



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

NÁVRH A VÝPOČET VÝMĚNÍKU SPALINY - VZDUCH
PROJECT AND CALCULATION OF HEAT EXCHANGER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. ŠTEFAN KÓŠA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. ZDENĚK SKÁLA, CSC.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Štefan Kóša

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

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

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:

Návrh a výpočet výměníku spaliny -vzduch

v anglickém jazyce:

Project and calculation of heat exchanger

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh vysokoteplotního výměníku pro ohřev vzduchu pro expanzní turbínu

Cíle diplomové práce:

Navrhnout tepelný výměník pro ohřev vzduchu na teplotu 750C, tlak 0,4Mpa

Seznam odborné literatury:

Černý, Janeba, Teysler: Parní kotle, SNTL Praha
Budaj, F.: Parní kotle, podklady pro tepelný výpočet

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 3.11.2010

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato závěrečná práce se zabývá návrhem tepelného výměníku pro jednotku s plynovou turbínou. Natlakovaný vzduch z kompresoru je ohříván spalinami vzniklými zplyňováním a následným spalováním dřevné biomasy. Ohřátý vzduch je pak veden na expanzní turbínu. Pro tepelný a hydraulický výpočet byl použit program HTRI Xchanger Suite®. Práce zahrnuje stručný popis výměníků tepla, popis použitého programu, výpočet a volbu vstupních údajů, řešení a následné vyhodnocení výsledků. Její součástí je také výkresová dokumentace výměníku.

Klíčová slova: tepelný výměník, trubkový výměník s U-trubkami, spaliny, vzduch, tepelný a hydraulický výpočet, HTRI Xchanger Suite®

ABSCTRACT

This master's thesis is concerned with design of a heat exchanger for a unit with gas turbine. The pressurized air from the compressor is heated with flue gases from gasification and subsequent combustion of wooden biomass. Then it is led to the expansion turbine. For thermal and hydraulic calculations a program named HTRI Xchanger Suite® has been used. The thesis includes a brief description of heat exchangers, description of the used program, calculation and selection of input data, solving and conclusions. It contains also a layout of the exchanger.

Keywords: heat exchanger, tube and shell exchanger with U-tubes, flue gases, air, thermal and hydraulic calculation, HTRI Xchanger Suite®

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KÓŠA, Š.: *Návrh a výpočet výměníku spaliny – vzduch*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 68 s. Vedoucí závěrečné práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, bez cizí pomoci. Vycházel jsem přitom ze svých znalostí, odborných konzultací a odborné literatury uvedené v seznamu na konci práce.

V Brně 26. května 2011

.....
Štefan Kóša

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Zdeňkovi Skálovi, CSc. za obětavou pomoc a poskytnutí cenných informací při vypracování mé diplomové práce, dále rodině za podporu po celou dobu studia.

OBSAH

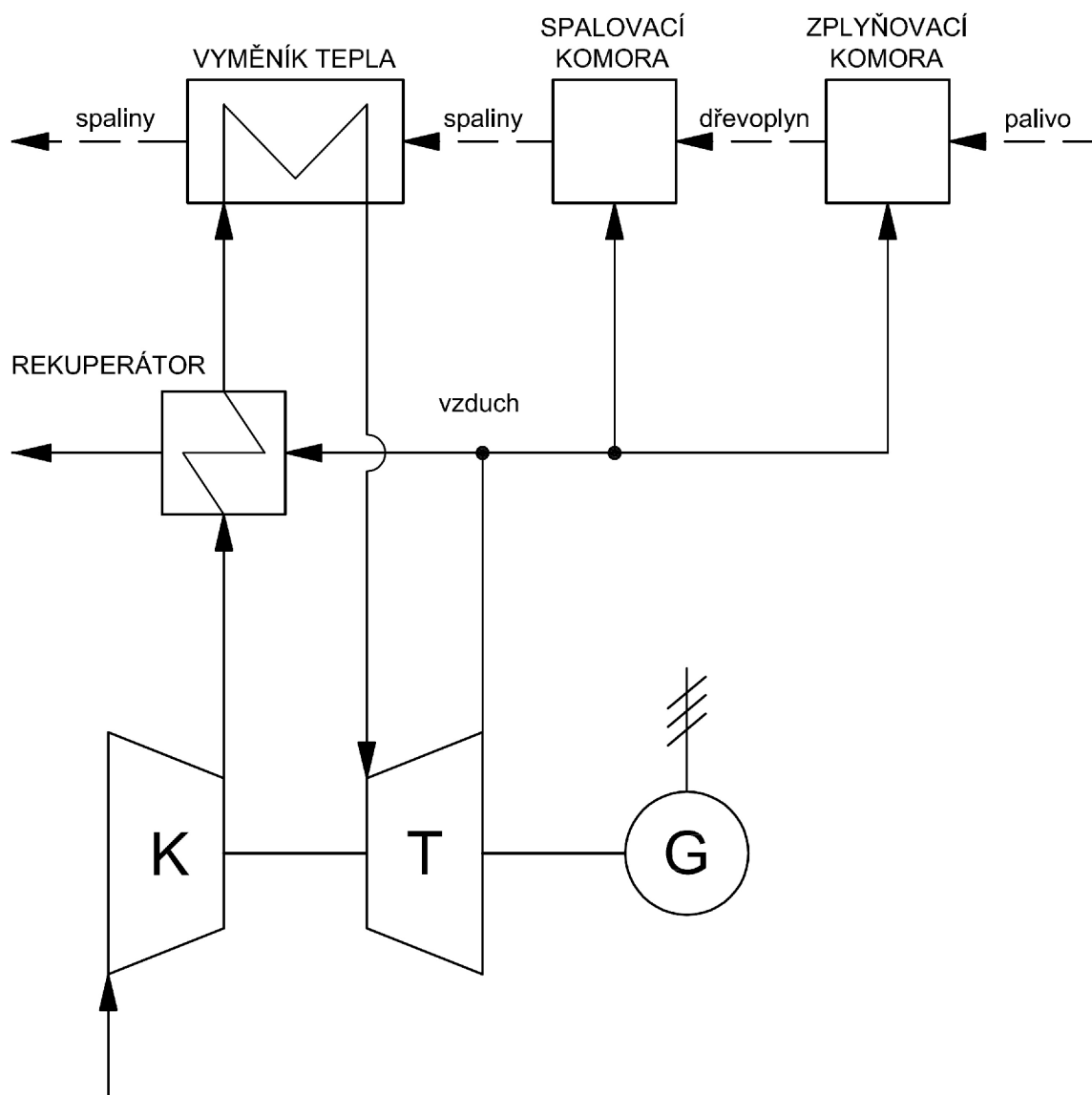
| | |
|---|-----------|
| 1. ÚVOD..... | 3 |
| 2. POPIS VÝMĚNÍKŮ TEPLA..... | 4 |
| 2.1. Princip funkce výměníků | 4 |
| 2.2. Rozdělení výměníků tepla | 4 |
| 2.2.1. Rozdělení podle vzájemného směru proudění teplosměnných medií..... | 4 |
| 2.2.2. Rozdělení podle pracovního pochodu..... | 5 |
| 2.2.3. Rozdělení podle způsobu přenosu tepla..... | 6 |
| 2.2.4. Rozdělení podle účelu použití..... | 6 |
| 2.2.5. Rozdělení podle kombinace teplosměnných médií..... | 6 |
| 2.2.6. Rozdělení podle konstrukčního řešení výhřevné plochy | 6 |
| 2.3. Trubkové výměníky tepla..... | 7 |
| 2.3.1. Popis trubkového výměníku tepla..... | 7 |
| 2.3.2. Rozdělení trubkových výměníků tepla | 11 |
| 2.4. Základní vztahy pro výpočet výměníku tepla | 13 |
| 2.4.1. Tepelný výpočet..... | 13 |
| 2.4.2. Hydraulický výpočet..... | 17 |
| 3. POPIS PROGRAMU HTRI XCHANGER SUITE® | 18 |
| 3.1. Všeobecný popis | 18 |
| 3.2. Popis výstupních protokolů..... | 19 |
| 4. VSTUPNÍ ÚDAJE PRO PROGRAM HTRI XCHANGER SUITE®..... | 20 |
| 4.1. Výpočet složení teplosměnných látek..... | 20 |
| 4.1.1. Výpočet složení vzduchu | 20 |
| 4.1.2. Výpočet složení spalin | 23 |
| 4.2. Návrh konstrukčního řešení výměníku..... | 26 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 4.3. | Volba materiálu výměníku..... | 27 |
| 4.3.1. | Materiál vysokoteplotní části..... | 27 |
| 4.3.2. | Materiál nízkoteplotní části..... | 27 |
| 4.4. | Volba ostatních parametrů | 27 |
| 5. | ŘEŠENÍ ZADÁNÍ V PROGRAMU HTRI XCHANGER SUITE® | 28 |
| 6. | VÝSLEDKY VÝPOČTU..... | 35 |
| 6.1. | Výstupní schémata | 35 |
| 6.1.1. | Vysokoteplotní část výměníku..... | 35 |
| 6.1.2. | Nízkoteplotní část výměníku | 36 |
| 6.2. | Shrnutí hlavních výsledků výpočtu | 37 |
| 6.2.1. | Vysokoteplotní část..... | 37 |
| 6.2.2. | Nízkoteplotní část | 38 |
| 7. | ZÁVĚR..... | 39 |
| 8. | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ..... | 40 |
| 9. | SEZNAM PŘÍLOH..... | 41 |
| 10. | PŘÍLOHY | 42 |

1. ÚVOD

Pro udržitelný rozvoj lidstva je jedním z nejdůležitějších faktorů zabezpečení dostatečného množství energie, přičemž její transformace ve využitelnou formu má být zároveň levná a šetrná k životnímu prostředí. V dnešní době se nejvíce využívají zdroje, které mění vázanou chemickou nebo nukleární energii na tepelnou a pak na elektrickou. Jedním z klíčových komponentů takových zařízení jsou tepelné výměníky, které kromě energetického průmyslu se uplatňují v řadě dalších odvětví jako chemický a potravinářský průmysl, metalurgie, klimatizace a další.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem výměníku tepla pro ohřev natlakovaného vzduchu, který následně expanduje v malé plynové turbíně. Ohřívacím médiem jsou spaliny vzniklé zplyňováním dřeva a následním spalováním vzniklého dřevoplynu. Návrh výměníku je proveden v programu HTRI Xchanger Suite®. Kromě zadaných údajů program vyžaduje další vstupní hodnoty, jako složení spalin, který je vypočten z průměrného prvkového složení dřeva. Tento výpočet a popis programu je proveden níže v rámci této práce.



Obr. 1-1: Základní schéma jednotky

2. POPIS VÝMĚNÍKŮ TEPLA

2.1. Princip funkce výměníků

Tepelné výměníky slouží k výměně tepelné energie mezi dvěma teplotními médii, přičemž hnací silou sdílení tepla je rozdíl teplot těchto médií, kde médium o vyšší teplotě sdílí energii médiu o nižší teplotě. Tento proces přenosu tepla může být kontinuální nebo přerušovaný. Návrh výměníků může být značně složitý, neboť tyto zařízení musí vyhovět různým požadavkům, jakými jsou například nízká cena, co nejmenší rozměry, vysoká účinnost, nízké tlakové ztráty, vysoká bezpečnost provozu a snadná údržba. Teplosměnné média často mají vysoké parametry, které ovlivňují výběr materiálu a konstrukci výměníku.

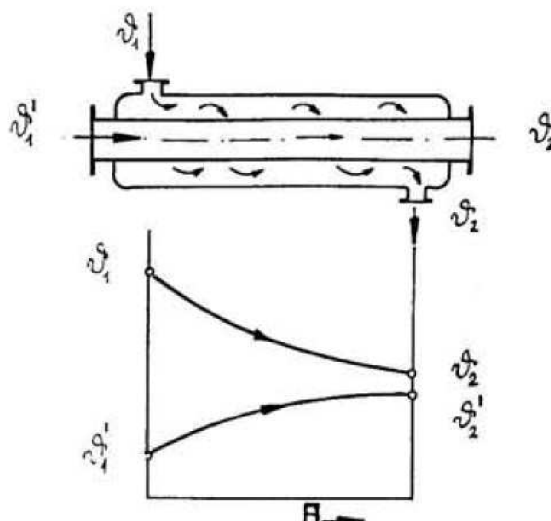
Proces sdílení tepla ve výměníku se provádí třemi základními mechanismy, vedením (kondukcí), prouděním (konvekce) a zářením (radiací). Při přenosu tepla vedením se tepelná energie přenáší z částic o vyšší energie (molekuly u kapalin a plynů a atomy v případě tuhého média) k částicím o nižší energie. Tento mechanismus lze charakterizovat jako difúzní proces sdílení tepla. Při konvekci jedno z teplosměnných médií musí mít kapalnou nebo plynnou skupenství, jelikož tento proces vyžaduje pohyb látky. Samotný proces se skládá ze dvou mechanismů a to z vedení tepla a zároveň z pohybu teplotního média. Výpočtové vztahy pro přenos tepla konvekci závisí na několika faktorech, mezi ně patří, zda se jedná o proudění nucené nebo přirozené, dále na tom, zda médium proudí vně (obtéká těleso) nebo uvnitř tělesa (např. kapalina v trubce). Při přenosu tepla sáláním není nutné, aby teplosměnné média byla v kontaktu, ani nevyžaduje žádné prostředkovací látku, jelikož se jedná o přenos energie ve formě elektromagnetického záření. Při reálných aplikacích přenos tepelné energie provádí všemi třemi mechanismy, přičemž většinou konvekce má největší podíl a radiace značně menší.

2.2. Rozdělení výměníků tepla

Výměníky tepla lze rozdělit podle mnoha kritérií, v této kapitole jsou popsány jenom ty nejdůležitější.

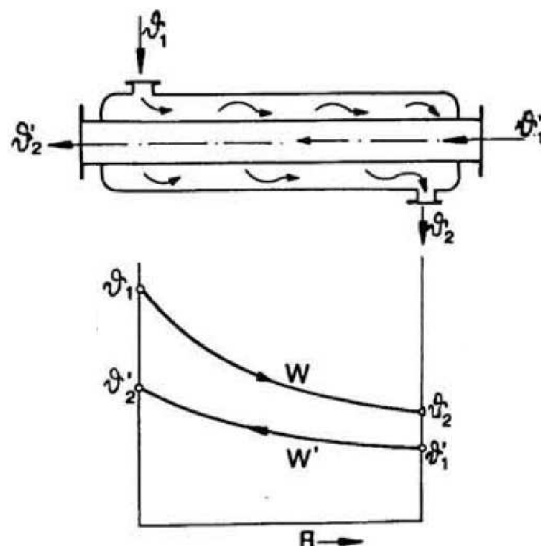
2.2.1. Rozdělení podle vzájemného směru proudění teplosměnných médií

- a) Souproudé – pracovní média proudí rovnoběžně a ve stejném směru. Tyto výměníky mají nižší účinnost než protiproudé, používají se v případě, když ohřívací médium má vysokou teplotu a je potřebné chladit teplosměnnou plochu (trubky) ohřívaným médiem.



Obr. 2-1: Souproudé uspořádání [1]

- b) Protiproudé – pracovní média proudí rovnoběžně, ale v opačném směru. Takové zařízení mají vyšší účinnost, umožňují vyšší výstupní teplotu ohřívaného média, avšak může vzniknout problém vysokou teplotou teplosměnného povrchu.

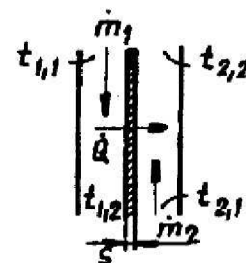


Obr. 2-2: Protiproudé uspořádání [1]

- c) Křížový proud – pracovní média proudí mimoběžně, zpravidla kolmo na sobě, používají se v případě, kdy jeden z teplosměnných médií mění své skupenství.
- d) Kombinované proudění – je to kombinace předchozích typů proudění, používá se při hledání kompromisů ve výhodách a nevýhodách těchto typů.

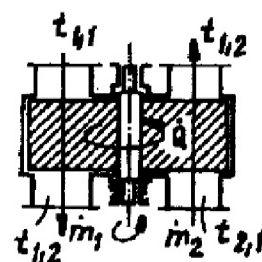
2.2.2. Rozdělení podle pracovního pochodu

- a) Rekupační – Teplosměnné média jsou oddělena nepropustnou stěnou, která tvoří teplosměnnou plochu. Teplo prostupuje přes tuto plochu. Mají nejširší oblast použití.



Obr. 2-3: Rekupační výměník [2]

- b) Regenerační – Tento typ výměníku využívá akumulární schopnost hmoty, která střídavě ochlazuje ohřívací médium a ohřívá ohřívané médium. Nejvíce se používají jako ohřívák vzduchu v parních kotlích (Ljungströmův regenerační ohřívák).



Obr. 2-4: Regenerační výměník [2]

- c) Kontaktní – Teplosměnné média jsou v kontaktu, ale nereagují, proto jsou snadně oddělitelné po předání tepla. Teplosměnnou plochu tvoří povrch látek. Příkladem jsou mokré chladicí věže.
- d) Směšovací – Teplosměnné média po kontaktu reagují a na výstupu z výměníku tvoří homogenní směs.

2.2.3. Rozdělení podle způsobu přenosu tepla

- a) Konvekční výměník – Přenos tepla se uskutečňuje hlavně konvekcí.
- b) Radiační výměník – Přenos tepla se uskutečňuje hlavně sálavým mechanismem.
- c) Kombinovaný výměník – Teplo se předává prouděním i radiací.

2.2.4. Rozdělení podle účelu použití

- a) Ohříváky – Cílem je ohřátí média bez fázové přeměny.
- b) Chladiče – Cílem je snížení teploty beze změny fáze.
- c) Výparníky a odparky – Ohřívání médium mění své skupenství a vyparuje se.
- d) Kondenzátory – Pracovní médium mění své fázi a kondenzuje se.
- e) Přehříváky a přihříváky – Slouží k dalšímu ohřevu páry.
- f) Sušárny – Cílem je snížení vlhkosti látky.
- g) Termické odplynění – Ohřátí vody na bod varu což způsobuje vylučování rozpuštěných plynů.
- h) Topná tělesa – Cílem je ohřátí vzduchu v místnosti.

2.2.5. Rozdělení podle kombinace teplosměnných médií

- a) Voda – voda
- b) Pára – pára
- c) Voda – pára
- d) Vzduch – pára
- e) Olej – pára
- f) Spaliny – voda
- g) Spaliny – pára
- h) Spaliny - vzduch

V ostatních oblastech energetiky a průmyslu jako teplosměnné médium se používají další látky, jako CO₂, DO₂, He, K-Na, Pb-Bi, SO₂, NH₃, H₂, freony, silikonové oleje, atd.

2.2.6. Rozdělení podle konstrukčního řešení výhřevné plochy

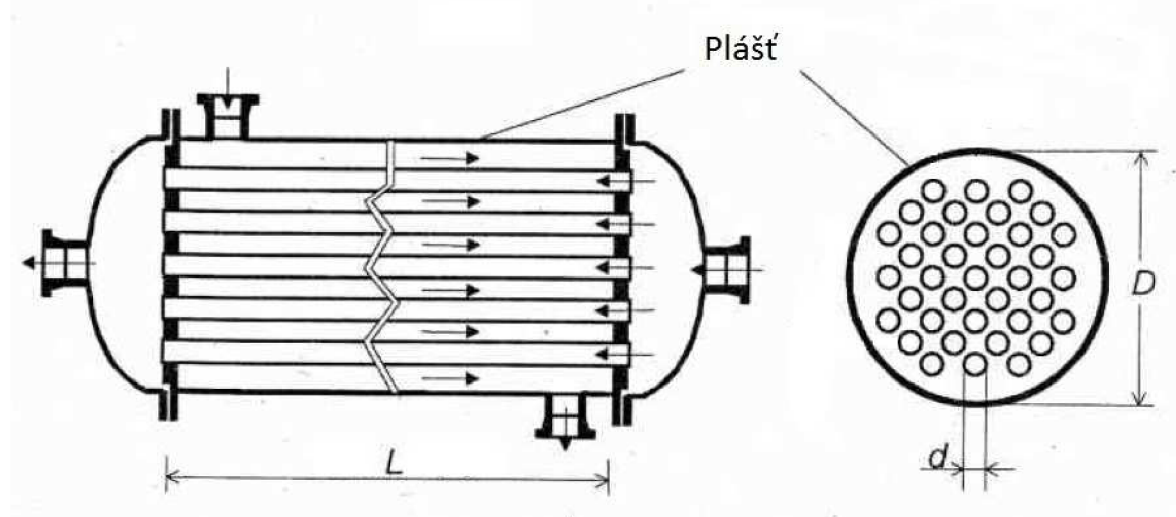
- a) Bubnové
- b) Skříňové
- c) Deskové
- d) Trubkové
- e) Svazkové
- f) Šroubové
- g) Hadové
- h) Žebrové
- i) Vlásenkové

2.3. Trubkové výměníky tepla

2.3.1. Popis trubkových výměníků tepla

Trubkové výměníky jsou nejvhodnější k předávání velkých výkonů, neboť v takových zařízeních lze dosáhnout velkých teplosměnných ploch navzdory malým rozměrům zařízení. Jejich údržba a čištění je snadné, další výhodou je, že pracovní látky mohou mít vysoké parametry, jelikož válcový tvar jak trubek, tak i pláště dodává výměníku vysokou odolnost proti vnitřnímu tlaku.

Orientace výměníku může být horizontální, vertikální nebo nakloněný. Všechny mají své výhody i nevýhody, při vysokých tlacích a teplotách je výhodné použít vertikální výměník a tím vymezit průhyb tenkých teplosměnných trubek. Když se jedná o výměník s fázovou přeměnou, jakým je kondenzátor, je výhodné použít horizontální výměník, neboť rostoucí tloušťka blány vody stékající na spodek výměníku by snižovala přenos tepla v této oblasti.



Obr. 2-5: Schéma horizontálního trubkového výměníku [3]

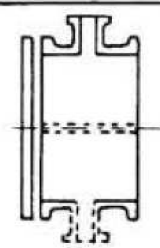
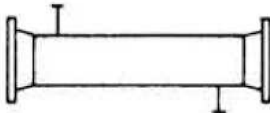
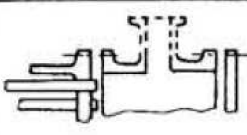
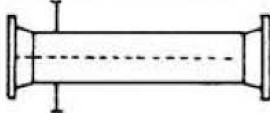
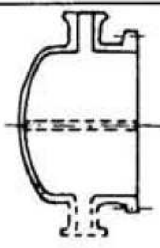
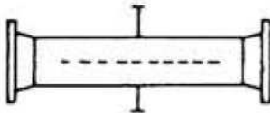
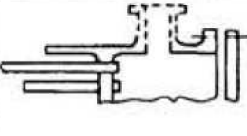
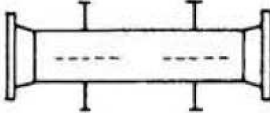
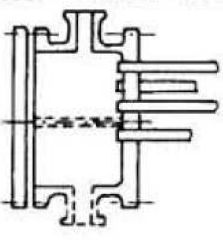
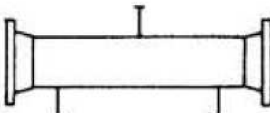
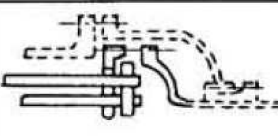
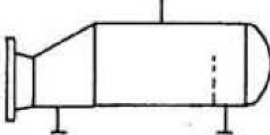
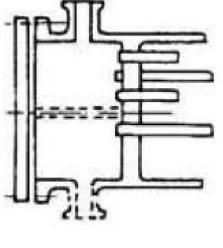
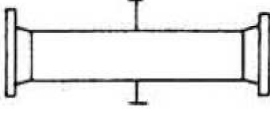
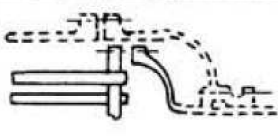
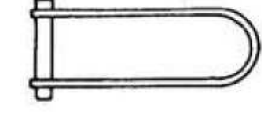
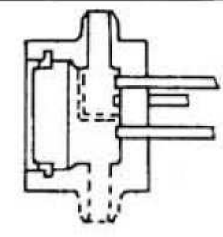
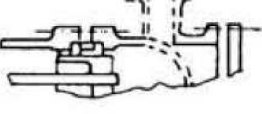
Teplosměnné médium proudící uvnitř trubek přichází vstupním nátrubkem do vstupní komory, pak vstupuje do trubek, které jsou zakotvené do trubkovnice na obou koncích a tvoří trubkový svazek. Zakotvení může být provedeno zaválcováním nebo přivařením. Z teplosměnných trubek pak vstupuje do výstupní komory a přes výstupní hrdlo odchází z výměníku. Médium proudící v mezitrubkovém prostoru vstupuje přes vstupní hrdlo přímo do mezitrubkového prostoru, která je tvořena trubkovým svazkem a pláštěm výměníku. Plášť, trubkovnice a komory jsou spojené rozebíratelným spojem. Jedním ze zásadních částí návrhu výměníku je volba, která z teplosměnných médií o různých parametrech, vlastnostech a toku bude proudit trubkami a která v mezitrubkovém prostoru.

