=913,69N/mm2
Sigsm=5,28N/mm2≤fsbk=913,69N/mm2=>vyhovuje

Ekvivalentní napětí
Maximální ekvivalentní napětí
Sigeq=Max(Sigsm-Sigsteta; Sigsm-Sigsr; Sigsteta-Sigsr)=Max(-5,28-0; -5,28-0; 0-0)=5,28N/mm2
Sigeq=5,27N/mm2≤1,5*fs=223N/mm2=>vyhovuje

VÝPOČET PLÁŠTĚ V MÍSTĚ SPOJENÍ S TRUBKOVNICÍ
Axiální ohybové napětí Sigsb
Sigsb=ks/(ks+kc)*(De/(2*es))^2*Pe/I1=4,3348E5/(4,3348E5+0)*(381,44/(2*7))^2*(-0,4154)/15,83=
=-19,47N/mm2
Maximální ekvivalentní napětí v plášti v místě připojení k trubkovnici
Sigseq1=Max(Sigsm-Sigsb+Ps; Sigsm+Sigsb)=Max(-5,28-(-19,47)+0; -5,28+(-19,47))=24,76N/mm2
Sigseq1=24,76N/mm2≤3*fs=446,01N/mm2=>vyhovuje

ZATÍŽENÍ: Pt+dT (Ps=0)

Efektivní tlak působící na trubkovnici Pe
Axiální diferenční teplotní dilatace mezi trubkami a pláštěm
Gamma=(atm*(ttm-20°C)-asm*(tsm-20°C))*L*Mdt=
=(1,589E-5*(109-20)*-1,223E-5*(143-20))*926*0=-0,084mm
Pe=(J*Kst/(1+J*Kst*Fq))*(xs+2*vt*(1-xs)+(2*vs/Kst)-(1-J)/(2*J*Kst)*((Dj+2*wj)^2-Ds^2)/Ds^2)*Ps-(J*Kst/(1+J*Kst*Fq)*(xt+2vt*(1-xt)+1/(J*Kst))*Pt+(J*Kst/(1+J*Kst*Fq)*(Kw/2)*Gamma=-0,05056MPa

Ohybové napětí v trubkovnici Sigma
Sigma=1,5*Fm/Mystar*(De/(ea-hg))^2*Pe=1,5*0,0512/0,2188*(381,44/(37-0))^2*(-0,5056)=
=-18,86N/mm2
Sigma=3,37N/mm2≤2,25*f=375,01N/mm2=>vyhovuje

Smykové napětí v trubkovnici Tau
Tau=0,25*Do/(my*ea)*Pe=0,25*344,96/(0,2188*37)*(-0,5056)=-5,39 N/mm2
Tau=5,39N/mm2≤0,8*f=133,34N/mm2=>vyhovuje

VÝPOČET TRUBEK
Axiální membránové napětí
Pro vnější řadu trubek
Sigto=((Ps*xs-Pt*xt)-Pe*Fq)/(xt-xs)=((0*0,6349-0,17*0,7424)-(-0,5056)*3,02)/(0,7424-0,6349)=
=13,05N/mm2
Sigto=1,36N/mm2≤ftbk=104,06N/mm2=>vyhovuje

Pro vnitřní řadu trubek
Sigti=((Ps*xs-Pt*xt)-Pe*Fi)/(xt-xs)=((0*0,6349-0,17*0,7424)-(-0,5056)*(-0,6714))/(0,7424-0,6349)=
=-4,33/mm2
Sigti=4,33N/mm2≤ftbk=103,08N/mm2=>vyhovuje
Ekvivalentní napětí
Sigtr=-(pt+Ps)/2=-(0,17+0)/2=-0,085N/mm2
Maximální ekvivalentní napětí v trubkách
Sigteq=Max(Sigti-Sigtteta; Sigti-Sigtr; Sigtteta-Sigtr; Sigto-Sigtteta; Sigto-Sigtr)
Sigteq=13,14N/mm2
Sigteq=13,14N/mm2≤1,5*ft=235N/mm2=>vyhovuje

VÝPOČET PLÁŠTĚ
Axiální membránové napětí v plášti
Sigsm=Ds^2*(Pt+Pe)/(4*es*(Ds+es))=362^2*(0,17+(-0,5056)/(4*7*(363+7))=-4,27N/mm2

