



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ USTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

## NÁVRH POVRCHOVÉHO KONDENSÁTORU

SURFACE CONDENSER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MICHAL KLODA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. LADISLAV ŠNAJDÁREK

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Michal Kloda

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

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

### **Návrh povrchového kondenzátoru**

v anglickém jazyce:

#### **Surface condenser**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte rešerži povrchových kondenzátorů pro kondenzační turbíny velkých a středních výkonů společně se zjednodušeným návrhem povrchového kondenzátoru pro zvolené parametry.

Cíle bakalářské práce:

Proveďte rešerži povrchových kondenzátorů pro kondenzační turbíny velkých a středních výkonů. Dle dostupné literatury zhodnoťte použití různých materiálů pro konstrukci trubkových svazků. Pro zadané parametry proveďte zjednodušený návrh povrchového kondenzátoru.

Seznam odborné literatury:

Fiedler, J.: Parní turbíny - návrh a výpočet, CERM- Brno 2004

AMBROŽ, Jaroslav. Parní turbíny. 1. vyd. Praha, 1955, 498 s.

AMBROŽ, Jaroslav. Parní turbíny. 2. vyd. Praha, 1956, 646 s.

KADRNOŽKA, Jaroslav. Parní turbíny a kondenzace. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1987, 268 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislav Šnajdárek

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 19. 11. 2012

L. S.



---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu



---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan Fakulty

## ABSTRAKT

Bakalářská práce zabývající se povrchovými kondenzátory je rozdělena do tří hlavních částí. První část popisuje povrchový kondenzátor, problematiku přestupu tepla při kondenzaci par a způsob určování součinitele prostupu tepla pomocí metod HEI a VTI-CKTI. Druhá část se zabývá hlavními konstrukčními prvky a jejich používanými materiály, kde je zvláštní pozornost věnována materiálům kondenzátorových trubek. Ve třetí závěrečné části je uveden zjednodušený termodynamický návrh povrchového kondenzátoru pro zadané parametry.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Povrchový kondenzátor, součinitel přestupu tepla při kondenzaci par, hlavní konstrukční prvky povrchového kondenzátoru, materiály kondenzátorových trubek, návrh povrchového kondenzátoru, HEI, VTI-CKTI.

## ABSTRACT

The bachelor's thesis dealing with surface condensers is split into three main sections. The first section describes surface condenser, problems of heat transfer during condensation and a method of determining the heat transfer coefficient using the methods HEI and VTI-CKTI. The second section deals with the main construction elements and their materials, where the special attention is paid to condenser tubes materials. In the third and the last section, the simplified thermodynamic design of surface condenser for given parameters is shown.

## KEY WORDS

Surface condenser, heat transfer coefficient during condensation, main construction elements of surface condenser, condenser tubes materials, design of surface condenser, HEI, VTI-CKTI.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KLODA, M. *Návrh povrchového kondensátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 64 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Šnajdárk.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval sám, s pomocí vedoucího bakalářské práce, literatury a ostatních materiálů, které mi byly poskytnuty a které jsou uvedeny v seznamu literatury.

V Brně dne 23. května 2013

.....

Michal Kloda

## PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří především vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Ladislavu Šnajdárkovi, který mi během tvorby této práce poskytoval užitečné rady, informace, a že byl velice ochotný a trpělivý během naší spolupráce. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu při studiu. Dále děkuji Mgr. Janě Vondroušové za kontrolu gramatické a stylistické formy mé práce.

## OBSAH

ÚVOD .....	10
1. KONDENZACE .....	11
1.1. Základní typy kondenzace.....	12
1.1.1. Kondenzace směšovací .....	12
1.1.2. Kondenzace povrchová .....	12
1.2. Vakuum .....	13
2. POVRCHOVÝ KONDENZÁTOR.....	14
2.1. Rankine-Clausiiův cyklus.....	14
2.2. Funkce kondenzátoru v R-C cyklu .....	15
2.3. Přestup tepla při kondenzaci par .....	16
2.3.1. Hranice kapkové a blánové kondenzace .....	17
2.3.2. Kapková kondenzace.....	17
2.3.3. Blánová kondenzace.....	17
2.4. Součinitel prostupu tepla .....	19
2.4.1. Metoda tepelných odporů.....	19
2.4.2. Metoda HEI.....	20
2.4.3. Metoda VTI – CKTI.....	22
3. KONSTRUKCE POVRCHOVÉHO KONDENZÁTORU .....	24
3.1. Kondenzátory malých výkonů .....	25
3.2. Plášť, vodní nádrže a sběrač kondenzátu .....	27
3.2.1. Popis.....	27
3.2.2. Používané materiály .....	27
3.3. Příruby.....	28
3.3.1. Popis.....	28
3.3.2. Šrouby přírubových spojů .....	28
3.3.3. Používané materiály přírub .....	28
3.4. Návarky .....	28
3.5. Hrdla.....	28
3.6. Trubkovnice a desková víka.....	29
3.6.1. Popis.....	29
3.6.2. Upevňování trubek do trubkovnice .....	29
3.6.3. Používané materiály .....	32
3.7. Trubky a trubkové svazky .....	33
3.7.1. Popis.....	33
3.7.2. Rozložení trubkového svazku .....	34

3.7.3. Uspořádání trubek .....	37
3.7.4. Materiály trubek .....	38
3.8. Mechanizmy koroze .....	43
3.8.1. Elektrolytická koroze .....	43
3.8.2. Korozní praskání pod napětím .....	43
3.8.3. Koroze z usazenin .....	43
3.8.4. Erozní koroze .....	43
3.8.5. Korozní únava .....	43
3.9. Zanášení .....	44
4. VÝPOČET KONDENZÁTORU .....	45
4.1. Algoritmus výpočtu .....	45
4.2. Zadání .....	46
4.3. Stanovení parametrů páry a kondenzátu .....	46
4.4. Určení měrného objemu páry .....	46
4.5. Rovnice tepelné rovnováhy .....	47
4.6. Tepelný výkon .....	47
4.7. Poměrný průtok chladicí vody .....	47
4.8. Ohřátí chladicí vody .....	48
4.9. Střední logaritmický teplotní spád .....	48
4.10. Výpočet součinitele prostupu tepla .....	49
4.10.1. Výpočet součinitele prostupu tepla pomocí HEI .....	49
4.10.2. Výpočet součinitele prostupu tepla pomocí VTI - CKTI .....	49
4.11. Velikost teplosměnné plochy .....	50
4.12. Počet trubek na jeden modul .....	51
4.13. Celkový počet trubek .....	51
4.14. Činná délka trubek .....	51
4.15. Celková délka trubek .....	51
4.16. Návrh rozměrů trubkovnice .....	52
4.17. Koncepční návrh kondenzátoru .....	53
ZÁVĚR .....	57
5. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	58
6. SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	59
7. SEZNAM TABULEK .....	62
8. SEZNAM OBRÁZKŮ .....	63
9. SEZNAM PŘÍLOH .....	64

## ÚVOD

Kondenzátory se běžně používají v energetických zařízeních, farmaceutickém, potravinářském a chemickém průmyslu.

Toto zařízení slouží i jako základní stavební kámen pro chladicí techniku a tepelná čerpadla. Při použití v chladicí technice odvádí teplo vně chladicího okruhu. Naopak při užití v tepelných čerpadlech předává teplo topné smyčce.

Hlavní úlohou procesu kondenzace je expandování proudící páry na co nejnižší tlak tak, aby se mohla odváděním tepla přeměnit na kapalinu – kondenzát. Účelem kondenzátoru je dosažení největší možné účinnosti elektráren a vrácení vody do oběhu.

Kdyby se kondenzátor nepoužíval, vypouštěla by se vodní pára z parního oběhu do ovzduší a ztrácela by se tím chemicky vyčištěná napájecí voda. Tím, že by se tato voda musela neustále doplňovat a znovu čistit od různých minerálních látek, by docházelo ke snížení účinnosti a prodražení nákladů na provoz.

Kondenzátor je z konstrukčního hlediska speciální tepelný výměník, ve kterém dochází ke kondenzaci na povrchu teplosměnných trubek, nebo se do proudící páry vstřikuje chladicí voda. V těchto trubkách proudí chladicí kapalina (nejčastěji voda), která páře odebírá teplo potřebné ke kondenzaci páry na vodu.

V kondenzátoru se standardně udržuje co nevyšší stupeň vakua, aby se dosahovalo maximálního entalpického spádu na turbíně. Tím se docílí toho, že pára odvede vyšší měrnou práci, to dovoluje zvyšovat účinnost celého cyklu.

V první kapitole je shrnuto užití procesu kondenzace a jeho základní rozdělení.

Druhá kapitola uvádí použití povrchového kondenzátoru v energetice a dále se zabývá problematikou určování součinitele prostupu tepla při kondenzaci par, z nichž nejužívanější jsou metody HEI a VTI-CKTI.

Třetí kapitola se zabývá nejdůležitějšími konstrukčními prvky kondenzátorů a jejich používanými materiály, zde jsou podrobně rozebrány používané materiály kondenzátorových trubek.

Čtvrtá kapitola se zabývá zjednodušeným návrhem povrchového kondenzátoru.

## 1. KONDENZACE

Kondenzátor je speciální druh tepelného výměníku, ve kterém dochází chlazením ke kondenzaci páry na kapalinu. Kondenzátory se nejčastěji využívají ve farmaceutickém, potravinářském a chemickém průmyslu a v energetických zařízeních. Pro chlazení se obvykle využívá voda (viz obr. 2) nebo vzduch (viz obr. 1). Dále je možné používat mořskou vodu a vodu s nemrznoucími přísadami. V laboratorních aplikacích se také nazývá „chladič“.

Příklad vzduchem chlazeného kondenzátoru:



Obr. 1: Vzduchem chlazený kondenzátor [10]

Příklad kondenzátoru chlazeného vodou:



Obr. 2: Povrchový vodou chlazený kondenzátor [13]

## 1.1. Základní typy kondenzace

Základní typy kondenzace:

- Směšovací
- Povrchová
  - Průtoková
  - Oběhová

### 1.1.1. Kondenzace směšovací

Kondenzace je způsobena vstříkáním chladicí vody do páry nebo probubláváním páry vodní hladinou (příkladem jsou *barbotážní věže*<sup>1</sup> v jaderných elektrárnách). Výhodou tohoto principu je jeho jednoduchost a nenáročnost na další technické zařízení. Jeho velkou nevýhodou je ztráta veškerého kondenzátu. Směs chladicí vody a kondenzátu se musí odčerpávat a odvádět.

Vysokotlaké parní generátory požadují vysokou kvalitu a čistotu páry, resp. napájecí vody. Pokud kondenzát, který má požadované vlastnosti, odvedeme, musíme ho nahrazovat novou chemicky upravenou napájecí vodou. Tento proces je složitý a ekonomicky nákladný. Proto není vhodné tento druh kondenzace používat u velkých energetických zařízení.

Tento typ je možné používat u menších jednotek nebo u nízkotlakých turbín, které jsou poháněny například znečištěnou odpadní párou. [1]

### 1.1.2. Kondenzace povrchová

U velkých energetických zařízení se používá výhradně tento typ kondenzace.

Chladicí voda proudí v trubkách, na kterých kondenzuje pára. Ta poté stéká do sběrače kondenzátu, odkud je kondenzát odváděn do napájecí nádrže. Tímto principem získáme kondenzát vysoké čistoty, který lze téměř bez úpravy znovu použít v oběhu. V celém cyklu mohou nastat ztráty (např. netěsnostmi, odluhováním, odkalováním) u moderních zařízení v řádu do 0,5 %.

Chladicí voda by měla proudit uvnitř trubek, protože na ni nejsou kladeny vyšší nároky na úpravu. Kdyby voda proudila v mezitrubkovém prostoru, docházelo by zde k zanášení, které se v těchto místech nedá čistit.

Podle typu chlazení chladicí vody lze povrchovou kondenzaci dělit:

- Průtoková kondenzace – používáme, pokud je v blízkosti dostatečně velký tok vody na to, abychom jej mohli použít v kondenzátoru.
- Oběhová kondenzace – používáme, pokud v blízkosti není dostatečně velký tok vody. Ohřátá voda se následně chladí ve chladicích věžích.

Zpracováno dle [1].

---

<sup>1</sup> *Barbotážní věž* – Pokud nastane únik chladicí vody z potrubí v hermeticky těsném boxu v JE, dojde vlivem změny tlaku k okamžitému odpaření. Tato pára je poté vedena přes systém vodních nádrží, kam je přivedena pod hladinou vody a tím chlazena. Tímto dochází ke kondenzaci páry a snížení tlaku v hermeticky těsném boxu.

## 1.2. Vakuum

Definice vakua zní dle normy DIN 28400: Vakuum je stav plynu, který má menší hustotu než atmosféra na zemském povrchu. Jako vakuum tedy můžeme označit stav plynu, jehož tlak je nižší, než je tlak atmosférický resp. tlak normální.

Vakuum vytváříme v kondenzátoru z toho důvodu, aby se využil optimální tlakový spád mezi vstupem a výstupem páry na turbíně.

Hodnotu vakua, resp. absolutní tlak, v kondenzátoru lze podle [1] určit ze vztahu:

$$p_k \doteq p_E - (0,2 \div 0,5) [kPa] \quad (1.1)$$

kde je:

$p_k$  ..... tlak v kondenzátoru

$p_E$  ..... tlak emisní páry (tlak páry odcházející z poslední řady lopatek)

Podle [4] je možné zlepšit vakuum při kondenzaci následujícími způsoby:

- snížením teploty chladicí vody
- zvýšením průtoku chladicí vody
- zvětšením teplosměnné plochy kondenzátoru

## 2. POVRCHOVÝ KONDENZÁTOR

Dále budou v této práci probírány povrchové kondenzátory v energetických zařízeních

(viz obr. 2).

Kondenzátor se sestává z dalších zařízení:

- kondenzátní čerpadlo
- čerpadlo chladicí vody
- vývěva
- čerpadlo provozní vody (při použití vodoproudé vývěvy)
- chladicí věž (při oběhové kondenzaci)

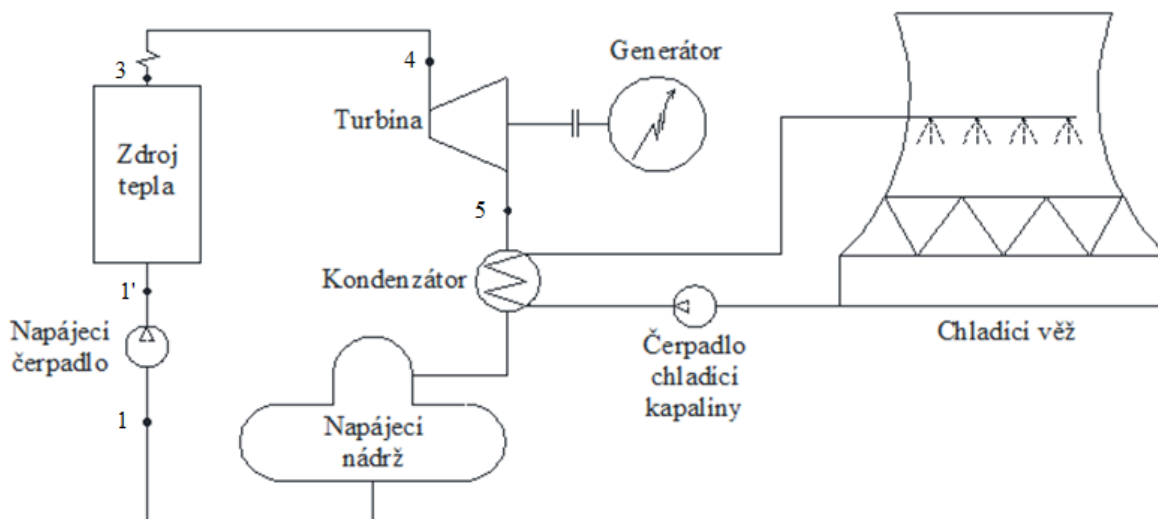
### 2.1. Rankine-Clausiiův cyklus

R-C cyklus je základním oběhem všech tepelných elektráren, kde je pracovním médiem voda a vodní pára.

Do zdroje tepla je napájecí voda hnána napájecím čerpadlem. V tepelném zdroji se voda přeměňuje pomocí výparníku na sytou páru, ta se následně přehřívá v přehříváku páry. Tím se páře dodají požadované parametry pro dané technické řešení elektrárny. Přehřátá pára nadále svou prací otáčí turbínou. Tato práce se pomocí spojky a případně převodovky přenáší na generátor, odkud je veden elektrický proud. Následně pára zkondenzuje v kondenzátoru a ve formě vody je pomocí kondenzačního čerpadla přepravena do napájecí nádrže. Odtud se cyklus opakuje. V případě ztrát je možno pomocí napájecí nádrže doplňovat vodu, která se z cyklu vytratila.

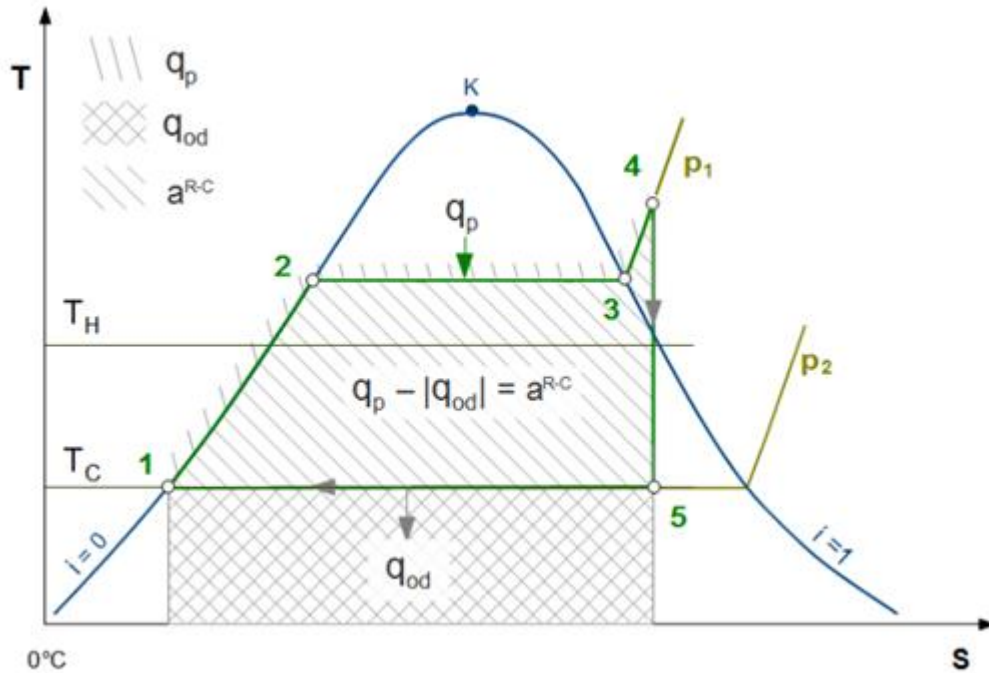
Zdrojem tepla mohou být různá zařízení, jako jaderný reaktor, nejrůznější druhy kotlů (např.: spalovenské; spalující uhlí, biomasu, plyn, topné oleje), spalovací motory, geotermální vrty, koncentrované sluneční záření.

Schéma R-C cyklu:



Obr. 3: Schéma R-C cyklu

V T-s diagramu:



Obr. 4: T-s diagram R-C cyklu

Při stavu 4 má přehřátá pára entalpii  $i_{pp}$  a entalpie kondenzátu v bodě 1 je  $i_k$ , potom je dodané teplo:

$$q_p = i_{pp} - i_k \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2.1)$$

Při stavu 5 má pára entalpii  $i_p$  a ve stavu 1 má kondenzát entalpii  $i_k$ , potom je odvedené teplo v kondenzátoru:

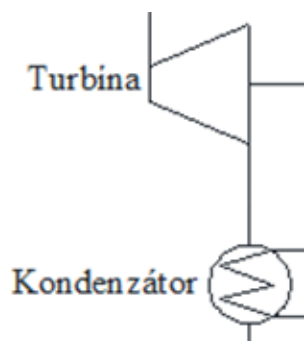
$$q_{od} = i_p - i_k \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2.2)$$

Práce na turbíně dodaná párou je:

$$a^{R-C} = q_p - |q_{od}| = i_{pp} - i_p \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2.3)$$

## 2.2. Funkce kondenzátoru v R-C cyklu

Kondenzátor se standardně navrhuje pro určitou turbínu, se kterou má spolupracovat, a přímo navazuje na turbínu (viz obr. 5). Pára, která odchází z posledního oběžného kola, přichází přímo do kondenzátoru bez dalších úprav.



Obr. 5: Výběr z R-C cyklu

Kondenzátor odvádí z okruhu nevyužitelné teplo vně okruhu kondenzací vodní páry. Zároveň je to také největší tepelná ztráta celého okruhu. Toto teplo je chlazeno pomocí vodního toku nebo v chladicích věžích, což je v našich přírodních podmínkách nejčastější způsob. Například v jaderné elektrárně Temelín, u které je tepelný výkon jednoho bloku 3000 MW a elektrický výkon jednoho bloku 1000 MWe, odchází kondenzátorem a chladicími věžemi 2000 MW přebytečné tepelné energie.