Zpravidla v teplosměnných trubkách proudí médium:

- dvofázové, kvůli zabránění vzniku vzduchového polštáře
- které působí intenzivnější usazování a to kvůli snadnějšímu čištění trubek jako mezitrubkového prostoru
- korozivní médium, neboť v tom případě není potřebná výroba celého výměníku z korozivzdorného materiálu
- médium a vyšším tlaku, neboť plášť výměníku může být tenčí a levnější

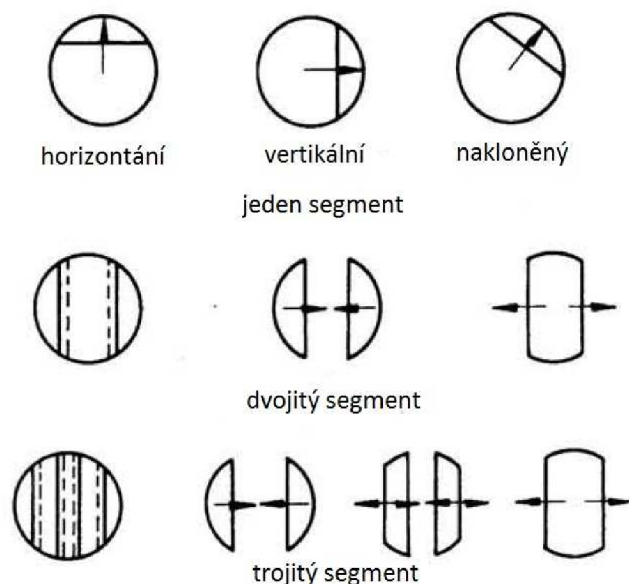
Když je třeba brát v ohledu více z vyjmenovaných okolností, tak rozhodující jsou bezpečnostní faktory, výrobní a provozní náklady jsou druhotní otázkou.

Asociace výrobců trubkových výměníků (TEMA – Tubular Exchanger Manufacturers Association) ve svých normách vypracovala jednotné označení trubkových výměníků, která je známá a používaná jak v České Republice, tak i na celém světě. Tato norma popisuje výměník třemi písmeny podle následující tabulky.

| 1 | Vstupní komora | 2 | Plášť | 3 | Zadní komora |
|---|---|---|---|---|---|
| A |  | E |  | L |  |
| | | F |  | | |
| B |  | G |  | N |  |
| | | H |  | | |
| C |  | J |  | S |  |
| | | K |  | | |
| N |  | X |  | T |  |
| | | | | U |  |
| D |  | | | W |  |

Tab. 2-1: Označování výměníků podle TEMA [1]

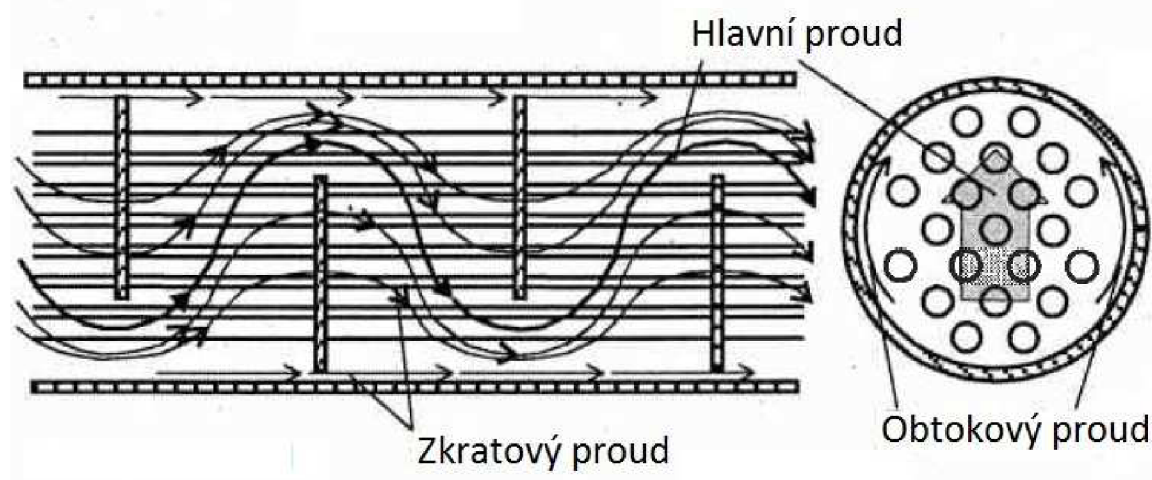
Z důvodu intenzifikace přenosu tepla se doporučuje zvýšení turbulence a nastavení optimální rychlosti proudění média v mezitrubkovém prostoru. V praxi to znamená použití příčných přepážek, které slouží také jako podpěra teplosměnných trubek. Tyto přepážky mohou být diskové, prstencové nebo mohou mít tvar kruhového segmentu. Na následujícím obrázku jsou znázorněny segmentové přepážky.



Obr. 2-6: Druhy segmentových přepážek [1]

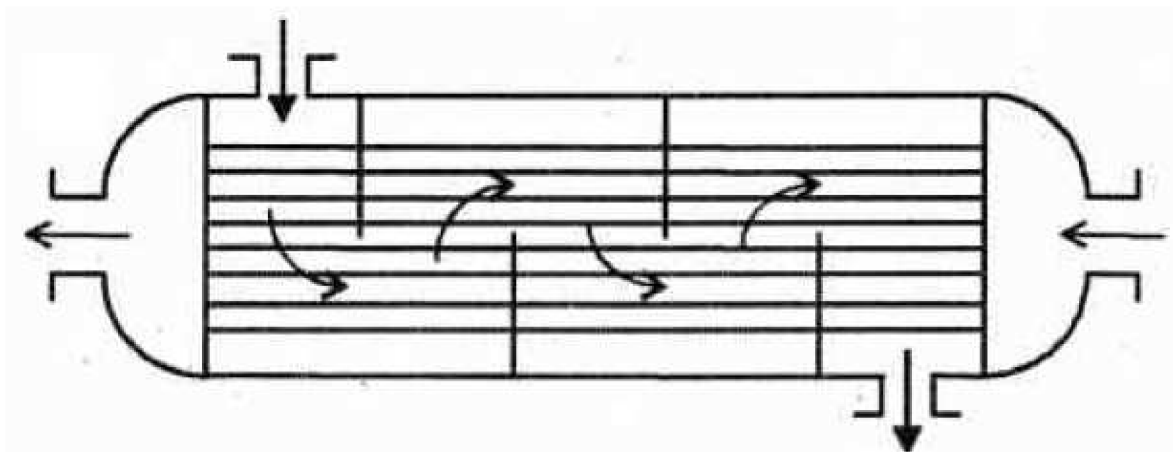
Nejvíce použité uspořádání je znázorněno na

Obr. 2-7. Je patrné, že segmentové přepážky nutí hlavní proud v mezitrubkovém prostoru k vícenásobné změně směru proudění čímž zabezpečí styk teplosměnného média se všemi teplosměnnými trubkami svazku a intenzifikuje turbulenci proudění. Rychlost proudění pak lze nastavit mírou zasunutí přepážek do mezitrubkového prostoru. Při standardních podmínkách se přepážky umísťují rovnoměrně po délce trubkového svazku. Kvůli minimalizaci napětí působené teplotní roztažností trubek, přepážky nejsou pevně spojeny s trubkami ani vnitřní stěnou pláště, což způsobuje vznik tzv. zkratových a obtokových proudů.

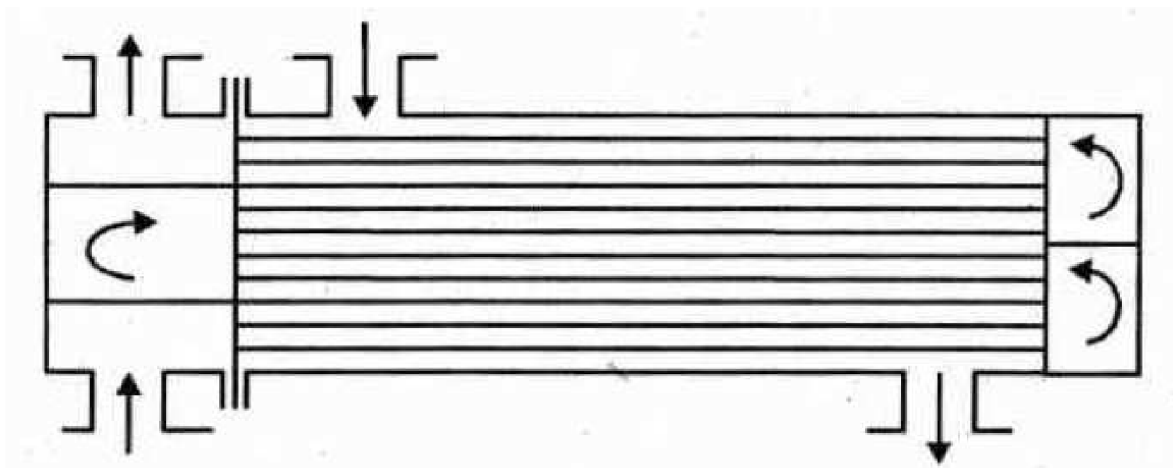


Obr. 2-7: Charakter proudění v mezitrubkovém prostoru trubkového výměníku [3]

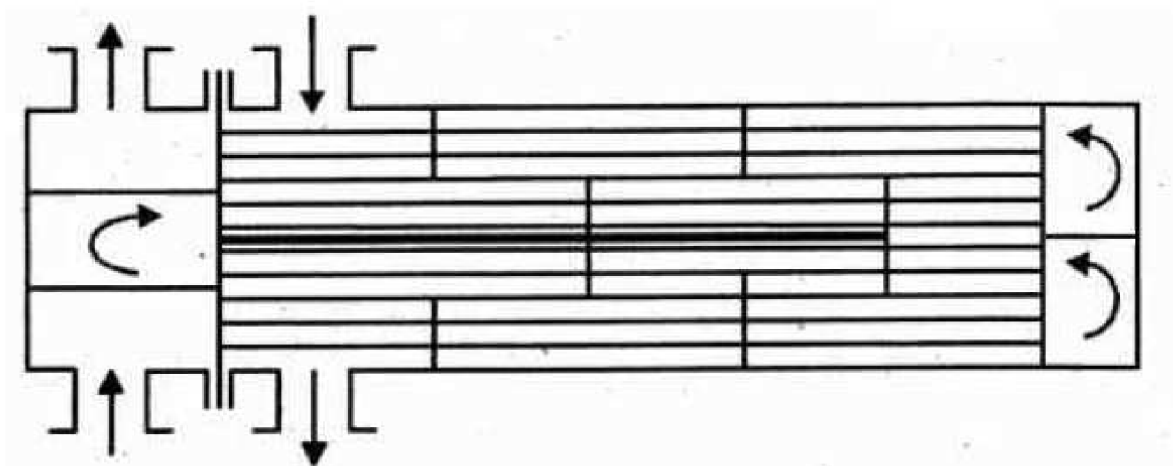
Počet chodů jak na straně trubek, tak i na straně mezitrubkového prostoru může být různý, na následujících obrazech jsou znázorněny některé nejjednodušší provedení.



Obr. 2-8: Trubkový výměník s jedním chodem na straně trubek a mezitrubkového prostoru [3]



Obr. 2-9: Trubkový výměník se čtyřmi chody na straně trubek a jedním chodem v mezitrubkovém prostoru bez přepážek [3]



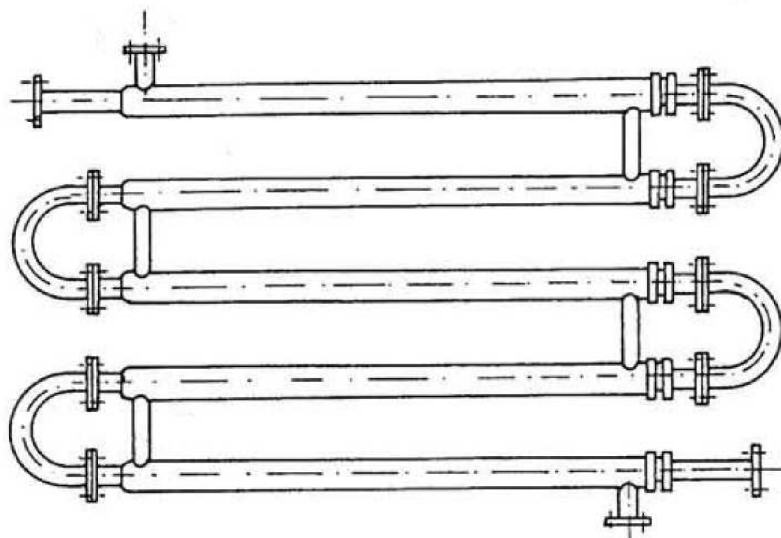
Obr. 2-10: Trubkový výměník tepla se čtyřmi chody na straně trubek a dvěma chody v mezitrubkovém prostoru [3]

2.3.2. Rozdělení trubkových výměníků tepla

Podle konstrukčního provedení trubkových výměníků rozeznáváme 4 základní typy.

1) Výměníky typu trubka v trubce

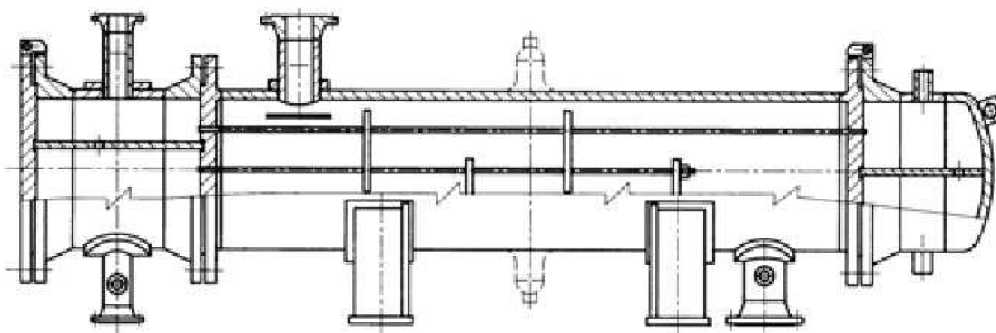
Je to trubkový výměník s nejjednodušším konstrukčním řešením, je to v podstatě teplosměnná trubka uložena soustředně v další, obalové trubce o větším průměru. Kvůli malé teplosměnné ploše používá se v aplikacích, kde je potřeba převést jen malé výkony.



Obr. 2-11: Trubkový výměník tepla typu trubka v trubce [1]

2) Výměníky s pevnou trubkovnicí nebo s kompenzátorem v plášti

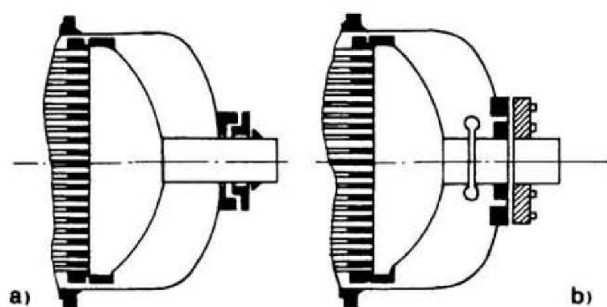
Má jednodušší konstrukční provedení, ale její použití se nedoporučuje v případě, kdy nerovnoměrné teplotní dilatace nadměrně namáhají trubky, trubkovnice nebo jiné komponenty výměníku. Tyhle nerovnoměrné teplotní dilatace mohou vzniknout velkým rozdílem teplot teplosměnných médií v různých částech výměníku nebo kvůli různým materiálovým vlastnostem jednotlivých komponentů. K minimalizaci napětí je možné použít kompenzátor v plášti, ale v tom případě čištění mezitrubkového prostoru je obtížné a lze jí provést pouze chemicky, proto se nedoporučuje použít kompenzátor v případě, když dochází k nadměrnému usazování nečistot v mezitrubkovém prostoru.



Obr. 2-12: Trubkový výměník tepla s pevnou trubkovnicí a kompenzátorem v plášti [4]

3) Výměníky s plovoucí hlavou

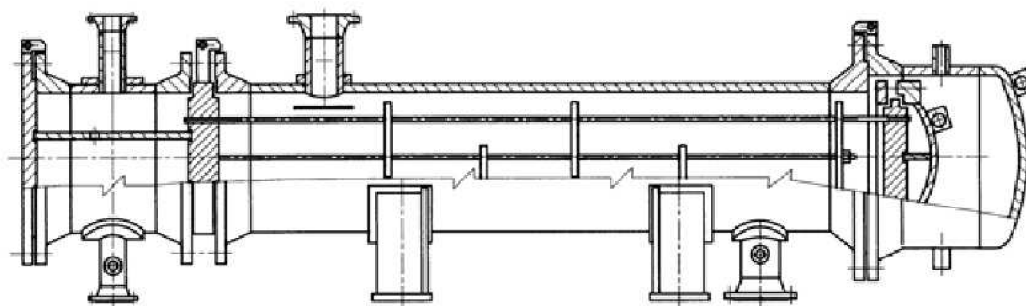
Tento typ se používá zejména v případě, když zatížení působené velkým rozdílem v dilataci trubek a pláště nelze eliminovat použitím kompenzátoru. Konstrukční provedení dna výměníku je takové, že zadní trubkovnice a komora se může pohybovat volně ve směru dilatace trubkového svazku jako celek. Když se jedná o jednoduchý výměník na straně trubek, výstupní hrdlo teplosměnného média proudícího uvnitř trubek musí být opatřen kompenzátořem nebo ucpávkou.



Obr. 2-13: Vývod média z plovoucí hlavy [1]

a – použitím ucpávky
b – použitím kompenzátoru

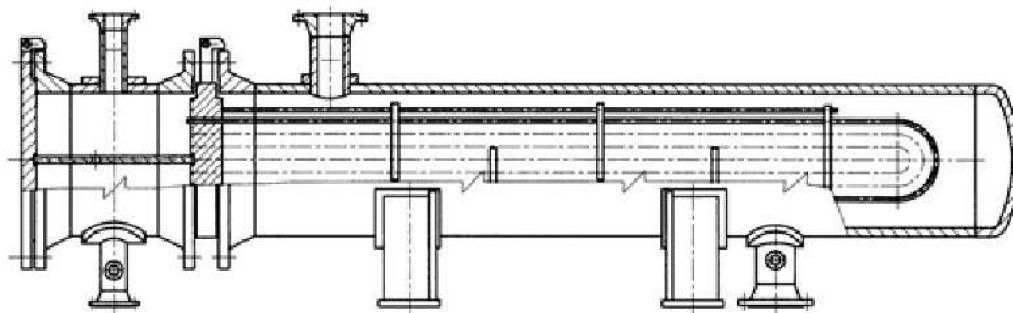
Po demontáži zadní komory je možné vybrat celý trubkový svazek a tím je její čištění snadné a lze jí použít i v případě, když v důsledku charakteru teplosměnného média proudícího v mezitrubkovém prostoru dochází k nadměrnému usazování nečistot.



Obr. 2-14: Trubkový výměník tepla s plovoucí hlavou [4]

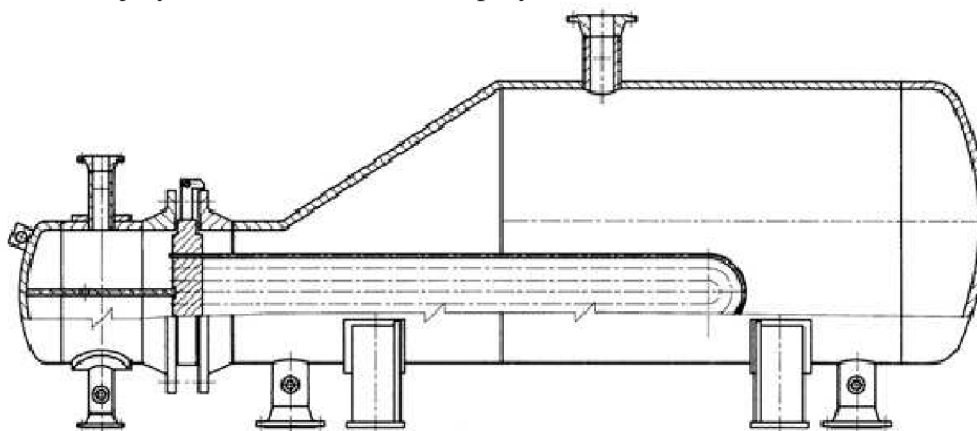
4) Výměníky s U-trubkami

Výměníky s U-trubkami se používají v podobných případech jako výměníky s plovoucí hlavou. Všechny trubky jsou zakotveny do jedné trubkovnice, proto není potřeba druhé komory a tím je jejich konstrukce a montáž snadnější, mají nižší hmotnost a nižší cenu. Při nesprávném návrhu, v oblasti zahnutí trubek může vzniknout problém větší dilatací vnitřních trubek než vnějších a proto může dojít k nadměrnému namáhání některých částí. Čištění vnějšího povrchu trubek v této oblasti je někdy obtížné, proto se nedoporučuje jí použít v případě, když v mezitrubkovém prostoru proudí látka působící nadměrné usazování nečistot. Další nevýhodou je omezená možnost výměny poškozených teplosměnných trubek, proto v některých aplikacích množství trubek je předimenzován a v případě poškození je možné je zavařit, přičemž tepelný výkon se výrazně neklesne. Vláškové výměníky jsou většinou dvouchodé v trubkovém prostoru a jednoduché v mezitrubkovém prostoru. Použitím podélné přepážky lze vytvořit protiproudé uspořádání.



Obr. 2-15: Trubkový výměník tepla s U-trubkami [4]

Speciálním případem vlásenkového výměníku je tzv. Reboiler. Takové zařízení se používá v případě, když dochází k varu média v mezitrubkovém prostoru. Má rozšířený plášť, což zabezpečí dostatečný objem pro tento proces a umožní umístění žaluziových separátorů nebo jiných odlučovačů vlhkosti páry.



