

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING

# KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO PŘEDEHŘÍVAČE VZDUCHU

STRUCTURAL DESIGN OF AN EXPERIMENTAL AIR PREHEATER

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. JIŘÍ TICHÝ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK JEGLA, Ph.D.

BRNO 2014

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce je zaměřena na konstrukční návrh nekonvenčního experimentálního předehřívače spalovacího vzduchu do podoby výkresové dokumentace potřebné pro výrobu a realizaci. Součástí práce je rovněž pevnostní a dilatační kontrola exponovaných prvků konstrukce. Výsledný konstrukční návrh je získán postupným upřesněním předběžně navržených a pevnostně a dilatačně kontrolovaných dílčích prvků konstrukce. Součástí práce je také diskuse konstrukčních vlastností výsledného návrhu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

předehřívač vzduchu, spalovací vzduch, ČSN EN 13445, ČSN EN 13480, dilatace, tepelná izolace

## **ABSTRACT**

The thesis is focused on structural design of unconventional experimental combustion air preheater into drawing documentation needed for production and realization. Strength and expansion control of exposed elements of construction is also included in the thesis. The final design is obtained by gradual specification of pre-designed and strength and expansion controlled elements of construction. The work also includes discussion of structural properties of the final design.

## **KEY WORDS**

air preheater, combustion air, ČSN EN 13445, ČSN EN 13480, expansion, heat insulation

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

TICHÝ, J. *Konstrukční řešení experimentálního předehříváče vzduchu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 57 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Jegla Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Konstrukční řešení experimentálního předehřívače vzduchu* vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeňka Jegly, Ph.D. na základě použitých pramenů, které jsou uvedeny v seznamu literatury.

V Brně, dne 28. května 2014

.....

Jiří Tichý

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Zdeňku Jeglovi za odborné vedení práce a velmi cenné rady při zpracovávání problematiky. Dále děkuji své rodině a přítelkyni za mimořádnou podporu během tvorby diplomové práce i celého studia.

## **OBSAH**

SEZNAM SYMBOLŮ .....	7
1 ÚVOD.....	10
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ .....	11
2.1 Rekuperační předehřívače vzduchu .....	11
2.1.1 Trubkové předehřívače vzduchu ocelové .....	11
2.1.2 Trubkové předehřívače vzduchu litinové .....	13
2.1.3 Trubkový ohřívák skleněný .....	13
2.1.4 Deskové předehřívače vzduchu .....	14
2.1.5 Parní spirála .....	15
2.2 Regenerační předehřívače vzduchu.....	15
2.2.1 Regenerační ohřevná plocha.....	17
2.2.2 Předehřívač typu Babcock – Wilcox .....	18
3 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU.....	20
4 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE.....	21
5 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ.....	22
6 PEVNOSTNÍ VÝPOČET NAVRHOVANÉHO ZAŘÍZENÍ.....	23
6.1 SPALOVACÍ KOMORA.....	23
6.1.1 VNITŘNÍ VÁLEC SPALOVACÍ KOMORY .....	23
6.1.2 VNĚJŠÍ VÁLEC SPALOVACÍ KOMORY.....	27
6.2 KONVEKČNÍ BLOK .....	30
6.3 SPOJOVACÍ POTRUBÍ.....	35
6.3.1 Potrubí spalovacího vzduchu .....	36
6.3.2 Potrubí spalin .....	38
7 VÝPOČET TEPELNÉ IZOLACE .....	41
7.1 Izolace spalovací komory.....	41
7.2 Izolace konvekčního bloku .....	43
7.3 Izolace potrubí spalovacího vzduchu.....	44
7.4 Izolace potrubí spalin .....	46
8 TVORBA VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE.....	50
9 ZÁVĚR, ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	52
10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	53
11 SEZNAM OBRÁZKŮ .....	55
12 SEZNAM TABULEK .....	56
13 SEZNAM PŘÍLOH .....	57

## SEZNAM SYMBOLŮ

symbol	význam	jednotka
a	geometrická charakteristika pro určení $\varepsilon$	-
b	geometrická charakteristika pro určení $\varepsilon$	-
c	přídavek na korozi	mm
$d_i$	vnitřní průměr potrubí	mm
$d_o$	vnější průměr potrubí	mm
$D_e$	vnější průměr válcové skořepiny	mm
$D_i$	vnitřní průměr válcové skořepiny	mm
$D_m$	střední průměr válcové skořepiny	mm
DN	jmenovitá světlost potrubí	mm
e	požadovaná tloušťka stěny	mm
E	modul pružnosti v tahu při teplotě $t$ v $^{\circ}\text{C}$	MPa
$e_a$	analyzovaná tloušťka stěny	mm
$e_{ex}$	tloušťka přidaná navíc pro doplnění na jmenovitou tloušťku	mm
$e_{ext}$	tloušťka stěny potrubí na vnější straně oblouku	mm
$e_{int}$	tloušťka stěny potrubí na vnitřní straně oblouku	mm
$e_{min}$	minimální přijatelná výrobní tloušťka stěny	mm
$e_n$	jmenovitá tloušťka stěny	mm
f	předběžná hodnota dovoleného namáhání	MPa
$f_d$	maximální hodnota dovoleného namáhání pro běžné provozní podmínky	MPa
$F_g$	tíhová síla	N
$F_1$	působící složka zatěžující síly	N
$F_2$	působící složka zatěžující síly	N
g	gravitační zrychlení	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
k	součinitel bezpečnosti	-
$k_A$	koeficient bezpečnosti v nebezpečném místě A	-
l	rozměr zařízení při teplotě $T_1$	mm
$l_0$	rozměr zařízení při teplotě $20^{\circ}\text{C}$	mm
L	nevztyžená délka skořepiny, potrubí	mm
m	hmotnost	kg
$n_{cyl}$	počet obvodových vln u nevztyžené části válcového pláště	-

$p$	diferenční tlak používaný pro konstrukční výpočet skořepin	MPa
$p_a$	atmosférický tlak	MPa
$p_c$	diferenční tlak používaný pro konstrukční výpočet potrubí	MPa
$P_m$	teoretický tlak při ztrátě stability válcového pláště potrubí bez imperfekcí	MPa
$p_{max}$	maximální výpočtový tlak	MPa
$p_r$	výpočtová dolní mez tlaku při zborcení potrubí	MPa
$P_y$	tlak, při kterém střední obvodové napětí ve středu pole (mezi výztuhami) na válcovém plášti potrubí dosáhne meze kluzu	MPa
$P_m$	teoretický tlak při ztrátě stability válcového pláště skořepiny bez imperfekcí	MPa
$P_r$	výpočtová dolní mez tlaku při zborcení skořepiny	MPa
$P_y$	tlak, při kterém střední obvodové napětí ve středu pole (mezi výztuhami) na válcovém plášti skořepiny dosáhne meze kluzu	MPa
$p_1$	tlak na vnější straně stěny	MPa
$p_2$	tlak na vnitřní straně stěny	MPa
$\dot{q}$	tepelný tok stěnou	$W \cdot m^{-2}$
$R$	středního poloměr skořepiny	mm
$R_{mp}$	střední poloměr potrubí	mm
$R_{obl}$	poloměr oblouku potrubního kolena	mm
$R_m$	mez pevnosti v tahu	MPa
$R_{m/t}$	minimální mez pevnosti v tahu při teplotě $t$ v $^{\circ}C$	MPa
$R_e$	mez kluzu	MPa
$R_{p0,2/t}$	minimální smluvní mez kluzu 0,2 % při teplotě $t$ v $^{\circ}C$	MPa
$R_{p1,0/t}$	minimální smluvní mez kluzu 1,0 % při teplotě $t$ v $^{\circ}C$	MPa
$S$	elastické mezní napětí	MPa
$S_1$	součinitel bezpečnosti pro konstrukční podmínky	-
$S_2$	součinitel bezpečnosti pro zkušební podmínky	-
$t_{ok}$	teplota okolí	K, $^{\circ}C$
$t_s$	teplota stěny	$^{\circ}C$
$t_{w1}$	teplota povrchu stěny	K, $^{\circ}C$
$t_{w2}$	teplota povrchu stěny	K, $^{\circ}C$
$t_{w2sk}$	skutečná teplota povrchu stěny	K, $^{\circ}C$
$t_{w3}$	teplota povrchu stěny	K, $^{\circ}C$



$t_{w3sk}$	skutečná teplota povrchu stěny	K, °C
$t_{w4}$	teplota povrchu stěny	K, °C
$t_{w4sk}$	skutečná teplota povrchu stěny	K, °C
$t_{w5}$	teplota povrchu stěny	K, °C
$t_{w5sk}$	skutečná teplota povrchu stěny	K, °C
$T_1$	teplota stěny	°C
$z$	součinitel hodnoty svarového spoje	-
$Z$	geometrická charakteristika pro určení $\varepsilon$	-
$\alpha$	součinitel tepelné roztažnosti	°C <sup>-1</sup>
$\alpha_{ok}$	součinitel přestupu tepla vzduchu	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
$\delta_e$	absolutní hodnota možné záporné tolerance na jmenovité tloušťce	mm
$\delta_{lan}$	navržená tloušťka stěny izolační rohože PROMALAN HT100	m
$\delta_m$	přídavek na možné zeslabení během výrobního procesu	mm
$\delta_{or}$	vypočtená tloušťka stěny izolační rohože ORSTECH DP100	m
$\delta_{orsk}$	skutečna (navržená) tloušťka izolační rohože ORSTECH DP100	m
$\delta_{pro}$	vypočtená tloušťka stěny izolační rohože PROMAFORM 1430	m
$\delta_{prosk}$	skutečna (navržená) tloušťka izolační rohože PROMAFORM 1430	m
$\delta_s$	tloušťka stěny skořepiny, potrubí	m
$\delta_{sup}$	vypočtená tloušťka stěny izolační rohože Superwool 607 Blanket	m
$\delta_{supsk}$	skutečna (navržená) tloušťka izolační rohože Superwool 607 Blanket	m
$\varepsilon$	střední elastická poměrná obvodová deformace při zborcení	-
$\lambda_{lan}$	součinitel tepelné vodivosti rohože PROMALAN HT100	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$\lambda_{or}$	součinitel tepelné vodivosti rohože ORSTECH DP 100	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$\lambda_{pro}$	součinitel tepelné vodivosti rohože PROMAFORM 1430	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$\lambda_s$	součinitel tepelné vodivosti stěny skořepiny, potrubí	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$\lambda_{sup}$	součinitel tepelné vodivosti rohože Superwool 607 Blanket	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$\sigma_A$	nominální napětí v nebezpečném místě A	MPa
$\sigma_e$	dovolené elastické mezní napětí pro skořepinu	MPa
$\Delta l$	velikost změny rozměru	mm
$\Delta T$	velikost změny teploty	°C

## 1 ÚVOD

V dnešní době je kladen velký důraz na ekonomičnost a ekologičnost každého procesu. Spalovací procesy patřily v minulosti k těm, které nejvíce poškozovaly životní prostředí. Na základě této skutečnosti vzniká mnoho nařízení a norem, které musí dané technologie a zařízení splňovat. Právě kvůli negativnímu vlivu na životní prostředí je snaha v odvětví spalovacích procesů neustále zlepšovat jejich průběhy a výsledky. To je docíleno neustálým zlepšováním dílčích částí procesu, jež zlepší jeho celkovou efektivitu.

V současné době je jednou z významných součástí spalovacího procesu využití zařízení pro předehřev spalovacího vzduchu. Předehříváče mohou být použity samostatně nebo mohou být součástí rekuperačního systému. Výhodou přidání tohoto prvku do procesu je zvýšení výsledné efektivity. Toho je docíleno prostřednictvím zmenšení komínových ztrát, zlepšení průběhu vznícování paliva a vlastního hoření, zvýšení spalovací teploty v ohništi a zvýšení celé teplotní úrovně ve spalovací komoře při současné úspoře paliva.

Tato práce, která se zabývá konstrukčním návrhem experimentálního předehříváče vzduchu, vznikla ve spolupráci s Ústavem procesního a ekologického inženýrství, sekci termických procesů a čištění plynů. Tato sekce se mimo jiné zabývá právě spalovacími procesy plynných paliv, kapalných paliv a kapalných odpadů.

Řešený nekonvenční experimentální předehříváč spalovacího vzduchu bude sloužit na zkušebně hořáků provozované touto sekci pro potřeby studia vlivu a vlastností předehřevu spalovacího vzduchu na kvalitu spalovacího procesu při různých podmínkách spalování u různých druhů paliv.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Přehříváč vzduchu je standardní technický termín používaný pro označení zařízení, sestaveného pro ohřátí vzduchu před dalším použitím. Přehříváče jsou nejčastěji používány v elektrárnách generujících páru pro přehřev spalovacího vzduchu u elektrických kotlů, díky čemuž je zlepšena ekonomika procesu spalování. Nejčastějším zdrojem tepelné energie jsou spaliny. Přehříváče slouží k zachycení této energie v podobě odpadního tepla v proudu spalin. Na základě toho může být zvýšena celková účinnost kotle o 5 až 10 %, ale musí být bráno v úvahu možné poškození zařízení vlivem koroze. [1]

Další možností pro přehřev vzduchu je využití páry (parní ohříváče vzduchu), která je odebírána přímo z procesu nebo z jiných zdrojů v závislosti na konkrétní aplikaci. Spalinové přehříváče jsou obvykle umístěny přímo za kotlem, kde jsou dostatečně horké spaliny vystupující z ekonomizéru, jejichž teplo lze použít pro přehřev studeného spalovacího vzduchu přivedeného z ventilátorů. Horký vzduch produkovaný přehříváčem vzduchu zlepšuje spalování všech paliv a často je také potřebný pro sušení a dopravu paliva do práškových uhelných bloků. Přehříváče jsou rozděleny podle jejich principu činnosti do dvou skupin, a to na rekuperační a regenerační. [2]