Nadále jsou z okruhu vývěvou odváděny nekondenzující plyny a vývěva pomáhá udržovat v kondenzátoru neustálý podtlak.

Odvedenému teplu odpovídá plocha pod čarou 5 – 1 v obr. 4. Z uvedeného diagramu je vidět, že pokud snížíme v kondenzátoru teplotu a tlak, dojde ke zvětšení entalpického spádu na turbíně (čára 4 – 5), čímž pára odevzdá více práce.

## 2.3. Přestup tepla při kondenzaci par

Při kondenzaci par dochází ke sdílení tepla, jenž představuje výparné teplo, a přenosu hmoty, jež představuje množství kondenzátu. Pára začne kondenzovat tehdy, přijde-li do kontaktu s chladicími trubkami. Při tomto kontaktu dochází k úbytku objemu páry, pokud je sytá pára čistá, dochází až k tisícinásobnému zmenšení objemu. Vlivem tohoto zmenšení objemu vznikne kolem trubky větší podtlak, který přisává další páru. V případě, že pára není čistá a obsahuje nekondenzující plyny (např. 50 %), dochází při kondenzaci pouze k polovičnímu zmenšení objemu oproti použití čisté páry.

Pokud je teplosměnná plocha rovinného charakteru, potom je plocha většinou kvůli dobrému odvodu kondenzátu orientována svisle. Při použití teplosměnné plochy válcového tvaru (trubky), lze použít orientaci jak svislou, tak vodorovnou.

Pára přechází na vodu v dílčích, na sebe navazujících dějích, ty můžou mít velmi různý vliv na celkový přenosový tepelný odpor.

1. Pára při kondenzaci musí být přiváděna na rozhraní obou fází transportem molekul.
2. Vlastní kondenzace nastává na hraniční ploše oddělující obě fáze.
3. Výparné teplo, které se přitom uvolňuje, musí být vedeno k ochlazované stěně vrstvou kondenzátu.

První děj probíhá konečnou rychlostí ve směru normály. Při použití čisté páry lze tento děj zanedbat, nelze to však udělat při obsahu nekondenzujících plynů, které ovlivňují difuzní odpor.

Druhý děj by se dal považovat za kondenzační koeficient  $f$ . Představuje poměr všech zúčastněných molekul, které se na kondenzační ploše skutečně zachytí. Pro vodu při atmosférickém tlaku je experimentálně zjištěná hodnota  $f = 0,02$ . To značí, že počet molekul, které se zachytí jako kondenzát, je padesátkrát menší než molekul, které se setkají s hraniční plochou obou fází. Toto zlepšíme podchlazením povrchové plochy kondenzátu. Při použití vody při atmosférickém tlaku je toto podchlazení asi o 0,03 °C. Pouze při velmi nízkých tlacích je vhodné uvažovat podchlazení, jinak je v běžných aplikacích možné, aby teplota povrchové plochy kondenzátu byla stejná, jako je teplota syté páry.

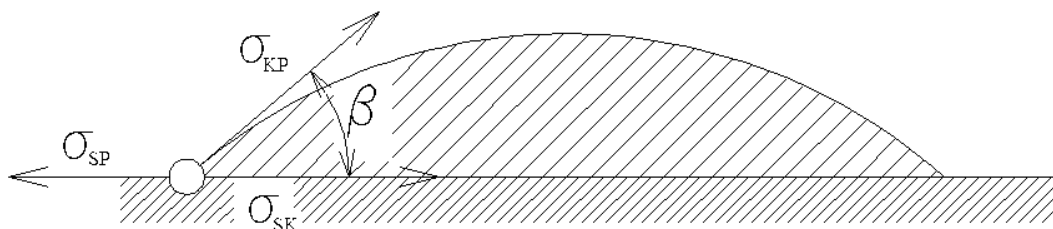
Třetí dílčí děj při kondenzaci závisí na tom, jak je kondenzát rozložený na chladicí trubce. Ze všech tří dějů má tento největší vliv na odpor proti přestupu tepla. O blánové (filmové) kondenzaci hovoříme tehdy, tvoří-li kondenzát souvislou vrstvu pokrývající trubku. Rychlost kondenzace potom přímo ovlivňuje tepelný odpor tohoto filmu. Pokud je trubka smáčena jen částečně, hovoříme o kondenzaci kapkové.

Tato kapitola byla zpracována dle [5], [3].

### 2.3.1. Hranice kapkové a blánové kondenzace

Poměr mezi kapkovou a blánovou kondenzací je dán vztahem:

$$\sigma_{sp} - \sigma_{sk} = \sigma_{kp} \cdot \cos \beta \quad (2.4)$$



Obr. 6: Povrchové napětí kapky dle [5]

kde:

indexy s, k, p znamenají pevná (stěna), kapalná a parní fáze

$\beta$  ..... Okrajový úhel

$\sigma_{kp}$  ..... Povrchové napětí kapaliny proti páře

$\sigma_{sk}$ ,  $\sigma_{sp}$  ..... Povrchové napětí stěny proti kapalině, resp. páře

Levou stranu rovnice můžeme nazvat smáčivým napětím. Pokud bude úhel  $\beta = 0$ , pak nastane tvorba filmu na smáčeném povrchu. Pakliže úhel  $\beta$  nabývá konkrétních hodnot, potom je smáčení nedokonalé a můžeme hovořit o kapkové kondenzaci. [5]

### 2.3.2. Kapková kondenzace

Tato kondenzace nastává tehdy, ulpívá-li na povrchu kondenzační plochy látka, která tuto plochu činí nesmáčitelnou. Látka na povrchu buď pevně ulpívá, nebo je přivedena jako znečištění párou. Nejpříhodnější podmínky pro kapkovou kondenzaci jsou podle [5] nepatrná kondenzační rychlost, malá vazkost kondenzátu, velké povrchové napětí kapaliny, nesmáčitelnost a hladkost povrchu.

Tento druh kondenzace dává mimořádně velké hodnoty součinitele přestupu tepla  $\alpha = 50000 \div 80000 [W \cdot m^{-2} \cdot \text{deg}^{-1}]$ , zatímco u blánové kondenzace se střední hodnoty součinitele přestupu tepla pohybují kolem  $6000 [W \cdot m^{-2} \cdot \text{deg}^{-1}]$ . [5]

### 2.3.3. Blánová kondenzace

O blánové (filmové) kondenzaci hovoříme tehdy, tvoří-li tekutina souvislou vrstvu kondenzátu na povrchu smáčené plochy. Podle [5] blánovou kondenzaci podporují tyto faktory: malé povrchové napětí tekutiny, vysoké tepelné zatížení a větší rychlost páry  $\left( w \geq 10 [m \cdot s^{-1}] \right)$ .

Předpokladem pro Nusseltovu teorii vodní blány je tak tenká vrstva kondenzátu, že teplotní spád vrstvy je pouze lineární a veškeré teplo se sdílí vrstvou jen vedením, přičemž kondenzát stéká pouze laminárním prouděním. Celkový tepelný odpor je tedy určen tloušťkou blány na povrchu teplosměnné plochy. Z toho vyplývá, že čím bude tloušťka blány větší, tím větší bude i tepelný odpor vrstvy kondenzátu.

Při laminárním toku vrstvy lze určit tepelný tok blánou  $q_{tx}$  z Fourierovy rovnice pro vedení tepla i z Newtonovy rovnice pro přestup tepla. Tedy podle [5]:

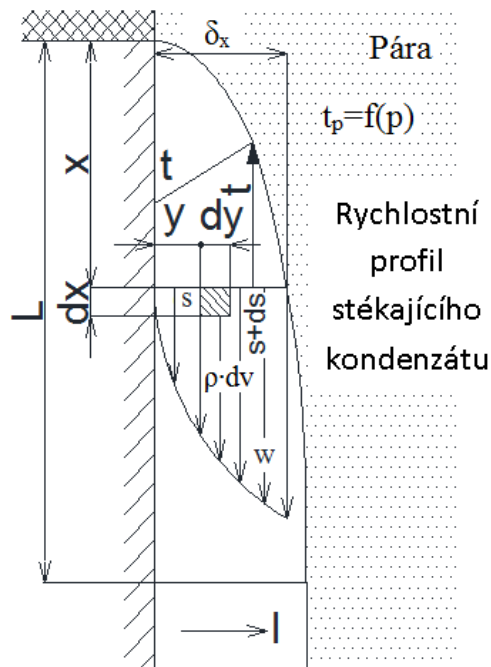
$$q_{tx} = \frac{\lambda}{\delta_x} \cdot (t_{ps} - t_s) = \alpha_x (t_{ps} - t_s) \quad (2.5)$$

Při porovnání těchto výrazů vypočtyne:

$$\alpha_x = \frac{\lambda}{\delta_x} \quad (2.6)$$

Střední hodnotu součinitele přestupu tepla na straně páry pro svislou stěnu délky  $L$  lze podle [5] vypočítat ze vztahu:

$$\alpha_p = L^{-1} \int_0^L \alpha_x \cdot dx \quad (2.7)$$



Obr. 7: Blánová kondenzace na svislé stěně dle [5]

Dle výše uvedených rovnic (2.6), (2.7) součinitel přestupu tepla závisí na tloušťce kapalné blány  $\delta_x$ . Tuto tloušťku lze určit z rovnice kontinuity. Podle této rovnice musí být přírůstek kondenzátu roven nově kondenzovanému množství páry. Výsledek je poté dle [5]:

$$\delta_x = \left[ \frac{4 \cdot \lambda \cdot \eta \cdot x \cdot (t_{ps} - t_s)}{\rho^2 \cdot g \cdot l} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.8)$$

zde má  $x$  význam podle obr. 7.

Po dosazení do rovnice (2.6) a následném přepočtení podle rovnice (2.7) dojdeme k výsledku  $\alpha_p$ :

$$\alpha_p = 0,943 \left[ \frac{\lambda^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot l}{(t_{ps} - t_s) \cdot \eta \cdot L} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.9)$$

Tento vztah platí pro svislé trubky.

Při vířivém pohybu kondenzátu se upravuje součinitel 0,943 na 1,15. Potom výpočet  $\alpha_p$  vypadá:

$$\alpha_p = 1,15 \left[ \frac{\lambda^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot l}{(t_{ps} - t_s) \cdot \eta \cdot L} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.10)$$

Pokud bude chladičí plocha skloněna o úhel  $\varepsilon$ , pak se přepočte  $\alpha_p$  na tento úhel:

$$\alpha_\varepsilon = \alpha_p \cdot (\sin \varepsilon)^{\frac{1}{4}} \quad (2.11)$$

Při kondenzaci na vodorovných trubkách je dle [5] výpočet následovný:

$$\alpha_{p \text{ vod}} = 0,77 \cdot \alpha_{p \text{ vert}} \cdot \left( \frac{L}{d} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.12)$$

kde se za  $\alpha_{p \text{ vert}}$  dosadí hodnota z rovnice (2.9).

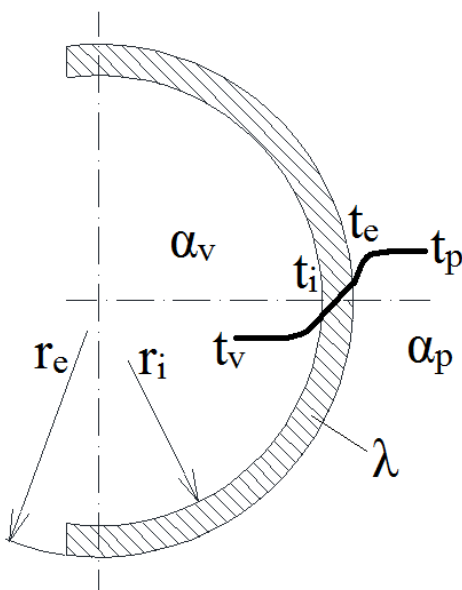
Tato část byla zpracována dle [5]

## 2.4. Součinitel prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla je možné stanovit pomocí metody tepelných odporů jednotlivých vrstev čili pomocí vedení tepla stěnou trubky (případně nánosu) a pomocí přestupu tepla na straně vody a na straně páry. Další a užívanější možností stanovení součinitele prostupu tepla při kondenzaci je použití experimentálních vztahů, které určují metody HEI nebo VTI – CKTI.

### 2.4.1. Metoda tepelných odporů

Součinitel přestupu tepla na straně páry ( $\alpha_p$ ) můžeme určit podle kapitoly 2.3.3. Tento výpočet zahrnuje i vrstvu kondenzátu na povrchu trubky.



Obr. 8: Tepelné odpory

Součinitel přestupu tepla na straně vody ( $\alpha_v$ ) je možné vypočítat podle termomechanických vztahů pro nucenou konvekci pomocí podobnostních kritérií:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (2.13)$$

Tento vztah platí pro hodnoty  $Re = <10^4; 4 \cdot 10^4>$ ;  $Pr = <0,5; 25>$ . Velikost Prandtlova čísla se pro vodu  $t = (0 - 100)^\circ\text{C}$  pohybuje v rozmezí  $<1,72; 13,57>$ . Resp. je možné jej vypočítat:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (2.14)$$

zde je  $a$  teplotová vodivost.

A Reynoldsovo číslo je možné vypočítat dle vztahu:

$$Re = \frac{w_s \cdot d_{Char}}{\nu} \quad (2.15)$$

Následně je možné vypočítat  $\alpha_v$  z Nusseltova kritéria:

$$Nu = \frac{\alpha_v \cdot d_{Char}}{\lambda} \quad (2.16)$$

$$\alpha_v = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_{Char}} \left[ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \right] \quad (2.17)$$

Zde je  $\lambda$  součinitel vedení tepla proudící kapaliny. A  $d_{Char}$  je charakteristický rozměr.

Následně je možné vypočítat součinitel prostupu tepla válcovou stěnou:

$$k = \frac{1}{\frac{r_e + r_i}{2} \cdot \frac{1}{\alpha_p \cdot r_e} + \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_e}{r_i} + \frac{1}{\alpha_v \cdot r_i}} \left[ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \right] \quad (2.18)$$

V rovnici (2.18) je  $\lambda$  součinitel vedení tepla stěnou, je dán vlastnostmi materiálu.

## 2.4.2. Metoda HEI

HEI – Heat Exchange Institute – stanovuje na základě experimentálních měření součinitel prostupu tepla trubek a provozní opravné koeficienty (teploty vstupní vody, materiálu, znečištění trubek).

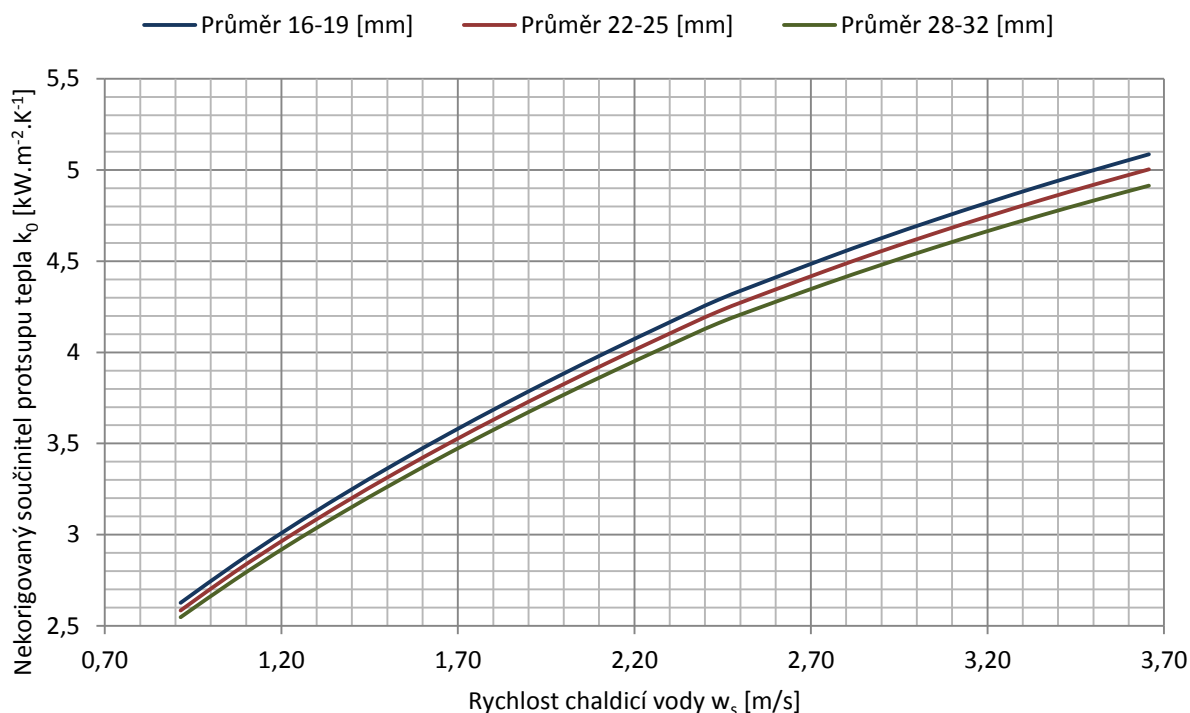
Experimenty jsou prováděny na zařízení s trubkami do tvaru U, které jsou čisté, a jejich tloušťka stěny je 1,246 [mm] (resp. 0,049<sup>cc</sup>). Jsou vyrobeny z admirální mosazi a referenční teplota je 21 [°C] (resp. 70 [°F]). [11]

$$k = k_0 \cdot F_W \cdot F_M \cdot F_C \left[ kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \right] \quad (2.19)$$

Tabulka 1: Vybrané nekorigované součinitele prostupu tepla  $k_0$  dle [11]

Průměr trubek [mm]	Rychlost v trubkách [m/s]					
	1,5	1,7	1,8	2	2,1	2,3
16 – 19	3,39	3,56	3,71	3,87	4,01	4,15
22 – 25	3,34	3,50	3,66	3,81	3,95	4,09
28 – 32	3,29	3,45	3,60	3,75	3,89	4,03

Následující obrázek graficky znázorňuje průběh nekorigovaného součinitele prostupu tepla  $k_0$ :

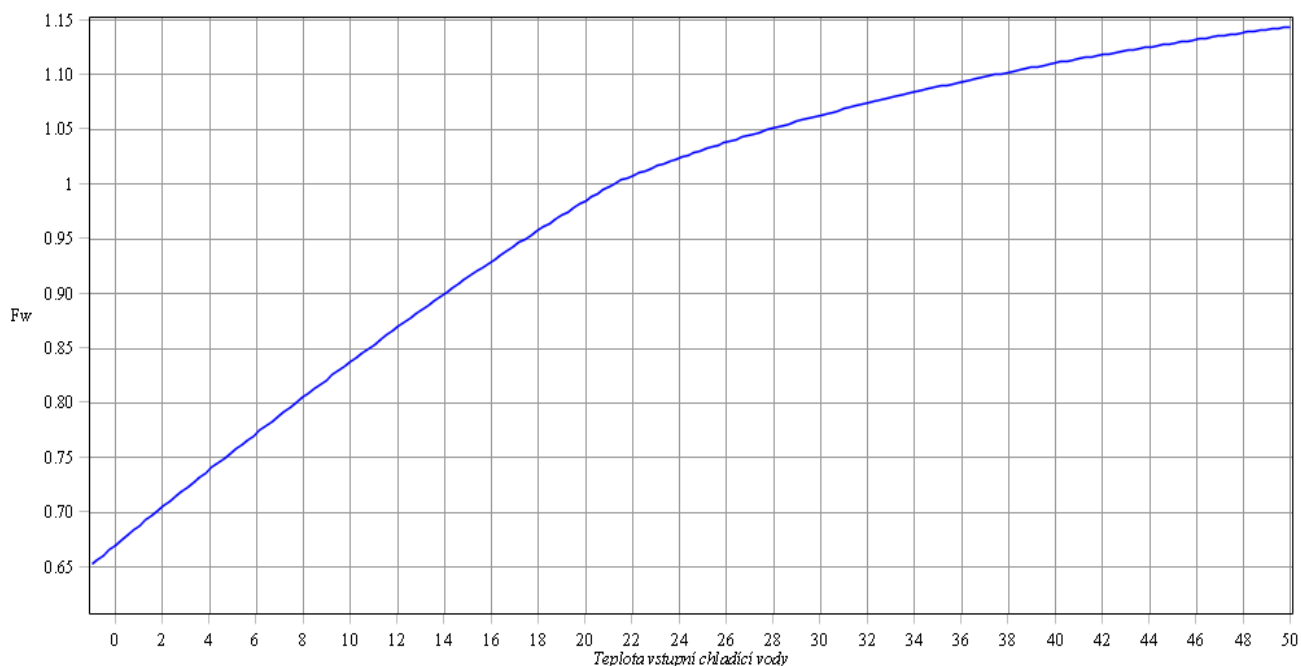


Obr. 9: Průběh součinitelů prostupu tepla u vybraných průměrů trubek [11]

Korekční koeficient teploty se vypočte podle:

$$F_w = 1,051 \cdot 10^{-2} \cdot t_{v1} - 1,506 \cdot 10^{-3} \cdot (|21,5 - t_{v1}|)^{1,39} + 0,7765 \quad (2.20)$$

Následující graf ukazuje průběh korekčního součinitele teploty chladicí vody v rozsahu teplot 1 °C až 50 °C



Obr. 10: Průběh koeficientu korekce teploty  $F_w$  [11]

Tabulka 2: Vybrané korekční součinitele materiálu  $F_M$  [11]

Materiál			Korekční součinitel materiálu $F_M$				
			Pro tloušťku stěny [mm]				
Součinitel vedení tepla $\lambda$ [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]		0,7	1	1,2	1,5	2	
Nerezová ocel	1.4301	1,240	0,862	0,804	0,754	0,714	0,619
	1.4401	1,183	0,854	0,794	0,744	0,703	0,607
Admiraltní mosaz	2.0470	9,231	1,021	1,008	0,998	0,987	0,961
Hliníková mosaz	2.0460	8,365	1,018	1,004	0,993	0,981	0,952
Hliníkový bronz	2.0918	6,634	1,009	0,993	0,979	0,965	0,930
Monely	2.0872	3,750	0,980	0,953	0,930	0,908	0,854
	2.0883	2,452	0,946	0,908	0,876	0,847	0,777
Titan	3.7025	1,832	0,915	0,869	0,830	0,796	0,714
	3.7035						

Korekční součinitel zahrnující vliv znečištění vnitřní strany trubek  $F_C$  je podle [4]

- 0,85 – pro dokonale čistou trubku
- 0,8 – 0,7 – pro zhoršené podmínky, přičemž se pro čistou vodu a průtočné chlazení bere vyšší hodnota než pro oběhové chlazení.