Ekvivalentní napětí
Maximální ekvivalentní napětí
Sigeq=Max(Sigsm-Sigsteta; Sigsm-Sigsr; Sigsteta-Sigsr)=Max(4,27-0; -4,27-0; 0-0)=4,27N/mm2
Sigeq=4,27N/mm2≤1,5*fs=223N/mm2=>vyhovuje

VÝPOČET PLÁŠTĚ V MÍSTĚ SPOJENÍ S TRUBKOVNICÍ
Axiální ohybové napětí Sigsb
Sigsb=ks/(ks+kc)*(De/(2*es))^2*Pe/I1=4,3348E5/(4,3348E5+0)*(381,44/(2*7))^2*(-0,5056)/15,83=
=-23,7N/mm2
Maximální ekvivalentní napětí v plášti v místě připojení k trubkovnici
Sigseq1=Max(Sigsm-Sigsb+Ps; Sigsm+Sigsb)=Max(4,27-(-23,7)+0; -4,27+(-23,7))=27,97N/mm2
Sigseq1=27,97N/mm2≤3*fs=446,01N/mm2=>vyhovuje

ZATÍŽENÍ: Ps+dT (Pt=0)

Maximální dovolené podélné napětí trubek
Sigtp=1,02N/mm2
ftbk=104,41N/mm2

Efektivní tlak působící na trubkovnici Pe
Axiální diferenční teplotní dilatace mezi trubkami a pláštěm
Gamma=-0,084mm
Pe=-0,2989MPa

Ohybové napětí v trubkovnici Sigma
Sigma=-11,15N/mm2
Sigma=11,15N/mm2≤2,25*f=375,01N/mm2=>vyhovuje

Smykové napětí v trubkovnici Tau
Tau=-3,19N/mm2
Tau=3,19N/mm2≤0,8*f=133,34N/mm2=>vyhovuje

VÝPOČET TRUBEK
Axiální membránové napětí
Pro vnější řadu trubek
Sigto=10,18N/mm2
Sigto=10,18N/mm2≤ftj=125,34N/mm2=>vyhovuje
Pro vnitřní řadu trubek
Sigti=-0,0953/mm2
Sigti=0,0953N/mm2≤ftbk=104,41N/mm2=>vyhovuje

Ekvivalentní napětí
Sigtteta=-1,84N/mm2
Sigtr=-0,15N/mm2
Maximální ekvivalentní napětí v trubkách
Sigteq=12,06N/mm2
Sigteq=12,06N/mm2≤1,5*ft=235N/mm2=>vyhovuje

VÝPOČET PLÁŠTĚ
Axiální membránové napětí v plášti
Sigsm=-3,8N/mm2
Ekvivalentní napětí
Sigsteta=Ps*Ds/(2*es)=0,3*363/(2*7)=7,78N/mm2
Sigsr=-Ps/2=-0,3/2=-0,15N/mm2
Maximální ekvivalentní napětí
Sigeq=11,58N/mm2
Sigeq=11,58N/mm2≤1,5*fs=223N/mm2=>vyhovuje

VÝPOČET PLÁŠTĚ V MÍSTĚ SPOJENÍ S TRUBKOVNICÍ
Axiální ohybové napětí Sigsb
Sigsb=-14,01N/mm2
Maximální ekvivalentní napětí v plášti v místě připojení k trubkovnici
Sigseq1=17,82N/mm2
Sigseq1=17,82N/mm2≤3*fs=446,01N/mm2=>vyhovuje

ZATÍŽENÍ: Pt+Ps+dT

Maximální dovolené podélné napětí trubek
Sigtp=0,6116/mm2
Sigtcr=148,14N/mm2
bo=0,1376
ftbk=104,06N/mm2

Efektivní tlak působící na trubkovnici Pe
Axiální diferenční teplotní dilatace mezi trubkami a pláštěm
Gamma=-0,084mm
Pe=-0,3892MPa

Ohybové napětí v trubkovnici Sigma
Sigma=-14,52N/mm2
Sigma=14,52N/mm2≤1,5*2,25=375N/mm2=>vyhovuje

Smykové napětí v trubkovnici Tau
Tau=-4,15N/mm2
Tau=4,15N/mm2≤0,8*f=133,34N/mm2=>vyhovuje

VÝPOČET TRUBEK
Axiální membránové napětí
Pro vnější řadu trubek
Sigto=11,55N/mm2
Sigto=11,55N/mm2≤ftj=125,34N/mm2=>vyhovuje