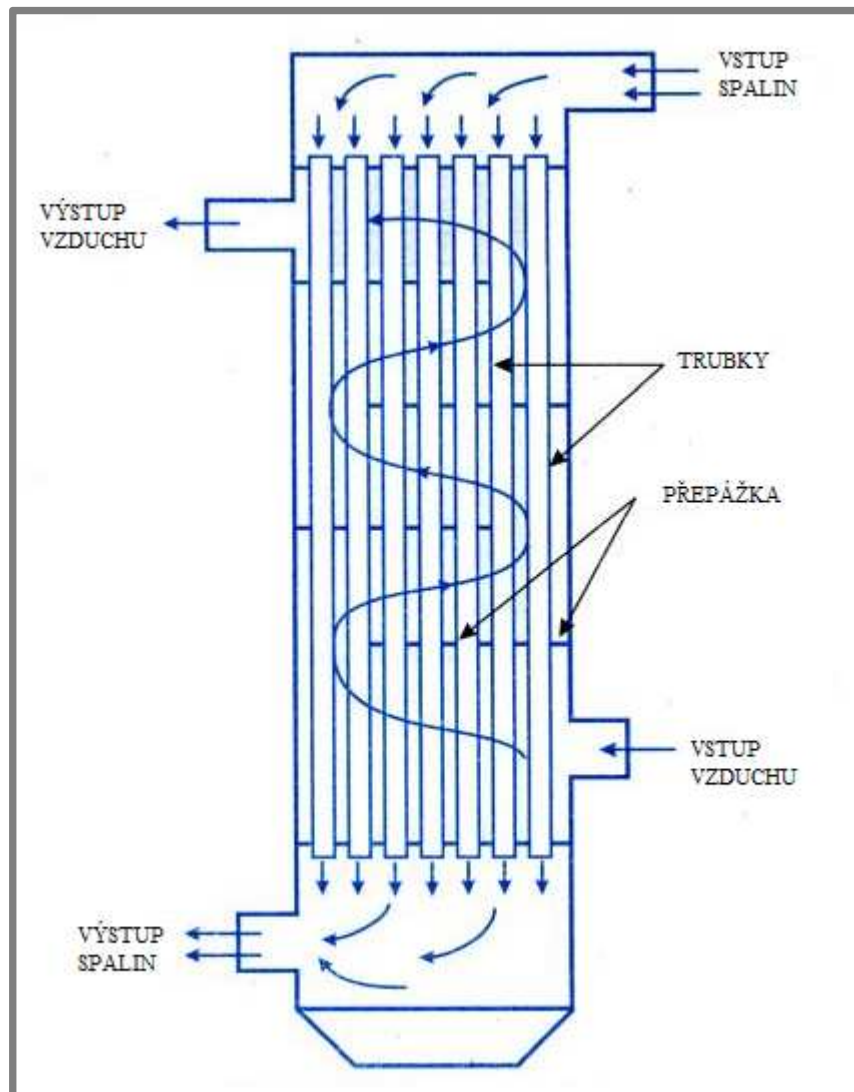
### 2.1 Rekuperační přehříváče vzduchu

V rekuperačním výměníku tepla je teplo přenášeno nepřetržitě a přímo přes stacionární pevnou teplosměnnou plochu, která odděluje horký proud spalin od chladného proudu vzduchu proudícího do hořáků. Nejčastěji používané teplosměnné plochy jsou trubky a paralelní desky. Tyto ohříváky mají větší hmotnost, větší obestavěný prostor, jsou těsné a citlivé na zanášení. Dochází u nich k malé křížové kontaminaci a k malým únikům mezi proudy. [3]

#### 2.1.1 Trubkové přehříváče vzduchu ocelové

U trubkových přehříváčů vzduchu je energie převáděna z teplého proudu proudícího nejčastěji v trubkovém prostoru tenkostěnných trubek do chladného spalovacího vzduchu proudícího v mezitrubkovém prostoru. Výměník se skládá ze svazku rovných trubek, které jsou zaválcované nebo přivařené k trubkovnici, která má standardně tloušťku 15 až 25 mm. Celý svazek je uzavřen v ocelovém pouzdře (plášti). Svisle uspořádané trubky jsou připevněné buď k horní nebo spodní pevné trubkovnici, zatímco druhá plovoucí trubkovnice se může volně pohybovat v závislosti na dilataci trubek. Dilatační spáry nacházející se mezi plovoucí trubkovnicí a pláštěm, jsou obvykle opatřeny těsněním. Přechodové usměrňovací přepážky, které jsou rovnoběžné s trubkovnicemi, jsou často využívány k rozdělení nebo usměrnění průtokové cesty. Jejich další výhodou je eliminace možného poškození trubek vlivem vibrací vzniklých prouděním média. Zařízení je vyrobeno buď z uhlíkové oceli, nebo z korozivzdorného materiálu. [1] Trubky jsou nejčastěji navrhovány v rozsahu od 38 mm do 102 mm v průměru a mají tloušťku stěny obvykle od 1,25 mm do 3 mm. Větší průměry trubek jsou používány v případě nebezpečí zanášení a koroze trubek. Trubky mohou být ve svazku uspořádány

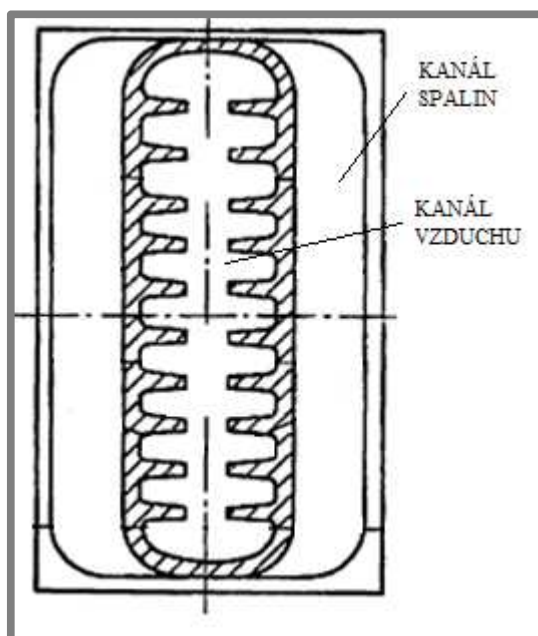
v zákrytu nebo mohou být uspořádány střídavě, což umožňuje intenzivnější přenos tepla. Trubkové ohřívače vzduchu mohou být vybaveny parním nebo vzduchovým ofukovačem, který slouží k odstranění úsad či popelovin ze stěny vystavené spalinám během provozu. Nejběžnějším způsobem uspořádání pracovních látek je protiproudý tok v jednom nebo ve více vzájemných chodech. Konstrukční provedení jednochodého nebo vícechodého uspořádání cest spalin a vzduchu závisí na konkrétním provedení zařízení. [2] Typické jednochodé provedení trubkového předehřívače vzduchu s protiproudým uspořádáním pracovních látek je na obr. 1. Projektovaná zařízení jsou často konstruována tak, aby splňovala specifické projekční předpisy týkající se obtoku studeného vzduchu (bypass) nebo recirkulace horkých spalin tak, aby nedocházelo k zanášení popelem a ke korozi na takzvaném studeném konci předehřívače vlivem blízkosti rosného bodu spalin. Moderní předehřívače spalovacího vzduchu jsou blokového typu a jsou často sestaveny do velkých přenosných modulů. [4]



Obr. 1 Trubkový předehřívač vzduchu v protiproudém uspořádání [4]

### 2.1.2 Trubkové předehříváče vzduchu litinové

Tyto předehříváče jsou velice těžké a velké, ale zároveň odolné. Používaly se v minulosti v těžkých průmyslových podmínkách především z důvodů vysoké odolnosti proti korozi. Litinové ohříváky vzduchu jsou montovány z litinových trub. Ty mají zvětšenou vnitřní i vnější výhřevnou plochu odlitými žebry a jehlami. Vzduchovody a spalinovody měly odlity čtyřúhelníkové příruby, kterými se staví na sebe do rámců, vytvořených z válcovaných profilů. Spoje byly utěsněny těsníci provazci. [5] Nejčastěji se používaly v délkách od 1 500 až 3 500 mm z šedé litiny nebo z ohnivzdorné litiny pro vyšší teploty spalin. Tloušťka stěny je závislá na způsobu odlévání a bývá v rozmezí od 6 do 8 mm. Jednotlivé trubky jsou sestaveny do paralelních sekcí převáděcími kanály tak, aby byla zajištěna správná rychlost spalin. U těchto předehříváčů, s nimiž se lze ještě dnes setkat, je obvyklé, že spaliny proudí v jednocestném uspořádání v mezitrubkovém prostoru a vzduch proudí uvnitř trubek je v uspořádání vícechodém, viz obr. 2. [1]



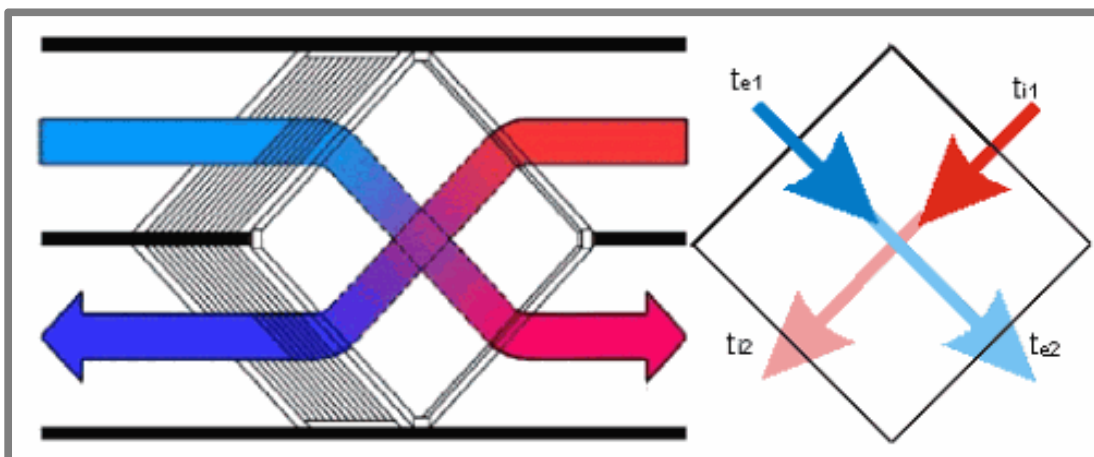
Obr. 2 Řez typickým litinovým předehříváč vzduchu [1]

### 2.1.3 Trubkový ohřívák skleněný

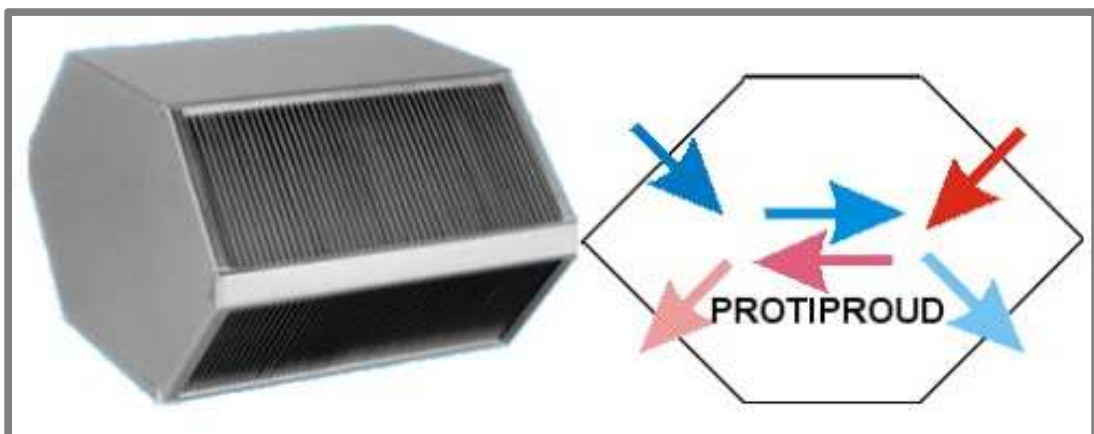
Trubky těchto výměníků se dělají z borokřemičitého skla. Jsou odolné vůči korozi, mají nižší tlakovou ztrátu oproti ocelovým trubkám díky větší hladkosti. Lze je použít maximálně do teploty stěny 350 °C. Mají oproti ocelovým trubkám nižší součinitel prostupu tepla za stejných aerodynamických podmínek. Vzhledem k rozdílné tepelné roztažnosti železa a skla je nutné kluzné spojení trubek s trubkovicemi zajistit pomocí manžet ze speciálních těsnících kyselinovzdorných tkanin. Těsnost těchto ohříváků je nižší než u ocelových. [1]

## 2.1.4 Deskové přehřívače vzduchu

Deskové ohřívače vzduchu přenášejí teplo z teplých spalin proudících na jedné straně desky do studeného spalovacího vzduchu proudícího na druhé straně desky, obvykle v křížovém toku (viz obr. 3) nebo v protiproudu (viz obr. 4). Přehřívač se skládá z několika rovnoběžně uspořádaných desek. Těsnost mezi spalovacím vzduchem a proudem spalin je zajištěna buď svařením, nebo kombinací těsnění a pružin stlačených z venku přítlačnou deskou. Materiál desek a vzdálenost jednotlivých desek se v některých konstrukčních řešeních může měnit v závislosti na provozních požadavcích v závislosti na druhu spalovaného paliva. [3] Jako první se používaly ocelové desky, ale od jejich použití se odstoupilo kvůli těsnícím problémům dosedajících desek. Nicméně vývoj těsnění umožnil využít ocelové desky v průmyslových a malých užitkových aplikacích. Moderní deskové jednotky jsou o něco menší než trubkové jednotky pro danou kapacitu a vykazují minimální úniky spalovacího vzduchu a spalin. [4]



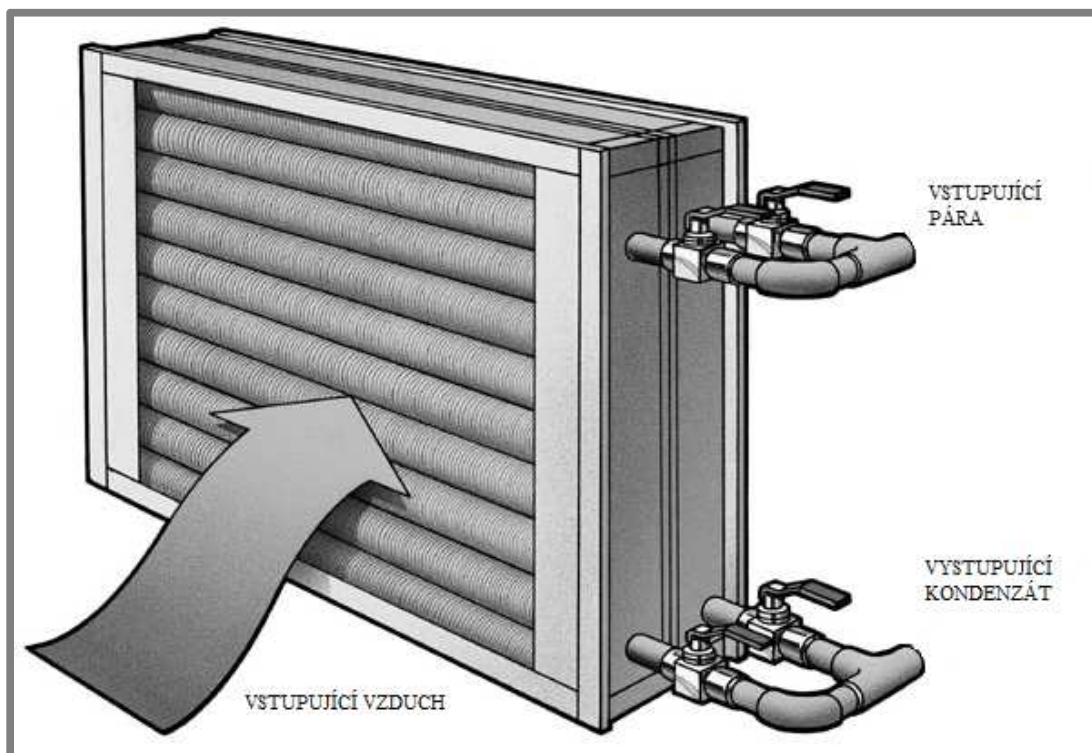
Obr. 3 Schéma deskového výměníku s křížovým proudem [6]



Obr. 4 Schéma deskového výměníku s protiproudem [6]

## 2.1.5 Parní spirála

Parní a vodní spirály jsou rovněž využívány jako rekuperační ohřivače vzduchu. Jsou používány v parních elektrárnách pro předehřev spalovacího vzduchu. Tyto předehřivače jsou často součástí předehřívací soustavy. Eliminují vznik koroze na studeném konci hlavního předehříváče spalovacího vzduchu. Občas slouží jako jediný zdroj předehřátého spalovacího vzduchu. Tyto předehřivače se skládají z přívodního potrubí malého průměru, žebrovaných trubek uspořádaných svisle nebo vodorovně do kanálu mezi ventilátor spalovacího vzduchu a hlavní ohřivač vzduchu. Spalovací vzduch proudí v mezitrubkovém prostoru křížovým tokem a je ohříván párou, která je odtažena z turbíny (viz obr. 5) nebo napájecí vodou, protékající uvnitř trubek. Někdy se používá jako teplá látka etylenglykol. Tato látka zamezuje poškození, které by mohlo vzniknout působením mrazu. [7]