Obr. 2-16: Trubkový výměník tepla s U-trubkami typu Reboiler [4]

2.4. Základní vztahy pro výpočet výměníku tepla

2.4.1. Tepelný výpočet

Tepelný výpočet výměníků tepla zpravidla vychází ze **zákona zachování energie** podle následující rovnice:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_z \quad (2.1)$$

kde \dot{Q}_1 [W] je tepelný výkon přivedený ochlazovaným médiem

\dot{Q}_2 [W] je tepelný výkon odvedený ohřívaným médiem

\dot{Q}_z [W] je součet tepelných ztrát

Tepelné výměníky uvažujeme jako izolované soustavy, a proto ztráty jsou zanedbatelné a rovnice (2.1) nabývá následující tvar:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 \quad (2.2)$$

Tyto **tepelné výkony** lze přepsat do tvaru bilančních rovnic, které mají následující tvar:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_1 \cdot \bar{c}_{p1} \cdot (t_{1,IN} - t_{1,OUT}) \quad (2.3)$$

kde: \dot{m}_1 [kg/s] je hmotnostní tok ochlazovaného média
 \bar{c}_{p1} [J · kg⁻¹ · K⁻¹] je střední měrná tepelná kapacita ochlazovaného média
 $t_{1,IN}$ [°C] je teplota ochlazovaného média na vstupu do výměníku
 $t_{1,OUT}$ [°C] je teplota ochlazovaného média na výstupu z výměníku

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_2 \cdot \bar{c}_{p2} \cdot (t_{2,OUT} - t_{2,IN}) \quad (2.4)$$

kde: \dot{m}_2 [kg/s] je hmotnostní tok ohřivaného média
 \bar{c}_{p2} [J · kg⁻¹ · K⁻¹] je střední měrná tepelná kapacita ohřivaného média
 $t_{2,OUT}$ [°C] je teplota ohřivaného média na výstupu z výměníku
 $t_{2,IN}$ [°C] je teplota ohřivaného média na vstupu do výměníku

Po dosazení do rovnice (2.2) dostaneme tvar:

$$Q = \dot{m}_1 \cdot \bar{c}_{p1} \cdot (t_{1,IN} - t_{1,OUT}) = \dot{m}_2 \cdot \bar{c}_{p2} \cdot (t_{2,OUT} - t_{2,IN}) \quad (2.5)$$

kde: Q [W] je tepelný výkon výměníku

Jelikož **měrná tepelná kapacita** je závislá na teplotě a její průběh v závislosti na teplotě není lineární, její výpočet pro ochlazované médium se provádí podle následující rovnice:

$$\bar{c}_{p1} = \frac{1}{t_{1,IN} - t_{1,OUT}} \cdot \int_{t_{1,OUT}}^{t_{1,IN}} c_{p1}(t) \cdot dt \quad (2.6)$$

a pro ohřivané médium podle následujícího vzorce:

$$\bar{c}_{p2} = \frac{1}{t_{2,OUT} - t_{2,IN}} \cdot \int_{t_{2,IN}}^{t_{2,OUT}} c_{p2}(t) \cdot dt \quad (2.7)$$

Rovnice (2.3), (2.4) resp. (2.5) slouží k výpočtu některých z členů těchto rovnic. Jelikož měrné tepelné kapacity látek používaných v tepelných výměnících jsou shrnuté v tabulkách a vstupní a výstupní teploty obou médií jsou zpravidla dané nebo zvolené z optimální účinnosti cyklu, tyto rovnice slouží zejména k výpočtu hmotnostního průtoku většinou ochlazovaného média, jelikož hmotnostní průtok ohřivaného média bývá zadán z potřeby tepelné energie. Pomocí těchto rovnic lze také stanovit celkový tepelný výkon výměníku.

Výsledkem tepelného výpočtu má být teplosměnná plocha výměníku, kterou lze vypočítat z rovnice výměny tepla:

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta T_{\ln} \quad (2.8)$$

kde: k $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ je součinitel prostupu tepla
 A $[m^2]$ je teplosměnná plocha výměníku
 ΔT_{\ln} $[^{\circ}C]$ je střední logaritmický teplotní rozdíl

Součinitel prostupu tepla je veličinou, která charakterizuje intenzitu výměny tepla mezi dvěma médii. Tvar rovnice výpočtu závisí na typu výměníku, pro trubkový výměňník vypadá následovně:

$$k = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_i} + R_{z,i}\right) \cdot \frac{D_i}{d_i} + \frac{D_i}{2 \cdot \lambda_t} \cdot \ln\left(\frac{D_i}{d_i}\right) + \left(\frac{1}{\alpha_o} + R_{z,o}\right)} \quad (2.9)$$

kde: α_i $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ je součinitel přestupu tepla v trubkovém prostoru
 α_o $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ je součinitel přestupu tepla v mezitrubkovém prostoru
 $R_{z,i}$ $[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$ je součinitel zanášení v trubkovém prostoru
 $R_{z,o}$ $[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$ je součinitel zanášení v mezitrubkovém prostoru
 D_i $[m]$ je vnější průměr teplosměnných trubek
 d_i $[m]$ je vnitřní průměr teplosměnných trubek
 λ_t $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ je součinitel tepelné vodivosti materiálu trubek

Součinitel přestupu tepla pro obě média se počítá podle následujícího vztahu:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad (2.10)$$

kde: Nu $[-]$ je Nusseltovo číslo
 λ $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ je součinitel tepelné vodivosti teplosměnného média
 d $[m]$ je charakteristický rozměr

V trubkových výměňících jako charakteristický rozměr označujeme vnitřní průměr teplosměnných trubek na straně trubkového prostoru a hydraulický průměr na straně mezitrubkového prostoru.

Nusseltovo číslo se počítá z kriteriální rovnice, kterou volíme podle charakteru proudění, který může být laminární nebo turbulentní, volné nebo nucené a vnitřní nebo vnější, a podle druhu teplosměnné látky. Obecně má tvar:

$$Nu = a \cdot Re^b \cdot Pr^c \quad (2.11)$$

kde: Re $[-]$ je Reynoldsovo číslo
 Pr $[-]$ je Prandtlovo číslo
 a, b, c $[-]$ jsou konstanty dané charakterem proudění

Pomocí Reynoldsova čísla určíme, jestli se jedná o laminární nebo turbulentní proudění. Počítá se pomocí vztahu:

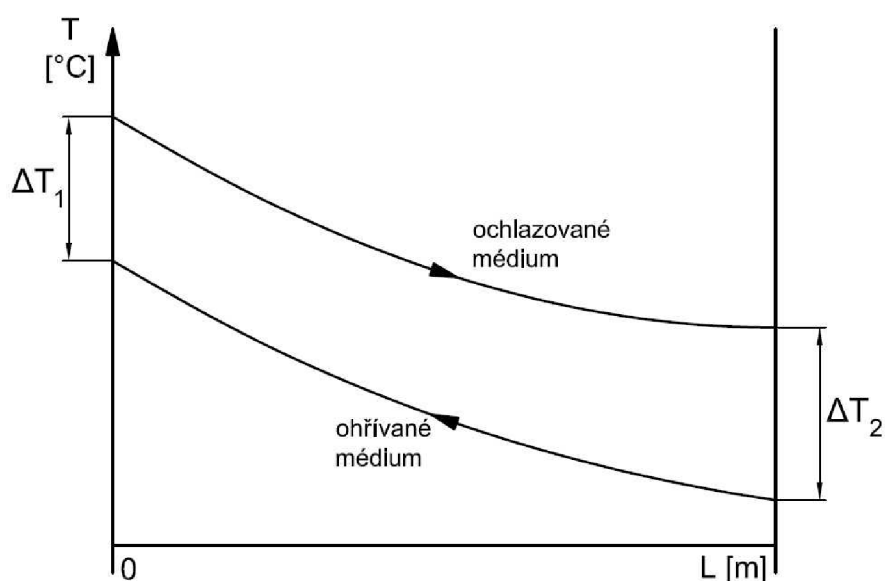
$$Re = \frac{w \cdot D \cdot \rho}{\eta} \quad (2.12)$$

kde: w $[m \cdot s^{-1}]$ je rychlost proudění teplosměnné látky
 D $[m]$ je charakteristický rozměr
 ρ $[kg \cdot m^{-3}]$ je hustota teplosměnné látky
 η $[Pa \cdot s]$ je dynamická viskozita teplosměnné látky

Střední logaritmický teplotní rozdíl se počítá z maximálního a minimálního rozdílu teplot pracovních látek na obou koncích výměníku. Teploty pracovních látek v závislosti na délce teplosměnné plochy mají logaritmický průběh, proto rovnice pro výpočet středního rozdílu teplot má následující tvar:

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}} \quad (2.13)$$

kde: ΔT_{max} $[^{\circ}C]$ je maximální teplotní rozdíl teplosměnných médií
 ΔT_{min} $[^{\circ}C]$ je minimální teplotní rozdíl teplosměnných médií



Obr. 2-17: Průběh teplot teplosměnných médií v protiproudém výměníku

V případě trubkového výměníku z **teplosměnné plochy** a počtu trubek lze vypočítat potřebnou délku teplosměnných trubek k zabezpečení přenosu potřebného výkonu pomocí následující rovnice:

$$A = n_t \cdot \pi \cdot D_t \cdot L_t \quad (2.13)$$

Kde: n_t [°C] je počet teplosměnných trubek

L_t [m] je délka teplosměnných trubek

Když jsme při výpočtu součinitele prostupu tepla brali jako referenční rozměr vnější průměr trubek, tak i v případě výpočtu délky trubek musíme brát stejný rozměr.

2.4.2. Hydraulický výpočet

Hydraulický výpočet určuje tlakové ztráty výměníku na straně trubek i mezitrubkového prostoru. Tlakové ztráty lze rozdělit na délkové a místní, počítáme je podle následujícího postupu.

Pomocí Reynoldsova kritéria a poměru drsnosti a charakteristického rozměru trubek, určíme **součinitel třecích ztrát** z Moodyho digramu.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Re} = \\ \frac{\varepsilon}{d} = \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda \quad (2.14)$$

kde: ε [m] je drsnost potrubí

λ [-] je součinitel třecích ztrát

Pak rovnice pro výpočet **délkových tlakových ztrát** vypadá následovně:

$$\Delta p_t = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho \quad (2.15)$$

kde: Δp_t [Pa] je třecí tlaková ztráta

Místné tlakové ztráty počítáme z následující rovnice:

$$\Delta p_m = \sum \xi \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho \quad (2.16)$$

kde: Δp_m [Pa] je součet místních tlakových ztrát

$\sum \xi$ [-] je součet součinitelů tlakových ztrát, které lze určit podle diagramů

3. POPIS PROGRAMU HTRI XCHANGER SUITE®

3.1. Všeobecný popis

Software HTRI (Heat Transfer Research, Inc.) Xchanger Suite® slouží k návrhu, výpočtu a simulaci širokého spektra výměníků tepla, má však modul i pro výpočet a návrh pecí. V programu jsou zabudovány vztahy pro tepelný a hydraulický výpočet výměníků. Software má vlastní databázi, která obsahuje termofyzikální vlastnosti některých látek použitých jako teplosměnné médium ve výměnících, kromě toho obsahuje mechanické vlastnosti řadu materiálů, které slouží k pevnostnímu výpočtu. Program také umožňuje zadání potřebných vlastností předem nedefinovaných teplosměnných látek a materiálů výměníku.

Software obsahuje následující návrhové moduly:

- *Xace* – slouží k návrhu vzduchových chladičů a ekonomizérů
- *Xfh* – slouží k návrhu pecí
- *Xhpe* – slouží k návrhu vlásenkových výměníků
- *Xist* – slouží k návrhu trubkových výměníků
- *Xjpe* – slouží k návrhu výměníků typu trubka v trubce
- *Xphe* – slouží k návrhu deskových výměníků
- *Xspe* – slouží k návrhu spirálových výměníků

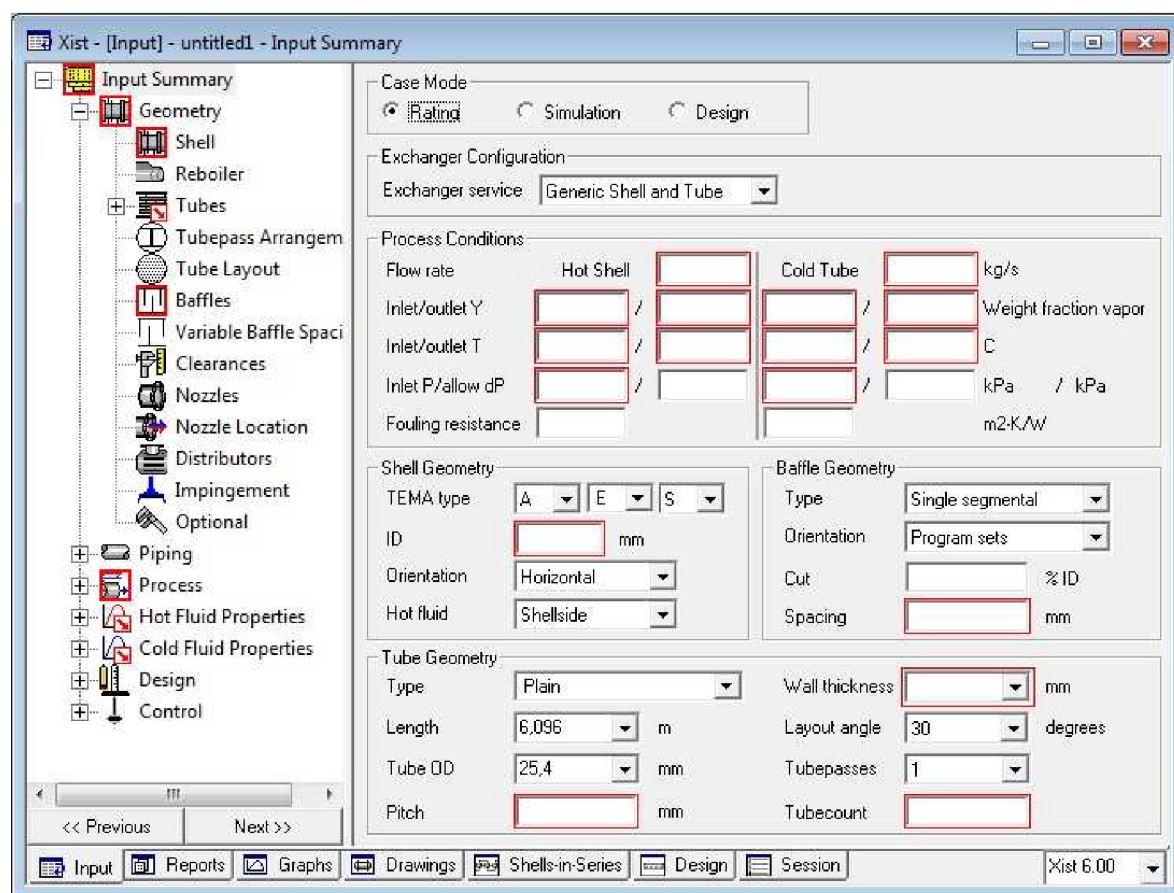
Dalšími moduly jsou:

- *Xtlo* – slouží k návrhu rozvržení trubek
- *Xvib* – slouží k analýze vibrací

Uživatelské rozhraní programu je typické pro operační systém Windows. Práci v softwaru začínáme záložkou *File*, kde můžeme navrhnout nový výměník stisknutím *New* a typ výměníku, nebo otevřít existující soubor použitím *Open case...* Po výběru typu výměníku nebo po otevření existujícího souboru se objeví pracovní okno *Input Summary*, které je s ostatními pracovními okny uspořádán do stromové struktury v levé části pracovního okna. Na spodku okna jsou jednotlivé záložky, první je *Input* a obsahuje dříve zmíněné pracovní okno pro zadávání vstupů. Další záložky neobsahují žádná data před samotným spuštěním návrhu. Po dokončení návrhu, záložka *Reports* obsahuje výstupní protokoly, *Graphs* umožňuje vykreslení výstupních dat ve formě grafů a *Drawings* umožní grafické znázornění uspořádání trubek, hlavních rozměrů výměníku, dispoziční uspořádání a trojdimenzionální náčrt. Další záložka obsahuje schematický náčrt více výměníků zapojených sériově nebo paralelně a její název závisí na zvoleném typu výměníků. Další záložky *Design* a *Session* se používají při jednotlivých módech návrhu popsaných níže.

Software podporuje tři různé metody návrhu, které lze volit ve vrchní části pracovního okna *Input Summary*. První dvě metody jsou *Rating* a *Simulation*, které se volí v případě, kdy je známá geometrie výměníku a potřebujeme znát doplňkové údaje jako tlakové ztráty, některé předem neznámé parametry teplosměnných látek, míru vibrací, atd. Mód *Design* slouží k předběžnému návrhu hlavních rozměrů výměníku, je založen na vstupních údajích.

Po zadání všech potřebných vstupních dat program umožňuje spuštění návrhu, což se provádí stisknutím ikonky *Run case*.



Obr. 3-1: Pracovní okno Input Summary pro trubkový výměník

3.2. Popis výstupních protokolů

Výsledné protokoly jsou sjednoceny pod záložkou **Reports** na spodku pracovního okna.

- Output Summary** – obsahuje hlavní vstupní a výstupní parametry pracovních látek, vypočtený výkon a vybrané geometrické údaje.
- Runtime Messages** – obsahuje připomínky a chybové hlášení o nesrovnalostech zjištěných během návrhu
- Final Results** – má tři záložky, ve kterých jsou podrobně shrnuty všechny údaje o výměníku. Mezi nimi patří parametry pracovních látek, geometrické vlastnosti pláště, přepážek, teplosměnných trubek, tlakové ztráty, rozměry vstupních a výstupních hrdel a další informace.
- Shellside Monitor** – obsahuje parametry teplosměnné látky proudícího v mezitrubkovém prostoru.
- Tubeside Monitor** – obsahuje parametry teplosměnné látky proudícího uvnitř trubek.
- Vibration** – obsahuje údaje o vzniklých vibracích.
- Tema Spec Sheet** – je to oficiální protokol podle norem TEMA.
- Rating Data Sheet** – je odvozen z TEMA Spec Sheet a je doplněn dalšími vybranými údaji.
- Property Monitor** – obsahuje podrobný rozbor termofyzikálních údajů pracovních látek v jednotlivých bodech výměníku.
- Stream Properties** – jsou v něm shrnuty vlastnosti a prvkové složení teplosměnných médií.

4. VSTUPNÍ ÚDAJE PRO PROGRAM HTRI XCHANGER SUITE®

4.1. Výpočet složení teplosměnných látek

4.1.1. Výpočet množství a složení vzduchu

Výpočet vychází z prvkového složení spalované biomasy podle *Tab. 4-1*. Výpočet byl proveden použitím vztahů podle literatury [5].

| Q_i^r | C^r | S^r | N^r | O^r | H^r | A^r | W^r |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| [MJ/kg] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] |
| 16,7 | 45 | 0,01 | 0 | 10,67 | 3,24 | 2 | 39 |

Tab. 4-1: Prvkové složení biomasy

| $[N_2]$ | $[O_2]$ | $[CO_2]$ | $[Ar]$ |
|---------|---------|----------|--------|
| [%] | [%] | [%] | [%] |
| 78,05 | 21 | 0,03 | 0,92 |

Tab. 4-2: Složení suchého vzduchu [5]

Minimální objem kyslíku na spálení 1kg paliva:

$$O_{O_2 \min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{S_{prch}^r}{32,06} - \frac{O_2^r}{32} \right) \quad (4.1)$$

Veškerou síru obsaženou v palivu lze považovat za organickou, tj. veškerá síra je spalitelná.

$$O_{O_2 \min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{45}{12,01} + \frac{3,24}{4,032} + \frac{0,01}{32,06} - \frac{10,67}{32} \right) = 0,95 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Protože vzduch obsahuje 21% kyslíku, minimální množství suchého vzduchu na spálení 1kg paliva:

$$O_{vz\ min}^s = \frac{100}{[O_2]} \cdot O_{O_2\ min} \quad (4.2)$$

$$O_{vz\ min}^s = \frac{100}{21} \cdot 0,95 = 4,52\ m^3/kg$$

Pro výpočet objemu vody na jednotku objemu vzduchu byl použit následující vztah:

$$o_{H_2O} = \varphi \cdot \frac{p''}{p_c - \varphi \cdot p''} \quad (4.3)$$

Kde φ je relativní vlhkost vzduchu, její hodnota obecně bývá 70%. p'' je tlak vodní páry na mezi sytosti při dané teplotě vzduchu, při normálních podmínkách, tj. při 20°C má hodnotu 0,0023MPa [6]. p_c je celkový absolutní tlak vzduchu, při normálních podmínkách je to 0,1MPa.

$$o_{H_2O} = \frac{70}{100} \cdot \frac{0,0023}{0,1 - \frac{70}{100} \cdot 0,0023} = 0,017\ m^3/m^3$$

Součinitel zohledňující vlhkost vzduchu je:

$$\chi_v = 1 + v_{H_2O} \quad (4.4)$$

$$\chi_v = 1 + 0,017 = 1,017$$

Minimální množství vlhkého vzduchu potřebného na spálení 1kg paliva:

$$O_{vz\ min} = O_{vz\ min}^s \cdot \chi_v \quad (4.5)$$

$$O_{vz\ min} = 4,52 \cdot 1,017 = 4,6\ m^3/kg$$

Při uvažování přebytku vzduchu $\alpha = 1,3$, což je hodnota obecně používaná při spalování biomasy, množství vzduchu na spálení 1kg paliva je:

$$O_{vz} = O_{vz\ min} \cdot \alpha \quad (4.6)$$

$$O_{vz} = 4,6 \cdot 1,3 = 5,98\ m^3/kg$$

Procentuální zastoupení složek ve vlhkém vzduchu:

$$y_{CO_2} = [CO_2] \cdot \frac{O_{vz\ min}^s}{O_{vz\ min}} = 0,03 \cdot \frac{4,52}{4,6} = \underline{\underline{0,029\%}} \quad (4.7)$$

$$y_{SO_2} = [SO_2] \cdot \frac{O_{vz\ min}^s}{O_{vz\ min}} = 0 \cdot \frac{4,52}{4,6} = \underline{\underline{0\%}} \quad (4.8)$$

$$y_{N_2} = [N_2] \cdot \frac{O_{vz\ min}^s}{O_{vz\ min}} = 78,05 \cdot \frac{4,52}{4,6} = \underline{\underline{76,77\%}} \quad (4.9)$$

$$y_{O_2} = [O_2] \cdot \frac{O_{vz\ min}^s}{O_{vz\ min}} = 21 \cdot \frac{4,52}{4,6} = \underline{\underline{20,66\%}} \quad (4.10)$$

$$y_{Ar} = [Ar] \cdot \frac{O_{vz\ min}^s}{O_{vz\ min}} = 0,92 \cdot \frac{4,52}{4,6} = \underline{\underline{0,9\%}} \quad (4.11)$$

$$y_{H_2O} = 100 - y_{CO_2} - y_{SO_2} - y_{N_2} - y_{O_2} - y_{Ar} \quad (4.12)$$

$$y_{H_2O} = 100 - 0,03 - 0 - 76,77 - 20,66 - 0,9 = \underline{\underline{1,64\%}}$$

| | | |
|--------|-------|-----|
| CO_2 | 0,029 | [%] |
| SO_2 | 0 | [%] |
| N_2 | 76,77 | [%] |
| O_2 | 20,66 | [%] |
| Ar_2 | 0,9 | [%] |
| H_2O | 1,64 | [%] |

Tab. 4-3: Složení vlhkého vzduchu

4.1.2. Výpočet složení spalin

Při výpočtu složení spalin nejdříve byly vypočteny objemy jednotlivých složek spalin bez uvažování přebytku vzduchu:

$$O_{CO_2 \min} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{C^r}{12,01} + \frac{[CO_2]}{100} \cdot O_{vz \min}^s \quad (4.13)$$

$$O_{CO_2 \min} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{45}{12,01} + \frac{0,03}{100} \cdot 4,52 = 0,8354 m^3/kg$$

$$O_{SO_2 \min} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{S^r}{32,06} + \frac{[SO_2]}{100} \cdot O_{vz \min}^s \quad (4.14)$$

$$O_{SO_2 \min} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{0,01}{32,06} = 0,00007 m^3/kg$$

$$O_{N_2 \min} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{N^r}{28,016} + \frac{[N_2]}{100} \cdot O_{vz \min}^s \quad (4.15)$$

$$O_{N_2 \min} = \frac{78,05}{100} \cdot 4,52 = 3,5301 m^3/kg$$

$$O_{Ar \min} = \frac{[Ar]}{100} \cdot O_{vz \min}^s \quad (4.16)$$

$$O_{Ar \min} = \frac{0,92}{100} \cdot 4,52 = 0,0416 m^3/kg$$

$$O_{H_2O \min} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{H^r}{4,092} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{W^r}{18,016} + (\chi_v - 1) \cdot O_{vz \min}^s \quad (4.17)$$

$$O_{H_2O \min} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{3,34}{4,092} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{39}{18,016} + (1,017 - 1) \cdot 4,52 = 0,9313 m^3/kg$$