### 2.4.3. Metoda VTI – CKTI

Metoda HEI je často využívána, avšak má nedostatky zejména v omezeném hodnocení vlivů  $w$ ,  $t_{vl}$  a  $d$ . Naproti tomu metoda VTI – CKTI tyto veličiny ve svém výpočtu podrobněji zahrnuje. [4]

$$k = 3,96 \cdot a \cdot \left( \frac{1,1 \cdot w_s}{\sqrt[4]{d_i}} \right)^x \cdot \beta_t \cdot \beta_d \cdot \beta_z \quad (2.21)$$

kde exponent  $x$  se vypočte:

$$x = 0,12 \cdot a \cdot (1 + 0,15 \cdot t_{vl}) \quad (2.22)$$

$\beta_t$  je součinitel zahrnující vliv teploty chladicí vody

$$\beta_t = 1 - \frac{0,44\sqrt{a}}{1000} (35 - t_{vl}) \quad (2.23)$$

$\beta_z$  je opravný součinitel zahrnující vliv počtu tahů

$$\beta_z = 1 + \frac{z-2}{10} \left( 1 - \frac{t_{vl}}{35} \right) \quad (2.24)$$

$\beta_d$  je opravný součinitel, který zahrnuje vliv parního zatížení teplosměnné plochy. Pro jmenovité měrné parní zatížení  $d_j$  a pro nižší měrné zatížení až do hodnoty  $d_m$ , tedy v rozsahu  $d_m < d < d_j$  je  $\beta_d = 1$ , je velikost  $d_m$  dána [4]:

$$d_m = (0,9 - 0,012 \cdot t_{v1}) \cdot d_j \quad (2.25)$$

Pro měrné parní zatížení  $d < d_m$  platí:

$$\beta_d = \delta(2 - \delta) \quad (2.26)$$

kde  $\delta = \frac{d}{d_m}$

Při návrhu nového kondenzátoru se počítá se jmenovitou hodnotou parního zatížení, a proto  $\beta_d = 1$ . Jinak se tento součinitel využívá k výpočtu charakteristiky kondenzátoru.

$a$  je součinitel zahrnující vliv znečištění teplosměnné plochy a dle [4] se volí v rozsahu:

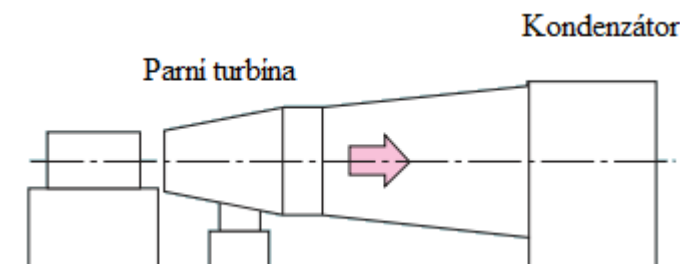
- 0,8 až 0,85 pro průtočné chlazení s čistou vodou
- 0,75 až 0,8 pro oběhové chlazení
- 0,65 až 0,75 pro znečištěnou vodu a při možném vytváření nánosů

### 3. KONSTRUKCE POVRCHOVÉHO KONDENZÁTORU

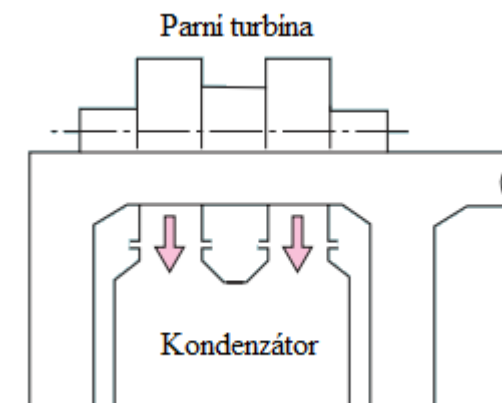
V jednotlivých kapitolách bude zmíněna konstrukce kondenzátoru malých výkonů. Dále zde budou rozebrány hlavní konstrukční části kondenzátorů a jejich materiály, problematika vzniku koroze.

Kondenzátory lze dělit dle konstrukčního uspořádání:

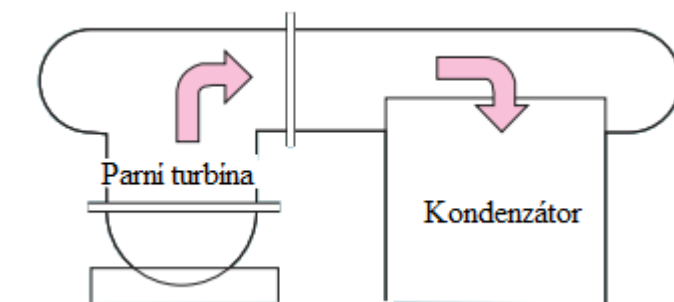
- Podle polohy trubkového svazku na:
  - horizontální
  - vertikální
- Podle počtu tahů na:
  - jednotahový
  - dvoutahový
  - třítahový
  - vícetahový
- Podle uspořádání výstupu z turbíny do kondenzátoru na:
  - axiální
  - pod turbínou
  - boční



Obr. 11: Axiální výstup z turbíny dle [14]



Obr. 12: Spodní výstup z turbíny dle [14]



Obr. 13: Boční kondenzátor s horním výstupem z turbíny dle [14]

Poloha kondenzátoru v návaznosti na turbínu nemá na samotný proces kondenzace významný vliv a jedná se tedy pouze o prostorový požadavek na konstrukci.

Nejvhodnější uspořádání kondenzátoru je takové, že pára kondenzuje na vnějším povrchu trubek a voda proudí uvnitř trubek. Při tomto uspořádání je dosaženo nejlepších hodnot prostupu tepla. Toto uspořádání dovoluje dobré čištění vnitřního povrchu přímých trubek a zároveň je možné použití vyšších rychlostí chladicí vody. Naproti tomu, kdyby chladicí voda proudila vně trubkových svazků, nebylo by prakticky možné tyto prostory čistit od zanášení.

Přívod páry většinou provádíme radiálně středem délky pláště. V případě použití kondenzátorů pro malé výkony je možné je konstruovat jako běžný výměník tepla s tím rozdílem, že je potřeba použít výztuhy nebo silnějšího pláště, aby nádoba vydržela vnitřní podtlak, pokud kondenzátor pracuje s vnitřním tlakem v oblasti vakua.

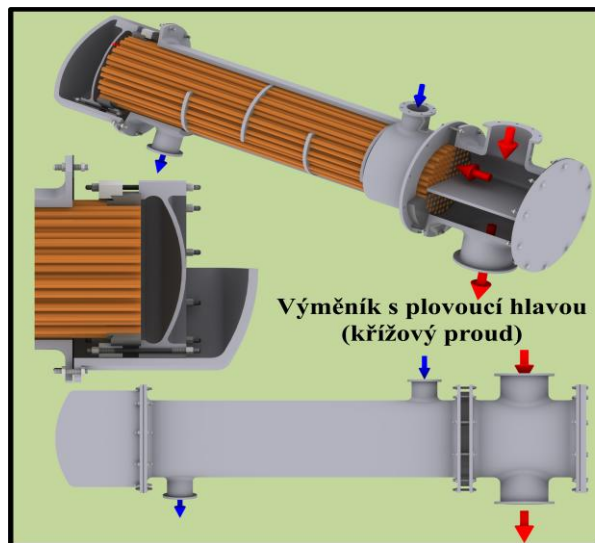
Kondenzátory malých výkonů stavíme tedy válcového tvaru s kruhovitým průřezem. Z pevnostního hlediska tento tvar vychází nejlépe. Pro velké výkony však stavíme kondenzátory většinou ve tvaru hranolu. Pevnostní výsledky nejsou tak příznivé jako u válcových nádob, a v případě potřeby se kondenzátor vhodně vyztuží vnějšími žebry, lépe však využívá prostoru.

Tato kapitola byla zpracována dle [1], [4].

### 3.1. Kondenzátory malých výkonů

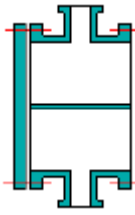

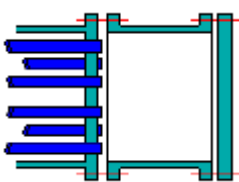
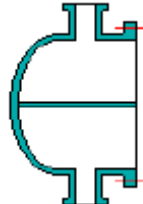

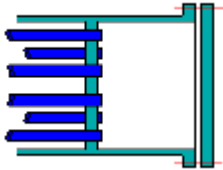
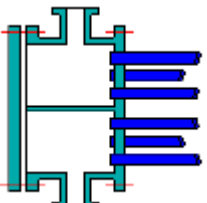
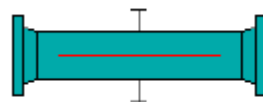
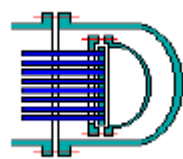
Jak již bylo zmíněno výše, kondenzátory malých výkonů lze konstruovat obdobně jako tepelné výměníky. Za kondenzátory malých výkonů lze považovat takové, které přenášejí malý tepelný výkon nejvýše v řádu stovek kilowattů.

Příkladem mohou být kondenzátory používané v domácí chladicí technice (lednice, klimatizace) nebo kondenzátory v tepelných čerpadlech. Dále například kondenzátory ucpávkové páry, kondenzátory páry unášené spaliny.



Obr. 14: Výměník s plovoucí hlavou

Tabulka 3: Vybrané typy konstrukce výměníků dle [2]

Přední strana	Plášť	Zadní strana
Typ A	Typ E	Typ L
Kanál se snímatelným krytem	Jednotahový	Pevná trubkovnice
		
Typ B	Typ F	Typ N
Víko (integrovaný kryt)	Dvoutahový	Pevná trubkovnice
		
Typ C	Typ G	Typ S
Kanál s integrovanou trubkovnicí a odnímatelným krytem	S rozděleným tokem	Plovoucí hlava s podpěrným zařízením
		

## 3.2. Plášť, vodní nádrže a sběrač kondenzátu

### 3.2.1. Popis

Plášť neboli skořepina (anglicky *shell*) je základním prvkem všech tlakových nádob. Tvoří obálku kolem vnitřního prostoru. Jsou to díly zhotovené z plechů svařené dohromady. U kondenzátoru je tvar ovlivněn požadavky na konstrukci. Jak již bylo zmíněno dříve, z hlediska napjatosti materiálu je nejvhodnější použít válcového tvaru pláště.

Před samotným skružováním se plechy předešly, aby se zamezilo tomu, že po skružování zůstanou rovné konce plechů a tím vznikne nekruhový profil. Válcové plechy se poté skružují na tříválcových skružovacích stolicích. Vložený plech mezi masivní válce se plasticky deformuje. Takto vzniklé luby se sestaví dohromady a slícují se. Po kontrole souososti je možné takto vzniklý válec nastehovat a následně přesunout na svařovací pracoviště. Pro bezpečné přemístění na svařovací pracoviště musí být stehových svarů velké množství. [8]

Vodní nádrže (angl. *water boxes*) mohou v aplikaci pro kondenzátory sloužit jako rozvaděče a sběrače chladicí vody.

Funkce sběrače kondenzátu (angl. *hotwell*) je zřejmá z jeho názvu. Odtud je kondenzát dopravován kondenzátním čerpadlem zpět do systému.

### 3.2.2. Používané materiály

Tabulka 4: Materiály pláště, vodních nádrží a sběrače kondenzátu dle [11], [16]

Materiál	Označení dle		
	USA ASTM	EN	
Uhlíková ocel	A 36	S275JR	1.0044
	A 283 Gr. C	S235JR	1.0038
	A 285 Gr. C	P265GH	1.0425
	A 516 Gr. 70	P355GH	1.0473
Nerezová ocel	A 240 (AISI 304)	X5CrNi18-10	1.4301
Slitina ocel – molybden	A 204 Gr. A/B	16Mo3	1.5415
Slitina ocel – chrom – molybden	A 387 Gr. 12	13CrMo45	1.7335
	A 387 Gr. 11	13CrMo45	1.7335
	A 387 Gr. 22	10CrMo910	1.7380
Slitina ocel – nikl	A 203 Gr. A/B	14Ni6	1.5622
	A 203 Gr. D/E	12Ni14	1.5637

## 3.3. Příruby

### 3.3.1. Popis

Pomocí přírub (angl. *flange*) se realizují rozebíratelné spoje tam, kde má potrubí plynule navazovat na plášť a naopak. Nejčastěji se používá svarový spoj pro spojení s pláštěm. Pokud se přírubami spojuje vzájemně potrubí, pak se k sobě přišroubují.

Používané příruby dle [8]:

- ploché příruby
- krkové příruby
- závitové příruby
- točivé příruby
- vnitřní příruby

### 3.3.2. Šrouby přírubových spojů

Pro přírubové spoje se dle [8] používají dva druhy šroubů:

- Šrouby se šestihrannou hlavou: používají se na potrubní příruby.
- Svorníkové šrouby: pro tlakové nádoby a potrubní spoje s vyššími pracovními parametry.

### 3.3.3. Používané materiály přírub

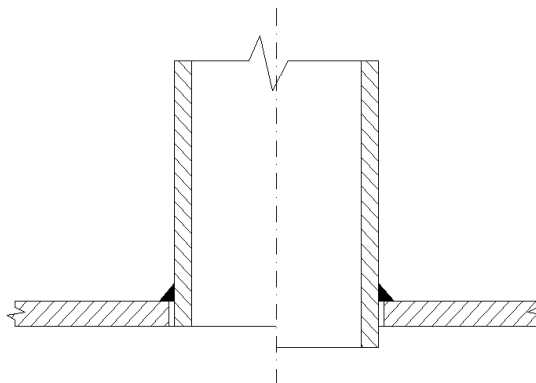
- Podle značení EN:
  - Konstrukční ocele: P265GH, E295
  - Nízko legované ocele: 18CrMo4, 25CrMo4
- Podle značení ASTM:
  - Konstrukční ocele: A 105
  - Legované a nerezové ocele: A 182, A 350
  - Nikl a jeho slitiny: B 462, B 564
  - Titanové: B 384
  - Měď a její slitiny: B 62, B 271
  - Hliník a jeho slitiny: B 211, B 247

## 3.4. Návarky

Používají se k odvodušňování, odvodnění, připojení regulační a měřicí techniky. Uvnitř je vysoustružen závit G 1/2“ nebo G 1/4“ [8].

## 3.5. Hrdla

Slouží pro přívod páry z posledního stupně turbíny. Dále se používají pro přívod a odvod chladicí vody, případně jiných technologických médií. Průměry hrdel se standardně volí v rozmezí Js 25 až Js 600 [8].



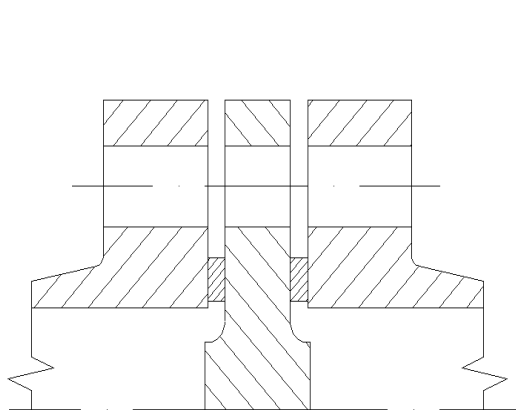
Obr. 15: Hrdlo bez vnitřního přístupu dle [8]

## 3.6. Trubkovnice a desková víka

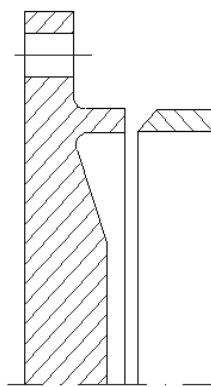
### 3.6.1. Popis

Jsou to desky konstantní tloušťky, tvaru dle zbytku zařízení. Dosedací plocha víka je zvláště upravená kvůli těsnění (v případě rozebíratelného spoje). Trubkovnice (angl. *tubesheet*) je na rozdíl od víka osazena hustou sítí otvorů pro trubky a její osou symetrie bývá svislá osa kondenzátoru.

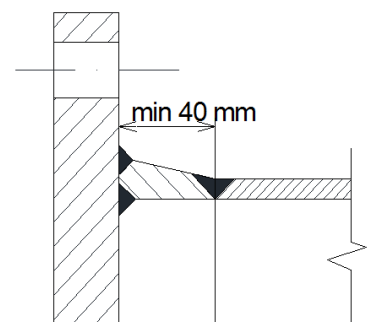
Trubkovnice a víka se dají ke zbytku zařízení připojit buď rozebíratelným šroubovým spojem, nebo zavařením. Při svařování se musí použít přechodového prvku, a sice krčku nebo přechodového prstence. Krček zlepšuje odvod tepla při svařování, a proto je svar na obou stranách housenky rovnoměrně tepelně zpracovaný. Krček dále zlepšuje přístup ke svaru a tudíž i možnost jeho následných kontrol. Dále se přechodovým elementem vytvoří plynulejší přechod mezi díly, což má výrazně příznivý vliv na lokální ohybová napětí. [8]



Obr. 16: Trubkovnice sevřena mezi přírubami [8]



Obr. 17: Připevnění pomocí krčku [8]



Obr. 18: Připevnění pomocí přechodového prstence [8]

### 3.6.2. Upevňování trubek do trubkovnice

#### 3.6.2.1. Zaválcování

Trubka s vhodně upraveným povrchem se zasune do připravené díry v trubkovnici. Následně se do trubky zasune zaválcovací nástroj.

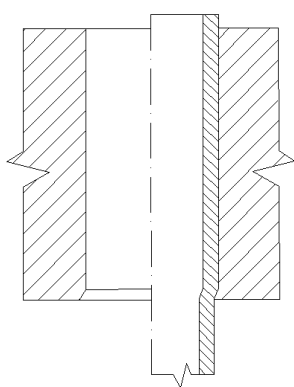
**Funkce zaválcovacího stroje:** Nástroj je osazen kuželovým trnem, jenž je poháněn elektromotorem. Na opačném konci trnu je klec s válečky, která se zasouvá do trubky. Otáčením trnu vznikne osový tlak, který přitlačí válečky na stěnu trubky a rozválcuje ji. Při

práci je nutno regulovat krouticí moment, jinak by mohlo dojít ke zplastizování okraje otvoru v trubkovnici.

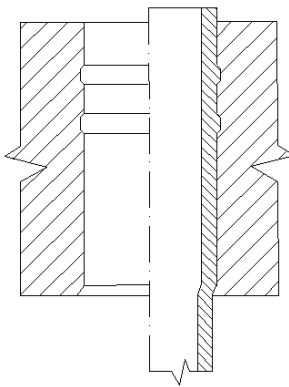
**Systematika zaválcování:** Vlivem pružných přetvoření může dojít k vyboulení trubkovnice směrem ven. Tento jev je zřetelnější, čím je trubkovnice tenčí a čím má větší rozměry. Tomuto je možné dle [8] zabránit:

- Zaválcováním několika „hnízd“, které obsahují 10 až 15 trubek, kolem středové části trubkovnice. Tato hnízda působí jako táhla a nedovolují trubkovnici vyboulení. Následně se systematicky zaválcují zbylé trubky.
- Do vybraných středových trubek se nasounou tyče zakončené závitem, které utažením matic předeprnou trubkovnici.