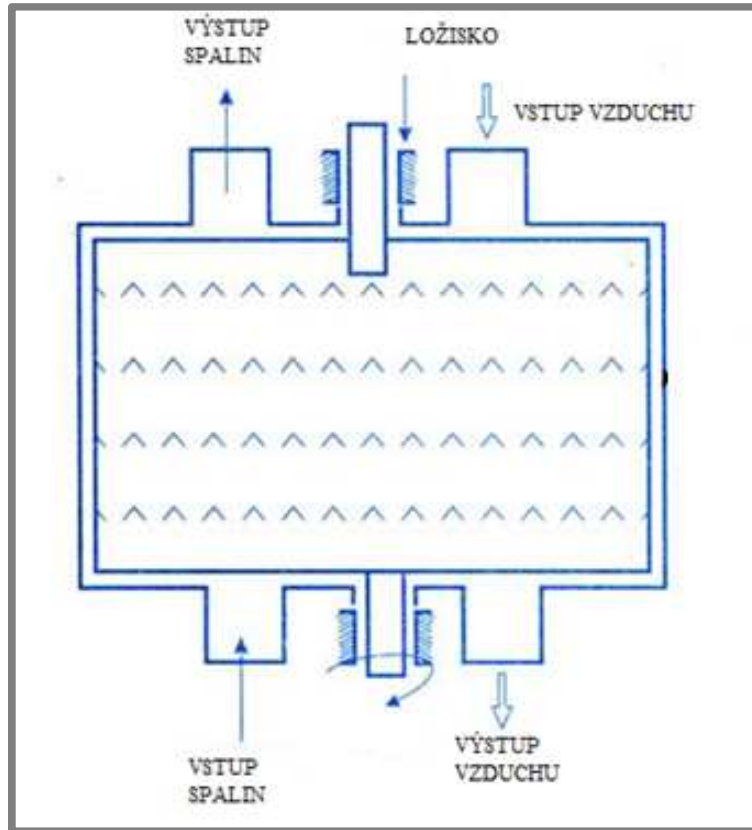
Obr. 5 Princip parní spirály [8]

## 2.2 Regenerační předehřivače vzduchu

Regenerační ohřivače spalovacího vzduchu přenášejí teplo nepřímo pomocí konvekce a vedení tepla. Akumulační médium je opakovaně vystaveno průtokům teplých a studených proudů. Pravidelné vystavení teplým a studeným proudům může být provedeno rotačně nebo spínací ovládanými ventily. Jako akumulační médium (materiál) pro přenos tepelné energie jsou voleny různé materiály. V parních elektrárnách slouží jako paměťové médium těsně zabalené svazky zvlněných ocelových desek. [1] U těchto typů předehřivačů se buď otáčejí ocelové desky, nebo plošné elementy přes proud spalin a spalovacího vzduchu nebo se otáčejí

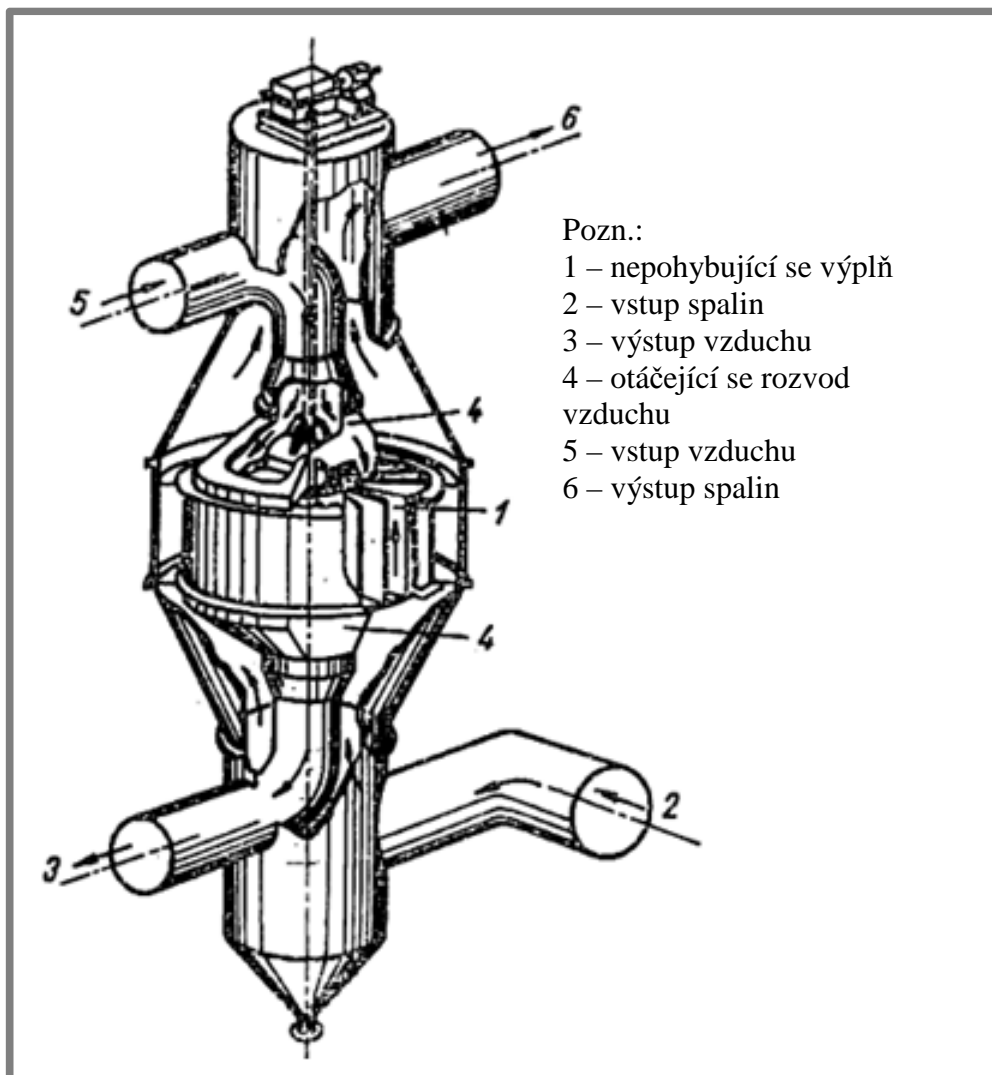


přímé potrubí, ve kterých proudí spaliny a spalovací vzduch přes pevné plošné elementy. Regenerační ohřivače spalovacího vzduchu jsou relativně kompaktní a patří mezi nejrozšířenější typy zařízení pro předehřev spalovacího vzduchu v parních elektrárnách. Jejich nejzajímavější charakteristikou je, že malé, ale významné množství vzduchu uniká do proudu spalin při rotačních operacích. Mezi nejčastěji používané předehřivače regeneračního typu patří předehřivače typu Ljungström obr. 6 a Rothemühle obr. 7. [4]



Obr. 6 Princip Ljungströмова předehřivače [4]



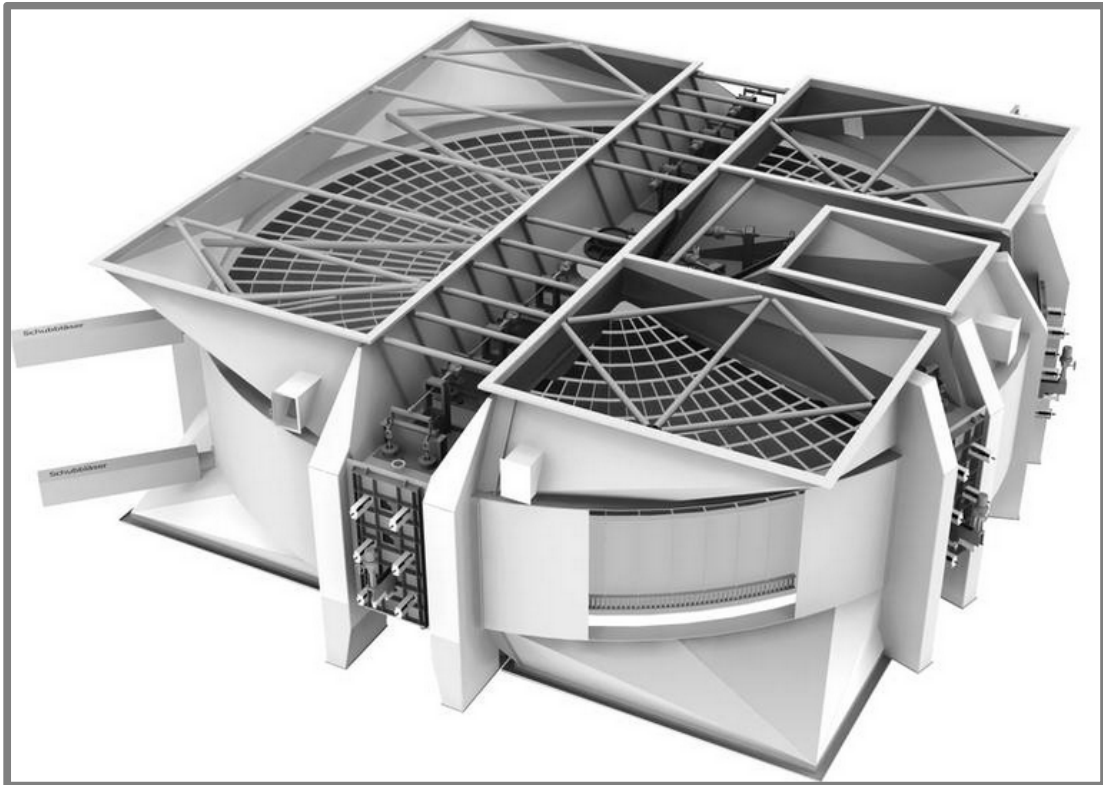


Obr. 7 Princip Rothemühleho předehříváče [4]

### 2.2.1 Regenerační ohřevná plocha

Povrchové elementy regeneračních předehříváčů vzduchu jsou kompaktně uspořádány ze dvou speciálně tvarovaných kovových desek. Každá dvojice elementů se skládá z kombinace plochých, vlnitých nebo profilovaných plechů. Válec je tvarován z vlnitého plechu. Zvlněný povrch slouží k oddělení desek pro udržení průtočných cest, zvýšení topné plochy a maximálního přestupu tepla tím, že vytvoří turbulentní proudění. Ocelové desky jsou obvykle rozmístěny 5 až 10 mm od sebe. Desky umístěné blízko k sobě a vysoce profilované plochy vykazují vysokou rychlost přenosu tepla, vysoké tlakové ztráty a vysoké zanášení. Zatímco desky umístěné dále od sebe, kde jedna deska je plochá, vykazují nízký tepelný výkon, nízké tlakové ztráty a méně se zanášejí. [1] Kombinace deskových profilů, materiálu a tloušťky je zvolena pro maximální přenos tepla, minimální pokles tlaku, dobrou čistitelnost a vysokou odolnost proti korozi. Plošné prvky jsou naskládány a svázány do soběstačných svazků a jsou instalovány do rotorů a statorů předehříváče ve dvou nebo více vrstvách. Povrchová vrstva na straně přívodu

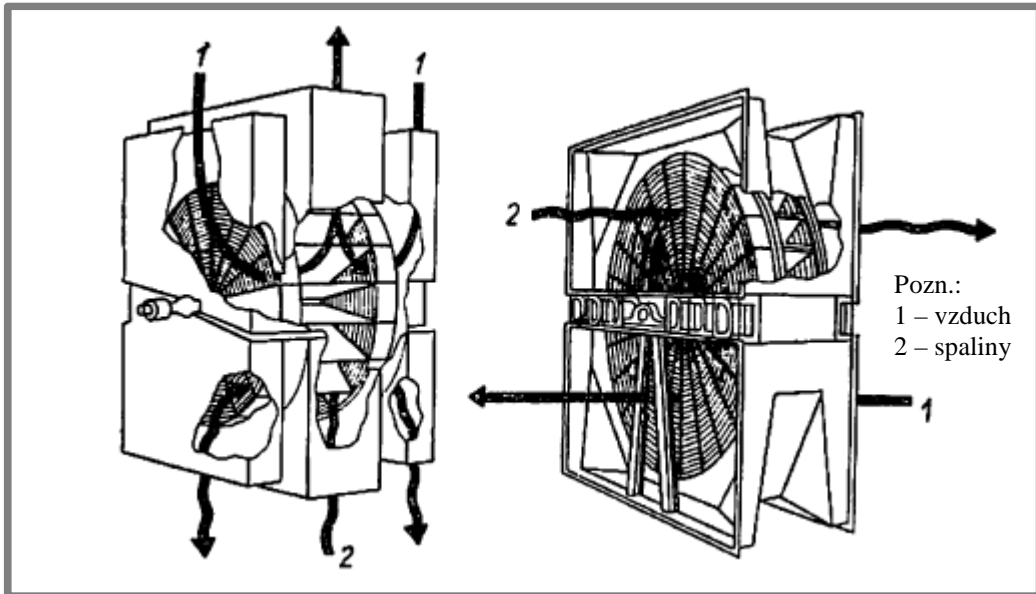
vzduchu se odlišuje od ostatních vrstev konstrukce. Studené vrstvy, které podléhají korozi a zanášení popelem jsou snadno čistitelné a vyměnitelné podle toho, co je v danou chvíli ekonomické. Otevřené profily elementů se používají pro ochranu proti korozi a pro čištění. Prakticky všechny prvky, kde jsou studené vrstvy, jsou vyrobeny z ocelových slitin odolných proti korozi, nebo pokud hrozí vysoké riziko koroze, je povrch smaltován a lakován. Teplé a střední povrchové vrstvy jsou kompaktnější než studené vrstvy, a proto se mohou používat tenčí desky. Na obr. 8 je znázorněn skutečný Ljungströmův předehříváč spalovacího vzduchu. [4]



*Obr. 8 Předehříváč typu Ljungström [9]*

### **2.2.2 Předehříváč typu Babcock – Wilcox**

Tyto předehříváče jsou novými typy Ljungströemových ohříváků. Jejich výplň je vyrobená z plechů tloušťky 0,46 mm a s mezerou mezi plechy 1,15 mm. Celková výška výplně je pak pouze 0,3 až 0,4 m vysoká oproti klasickým Ljungströemovým předehříváčům, kde je výška výplně 2 až 3 m. Zanášení není větší než u obyčejného typu výplně, kromě toho se snáze čistí. Proudění je při všech provozních režimech laminární. Lze použít buď jednodiskovou nebo dvoudiskovou konstrukci. Ta má výhodu v menším průměru rotoru pro daný výkon. Plášť i rotor je ohříván o centrální roviny rovnoměrně, díky tomu nedochází k hříbovitě deformaci jako u klasického provedení. Pro těžší provozní podmínky se používají plechy o větší tloušťce nebo se povrch plechů smaltuje. Předehříváč tohoto typu je znázorněn na obr. 9. [1]