Celkový minimální objem spalin:

$$O_{sp \min} = O_{CO_2 \min} + O_{SO_2 \min} + O_{N_2 \min} + O_{Ar \min} + O_{H_2O \min} \quad (4.18)$$

$$O_{sp \min} = 0,8354 + 0,00007 + 3,5301 + 0,0416 + 0,9313 = 5,3385 m^3/kg$$

Objem složek spalin s uvažováním přebytek vzduchu $\alpha = 1,3$:

$$O_{CO_2} = O_{CO_2 \min} + O_{vz \min}^s \cdot (\alpha - 1) \cdot \frac{[CO_2]}{100} \quad (4.19)$$

$$O_{CO_2} = 0,8354 + 4,52 \cdot (1,3 - 1) \cdot \frac{0,03}{100} = 0,8358 m^3 / kg$$

$$O_{SO_2} = O_{SO_2 \min} + O_{vz \min}^s \cdot (\alpha - 1) \cdot \frac{[SO_2]}{100} \quad (4.20)$$

$$O_{SO_2} = 0,00007 + 4,52 \cdot (1,3 - 1) \cdot 0 = 0,00007 m^3 / kg$$

$$O_{N_2} = O_{N_2 \min} + O_{vz \min}^s \cdot (\alpha - 1) \cdot \frac{[N_2]}{100} \quad (4.21)$$

$$O_{N_2} = 3,5301 + 4,52 \cdot (1,3 - 1) \cdot \frac{78,05}{100} = 4,5892 m^3 / kg$$

$$O_{O_2} = O_{O_2 \min} + O_{vz \min}^s \cdot (\alpha - 1) \cdot \frac{[O_2]}{100} \quad (4.22)$$

$$O_{O_2} = 0 + 4,52 \cdot (1,3 - 1) \cdot \frac{21}{100} = 0,2849 m^3 / kg$$

$$O_{Ar} = O_{Ar \min} + O_{vz \min}^s \cdot (\alpha - 1) \cdot \frac{[Ar]}{100} \quad (4.23)$$

$$O_{Ar} = 0,0416 + 4,52 \cdot (1,3 - 1) \cdot \frac{0,92}{100} = 0,0541 m^3 / kg$$

$$O_{H_2O} = O_{H_2O \min} + O_{vz \min}^s \cdot (\alpha - 1) \cdot (\chi_v - 1) \quad (4.24)$$

$$O_{H_2O} = 0,9313 + 4,52 \cdot (1,3 - 1) \cdot (1,017 - 1) = 0,9539 m^3 / kg$$

Celkový objem spalin:

$$O_{sp} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{O_2} + O_{Ar} + O_{H_2O} \quad (4.25)$$

$$O_{sp} = 0,8358 + 0,00007 + 4,5892 + 0,2849 + 0,0541 + 0,9539 = 6,718 m^3 / kg$$

Procentuální zastoupení jednotlivých složek spalin ve vlhkých spalinách:

$$x_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{sp}} \cdot 100 = \frac{0,8358}{6,718} \cdot 100 = \underline{\underline{12,44\%}} \quad (4.26)$$

$$x_{SO_2} = \frac{O_{SO_2}}{O_{sp}} \cdot 100 = \frac{0,00007}{6,718} \cdot 100 = \underline{\underline{0,001\%}} \quad (4.27)$$

$$x_{N_2} = \frac{O_{N_2}}{O_{sp}} \cdot 100 = \frac{4,5892}{6,718} \cdot 100 = \underline{\underline{68,31\%}} \quad (4.28)$$

$$x_{O_2} = \frac{O_{O_2}}{O_{sp}} \cdot 100 = \frac{0,2849}{6,718} \cdot 100 = \underline{\underline{4,24\%}} \quad (4.29)$$

$$x_{Ar} = \frac{O_{Ar}}{O_{sp}} \cdot 100 = \frac{0,0541}{6,718} \cdot 100 = \underline{\underline{0,809\%}} \quad (4.30)$$

$$x_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{sp}} \cdot 100 = \frac{0,9539}{6,718} \cdot 100 = \underline{\underline{14,2\%}} \quad (4.31)$$

Když následující nerovnost neplatí, tak vliv popílku na entalpii spalin je zanedbatelný [7].
Při uvažování úletu 50%, její hodnota je:

$$A^r > \frac{6 \cdot Q_i^r}{41,8 \cdot x_p} \quad (4.32)$$

$$2 > \frac{6 \cdot 16,7 \cdot 10^3}{41,8 \cdot 50} = 47,94$$

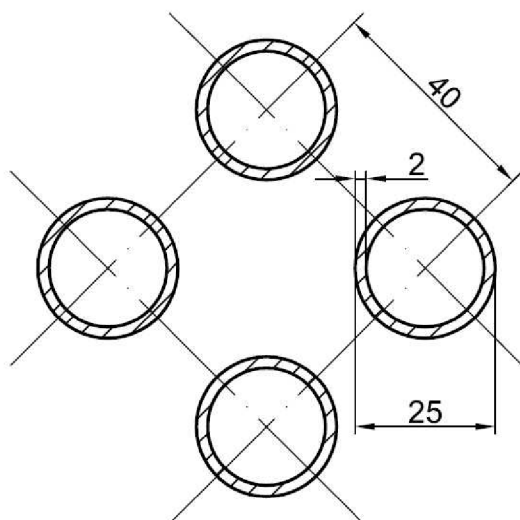
Nerovnost neplatí, proto entalpii popílku v tepelném výpočtu neuvažují.

| | | |
|--------|-------|-----|
| CO_2 | 12,44 | [%] |
| SO_2 | 0,001 | [%] |
| N_2 | 68,31 | [%] |
| O_2 | 4,24 | [%] |
| Ar_2 | 0,809 | [%] |
| H_2O | 14,2 | [%] |

Tab. 4-4: Složení spalin

4.2. Návrh konstrukčního řešení výměníku

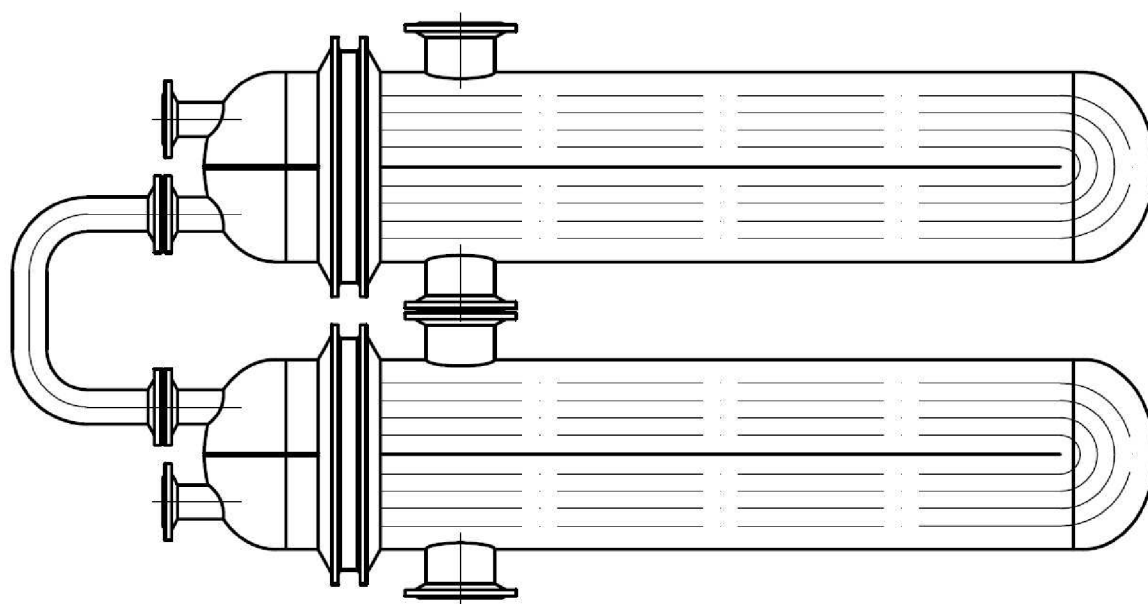
Výměník bude trubkový s vlásenkovými trubkami, protiproudý se dvěma chody jak na straně trubek, tak i na straně mezitrubkového prostoru. Takové uspořádání odpovídá TEMA typu BFU. Jelikož tlak vzduchu je větší než tlak spalin, je výhodnější jí umístit do trubkového prostoru a tím tloušťka stěny pláště může být menší. Celá jednotka bude rozdělena na dvě části a to na vysokoteplotní (dále VT) a nízkoteplotní (dále NT) část, takovým řešením NT část lze vyrobit z méně ušlechtilého a tím i levnějšího materiálu. Takové uspořádání odpovídá dvěma výměníkům vyrobených z různého materiálu zapojených sériově jak na straně spalin, tak i na straně vzduchu.



Teplosměnné trubky budou hladké, s vnějším průměrem 25mm a tloušťkou stěny 2mm. Rozměr by zvolen podle [8], trubky takového rozměru jsou běžně dostupné na trhu. Rozteč trubek byl volen 40mm a uložení bude čtvercový s otočením o 45°. Délka trubek je zvolena z pohledu optimálních rozměrů výměníku, v našem případě tomu odpovídá hodnota kolem 3m. Materiál trubek je stejný jako materiál ostatních částí výměníku, je to výhodné zejména z hlediska tepelné roztažnosti jednotlivých komponentů. Volba materiálu je provedena v další kapitole.

Obr. 4-1: Uložení a rozměry trubek

Přepážky budou segmentové a horizontální. Hrdla spalin budou radiální, přičemž vstup bude na vrhu a výstup na spodku, jelikož látka, která se ochlazuje, má tendenci sestoupit. Výstupní hrdlo NT části a vstupní hrdlo VT části budou spojeny pevně. Vstupní a výstupní hrdla vzduchu budou axiální a budou spojeny převáděcím potrubím, tím lze minimalizovat pnutí vzniklé různou tepelnou roztažností materiálů VT a NT částí po spojení.



Obr. 4-2: Schematický náčrt výměníku

4.3. Volba materiálu výměníku

4.3.1. Materiál vysokoteplotní části

Jelikož nevyšší provozní tedy i výpočtová teplota je značně vysoká, pro výrobu vysokoteplotní části není možné použít ocel. Jako materiál vysokoteplotní části volím niklovou slitinu s názvem **Hastelloy® X Allox**, která má zaručené mechanické vlastnosti i za působení vysokých teplot. Termofyzikální a materiálové vlastnosti jsou shrnuty v následující tabulce:

| | | | |
|---------------------------------|-------------------|--------|-----------------|
| Součinitel tepelné vodivosti | λ | 9,1 | $[W/m \cdot K]$ |
| Hustota | ρ | 8220 | $[kg/m^3]$ |
| Mosul pružnosti v tahu | E | 205000 | $[MPa]$ |
| Mez kluzu při výpočtové teplotě | σ_{Kt} | 144 | $[MPa]$ |
| Střední hodnota meze pevnosti | σ_{TP10^n} | 245 | $[MPa]$ |
| Střední hodnota meze tečení | σ_{T10^n} | - | $[MPa]$ |

Tab. 4-5: Termofyzikální a mechanické vlastnosti materiálu vysokoteplotní části [9]

4.3.2. Materiál nízkoteplotní části

Nejvyšší teplota v nízkoteplotní části dovoluje použití oceli, ale musí být žáropevná tedy i vysoce legovaná. Pro tuhle část výměníku jsem zvolil austenitickou ocel číslo **X20CrMoV12-1** podle [10]. Vybraný materiál má zaručené mechanické vlastnosti do 550°C, která by podle předběžného odhadu měla být vyšší než nejvyšší provozní tedy i výpočtová teplota této části.

| | | | |
|---------------------------------|-------------------|--------|-----------------|
| Součinitel tepelné vodivosti | λ | 24 | $[W/m \cdot K]$ |
| Hustota | ρ | 7700 | $[kg/m^3]$ |
| Mosul pružnosti v tahu | E | 217000 | $[MPa]$ |
| Mez kluzu při výpočtové teplotě | σ_{Kt} | 250 | $[MPa]$ |
| Střední hodnota meze pevnosti | σ_{TP10^n} | 192 | $[MPa]$ |
| Střední hodnota meze tečení | σ_{T10^n} | 151 | $[MPa]$ |

Tab. 4-6: Termofyzikální a mechanické vlastnosti materiálu nízkoteplotní části [10]

4.4. Volba ostatních parametrů

Jelikož hmotnostní průtok spalin není znám, je třeba zvolit její teplotu na výstupu z výměníku. Teplota spalin na vstupu je 150°C, proto teplotu spalin v tomto místě zvolím o 80°C vyšší, tedy 230°C. Program také potřebuje zadat tlak teplosměnných médií na vstupech, které nejsou známe. Známe jenom tlaky na výstupech a to 400kPa na straně vzduchu a 100kPa na straně spalin, což je přibližně atmosférický tlak. Nejdřív volím přibližnou hodnotu a to 410kPa pro vzduch a 120kPa pro spaliny a po prvním spuštění návrhu je změním podle výsledných tlakových ztrát.

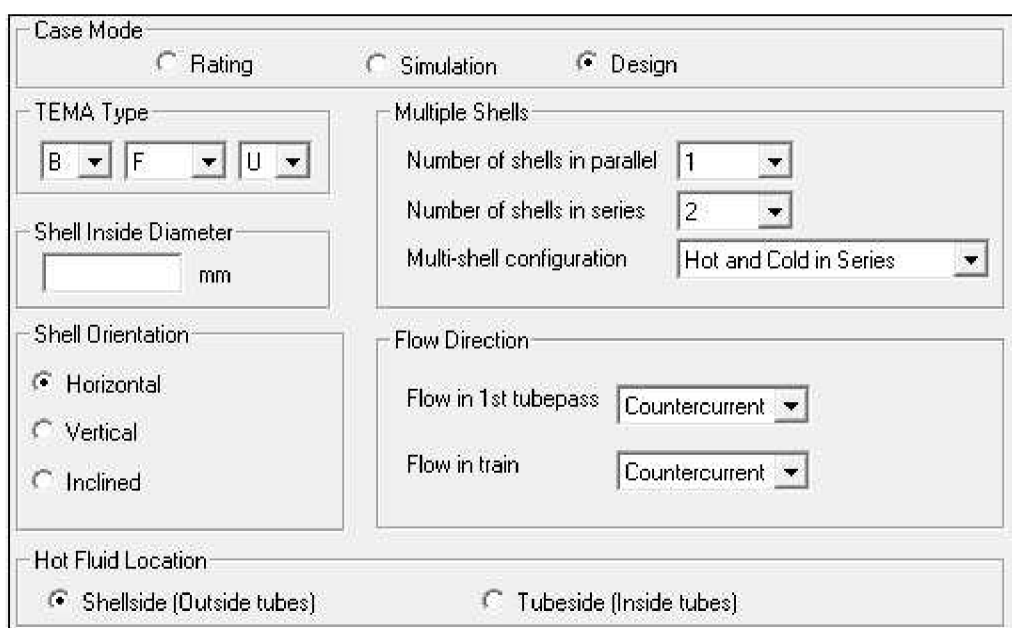
5. ŘEŠENÍ ZADÁNÍ V PROGRAMU HTRI XCHANGER SUITE®

Po spuštění programu stlačíme *New* a zvolíme *New Shell and Tube Exchanger*. V levé části okna nového projektu jsou položky pro zadávání vstupních dat uspořádány v stromové struktuře. První pracovní okno je *Input Summary* kde jsou shrnuty hlavní vstupní parametry. V části *Case Mode* zvolíme *Design*.



Obr. 5-1: Volba módu *Design*

Zadávání vstupních údajů začínáme tím, že v stromové struktuře zvolíme *Input Summary* → *Geometry* → *Shell*, kde můžeme zvolit geometrii pláště. V části *TEMA Type* pracovního okna zvolíme *BFU* a v části *Multiple Shells* zvolíme dva pláště v sériovém uspořádání nastavením *Number of shells in series* na 2.



Obr. 5-2: Nastavení geometrie pláště

V stromové struktuře zvolíme okno *Input Summary* → *Geometry* → *Tubes* → *Tube Geometry*, které složí volbě geometrii teplosměnných trubek. *Tube OD*, což je vnější průměr trubky, nastavíme na hodnotu **25mm** a tloušťku stěny *Average wall thickness* na **2mm**. V části *Tube Pitch* nastavíme rozteč trubek na zvolenou hodnotu napsáním **40mm** do okna *Pitch*. V části *Bundle Geometry* zvolíme **45°** pro *Tube layout angle*, **2** pro *Tubepasses* což je počet chodů trubkového prostoru a **3m** pro *Length* což je délka teplosměnných trubek. V části *Tube Material* v rolovacím menu *Material* zvolíme **<Not in data bank>** a zadáme vlastnosti materiálu zvoleného v předcházející sekci. Hodnotu

9,1W/m-C pro **Thermal conductivity**, **8220kg/m³** pro **Density** a **205000MPa** pro **Elastic modulus**.

Obr. 5-3: Nastavení geometrie teplosměnných trubek

V dialogovém okně **Input Summary** → **Geometry** → **Baffles** v části **Baffle Geometry** v rolovacím okně **Cut orientation** zvolíme **Perpendicular**, čímž zvolíme horizontální segmentové přepážky.

Obr. 5-4: nastavení geometrie přepážek

Tím geometrické údaje jsou zadané a můžeme pokračovat zadáváním fyzikálních veličin teplosměnných médií. V stromové struktuře vybereme **Input Summary** → **Process** a zadáme vstupní údaje pro tepelný výpočet. Do levých kolonek píšeme údaje pro **Hot Fluid**, což znamená teplé médium a v našem případě jsou to spaliny. Na pravé straně jsou kolonky pro **Cold Fluid**, což znamená studené médium, tj. vzduch. První řádek je **Fluid Name**, kam napíšeme název média a **Phase** zvolíme **All vapor** pro obě média. Třetí řádek je **Flow Rate** (průtok), kde pro spaliny nenapíšeme nic, neboť tento údaj nepoznáme a pro vzduch **3,85kg/s**. Další řádek je **Inlet temperature** (vstupní teplota) kam pro spaliny napíšeme **925°C** a pro vzduch **150°C**. Do kolonek **Outlet temperature** (výstupní teplota) pro spaliny napíšeme zvolených **230°C** a pro vzduch zadaných **750°C**. Další řádek je **Inlet pressure** (vstupní tlak) kde pro spaliny zadáme **120kPa** a **410kPa** pro vzduch.

| | Hot Fluid | Cold Fluid | |
|-------------------------|-----------|------------|-----------------------|
| Fluid name | spaliny | vzduch | |
| Phase | All vapor | All vapor | |
| Flow rate | | 3,85 | kg/s |
| Inlet fraction vapor | 1 | 1 | weight fraction vapor |
| Outlet fraction vapor | 1 | 1 | weight fraction vapor |
| Inlet temperature | 925 | 150 | C |
| Outlet temperature | 230 | 750 | C |
| Inlet pressure | 120 | 410 | kPa |
| Allowable pressure drop | | | kPa |
| Fouling resistance | | | m ² -K/W |
| Fouling layer thickness | | | mm |
| Exchanger duty | | | MegaWatts |
| Duty/flow multiplier | 1 | | |

Obr. 5-5: Vstupní hodnoty pro tepelný výpočet

Program obsahuje databázi termofyzikálních vlastností široké škály látek, proto potřebujeme zadat jenom složení médií. K zadání složení spalin zvolíme okno **Input Summary** → **Hot fluid properties**. V části **Physical Property Input Option** zvolíme **Component by component** a v části **Heat Release Input Method** zvolíme možnost **Program calculated**.

| | |
|--------------------------------|---|
| Fluid name | spaliny |
| Fluid compressibility | |
| Physical Property Input Option | <input type="radio"/> Mixture properties via grid <input checked="" type="radio"/> Component by component <input type="radio"/> Component and grid properties |
| Heat Release Input Method | <input type="radio"/> User specified <input type="radio"/> Specified dew/bubble point <input checked="" type="radio"/> Program calculated |
| Composition Units | <input type="radio"/> Mass <input checked="" type="radio"/> Moles |
| Flash Type | <input type="radio"/> Differential <input checked="" type="radio"/> Integral |
| Property Options | Temperature interpolation: Program |
| Property Generator... | |

Obr. 5-6: Volba metody zadání vlastností složek teplosměnných médií

V okně *Input Summary* → *Hot Fluid Properties* → *Components* zadáváme relativné hodnoty množství složek spalin. V scrollovacím okně vybereme žádanou složku, klikneme *Add*, v tabulce v spodní části okna nastavíme *Vapor* v sloupci *Phase* a zapíšeme relativní množství do sloupce s názvem *Quantity*. Stejný postup zopakujeme pro každou složku.

The screenshot shows the 'Components' window in a software application. At the top, the 'Databank' is set to 'HTRI'. A list of components is shown, including Acetic Acid (C2H4O2), Acetone (C3H6O), Acetylene (C2H2), Air, Ammonia (NH3), Aniline (C6H7N), Argon (Ar), Benzene (C6H6), 1,3 Butadiene (C4H6), 1,2 Butadiene (C4H6), and n-Butane (C4H10). To the right, there are search options: 'Find Component' with a text input, and checkboxes for 'By name' and 'By formula', both checked. Below these are 'Find First' and 'Find Next' buttons. Further down, 'Composition Units' are set to 'Moles'. At the bottom right are 'Add', 'Delete', and 'Order...' buttons.

| | Databank Name | User Name | Source | Phase | Quantity | Fraction |
|---------------------|------------------|------------------|--------|-------|----------|----------|
| 1 | Carbon Dioxide | Carbon Dioxide | HTRI | Vapor | 12,4415 | 0,1244 |
| 2 | Sulfur Dioxide | Sulfur Dioxide | HTRI | Vapor | 0,00102 | 1,016e-5 |
| 3 | Nitrogen | Nitrogen | HTRI | Vapor | 68,3116 | 0,6831 |
| 4 | Oxygen | Oxygen | HTRI | Vapor | 4,24149 | 0,0424 |
| 5 | Argon | Argon | HTRI | Vapor | 0,80521 | 0,0081 |
| 6 | Water (IAPWS 199 | Water (IAPWS 199 | HTRI | Vapor | 14,1992 | 0,1420 |
| 7 | | | | | | |
| 8 | | | | | | |
| 9 | | | | | | |
| 10 | | | | | | |
| 11 | | | | | | |
| Total Moles: | | | | | 100 | |

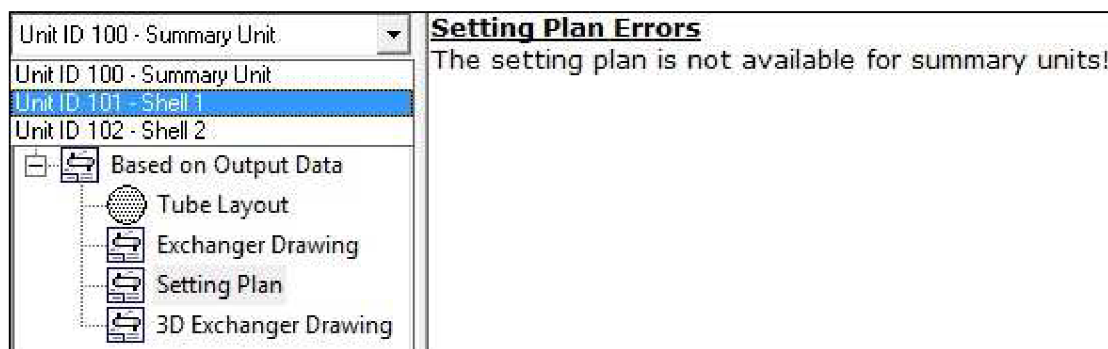
Obr. 5-7: Zadání složení spalin

Pro zadání složení vzduchu zvolíme *Input Summary* → *Cold fluid properties* a dále postupujeme stejně jako v případě spalin.

| | Databank Name | User Name | Source | Phase | Quantity | Fraction |
|---------------------|------------------|------------------|--------|-------|----------|----------|
| 1 | Carbon Dioxide | Carbon Dioxide | HTRI | Vapor | 0,02951 | 2,951e-4 |
| 2 | Nitrogen | Nitrogen | HTRI | Vapor | 76,7719 | 0,7677 |
| 3 | Oxygen | Oxygen | HTRI | Vapor | 20,6561 | 0,2066 |
| 4 | Argon | Argon | HTRI | Vapor | 0,90494 | 0,0090 |
| 5 | Water (IAPWS 199 | Water (IAPWS 199 | HTRI | Vapor | 1,63752 | 0,0164 |
| 6 | | | | | | |
| 7 | | | | | | |
| 8 | | | | | | |
| 9 | | | | | | |
| 10 | | | | | | |
| 11 | | | | | | |
| Total Moles: | | | | | 100 | |

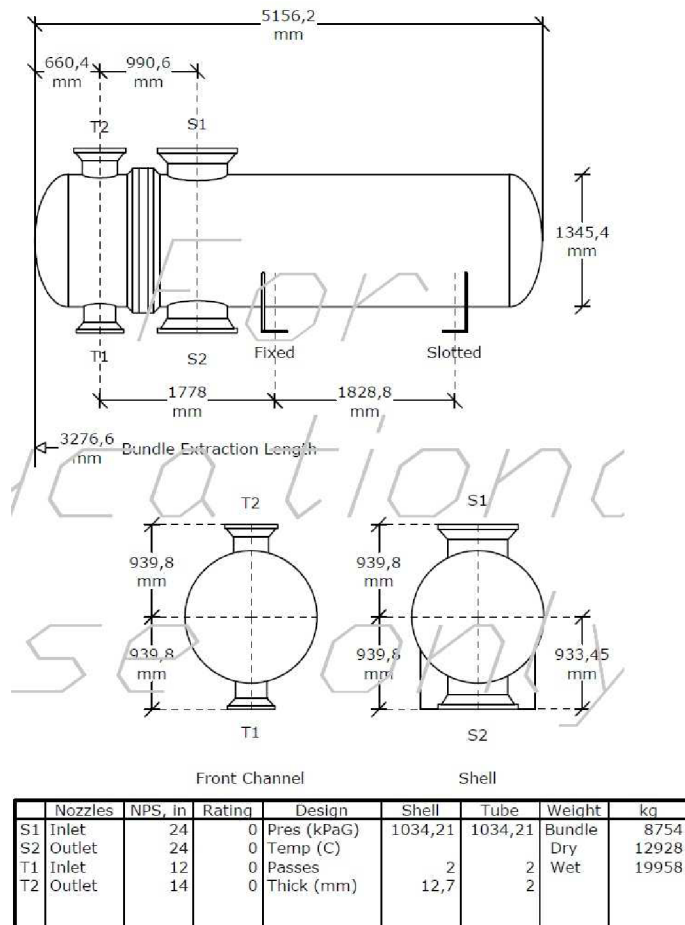
Obr. 5-8: Zadání složení vzduchu

Tím máme všechny potřebné vstupní údaje zadané. Pro spuštění návrhu výměníku programem stlačíme ikonu **Run case**, čím program začne vypočítat optimální rozměry v pěti krocích. V prvním kroku stanoví přibližný vnitřní průměr pláště a rozteč přepážek, v druhém a třetím kroku přepočítá výměník s různými průměry pláště a ve čtvrtém a pátém kroku s různými rozteči přepážek. Program vybere nejlepší variantu a vyhodnotí jí. Tím máme vypočtené přibližné optimální rozměry výměníku. Výstupem jsou protokoly sepsány v kapitole 3.2. Jelikož výměník je složen ze dvou sériově zapojených identických těles, pro zobrazení výstupních protokolů a schémat musíme vybrat některý z nich kliknutím na rolovací menu **Unit ID 100 - Summary Unit** v horním levém rohu pracovního okna a výběrem žádané části **Unit ID 101 - Shell 1** nebo **Unit ID 102 - Shell 2**.