Pro vnitřní řadu trubek
Sigti=-1,83/mm2
Sigti=1,83N/mm2≤ftbk=103,08N/mm2=>vyhovuje

Ekvivalentní napětí
Sigtteta=-0,9825N/mm2
Sigtr=0,235N/mm2
Maximální ekvivalentní napětí v trubkách
Sigteq=12,53N/mm2
Sigteq=12,53N/mm2≤1,5*ft=235N/mm2=>vyhovuje

VÝPOČET PLÁŠTĚ
Axiální membránové napětí v plášti
Sigsm=-2,79N/mm2

Ekvivalentní napětí
Střední obvodové napětí v plášti
Sigsteta=7,78N/mm2
Střední radiální napětí v plášti
Sigsr=-0,15N/mm2
Maximální ekvivalentní napětí
Sigeq=Max(Sigsm-Sigsteta; Sigsm-Sigsr; Sigsteta-Sigsr)=10,57N/mm2
Sigeq=10,57N/mm2≤1,5*fs=223N/mm2=>vyhovuje

VÝPOČET PLÁŠTĚ V MÍSTĚ SPOJENÍ S TRUBKOVNICÍ
Axiální ohybové napětí Sigsb
Sigsb=-18,24N/mm2
Maximální ekvivalentní napětí v plášti v místě připojení k trubkovnici
Sigseq1=Max(Sigsm-Sigsb+Ps; Sigsm+Sigsb=21,03N/mm2
Sigseq1=21,03N/mm2≤3*fs=446,01N/mm2=>vyhovuje

6.5 ČSN EN 13445: 13.10 Výpočet přírubového okraje trubkovnice s úzkým těsněním.

Celkový moment působící na trubkovnici v podmínkách montáže
MA=W*(C-G)/2=253840*(445-399,88)/2=5,7266*10^6Nmm
Analyzovaná tloušťka přírubového okraje
eflA=Sqr(MA*Tmp/(PI*A*fa))=Sqr(5,7266E6*6,96/(3,14-485*235))=10,55mm

Celkový moment působící na trubkovnici při provozních podmínkách
Mop=9,1266*10^5Nmm (dle 13.10.5-4)
Požadovaná tloušťka pro provozní podmínky
eflop=5mm (dle 13.10.5-3)

ZKUŠEBNÍ TLAK

TRUBKOVNICE
Ptmin=Max1,43*0,17; 1,25*0,14*173,33/166,67)=0,2431MPa
Ptmin=0,2431≤Ptmax=8,22=>vyhovuje
PLÁŠŤ
Ptsmin=Max(1,43*Psd; 1,25*Psd*f20/f)=Max(1,43*0,3; 1,25*0,3*173,33/166,67)=0,4290MPa
Ptsmin=0,4290≤Ptsmax=10,5=>vyhovuje

Výpočet byl proveden pouze pro jednu trubkovnici při výpočtu druhé trubkovnice se postupuje stejným způsobem. Rozdílné jsou pouze střední teplota trubek 150°C a střední teplota skořepiny 114°C. Výpočet byl proveden pro všechny možné způsoby zatížení a jejich kombinace. Trubkovnice vyhovuje, žádné napětí nepřekračuje dovolené napětí pro daný materiál při zatížení.
Obě trubkovnice jsou integrální s pláštěm. Jsou k němu přivařeny.

VÝPOČET TRUBEK

Materiál: 10216-5:2004/AC:08, 1.4539 X1NiCrMoCu25-20-5
Materiálové parametry: Rm=520MPa, Rp=250MPa, Rpt=235MPa, f20=166,67, ft=156,67MPa, ftest=238,1MPa, E=193180N/mm2, ro=7,93

Parametry trubek:
Vnější průměr trubek: dt=25mm
Tloušťka stěny trubky: et=2mm
Poloha trubky: p=32mm
Průměr díry v trubkovnici: dh=25,2mm
Průměr otrubkované plochy trubkovnice: Do=344,96
Počet trubek v trubkovnici: Nt=85 trubek
Koeficient tepelné roztažnosti trubek: atm=1,58E-05mm/mmC
Délka trubek mezi čely trubkovnice: L=926mm
Tloušťka trubkovnice (nezkorodované): en=40mm
Negativní tolerance: 12,5%
Bezpečnostní faktor: 1,25