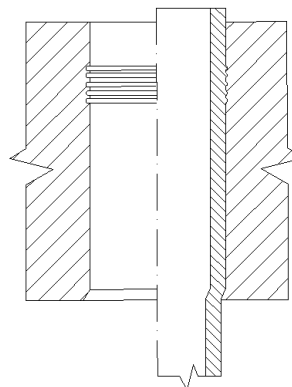
Používané zaválcované spoje dle [8]:



Obr. 19: Zaválcovaný spoj do hladké díry



Obr. 20: Zaválcovaný spoj do díry s drážkami

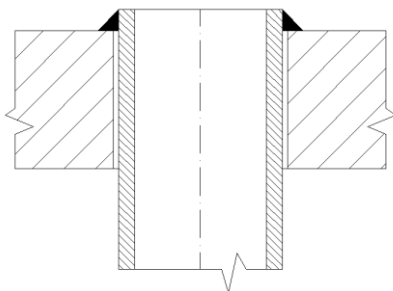


Obr. 21: Zaválcovaný spoj do díry s hřebínkem

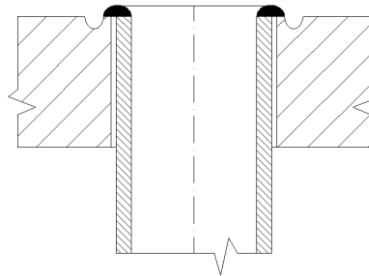
### 3.6.2.2. Svařování

Tyto spoje se používají s vysokou spolehlivostí při vysokých namáháních a tam, kde je nutné oddělení nebezpečných médií. U zaválcovaného spoje dochází při teplotách nad 300 °C k odbourání pružné složky napětí, což vede k netěsnosti spoje. Těmto teplotním oblastem spolehlivě vyhovuje svarový spoj. Případně jejich kombinace. Ke svařování se používají svařovací automaty. [8]

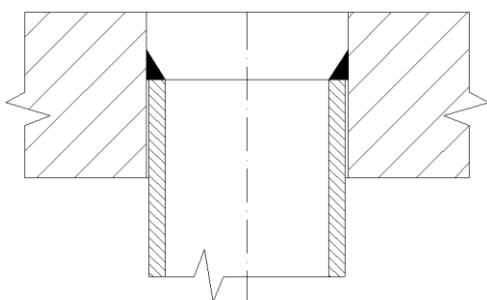
Používané svarové spoje dle [8]:



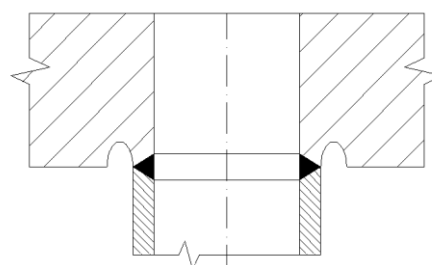
Obr. 22: Koutový svar



Obr. 23: Lemový svar



Obr. 24: Přivaření uvnitř díry trubkovnice



Obr. 25: Svar na vnitřní straně trubkovnice  
(používá se výjimečně)

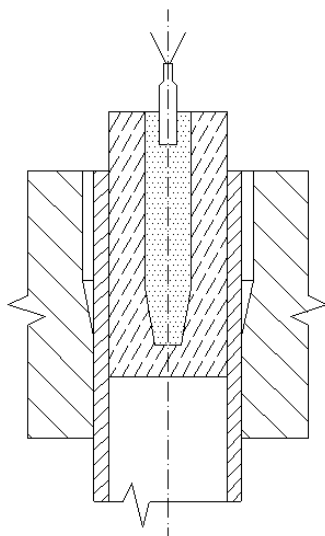
### 3.6.2.3. Explosivní upevňování

Existují dva způsoby explozivního upevnění, které se liší rychlostí nárazu trubky na stěnu trubkovnice:

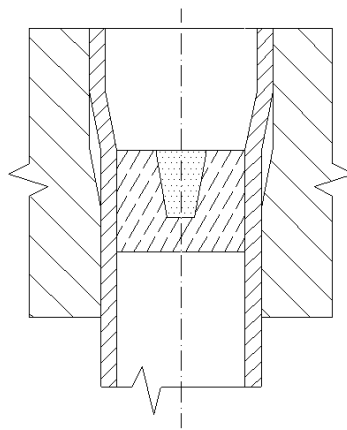
- Explosivní spoj, kdy existuje zřetelná hranice mezi trubkou a trubkovnicí.
- Explosivně zavařený spoj, kdy výbuchem vznikne dokonalý nerozebíratelný spoj.

Nárazová rychlost trubky na stěnu trubkovnice je kolem 100 [m/s] a tlak na stykové ploše 13 [GPa], detonační rychlost výbušniny se pohybuje v rozmezí 155 až 4500 [m/s].

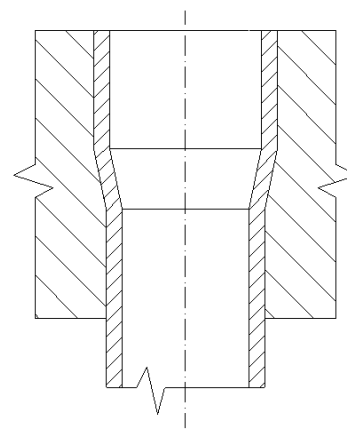
Otvor musí být před tvorbou spoje upraven. Úpravy povrchu trubkovnice a průběh jsou zřetelné z následujících obrázků dle [8]:



Obr. 26: Příprava exploze



Obr. 27: Průběh exploze



Obr. 28: Finální vzhled

### 3.6.3. Používané materiály

Tabulka 5: Vybrané materiály trubkovnic dle [11], [16]

Tabulka Materiál	Označení dle		
	USA	EU	
Hliníkový bronz	ASTM B171	CuAl5As	2.0918
Admiraltní mosaz		CuZn28Sn1As	2.0470
70/30 Měď – nikl		CuNi30Fe2Mn2	2.0883
90/10 Měď – nikl		CuNi10Fe1Mn	2.0872
Křemíkový bronz	ASTM B96	-	-
Titan	ASTM B265	Ti Gr.2	3.7035
Uhlíková ocel	ASTM A283	S235JR	1.0038
	ASTM A285	P265GH	1.0425
	ASTM A516	P355GH	1.0473
Nerezová ocel	ASTM 240	X5CrNi18-10	1.4301
Martenzitická ocel	AISI 316L	X2CrNiMo18-14-3	1.4435
	AISI S31726	X2CrNiMoN17-13-5	1.4439
	AISI N08904	X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539
Feritická ocel	-	X10CrAl7	1.4713
	-	X10CrAl13	1.4724
	AISI 442	X10CrAl18	1.4742
	AISI 446	X10CrAl24	1.4762
Austenitická ocel	AISI 321H	X12CrNiTi18-9	1.4878
	AISI 309	X15CrNiSi20-12	1.4828
	AISI 310S	X12CrNi25-21	1.4845
	AISI 310	X15CrNiSi25-20	1.4841

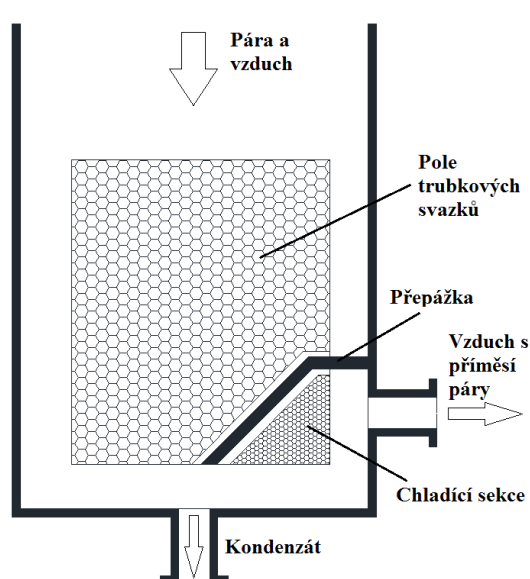
## 3.7. Trubky a trubkové svazky

### 3.7.1. Popis

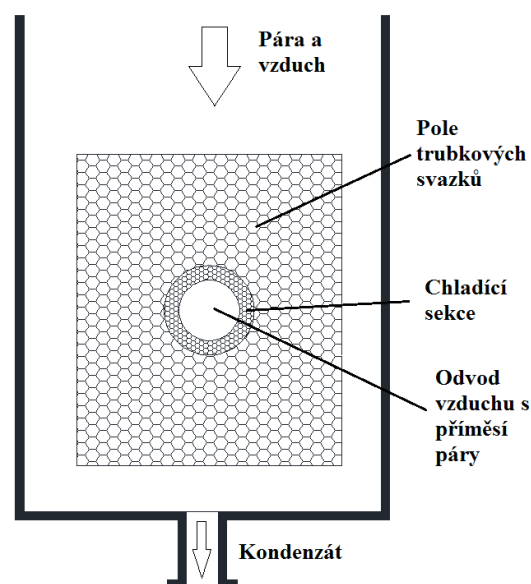
Trubkové svazky se do kondenzátoru umísťují tak, aby se před přicházející párou rozcházely, protože pára má při vstupu do kondenzátoru největší měrný objem a následným průchodem se měrný objem zmenšuje. Dochází tím k menšímu podchlazování kondenzátu. Čím je větší podchlazení kondenzátu, tím má větší tendenci k absorpci kyslíku ze vzduchu, který se dostane do kondenzátoru netěsnostmi. Takto obohacený kondenzát poté zavinuje zvýšenou korozi v následujících zařízeních a snižuje součinitele prostupu tepla.

Dále se vhodným umístěním trubkových svazků zabraňuje vzniku tzv. mrtvých koutů, kde se může hromadit stagnující pára a nekondenzující plyny.

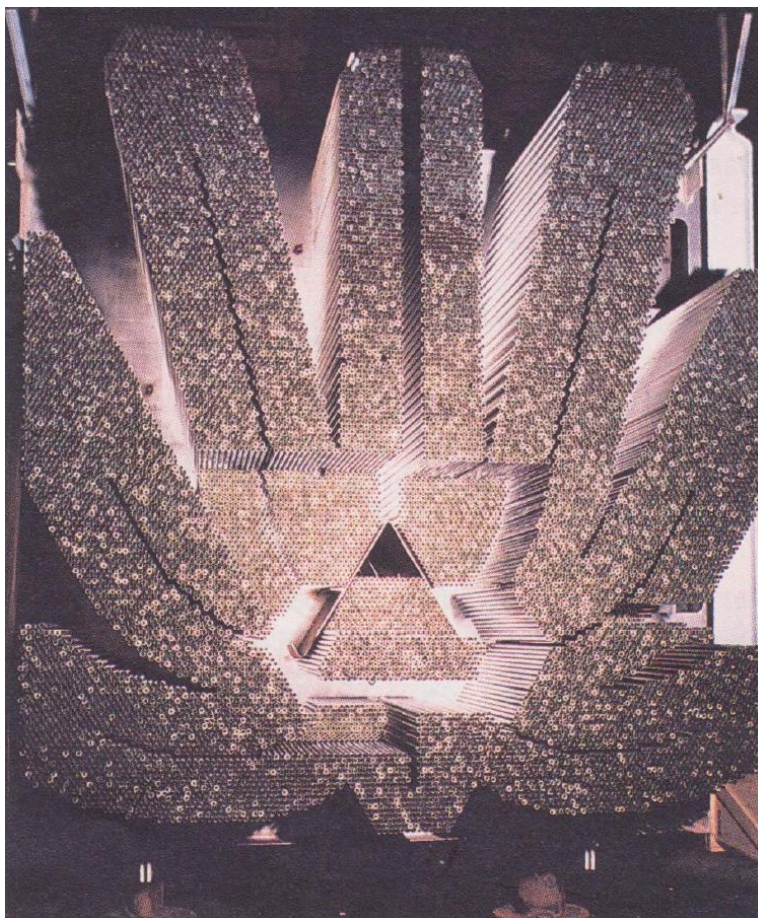
Pro odsávání nekondenzujících plynů (nejčastěji netěsnostmi přisávaného vzduchu) se používá právě vývěvy. Pokud by se tento vzduch neodsával, docházelo by ke zvyšování tlaku v kondenzátoru, což je nežádoucí vzhledem k účinnosti celého cyklu, protože pára začne kondenzovat při vyšší teplotě. Snižuje se tím odevzdaná práce na turbíně a hrozí kondenzace páry ještě v prostoru turbíny. Vzduch je v páře rozptýlen nerovnoměrně a jeho koncentrace bývá největší na konci dráhy, po které proudí pára kondenzuje. Parovzdušná směs se odvádí buď středem (viz obr. 30), nebo častěji na stranách kondenzátoru (viz obr. 29). V tomto místě bývá umístěn chladič, který podchlazuje parovzdušnou směs. Tím, že se podchlazuje, dochází ke zvýšení koncentrace vzduchu, díky čemuž se odsává méně páry z prostoru kondenzátoru. Chladič bývá od zbytku prostoru oddělen plechovými přepážkami a je tvořen trubkovým svazkem, který obsahuje kolem 10 % všech trubek v kondenzátoru. Schematicky znázorněno:



Obr. 29: Boční odvod vzduchu [7]



Obr. 30: Střední odvod vzduchu [7]



Obr. 31: Ukázka trubkového svazku se středním odvodem nekondenzujících plynů [15]

Aby bylo možné vodu z kondenzátoru úplně vypustit, trubky v kondenzátoru podepíráme tak, aby byly mírně prohnuté směrem nahoru. Zmenšují se tím i síly vzniklé vlivem tepelných dilatací trubky.

Pokusy se prokázalo, že tloušťka filmu kondenzátu na povrchu trubek je dána kapilárními silami, a tudíž nezávisí na parním zatížení. Pokud roste množství kondenzující páry, roste i rychlost ve filmu vody a přestup tepla tedy probíhá lépe. Dále bylo prokázáno, že kapky kondenzátu vznikají v celém prostoru kondenzátoru, a ne pouze na trubkách. Povrch trubek bude vždy smáčen.

Je však vhodné zabránit vzniku souvislé vodní clony, která by zabránila přístupu páry k povrchu trubek. Za tímto účelem se používají svazky trubek, které jsou od sebe odděleny mezerou a vloženou stříškou, jež zabraňuje skapávání kondenzátu na další svazek, a tím zamezuje vzniku nechtěné vodní clony.

Kapitola byla zpracována dle [1], [4], [9].

### 3.7.2. Rozložení trubkového svazku

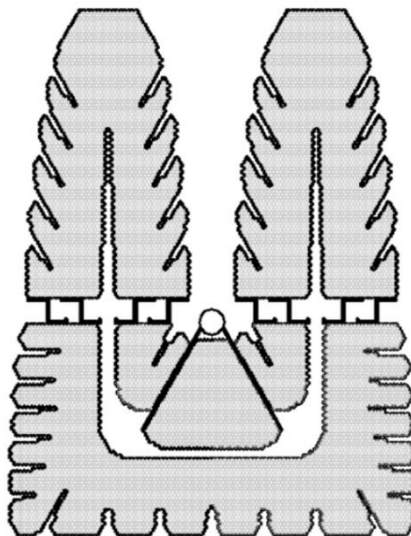
Nejnáročnější disciplínou při konstrukci povrchového kondenzátoru je navrhnout tvar trubkového svazku. Při tomto návrhu se bere ohled hlavně na proudění, pole rychlosti proudící páry a vzduchu, koncentraci vzduchu v páře a v neposlední řadě na koeficient prostupu tepla.

Výrobci kondenzátorů většinou navrhují kondenzátor podle předešlých zařízení nebo podle experimentů. Často se při nových návrzích opírají o standardy Heat exchange institute (HEI standards). Nicméně tyto standardy zanedbávají několik faktorů, které ovlivňují tepelný výkon, a to včetně rozmístění trubkových svazků. Vylepšené počítačové a

numerické simulace umožňují řešit tok kapalin a tepelný tok ve svazcích a zahrnout tedy i tvar trubkového svazku [9].

Pro výpočet rozložení trubkových svazků je možné využít numerických metod a následných přibližných simulací proudění. Výsledky z [9] jsou zde uvedeny jako příklad navrhování trubkových svazků. V praxi má většinou každá firma své chráněné know-how postupu navrhování kondenzátoru.

Inženýrská praxe ukázala, že dobrý návrh vede k vysokým a rovnoměrným koeficientům prostupu tepla, zabraňuje hromadění vzduchu v nevhodných místech a zabraňuje páře dostat se přímo k vychlazovací části, aniž by prošla kondenzační oblastí.



Obr. 32: Tvar trubkového svazku [9]

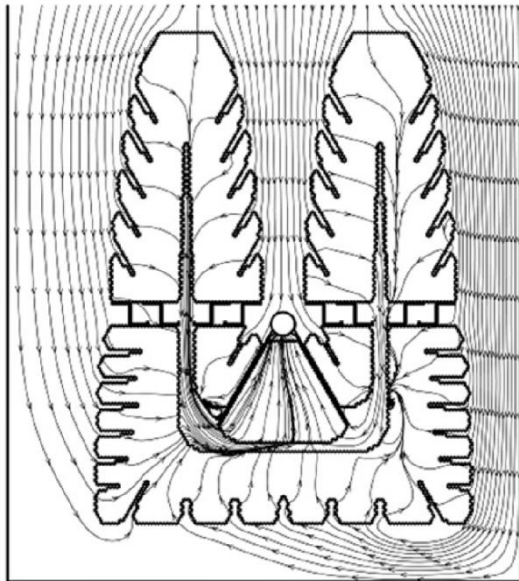
Tvar tohoto trubkového svazku byl navrhován pro jednotku o výkonu 300 MW. Obr. 32 ukazuje pouze polovinu, protože kondenzátor je symetrický podle střední (vertikální) roviny.

Pro ušetření času byl volen 2D model. Trubky byly nahrazeny porézním médiem a vícefázový a vícesložkový tok v mezitrubkovém prostoru byl zjednodušen na jednofázový tok směsi páry a vzduchu. Při výpočtu bylo využito symetrie a byla modelována pouze levá polovina kondenzátoru. Trubkové pole nahrazené pórovitým médiem využívá izotropní pórovitost  $\beta$ , která je definována jako poměr objemu zabraného kapalinou k celkovému objemu. Dle [9]

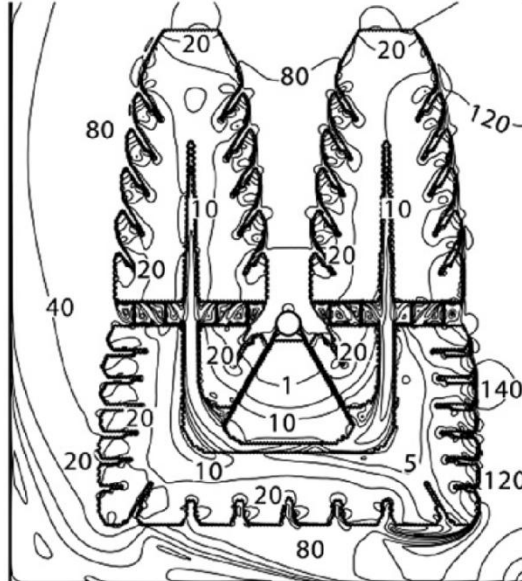
$$\beta = 1 - \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \left( \frac{d_e}{P_t} \right)^2 \quad (3.1)$$

$P_t$  ..... Rozteč trubek

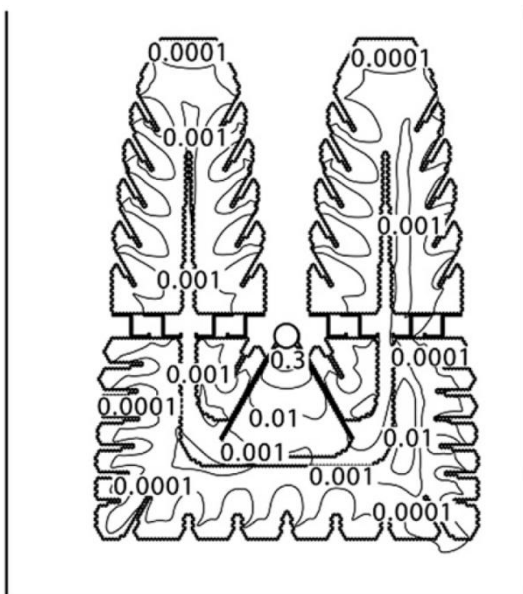
Simulace ukázala, že stromečkový tvar se sekundárními kuželovými kanály zlepšuje rovnoměrnost proudění uvnitř trubkového svazku. Trubky jsou sestaveny pouze do jednoho trubkového svazku, aby se zabránilo narušování způsobenému více svazky.