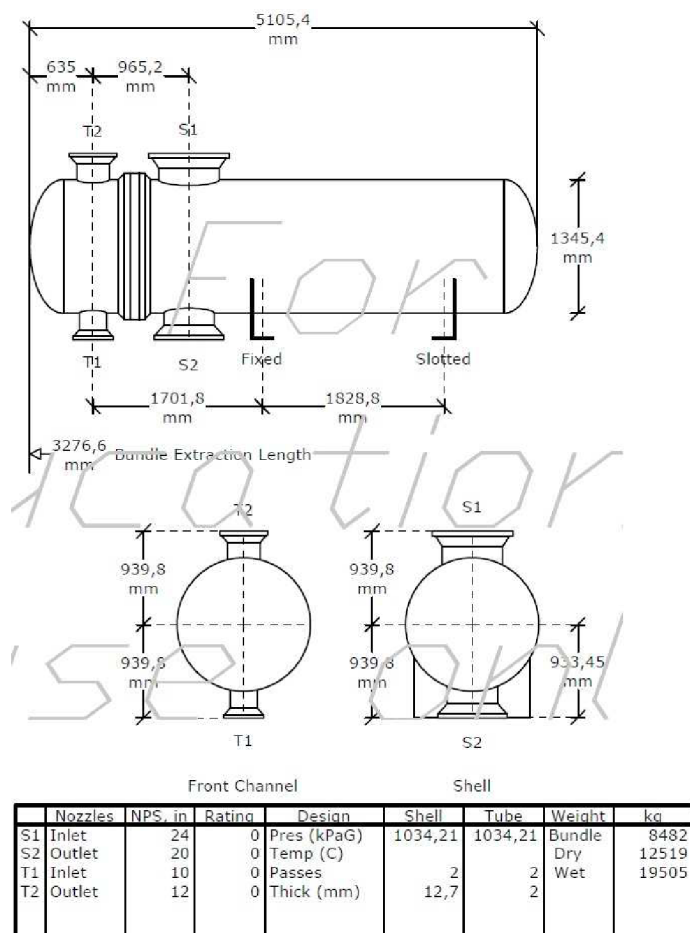


Obr. 5-9: Výběr žádaného tělesa pro vykreslení schémat

Implicitní nastavení hrdel je radiální, a jelikož program není schopný vykreslit dispoziční uspořádání (**Setting Plan**) výměníku s axiálními hrdly vzduchu, poznameneáme některé rozměry výměníku, jako tloušťka pláště a délka hrdel spalín.



Obr. 5-10: Dispoziční uspořádání vysokoteplotní části



Obr. 5-11: Dispoziční uspořádání nízkoteplotní části

Pro další návrh je třeba přepnout do módu **Simulation** nebo **Rating**. Program žádá další vstupní údaje, jako vnitřní průměr pláště nebo počet trubek, a počet mezer mezi přepážkami nebo délka jedné mezery. Jako první doplním vnitřní průměr pláště podle předcházejícího výpočtu, což je 1320mm, kliknutím na stromovou strukturu zvolíme **Input Summary** → **Geometry** → **Shell**, a do kolonky **Shell Inside Diameter** napíšeme hodnotu.

Case Mode: Rating Simulation Design

TEM Type: B F U

Shell Inside Diameter: 1320 mm

Shell Orientation: Horizontal Vertical Inclined

Hot Fluid Location: Shellside (Outside tubes) Tubeside (Inside tubes)

Multiple Shells: Number of shells in parallel: 1; Number of shells in series: 2; Multi-shell configuration: Hot and Cold in Series

Flow Direction: Flow in 1st tubepass: Countercurrent; Flow in train: Countercurrent

Obr. 5-12: Nastavení vnitřního průměru pláště


Počet přepážek nastavíme kliknutím v stromové struktuře **Input Summary** → **Geometry** → **Baffles** a v části **Baffle Geometry** do kolonky **Crosspasses** doplníme hodnotu 7. Ve výstupním protokolu s chybovým hlášením **Runtime Messages** je psáno, že vstupní a výstupní mezera mezi přepážkami je příliš malá, proto zvolíme větší hodnotu, než jsou průměry hrdel napsáním hodnoty **800mm** do kolonky **Inlet/outlet spacing** v části **Baffle spacing** pracovního okna geometrie přepážek.

| | | | |
|-----------------|--------------------------|----------------------|----------|
| Baffle Geometry | | | |
| Type | Single segmental | Window area | percent |
| Cut orientation | Perpendicular | Crosspasses | 7 |
| Cut | % of shell ID | Double-seg. overlap | Tuberows |
| Baffle Spacing | | | |
| Central | mm | Inlet/outlet spacing | 800 mm |
| Variable | <input type="checkbox"/> | Turn-around spacing | mm |

Obr. 5-13: Nastavení počtu mezer a délku vstupní a výstupní mezery mezi přepážkami

Dalším krokem je nastavení umístění vstupního a výstupního hrdla vzduchu volbou **Input Summary** → **Geometry** → **Nozzle Location**. V části **Tubeside Positions** v rolovacím menu **Inlet type** nastavíme **Axial**.

| | | | | | | |
|---------------------|-----------------|--------------------|---------------|------------|---|---|
| Shellside Positions | | Tubeside Positions | | Front Head | | |
| Inlet radial | Program Decides | Inlet position | Front head | Location | | |
| Inlet longitudinal | Front head | Inlet type | Axial | TEMA Type | | |
| Outlet radial | Program decides | Outlet type | Same as inlet | B | F | U |
| Nozzle at U-bend | At U-bend | Tubeside Process | | Type | | |
| | | Type | | All vapor | | |



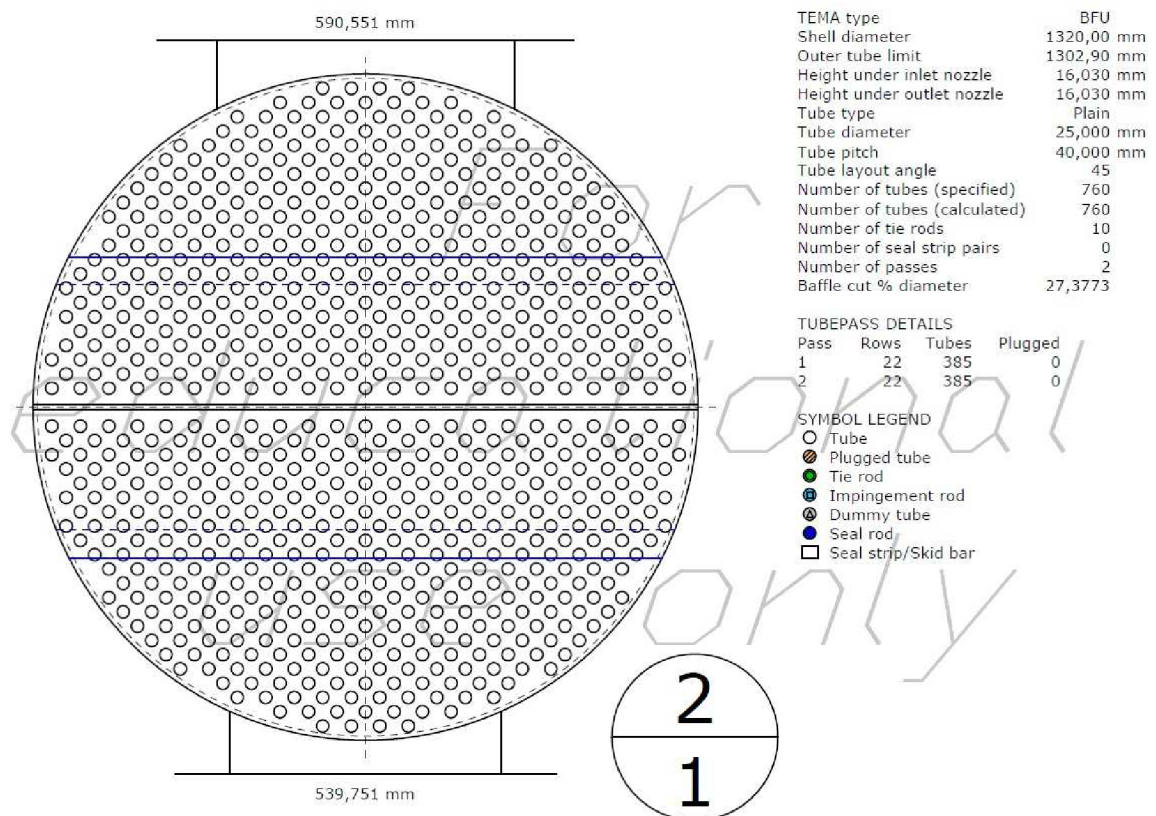
Obr. 5-14: Nastavení umístění hrdel vzduchu

Jako poslední krok znovu spustíme návrh stisknutím ikonky **Run case**.

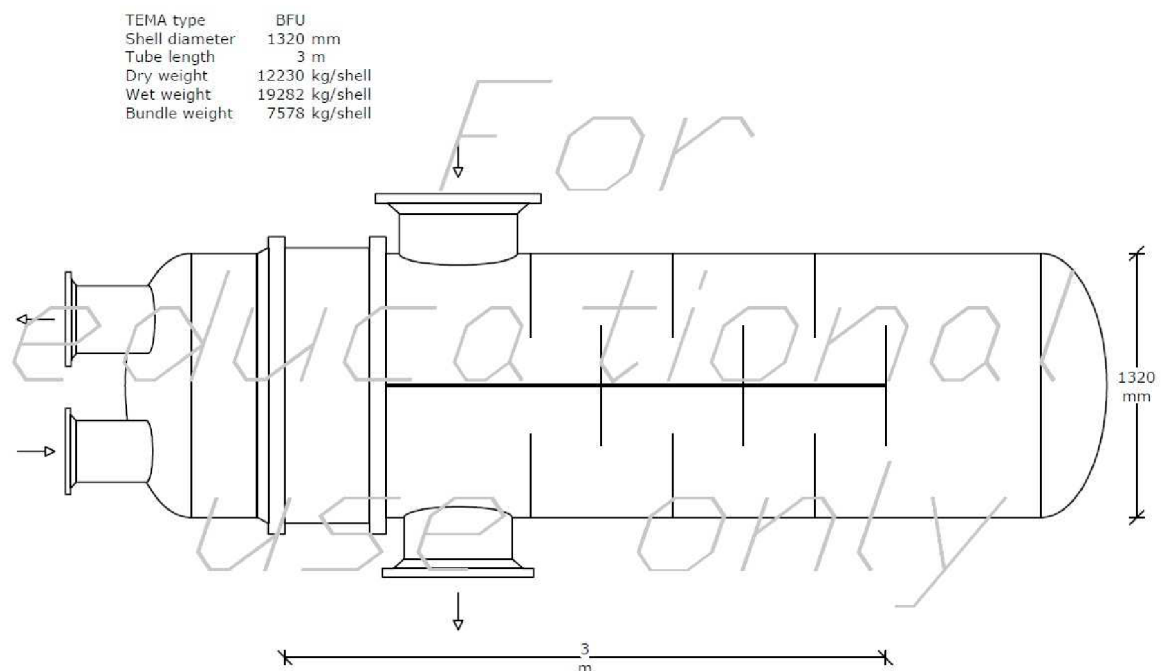
6. VÝSLEDKY VÝPOČTU

6.1. Výstupní schémata

6.1.1. Vysokoteplotní část výměníku

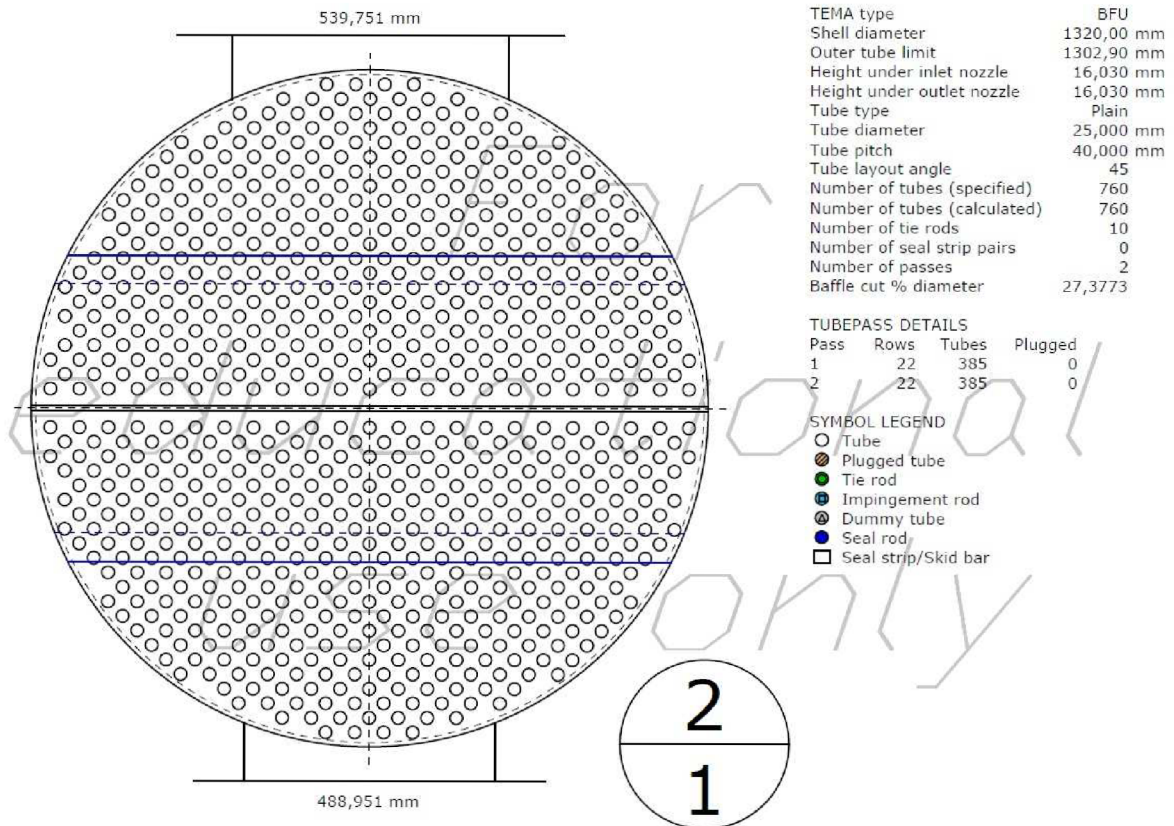


Obr. 6-1: Rozvržení trubek vysokoteplotní části

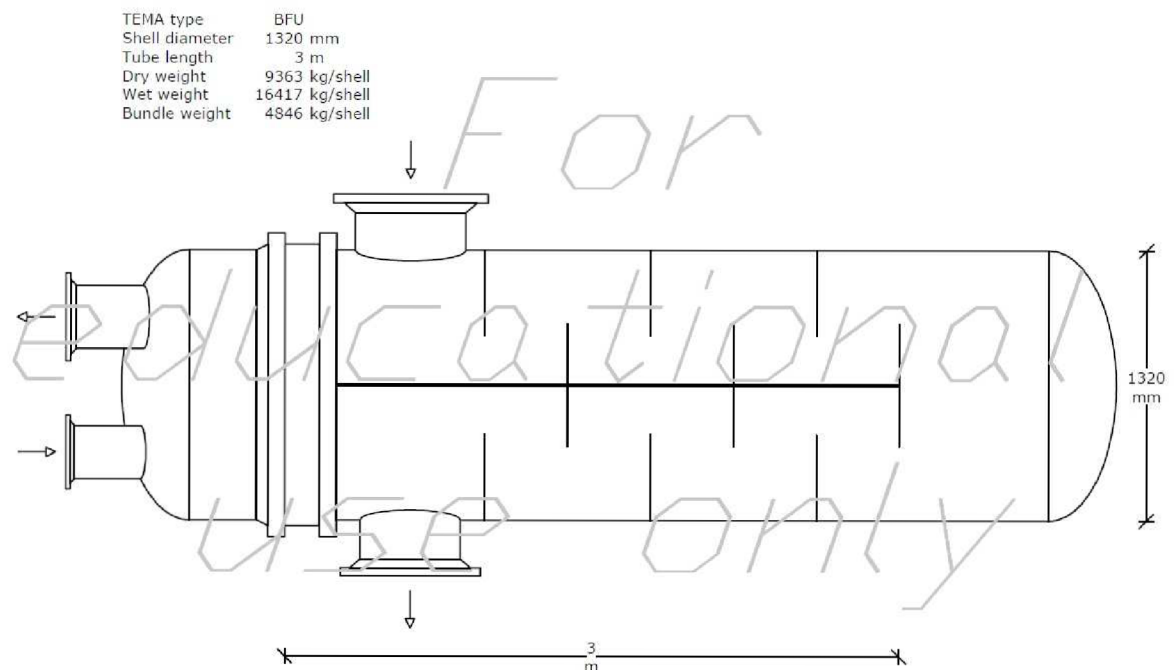


Obr. 6-2: Schéma vysokoteplotní části

6.1.2. Nízkoteplotní část výměníku



Obr. 6-3: Rozvržení trubek nízkoteplotní části



Obr. 6-4: Schéma nízkoteplotní části

6.2. Shrnutí hlavních výsledků výpočtu

6.2.1. Vysokoteplotní část

| | | | |
|-----------------------------|----------------|--------|-------------------|
| Hmotnostní průtok spalin | \dot{m}_{sp} | 2,97 | [kg/s] |
| Hmotnostní průtok vzduchu | \dot{m}_{vz} | 3,85 | [kg/s] |
| Teplota spalin na vstupu | t_{spIN} | 925 | [°C] |
| Teplota spalin na výstupu | t_{spOUT} | 513 | [°C] |
| Teplota vzduchu na vstupu | t_{vzIN} | 390 | [°C] |
| Teplota vzduchu na výstupu | t_{vzOUT} | 750 | [°C] |
| Tlak spalin na vstupu | p_{spIN} | 120 | [kPa] |
| Tlak spalin na výstupu | p_{spOUT} | 114 | [kPa] |
| Tlak vzduchu na vstupu | p_{vzIN} | 405 | [kPa] |
| Tlak vzduchu na výstupu | p_{vzOUT} | 402,5 | [kPa] |
| Tepelný výkon | \dot{Q} | 1542 | [kW] |
| Velikost teplosměnné plochy | A | 179,68 | [m ²] |

Tab. 6-1: Výsledky tepelného výpočtu vysokoteplotní části

| | | | |
|---|-------------|------|------|
| Typ pláště a komor | TEMA | BFU | [-] |
| Vnitřní průměr pláště | d_{pl} | 1320 | [mm] |
| Tloušťka stěny pláště | t_{pl} | 13 | [mm] |
| Vnější průměr pláště | D_{pl} | 1346 | [mm] |
| Vnitřní průměr teplosměnných trubek | d_{tr} | 21 | [mm] |
| Tloušťka stěny teplosměnných trubek | t_{tr} | 2 | [mm] |
| Vnější průměr teplosměnných trubek | D_{tr} | 25 | [mm] |
| Efektivní délka teplosměnných trubek | l_{tr} | 3010 | [mm] |
| Počet teplosměnných trubek | n | 385 | [-] |
| Rozteč teplosměnných trubek | t | 40 | [mm] |
| Tloušťka trubkovnice | s | 422 | [mm] |
| Rozteč přepážek | $t_{př}$ | 355 | [mm] |
| Vnitřní průměr vstupního hrdla spalin | d_{spIN} | 590 | [mm] |
| Vnitřní průměr výstupního hrdla spalin | d_{spOUT} | 540 | [mm] |
| Vnitřní průměr vstupního hrdla vzduchu | d_{vzIN} | 308 | [mm] |
| Vnitřní průměr výstupního hrdla vzduchu | d_{vzOUT} | 336 | [mm] |
| Celková výška VT části | H_{VT} | 1880 | [mm] |
| Celková délka VT části | L_{VT} | 5156 | [mm] |

Tab. 6-2: Geometrické parametry vysokoteplotní části

6.2.2. Nízkoteplotní část

| | | | |
|-----------------------------|----------------|--------|-------------------|
| Hmotnostní průtok spalin | \dot{m}_{sp} | 2,97 | [kg/s] |
| Hmotnostní průtok vzduchu | \dot{m}_{vz} | 3,85 | [kg/s] |
| Teplota spalin na vstupu | t_{spIN} | 513 | [°C] |
| Teplota spalin na výstupu | t_{spOUT} | 230 | [°C] |
| Teplota vzduchu na vstupu | t_{vzIN} | 150 | [°C] |
| Teplota vzduchu na výstupu | t_{vzOUT} | 390 | [°C] |
| Tlak spalin na vstupu | p_{spIN} | 108 | [kPa] |
| Tlak spalin na výstupu | p_{spOUT} | 103 | [kPa] |
| Tlak vzduchu na vstupu | p_{vzIN} | 408 | [kPa] |
| Tlak vzduchu na výstupu | p_{vzOUT} | 406 | [kPa] |
| Tepelný výkon | \dot{Q} | 980 | [kW] |
| Velikost teplosměnné plochy | A | 194,73 | [m ²] |

Tab. 6-3: Výsledky tepelného výpočtu nízkoteplotní části

| | | | |
|---|-------------|------|------|
| Typ pláště a komor | TEMA | BFU | [-] |
| Vnitřní průměr pláště | d_{pl} | 1320 | [mm] |
| Tloušťka stěny pláště | t_{pl} | 13 | [mm] |
| Vnější průměr pláště | D_{pl} | 1346 | [mm] |
| Vnitřní průměr teplosměnných trubek | d_{tr} | 21 | [mm] |
| Tloušťka stěny teplosměnných trubek | t_{tr} | 2 | [mm] |
| Vnější průměr teplosměnných trubek | D_{tr} | 25 | [mm] |
| Efektivní délka teplosměnných trubek | l_{tr} | 3262 | [mm] |
| Počet teplosměnných trubek | n | 385 | [-] |
| Rozteč teplosměnných trubek | t | 40 | [mm] |
| Tloušťka trubkovnice | s | 170 | [mm] |
| Rozteč přepážek | $t_{př}$ | 405 | [mm] |
| Vnitřní průměr vstupního hrdla spalin | d_{spIN} | 540 | [mm] |
| Vnitřní průměr výstupního hrdla spalin | d_{spOUT} | 490 | [mm] |
| Vnitřní průměr vstupního hrdla vzduchu | d_{vzIN} | 260 | [mm] |
| Vnitřní průměr výstupního hrdla vzduchu | d_{vzOUT} | 308 | [mm] |
| Celková výška VT části | H_{VT} | 1880 | [mm] |
| Celková délka VT části | L_{VT} | 5105 | [mm] |

Tab. 6-4: Geometrické parametry nízkoteplotní části

7. ZÁVĚR

Tato závěrečná práce se zabývala návrhem výměníku tepla pro ohřev vzduchu spaliny vzniklémi spalováním dřevné biomasy. Vzduch na vstupu do výměníku má tlak 410kPa a po ohřátí na teplotu 750°C expanduje v malé plynové turbíně. Výměník byl navržen jako protiproudý, trubkový s U-trubkami, se dvěma chody jak na straně teplosměnných trubek, kde proudí vzduch, tak i v mezitrubkovém prostoru, kde proudí spaliny. K intenzifikaci turbulence proudění, segmentové přepážky jsou použity. Výměník je složen ze dvou sériově zapojených částí a to kvůli úsporám, jelikož nízkoteplotní část klade menší nároky na materiál. Návrh byl proveden použitím softwaru HTRI Xchanger Suite®.