VÁLCOVÝ PLÁŠŤ POD VNITŘNÍM TLAKEM
Minimální tloušťka stěny trubek
emin=De*P/(2*f*z+P)=25*0,17/(2*156,67*1+0,17)=0,0136mm
emina=(emin+c+th)*(1+trend/100)=(0,0136+0+0,25)*(1+0/100)=0,2636mm
Analyzovaná tloušťka
ea=en/(1+trend/100)-c-th=2/(1+0/100)-0-0,25=1,75mm
emina=0,2636mm≤en=2mm=>vyhovuje

MAXIMÁLNÍ PŘÍPUSTNÝ PRACOVNÍ TLAK MAWP

Vnitřní průměr trubky
Di=dt-2*ea=25-1,75=21,5mm
Střední průměr trubky
Dm=(De+Di)/2=(25+21,5)/2=23,25mm
Zkorodovaný a zatížený teplotou
MAWPHC=2*f*z*ea/Dm=2*156,67*1*1,75/23,25=23,58MPa
Nezkorodovaný a studený
MAWPNC=2*f20*z*(ea+c)/Dm=2*166,67*1*(1,75+0)/23,25=25,09MPa

MAXIMÁLNÍ ZKUŠEBNÍ TLAK
Ptmax=2*ftest*(ea+c)/Dm=2*238,1*(1,75+0)/23,25=35,84MPa

ČSN EN 13445-5 10.2.3.3 MINIMÁLNÍ POŽADOVANÝ ZKUŠEBNÍ TLAK Ptmin
Ptmin=1,25*Pd*f20/f=1,25*0,17*166,67/155,67=0,2261MPa
Ptmin=1,43*pd=1,43*0,17=0,2431MPa
Ptmin=0,2261≤Ptmax=35,84=>vyhovuje

VÁLCOVÝ PLÁŠŤ POD EXTERNÍM TLAKEM

NOMINÁLNÍ MEZNÍ ROZTAŽENÍ
Sige=Rpr/(1,3*s)=235/(1,3*1,25)=144,62N/mm2
PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET
R=Dm/2=23,25/2=11,63mm
Z=PI*R/L=3,14*11,625/926=0,0394
Delta=1,28/Sqr(R*ea)=1,28/Sqr=0,2838
gamma=0

URČENÍ eps
eps je nejmenší když n=2
eps=0,006231
MEMBRÁNOVÝ ZISK py
py=Sige*ea/(R*1-gamma*G))=144,62*175/(11,625*(1-0*0)=21,77MPa
ELASTICKÁ NESTÁLOST pe
pm=E*ea*eps/R=193180*1,75*0,0062/11,625=181,19MPa
MAXIMÁLNÍ PŘÍPUSTNÝ TLAK Pmax
pr=Value1*py=0,9585*21,77=20,87MPa
Pmax=pr/k=20,87/1,5=13,91MPa
Externí tlak Pmax=13,91Mpa≥Pext=0,3Mpa=>vyhovuje

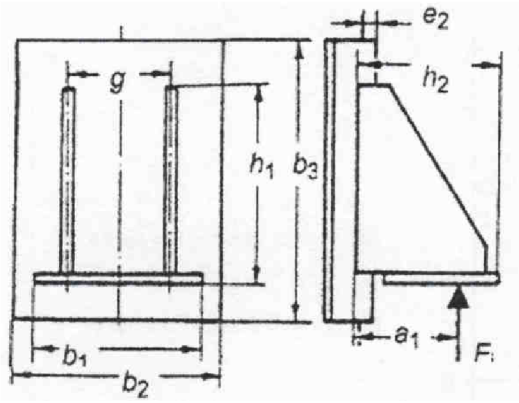
Maximální tlak působící na vnější stranu trubek je 0,3MPa maximální možný tlak činí 13,91Mpa. Trubky na vnější tlak vyhovují.