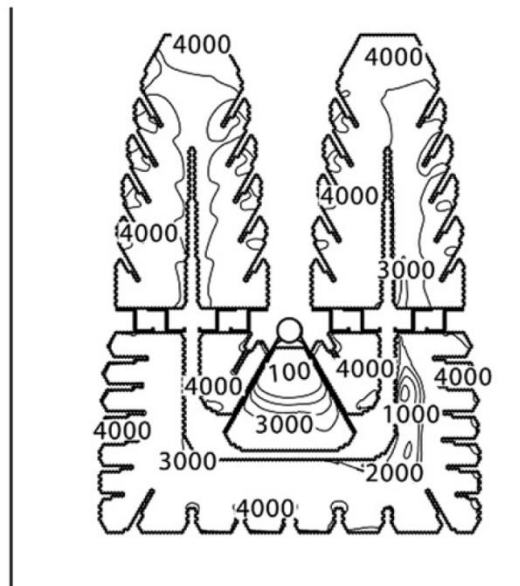
Obr. 33: Proudnice [9]



Obr. 34: Rychlostní pole [ $\text{m s}^{-1}$ ] [9]



Obr. 35: Rozložení podílu vzduchu [9]



Obr. 36: Rozložení koeficientu prostupu tepla [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ] [9]

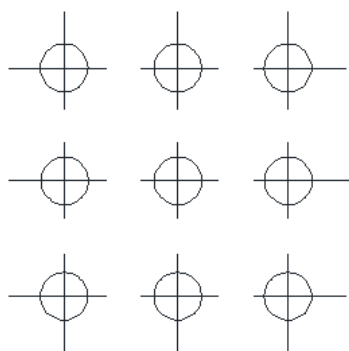
Rozložení rychlosti je podle obr. 34 soustředěno kolem odsávání vzduchu, což naznačuje, že kondenzace v trubkovém svazku je poměrně rovnoměrná.

Z obr. 35 je zřejmé, že koncentrace vzduchu v páře stoupá směrem k odsávání a v ostatních částech je poměrně malá, kromě místa v pravé spodní části, kde je koncentrace 0,01. I když je tato hodnota vyšší než v ostatních místech trubkového svazku, stále je dosti malá na to, aby významně ovlivňovala proces kondenzace.

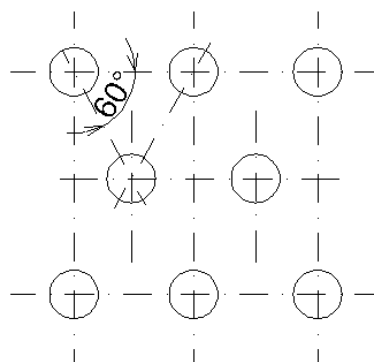
Podle tohoto modelu je dosaženo průměrné hodnoty prostupu tepla  $3709 [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$  a dosažený tlak je  $4,68 \text{ kPa}$ . [9]

### 3.7.3. Uspořádání trubek

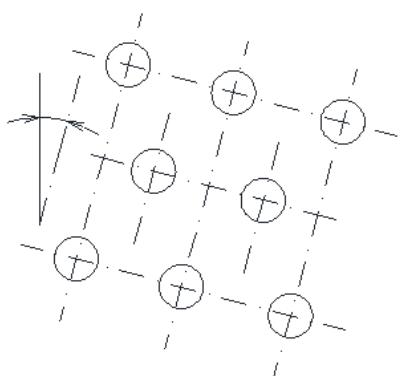
Trubky se uspořádávají ve svazcích podle různých schémat:



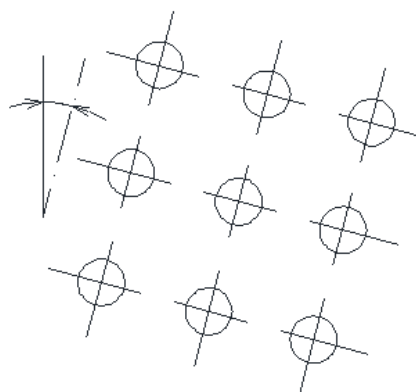
Obr. 37: Chodbovitě uspořádání



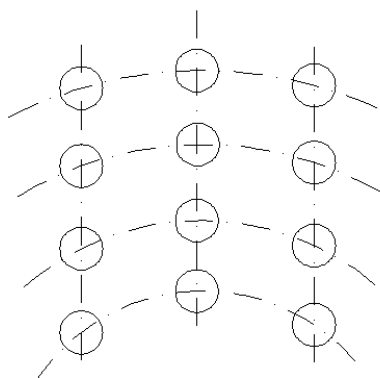
Obr. 38: Šachovité uspořádání (do trojúhelníku)



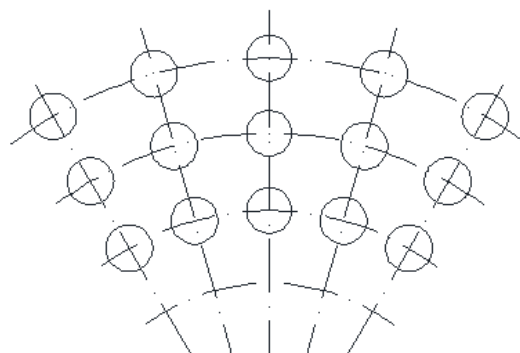
Obr. 39: Rombické pootočené uspořádání



Obr. 40: Chodbovitě pootočené uspořádání



Obr. 41: Vějířovité radiální uspořádání



Obr. 42: Vějířovité chodbové uspořádání

Jak na trubky uvnitř svazku stéká kondenzát z trubek nad nimi, dochází ke zvětšování tloušťky blány, což má za následek zmenšení součinitele  $\alpha_p$ . Přestože kondenzát z trubky stéká po kapkách, nemá tento děj větší vliv na přenos tepla po celé délce trubky, neboť je kapek velké množství. Tečení tedy zůstává v průměru symetrické.

### 3.7.4. Materiály trubek

#### 3.7.4.1. Austenitické oceli

##### X5CrNi18-10 (1.4301) • ASTM A213 TP304

Jedna z nejpobulárnějších nerezových ocelí. Má dobrou tváritelnost za studena, odolnost proti korozi, houževnatost a dobré mechanické vlastnosti. Je dobré používat v neznečištěných, neagresivních prostředích. [17]

Tabulka 6: Složení 1.4301 [17]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Jiné
1.4301	0,07	1,00	2,00	0,04	0,015	17-19,5	8-10,5	N≤0,11
TP304	0,08	1,00	2,00	0,045	0,03	18-20	8-11	-

Tabulka 7: Mechanické vlastnosti 1.4301 [17]

	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rp <sub>1,0</sub> [Mpa]	Rm [MPa]	A [min%]	HRB	TZ
1.4301	195	230	500-700	40	-	Rozpouštěcí žihání
TP304	205	-	515	35	90	Rozpouštěcí žihání

##### X5CrNiMo17-12-2 (1.4401) • ASTM A213 TP316

Po oceli 1.4301 jsou tyto další nejrozšířenější austenitické oceli. Vyznačují se dobrou odolností proti oxidaci za vysokých teplot (až do 900 °C). Na rozdíl od 1.4301 mají lepší odolnost ve znečištěných průmyslových prostředích. [17]

Tabulka 8: Složení 1.4401 [17]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Jiné
1.4401	0,07	1,00	2,00	0,04	0,015	16,5-18,5	10-13	2-2,5	N≤0,11
TP316	0,08	1,00	2,00	0,045	0,03	16-18	10-14	2-3	-

Tabulka 9: Mechanické vlastnosti 1.4401 [17]

	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rp <sub>1,0</sub> [Mpa]	Rm [MPa]	A [min%]	HRB	TZ
1.4401	205	240	510-710	40	-	Rozpouštěcí žihání
TP316	205	-	515	35	90	Rozpouštěcí žihání

##### X6CrNiTi18-10 (1.4541) • ASTM A213 TP321

Vysoko uhlíková austenitická ocel je náchylnější k mezikrystalovému napadání ve svarové zóně. Tomu se zabráňuje stabilizací titanem. Korozní chování je obdobné jako u 1.4301. Má dobré vlastnosti v nízko chloridovém prostředí. Avšak v mořské vodě je náchylná k pittingu nebo stěrbinové (místní) korozi. [17]

Tabulka 10: Složení 1.4541 [17]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti
1.4541	0,08	1,00	2,00	0,04	0,015	17-19	9-12	4-5	5x%C max0,7
TP321	0,08	1,00	2,00	0,045	0,03	17-19	9-12	4-5	5x%(C+N) max0,7

Tabulka 11: Mechanické vlastnosti 1.4541 [17]

	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rp <sub>1,0</sub> [Mpa]	Rm [MPa]	A [min%]	HRB	TZ
1.4539	200	235	500-730	35	-	Rozpouštěcí žíhání
UNS N08904	205	-	515	35	90	Rozpouštěcí žíhání

### 3.7.4.2. Super-austenitické oceli

#### X1NiCrMoCu25-20-5 (1.4539) • ASTM A269 UNS N08904 (TP904L)

Vysoko legovaná austenitická ocel je velmi odolná vůči napadání zředěnou kyselinou sírovou, kyselinou fosforečnou a kyselinou octovou. V neutrálním roztoku chloridů odolává pittingu. Odolnost proti koroznímu praskání pod napětím je v některých horkých chloridech lepší než u níže legovaných niklových austenitických ocelí. Tato ocel má dobrou tvářitelnost a svařitelnost. [17]

Tabulka 12: Složení 1.4539 [17]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Jiné
1.4539	0,02	0,7	2,00	0,03	0,01	19-21	24-26	4-5	Cu <sub>1,2-2</sub> N <sub>≤0,15</sub>
UNS N08904	0,02	1,00	2,00	0,04	0,03	19-23	23-28	4-5	Cu <sub>1-2</sub> N <sub>≤0,1</sub>

Tabulka 13: Mechanické vlastnosti 1.4539 [17]

	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rp <sub>1,0</sub> [Mpa]	Rm [MPa]	A [min%]	HRB	TZ
1.4539	230	250	520-720	40	-	Rozpouštěcí žíhání
UNS N08904	220	-	490	35	90	Rozpouštěcí žíhání

### 3.7.4.3. Feritické a martenzitické oceli

#### X6CrAl13 (1.4002) • ASTM A268 TP405

Nízko uhlíková chromovaná ocel. Chlazením z vysoké teploty dojde ke zpevnění materiálu. Tato tendence zabraňuje vzniku trhlin způsobených svařováním. Může být obráběna, tažena nebo tvarována bez problémů. Má výbornou stabilitu až do 650 °C. [17]

Tabulka 14: Složení 1.4002 [17]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Jiné
1.4002	0,08	1,00	1,00	0,045	0,03	12-14	-	Al 0,1-0,3
TP405	0,08	1,00	1,00	0,04	0,03	11,5-14,5	0,5	Al 0,1-0,3

Tabulka 15: Mechanické vlastnosti 1.4002 [17]

	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [Mpa]	A [min%]	HRB	TZ
1.4002	250	400-600	20	-	žihání
TP405	205	415	20	90	žihání

### X12Cr13 (1.4006) • ASTM A268 TP410

Tato ocel je martenzitická, vysoce vytvrditelná. Po vytvrzení je nutné ocel temperovat na dostatečné teplotě, aby se zlepšily vlastnosti. Tato ocel má omezenou svařitelnost. Není moc odolná v prostředí okysličené mořské vody. Tato ocel nemá stejné protikorozní vlastnosti jako austenitické oceli, ale je dostatečně odolná při mírnějších koncentracích kyselin, alkaloidů, sladké vody a v atmosférických podmínkách. [17]

Tabulka 16: Složení 1.4006 [17]

	C	Si	Mn	P	S	Cr
1.4006	0,08-0,12	1,00	1,00	0,045	0,03	12-14
TP410	0,15	1,00	1,00	0,04	0,03	11,5-13,5

Tabulka 17: Mechanické vlastnosti 1.4006 [17]

	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [Mpa]	A [min%]	HRB	TZ
1.4006	250	450-650	20	-	žihání
TP410	215	415	20	90	žihání

### X6Cr17 (1.4016) • ASTM A268 TP430

Tato nerezová ocel kombinuje dobrou korozní odolnost s dobrou tvářitelností a kujností. Je to feritická nerezová ocel, nevytvrditelná, legovaná pouze chromem. Má dobrou odolnost proti nitridům. [17]

Tabulka 18: Složení 1.4016 [17]

	C	Si	Mn	P	S	Cr
1.4016	0,08	1,00	1,00	0,04	0,03	16-18
TP430	0,12	1,00	1,00	0,04	0,03	16-18

Tabulka 19: Mechanické vlastnosti 1.4016 [17]

	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [Mpa]	A [min%]	HRB
1.4016	240	400-630	20	-
TP430	205	450	20	90

### 3.7.4.4. Titanové materiály

#### Ti1 (3.7025) • ASTM B338 Grade 1

Tabulka 20: Složení 3.7025 [17]

	N	C	H	Fe	O	Ti
3.7025	0,05	0,06	0,013	0,15	0,12	Zbytek
B338 Gr. 1	0,03	0,08	0,015	0,2	0,18	Zbytek

Tabulka 21: Mechanické vlastnosti 3.7025 [17]

	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rp <sub>1,0</sub> [Mpa]	Rm [MPa]	A [min%]	TZ
3.7025	180	200	290-410	30	Měkké žhání
B338 Gr. 1	138-310	-	240	24	Žhání

#### Ti2 (3.7035) • ASTM B338 Grade 2

Tabulka 22: Složení 3.7035 [17]

	N	C	H	Fe	O	Ti
3.7035	0,05	0,06	0,013	0,20	0,18	Zbytek
B338 Gr. 2	0,03	0,08	0,015	0,30	0,25	Zbytek

Tabulka 23: Mechanické vlastnosti 3.7035 [17]

	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rp <sub>1,0</sub> [Mpa]	Rm [MPa]	A [min%]	TZ
3.7035	250	270	390-540	22	Měkké žhání
B338 Gr. 2	275-450	-	345	20	Žhání

### 3.7.4.5. Slitiny mědi

#### CuZn28Sn1 (2.0470)

Ekvivalentem dle USA norem je ASTM B111 C44300 [11]

Tabulka 24: Složení 2.0470 [12]

	Al	As	Cu	Fe	Mn	Ni	P	Pb	Sn	Jiné	Zn
2.0470	1,8-2,3	0,02-0,035	70-72,5	0,07	0,1	0,1	0,01	0,07	0,9-1,3	0,1	Zbytek

Tabulka 25: Mechanické vlastnosti 2.0470 [12]

	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [Mpa]	A [min%]
2.0470	100	320	40

### CuZn20Al2 (2.0460)

Ekvivalentem dle USA norem je ASTM B111 C68700 [11]

Tabulka 26: Složení 2.0460 [12]

	Al	As	Cu	Fe	Mn	Ni	P	Pb	Sn	Jiné	Zn
2.0460	1,8-2,3	0,02-0,035	70-72,5	0,07	0,1	0,1	0,01	0,07	0,9-1,3	0,1	Zbytek

Tabulka 27: Mechanické vlastnosti 2.0460 [12]

	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [Mpa]	A [min%]
2.0460	120-170	340	40

### CuNi10Fe (2.0872)

Ekvivalentem dle USA norem je ASTM B111 C70600 [11]

Tabulka 28: Složení 2.0872 [12]

	C	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	S	Zn	Jiné
2.0872	0,05	Zbytek	1-1,8	0,5-1	9-11	0,03	0,05	0,5	0,1

Tabulka 29: Mechanické vlastnosti 2.0872 [12]

	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [Mpa]	A [min%]
2.0872	90-180	290	30

### CuNi30Fe (2.0882)

Ekvivalentem dle USA norem je ASTM B111 C71500 [11]

Tabulka 30: Složení 2.0882 [12]

	C	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	S	Zn	Jiné
2.0882	0,06	Zbytek	0,4-1	0,5-1,5	30-32	0,03	0,05	0,5	0,1

Tabulka 31: Mechanické vlastnosti 2.0882 [12]

	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [Mpa]	A [min%]
2.0882	120-220	370	30

## CuAl5As (2.0918; CW300G)

Ekvivalentem dle USA norem je ASTM B111 C60800 [11]

Tabulka 32: Složení 2.0918 [12]

	Al	As	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Jiné	Zn
2.0918	4-6	0,2	Zbytek	0,2	0,2	0,2	0,02	0,1	0,3

Tabulka 33: Mechanické vlastnosti 2.0918 [12]

	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [Mpa]	A [min%]
2.0918	110-220	350	45

## 3.8. Mechanizmy koroze

### 3.8.1. Elektrolytická koroze

Tento druh koroze se nejčastěji může objevovat v kondenzátorech, kde se jako chladicí médium používá slaná mořská voda. Při špatné volbě materiálů, tj. pokud mají materiály vůči sobě vysoký potenciál (podle [15] přes 300 mV), může dojít k tomuto typu napadení.

### 3.8.2. Korozní praskání pod napětím

Tato koroze může vznikat vlivem vnitřního napětí v materiálu, z tepelných úprav nebo ze svarových spojů. Na mikrotrhlíně v materiálu dochází ke koncentraci napětí, ze kterého se např. vnitřním napětím rozroste hlubší a delší trhlinka. [6]

### 3.8.3. Koroze z usazenin

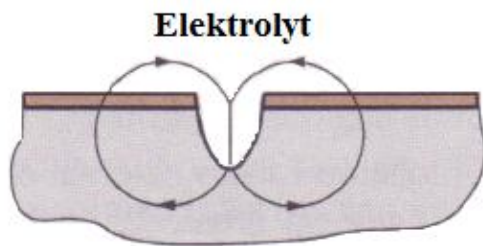
Vlivem používání „méně čisté“ vody na straně chladicí smyčky může dojít k tvorbě nánosů na vnitřní straně trubky. Minerální látky obsažené v usazenině mohou způsobovat korozivní napadení stěny trubky.

### 3.8.4. Erozní koroze

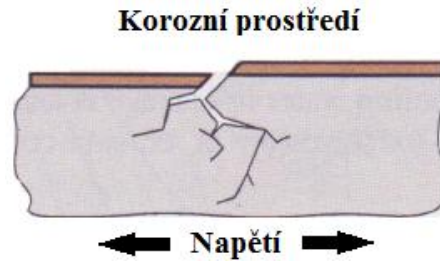
K tomuto druhu koroze dochází v médiu, které má vyšší abrazivní, adhezivní, erozní nebo kavitační vlastnosti. Těmito druhy mechanického působení může dojít k rozrušení ochranné pasivní vrstvy a vlivem okolního prostředí nebo minerálních látek může dojít ke koroznímu napadení základního materiálu. [6]

### 3.8.5. Korozní únava

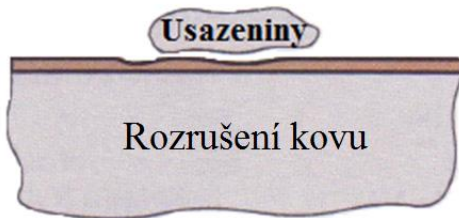
Pokud je materiál cyklicky mechanicky namáhán (tahovou složkou) v korozním prostředí neexistuje jeho mez únavy. Ke korozní únavě stačí frekvence cyklu  $10^{-6}$  Hz (cca 1x týdně). Lom se šíří z místních nehomogenit povrchu (podobně jako u korozního praskání pod napětím) a je pokryt korozními produkty. [6]



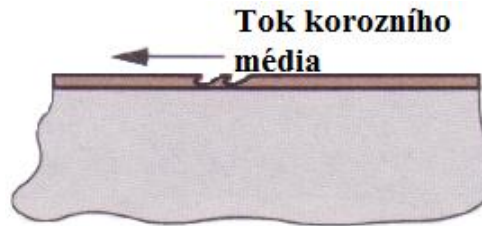
Obr. 43: Elektrolytická koroze [15]



Obr. 44: Korozní praskání pod napětím [15]



Obr. 45: Koroze z usazenin [15]



Obr. 46: Erozní koroze [15]



Obr. 47: Korozní únava [15]

### 3.9. Zanášení

K zanášení dochází usazováním různých solí, korozních produktů nebo jiných mechanických nečistot v médiu na stěnách trubek. Nános snižuje průtočný průřez, čímž se zvyšuje rychlost toku chladicího média, to má za následek vyšší abrazi a tlakovou ztrátu. Dále usazeniny zhoršují součinitel prostupu tepla.

## 4. VÝPOČET KONDENZÁTORU

Celý výpočet byl proveden v matematickém programu Maple. Výpočty jsou přiloženy v příloze ve formátu pdf.