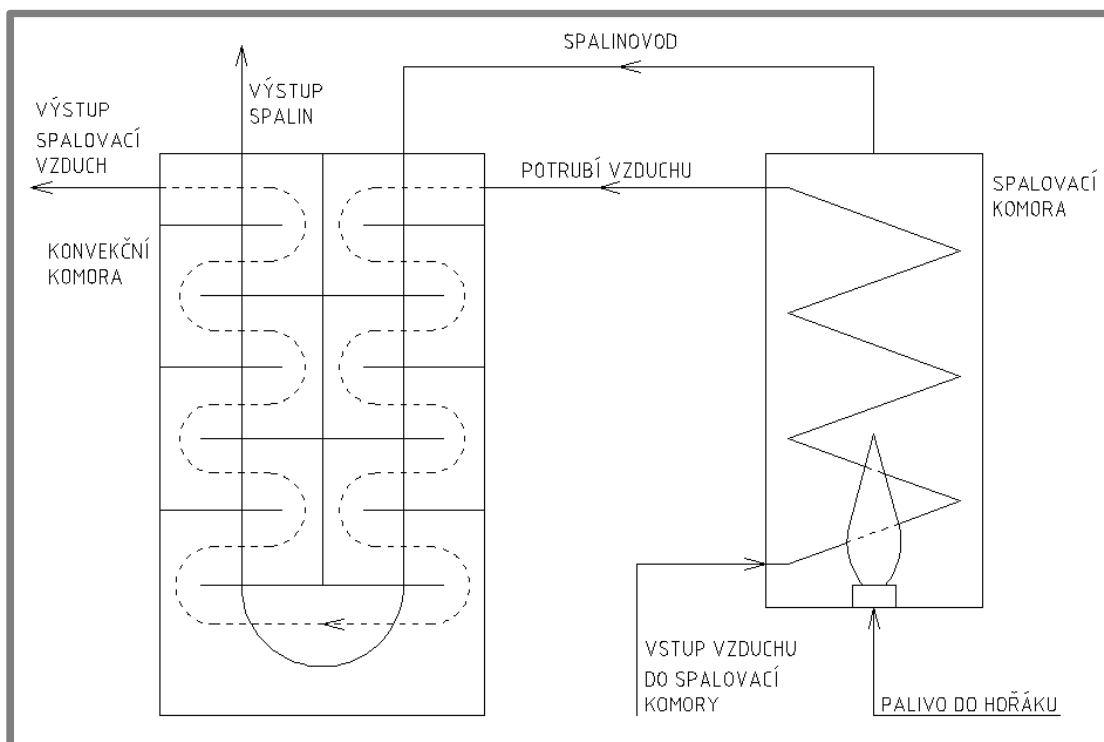
Obr. 9 Přeohřívák typu Babcock – Wilcox [1]

### 3 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

Předehříváče spalovacího vzduchu patří mezi nepostradatelné součásti spalovacích zařízení hned z několika důvodů. Je to především úspora paliva a zlepšení účinnosti spalovacího procesu. Nicméně je zde prostor pro nová inovativní řešení.

Předehříváč spalovacího vzduchu navrhovaný v této práci bude sloužit pro simulaci skutečných podmínek na procesních pecích, kde dochází k využití zbytkového tepla spalin pro předehřev spalovacího vzduchu. Aby bylo možné ve zkušebních podmínkách přesně regulovat požadovanou teplotu předehřátého vzduchu, bude mít předehříváč vlastní zdroj tepla ve formě hořáku. Teplotu spalovacího vzduchu bude možné regulovat v rozmezí od 20 do 600 °C. Teplota předehřívajícího vzduchu byla stanovena na základě potřeb průmyslu a na základě technických možností pro realizaci předehřevu spalovacího vzduchu v podmínkách zkušebny hořáků. Primárním účelem předehřátého spalovacího vzduchu bude jeho použití při testování procesních hořáků.

Zařízení pro předehřev spalovacího vzduchu bude vyrobeno pro Sekci termických procesů a čištění spalin spadající pod Ústav procesního a ekologického inženýrství. Toto zařízení bude doplňovat stávající systém spalování. Jeho principiální (blokové) schéma je znázorněno na obr. 10.



Obr. 10 Principiální (blokové) schéma experimentálního předehříváče vzduchu

## 4 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cílem diplomové práce je vytvoření návrhu a konstrukce zařízení pro předehřev spalovacího vzduchu složeného ze spalovací komory a konvekčního bloku. Přínosem tohoto konstrukčního návrhu bude zejména získání optimálních vlastností navrhovaných zařízení, které povedou k optimálním stupňům bezpečnosti a dlouhé životnosti zařízení.

Požadavky na konstrukční návrh:

- jednoduché a snadno vyrobitelné zařízení,
- zařízení musí odolat vysokému teplotnímu zatížení,
- zařízení musí splňovat požadavky na vysokou bezpečnost a životnost,
- zpracování výkresové dokumentace dle norem v programu Auto CAD.

Posledním cílem diplomové práce je vyhodnocení návrhu zařízení pro předehřev spalovacího vzduchu.

## 5 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

Celý proces řešení zadaného úkolu je rozdělen do několika částí popsaných níže, které jsou řazeny podle logické časové posloupnosti jejich výkonu.

### **Průzkum charakteristických vlastností zařízení pro předehřev spalovacího vzduchu**

Nejprve je nutné získat základní informace o zařízeních pro předehřev spalovacího vzduchu a specifikovat vlastnosti, které mají vliv na jejich provoz.

### **Seznámení s cíli práce a požadavky na konstrukci zařízení**

Tyto informace jsou nastíněny v předchozích kapitolách Formulace řešeného problému a Vymezení cílů práce.

### **Seznámení s tepelně hydraulickým výpočtem**

Výsledky tepelně – hydraulického návrhu experimentálního předehříváče spalovacího vzduchu jsou uvedeny v základních literárních pramenech pro tuto práci.

### **Nastudování předpisů a norem, spjatých s touto problematikou**

Konstrukční provedení musí odpovídat normám pro navrhování tlakových nádob a potrubí.

### **Návrh konstrukčního řešení zařízení pro předehřev spalovacího vzduchu**

Bude vytvořen předběžný návrh zařízení pro předehřev spalovacího vzduchu, který bude respektovat normy. Při konstrukčním řešení bude brán ohled na provozní podmínky zařízení a na požadavky bezpečnosti a životnosti.

### **Analytický výpočet navrženého zařízení**

Pomocí znalostí získaných z oblasti navrhování procesních zařízení bude vypočtena tloušťka stěn jednotlivých komponent zařízení. Dále pak bude proveden výpočet tepelných dilatací zařízení.

### **Analýza ve výpočtovém programu ANSYS Workbench**

V programu ANSYS Workbench bude proveden výpočet podpěry trubkovnice s následným vyhodnocením koeficientu bezpečnosti. Také bude provedena kontrola analytického výpočtu tepelných dilatací trubkovnice se svazkem trubek.

### **Vytvoření výkresové dokumentace**

Na základě vytvořeného modelu v programu SolidWorks bude vytvořena výkresová dokumentace zařízení pro předehřev spalovacího vzduchu.

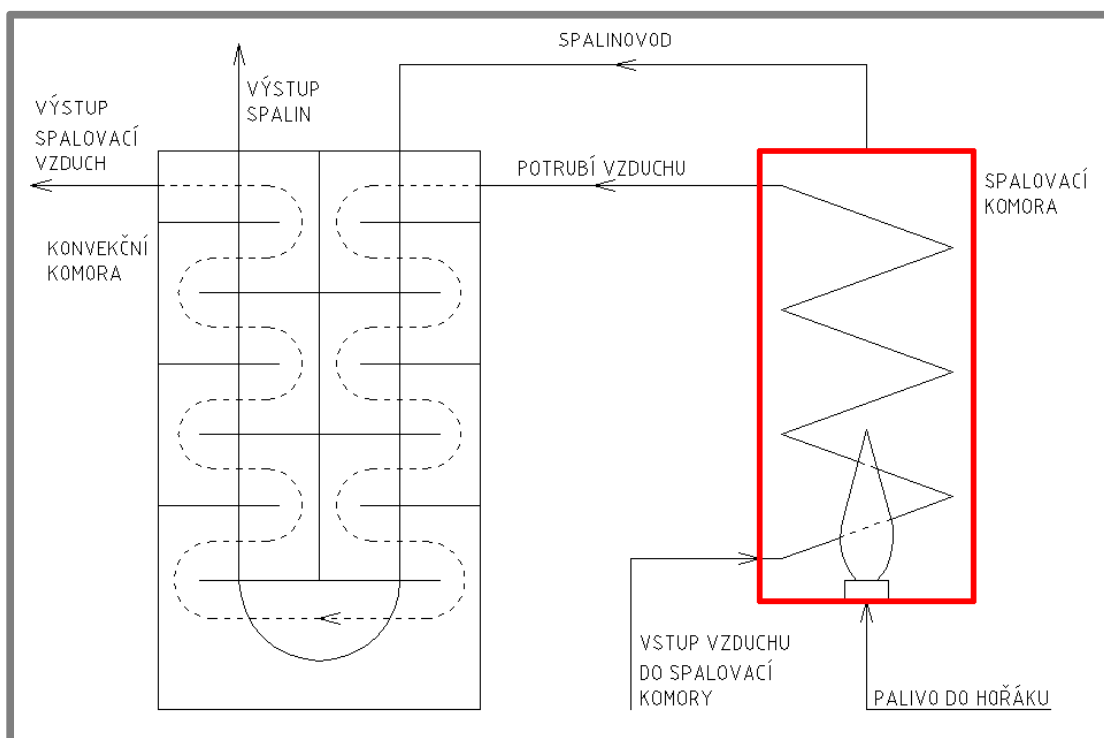
### **Zhodnocení výsledků**

V závěru budou zhodnoceny výsledky výpočtu, které by měly dát přesnější náhled na vhodnost konstrukce zařízení pro předehřev spalovacího vzduchu.

## 6 PEVNOSTNÍ VÝPOČET NAVRHOVANÉHO ZAŘÍZENÍ

### 6.1 SPALOVACÍ KOMORA

Spalovací komora tvoří první stupeň experimentálního předehřívače vzduchu a je zvýrazněna v blokovém schématu na obr. 11. Komora se skládá ze dvou válcových skořepin. V prostoru mezi skořepinami proudí ohříváný spalovací vzduch. Výpočet válcových plášťů je proveden v souladu s normou ČSN EN 13445. Výsledná tloušťka materiálů je velmi důležitá pro konstrukční návrh a ekonomickou rozvahu.



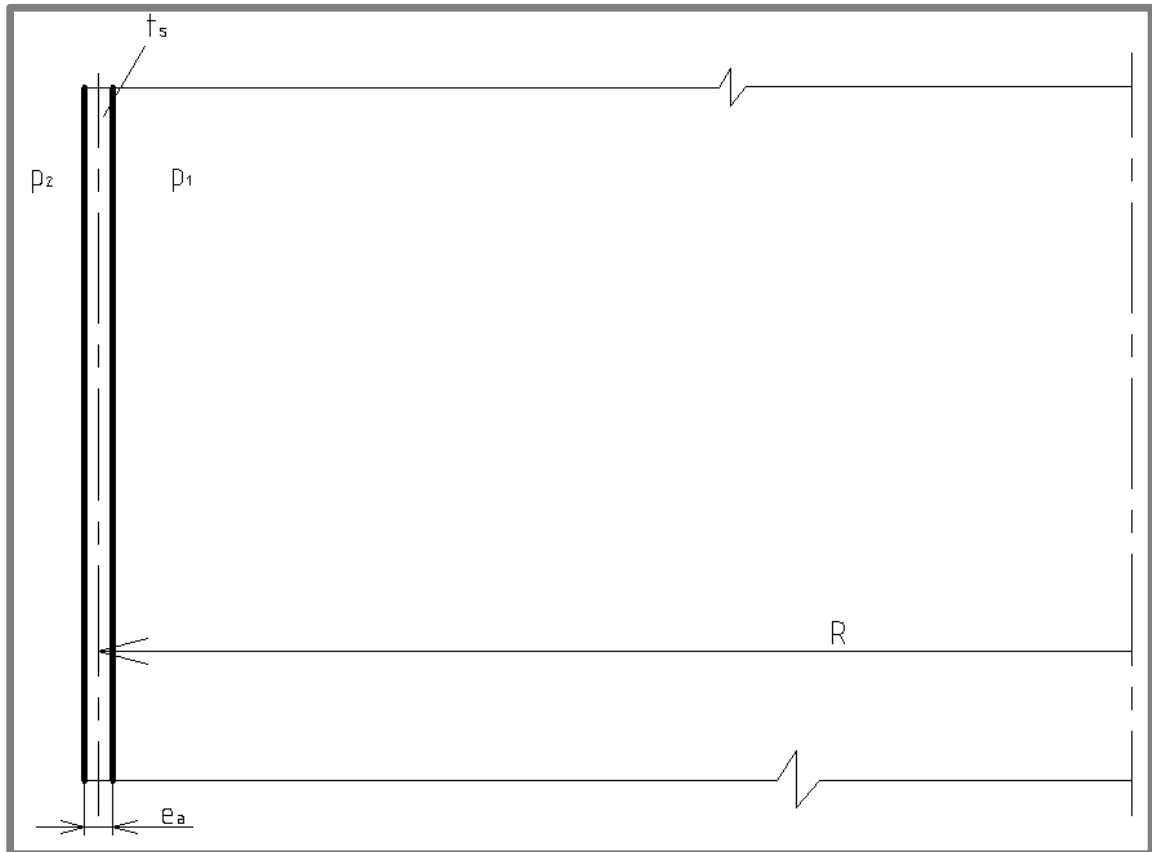
Obr. 11 Blokové schéma experimentálního předehřívače – spalovací komora

#### 6.1.1 VNITŘNÍ VÁLEC SPALOVACÍ KOMORY

Vnitřní válec spalovací komory je namáhán vnějším tlakem a zároveň vnitřním podtlakem. Vzhledem k tomu, že uvnitř válce probíhá proces hoření a proudí zde horké spaliny, je zvýšena teplota stěny. To má významný vliv na vlastnosti materiálu. Pro navrhovaný plášť byl zvolen materiál 1.4845. Tato situace je znázorněna na obr. 12. Důležitá data pro výpočet tloušťky stěny jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Základní hodnoty pro výpočet vnitřního válce spalovací komory

Veličina	$p_1$ [MPa]	$p_2$ [MPa]	$t_s^{[10]}$ [°C]	$R^{[10]}$ [mm]	$L$ [mm]	$R_{p0,2/700}^{[13]}$ [MPa]	$E^{[13]}$ [MPa]
Hodnota	0,111275	0,111325	700	352	1400	80	200 000



Obr. 12 Schématické znázornění situace vnitřního válce

Výpočet pro návrh skořepin zatížených vnějším tlakem se používá pro nevyztužené válcové a kuželové pláště, vyztužené válcové a kuželové pláště, kulové pláště a klenutá dna. Pokud je skořepina zatížena dalším ovlivňujícím zatížením, musí být zrealizováno opatření, a to například zvětšení tloušťky stěny skořepiny, nebo přidání vyztužení. Tyto předpisy neplatí v oblasti tečení daného materiálu. [11]

#### Dovolené elastické mezní napětí pro skořepinu $\sigma_e$

Tloušťka stěny skořepiny, na kterou působí vnější tlak, nesmí být menší než tloušťka stěny, která je vyžadována normou ČSN EN 13445 pro shodný tlak působící jako vnitřní se součinitelem hodnoty spoje. Jelikož je tato válcová skořepina vyrobena z materiálu 1.4845 a tato ocel je austenitická, je dovolená elastická mez dána rovnicí (1). [11]



$$\sigma_e = \frac{R_{p0,2/700}}{1,25} = \frac{80 \text{ MPa}}{1,25} = 64 \text{ MPa} \quad (1)$$