Úvodní částí práce obsahuje popis a rozdělení výměníků z různých hledisek a podrobnější popis trubkových výměníků, dále obsahuje základní vztahy pro tepelný a hydraulický výpočet. V další části jsou vypočteny vstupní údaje pro použitý software. Mezi ní patří složení teplosměnných médií, tj. vlhkého vzduch a spalin, dále některé zvolené geometrické vlastnosti, jako rozměry a uspořádání teplosměnných trubek, jejich rozteč, dále volba materiálů pro vysokoteplotní a nízkoteplotní část a volba dalších parametrů. V poslední části je podrobný popis zadávání vstupních údajů do softwaru a shrnutí výsledků. Práce také obsahuje výkresovou dokumentaci vybraných částí.

Na základě výsledků a odborné literatury můžu předpokládat, že navržený výměník bude pracovat spolehlivě. Koncepce výměníku je jednoduchá jak z konstrukčního tak i z technologického hlediska a výroba takového výměníku je plně zvládnuta v České republice. Pro výměník je třeba dále navrhnout konstrukční a technologický postup, podpěrnou konstrukci, tepelnou izolaci a přístrojové vybavení.

8. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Fonyó, Zs. a Fábry, Gy.: *Vegyipari művelettani alapismeretek (Základy chemických procesů)*. Nemzeti Tankönyvkiadó Budapest, 1998
- [2] Ochrana, L.: *Spalovací zařízení a výměníky tepla*. Nakladatelství VUT Brno, 1993
- [3] Beke, J.: *Műszaki hőtan mérnököknek (Termodynamika pro inženýry)*. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó Budapest, 2000
- [4] *Tepelné výměníky*, ZVU Engineering a.s.
http://www.zvuengineering.cz/files/cz/brozury/Tepelne_vymeniky_brozura_revize_0.pdf
[04.2011]
- [5] Dlouhý, T.: *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Nakladatelství ČVUT, 2007
- [6] *Software SteanTab*, ChemicalLogic
<http://www.chemicallogic.com> [04.2011]
- [7] Budaj, F.: *Parní kotle – Podklady pro tepelný výpočet*. Nakladatelství VUT Brno
- [8] DIN 2448 – Rozměry a délková hmotnost bezešvých trubek
- [9] *Hastelloy® X Alloy*, Haynes International high-temperature alloys
<http://www.haynesintl.com/pdf/h3009.pdf> [04.2011]
- [10] DIN 17 175 – Bezešvé trubky z žárovevných ocelí
- [11] ČSN 69 0010 – Tlakové nádoby stabilní

9. SEZNAM PŘÍLOH

1. Výstupní protokoly softwaru HTRI Xchanger Suite®
2. Výkresová dokumentace vybraných částí

10. PŘÍLOHY

Příloha 1

Vysokoteplotní část výměníku

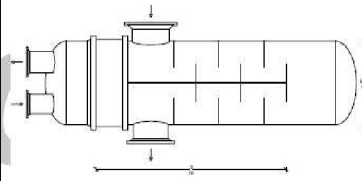
| HTRI | | Input Reprint | Page 1 |
|---|------------------------|---|--------|
| | | Released to the following organization: <i>Microsoft</i> <i>Microsoft</i> | |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: Friendsl | | SI Units | |
| : Shell 1 | | | |
| Simulation - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | | |
| NOTE: Case input modified. Values may not be consistent with other output reports. | | | |
| Shell Data | | | |
| Service type | Generic Shell and Tube | | |
| TEMA type | BFU | | |
| Run mode | Simulation | | |
| Hot fluid location | Shellside | | |
| Number of shells in series | 1 | | |
| Number of shells in parallel | 1 | | |
| Shell inside diameter | 1320,00 mm | | |
| Flow in 1st tubepass | Countercurrent | | |
| Train flow direction | Countercurrent | | |
| Reboiler Data | | | |
| Reboiler type | No piping specified | | |
| Inlet pressure location | Inlet nozzle | | |
| Tube Data | | | |
| Tube type | Plain | | |
| Tube outside diameter | 25,000 mm | | |
| Tube wall thickness | 2,000 mm | | |
| Tube pitch | 40,000 mm | | |
| Tube pitch ratio | 1,600 | | |
| Tubepasses per shell | 2 | | |
| Tube pattern | 45 degrees | | |
| Tube count method | Rigorous | | |
| Tube length | 3,000 m | | |
| Tube material | Not in data bank | | |
| Tube material density | 8220,00 kg/m3 | | |
| Tube material thermal conductivity | 9,1000 W/m-C | | |
| Tube material elastic modulus | 205000 MPa | | |
| Tubepass Arrangement Data | | | |
| Force symmetric layout | No | | |
| Force cleaning lanes | No | | |
| Tubes to remove for tie rods | Calculated | | |
| Baffle Data | | | |
| Baffle type | Single segmental | | |
| Baffle orientation | Perpendicular | | |
| Number of crosspasses | 7 | | |
| Variable baffle spacing | No | | |
| Window cut from baffles | No | | |
| Clearance Data | | | |
| Number of seal strip pairs | Calculated | | |
| Baffle clearance type | TEMA | | |
| Block A stream | No | | |
| Block E stream | No | | |
| Block F stream | No | | |
| Number of passlane seal rods | Calculated | | |

| HTRI | | Input Reprint | Page 2 |
|---|------------------|---|--------|
| | | Released to the following organization: <i>Microsoft</i> <i>Microsoft</i> | |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: Friendsl | | SI Units | |
| : Shell 1 | | | |
| Simulation - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | | |
| NOTE: Case input modified. Values may not be consistent with other output reports. | | | |
| Nozzle Data | | | |
| Number of shellside inlet nozzles | | | 1 |
| Number of shellside outlet nozzles | | | 1 |
| Number of tubeside inlet nozzles | | | 1 |
| Number of tubeside outlet nozzles | | | 1 |
| Radial position on shell inlet nozzle | | Program decides | |
| Radial position on shell outlet nozzle | | Program decides | |
| Location of nozzle at U-bend | | At U-bend | |
| Tubeside entry type | | Axial | |
| Tubeside inlet position | | Front head | |
| Tubeside exit type | | Same as inlet | |
| Front head location | | Left | |
| Impingement Data | | | |
| Impingement device present | | If required by TEMA | |
| Impingement type | | Circular plate | |
| Optional Geometry Data | | | |
| Small exchanger | | | No |
| Tubesheet type | | | Single |
| Shell expansion joint | | | No |
| Floating head support type | | | None |
| Full support at U-Bend | | | None |
| Insulated longitudinal baffle | | | No |
| Process Conditions Data | | | |
| | Hot Fluid | Cold Fluid | |
| Phase condition | Sensible gas | Sensible gas | |
| Flow rate | -- | 3,8500 kg/s | |
| Inlet vapor fraction | 1 | 1 | |
| Outlet vapor fraction | 1 | 1 | |
| Inlet temperature | 925,00 | -- C | |
| Outlet temperature | -- | 750,00 C | |
| Inlet pressure | 120,000 | 404,731 kPa | |
| Duty multiplier | | 1 | |
| Hot Fluid Property Data | | | |
| Fluid name | | spaliny | |
| Physical property method | | Component by component properties | |
| Heat release method | | Program calculated | |
| Flash type | | Integral | |
| Quantity units | | Moles | |
| Temperature interpolation option | | Program | |
| Number of components | | 6 | |
| Property package | | HTRI | |


| HTRI | | Input Reprint | | Page 3 |
|---|-----------------------------------|----------------------|--------------------|-----------------|
| Released to the following organization: <i>Microsoft</i> <i>Microsoft</i> | | | | |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: Friendsl | | | | SI Units |
| : Shell 1 | | | | |
| Simulation - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | | | |
| NOTE: Case input modified. Values may not be consistent with other output reports. | | | | |
| Hot Fluid Component Data | | | | |
| Component number | 1 | 2 | 3 | |
| Component name | Carbon Dioxide | Sulfur Dioxide | Nitrogen | |
| Comp. bank name | Carbon Dioxide | Sulfur Dioxide | Nitrogen | |
| Component bank | HTRI | HTRI | HTRI | |
| Component code | 2 | 120 | 131 | |
| Component phase | Vapor | Vapor | Vapor | |
| Component quantity | 12,4415 | 0,00102 | 68,3116 | |
| Component number | 4 | 5 | 6 | |
| Component name | Oxygen | Argon | Water (IAPWS 1997) | |
| Comp. bank name | Oxygen | Argon | Water (IAPWS 1997) | |
| Component bank | HTRI | HTRI | HTRI | |
| Component code | 201 | 208 | 1 | |
| Component phase | Vapor | Vapor | Vapor | |
| Component quantity | 4,24149 | 0,80521 | 14,1992 | |
| Cold Fluid Property Data | | | | |
| Fluid name | | | | vzduch |
| Physical property method | Component by component properties | | | |
| Heat release method | Program calculated | | | |
| Flash type | Integral | | | |
| Quantity units | Moles | | | |
| Temperature interpolation option | Program | | | |
| Number of components | 5 | | | |
| Property package | HTRI | | | |
| Cold Fluid Component Data | | | | |
| Component number | 1 | 2 | 3 | |
| Component name | Carbon Dioxide | Nitrogen | Oxygen | |
| Comp. bank name | Carbon Dioxide | Nitrogen | Oxygen | |
| Component bank | HTRI | HTRI | HTRI | |
| Component code | 2 | 131 | 201 | |
| Component phase | Vapor | Vapor | Vapor | |
| Component quantity | 0,02951 | 76,7719 | 20,6561 | |
| Component number | 4 | 5 | | |
| Component name | Argon | Water (IAPWS 1997) | | |
| Comp. bank name | Argon | Water (IAPWS 1997) | | |
| Component bank | HTRI | HTRI | | |
| Component code | 208 | 1 | | |
| Component phase | Vapor | Vapor | | |
| Component quantity | 0,90494 | 1,63752 | | |

| | | |
|---|---|-------------------------|
| HTRI | Input Reprint Released to the following organization: <i>Microsoft</i> <i>Microsoft</i> | Page 4 |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: FriendsI | | SI Units |
| : Shell 1 | | |
| Simulation - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | |
| NOTE: Case input modified. Values may not be consistent with other output reports. | | |
| Control Methods Data | | |
| Shellside friction factor method | | Commercial |
| Tubeside friction factor method | | Commercial |
| Pure longitudinal flow | | No |
| Pure component condensation | | No |
| Condensing correlation | | HTRI Proration |
| Mole fraction inerts | | 0 |
| Momentum exclusion | | 0 % |
| Pure component boiling | | No |
| Check film boiling | | Yes |
| Nucleate boiling method | Physical property/theoretical boiling range | |
| Component boiling method | | Nucleate and convective |
| Control User-Defined Methods Data | | |
| Add non-nucleate boiling | | Yes |
| Control Vibration Data | | |
| Damping factor method | | HTRI Method |
| Include inlet vibration support | | No |
| Include outlet vibration support | | No |

| HTRI | | Output Summary | | Page 1 | |
|---|-----------------|---|--------------------|----------------|-------------|
| | | Released to the following organization: | | | |
| | | Microsoft | | | |
| | | Microsoft | | | |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: FriendsI | | | | SI Units | |
| : Shell 1 | | | | | |
| Simulation - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | | | | |
| No Data Check Messages. | | | | | |
| See Runtime Message Report for Warning Messages. | | | | | |
| Process Conditions | | Hot Shellside | | Cold Tubeside | |
| Fluid name | | spaliny | | vzduch | |
| Flow rate | (kg/s) | 2,9702 | | 3,8500 | |
| Inlet/Outlet Y | (Wt. frac vap.) | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Inlet/Outlet T | (Deg C) | 925,00 | 512,87 | 390,16 | 750,00 |
| Inlet P/Avg | (kPa) | 120,002 | 113,897 | 404,731 | 402,448 |
| dP/Allow. | (kPa) | 12,209 | 0,000 | 4,567 | 0,000 |
| Fouling | (m2-K/W) | 0,000000 | | 0,000000 | |
| Exchanger Performance | | | | | |
| Shell h | (W/m2-K) | 160,48 | Actual U | (W/m2-K) | 61,59 |
| Tube h | (W/m2-K) | 121,92 | Required U | (W/m2-K) | 63,35 |
| Hot regime | (--) | Sens. Gas | Duty | (MegaWatts) | 1,5415 |
| Cold regime | (--) | Sens. Gas | Area | (m2) | 179,678 |
| EMTD | (Deg C) | 135,4 | Overdesign | (%) | -2,77 |
| Shell Geometry | | | Baffle Geometry | | |
| TEMA type | (--) | BFU | Baffle type | (--) | Single-Seg. |
| Shell ID | (mm) | 1320,00 | Baffle cut | (Pct Dia.) | 27,38 |
| Series | (--) | 1 | Baffle orientation | (--) | Perpend. |
| Parallel | (--) | 1 | Central spacing | (mm) | 354,884 |
| Orientation | (deg) | 0,00 | Crosspasses | (--) | 7 |
| Tube Geometry | | | Nozzles | | |
| Tube type | (--) | Plain | Shell inlet | (mm) | 590,551 |
| Tube OD | (mm) | 25,000 | Shell outlet | (mm) | 539,751 |
| Length | (m) | 3,000 | Inlet height | (mm) | 16,030 |
| Pitch ratio | (--) | 1,6000 | Outlet height | (mm) | 16,030 |
| Layout | (deg) | 45 | Tube inlet | (mm) | 307,087 |
| Tubecount | (--) | 760 | Tube outlet | (mm) | 336,551 |
| Tube Pass | (--) | 2 | | | |
| Thermal Resistance; % | | Velocities; m/s | | Flow Fractions | |
| Shell | 38,38 | Shellside | 31,01 | A | 0,013 |
| Tube | 60,14 | Tubeside | 16,96 | B | 0,900 |
| Fouling | 0,00 | Crossflow | 30,48 | C | 0,011 |
| Metal | 1,48 | Window | 32,61 | E | 0,076 |
| | | | | F | 0,000 |

| HTRI | | Final Results | | Page 1 | |
|--|----------------------|--|-------------|---------------|----------|
| | | Released to the following organization: Microsoft Microsoft | | | |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: Friendsl | | | | SI Units | |
| : Shell 1 Simulation - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | | | | |
| Process Data | | Hot Shellside | | Cold Tubeside | |
| Fluid name | spaliny | | | vzduch | |
| Fluid condition | | Sens. Gas | | Sens. Gas | |
| Total flow rate | (kg/s) | 2,9702 | | 3,8500 | |
| Weight fraction vapor, In/Out | (--) | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Temperature, In/Out | (Deg C) | 925,00 | 512,87 | 390,16 | 750,00 |
| Temperature, Average/Skin | (Deg C) | 718,94 | 648,58 | 570,08 | 646,13 |
| Wall temperature, Min/Max | (Deg C) | 468,12 | 841,79 | 466,71 | 838,87 |
| Pressure, In/Average | (kPa) | 120,002 | 113,897 | 404,731 | 402,448 |
| Pressure drop, Total/Allowed | (kPa) | 12,209 | | 4,567 | |
| Velocity, Mid/Max allow | (m/s) | 31,01 | | 16,96 | |
| Mole fraction inert | (--) | | 0,0000 | | |
| Average film coef. | (W/m2-K) | | 160,48 | | 121,92 |
| Heat transfer safety factor | (--) | | 1,000 | | 1,000 |
| Fouling resistance | (m2-K/W) | | 0,000000 | | 0,000000 |
| Overall Performance Data | | | | | |
| Overall coef., Reqd/Clean/Actual | (W/m2-K) | 63,35 | / | 61,59 | / 61,59 |
| Heat duty, Calculated/Specified | (MegaWatts) | 1,5415 | / | | |
| Effective overall temperature difference | (Deg C) | 135,4 | | | |
| EMTD = (MTD) * (DELTA) * (F/G/H) | (Deg C) | 147,13 | * | 0,9871 | * 0,9325 |
| See Runtime Messages Report for warnings. | |  | | | |
| Exchanger Fluid Volumes | | | | | |
| Approximate shellside (L) | 2501,9 | | | | |
| Approximate tubeside (L) | 4554,3 | | | | |
| Shell Construction Information | | | | | |
| TEMA shell type | BFU | Shell ID | (mm) | 1320,00 | |
| Shells Series | 1 Parallel 1 | Total area | (m2) | 204,888 | |
| Passes Shell | 2 Tube 2 | Eff. area | (m2/shell) | 179,678 | |
| Shell orientation angle (deg) | 0,00 | | | | |
| Impingement present | No | | | | |
| Pairs seal strips | 0 | Passlane seal rods (mm) | 0,000 | No. 0 | |
| Shell expansion joint | No | Full support at U-Bend | No | | |
| Weight estimation Wet/Dry/Bundle | 19282 / | 12230 / | 7577,7 | (kg/shell) | |
| Baffle Information | | | | | |
| Type | Perpend. Single-Seg. | Baffle cut (% dia) | 27,38 | | |
| Crosspasses/shellpass | 7 | No. (Pct Area) | (mm) to C.L | | |
| Central spacing | (mm) 354,884 | 1 | 45,05 | 298,619 | |
| Inlet/Outlet Spacing | (mm) 803,200 | 2 | 45,09 | 242,059 | |
| Turn Spacing | (mm) 775,663 | | | | |
| Baffle thickness | (mm) 9,525 | Long. baffle length | (m) | 2,578 | |
| Insulated long baffle | No | | | | |
| Tube Information | | | | | |
| Tube type | Plain | Tubecount per shell | 760 | | |
| Length to tangent | (m) 3,000 | Pct tubes removed (both) | 0,13 | | |
| Effective length | (m) 3,010 | Outside diameter | (mm) 25,000 | | |
| Total tubesheet | (mm) 422,350 | Wall thickness | (mm) 2,000 | | |
| Area ratio | (out/in) 1,1905 | Pitch (mm) | 40,0000 | Ratio | 1,6000 |
| Tube metal | Not in data bank | Tube pattern (deg) | 45 | | |


| | | | | | | |
|--|--------------|----------------------|---------|----------------|---------------|-------------------|
| HTRI | | Final Results | | | Page 2 | |
| Released to the following organization: <i>Microsoft</i> <i>Microsoft</i> | | | | | | |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: Friendsl | | | | | SI Units | |
| : Shell 1 Simulation - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | | | | | |
| Shellside Performance | | | | | | |
| Nom vel, X-flow/window | | 30,48 / 32,61 | | | | |
| Flow fractions for heat transfer | | 0,901 | | | | |
| A=0,0134 | | B=0,8999 | | C=0,0110 | | E=0,0756 F=0,0000 |
| Shellside Heat Transfer Corrections | | | | | | |
| Total | Beta | Gamma | End | Fin | | |
| 0,807 | 0,755 | 1,068 | 0,833 | 1,000 | | |
| Pressure Drops (Percent of Total) | | | | | | |
| Cross | Window | Ends | Nozzle | Shell | Tube | |
| 18,44 | 56,76 | 17,83 | Inlet | 3,47 | 12,53 | |
| MOMENTUM | | 0,00 | Outlet | 3,50 | 7,08 | |
| Two-Phase Parameters | | | | | | |
| Method | Inlet | Center | Outlet | Mix F | | |
| H. T. Parameters | | | | | | |
| | | | Shell | Tube | | |
| Overall wall correction | | | 1,000 | 0,948 | | |
| Midpoint | Prandtl no. | | 0,72 | 0,71 | | |
| Midpoint | Reynolds no. | | 7732 | 16731 | | |
| Bundle inlet | Reynolds no. | | 3479 | 18735 | | |
| Bundle outlet | Reynolds no. | | 3610 | 14670 | | |
| Fouling layer | (mm) | | | | | |
| Thermal Resistance | | | | | | |
| Shell | Tube | Fouling | Metal | Over Des | | |
| 38,38 | 60,14 | 0,00 | 1,48 | -2,77 | | |
| Total fouling resistance | | | | 0 | | |
| Differential resistance | | | | -4,5e-4 | | |
| Shell Nozzles | | | | | | |
| Inlet at channel end-Yes | | | Inlet | Outlet | Liquid Outlet | |
| Number at each position | | | 1 | 1 | 0 | |
| Diameter (mm) | | | 590,551 | 539,751 | | |
| Velocity (m/s) | | | 31,20 | 27,17 | | |
| Pressure drop (kPa) | | | 0,423 | 0,427 | | |
| Height under nozzle (mm) | | | 16,030 | 16,030 | | |
| Nozzle R-V-SQ (kg/m-s2) | | | 338,33 | 352,69 | | |
| Shell ent. (kg/m-s2) | | | 888,48 | 904,28 | | |
| Tube Nozzle | | | | | | |
| | | | Inlet | Outlet | Liquid Outlet | |
| | | | AXIAL | AXIAL | | |
| Diameter (mm) | | | 307,087 | 336,551 | | |
| Velocity (m/s) | | | 24,60 | 31,96 | | |
| Pressure drop (kPa) | | | 0,572 | 0,323 | | |
| Nozzle R-V-SQ (kg/m-s2) | | | 1278,90 | 1383,03 | | |
| Annular Distributor | | | | | | |
| | | | Inlet | Outlet | | |
| Length (mm) | | | | | | |
| Height (mm) | | | | | | |
| Slot area (mm2) | | | | | | |
| Diametral Clearances (mm) | | | | | | |
| Baffle-to-shell | | Bundle-to-shell | | Tube-to-baffle | | |
| 6,3500 | | 17,0998 | | 0,7938 | | |

| | | | | | | |
|--|---------------|---|--|-------|-------|----------|
|  | | Supplementary Results | | | | Page 3 |
| | | Released to the following organization: Microsoft Microsoft | | | | |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: Friendsl | | | | | | SI Units |
| : Shell 1 Simulation - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | | | | | |
| Externally Enhanced Tube Geometry | | | Internally Enhanced Tube Geometry | | | |
| Type | Plain | | Type | None | | |
| Fin density | (fin/meter) | | Thickness | (mm) | | |
| Fin height | (mm) | | Pitch | (L/D) | | |
| Fin thickness | (mm) | | | | | |
| Root diameter | (mm) | | | | | |
| Area/length | (m2/m) | | | | | |
| Mean Metal Temperatures | | | | | | |
| Mean shell temperature | 707,98 (C) | | | | | |
| Mean tube metal temperature in each tubepass, (C) | | | | | | |
| Tube Pass | Inside | Outside | Radial | | | |
| 1 | 555,35 | 557,28 | 556,37 | | | |
| 2 | 735,33 | 737,76 | 736,61 | | | |
| Longitudinal Baffle Seal Leakage Analysis | | | | | | |
| TEMA BFU Shell | | Base | Case | Case | Case | Case |
| | | Case | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Seal leakage clearance | (mm) | 0,000 | 0,406 | 0,813 | 1,626 | 2,381 |
| Percent fluid leakage past seal | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,23 | 2,01 |
| Fluid leakage MTD correction | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,988 | 0,980 |
| Corrected MTD | (C) | 135,4 | 135,4 | 135,4 | 133,8 | 132,7 |
| Corrected percent overdesign | | -2,8 | -2,8 | -2,8 | -4,0 | -4,7 |