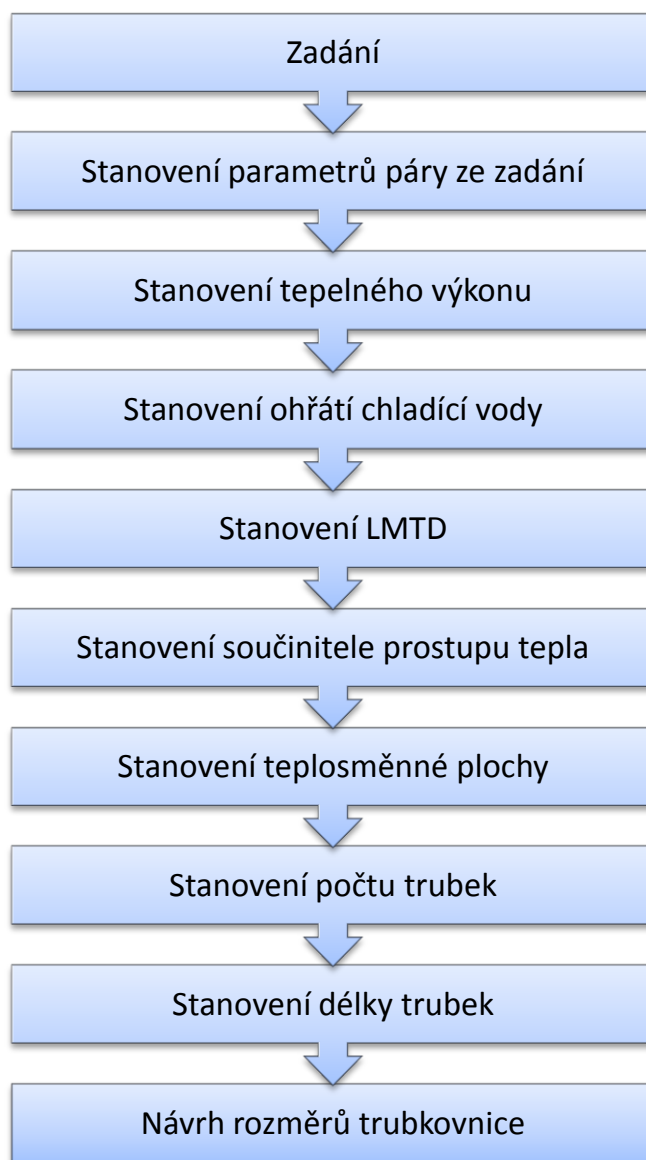
Příloha 1 ukazuje, jak byl proveden výpočet metodou HEI.

Příloha 2 ukazuje, jak byl proveden výpočet metodou VTI-CKTI.

Pro oba výpočty jsou dopočteny všechny parametry pouze v přílohách.

Příloha 3 ukazuje přepočet při naddimenzování teplosměnné plochy a je zde navíc výpočet zmenšení součinitele prostupu tepla oproti ostatním metodám. Výpočet od kapitoly 4.11 je právě podle této přílohy.

### 4.1. Algoritmus výpočtu



Obr. 48: Algoritmus výpočtu

## 4.2. Zadání

Proveďte zjednodušený termodynamický výpočet kondenzátoru pro tyto parametry:

$$p_k = 7,53[kPa]$$

$$i_p = 2224,4[kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$m_p = 151,1[t \cdot h^{-1}] \rightarrow 41,972[kg \cdot s^{-1}]$$

$$m_v = 7020[t \cdot h^{-1}] \rightarrow 1950[kg \cdot s^{-1}]$$

$$t_{v1} = 27[^\circ C]$$

## 4.3. Stanovení parametrů páry a kondenzátu

Hodnoty byly zjištěny pomocí programu Xsteam.

Parametry kondenzátu na mezi sytosti:

$$i_k = 169,04[kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$t_k = 40,36[^\circ C]$$

$$v_k = 0,001008[m^3 \cdot kg^{-1}]$$

Parametry páry na mezi sytosti:

$$i_{sp} = 2574,19[kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$v_{sp} = 19,161458[m^3 \cdot kg^{-1}]$$

Parametry chladicí vody:

$$c_{pv} = 4,180[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$\rho = 996,606[kg \cdot m^{-3}]$$

## 4.4. Určení měrného objemu páry

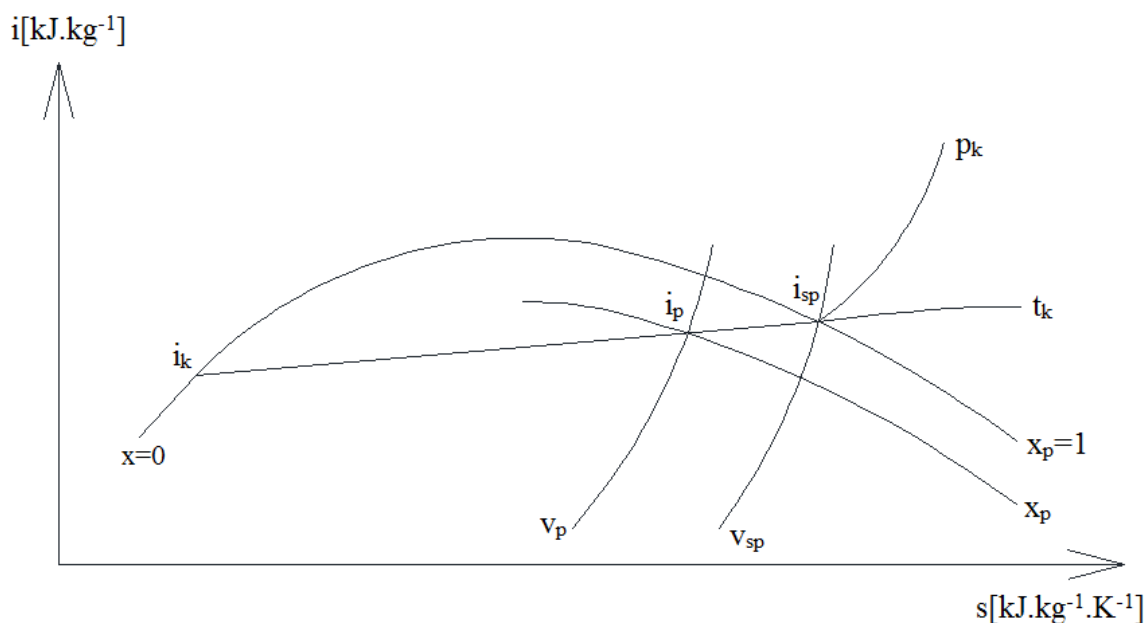
Suchost páry:

$$x_p = \frac{i_p - i_k}{i_{sp} - i_k} = \frac{2224,4[kJ \cdot kg^{-1}] - 169,04[kJ \cdot kg^{-1}]}{2574,19[kJ \cdot kg^{-1}] - 169,04[kJ \cdot kg^{-1}]} = 0,8546[-] = 85,46 \% \quad (4.1)$$

$$v_p = x \cdot (v_{sp} - v_k) + v_k \quad (4.2)$$

$$v_p = 0,8546 \cdot (19,161458[m^3 \cdot kg^{-1}] - 0,001008[m^3 \cdot kg^{-1}]) + 0,001008[m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4.3)$$

$$v_p = 16,374882[m^3 \cdot kg^{-1}]$$



Obr. 49: Stav páry

## 4.5. Rovnice tepelné rovnováhy

Vychází ze zákona zachování energie.

$$\dot{Q} = \dot{m}_p \cdot (i_p - i_k) \quad (4.4)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_v \cdot c_{pv} \cdot (t_{v2} - t_{v1}) \quad (4.5)$$

$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot t_s \quad (4.6)$$

## 4.6. Tepelný výkon

Tepelný výkon je roven součinu hmotnostního toku páry a příslušného rozdílu entalpií.

$$\dot{Q} = \dot{m}_p \cdot (i_p - i_k) = 41,972 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \cdot (2224,4 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] - 169,04 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]) \quad (4.7)$$

$$\dot{Q} = 86268,026 \text{ [kW]} = 86,27 \text{ [MW]}$$

## 4.7. Poměrný průtok chladicí vody

Vyjadřuje poměr mezi tokem chladicí vody a páry

$$\bar{m} = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_p} \quad (4.8)$$

$$\bar{m} = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_p} = \frac{1950 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}]}{41,972 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}]} = 46,4593 \text{ [-]} \quad (4.9)$$

## 4.8. Ohřátí chladicí vody

Ohřátí chladicí vody lze stanovit na základě zákona zachování energie. Teplem uvolňovaným při kondenzaci páry se ohřeje chladicí voda z  $t_{v1}$  na výstupní teplotu  $t_{v2}$ :

$$\dot{m}_p \cdot (i_p - i_k) = \dot{m}_v \cdot c_{pv} \cdot \Delta t_v \quad (4.10)$$

Z toho  $\Delta t_v$  je:

$$\Delta t_v = \frac{\dot{m}_p \cdot (i_p - i_k)}{\dot{m}_v \cdot c_{pv}} = \frac{41,972 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \cdot (2224,4 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] - 169,04 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}])}{1950 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \cdot 4,180 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]} \quad (4.11)$$

$$\Delta t_v = 10,58 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

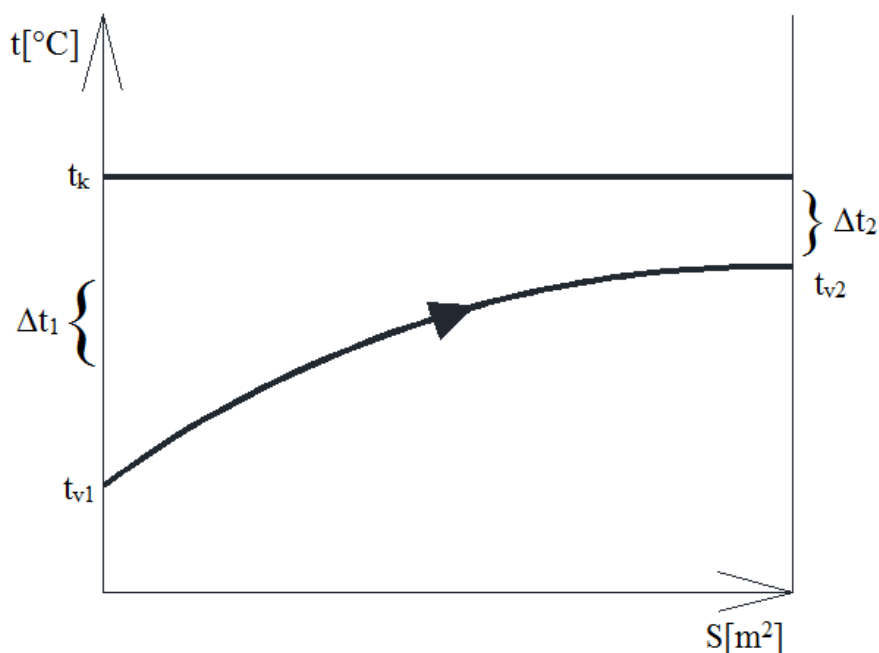
Teplota vystupující chladicí vody se vypočte následovně:

$$t_{v2} = t_{v1} + \Delta t_v = 27 \text{ [}^\circ\text{C]} + 10,58 \text{ [}^\circ\text{C]} = 37,58 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.12)$$

Chladicí voda se v kondenzátoru ohřeje o  $\Delta t_v = 10,58 \text{ [}^\circ\text{C]}$  na výstupní teplotu  $t_{v2} = 37,58 \text{ [}^\circ\text{C]}$

## 4.9. Střední logaritmický teplotní spád

Tento výpočet je přesnější oproti výpočtu pomocí aritmetického průměru.



Obr. 50: Ohřátí chladicí vody

$$t_s = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (4.13)$$

$$\Delta t_1 = t_k - t_{v1} = 40,36 \text{ [}^\circ\text{C]} - 27 \text{ [}^\circ\text{C]} = 13,36 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.14)$$

$$\Delta t_2 = t_k - t_{v2} = 40,36 \text{ [}^\circ\text{C]} - 37,58 \text{ [}^\circ\text{C]} = 2,78 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.15)$$

Následně se stanoví střední logaritmický teplotní spád:

$$t_s = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{13,36[^\circ\text{C}] - 2,78[^\circ\text{C}]}{\ln \frac{13,36[^\circ\text{C}]}{2,78[^\circ\text{C}]}} = 6,7362[^\circ\text{C}] \quad (4.16)$$

## 4.10. Výpočet součinitele prostupu tepla

Výpočet bude proveden pomocí metod HEI a VTI-CKTI.

Pro výpočet byly zvoleny trubky s vnějším průměrem  $d_e = 25$  [mm] a tloušťkou stěny  $s = 1,2$  [mm], střední rychlost byla zvolena  $w_s = 1,8$  [ $\text{ms}^{-1}$ ].

$$d_i = d_e - 2 \cdot s = 25[\text{mm}] - 2 \cdot 1,2[\text{mm}] = 22,6[\text{mm}] \quad (4.17)$$

Kondenzátor bude mít dva moduly a bude dvoutahový.

$$nmo = 2 [-]$$

$$z = 2 [-]$$

### 4.10.1. Výpočet součinitele prostupu tepla pomocí HEI

Nekorigovaný součinitel prostupu tepla z tabulky 1  $k_0 = 3,66$  [ $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ].

Materiálový součinitel pro 2.0883 je z tabulky 2  $F_M = 0,876$

Korekční součinitel teploty chladicí vody  $F_W$ :

$$F_W = 1,051 \cdot 10^{-2} \cdot t_{v1} - 1,506 \cdot 10^{-3} \cdot \left( |21,5 - t_{v1}| \right)^{1,39} + 0,7765 \quad (4.18)$$

$$F_W = 1,051 \cdot 10^{-2} \cdot 27[^\circ\text{C}] - 1,506 \cdot 10^{-3} \cdot \left( |21,5 - 27[^\circ\text{C}]| \right)^{1,39} + 0,7765 \quad (4.19)$$

$$F_W = 1,0442$$

Součinitel čistoty trubek  $F_C = 0,85$

$$k_{HEI} = k_0 \cdot F_M \cdot F_W \cdot F_C \quad (4.20)$$

$$k_{HEI} = 3,66 \left[ \text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \right] \cdot 0,876 \cdot 1,0442 \cdot 0,85 = 2,8456 \left[ \text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \right] \quad (4.21)$$

### 4.10.2. Výpočet součinitele prostupu tepla pomocí VTI - CKTI

Vliv znečištění potrubí  $a = 0,7$

$$x = 0,12 \cdot a \cdot (1 + 0,15 \cdot t_{v1}) = 0,12 \cdot 0,7 \cdot (1 + 0,15 \cdot 27[^\circ\text{C}]) = 0,4242[-] \quad (4.22)$$

$$\beta_t = 1 - \frac{0,44 \cdot \sqrt{a}}{1000} \cdot (35 - t_{v1}) = 1 - \frac{0,44 \cdot \sqrt{0,7}}{1000} \cdot (35 - 27[^\circ\text{C}]) = 0,997055[-] \quad (4.23)$$

$$\beta_z = 1 + \frac{z-2}{10} \cdot \left( 1 - \frac{t_{v1}}{35} \right) = 1 + \frac{2[-]-2}{10} \cdot \left( 1 - \frac{27[^\circ\text{C}]}{35} \right) = 1[-] \quad (4.24)$$

Jmenovité měrné parní zatížení bylo zvoleno  $d_j = 180$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ] a měrné parní zatížení  $d = 32$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ].

$$d_m = (0,9 - 0,012 \cdot t_{v1}) \cdot d_j = (0,9 - 0,012 \cdot 27 [^{\circ}\text{C}]) \cdot 180 [kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}]$$

$$d_m = 103,68 [kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}] \quad (4.25)$$

$d$  je menší než  $d_m$  proto se bude  $\beta_d$  počítat pomocí vztahu (3.27).

$$\delta = \frac{d}{d_m} = \frac{32 [kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}]}{103,68 [kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}]} = 0,30864 [-] \quad (4.26)$$

$$\beta_d = \delta \cdot (2 - \delta) = 0,30864 [-] \cdot (2 - 0,30864 [-]) = 0,522 [-] \quad (4.27)$$

Ze zvolených a vypočtených hodnot je již možné vypočítat součinitel prostupu tepla

$$k_{VTI-CKTI} = 3,96 \cdot a \cdot \left( \frac{1,1 \cdot w_s}{\sqrt[4]{d_i}} \right)^x \cdot \beta_t \cdot \beta_z \cdot \beta_d = 3,96 \cdot 0,7 \cdot \left( \frac{1,1 \cdot 1,8 [m \cdot s^{-1}]}{\sqrt[4]{0,0226 [m]}} \right)^{0,4242} \cdot 0,997055 \cdot 1 \cdot 0,522 \quad (4.28)$$

$$k_{VTI-CKTI} = 2,881 [kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

## 4.11. Velikost teplosměnné plochy

Výpočet bude proveden pro oba součinitele prostupu tepla.

$$S_{HEI} = \frac{\dot{Q}}{k_{HEI} \cdot t_s} = \frac{86268,026 [kW]}{2,8453 [kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \cdot 6,7362 [^{\circ}\text{C}]} = 4500 [m^2] \quad (4.29)$$

$$S_{VTI-CKTI} = \frac{\dot{Q}}{k_{VTI-CKTI} \cdot t_s} = \frac{86268,026 [kW]}{2,881 [kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \cdot 6,7362 [^{\circ}\text{C}]} = 4445 [m^2] \quad (4.30)$$

Výsledná teplosměnná plocha vyšla v obou případech podobně. Vzhledem k určitému naddimenzování volím teplosměnnou plochu  $S = 4600 [m^2]$ .

Potom bude součinitel prostupu tepla podle předchozího výpočtu:

$$k = \frac{\dot{Q}}{S \cdot t_s} = \frac{86268,026 [kW]}{4600 [m^2] \cdot 6,7362 [^{\circ}\text{C}]} = 2,784 [kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (4.31)$$

Zmenšení  $k$  je oproti metodě HEI:

$$B_{HEI} = \left( \frac{k_{HEI}}{k} - 1 \right) \cdot 100 = \left( \frac{2,8453 [kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]}{2,784 [kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]} - 1 \right) \cdot 100 = 2,212 \% \quad (4.32)$$

Zmenšení  $k$  je oproti metodě VTI-CKTI:

$$B_{VTI-CKTI} = \left( \frac{k_{VTI-CKTI}}{k} - 1 \right) \cdot 100 = \left( \frac{2,881 [kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]}{2,784 [kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]} - 1 \right) \cdot 100 = 3,483 \% \quad (4.33)$$

## 4.12. Počet trubek na jeden modul

Jak již bylo zmíněno výše, kondenzátor se skládá ze dvou modulů =>  $nmo = 2$  a je dvoutahový =>  $z = 2$ .

Trubky jsou  $\varnothing 25 \times 1,2$  [mm].

$$n_i = \frac{\frac{\dot{m}_v}{nmo}}{\rho \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \cdot w_s} \cdot z = \frac{\frac{1950 [kg \cdot s^{-1}]}{2 [-]}}{996,606 [kg \cdot m^{-3}] \cdot \frac{\pi \cdot (0,0226 [m])^2}{4} \cdot 1,8 [m \cdot s^{-1}]} \cdot 2 [-] \quad (4.34)$$

$$n_i = 2709,77 [ks] \doteq 2710 [ks]$$

## 4.13. Celkový počet trubek

Protože se kondenzátor skládá ze dvou modulů, je celkový počet trubek roven dvojnásobku počtu trubek jednoho modulu

$$n = nmo \cdot n_i \quad (4.35)$$

$$n = nmo \cdot n_i = 2 [-] \cdot 2710 [ks] = 5420 [ks] \quad (4.36)$$

## 4.14. Činná délka trubek

Činná délka trubek vyplývá z velikosti teplosměnné plochy, na které dochází ke kondenzaci vodní páry, která se mění na kondenzát.

$$L_i = \frac{S}{\pi \cdot d_e \cdot n} \quad (4.37)$$

$$L_i = \frac{S}{\pi \cdot d_e \cdot n} = \frac{4600 [m^2]}{\pi \cdot 0,025 [m] \cdot 5420 [ks]} = 10,806 [m] \quad (4.38)$$

## 4.15. Celková délka trubek

Na pokrytí nepřesností výroby je potřebné k oběma koncům teplosměnných trubek přidat 2 mm.

Celková délka trubek se skládá z hodnoty činné délky trubek, která musí být navýšená na obou stranách o přídavek na spojení trubek s trubkovnicí a ještě o sumu tloušťky podpěrných stěn.

Pro tento výpočet bylo zvoleno  $pps = 12$ ;  $s_s = 14$  [mm];  $s_{tr} = 50$  [mm].

$$L = L_i + 0,004 [m] + 2 \cdot s_{tr} + \sum_{i=1}^{pps} s_{s,i} \quad (4.39)$$

$$L = L_i + 0,004 + 2 \cdot s_{tr} + \sum_{i=1}^{pps} s_{s,i} = 10,806 [m] + 0,004 [m] + 2 \cdot 0,05 [m] + 12 \cdot 0,014 [m] \quad (4.40)$$

$$L = 11,078 [m]$$

Celková délka trubek použitých v kondenzátoru představuje 11,078 [m].