Maximální vnější zkušební tlak
Ptemax=Pr1/1,1=22,2/1,1=20,18MPa

6.6 Návrh patek

Vnější průměr pláště: De=377mm
Tloušťka stěny (nezkorodovaný): en=8mm
Negativní tolerance: th=0,5mm
Použitý materiál: EN 10028-2:2003/AC:06, 1.0425 P265GH
Hodnoty při teplotě 150°C: Rm=410MPa, Rp=265MPa, Rpt=223MPa, fs=148,67MPa, ftest=252,38MPa, f20=170,83MPa, E=202384N/mm2, ro=7,85

GEOMETRIE PATEK



Obr.14: Geometrie patek

Type A
Použitý materiál: EN 10028-2:2003/AC:06, 1.0425 P265GH
Hodnoty při teplotě 150°C: Rm=410MPa, Rp=265MPa, Rpt=223MPa, fs=148,67MPa, ftest=252,38MPa, f20=170,83MPa, E=202384N/mm2, ro=7,85
b1=120mm; g=92mm; h=0mm; h1=190mm; h2=120mm; Počet patek: n=2; a1=91,5mm; er=ec=8mm; a2=50mm

HODNOTY SVARU
Svarový součinitel: z=0,5
Svar mezi padkou a pláštěm: ab=ag=4mm

Popis	Značka	Zkouška	Provoz	Jednotka
Celková vertikální síla	FV	4,908	4,53	kN
Celková horizontální síla	FH	0	0	kN
Ohybový moment	MA	0	0	kNm
Vnitřní tlak	Pi	0,43	0,3	Mpa
Korozní přídavek	c	1	1	mm

tab.4 zatížení působící na patku

PŮSOBÍCÍ NAPĚTÍ: TLAKOVÁ ZKOUŠKA

Analyzovaná tloušťka pláště
ea=en-c-th=8-1-0,5=6,5mm
Vnitřní průměr pláště
Di=De-2*(en-c)=377-2*(8-1)=363mm
Ekvivalentní průměr pláště
Deq=Di=363mm

Podmínky platnosti
0,001≤en/Deq=0,022≤0,05=>vyhovuje

0,2≤g/h1=0,4842≤1=>vyhovuje

PŮSOBÍCÍ SÍLY
Vertikální síla
Fvi=(FV+4*MA/(Di+2*(a1+ea)))/n=(4,908+4*0/(363+2*(91,5+6,5)))/2=2,45kN
Horizontální síla
Fhi=FH/n=0/2=0kN

ZÁTĚŽNÉ LIMITY PLÁŠTĚ
Lamda=h1/Sqr(Deq*ea)=190/Sqr(363*6,5)=3,91
K16=1/Sqr(0,36+0,4*Lamda+0,02*Lamda^2)=1/Sqr(0,36+0,4*3,91+0,02*3,91^2)=0,6696
Ny1=Min(0,08*Lamda; 0,3)=Min(0,08*3,91; 0,3)=0,3
Sigm=P*Deq/(2*ea)=0,43*363/(2*6,5)=12,01N/mm2
Ny2=Sigm/(K2*fs)=12,01/(1,05*252,38)=0,0453
Sigball=k1*K2*fs=1,24*1,05*252,38=328,36N/mm2
aleq=a1+Fhi*h/Fvi=91,5+0/2,454=91,5mm
Fimax=(Sigball*ea^2*h1/(k16*aleq))*Min(1; 0,5+g/h1)=
=(238,36*6,5^2*190/(0,6696*91,5))*Min(1; 0,5+92/190)=42,35kN
Fvi=2,454kN≤Fimax=42,53kN=>vyhovuje

Minimální tloušťka patky
Vliv tlaku
Pb=Fvi/(b1*a2)=2,454/(120*50)=0,4090N/mm2

Plát se dvěma klíny
tbBendink=Sqr(Fvi*g/((h2-dh)*fb))=Sqr(2,454*92/((120-0)*252,38))=2,73mm
tbBearing=Sqr(beta*Pb*h2^2/fb)=Sqr(0,25*0,409*120^2/252,38=2,42mm
tbmin=Max(tbBending; tbBearing)=2,73mm
tbmin=2,73mm≤ec=8mm=>vyhovuje

Minimální požadovaná tloušťka plátu je 2,73mm, tloušťka plátu je 8mm. Podpěry tedy vyhovují.