Pro skořepiny, na které působí vnější zatížení, je použita hodnota minimálního součinitele bezpečnosti pro konstrukční podmínky  $S_1 = 1,5$  a pro zkušební podmínky  $S_2 = 1,1$ . [11]

#### Nevyztužené délka válcového pláště L

V našem případě je nevyztužená délka válcového pláště skořepiny dána tepelně hydraulickým výpočtem. Tímto výpočtem bylo zjištěno, že minimální délka pro splnění zadaných podmínek je  $L = 1200 \text{ mm}$ . [10] Z konstrukčních důvodů zabudování přívodu a odvodu spalovacího vzduchu a zároveň zachování podmínek pro přestup tepla ve spalovací komoře byla tato výška navýšena na  **$L = 1400 \text{ mm}$** . [11]

#### Výpočet tlaku $P_y$

Tlak  $P_y$  je dán vztahem (2), který odpovídá střednímu obvodovému napětí ve středu pole na válcovém plášti, při kterém je dosaženo meze kluzu. [11]

$$P_y = \frac{\sigma_e \cdot e_a}{R} = \frac{64 \text{ MPa} \cdot 2 \text{ mm}}{352 \text{ mm}} = 0,3636 \text{ MPa} \quad (2)$$

#### Výpočet tlaku $P_m$

Tlak  $P_m$  je dán vztahem (5) a odpovídá teoretickému tlaku při ztrátě stability válcového pláště skořepiny bez odchylky od stanoveného stavu. Do rovnice (5) je potřebné stanovit několik veličen. Modul pružnosti v tahu **E** je materiálová charakteristika viz tabulka č. 1. Hodnota  $\varepsilon$  je odečtena z grafu, který je součástí normy. Pro určení hodnoty  $\varepsilon$  je zapotřebí vypočítat několik geometrických charakteristik skořepiny. [11]

$$a = \frac{L}{2 \cdot R} = \frac{1400 \text{ mm}}{2 \cdot 352 \text{ mm}} = 1,98 \quad (3)$$

$$b = \frac{2 \cdot R}{e_a} = \frac{2 \cdot 352 \text{ mm}}{2 \text{ mm}} = 176 \quad (4)$$

Pomocí těchto charakteristik je odečtena z grafu hodnota  $\varepsilon = \mathbf{0,00013}$ . [11]

$$P_m = \frac{E \cdot \varepsilon \cdot e_a}{R} = \frac{200\,000 \text{ MPa} \cdot 0,00013 \cdot 2 \text{ mm}}{352 \text{ mm}} = 0,1477 \text{ MPa} \quad (5)$$

### Výpočet tlaku Pr

Je určen poměr hodnot  $P_m/P_y$ . Tento poměr je určující pro získání hodnoty poměru  $P_r/P_y$ , který je odečten z grafu uvedeného v normě. [11]

$$\frac{P_m}{P_y} = \frac{0,3636 \text{ MPa}}{0,0,1477 \text{ MPa}} = 0,406 \quad (6)$$

$$\frac{P_r}{P_y} = 0,19 \quad (7)$$

Z tohoto poměru vyplívá samotná hodnota tlaku  $P_r$ , který odpovídá dolní výpočtové mezi tlaku při zborcení skořepiny.

$$P_r = 0,19 \cdot P_y = 0,19 \cdot 0,0,3636 \text{ MPa} = 0,0691 \text{ MPa} \quad (8)$$

### Stanovení diferenčního tlaku p

$$p = p_2 - p_1 = 0,111325 \text{ MPa} - 0,101275 = 0,01005 \text{ MPa} \quad (9)$$

### Podmínky

Pro zjištění, zda je navržená tloušťka vhodná, musí platit podmínka v rovnici (10) pro konstrukční podmínky a v rovnici (11) pro zkušební podmínky. [11]

$$p < \frac{P_r}{S_1} \quad (10)$$

$$0,01005 \text{ MPa} < \frac{0,0691 \text{ MPa}}{1,5}$$

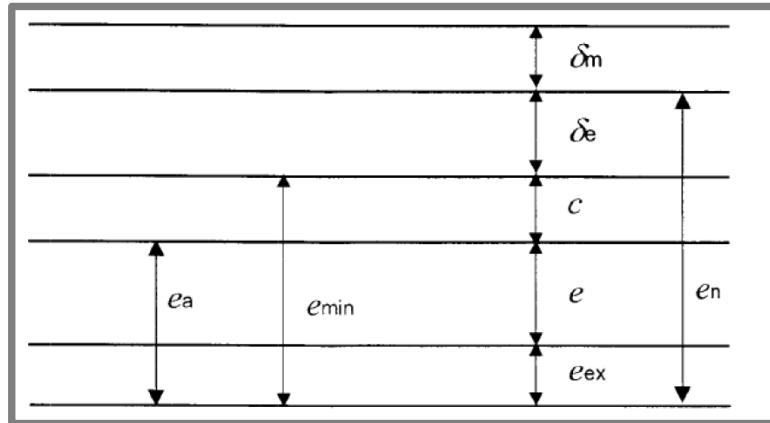
$$0,01005 \text{ MPa} < 0,0461 \text{ MPa}$$

$$p < \frac{P_r}{S_2} \quad (11)$$

$$0,01005 \text{ MPa} < \frac{0,0691 \text{ MPa}}{1,1}$$

$$0,01005 \text{ MPa} < 0,0628 \text{ MPa}$$

Z výsledků rovnice (10) a (11) vyplývá, že analyzovaná tloušťka materiálu ( $e_a = 2 \text{ mm}$ ) vyhovuje. Tato tloušťka je pouze návrhová, je nutné k ní přičíst přídavek na korozi a absolutní hodnotu možné záporné tolerance na jmenovité tloušťce (viz obr. 13). Proto je výsledná jmenovitá tloušťka stěny  $e_n = 3 \text{ mm}$ . [12]



Obr. 13 Definice tloušťky stěny [11]

### Výpočet dilatace vnitřního válce

Výška vnitřního válce

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T = 19,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 1400 \text{ mm} \cdot (740 \text{ } ^\circ\text{C} - 20 \text{ } ^\circ\text{C}) = 19,55 \text{ mm} \quad (12)$$

Průměr vnitřního válce

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T = 19,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 708 \text{ mm} \cdot (740 \text{ } ^\circ\text{C} - 20 \text{ } ^\circ\text{C}) = 9,889 \text{ mm} \quad (13)$$

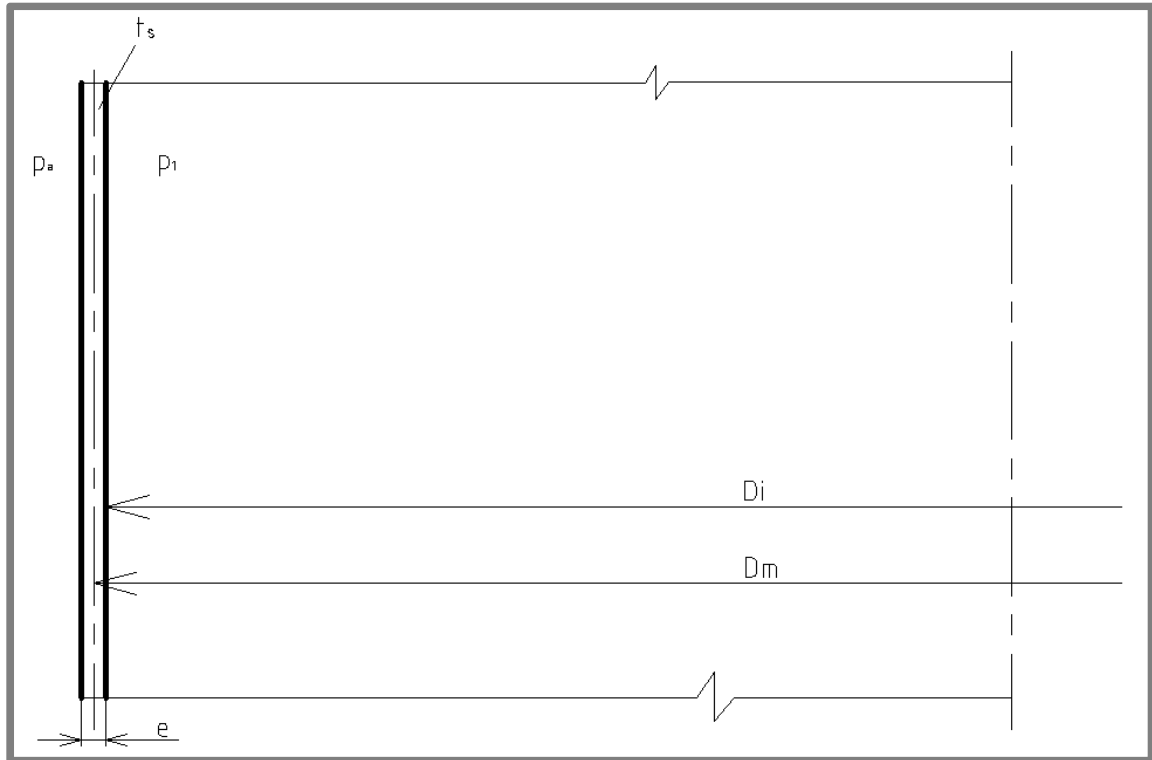
Na vnitřním válci je navařena spirála. Tato spirála musí mít takový rozměr, aby nedošlo při zahřátí k poškození vnějšího válce.

## 6.1.2 VNĚJŠÍ VÁLEC SPALOVACÍ KOMORY

Na vnější válec spalovací komory působí z jedné strany atmosférický tlak a z druhé strany přetlak. Uvnitř válce proudí přehříváný spalovací vzduch, který zvyšuje teplotu stěny válce, což má vliv na jeho materiálové vlastnosti. Vnější válec je vyroben z materiálu 1.0036. Situace je znázorněna na obr. 14. Vstupní data pro výpočet jsou pak uvedena v tab. 3. Výpočet je proveden v souladu s normou ČSN 13445.

Tab. 2 Základní hodnoty pro výpočet vnějšího válce spalovací komory

Veličina	$p_a$ [MPa]	$p_l$ [MPa]	$t_s^{[10]}$ [°C]	$D_i^{[10]}$ [mm]	$D_m$ [mm]	$R_m^{[12]}$ [MPa]	$E^{[12]}$ [MPa]
Hodnota	0,101325	0,111325	200	825	829	340	200 000



Obr. 14 Schematické znázornění situace vnějšího válce

Norma určuje, že tento výpočet je možné použít pro axiálně symetrické skořepiny válcové, kuželové, kulové, klenutá dna a pro výpočet přechodů kuželových a válcových skořepin zatížených vnitřním tlakem. [11]

Pro výpočet tloušťky stěny skořepiny je důležité určit několik hodnot.

#### Dovolené namáhání $f_d$

Dovolené namáhání, pro neaustenitické oceli uvedené v rovnici (15) musí být děleno dodatečným součinitelem bezpečnosti, který nesmí být menší než 1,2. Není-li mez kluzu pro nelegované oceli specifikována pro vyšší teploty, smí být použita rovnice (14). [11]

$$R_{p0,2/200} = R_m \cdot \frac{720 - t_s}{1400} = 340 \text{ MPa} \cdot \frac{720 - 200^\circ\text{C}}{1400} = 126,3 \text{ MPa} \quad (14)$$

$$f = \min\left(\frac{R_{p0,2/t}}{1,5}; \frac{R_m}{2,4}\right) = \min\left(\frac{126,3 \text{ MPa}}{1,5}; \frac{340 \text{ MPa}}{2,4}\right) \quad (15)$$

$$f = \min(84,2 \text{ MPa}; 141,6 \text{ MPa})$$

Výsledné dovolené napětí je ještě menší o dodatečný součinitel bezpečnosti.

$$f_d = \frac{\min f}{1,2} = \frac{84,2 \text{ MPa}}{1,2} = 70,16 \text{ MPa} \quad (16)$$

Součinitel hodnoty svarového spoje  $z$ , pro standartní zatěžovací stavy je uveden v tab. 4. [11]

Tab. 3 Hodnoty součinitele svarového spoje [11]

$z$	1	0,85	0,7
zkušební skupina	1,2	3	4

Zkušební skupině 3 odpovídá součinitel svarového spoje  $z = 0,85$ .

#### Stanovení diferenčního tlaku $p$

$$p = p_1 - p_a = 0,111325 \text{ MPa} - 0,10135 \text{ MPa} = 0,01 \text{ MPa} \quad (17)$$

#### Stanovení požadované tloušťky

Po dosazení získaných hodnot do rovnice (18) je vypočítána teoretická hodnota požadované tloušťky stěny skořepiny. [11]

$$e = \frac{p \cdot D_i}{2 \cdot f_d \cdot z - p} = \frac{0,01 \text{ MPa} \cdot 825 \text{ mm}}{2 \cdot 70,16 \text{ MPa} \cdot 0,85 - 0,01 \text{ MPa}} = 0,069 \text{ mm} \quad (18)$$

#### Určení skutečné tloušťky stěny skořepiny

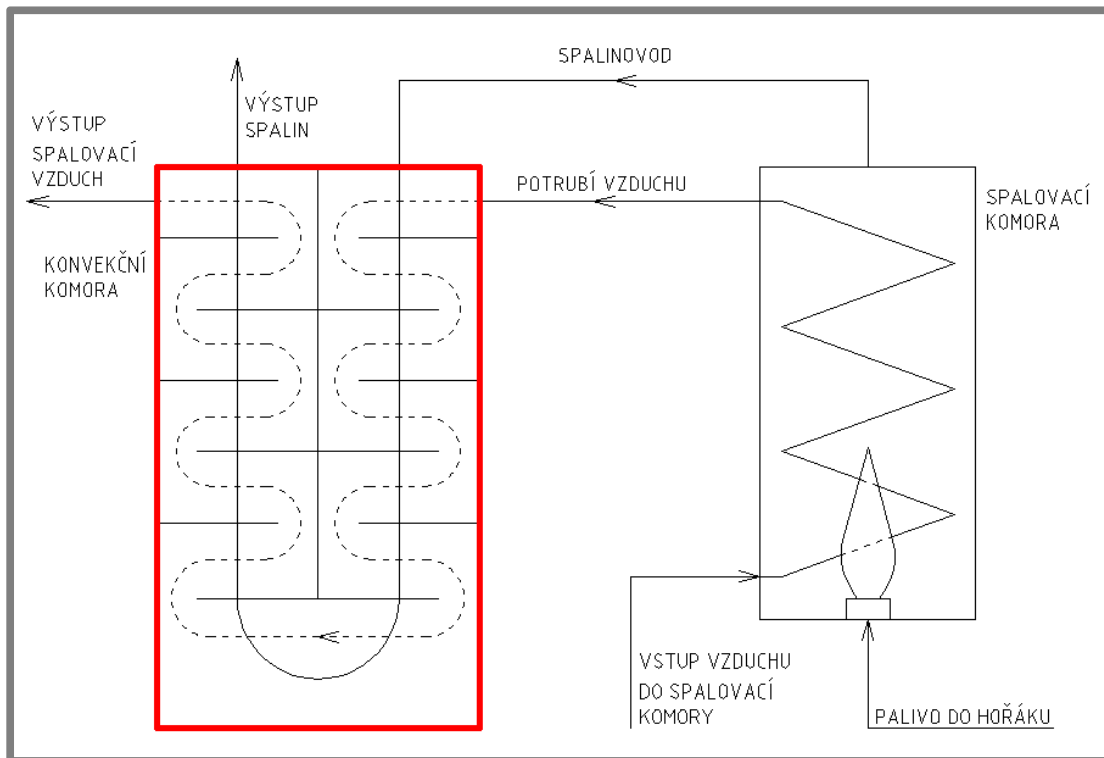
Hodnota analyzované tloušťky, po zaokrouhlení vypočítané hodnoty, je  $e_a = 0,7 \text{ mm}$ . [11] Pak maximální přípustný tlak, který snese daná tlaková nádoba, je dán rovnicí (19).

$$p_{\max} = \frac{2 \cdot f_d \cdot z \cdot e_a}{D_m} = \frac{2 \cdot 70,16 \text{ MPa} \cdot 0,85 \cdot 0,7 \text{ mm}}{829 \text{ mm}} = 0,101 \text{ MPa} \quad (19)$$

K analyzované tloušťce je potřeba ještě přičíst korozní přírůstek a absolutní hodnotu možné záporné tolerance na jmenovité tloušťce. Vzhledem k tomu, že bude plášť přivařen ke společnému dnu, je zvolena tloušťka materiálu 3 mm, aby byl svar dostatečně kvalitní a nedošlo k provaření plechu.