## 4.16. Návrh rozměrů trubkovnice

Nejprve se zvolí rozteč trubek, dle [4] se pohybuje pro zaválcované trubky v rozsahu:

$$P_t = (1,25 \text{ až } 1,3) \cdot d_e \quad (4.41)$$

Volím:

$$P_t = 1,28 \cdot d_e = 1,28 \cdot 25 [mm] = 32 [mm] \quad (4.42)$$

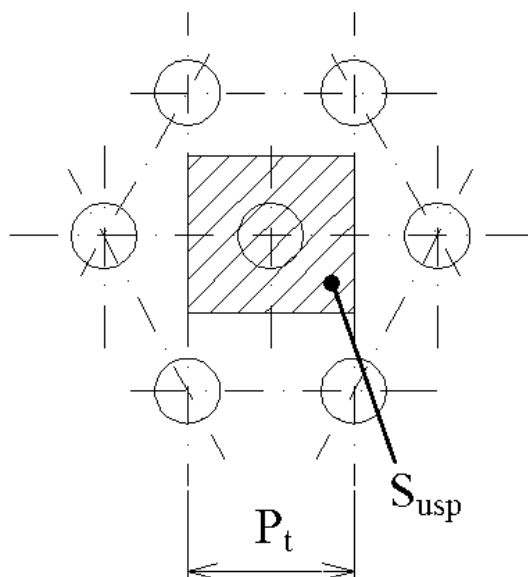
Následně se zvolí podle tabulky 34 nebo se výpočtem zjistí součinitel zaplnění trubkovnice  $\eta_{tr}$ . [4]

$$\eta_{tr} = \frac{n \cdot S_{usp}}{S_{tr}} \quad (4.43)$$

kde  $S_{usp}$  je plocha rezervovaná pro trubku. V případě trojúhelníkového uspořádání:

$$S_{usp} = 0,866 \cdot P_t^2 \quad (4.44)$$

$S_{tr}$  je plocha trubkovnice



Obr. 51: Rezervovaná plocha jedné trubky dle [4]

Tabulka 34: Součinitel zaplnění trubkovnice  $\eta_{tr}$  [4]

Typ kondenzátoru	Počet tahů			
	1	2	3	4
Jednocestný	0,72 až 0,8	0,70 až 0,80	0,68 až 0,75	
Dvoucestný	0,66 až 0,74	0,65 až 0,72	0,63 až 0,70	0,56 až 0,68

Následně se vypočte efektivní průměr trubkovnice

Pro tento výpočet bylo zvoleno podle tabulky 34:

$$\eta_{tr} = 0,75 [-]$$

$$D_{tr} = 1,05 \cdot P_t \cdot \sqrt{\frac{n}{\eta_{tr}}} = 1,05 \cdot 0,032 [m] \cdot \sqrt{\frac{5420 [ks]}{0,75 [-]}} = 2,856 [m] \quad (4.45)$$

Efektivní plocha trubkovnice:

$$S_{tr} = \frac{\pi \cdot D_{tr}^2}{4} = \frac{\pi \cdot (2,856 [m])^2}{4} = 6,4077 [m^2] \quad (4.46)$$

Pokud má být kondenzátor hranolovitého tvaru, potom můžeme  $S_{tr}$  užít jako ekvivalentní efektivní plochu, pro tvorbu modelu bylo použito  $a = 2,2 [m]$ :

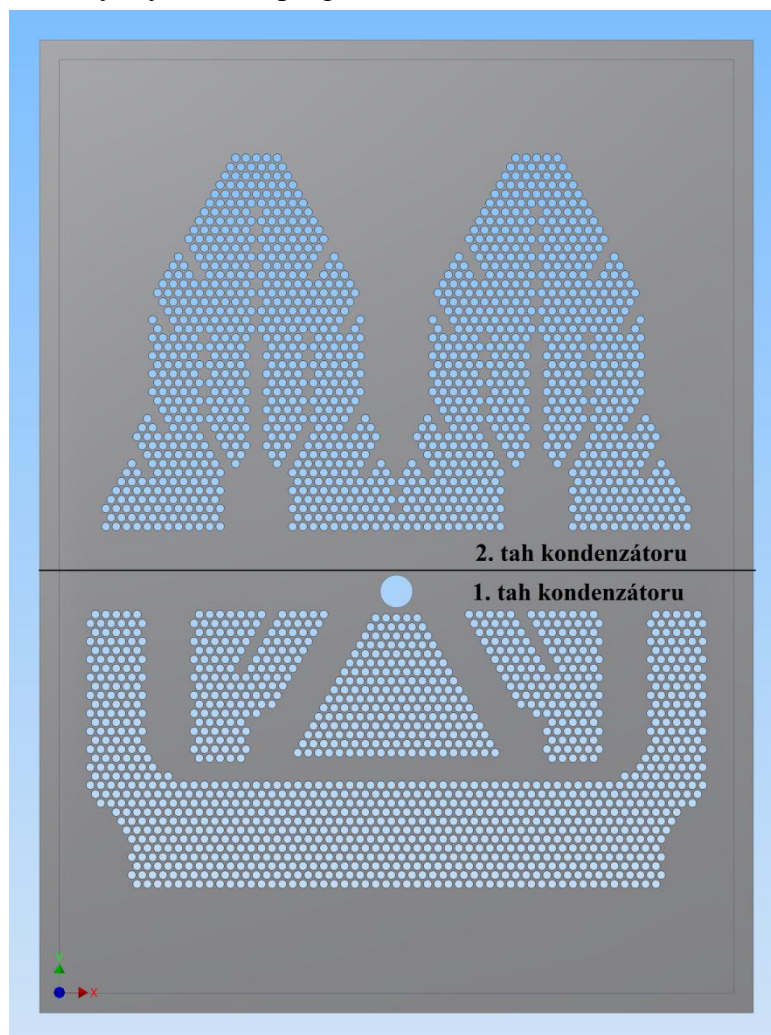
$$S_{tr} = a \cdot b \rightarrow b = \frac{S_{tr}}{a} = \frac{6,4077 [m^2]}{2,2 [m]} = 2,91 [m] \doteq 3 [m] \quad (4.47)$$

Podle potřebného poměru mezi  $a$  a  $b$  můžeme vypočítat jednotlivé strany hranolu.

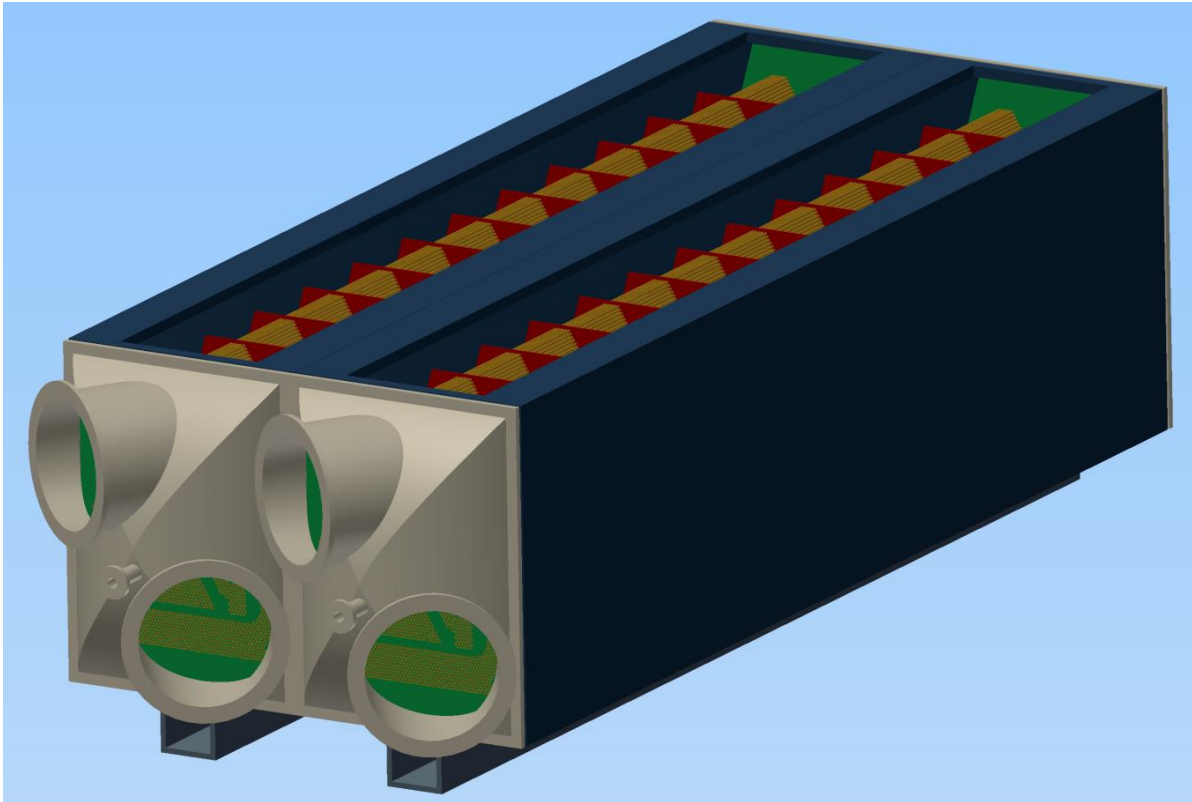
Poměr  $\frac{L}{D_{tr}}$  by se měl pohybovat v rozmezí 1,5 až 2,5, avšak tyto hodnoty nejsou přísným ohraničením [4].

## 4.17. Koncepční návrh kondenzátoru

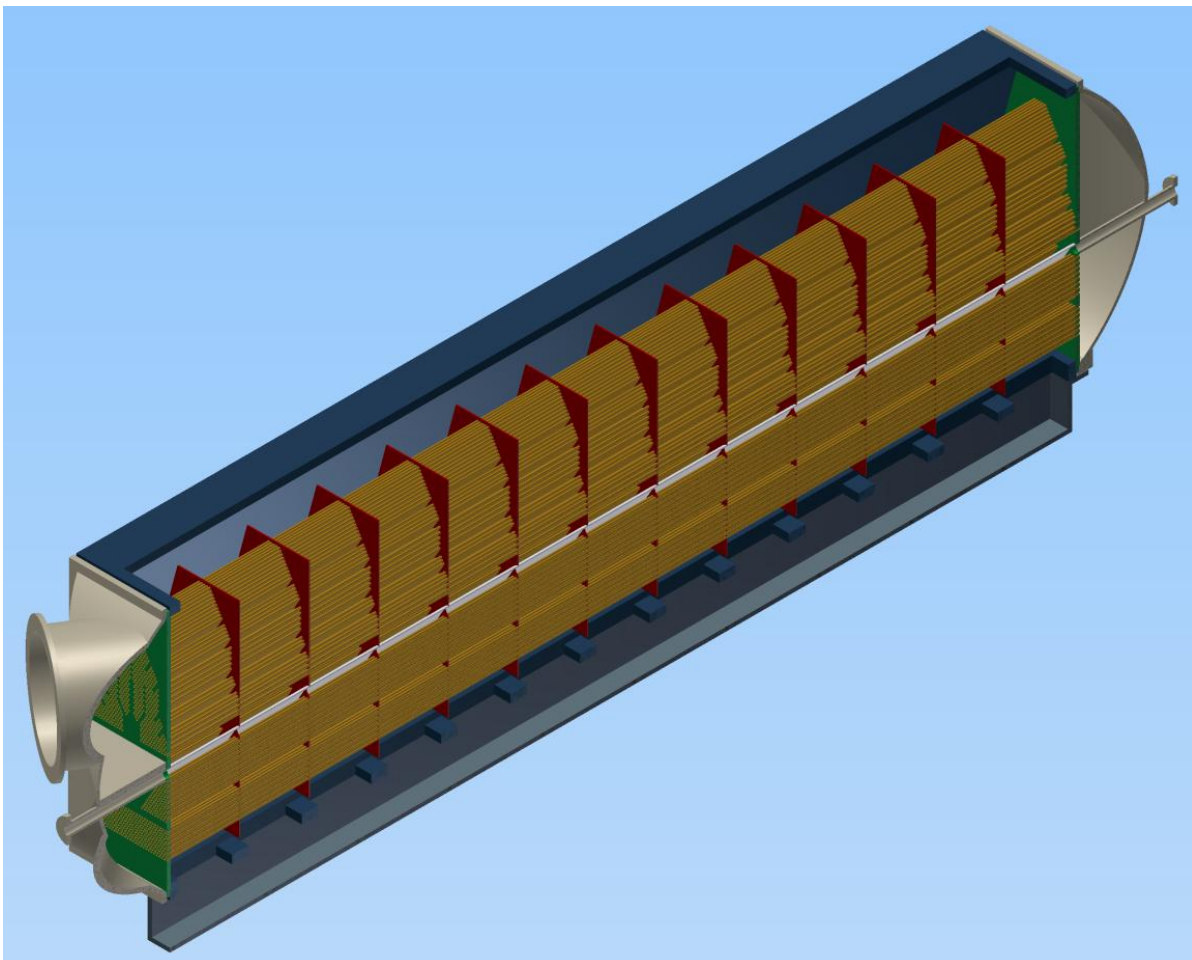
Model kondenzátoru byl vytvořen v programu Autodesk Inventor 2012.



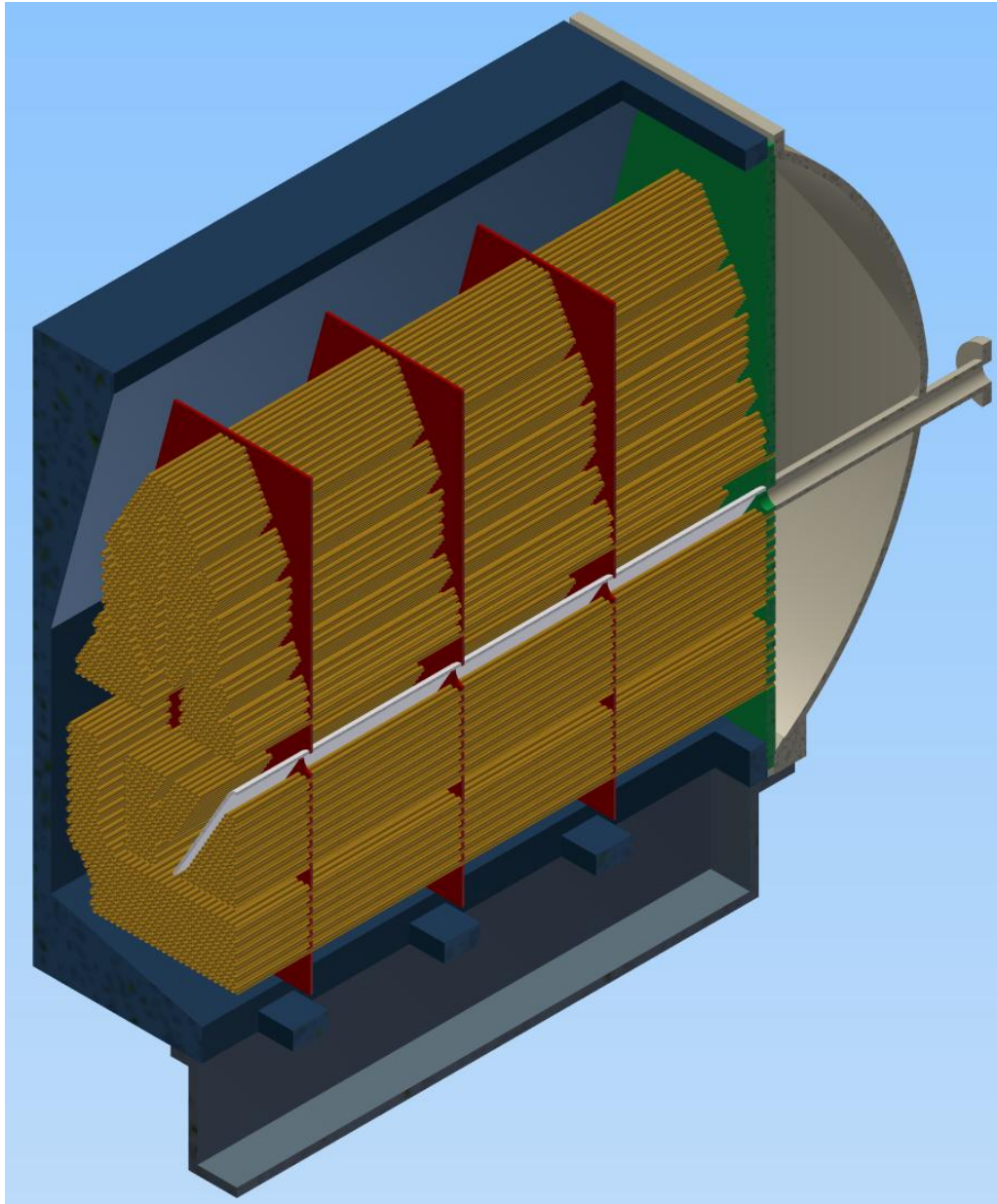
Obr. 52: Návrh trubkovnice



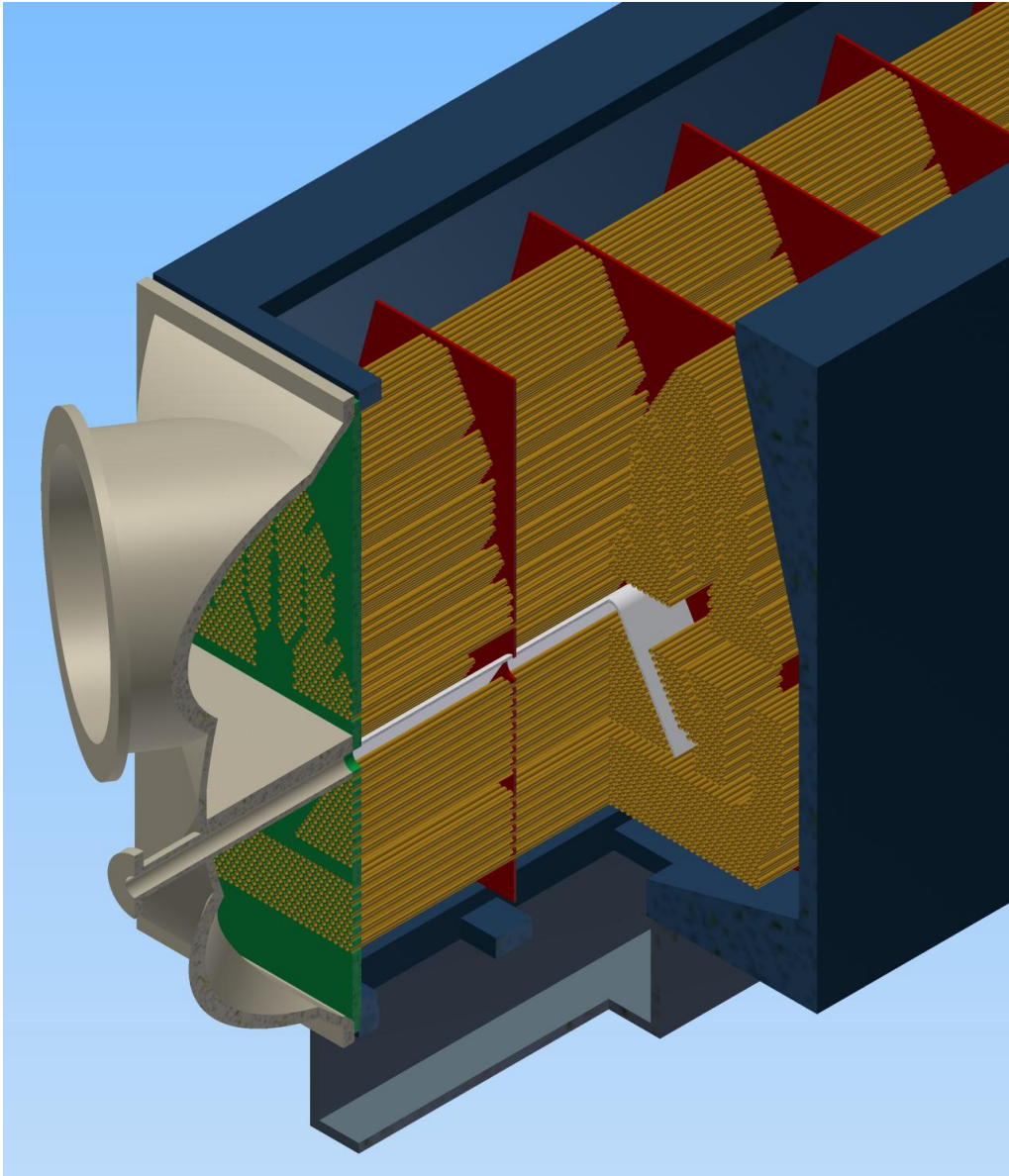
Obr. 53: Koncept kondenzátoru



Obr. 54: Poloviční řez modulem kondenzátorem



Obr. 55: Řez koncovou částí modulu kondenzátoru



Obr. 56: Řez přední částí modulu kondenzátoru

## ZÁVĚR

V první části této bakalářské práce jsou shrnuty typy kondenzátorů, jejich účel a způsob určování součinitele prostupu tepla při kondenzaci par. Metoda tepelných odporů je oproti metodám HEI a VTI-CKTI náročnější a zdoluhavější, proto je používána, pokud je potřeba znát přesný součinitel přestupu tepla na straně páry, nebo pokud je nutné hodnotit vliv jednotlivých vrstev nanesených na stěnu trubek kondenzátoru. Tuto metodu je vhodné používat na již fungujících zařízeních, kde je možné všechny provozní veličiny naměřit a z těchto veličin následně experimentálně stanovit součinitel přestupu tepla na straně páry, resp. součinitel prostupu tepla.