Napětí v klínu/žebru
Axiální napětí
Fga=Fvi*Sin(teta)+Fhi*Cos(teta))=2,454*Sin(57,5)+0*Cos(57,5)=2,07kn
Ohybový moment
Mgb=Fvi*Cos(teta)*(a1-h2/2)*Sin(teta)+Fhi*h=34,9kNmm
Požadované tloušťka
trmin=2/(ng*fbc)*(Fga/(h2*Sin(teta))+6Mgb/(h2*Sin(teta))^2=0,3233mm≤8mm=>vyhovuje

MÍSTO SVAŘENÍ ZÁKLADNÍ DESKY A KLÍNU
Oblast svaření
Aw=4*ag*h1=4*4*190=3040mm2
Momenty
Ixx=2*ag*h1^3/6=2*4*190^3/6=9,1453*10^6mm4
Iyy=2*ag*h1^2*b1/2=2*4*190^2*120/2=1,7218*10^7mm4
Polární moment
Jxy=2*ag*h1*(3*b1^2+h1^2)/6=2*4*190*(3*120^2+190^2)/6=2,0089*10^7mm4
Primární střihové napětí ve svaru
Tauw=Fvi/Aw=2,454/3040=0,8075N/mm2

Normální napětí ve svaru
Sigwx=(fvi*a1+Fhi*h)*ry/Ixx=(2,454*91,5+0*0)*95/9,1453*10^6=2,33N/mm2
Celkové napětí ve svaru A
SigwTotx=Sqr(Sigwx^2+3*Tauw^2)=sqr(2,33^2*0,8072^2)=2,72N/mm2≤z*fb=126,18N/mm2
=>vyhovuje

Horizontální napětí v příčném směru
Tauyw=Abs(Fhi/Aw)=Abs(0/3040)=0N/mm2
Normální napětí ve svaru X-X
SigwyTw=Fhi*a1*rx/Iyy=0*91,5*60/1,7328E7=0N/mm2
Normální napětí ve svaru Y-Y
SigwyB=Fgi*a1*rx/Iyy=0*91,5*60/1,7328E7=0N/mm2
Střihové napětí od kroutícího Momentu y-y
TauyTw=Fhi*h*ry/Jxy=0N/mm2
Celkové střihové napětí
TauTot=Sqr((Tauw+TauxTw)^2+(Tauw+TauyTw)^2)=1,14N/mm2
Celkové napětí ve svaru B
SigwTotb=Sqr(SigwxB^2+SigwyB^2+3*TauTot^2=3,06N/mm2≤z*fb=126,19N/mm2=>vyhovuje

PŮSOBÍCÍ NAPĚTÍ: PROVOZNÍ STAV

PŮSOBÍCÍ SÍLY

Vertikální síla
Fvi=(FV+4*MA/(Di+2*(a1+ea)))/n=(4,53+4*0/(363+2*(91,5+6,5)))/2=2,27kN
Horizontální síla
Fhi=FH/n=0/2=0kN

ZÁTĚŽNÉ LIMITY PLÁŠTĚ

Sigm=P*Deq/(2*ea)=0,3*363/(2*6,5)=8,38N/mm2
Ny2=Sigm/(K2*fs)=8,38/(1,05*252,38)=0,0451
Sigball=k1*K2*fs=1,24*1,05*252,38=328,36N/mm2
Fimax=(Sigball*ea^2*h1/(k16*aleq))*Min(1; 0,5+g/h1)=
=(230,31*6,5^2*190/(0,6696*91,5))*Min(1; 0,5+92/190)=29,7kN
Fvi=2,265kN≤Fimax=29,7kN=>vyhovuje

Minimální tloušťka patky
Vliv tlaku
Pb=Fvi/(b1*a2)=2,265/(120*50)=0,3775N/mm2

Plát se dvěma klíny
tbBendink=Sqr(Fvi*g/((h2-dh)*fb))=Sqr(2,265*92/((120-0)*148,67))=3,42mm
tbBearing=Sqr(beta*Pb*h2^2/fb)=Sqr(0,25*0,3775*120^2/148,67)=3,02mm
tbmin=Max(tbBending; tbBearing)=3,42mm
tbmin=3,42mm≤ec=8mm=>vyhovuje

Minimální požadovaná tloušťka plátu pro provozní stav je 3,42mm, tloušťka plátu je 8mm. Podpěry tedy vyhovují.