| HTRI | | HEAT EXCHANGER RATING DATA SHEET | | | | Page 1 | | | | |
|---------------------------|-----|----------------------------------|----------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------------|--|-----------|
| | | SI Units | | | | | | | | |
| Service of Unit | | | Item No. | | | | | | | |
| Type | BFU | Orientation Horizontal | | Connected In 1 Parallel 1 Series | | | | | | |
| Surf/Unit (Gross/Eff) | | 204,89 / 179,68 m ² | | Shell/Unit | 1 | | Surf/Shell (Gross/Eff) | 204,89 / 179,68 m ² | | |
| PERFORMANCE OF ONE UNIT | | | | | | | | | | |
| Fluid Allocation | | Shell Side | | | | Tube Side | | | | |
| Fluid Name | | spaliny | | | | vzduch | | | | |
| Fluid Quantity, Total | | kg/s | | 2,9702 | | kg/s | | 3,8500 | | |
| Vapor (In/Out) | | wt% | | 100,0 | | wt% | | 100,0 | | |
| Liquid | | wt% | | 0,0 | | wt% | | 0,0 | | |
| Temperature (In/Out) | | C | | 925,00 | | C | | 750,00 | | |
| Density | | kg/m ³ | | 0,3476 | | kg/m ³ | | 2,1128 | | |
| Viscosity | | mN-s/m ² | | 0,0455 | | mN-s/m ² | | 0,0322 | | |
| Specific Heat | | kJ/kg-C | | 1,3103 | | kJ/kg-C | | 1,0793 | | |
| Thermal Conductivity | | W/m-C | | 0,0829 | | W/m-C | | 0,0564 | | |
| Critical Pressure | | kPa | | | | kPa | | | | |
| Inlet Pressure | | kPa | | 120,002 | | kPa | | 404,731 | | |
| Velocity | | m/s | | 31,01 | | m/s | | 16,96 | | |
| Pressure Drop, Allow/Calc | | kPa | | 12,209 | | kPa | | 4,567 | | |
| Average Film Coefficient | | W/m ² -K | | 160,48 | | W/m ² -K | | 121,92 | | |
| Fouling Resistance (min) | | m ² -K/W | | | | m ² -K/W | | | | |
| Heat Exchanged | | 1,5415 MegaWatts | | MTD (Corrected) 135,4 C | | Overdesign | | -2,77 % | | |
| Transfer Rate, Service | | 63,35 W/m ² -K | | Calculated 61,59 W/m ² -K | | Clean | | 61,59 W/m ² -K | | |
| CONSTRUCTION OF ONE SHELL | | | | | Sketch (Bundle/Nozzle Orientation) | | | | | |
| | | Shell Side | | | Tube Side | | | | | |
| Design Pressure | | kPaG | | | 1034,21 | | | | | |
| Design Temperature | | C | | | | | | | | |
| No Passes per Shell | | 2 | | | 2 | | | | | |
| Flow Direction | | Downward | | | Upward | | | | | |
| Connections | | In mm | | | 1 @ 590,551 | | | | | |
| Size & Rating | | Out mm | | | 1 @ 539,751 | | | 1 @ 336,551 | | |
| | | Liq. Out mm | | | @ | | | @ | | |
| Tube No. | | 760 OD 25,000 mm | | Thk(Avg) 2,000 mm | | Length 3,000 m | | Pitch 40,000 mm | | Layout 45 |
| Tube Type | | Plain | | Material NOT, IN DATA BANK | | Pairs seal strips | | 0 | | |
| Shell ID | | 1320,00 mm | | Kettle ID | | mm | | Passlane Seal Rod No. | | 0 |
| Cross Baffle Type | | PERPEND. SINGLE-SEG. | | %Cut (Diam) 27,38 | | Impingement Plate | | None | | |
| Spacing(c/c) | | 354,884 mm | | Inlet 803,200 mm | | No. of Crosspasses | | 7 | | |
| Rho-V2-Inlet Nozzle | | 338,33 kg/m-s ² | | Shell Entrance 888,48 | | Shell Exit 904,28 | | kg/m-s ² | | |
| | | | | Bundle Entrance 360,57 | | Bundle Exit 310,96 | | kg/m-s ² | | |
| Weight/Shell | | 12230,1 | | Filled with Water 19282,1 | | Bundle | | 7577,67 kg | | |
| Notes: | | | | Thermal Resistance, % | | Velocities: m/s | | Flow Fractions | | |
| | | | | Shell 38,38 | | Shellside 31,01 | | A 0,013 | | |
| | | | | Tube 60,14 | | Tubeside 16,96 | | B 0,900 | | |
| | | | | Fouling 0,00 | | Crossflow 30,48 | | C 0,011 | | |
| | | | | Metal 1,48 | | Window 32,61 | | E 0,076 | | |
| | | | | | | | | F 0,000 | | |

| HTRI | | HEAT EXCHANGER SPECIFICATION SHEET | | | | Page 1 SI Units | |
|--|--------------------------------|------------------------------------|-----------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|------------------|
| Customer | | Job No. | | Reference No. | | | |
| Address | | Proposal No. | | | | | |
| Plant Location | | Date 20.5.2011 | | Rev | | | |
| Service of Unit | | Item No. | | | | | |
| Size | 1320,00 x 2999,96 mm | Type | BFU | Horz. | Connected In | 1 Parallel | 1 Series |
| Surf/Unit (Gross/Eff) | 204,89 / 179,68 m ² | Shell/Unit | 1 | Surf/Shell (Gross/Eff) | 204,89 / 179,68 m ² | | |
| PERFORMANCE OF ONE UNIT | | | | | | | |
| Fluid Allocation | | Shell Side | | | Tube Side | | |
| Fluid Name | | spaliny | | | vzduch | | |
| Fluid Quantity, Total | | kg/hr 10692,7 | | | 13860,1 | | |
| Vapor (In/Out) | | 10692,7 | | | 13860,1 | | |
| Liquid | | | | | | | |
| Steam | | 948,406 | | | 142,091 | | |
| Water | | | | | | | |
| Noncondensables | | | | | | | |
| Temperature (In/Out) C | | 925,00 | | | 512,87 | | |
| Specific Gravity | | | | | | | |
| Viscosity mN-s/m ² | | 0,0455 | | | 0,0322 | | |
| Molecular Weight, Vapor | | | | | | | |
| Molecular Weight, Noncondensables | | | | | | | |
| Specific Heat kJ/kg-C | | 1,3103 | | | 1,2052 | | |
| Thermal Conductivity W/m-C | | 0,0829 | | | 0,0564 | | |
| Latent Heat kJ/kg | | | | | | | |
| Inlet Pressure kPa | | 120,002 | | | 404,731 | | |
| Velocity m/s | | 31,01 | | | 16,96 | | |
| Pressure Drop, Allow/Calc kPa | | | | | 12,209 | | |
| Fouling Resistance (min) m ² -K/W | | | | | | | |
| Heat Exchanged W | | 1541489 | | MTD (Corrected) | | 135,4 C | |
| Transfer Rate, Service | | 63,35 W/m ² -K | | Clean | | 61,59 W/m ² -K | |
| | | | | Actual | | 61,59 W/m ² -K | |
| CONSTRUCTION OF ONE SHELL | | | | Sketch (Bundle/Nozzle Orientation) | | | |
| Design/Test Pressure kPaG | | Shell Side 1034,21 / | | Tube Side 1034,21 / | | | |
| Design Temperature C | | | | | | | |
| No Passes per Shell | | 2 | | 2 | | | |
| Corrosion Allowance mm | | | | | | | |
| Connections | | In mm 1 @ 590,551 | | 1 @ 307,087 | | | |
| Size & Rating | | Out mm 1 @ 539,751 | | 1 @ 336,551 | | | |
| | | Intermediate @ | | @ | | | |
| Tube No. | 380U | OD | 25,000 mm | Thk(Avg) | 2,000 mm | Length | 3,000 m |
| Tube Type | Plain | | | | | Pitch | 40,000 mm |
| Shell | ID 1320,00 mm | OD | mm | | | Layout | 45 |
| Channel or Bonnet | | | | | | Material | NOT IN DATA BANK |
| Tubesheet-Stationary | | | | | | Shell Cover | |
| Floating Head Cover | | | | | | Channel Cover | |
| Baffles-Cross | Type SINGLE-SEG. | %Cut (Diam) | 27;38 | Spacing(c/c) | 354,884 | Inlet | 803,200 mm |
| Baffles-Long | | Seal Type | | | | | |
| Supports-Tube | | U-Bend | | Type | | | |
| Bypass Seal Arrangement | | Tube-Tubesheet Joint | | | | | |
| Expansion Joint | | Type | | | | | |
| Rho-V2-Inlet Nozzle | 338,33 kg/m-s ² | Bundle Entrance | 360,57 | Bundle Exit | 310,96 | kg/m-s ² | |
| Gaskets-Shell Side | | Tube Side | | | | | |
| -Floating Head | | | | | | | |
| Code Requirements | | | | TEMA Class | | | |
| Weight/Shell | 12230,1 | Filled with Water | 19282,1 | Bundle | 7577,67 | kg | |
| Remarks: | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Reprinted with Permission (v5) | | | | | | | |

| HTRI | | Stream Properties | | | Page 1 | | |
|---|--------------------|---|--------|----------|----------|--------|---------|
| | | Released to the following organization: | | | | | |
| | | Microsoft | | | | | |
| | | Microsoft | | | | | |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: Friendsl | | | | SI Units | | | |
| : Shell 1 | | | | | | | |
| Simulation - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | | | | | | |
| Hot Shellside Fluid For Unit 101 | | Inlet | | Outlet | | | |
| Fluid name | | spaliny | | | | | |
| Temperature | (C) | 925,00 | | 512,87 | | | |
| Pressure | (kPa) | 120,002 | | 107,795 | | | |
| Weight fraction vapor | (--) | 1,0000 | | 1,0000 | | | |
| Vapor Properties | | | | | | | |
| Density | (kg/m3) | 0,3476 | | 0,4759 | | | |
| Viscosity | (mN-s/m2) | 0,0455 | | 0,0342 | | | |
| Conductivity | (W/m-C) | 0,0829 | | 0,0564 | | | |
| Heat capacity | (kJ/kg-C) | 1,3103 | | 1,2052 | | | |
| Molecular weight | (--) | 28,8478 | | 28,8478 | | | |
| Liquid Properties | | | | | | | |
| Density | (kg/m3) | -- | | -- | | | |
| Viscosity | (mN-s/m2) | -- | | -- | | | |
| Conductivity | (W/m-C) | -- | | -- | | | |
| Heat capacity | (kJ/kg-C) | -- | | -- | | | |
| Molecular weight | (--) | -- | | -- | | | |
| Latent heat | (kJ/kg) | -- | | -- | | | |
| Surface tension | (mN/m) | -- | | -- | | | |
| Molar Composition | | Vapor | Liquid | K-Value | Vapor | Liquid | K-Value |
| 1 | Carbon Dioxide | 0,1244 | -- | -- | 0,1244 | -- | -- |
| 2 | Sulfur Dioxide | 1,016e-5 | -- | -- | 1,016e-5 | -- | -- |
| 3 | Nitrogen | 0,6831 | -- | -- | 0,6831 | -- | -- |
| 4 | Oxygen | 0,0424 | -- | -- | 0,0424 | -- | -- |
| 5 | Argon | 0,0081 | -- | -- | 0,0081 | -- | -- |
| 6 | Water (IAPWS 1997) | 0,1420 | -- | -- | 0,1420 | -- | -- |


|  | | Stream Properties | | | Page 2 | | | | |
|---|--------------------|---|--|--------------|---------------|----------------|--------------|---------------|----------------|
| | | Released to the following organization: Microsoft Microsoft | | | | | | | |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: Friends! | | | | SI Units | | | | | |
| : Shell 1 | | | | | | | | | |
| Simulation - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | | | | | | | | |
| Cold Tubeside Fluid For Unit 101 | | | | Inlet | | Outlet | | | |
| Fluid name | | | | vzduch | | | | | |
| Temperature | (C) | 390,16 | | 750,00 | | | | | |
| Pressure | (kPa) | 404,731 | | 400,169 | | | | | |
| Weight fraction vapor | (--) | 1,0000 | | 1,0000 | | | | | |
| Vapor Properties | | | | | | | | | |
| Density | (kg/m3) | 2,1128 | | 1,3543 | | | | | |
| Viscosity | (mN-s/m2) | 0,0322 | | 0,0427 | | | | | |
| Conductivity | (W/m-C) | 0,0490 | | 0,0695 | | | | | |
| Heat capacity | (kJ/kg-C) | 1,0793 | | 1,1469 | | | | | |
| Molecular weight | (--) | 28,7833 | | 28,7833 | | | | | |
| Liquid Properties | | | | | | | | | |
| Density | (kg/m3) | -- | | -- | | | | | |
| Viscosity | (mN-s/m2) | -- | | -- | | | | | |
| Conductivity | (W/m-C) | -- | | -- | | | | | |
| Heat capacity | (kJ/kg-C) | -- | | -- | | | | | |
| Molecular weight | (--) | -- | | -- | | | | | |
| Latent heat | (kJ/kg) | -- | | -- | | | | | |
| Surface tension | (mN/m) | -- | | -- | | | | | |
| Molar Composition | | | | Vapor | Liquid | K-Value | Vapor | Liquid | K-Value |
| 1 | Carbon Dioxide | 2,951e-4 | | -- | -- | 2,951e-4 | -- | -- | |
| 2 | Nitrogen | 0,7677 | | -- | -- | 0,7677 | -- | -- | |
| 3 | Oxygen | 0,2066 | | -- | -- | 0,2066 | -- | -- | |
| 4 | Argon | 0,0090 | | -- | -- | 0,0090 | -- | -- | |
| 5 | Water (IAPWS 1997) | 0,0164 | | -- | -- | 0,0164 | -- | -- | |

Nízkoteplotní část výměníku

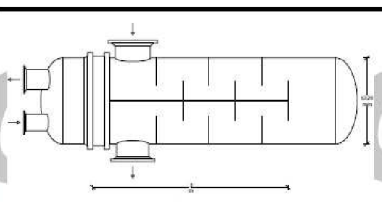
| HTRI | | Input Reprint | Page 1 |
|---|------------------------|---|--------|
| | | Released to the following organization: <i>Microsoft</i> <i>Microsoft</i> | |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: Friendsl | | SI Units | |
| : Shell 2 | | | |
| Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | | |
| NOTE: Case input modified. Values may not be consistent with other output reports. | | | |
| Shell Data | | | |
| Service type | Generic Shell and Tube | | |
| TEMA type | BFU | | |
| Run mode | Rating | | |
| Hot fluid location | Shellside | | |
| Number of shells in series | 1 | | |
| Number of shells in parallel | 1 | | |
| Shell inside diameter | 1320,00 mm | | |
| Flow in 1st tubepass | Countercurrent | | |
| Train flow direction | Countercurrent | | |
| Reboiler Data | | | |
| Reboiler type | No piping specified | | |
| Inlet pressure location | Inlet nozzle | | |
| Tube Data | | | |
| Tube type | Plain | | |
| Tube outside diameter | 25,000 mm | | |
| Tube wall thickness | 2,000 mm | | |
| Tube pitch | 40,000 mm | | |
| Tube pitch ratio | 1,600 | | |
| Tubepasses per shell | 2 | | |
| Tube pattern | 45 degrees | | |
| Tube count method | Rigorous | | |
| Tube length | 3,000 m | | |
| Tube material | Not in data bank | | |
| Tube material density | 7700,00 kg/m3 | | |
| Tube material thermal conductivity | 24,0000 W/m-C | | |
| Tube material elastic modulus | 217000 MPa | | |
| Tube Pass Arrangement Data | | | |
| Force symmetric layout | No | | |
| Force cleaning lanes | No | | |
| Tubes to remove for tie rods | Calculated | | |
| Baffle Data | | | |
| Baffle type | Single segmental | | |
| Baffle orientation | Perpendicular | | |
| Number of crosspasses | 7 | | |
| Variable baffle spacing | No | | |
| Window cut from baffles | No | | |
| Clearance Data | | | |
| Number of seal strip pairs | Calculated | | |
| Baffle clearance type | TEMA | | |
| Block A stream | No | | |
| Block E stream | No | | |
| Block F stream | No | | |
| Number of passlane seal rods | Calculated | | |


| HTRI | | Input Reprint | Page 2 |
|---|------------------|---|--------|
| | | Released to the following organization: <i>Microsoft</i> <i>Microsoft</i> | |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: Friendsl | | SI Units | |
| : Shell 2 | | | |
| Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | | |
| NOTE: Case input modified. Values may not be consistent with other output reports. | | | |
| Nozzle Data | | | |
| Number of shellside inlet nozzles | | | 1 |
| Number of shellside outlet nozzles | | | 1 |
| Number of tubeside inlet nozzles | | | 1 |
| Number of tubeside outlet nozzles | | | 1 |
| Radial position on shell inlet nozzle | | Program decides | |
| Radial position on shell outlet nozzle | | Program decides | |
| Location of nozzle at U-bend | | At U-bend | |
| Tubeside entry type | | Axial | |
| Tubeside inlet position | | Front head | |
| Tubeside exit type | | Same as inlet | |
| Front head location | | Left | |
| Impingement Data | | | |
| Impingement device present | | If required by TEMA | |
| Impingement type | | Circular plate | |
| Optional Geometry Data | | | |
| Small exchanger | | | No |
| Tubesheet type | | | Single |
| Shell expansion joint | | | No |
| Floating head support type | | | None |
| Full support at U-Bend | | | None |
| Insulated longitudinal baffle | | | No |
| Process Conditions Data | | | |
| | Hot Fluid | Cold Fluid | |
| Phase condition | Sensible gas | Sensible gas | |
| Flow rate | -- | 3,8500 kg/s | |
| Inlet vapor fraction | 1 | 1 | |
| Outlet vapor fraction | 1 | 1 | |
| Inlet temperature | 512,87 | 150,00 C | |
| Outlet temperature | 230,00 | 390,16 C | |
| Inlet pressure | 107,793 | 408,000 kPa | |
| Duty multiplier | | 1 | |
| Hot Fluid Property Data | | | |
| Fluid name | | spaliny | |
| Physical property method | | Component by component properties | |
| Heat release method | | Program calculated | |
| Flash type | | Integral | |
| Quantity units | | Moles | |
| Temperature interpolation option | | Program | |
| Number of components | | 6 | |
| Property package | | HTRI | |


| HTRI | | Input Reprint | | Page 3 |
|---|-----------------------------------|----------------------|--------------------|--------|
| Released to the following organization: | | | | |
| <i>Microsoft</i> | | | | |
| <i>Microsoft</i> | | | | |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: Friendsl | | | SI Units | |
| : Shell 2 | | | | |
| Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | | | |
| NOTE: Case input modified. Values may not be consistent with other output reports. | | | | |
| Hot Fluid Component Data | | | | |
| Component number | 1 | 2 | 3 | |
| Component name | Carbon Dioxide | Sulfur Dioxide | Nitrogen | |
| Comp. bank name | Carbon Dioxide | Sulfur Dioxide | Nitrogen | |
| Component bank | HTRI | HTRI | HTRI | |
| Component code | 2 | 120 | 131 | |
| Component phase | Vapor | Vapor | Vapor | |
| Component quantity | 12,4415 | 0,00102 | 68,3116 | |
| Component number | 4 | 5 | 6 | |
| Component name | Oxygen | Argon | Water (IAPWS 1997) | |
| Comp. bank name | Oxygen | Argon | Water (IAPWS 1997) | |
| Component bank | HTRI | HTRI | HTRI | |
| Component code | 201 | 208 | 1 | |
| Component phase | Vapor | Vapor | Vapor | |
| Component quantity | 4,24149 | 0,80521 | 14,1992 | |
| Cold Fluid Property Data | | | | |
| Fluid name | | | | vzduch |
| Physical property method | Component by component properties | | | |
| Heat release method | Program calculated | | | |
| Flash type | Integral | | | |
| Quantity units | Moles | | | |
| Temperature interpolation option | Program | | | |
| Number of components | 5 | | | |
| Property package | HTRI | | | |
| Cold Fluid Component Data | | | | |
| Component number | 1 | 2 | 3 | |
| Component name | Carbon Dioxide | Nitrogen | Oxygen | |
| Comp. bank name | Carbon Dioxide | Nitrogen | Oxygen | |
| Component bank | HTRI | HTRI | HTRI | |
| Component code | 2 | 131 | 201 | |
| Component phase | Vapor | Vapor | Vapor | |
| Component quantity | 0,02951 | 76,7719 | 20,6561 | |
| Component number | 4 | 5 | | |
| Component name | Argon | Water (IAPWS 1997) | | |
| Comp. bank name | Argon | Water (IAPWS 1997) | | |
| Component bank | HTRI | HTRI | | |
| Component code | 208 | 1 | | |
| Component phase | Vapor | Vapor | | |
| Component quantity | 0,90494 | 1,63752 | | |

| | | |
|---|---|-------------------------|
|  | Input Reprint Released to the following organization: <i>Microsoft</i> <i>Microsoft</i> | Page 4 |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: FriendsI | | SI Units |
| : Shell 2 | | |
| Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | |
| NOTE: Case input modified. Values may not be consistent with other output reports. | | |
| Control Methods Data | | |
| Shellside friction factor method | | Commercial |
| Tubeside friction factor method | | Commercial |
| Pure longitudinal flow | | No |
| Pure component condensation | | No |
| Condensing correlation | | HTRI Proration |
| Mole fraction inerts | | 0 |
| Momentum exclusion | | 0 % |
| Pure component boiling | | No |
| Check film boiling | | Yes |
| Nucleate boiling method | Physical property/theoretical boiling range | |
| Component boiling method | | Nucleate and convective |
| Control User-Defined Methods Data | | |
| Add non-nucleate boiling | | Yes |
| Control Vibration Data | | |
| Damping factor method | | HTRI Method |
| Include inlet vibration support | | No |
| Include outlet vibration support | | No |

| HTRI | | Output Summary | | | | Page 1 |
|---|---------|---|-----------------|----------------|----------|--------|
| | | Released to the following organization: | | | | |
| | | Microsoft | | | | |
| | | Microsoft | | | | |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: Friendsl | | | | | SI Units | |
| : Shell 2 | | | | | | |
| Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | | | | | |
| No Data Check Messages. | | | | | | |
| See Runtime Message Report for Warning Messages. | | | | | | |
| Process Conditions | | Hot Shellside | | Cold Tubeside | | |
| Fluid name | | spaliny | | vzduch | | |
| Flow rate (kg/s) | | 2,9702 | | 3,8500 | | |
| Inlet/Outlet Y (Wt. frac vap.) | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | |
| Inlet/Outlet T (Deg C) | 512,87 | 230,00 | 150,00 | 390,16 | | |
| Inlet P/Avg (kPa) | 107,795 | 103,831 | 408,006 | 406,368 | | |
| dP/Allow. (kPa) | 7,928 | 0,000 | 3,275 | 0,000 | | |
| Fouling (m2-K/W) | | 0,000000 | | 0,000000 | | |
| Exchanger Performance | | | | | | |
| Shell h (W/m2-K) | 132,61 | Actual U (W/m2-K) | 53,52 | | | |
| Tube h (W/m2-K) | 107,71 | Required U (W/m2-K) | 54,57 | | | |
| Hot regime (--) Sens. Gas | | Duty (MegaWatts) | 0,9800 | | | |
| Cold regime (--) Sens. Gas | | Area (m2) | 194,730 | | | |
| EMTD (Deg C) | 92,2 | Overdesign (%) | -1,93 | | | |
| Shell Geometry | | | Baffle Geometry | | | |
| TEMA type (--) | BFU | Baffle type (--) | Single-Seg. | | | |
| Shell ID (mm) | 1320,00 | Baffle cut (Pct Dia.) | 27,38 | | | |
| Series (--) | 1 | Baffle orientation (--) | Perpend. | | | |
| Parallel (--) | 1 | Central spacing (mm) | 405,320 | | | |
| Orientation (deg) | 0,00 | Crosspasses (--) | 7 | | | |
| Tube Geometry | | | Nozzles | | | |
| Tube type (--) | Plain | Shell inlet (mm) | 539,751 | | | |
| Tube OD (mm) | 25,000 | Shell outlet (mm) | 488,951 | | | |
| Length (m) | 3,000 | Inlet height (mm) | 16,030 | | | |
| Pitch ratio (--) | 1,6000 | Outlet height (mm) | 16,030 | | | |
| Layout (deg) | 45 | Tube inlet (mm) | 258,877 | | | |
| Tube count (--) | 760 | Tube outlet (mm) | 307,087 | | | |
| Tube Pass (--) | 2 | | | | | |
| Thermal Resistance; % | | Velocities; m/s | | Flow Fractions | | |
| Shell | 40,36 | Shellside | 19,35 | A | 0,013 | |
| Tube | 59,15 | Tubeside | 10,76 | B | 0,908 | |
| Fouling | 0,00 | Crossflow | 18,84 | C | 0,011 | |
| Metal | 0,49 | Window | 23,11 | E | 0,067 | |
| | | | | F | 0,000 | |