## 6.2 KONVEKČNÍ BLOK

Na obr. 15 je zvýrazněn konvekční blok v principiálním schématu. Níže je uveden výpočet podpěry trubkovnice. Dále je na obr. 16 znázorněna trubkovnice se svazkem U trubek a přepážkami. Pro tuto část zařízení je spočítána dilatace materiálu.



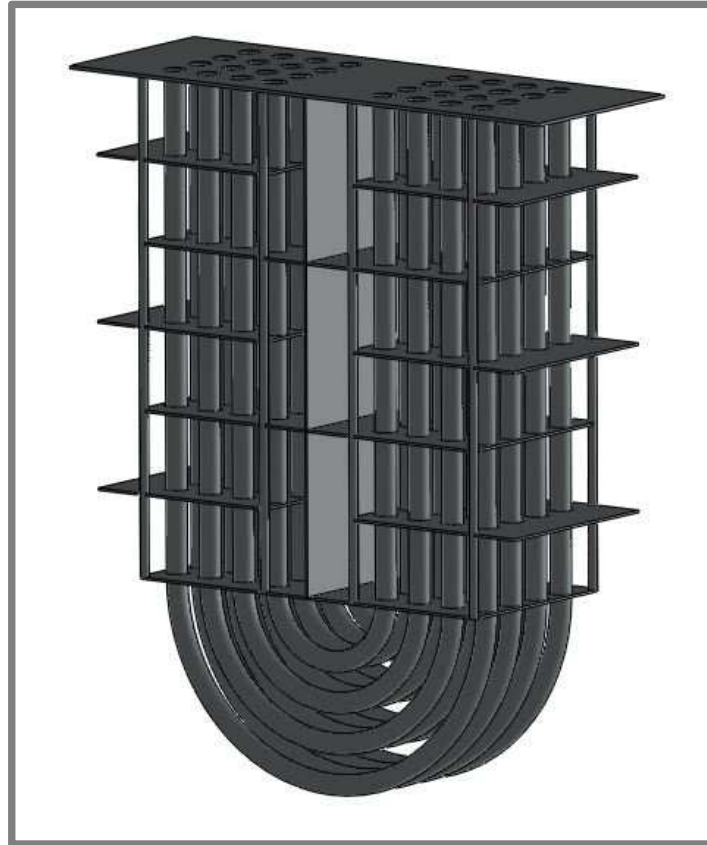
Obr. 15 Blokové schéma experimentálního předehříváče – konvekční blok

### Výpočet působících sil

Výpočet působících sil na podpěry trubkovnice se odvíjí od rozměrů svazku trubek s trubkovnicí a přepážkami. Rozměry a specifikace zařízení jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 4 Technická specifikace svazku trubek a trubkovnice

Veličina	Šířka [mm]	Délka [mm]	Výška [mm]	Hmotnost [kg]
Hodnota	490	1380	1690	361

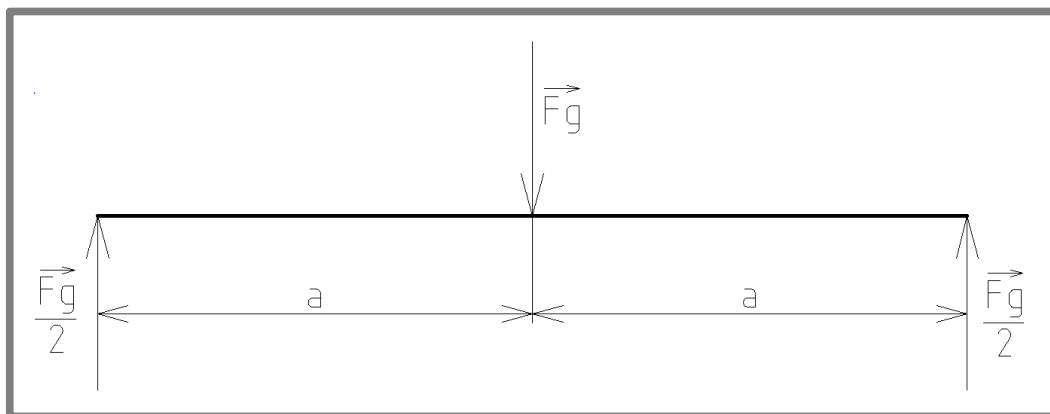


Obr. 16 Svazek trubek s trubkovnicí a přepážkami

Z tab. 5 je vidět, že hmotnost svazku trubek s trubkovnicí je 361 kg. Z toho je spočítána tíhová síla  $F_g$  v rovnici (20).

$$F_g = m \cdot g = 361 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 3542 \text{ N} \quad (20)$$

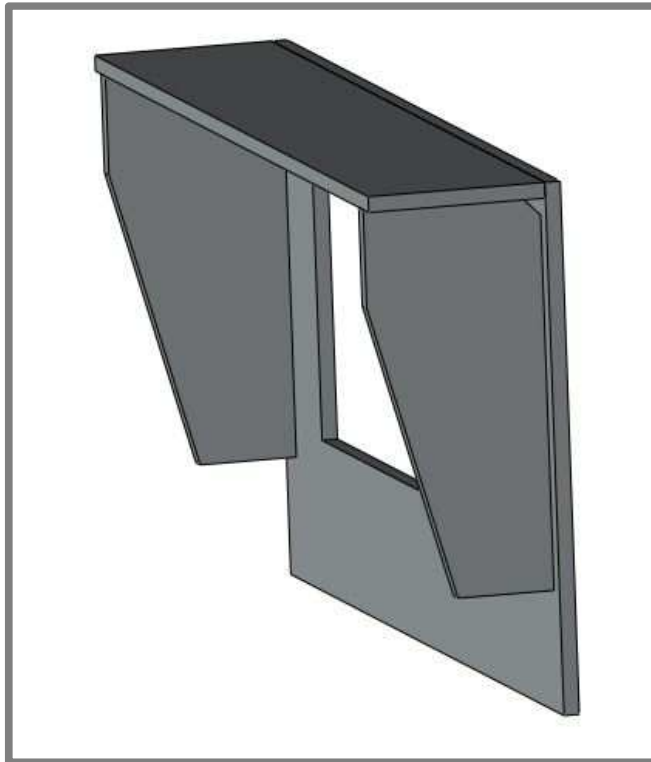
Je zaveden předpoklad, že těžiště svazku trubek s trubkovnicí je v ose zařízení. S ohledem na tento předpoklad je rozdělena tíhová síla na obě strany stejně. Silové působení je zobrazeno na obr. 17.



Obr. 17 Silové působení

$$F_1 = F_2 = \frac{F_g}{2} = \frac{3542N}{2} = 1771N \Rightarrow 1800N \quad (21)$$

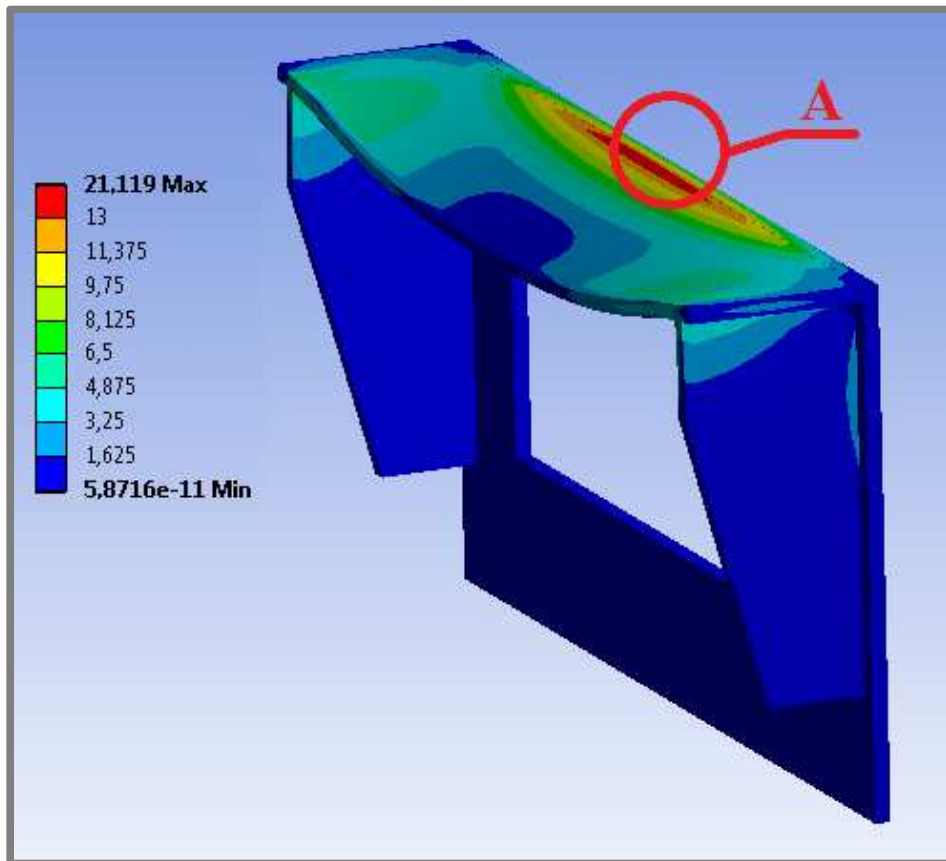
Podpěra trubkovnice znázorněná na obr. 18 je zatížena silou  $F_1$ , respektive silou  $F_2$ . Kolem podpěry proudí horké spaliny, což má vliv na materiálové vlastnosti. Konzole, na kterou působí největší teplota, je vyrobená z materiálu 1.4845. Konstrukce je přivařena ke stěně konvekčního bloku a trubkovnice je na podpoře uložena volně.



*Obr. 18 Podpěra trubkovnice*

Pro výpočet je použit program ANSYS Workbench. Z programu je získána hodnota redukovaného napětí v nejnebezpečnějším místě viz obr. 19. Hodnota je vyhodnocena k dovolenému napětí a je tak získán koeficient bezpečnosti v kritickém místě.





Obr. 19 Numerické řešení napětí

Z obrázku plyne, že největší napětí je v bodě A. Koeficient bezpečnosti k tomuto bodu vzhledem k dovolenému napětí je:

$$f_d = \min\left(\frac{R_{p0,2/t}}{1,5}, \frac{R_{m/t}}{2,4}\right) = \min\left(\frac{80 \text{ MPa}}{1,5}, \frac{300 \text{ MPa}}{2,4}\right) \quad (22)$$

$$f_d = \min(53,3 \text{ MPa}; 125 \text{ MPa}) \Rightarrow f_d = 53,3 \text{ MPa}$$

$$A: k_A = \frac{f_d}{\sigma_A} = \frac{53,3 \text{ MPa}}{21,2 \text{ MPa}} = 2,5 \quad (23)$$

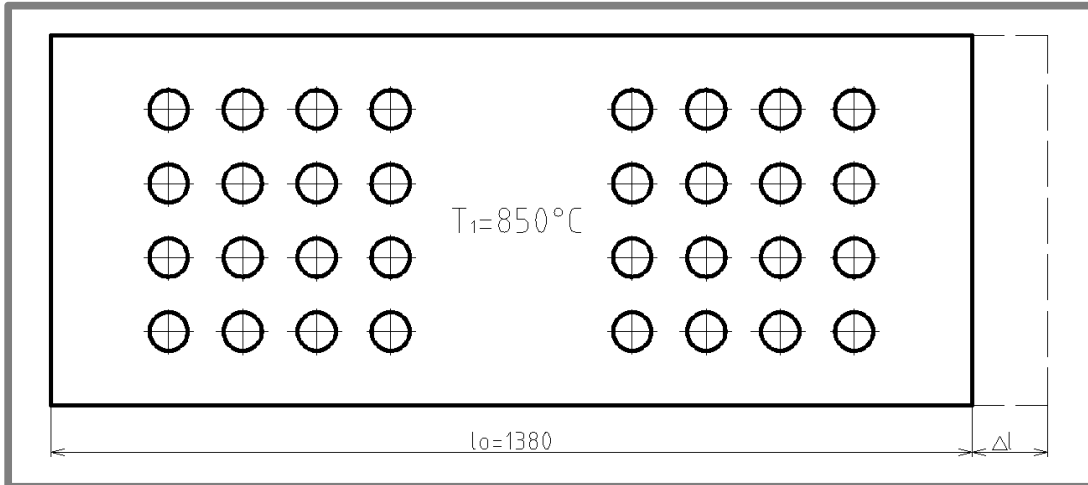
Z rovnice (23) je vidět, že koeficient bezpečnosti je  $k_A = 2,5$  což je pro tuto konstrukci dostačující.

#### Výpočet dilatací trubkovnice se svazkem trubek

Trubkovnice se svazkem trubek a přepážkami je usazena v konvekčním U bloku na podpěrách vypočítaných výše. Zařízení je vyrobeno z materiálu 1.4845. Jelikož proudí okolo trubkovnice a uvnitř trubek horké spaliny, které mohou mít teplotu až 1330 °C, dochází k významnému ohřátí materiálu zařízení až na teplotu 850 °C. To má za důsledek dilataci materiálu jednotlivých

částí svazku trubek. Rovnice (24) je názorným příkladem výpočtu dilatace délky trubkovnice. Tato situace je také znázorněna na obr. 20. Souhrn výsledků dilatací ostatních důležitých rozměrů zařízení je uveden v tab. 6.