Napětí v klínu/žebru
Axiální napětí
Fga=Fvi*Sin(teta)+Fhi*Cos(teta))=1,92kN
Ohybový moment
Mgb=Fvi*Cos(teta)*(a1-h2/2)*Sin(teta)+Fhi*h=32,21kNmm

Požadované tloušťka
trmin=2/(ng*fbc)*(Fga/(h2*Sin(teta))+6Mgb/(h2*Sin(teta))^2=0,5065mm≤8mm=>vyhovuje

MÍSTO SVAŘENÍ ZÁKLADNÍ DESKY A KLÍNU
Primární střihové napětí ve svaru
Tauw=Fvi/Aw=2,265/3040=0,7451N/mm2
Normální napětí ve svaru
Sigwx=(fvi*a1+Fhi*h)*ry/Ixx=2,15N/mm2
Celkové napětí ve svaru A
SigwTotx=Sqr(Sigwx^2+3*Tauw^2)=2,51N/mm2≤z*fb=74,335N/mm2=>vyhovuje

Horizontální napětí v příčném směru
Normální napětí ve svaru X-X
TauTot=Sqr((Tauw+TauxTw)^2+(Tauw+TauyTw)^2)=1,05N/mm2
Celkové napětí ve svaru B
SigwTotb=Sqr(SigwxB^2+SigwyB^2+3*TauTot^2=2,82N/mm2≤z*fb=74,335N/mm2=>vyhovuje

7. Zhodnocení výpočtu

Kontrola všech tlakem zatížených částí byla provedena dle ČSN EN 13445. Jedná se o trubkový výměník s pevnými integrálními trubkovnicemi s pláštěm. Trubkovnice jsou spojeny s pláštěm svarem. Nejdříve se u každé zatížené části výměníku určí maximální hodnoty přípustného namáhání pro daný materiál a teplotu. Dále se určí skutečné namáhání jednotlivých částí a tyto hodnoty se porovnají. Pokud je dovolené namáhání menší než namáhání skutečné, součást vyhovuje.

Návrh součástí se provádí zvlášť pro provozní podmínky a zvlášť pro podmínky tlakové zkoušky. Parametry podmínek tlakové zkoušky a provozní se značně liší. Tlaková zkouška se provádí při teplotě 20°C a zkušebním tlaku, který je vyšší než provozní.

Hlavní zatížené části výměníku:

Plášť:

Při výpočtu pláště se nejdříve vypočítá minimální tloušťka stěny, která se následovně porovná se zvolenou tloušťkou. Dále se určí hydrostatické tlaky.

Torosférické dno:

Provede se výpočet tloušťky stěny dna a maximálních tlaků pro všechny možné stavy. Jedná se o stavy jak pro nový tak i zkorodovaný výměník zatížený teplotou a bez teploty. Následuje výpočet průměru největšího nevyztuženého otvoru. Pokud by některý otvor ve skořepině překročil maximální rozměr nevyztuženého otvoru bylo by nutné otvor vyztužit.
Následuje návrh příruby, těsnění a šroubů. Výpočet šroubů zahrnuje zjištění velikosti jednotlivých sil na nich. Pro největší sílu se vypočítá potřebná plocha šroubového spoje a podělí počtem šroubů. Příruba je zatěžována ohybovými momenty od šroubového spoje.

Těsnění:

Jako těsnění bylo použito těsnění typu TEMACARB. Jedná se o těsnění ze speciálního materiálu na bázi uhlíkových vláken a speciálních přísad spojených kvalitním NBR. Tato těsnění se používají převážně pro vyšší teploty a tlaky, hlavně pro přehřátou páru. Těsnění temacarb jsou vhodná i pro zásaditá média. Maximální pracovní teplota se pohybuje do 250°C a krátkodobě snesou i teplotu 450°C. Maximální pracovní tlak je 140Barů.

Hrdlo:

Výpočet hrdla se provádí pro všechny možné způsoby zatížení, jak vnější tak vnitřní. Jsou to smyková napětí a jejich kombinace s vnitřním tlakem.

Trubkovnice:

Trubkovnice jsou integrální s pláštěm a utěsněná přírubovým okrajem ke komoře. Výpočet trubkovnice musí být proveden pro všechny možné způsoby zatížení. Působení vnějšího, vnitřního tlaku a teploty. Výpočet byl proveden pro každé zatížení zvlášť a následně pro všechny možné stavy. Nejprve se tento výpočet provede pro provozní stav a následně pro stav zkušební.

Patky:

Výpočet patek byl proveden pro zatížení vzniklé provozním a zkušebním stavem. Určuje se napětí ve svarech a porovnává se s dovoleným napětím pro daný materiál násobený svarovým součinitelem.

Obr.15: Fotografie výměníku z montáže z Královopolské Brno

8. Závěr

V práci byla zpracována problematika výměníků tepla a návrh nového trubkového rekuperačního výměníku tepla s pevnými trubkovnice pro dané vstupní parametry přiváděného média. Teplonosným médiem je v tomto výměníku voda.