| HTRI | | Final Results | | Page 1 | |
|---|----------------------|--|-------------|---------------|-------------------|
| | | Released to the following organization: | | | |
| | | Microsoft | | | |
| | | Microsoft | | | |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: Friendsl | | | | SI Units | |
| : Shell 2 | | | | | |
| Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | | | | |
| Process Data | | Hot Shellside | | Cold Tubeside | |
| Fluid name | | spaliny | | vzduch | |
| Fluid condition | | Sens. Gas | | Sens. Gas | |
| Total flow rate | (kg/s) | 2,9702 | | 3,8500 | |
| Weight fraction vapor, In/Out | (--) | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Temperature, In/Out | (Deg C) | 512,87 | 230,00 | 150,00 | 390,16 |
| Temperature, Average/Skin | (Deg C) | 371,44 | 319,61 | 270,08 | 318,91 |
| Wall temperature, Min/Max | (Deg C) | 198,09 | 453,26 | 197,79 | 452,59 |
| Pressure, In/Average | (kPa) | 107,795 | 103,831 | 408,006 | 406,368 |
| Pressure drop, Total/Allowed | (kPa) | 7,928 | | 3,275 | |
| Velocity, Mid/Max allow | (m/s) | 19,35 | | 10,76 | |
| Mole fraction inert | (--) | | 0,0000 | | |
| Average film coef. | (W/m2-K) | | 132,61 | | 107,71 |
| Heat transfer safety factor | (--) | | 1,000 | | 1,000 |
| Fouling resistance | (m2-K/W) | | 0,000000 | | 0,000000 |
| Overall Performance Data | | | | | |
| Overall coef., Req/Clean/Actual | (W/m2-K) | 54,57 | / | 53,52 | / 53,52 |
| Heat duty, Calculated/Specified | (MegaWatts) | 0,9800 | / | | |
| Effective overall temperature difference | (Deg C) | 92,2 | | | |
| EMTD = (MTD) * (DELTA) * (F/G/H) | (Deg C) | 99,95 | * | 0,9889 | * 0,9329 |
| See Runtime Messages Report for warnings. | |  | | | |
| Exchanger Fluid Volumes | | | | | |
| Approximate shellside (L) | 2726,7 | | | | |
| Approximate tubeside (L) | 4330,7 | | | | |
| Shell Construction Information | | | | | |
| TEMA shell type | BFU | Shell ID | (mm) | 1320,00 | |
| Shells Series | 1 Parallel 1 | Total area | (m2) | 204,888 | |
| Passes Shell | 2 Tube 2 | Eff. area | (m2/shell) | 194,730 | |
| Shell orientation angle (deg) | 0,00 | | | | |
| Impingement present | No | | | | |
| Pairs seal strips | 0 | Passiane seal rods (mm) | 0,000 | No. 0 | |
| Shell expansion joint | No | Full support at U-Bend | No | | |
| Weight estimation Wet/Dry/Bundle | 16417 | / | 9363,4 | / | 4846,0 (kg/shell) |
| Baffle Information | | | | | |
| Type | Perpend. Single-Seg. | Baffle cut (% dia) | | 27,38 | |
| Crosspasses/shellpass | 7 | No. (Pct Area) | (mm) to C.L | | |
| Central spacing | (mm) 405,320 | 1 | 45,05 | 298,619 | |
| Inlet/Outlet Spacing | (mm) 803,200 | 2 | 45,09 | 242,059 | |
| Turn Spacing | (mm) 731,153 | | | | |
| Baffle thickness | (mm) 9,525 | Long. baffle length | (m) | 2,830 | |
| Insulated long baffle | No | | | | |
| Tube Information | | | | | |
| Tube type | Plain | Tubecount per shell | 760 | | |
| Length to tangent | (m) 3,000 | Pct tubes removed (both) | 0,13 | | |
| Effective length | (m) 3,262 | Outside diameter | (mm) | 25,000 | |
| Total tubesheet | (mm) 170,168 | Wall thickness | (mm) | 2,000 | |
| Area ratio | (out/in) 1,1905 | Pitch (mm) | 40,0000 | Ratio | 1,6000 |
| Tube metal | Not in data bank | Tube pattern (deg) | 45 | | |

| | | | | | |
|--|-----------------|---|---|--------------------------|--------------------------|
|  | | Final Results Page 2 | | | |
| | | Released to the following organization: Microsoft Microsoft | | | |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: Friendsl | | | | SI Units | |
| : Shell 2 Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | | | | |
| Shellside Performance | | | | | |
| Nom vel, X-flow/window | | 18,84 / 23,11 | | | |
| Flow fractions for heat transfer | | 0,910 | | | |
| A=0,0133 B=0,9083 C=0,0115 E=0,0670 F=0,0000 | | | | | |
| Shellside Heat Transfer Corrections | | | | | |
| Total 0,824 | Beta 0,772 | Gamma 1,068 | End 0,853 | Fin 1,000 | |
| Pressure Drops (Percent of Total) | | | | | |
| Cross 15,46 MOMENTUM | Window 52,78 | Ends 21,00 | Nozzle Inlet Outlet 5,41 5,36 | Shell 5,41 5,36 | Tube 22,61 9,24 |
| Two-Phase Parameters | | | | | |
| Method | Inlet | Center | Outlet | Mix F | |
| H. T. Parameters | | | Shell | Tube | |
| Overall wall correction | | | 1,000 | 0,945 | |
| Midpoint | Prandtl no. | | 0,74 | 0,72 | |
| Midpoint | Reynolds no. | | 10608 | 22607 | |
| Bundle inlet | Reynolds no. | | 4769 | 25633 | |
| Bundle outlet | Reynolds no. | | 5252 | 19474 | |
| Fouling layer | (mm) | | | | |
| Thermal Resistance | | | | | |
| Shell 40,36 | Tube 59,15 | Fouling 0,00 | Metal 0,49 | Over Des -1,93 | |
| Total fouling resistance | | | | 0 | |
| Differential resistance | | | | -3,61e-4 | |
| Shell Nozzles | | | Inlet | Outlet | Liquid Outlet |
| Inlet at channel end-Yes | | | 1 | 1 | 0 |
| Number at each position | | | 1 | 1 | 0 |
| Diameter (mm) | | | 539,751 | 488,951 | |
| Velocity (m/s) | | | 27,28 | 22,90 | |
| Pressure drop (kPa) | | | 0,429 | 0,425 | |
| Height under nozzle (mm) | | | 16,030 | 16,030 | |
| Nozzle R-V-SQ (kg/m-s2) | | | 354,07 | 362,18 | |
| Shell ent. (kg/m-s2) | | | 907,81 | 902,15 | |
| Tube Nozzle | | | Inlet | Outlet | Liquid Outlet |
| | | | AXIAL | AXIAL | |
| Diameter (mm) | | | 258,877 | 307,087 | |
| Velocity (m/s) | | | 21,90 | 24,60 | |
| Pressure drop (kPa) | | | 0,741 | 0,302 | |
| Nozzle R-V-SQ (kg/m-s2) | | | 1601,72 | 1278,88 | |
| Annular Distributor | | | Inlet | Outlet | |
| Length (mm) | | | | | |
| Height (mm) | | | | | |
| Slot area (mm2) | | | | | |
| Diametral Clearances (mm) | | | | | |
| Baffle-to-shell 6,3500 | | Bundle-to-shell 17,0998 | | Tube-to-baffle 0,7938 | |

| | | | | | | |
|--|----------------------|---|----------------------|--|-------|----------|
|  | | Supplementary Results | | | | Page 3 |
| | | Released to the following organization: Microsoft Microsoft | | | | |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: Friendsl | | | | | | SI Units |
| : Shell 2 Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | | | | | |
| Externally Enhanced Tube Geometry | | | | Internally Enhanced Tube Geometry | | |
| Type | Plain | | | Type | None | |
| Fin density | (fin/meter) | | | Thickness | (mm) | |
| Fin height | (mm) | | | Pitch | (L/D) | |
| Fin thickness | (mm) | | | | | |
| Root diameter | (mm) | | | | | |
| Area/length | (m2/m) | | | | | |
| Mean Metal Temperatures | | | | | | |
| Mean shell temperature | 361,78 (C) | | | | | |
| Mean tube metal temperature in each tubepass, (C) | | | | | | |
| <u>Tube Pass</u> | <u>Inside</u> | <u>Outside</u> | <u>Radial</u> | | | |
| 1 | 256,38 | 256,80 | 256,60 | | | |
| 2 | 380,43 | 380,98 | 380,72 | | | |
| Longitudinal Baffle Seal Leakage Analysis | | | | | | |
| TEMA BFU Shell | | Base | Case | Case | Case | Case |
| | | Case | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Seal leakage clearance | (mm) | 0,000 | 0,406 | 0,813 | 1,626 | 2,381 |
| Percent fluid leakage past seal | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,31 | 2,12 |
| Fluid leakage MTD correction | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,987 | 0,979 |
| Corrected MTD | (C) | 92,2 | 92,2 | 92,2 | 91,0 | 90,2 |
| Corrected percent overdesign | | -1,9 | -1,9 | -1,9 | -3,2 | -4,0 |

| HTRI | | HEAT EXCHANGER RATING DATA SHEET | | | | Page 1 | | | |
|---------------------------|----------------------------|--------------------------------------|------------|------------------------------------|---|---------------------|---------------------|--------|----|
| | | SI Units | | | | | | | |
| Service of Unit | | Item No. | | | | | | | |
| Type | BFU | Orientation | | Horizontal | Connected In | | 1 Parallel 1 Series | | |
| Surf/Unit (Gross/Eff) | | 204,89 / 194,73 m ² | | Shell/Unit | 1 Surf/Shell (Gross/Eff) 204,89 / 194,73 m ² | | | | |
| PERFORMANCE OF ONE UNIT | | | | | | | | | |
| Fluid Allocation | | Shell Side | | | Tube Side | | | | |
| Fluid Name | | spaliny | | | vzduch | | | | |
| Fluid Quantity, Total | kg/s | 2,9702 | | | 3,8500 | | | | |
| Vapor (In/Out) | wt% | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | | | | |
| Liquid | wt% | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | | | |
| Temperature (In/Out) | C | 512,87 | 230,00 | 150,00 | 390,16 | | | | |
| Density | kg/m ³ | 0,4759 | 0,6909 | 3,3402 | 2,1128 | | | | |
| Viscosity | mN-s/m ² | 0,0342 | 0,0248 | 0,0235 | 0,0322 | | | | |
| Specific Heat | kJ/kg-C | 1,2052 | 1,1282 | 1,0438 | 1,0793 | | | | |
| Thermal Conductivity | W/m-C | 0,0564 | 0,0373 | 0,0337 | 0,0490 | | | | |
| Critical Pressure | kPa | | | | | | | | |
| Inlet Pressure | kPa | 107,795 | | | 408,006 | | | | |
| Velocity | m/s | | | | 19,35 | 10,76 | | | |
| Pressure Drop, Allow/Calc | kPa | | | | 7,928 | 3,275 | | | |
| Average Film Coefficient | W/m ² -K | 132,61 | | | 107,71 | | | | |
| Fouling Resistance (min) | m ² -K/W | | | | | | | | |
| Heat Exchanged | 0,9800 MegaWatts | MTD (Corrected) 92,2 C | | Overdesign -1,93 % | | | | | |
| Transfer Rate, Service | 54,57 W/m ² -K | Calculated 53,52 W/m ² -K | | Clean 53,52 W/m ² -K | | | | | |
| CONSTRUCTION OF ONE SHELL | | | | Sketch (Bundle/Nozzle Orientation) | | | | | |
| | | Shell Side | | Tube Side | | | | | |
| Design Pressure | kPaG | 1034,21 | | 1034,21 | | | | | |
| Design Temperature | C | | | | | | | | |
| No Passes per Shell | | 2 | | 2 | | | | | |
| Flow Direction | | Downward | | Upward | | | | | |
| Connections | In mm | 1 @ 539,751 | | 1 @ 258,877 | | | | | |
| Size & Rating | Out mm | 1 @ 488,951 | | 1 @ 307,087 | | | | | |
| | Liq. Out mm | @ | | @ | | | | | |
| Tube No. | 760 OD 25,000 mm | Thk(Avg) | 2,000 mm | Length | 3,000 m | Pitch | 40,000 mm | Layout | 45 |
| Tube Type | Plain | Material NOT IN DATA BANK | | | Pairs seal strips | | | 0 | |
| Shell ID | 1320,00 mm | Kettle ID mm | | | Passlane Seal Rod No. | | | 0 | |
| Cross Baffle Type | PERPEND. SINGLE-SEG. | %Cut (Diam) 27;38 | | | Impingement Plate | | | None | |
| Spacing(c/c) | 405,320 mm | Inlet | 803,200 mm | No. of Crosspasses | | | 7 | | |
| Rho-V2-Inlet Nozzle | 354,07 kg/m-s ² | Shell Entrance 907,81 | | Shell Exit 902,15 | | kg/m-s ² | | | |
| | | Bundle Entrance 312,18 | | Bundle Exit 259,01 | | kg/m-s ² | | | |
| Weight/Shell | 9363,42 | Filled with Water 16416,5 | | Bundle 4846,00 | | kg | | | |
| Notes: | | Thermal Resistance, % | | Velocities, m/s | | Flow Fractions | | | |
| | | Shell | 40,36 | Shellside | 19,35 | A | 0,013 | | |
| | | Tube | 59,15 | Tubeside | 10,76 | B | 0,908 | | |
| | | Fouling | 0,00 | Crossflow | 18,84 | C | 0,011 | | |
| | | Metal | 0,49 | Window | 23,11 | E | 0,067 | | |
| | | | | | | F | 0,000 | | |

| HTRI | | HEAT EXCHANGER SPECIFICATION SHEET | | | | Page 1 | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------|------------------------------------|--|---------------------|-------------------|----------------------------|-----------|--------|------------|
| | | | | | | SI Units | | | | | |
| Customer | | | Job No. | | | | | | | | |
| Address | | | Reference No. | | | | | | | | |
| Plant Location | | | Proposal No. | | | | | | | | |
| Service of Unit | | | Date | 20.5.2011 | Rev | | | | | | |
| Size | 1320,00 x 2999,96 mm | Type | BFU | Horz. | Connected In | 1 Parallel 1 Series | | | | | |
| Surf/Unit (Gross/Eff) | 204,89 / 194,73 m ² | Shell/Unit | 1 | Surf/Shell (Gross/Eff) | 204,89 / 194,73 m ² | | | | | | |
| PERFORMANCE OF ONE UNIT | | | | | | | | | | | |
| Fluid Allocation | | Shell Side | | | Tube Side | | | | | | |
| Fluid Name | | spaliny | | | vzduch | | | | | | |
| Fluid Quantity, Total | | kg/hr | | | 10692,7 | | | | | | |
| Vapor (In/Out) | | 10692,7 | | | 10692,7 | | | | | | |
| Liquid | | | | | | | | | | | |
| Steam | | 948,406 | | | 948,406 | | | | | | |
| Water | | | | | | | | | | | |
| Noncondensables | | | | | | | | | | | |
| Temperature (In/Out) | | C | | | 512,87 230,00 | | | | | | |
| Specific Gravity | | | | | | | | | | | |
| Viscosity | | mN-s/m ² | | | 0,0342 0,0248 | | | | | | |
| Molecular Weight, Vapor | | | | | | | | | | | |
| Molecular Weight, Noncondensables | | | | | | | | | | | |
| Specific Heat | | kJ/kg-C | | | 1,2052 1,1282 | | | | | | |
| Thermal Conductivity | | W/m-C | | | 0,0564 0,0373 | | | | | | |
| Latent Heat | | kJ/kg | | | | | | | | | |
| Inlet Pressure | | kPa | | | 107,795 408,006 | | | | | | |
| Velocity | | m/s | | | 19,35 10,76 | | | | | | |
| Pressure Drop, Allow/Calc | | kPa | | | 7,928 3,275 | | | | | | |
| Fouling Resistance (min) | | m ² -K/W | | | | | | | | | |
| Heat Exchanged W | | 979954 | | | MTD (Corrected) 92,2 C | | | | | | |
| Transfer Rate, Service | | 54,57 W/m ² -K | | | Clean 53,52 W/m ² -K Actual 53,52 W/m ² -K | | | | | | |
| CONSTRUCTION OF ONE SHELL | | | | Sketch (Bundle/Nozzle Orientation) | | | | | | | |
| Design/Test Pressure | | kPaG | | 1034,21 / | | | | | | | |
| Design Temperature | | C | | 1034,21 / | | | | | | | |
| No Passes per Shell | | | | 2 | | | | | | | |
| Corrosion Allowance | | mm | | | | | | | | | |
| Connections | | In mm | | 1 @ 539,751 | | | | | | | |
| Size & Rating | | Out mm | | 1 @ 488,951 | | | | | | | |
| | | Intermediate | | @ | | | | | | | |
| Tube No. | 380U | OD | 25,000 mm | Thk(Avg) | 2,000 mm | Length | 3,000 m | Pitch | 40,000 mm | Layout | 45 |
| Tube Type | Plain | | | Material | | | NOT IN DATA BANK | | | | |
| Shell | ID | 1320,00 mm | OD | mm | Shell Cover | | | | | | |
| Channel or Bonnet | Tubesheet-Stationary | | | | | | Channel Cover | | | | |
| Floating Head Cover | Tubesheet-Floating | | | | | | Impingement Plate | | | | |
| Baffles-Cross | Type | SINGLE-SEG. | | %Cut (Diam) | 27;38 | | Spacing(c/c) | 405,320 | | Inlet | 803,200 mm |
| Baffles-Long | Seal Type | | | | | | | | | | |
| Supports-Tube | U-Bend | | | | | | Type | | | | |
| Bypass Seal Arrangement | Tube-Tubesheet Joint | | | | | | | | | | |
| Expansion Joint | Type | | | | | | | | | | |
| Rho-V2-Inlet Nozzle | 354,07 kg/m-s ² | | Bundle Entrance | | 312,18 | | Bundle Exit | 259,01 kg/m-s ² | | | |
| Gaskets-Shell Side | Tube Side | | | | | | | | | | |
| -Floating Head | | | | | | | | | | | |
| Code Requirements | | | | | | TEMA Class | | | | | |
| Weight/Shell | 9363,42 | | Filled with Water | | 16416,5 | | Bundle | 4846,00 | | kg | |
| Remarks: | | | | | | | | | | | |
| Reprinted with Permission (v5) | | | | | | | | | | | |

| HTRI | | Stream Properties | | | | | Page 1 | |
|---|--------------------|---|--------|---------|----------|----------|---------|--|
| | | Released to the following organization: | | | | | | |
| | | Microsoft | | | | | | |
| | | Microsoft | | | | | | |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: Friendsl | | | | | | SI Units | | |
| : Shell 2 | | | | | | | | |
| Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | | | | | | | |
| Hot Shellside Fluid For Unit 102 | | Inlet | | | Outlet | | | |
| Fluid name | | spaliny | | | | | | |
| Temperature | (C) | 512,87 | | | 230,00 | | | |
| Pressure | (kPa) | 107,795 | | | 99,867 | | | |
| Weight fraction vapor | (--) | 1,0000 | | | 1,0000 | | | |
| Vapor Properties | | | | | | | | |
| Density | (kg/m3) | 0,4759 | | | 0,6909 | | | |
| Viscosity | (mN-s/m2) | 0,0342 | | | 0,0248 | | | |
| Conductivity | (W/m-C) | 0,0564 | | | 0,0373 | | | |
| Heat capacity | (kJ/kg-C) | 1,2052 | | | 1,1282 | | | |
| Molecular weight | (--) | 28,8478 | | | 28,8478 | | | |
| Liquid Properties | | | | | | | | |
| Density | (kg/m3) | -- | | | -- | | | |
| Viscosity | (mN-s/m2) | -- | | | -- | | | |
| Conductivity | (W/m-C) | -- | | | -- | | | |
| Heat capacity | (kJ/kg-C) | -- | | | -- | | | |
| Molecular weight | (--) | -- | | | -- | | | |
| Latent heat | (kJ/kg) | -- | | | -- | | | |
| Surface tension | (mN/m) | -- | | | -- | | | |
| Molar Composition | | Vapor | Liquid | K-Value | Vapor | Liquid | K-Value | |
| 1 | Carbon Dioxide | 0,1244 | -- | -- | 0,1244 | -- | -- | |
| 2 | Sulfur Dioxide | 1,016e-5 | -- | -- | 1,016e-5 | -- | -- | |
| 3 | Nitrogen | 0,6831 | -- | -- | 0,6831 | -- | -- | |
| 4 | Oxygen | 0,0424 | -- | -- | 0,0424 | -- | -- | |
| 5 | Argon | 0,0081 | -- | -- | 0,0081 | -- | -- | |
| 6 | Water (IAPWS 1997) | 0,1420 | -- | -- | 0,1420 | -- | -- | |

| HTRI | | Stream Properties | | | Page 2 | | |
|---|--------------------|---|--------|----------|----------|--------|---------|
| | | Released to the following organization: | | | | | |
| | | Microsoft | | | | | |
| | | Microsoft | | | | | |
| Xist E Ver. 5.00 20.5.2011 17:07 SN: Friends! | | | | SI Units | | | |
| : Shell 2 | | | | | | | |
| Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA BFU Shell With Single-Segmental Baffles | | | | | | | |
| Cold Tubeside Fluid For Unit 102 | | Inlet | | Outlet | | | |
| Fluid name | | vzduch | | | | | |
| Temperature | (C) | 150,00 | | 390,16 | | | |
| Pressure | (kPa) | 408,006 | | 404,731 | | | |
| Weight fraction vapor | (--) | 1,0000 | | 1,0000 | | | |
| Vapor Properties | | | | | | | |
| Density | (kg/m3) | 3,3402 | | 2,1128 | | | |
| Viscosity | (mN-s/m2) | 0,0235 | | 0,0322 | | | |
| Conductivity | (W/m-C) | 0,0337 | | 0,0490 | | | |
| Heat capacity | (kJ/kg-C) | 1,0438 | | 1,0793 | | | |
| Molecular weight | (--) | 28,7833 | | 28,7833 | | | |
| Liquid Properties | | | | | | | |
| Density | (kg/m3) | -- | | -- | | | |
| Viscosity | (mN-s/m2) | -- | | -- | | | |
| Conductivity | (W/m-C) | -- | | -- | | | |
| Heat capacity | (kJ/kg-C) | -- | | -- | | | |
| Molecular weight | (--) | -- | | -- | | | |
| Latent heat | (kJ/kg) | -- | | -- | | | |
| Surface tension | (mN/m) | -- | | -- | | | |
| Molar Composition | | Vapor | Liquid | K-Value | Vapor | Liquid | K-Value |
| 1 | Carbon Dioxide | 2,951e-4 | -- | -- | 2,951e-4 | -- | -- |
| 2 | Nitrogen | 0,7677 | -- | -- | 0,7677 | -- | -- |
| 3 | Oxygen | 0,2066 | -- | -- | 0,2066 | -- | -- |
| 4 | Argon | 0,0090 | -- | -- | 0,0090 | -- | -- |
| 5 | Water (IAPWS 1997) | 0,0164 | -- | -- | 0,0164 | -- | -- |