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T = 19,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 1380 \text{ mm} \cdot (850 \text{ } ^\circ\text{C} - 20 \text{ } ^\circ\text{C}) = 22,22 \text{ mm} \quad (24)$$

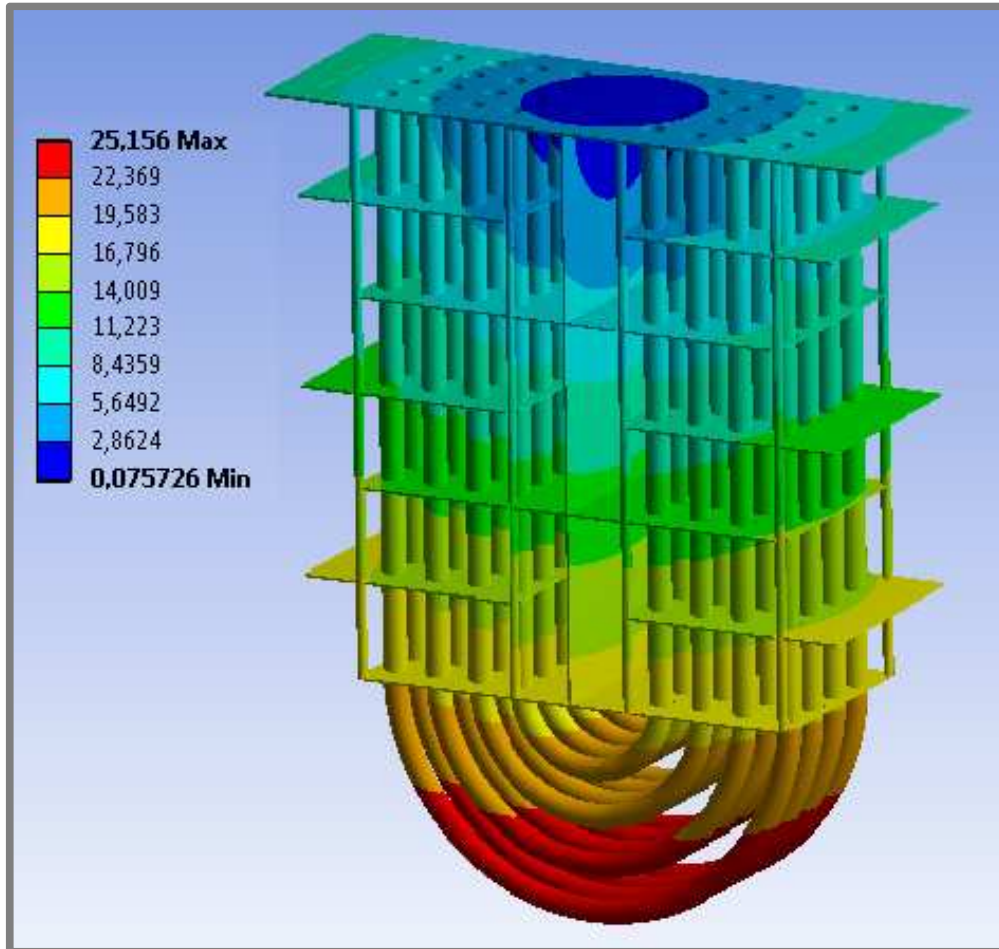


Obr. 20 Příklad dilatace trubkovnice

Tab. 5 Dilatace součástí zařízení

	$l_0$ [mm]	$\Delta l$ [mm]	$l$ [mm]
Délka trubkovnice	1380	22,22	1402,22
Šířka trubkovnice	490	7,89	497,89
Délka trubky R160	1370	22,06	1392,06
Délka trubky R258	1468	23,64	1491,64
Délka trubky R356	1566	25,22	4088
Délka trubky R454	1664	26,79	1690,79
Průměr trubky	50,8	0,82	51,62
Délka vodor. přepážky	491	7,906	498,906
Šířka vodor. přepážky	490	7,89	497,89
Průměr díry v přepážce	53,5	0,86	54,36
Délka svislé přepážky	1200	19,32	1219,32
Šířka svislé přepážky	490	7,89	497,89

Pro kontrolu analytického řešení je použit program ANSYS Workbench. Vzhledem k tomu, že se jedná o tenkostěnné zařízení, je pro řešení použit zjednodušený shell model. Z programu jsou získány hodnoty dilatací v jednotlivých místech zařízení (viz obrázek 21).

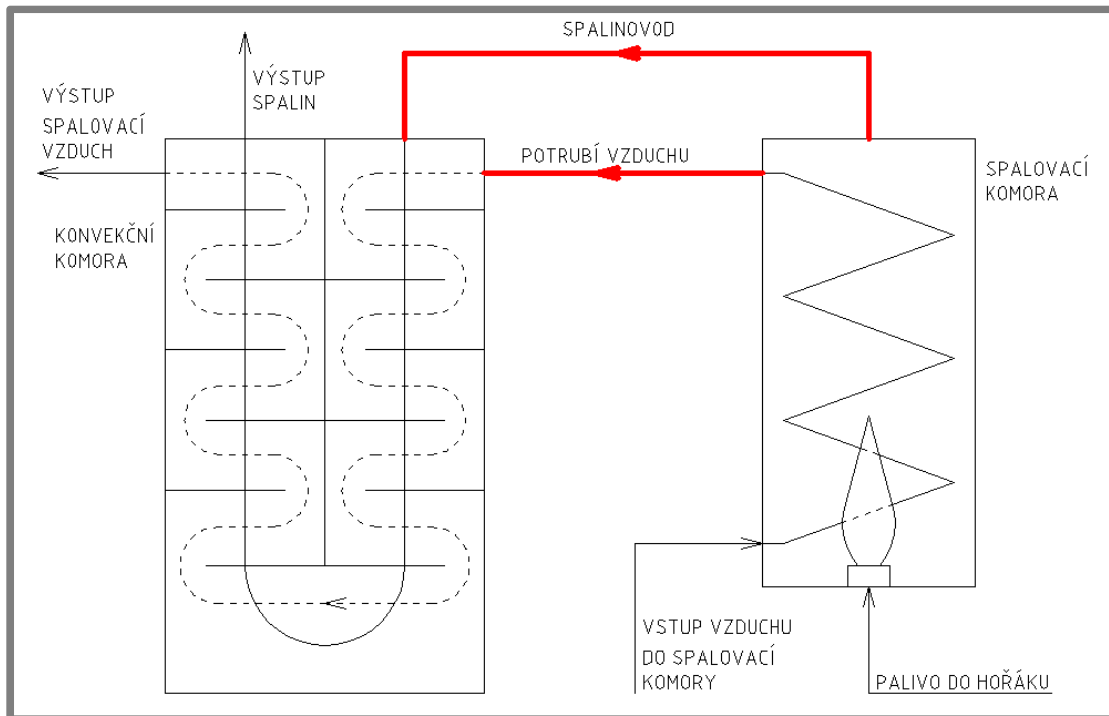


Obr. 21 Numerická kontrola dilatací

Z obrázku plyne, že hodnoty dilatací jsou o něco menší, než při analytickém řešení, ale hodnoty jsou si blízké. Nepřesnost je způsobena použitím zjednodušeného shell modelu.

### 6.3 SPOJOVACÍ POTRUBÍ

Nedílnou součástí navrhovaného zařízení je spojovací potrubí mezi prvním stupněm předehřívače (spalovací komorou) a druhým stupněm předehřívače (konvekční částí). To zahrnuje jednak spojovací potrubí pro spaliny, tak i spojovací potrubí pro spalovací vzduch. To je zvýrazněno v blokovém schématu na obr. 22. Výpočet tloušťky potrubí je proveden v souladu s normou ČSN EN 13480. Nároky výpočtu této normy platí pro zatížení převážně necyklické povahy. Uvažuje se, že 1000 plných zatěžovacích tlakových cyklu nevede k únavové poruše navrhované potrubní části. [14]



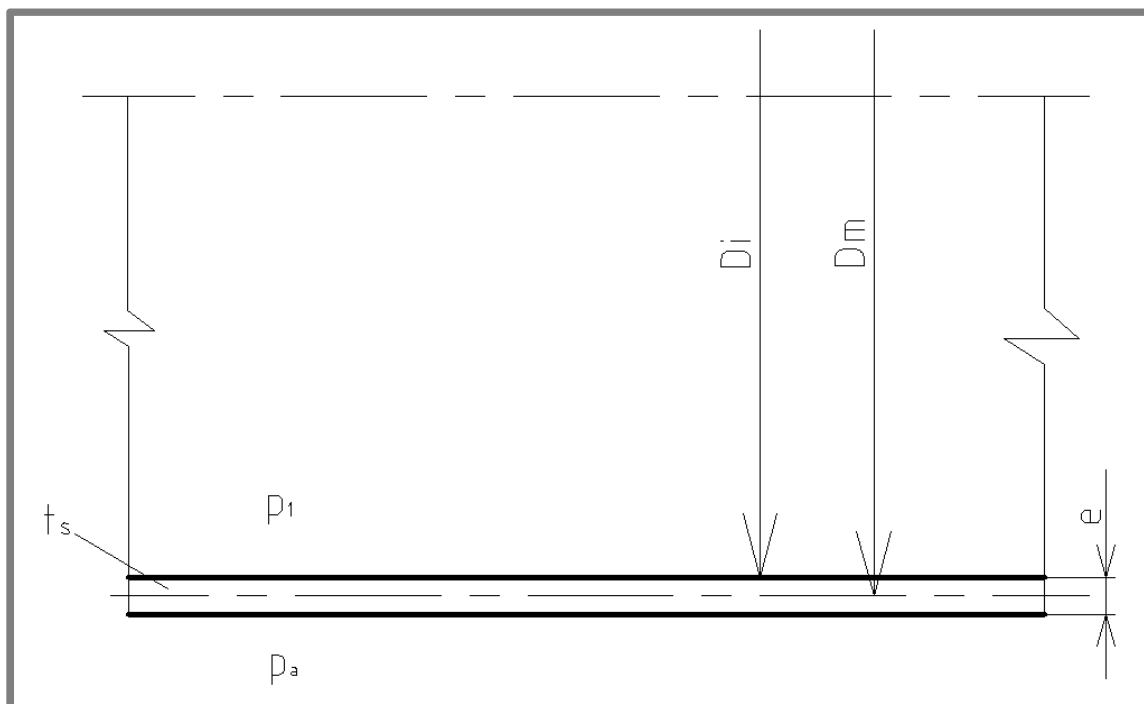
Obr. 22 Blokové schéma experimentálního předehříváče – spojovací potrubí

### 6.3.1 Potrubí spalovacího vzduchu

Toto potrubí, které vede spalovací vzduch ze spalovací komory do konvekčního bloku, je namáháno vnitřním tlakem. Současně zde proudí horký vzduch, který zvyšuje teplotu stěny a tím zhoršuje materiálové vlastnosti. Potrubí je vyrobeno z materiálu 1.0036. Rychlost proudícího vzduchu je cca 15 m/s. Schématické znázornění situace je na obr. 23. Základní údaje pro výpočet jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 6 Základní hodnoty pro výpočet potrubí spalovacího vzduchu

Veličina	$p_a$ [MPa]	$p_1$ [MPa]	$t_s^{[10]}$ [°C]	$d_i$ [mm]	$d_o$ [mm]	$R_{obl}$ [mm]	$R_p^{[12]}$ [MPa]	$R_m^{[12]}$ [MPa]
Hodnota	0,101325	0,109525	200	210,1	219,1	328	180	340



Obr. 23 Schematické znázornění potrubí spalovacího vzduchu

Dovolené namáhání je stanoveno stejně jako pro výpočet vnějšího válce spalovací komory, viz rovnice (14), (15), (16). Z toho vyplývá, že hodnota dovoleného napětí je  $f_d = 70,16 \text{ MPa}$ .

Součinitel hodnoty spoje  $z$  je součástí výpočtu tloušťky potrubních částí, které obsahují jeden nebo několik tupých svarů jiných než obvodových. V našem případě volíme  $z = 0,85$ . [11]

Minimální požadovaná tloušťka stěny přímé trubky bez přídavek a mezních úchylek se vypočítá dle vztahu (26). [14]

Stanovení diferenčního tlaku  $p_c$

$$p_c = p_1 - p_a = 0,109525 \text{ MPa} - 0,101325 \text{ MPa} = 0,0082 \text{ MPa} \quad (25)$$

Tloušťka stěny přímého potrubí

$$e = \frac{p_c \cdot d_i}{2 \cdot f_d \cdot z - p_c} = \frac{0,0082 \text{ MPa} \cdot 210,1 \text{ mm}}{2 \cdot 70,16 \text{ MPa} \cdot 0,85 - 0,0082 \text{ MPa}} = 0,014 \text{ mm} \quad (26)$$

Výpočtová pravidla daná normou berou v úvahu to, že při zatížení vnitřním tlakem potrubního ohybu se vyšší napětí vyskytuje na vnitřní straně ohybu a nižší napětí na vnější straně ohybu než z přímé trubky s identickou tloušťkou stěny. [14]

### Tloušťka stěny na vnitřní straně oblouku

$$e_{\text{int}} = e \cdot \frac{\frac{R_{\text{obl}}}{d_o} - 0,25}{\frac{R_{\text{obl}}}{d_o} - 0,5} = 0,014 \text{ mm} \cdot \frac{\frac{328 \text{ mm}}{219,1 \text{ mm}} - 0,25}{\frac{328 \text{ mm}}{219,1 \text{ mm}} - 0,5} = 0,018 \text{ mm} \quad (27)$$

### Tloušťka stěny na vnější straně oblouku

$$e_{\text{ext}} = e \cdot \frac{\frac{R_{\text{obl}}}{d_o} + 0,25}{\frac{R_{\text{obl}}}{d_o} + 0,5} = 0,012 \text{ mm} \cdot \frac{\frac{328 \text{ mm}}{219,1 \text{ mm}} + 0,25}{\frac{328 \text{ mm}}{219,1 \text{ mm}} + 0,5} = 0,0126 \text{ mm} \quad (28)$$

K výpočtové tloušťce je potřeba ještě přičíst korozní přídavek a absolutní hodnotu možné záporné tolerance na jmenovité tloušťce. Výsledná tloušťka stěny potrubí je 6,3 mm, protože to je nejnižší hodnota tloušťky pro potrubí DN 200. [15]

## **6.3.2 Potrubí spalin**

Toto potrubí, které vede horké spaliny ze spalovací komory do konvekčního bloku, je zatíženo vnějším tlakem. V potrubí proudí horké spaliny, které zvyšují teplotu stěny. To vede ke zhoršení materiálových vlastností. Toto potrubí je vyrobeno ze žáruvzdorného materiálu 1.4845. Schématické znázornění situace je podobné jako na obr. 23. Důležité hodnoty pro výpočet jsou uvedeny v tab. 8.