V úvodní části byl rozebrán princip funkce výměníku jakožto zařízení zprostředkovávajícího přestup tepla mezi proudícími médii.

Další část práce je zaměřena na rozdělení výměníku z různých hledisek. Zabýval jsem se hlavně trubkovými rekuperačními výměníky. Tyto výměníky nacházejí širokou míru uplatnění v chemii, petrochemii, energetických zařízeních, průmyslových provozech, potravinářství, atd.

Životnost výměníků ovlivňují mechanické poruchy, můžeme je rozdělit na poruchy vzniklé při výrobě a poruchy způsobené proudícím médiem. Poruchy způsobené proudícím médiem jsou: koroze, abraze a zanášení výměníku. Tyto jednotlivé poruchy lze ovlivnit čistotou média, konstrukcí výměníku a užitím kvalitnějších materiálů. Druhou skupinou poruch jsou vady vzniklé při výrobě. Mezi tyto vady nejčastěji patří: netěsnosti v zaválcování trubek, špatné svary, trhliny v trubkách, kavitační poškození. Těmto vadám lze předejít vhodnějším konstrukčním řešením výměníku a zjištěním vad nedestruktivními zkouškami, nebo jejich zjištěním při tlakové zkoušce.

Pro zjištění případných vad ve svarech tlakových nádob se provádí zkoušky svarového spoje. Zkoušky jsou nedestruktivní a destruktivní. Mezi nedestruktivní zkoušku pro zjištění povrchových vad patří vizuální kontrola svarového spoje. Pro kontrolu skrytých povrchových vad se provádí zkouška ultrazvukem, prozářením a penetrační zkouška. Zkoušky se používají podle určení tlakové nádoby. Destruktivní zkoušky jsou: tahem, ohybem a rázem v ohybu. Údaje z provedených zkoušek jsou součástí pasportu tlakové nádoby.

Kontrola všech tlakem zatížených částí byla provedena dle normy ČSN EN 13445. Nejdříve u každé zatížené části výměníku byly určeny maximální hodnoty dovoleného namáhání pro daný materiál a teplotu. Dovolená namáhání se pro různé teploty stejného materiálu liší. Dále bylo určeno skutečné namáhání jednotlivých částí a tyto hodnoty se porovnaly. Pokud je menší dovolené namáhání než namáhání skutečné součást vyhovuje.

Výpočet součástí byl proveden zvlášť pro provozní podmínky a zvlášť pro podmínky tlakové zkoušky. Parametry podmínek tlakové zkoušky a provozní se značně liší. Tlaková zkouška se provádí při teplotě 20°C a zkušebním tlaku, který je vyšší než provozní.

Veškeré části výměníku tepla pro dané parametry vyhovují. Hlavní zatížené části výměníku jsou dna, plášť, hrdla, trubkovnice a patky.

9. Použité zdroje

[1]Baláš, M.:Kotle a výměníky tepla, CERM Brno 2009.
[2]Norma ČSN EN 13445 Netopené tlakové nádoby
[3] Rekuperace tepla. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 15. 9. 2008, 23:19, last modified on 18. 5. 2006, 11:32 [cit. 2010-05-25]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Rekuperace_tepla>.
[4]obr.1 převzat z: http://www.atrea.cz/cz/rekuperace-tepla
[5]obr.2 převzat z: http://vetrani.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3688
[6]obr.3,4,5 převzaty z:
http://www.zvuengineering.cz/files/cz/brozury/Tepelne_vymeniky_brozura_revize_0.pdf
[7]obr.6 převzat z: http://www.bcb-plzen.eu/alfalaval/rozebiratelne.htm
[8]obr.7 převzat z: http://www.yulacorp.com/downloads/tema_nomenclature1.pdf
[9]obr.9,10 převzat z: http://www.worldwidemetric.com/pdf/flangesjoints.pdf
[10]obr.11 převzat z:
http://www.tracepartsonline.net/(S(ydvqaj45x10sts45ou2tnv55))/global/part.aspx?PartID=10-26122001-129861&sk_Reference=
[11] SITTECH [online]. [cit. 2010-05-25]. SITTECH. Dostupné z WWW: <http://www.sittech.cz/ploche/temacarb.htm>.

10. Seznam příloh

[1] Výkres sestavy výměníku
[2] Výrobní výkres trubkovnice