Podle metod HEI a VTI-CKTI se navrhuje nová zařízení. Tyto metody stojí na rovnicích, jejichž princip je ověřen na mnoha provedených experimentech.

Principem metody HEI je stanovení jednotlivých opravných součinitelů pomocí experimentálně zjištěných hodnot, které jsou v této práci uvedeny jak v tabulkách, tak v grafech.

Princip metody VTI-CKTI spočívá v hodnocení jednotlivých vlivů opravnými součiniteli, které se stanovují pomocí experimentálních rovnic.

Druhá část se zabývá hlavními konstrukčními částmi a jejich materiály. Nejpodrobněji jsou zde rozebrány materiály trubek, které je možno použít, a to včetně jejich chemického složení a mechanických vlastností. V současné době se nejčastěji na kondenzátorové trubky používají materiály CuZn28Sn1 (2.0470), CuZn20Al2 (2.0460), dále mezi běžně používané materiály spadá nerezová ocel X5CrNiMo17-12-2 (1.4401). Při volbě materiálu hraje největší roli prostředí, ve kterém se bude používat, a to, jak moc je toto prostředí agresivní. V neposlední řadě je důležitá i cena materiálu a náchylnost ke korozi.

Ve třetí části této práce je zpracován zjednodušený termodynamický výpočet povrchového kondenzátoru podle zadaných parametrů. Podle výsledků výpočtu byl vypracován koncepční návrh povrchového kondenzátoru formou modelu v programu Autodesk Inventor 2012. Výpočet součinitele prostupu tepla závisí na volbě koeficientů, tímto lze ovlivnit celkovou velikost kondenzátoru. Po vypočtení součinitelů prostupu tepla a následném vypočtení potřebných teplosměnných ploch pro obě výše zmíněné metody, byla tato plocha mírně naddimenzována, aby došlo k eliminaci rozdílu mezi oběma metodami. Výsledná teplosměnná plocha kondenzátoru byla  $S = 4600 \text{ [m}^2\text{]}$ , počet trubek na jeden modul byl  $n_i = 2710$  a jejich délka  $L = 11,078 \text{ [m]}$ . Následně byl určen potřebný rozměr trubkovnice  $2,2 \times 3 \text{ [m]}$ .

Podle těchto hodnot byl následně vypracován model jednoho modulu kondenzátoru. Rozdělní tahů je na obr. 52. Tahy jsou od sebe odděleny přepážkou ve víku. První tah je ve spodní části z důvodu, že je zde umístěn odvod nekondenzujících plynů a tímto tahem proudí chladnější voda než ve druhém tahu, dochází tak k většímu podchlazení v této části a odvedený plyn by tak měl obsahovat menší množství páry. Tato sekce je oddělena od zbytku svazku plechem, aby nekondenzující plyny musely procházet přes chladicí sekci. Při ohřátí chladicí vody dochází ke změně hustoty, proto je druhý tah nahoře. Nedochází tak k umělému navýšení tlakové ztráty vlivem překonávání přirozeného proudění v koncové části kondenzátoru, kde se voda obrací právě do druhého tahu. Okraje pláště v horní části jsou zešikmeny podél trubkového svazku tak, aby zde pokud možno nedocházelo k vytváření „mrtvých koutů“. Spodní část je zešikmena tak, aby docházelo k lepšímu odvodu kondenzátu do sběrače kondenzátu, který je umístěn pod pláštěm.

## 5. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] AMBROŽ, Jaroslav. *Parní turbíny*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955, 498 s.
- [2] EDWARDS, J. E. *Design and rating of shell and tube heat exchangers*. www.chemstations.com [online]. Issued 29 August 2008 [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: [http://www.chemstations.com/content/documents/Technical\\_Articles/shell.pdf](http://www.chemstations.com/content/documents/Technical_Articles/shell.pdf)
- [3] HASAL, Pavel a kol. Přestup tepla při varu a kondenzaci. *Chemické inženýrství I* [online]. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2007, s. 157-158 [cit. 2013-02-12]. ISBN 978-80-7080-002-7. Dostupné z: [http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_isbn-978-80-7080-002-7/pdf/157.pdf](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-978-80-7080-002-7/pdf/157.pdf)
- [4] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Parní turbíny a kondenzace*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1987, 268 s.
- [5] KALČÍK, Josef a Karel SÝKORA. *Technická termomechanika*. Praha: Academia, 1973, 536 s.
- [6] NOVÁK, Pavel. Korozí kovů. *Korozní inženýrství* [online]. 2002 [cit. 2013-04-05]. Dostupné z: [http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni\\_inzenyrstvi\\_se/koroze/d\\_pras\\_k.htm](http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni_inzenyrstvi_se/koroze/d_pras_k.htm)
- [7] RATHORE, Mahesh M. *Thermal engineering* [online]. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education, 2010, s. 755 [cit. 2013-03-22]. ISBN 9780070681132. Dostupné z: <http://booklens.com/mahesh-m-rathore/thermal-engineering>
- [8] SCHNEIDER, Petr. *Základy konstruování procesních zařízení*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR Real, 1999, 169 s. ISBN 80-214-1483-9.
- [9] ZENG, Hui, Jia'an MENG a Zhixin LI. Numerical study of a power plant condenser tube arrangement. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2012, roč. 40, s. 294-303 [cit. 2013-03-29]. ISSN 13594311. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.02.028. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111200124X>
- [10] *Air Cooled Condenser* [online]. 2011 [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: <http://sell.bizrice.com/selling-leads/34411/Air-Cooled-Condenser-For-Refinery-Petrochemical-Plants-Power-Plants-And-Incineration-Plants-.html#details>
- [11] HEAT EXCHANGE INSTITUTE, INC. *STANDARDS for STEAM SURFACE CONDENSERS, TENTH EDITION*, Copyright September 2006 by Heat Exchange Institute 1300 Summer Avenue Cleveland, Ohio 44115-3851
- [12] KEY TO METALS. *KEY TO METALS: Světově nejobsáhlejší databáze KOVŮ* [online]. 2013 [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.keytometals.com/>
- [13] *Power Plant Steam Turbine Condenser* [online]. 2013 [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: [http://www.alibaba.com/product-gs/553689906/Power\\_Plant\\_Steam\\_Turbine\\_Condenser.html](http://www.alibaba.com/product-gs/553689906/Power_Plant_Steam_Turbine_Condenser.html)
- [14] Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.: Technical Review. *A New Geothermal Steam Turbine with a "Single-Cylinder Axial Exhaust Design" (Outline of the Hellisheidi Geothermal Turbine in Iceland)* [online]. dec. 2007, Vol. 4, No. 44 [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: <http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e444/e444024.pdf>

- [15] *Revue technique / GEC Alsthom, Direction de la communication ; [dir. publ. Dominique de Causans].* 38, avenue Kléber 75795 PARIS CEDEX 16: GEC ALSTHOM, 1991, roč. 1991, č. 6. ISSN 1148-2893.
- [16] TPS-Technitube Röhrenwerke GmbH. *Sheets, Plates & Tubesheets* [online]. 2013 [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: [http://www.tps-technitube.com/downloads/inosindt/inosindt\\_pdf\\_sheets-\\_plates\\_und\\_tubesheets\\_12.pdf](http://www.tps-technitube.com/downloads/inosindt/inosindt_pdf_sheets-_plates_und_tubesheets_12.pdf)
- [17] TPS-Technitube Röhrenwerke GmbH. *Seamless tubes* [online]. 2013 [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: [http://www.tps-technitube.com/downloads/inosindt/inosindt\\_seamless\\_tubes\\_22.pdf](http://www.tps-technitube.com/downloads/inosindt/inosindt_seamless_tubes_22.pdf)

## 6. SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení	Jednotky	Význam
$p_k$	$kPa$	Tlak v kondenzátoru
$p_e$	$kPa$	Tlak emisní páry (tlak páry odcházející z poslední řady lopatek)
$i_{pp}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie přehřáté páry
$i_p$	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie páry jdoucí do kondenzátoru
$i_k$	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie kondenzátu (syté kapaliny)
$i_{sp}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie syté páry (odpovídající páře vstupující do kondenzátoru)
$v_k$	$m^{-3} \cdot kg$	Měrný objem kondenzátu
$v_{sp}$	$m^{-3} \cdot kg$	Měrný objem syté páry
$v_p$	$m^{-3} \cdot kg$	Měrný objem vlhké páry vstupující do kondenzátoru
$x_p$	-	Suchost páry
$m_p$	$kg \cdot s^{-1}$	Průtočné množství páry v kondenzátoru
$m_v$	$kg \cdot s^{-1}$	Průtočné množství chladicí vody v kondenzátoru
$c_{pv}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Měrná teplená kapacita chladicí vody
$\rho$	$kg \cdot m^{-3}$	Hustota chladicí vody
$\dot{Q}$	$kW$	Tepelný výkon kondenzátoru
$\bar{m}$	-	Poměrný průtok chladicí vody
$\Delta t_v$	$^{\circ}C$	Ohřátí chladicí vody
$t_{v1}$	$^{\circ}C$	Teplota vstupní chladicí vody
$t_k$	$^{\circ}C$	Teplota, při které pára kondenzuje
$t_{v2}$	$^{\circ}C$	Teplota výstupní chladicí vody
$\Delta t_{v1}$	$^{\circ}C$	Rozdíl teplot kondenzátu a vstupní chladicí vody
$\Delta t_{v2}$	$^{\circ}C$	Rozdíl teplot kondenzátu a výstupní chladicí vody

$t_s$	$^{\circ}\text{C}$	Střední logaritmický teplotní spád (LMTD)
$w_s$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Střední rychlost proudění vody
$d_e$	$\text{m}$	Vnější průměr
$r_e$	$\text{m}$	Vnější poloměr
$d_i$	$\text{m}$	Vnitřní průměr
$r_i$	$\text{m}$	Vnitřní poloměr
$d_{Char}$	$\text{m}$	Charakteristický rozměr
$s$	$\text{m}$	Tloušťka stěny
$k$	$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	Součinitel prostupu tepla
$k_0$	$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	Nekorigovaný součinitel prostupu tepla
$F_W$	-	Korekční součinitel teploty
$F_M$	-	Korekční součinitel materiálu
$F_C$	-	Korekční součinitel čistoty trubek
$x$	-	Exponent při výpočtu metodou VTI-CKTI
$a$	-	Korekční součinitel čistoty trubek
$\beta_t$	-	Součinitel zahrnující vliv teploty
$\beta_d$	-	Součinitel zahrnující vliv počtu tahů
$\beta_z$	-	Součinitel parního zatížení
$nmo$	-, kus	Počet modulů
$z$	-, kus	Počet tahů
$d_j$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	Jmenovité parní zatížení
$d$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	Měrné parní zatížení
$d_m$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	Nižší měrné parní zatížení
$\delta$	-	Poměr $d$ a $d_m$
$k_{HEI}$	$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	Součinitel prostupu tepla metodou HEI
$k_{VTI-CKTI}$	$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	Součinitel prostupu tepla metodou VTI-CKTI
$S_{HEI}$	$\text{m}^2$	Teplosměnná plocha při výpočtu podle HEI
$S_{VTI-CKTI}$	$\text{m}^2$	Teplosměnná plocha při výpočtu podle VTI-CKTI
$S$	$\text{m}^2$	Teplosměnná plocha
$B_{HEI}$	-	Naddimenzování $k$ oproti metodě HEI
$B_{VTI-CKTI}$	-	Naddimenzování $k$ oproti metodě VTI-CKTI
$n_i$	kus	Počet trubek jednoho modulu
$n$	kus	Celkový počet trubek
$Li$	$\text{m}$	Činná délka trubek použitých v kondenzátoru
$L$	$\text{m}$	Celková délka trubek použitých v kondenzátoru
$pps$	kus	Počet podpěrných stěn

$s_s$	$m$	Tloušťka podpěrných stěn
$s_{tr}$	$m$	Tloušťka trubkovnice
$P_t$	$m$	Rozteč trubek
$\eta_{tr}$	-	Součinitel zaplnění trubkovnice
$S_{usp}$	$m^2$	Plocha potřebná pro jednu trubku
$D_{tr}$	$m$	Efektivní průměr trubkovnice
$S_{tr}$	$m^2$	Efektivní plocha trubkovnice
$q_p$	$kJ \cdot kg^{-1}$	Dodané teplo
$q_{od}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	Odvedené teplo
$a^{R-C}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	Práce na turbíně dodaná párou
$\beta$	$^\circ$	Okrajový úhel
$\sigma_{kp}$	$Pa$	Povrchové napětí kapaliny proti páře
$\sigma_{sk}$	$Pa$	Povrchové napětí stěny proti kapalině
$\sigma_{sp}$	$Pa$	Povrchové napětí stěny proti páře
$q_{\tau x}$	$W \cdot m^{-2}$	Tepelný tok blánou kondenzátu
$\lambda$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Součinitel vedení tepla
$\delta_x$	$m$	Tloušťka blány
$t_{ps}$	$^\circ C$	Teplota páry
$t_s$	$^\circ C$	Teplota stěny
$\alpha_x$	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla v ose x
$\alpha_p$	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla na straně páry
$\alpha_v$	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla na straně vody
$\eta$	$Pa \cdot s$	Dynamická viskozita
$g$	$m \cdot s^{-2}$	Gravitační zrychlení
$l$	$kJ \cdot kg^{-1}$	Výparné teplo
$\varepsilon$	$^\circ$	Úhel náklonu trubek
$Nu$	-	Nusseltovo číslo
$Re$	-	Reynoldsovo číslo
$Pr$	-	Prandtlovo číslo
$\nu$	$m^2 \cdot s^{-1}$	Kinematická viskozita
<b>C</b>	<b>%</b>	Obsah uhlíku v oceli
<b>H</b>	<b>%</b>	Obsah vodíku v oceli
<b>N</b>	<b>%</b>	Obsah dusíku v oceli
<b>P</b>	<b>%</b>	Obsah fosforu v oceli
<b>S</b>	<b>%</b>	Obsah síry v oceli

Al	%	Obsah hliníku v oceli
As	%	Obsah arsenu v oceli
Cr	%	Obsah chromu v oceli
Cu	%	Obsah mědi v oceli
Fe	%	Obsah železa v oceli
Mn	%	Obsah manganu v oceli
Mo	%	Obsah molybdenu v oceli
Ni	%	Obsah niklu v oceli
Pb	%	Obsah olova v oceli
Si	%	Obsah křemíku v oceli
Sn	%	Obsah cínu v oceli
Ti	%	Obsah titanu v oceli
R <sub>p0,2</sub>	MPa	Smluvní mez kluzu
R <sub>p1,0</sub>	MPa	Smluvní mez kluzu
R <sub>m</sub>	MPa	Mez pevnosti
A	%	Tažnost
TZ	-	Tepelné zpracování

## 7. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Vybrané nekorigované součinitele prostupu tepla $k_0$ dle [11].....	20
Tabulka 2: Vybrané korekční součinitele materiálu $F_M$ [11].....	22
Tabulka 3: Vybrané typy konstrukce výměníků dle [2] .....	26
Tabulka 4: Materiály pláště, vodních nádrží a sběrače kondenzátu dle [11], [16] .....	27
Tabulka 5: Vybrané materiály trubkovic dle [11], [16].....	32
Tabulka 6: Složení 1.4301 [17].....	38
Tabulka 7: Mechanické vlastnosti 1.4301 [17] .....	38
Tabulka 8: Složení 1.4401 [17].....	38
Tabulka 9: Mechanické vlastnosti 1.4401 [17].....	38
Tabulka 10: Složení 1.4541 [17].....	39
Tabulka 11: Mechanické vlastnosti 1.4541 [17].....	39
Tabulka 12: Složení 1.4539 [17].....	39
Tabulka 13: Mechanické vlastnosti 1.4539 [17].....	39
Tabulka 14: Složení 1.4002 [17].....	40
Tabulka 15: Mechanické vlastnosti 1.4002 [17].....	40
Tabulka 16: Složení 1.4006 [17].....	40
Tabulka 17: Mechanické vlastnosti 1.4006 [17].....	40
Tabulka 18: Složení 1.4016 [17].....	40
Tabulka 19: Mechanické vlastnosti 1.4016 [17].....	41
Tabulka 20: Složení 3.7025 [17].....	41

Tabulka 21: Mechanické vlastnosti 3.7025 [17].....	41
Tabulka 22: Složení 3.7035 [17].....	41
Tabulka 23: Mechanické vlastnosti 3.7035 [17].....	41
Tabulka 24: Složení 2.0470 [12].....	41
Tabulka 25: Mechanické vlastnosti 2.0470 [12].....	42
Tabulka 26: Složení 2.0460 [12].....	42
Tabulka 27: Mechanické vlastnosti 2.0460 [12].....	42
Tabulka 28: Složení 2.0872 [12].....	42
Tabulka 29: Mechanické vlastnosti 2.0872 [12].....	42
Tabulka 30: Složení 2.0882 [12].....	42
Tabulka 31: Mechanické vlastnosti 2.0882 [12].....	42
Tabulka 32: Složení 2.0918 [12].....	43
Tabulka 33: Mechanické vlastnosti 2.0918 [12].....	43
Tabulka 34: Součinitel zaplnění trubkovnice $\eta_{tr}$ [4].....	52

## 8. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Vzduchem chlazený kondenzátor [10] .....	11
Obr. 2: Povrchový vodou chlazený kondenzátor [13] .....	11
Obr. 3: Schéma R-C cyklu .....	14
Obr. 4: T-s diagram R-C cyklu .....	15
Obr. 5: Výběr z R-C cyklu.....	15
Obr. 6: Povrchové napětí kapky dle [5].....	17
Obr. 7: Blánová kondenzace na svislé stěně dle [5] .....	18
Obr. 8: Tepelné odpory .....	19
Obr. 9: Průběh součinitelů prostupu tepla u vybraných průměrů trubek [11] .....	21
Obr. 10: Průběh koeficientu korekce teploty $F_w$ [11].....	21
Obr. 11: Axiální výstup z turbíny dle [14].....	24
Obr. 12: Spodní výstup z turbíny dle [14] .....	24
Obr. 13: Boční kondenzátor s horním výstupem z turbíny dle [14] .....	25
Obr. 14: Výměník s plovoucí hlavou.....	26
Obr. 15: Hrdlo bez vnitřního přístupu dle [8].....	29
Obr. 16: Trubkovnice sevřena mezi přírubami [8] .....	29
Obr. 17: Připevnění pomocí krčku [8] .....	29
Obr. 18: Připevnění pomocí přechodového prstence [8] .....	29
Obr. 19: Zaválcovaný spoj do hladké díry.....	30
Obr. 20: Zaválcovaný spoj do díry s drážkami .....	30
Obr. 21: Zaválcovaný spoj do díry s hřebínkem.....	30
Obr. 22: Koutový svar .....	30
Obr. 23: Lemový svar .....	30
Obr. 24: Přivaření uvnitř díry trubkovnice .....	31

Obr. 25: Svar na vnitřní straně trubkovnice (používá se výjimečně).....	31
Obr. 26: Příprava exploze .....	31
Obr. 27: Průběh exploze.....	31
Obr. 28: Finální vzhled .....	31
Obr. 29: Boční odvod vzduchu [7].....	33
Obr. 30: Střední odvod vzduchu [7].....	33
Obr. 31: Ukázka trubkového svazku se středním odvodem nekondenzujících plynů [15]..	34
Obr. 32: Tvar trubkového svazku [9].....	35
Obr. 33: Proudnice [9] .....	36
Obr. 34: Rychlostní pole [ $\text{m s}^{-1}$ ] [9].....	36
Obr. 35: Rozložení podílu vzduchu [9].....	36
Obr. 36: Rozložení koeficientu prostupu tepla [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ] [9].....	36
Obr. 37: Chodbovitě uspořádání .....	37
Obr. 38: Šachovité uspořádání (do trojúhelníku).....	37
Obr. 39: Rombické pootočené uspořádání .....	37
Obr. 40: Chodbovitě pootočené uspořádání.....	37
Obr. 41: Vějířovité radiální uspořádání .....	37
Obr. 42: Vějířovité chodbové uspořádání .....	37
Obr. 43: Elektrolytická koroze [15] .....	44
Obr. 44: Korozní praskání pod napětím [15] .....	44
Obr. 45: Koroze z usazenin [15] .....	44
Obr. 46: Erozní koroze [15] .....	44
Obr. 47: Korozní únava [15] .....	44
Obr. 48: Algoritmus výpočtu .....	45
Obr. 49: Stav páry .....	47
Obr. 50: Ohřátí chladicí vody .....	48
Obr. 51: Rezervovaná plocha jedné trubky dle [4] .....	52
Obr. 52: Návrh trubkovnice .....	53
Obr. 53: Koncept kondenzátoru .....	54
Obr. 54: Poloviční řez modulem kondenzátorem .....	54
Obr. 55: Řez koncovou částí modulu kondenzátoru .....	55
Obr. 56: Řez přední částí modulu kondenzátoru.....	56

## 9. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 .....	Výpočet pomocí metody HEI
Příloha 2 .....	Výpočet pomocí metody VTI-CKTI
Příloha 3 .....	Přepočet při naddimenzované teplosměnné ploše