Tab. 7 Základní hodnoty pro výpočet potrubí spalin

Veličina	pa [MPa]	p2 [MPa]	ts <sup>[10]</sup> [°C]	e [mm]	R <sub>mp</sub> [mm]	L [mm]	Rp0,2/1100 <sup>[13]</sup> [MPa]	E <sup>[13]</sup> [MPa]
Hodnota	0,101325	0,101275	700	4	304	2000	64	200 000

### Elastické mezní napětí

Pro austenitické oceli platí rovnice (29). [14]

$$S = \frac{R_{p0,2/1100}}{1,25} = \frac{64 \text{ MPa}}{1,25} = 51,2 \text{ MPa} \quad (29)$$

### Zborcení mezi výztuhami

Tloušťka potrubí v rozsahu nevyztužené délky L nesmí být menší než tloušťka určená následujícím postupem. Odhadne se hodnota tloušťky stěny e a vypočítá se hodnota p<sub>y</sub> z rovnice (30). [14]

$$p_y = \frac{S \cdot e}{R_{mp}} = \frac{51,2 \text{ MPa} \cdot 4 \text{ mm}}{304 \text{ mm}} = 0,674 \text{ MPa} \quad (30)$$

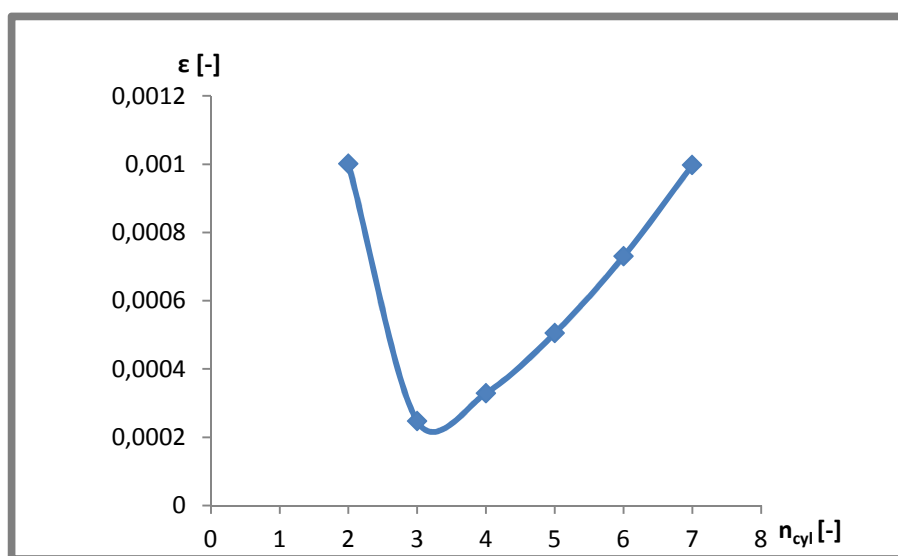
Vypočítá se hodnota  $p_m$  z rovnice (33) s použitím hodnoty  $e$  vybrané pro výpočet  $p_y$ . Pro výpočet  $p_m$  je nutné stanovit hodnotu  $\varepsilon$ , která je vypočítána v rovnici (32). Pro výpočet hodnoty  $\varepsilon$  je důležité stanovit geometrickou charakteristiku  $Z$ . Dále je potřebné získat minimální hodnotu  $n_{cyl}$ , což je počet obvodových vln u nevyztužené části válcového pláště. Platí, že hodnota  $n_{cyl}$  je celočíselná hodnota  $\geq 2$ , která minimalizuje hodnotu  $p_m$ . Z toho vyplývá, že hledáme takovou  $n_{cyl}$ , která má nejmenší hodnotu  $\varepsilon$ . Na obr. 24 je znázorněná závislost  $n_{cyl}$  na  $\varepsilon$ . Výsledná  $\varepsilon$  pro jednotlivá  $n_{cyl}$  jsou uvedena v tab. 9. [14]

$$Z = \frac{\pi \cdot R_m}{L} = \frac{\pi \cdot 304 \text{ mm}}{2000 \text{ mm}} = 0,477 \quad (31)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{n_{cyl}^2 - 1 + \frac{Z^2}{2}} \cdot \left\{ \frac{1}{\left( \frac{n_{cyl}^2}{Z^2} + 1 \right)^2} + \frac{e^2}{12 \cdot R_{mp}^2 \cdot (1 - \nu)} \cdot (n_{cyl}^2 - 1 + Z^2)^2 \right\} \quad (32)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2^2 - 1 + \frac{0,477^2}{2}} \cdot \left\{ \frac{1}{\left( \frac{2^2}{0,477^2} + 1 \right)^2} + \frac{4^2}{12 \cdot 304^2 \cdot (1 - 0,3)} \cdot (2^2 - 1 + 0,477^2)^2 \right\}$$

$$\varepsilon = 0,001$$



Obr. 24 Závislost  $\varepsilon$  na  $n_{cyl}$

Tab. 8 Výsledné  $\varepsilon$  hodnoty pro jednotlivá  $n_{cyl}$

$n_{cyl}$	2	3	4	5	6	7
$\varepsilon$	0,001	0,000247	0,000329	0,000505	0,00073	0,000997

Z výše uvedeného grafu a tabulky vidíme, že nejnižší hodnota  $\varepsilon = 0,000247$  je pro  $n_{cyl} = 3$ . Díky této hodnotě je získána minimální hodnota  $p_m$ .

$$p_m = \frac{E \cdot e \cdot \varepsilon}{R_{mp}} = \frac{200\,000\,MPa \cdot 4\,mm \cdot 0,000247}{304\,mm} = 0,65\,MPa \quad (33)$$

Pak je vypočítána hodnota  $p_m/p_y$  a z tabulky, která je uvedena v normě, získáme hodnotu  $p_r/p_y$ . [14]

$$\frac{p_m}{p_y} = \frac{0,65\,MPa}{0,674\,MPa} = 0,964 \quad (34)$$

$$\frac{p_r}{p_y} = 0,482 \quad (35)$$

Z  $p_r/p_y$  a  $p_y$  se vypočítá tlak  $p_r$ , který musí vyhovovat podmínce, která je dána rovnicí (37), kde hodnota  $k = 1,5$ . Pokud je  $p_r$  menší než  $k \cdot p$ , pak musí být zvětšena předpokládaná hodnota  $e$  nebo musí být upravena rozteč výztuh. [14]

$$p_r = 0,482 \cdot p_y = 0,482 \cdot 0,674\,MPa = 0,325\,MPa \quad (36)$$

$$p_r \geq k \cdot p \quad (37)$$

$$0,325\,MPa \geq 1,5 \cdot 0,00005\,MPa$$

$$0,325\,MPa \geq 0,000075\,MPa$$

V našem případě navržená tloušťka stěny  $e = 4\,mm$  vyhovuje.

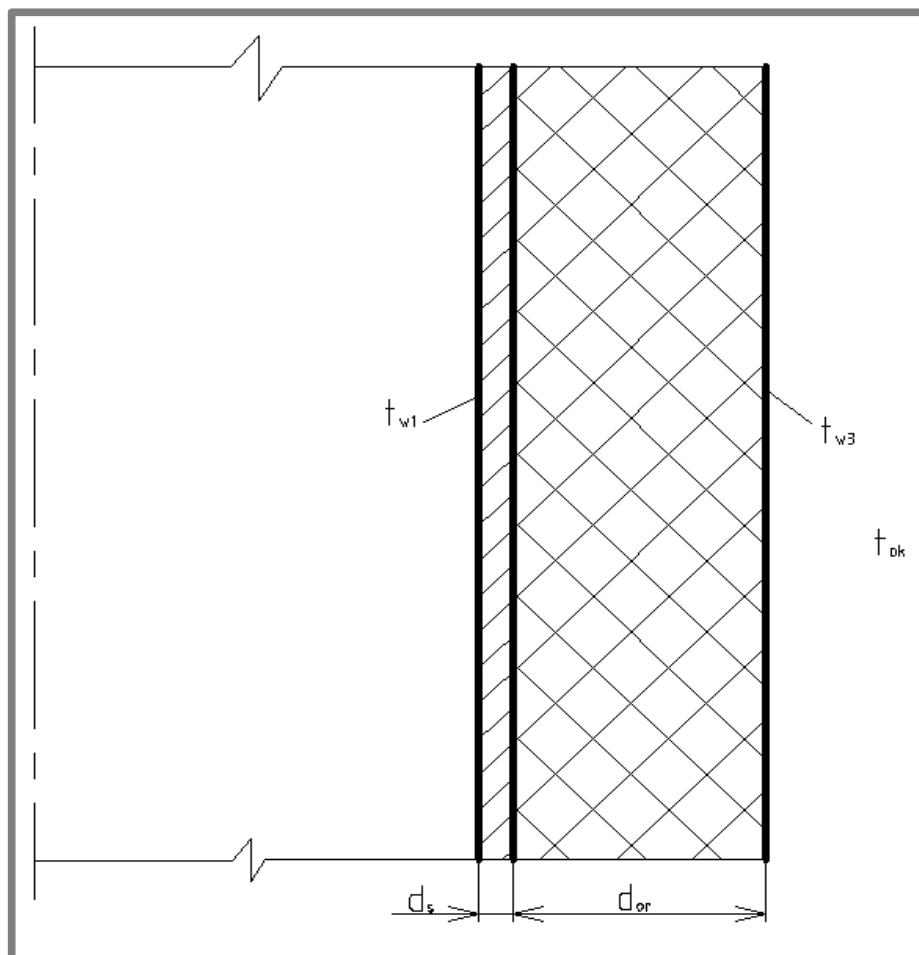


## 7 VÝPOČET TEPELNÉ IZOLACE

Části zařízení a potrubí se zvýšenou teplotou povrchu musí mít tepelnou izolaci, která zabezpečuje teplotu vnějšího povrchu izolace max. 50 °C při teplotě okolí 25 °C. I při teplotě ovzduší jiné než 25 °C je přípustný rozdíl mezi teplotou vnějšího povrchu izolace a teplotou ovzduší max. 25 °C. Pokud je z konstrukčních důvodů někde na zařízení místo s vyšší teplotou, je nutné toto místo s vyšší teplotou povrchu jak 70 °C chránit proti doteku osob. Teplota ovzduší nesmí překročit hodnoty povolené příslušnými hygienickými předpisy. [16]

### 7.1 Izolace spalovací komory

Jelikož uvnitř vnější spalovací komory proudí teplý spalovací vzduch, který zvedá teplotu stěny spalovací komory, je nutné toto zařízení tepelně izolovat. Jako izolační materiál je navržena rohož ORSTECH DP 100 od firmy ISOVER SAINT-GOBAIN ORSIL s. r. o. Situace je znázorněna na obr. 25 a základní údaje pro výpočet jsou uvedeny v tab. 10.



Obr. 25 Schematické znázornění izolace spalovací komory

Tab. 9 Základní hodnoty pro výpočet izolace spalovací komory

$\alpha_{ok}$ [W/m <sup>2</sup> K]	$t_{ok}$ [K]	$t_{w1}$ [K]	$t_{w3}$ [K]	$\lambda_s$ <sup>[12]</sup> [W/mK]	$\lambda_{or}$ <sup>[17]</sup> [W/mK]	$\delta_s$ [m]
7	298,15	473,15	323,15	50	0,055	0,004

Prvním krokem pro výpočet tloušťky je stanovení tepelného toku. Ten je stanoven z teploty okolí, dovolené teploty na vnější straně izolace a součinitele přestupu tepla.

$$\dot{q} = \alpha_{ok} \cdot (t_{w3} - t_{ok}) = 7 \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot (373,15 K - 298,15 K) = 175 \frac{W}{m^2} \quad (38)$$

Pomocí vypočítaného tepelného toku, vnitřní teploty stěny spalovací komory, dovolené vnější teploty izolace a tabelovaných hodnot, které jsou získány z katalogu materiálu, je vypočítána potřebná tloušťka izolačního materiálu  $\delta_{or}$ .

$$\delta_{or} = \frac{\lambda_{or} \cdot \left( t_{w1} - t_{w3} - \dot{q} \cdot \frac{\delta_s}{\lambda_s} \right)}{\dot{q}} \quad (39)$$

$$\delta_{or} = \frac{0,055 \frac{W}{m \cdot K} \cdot \left( 473,15 K - 323,15 K - 175 \frac{W}{m^2} \cdot \frac{50 \frac{W}{m \cdot K}}{0,004 m} \right)}{175 \frac{W}{m^2}}$$

$$\delta_{or} = 0,0471 m$$

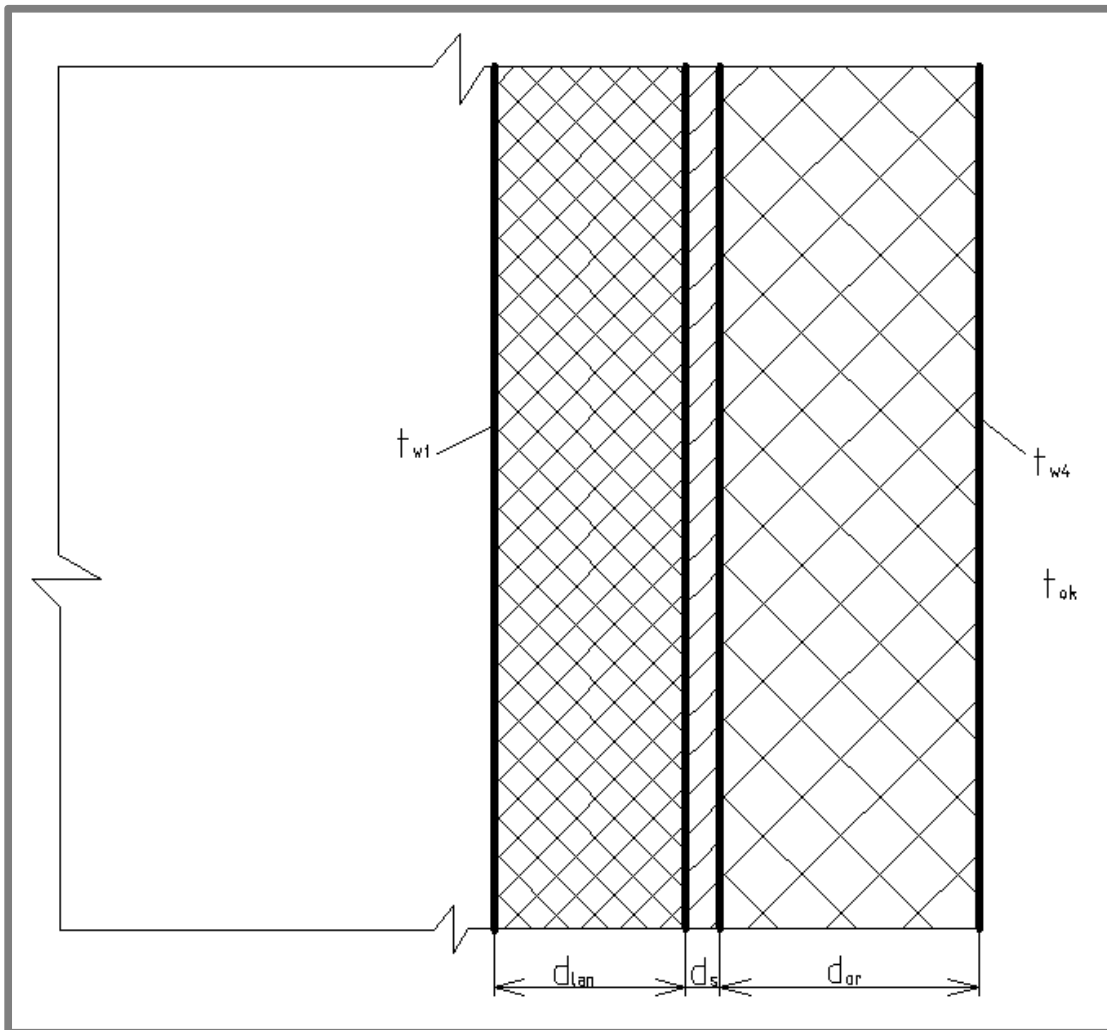
Vypočítanou tloušťku je nutné zaokrouhlit na katalogovou hodnotu. Firma ISOVER nabízí tloušťku rohože  $\delta_{orsk} = 0,05 m$ . [17] Pro tuto tloušťku rohože je v rovnici (40) spočítaná skutečná teplota na povrchu izolace.

$$t_{w3sk} = t_{w1} - \dot{q} \cdot \left( \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{\delta_{orsk}}{\lambda_{or}} \right) \quad (40)$$

$$t_{w3sk} = 473,15 K - 175 \frac{W}{m^2} \cdot \left( \frac{0,004 m}{50 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,05 m}{0,055 \frac{W}{m \cdot K}} \right) = 314,045 K = 40,895^\circ C$$

## 7.2 Izolace konvekčního bloku

Uvnitř konvekčního bloku proudí přehřátý spalovací vzduch. Aby se zamezilo poškození nosného plechu je vnitřní prostor konvekčního bloku vyplněn izolační deskou PROMALAN HT100 od firmy Promat. I přesto je ale teplota stěny plechu vysoká, a proto musí být tepelně izolována. Jako izolační materiál vnějšího povrchu je navržena rohož ORSTECH DP 100 od firmy ISOVER SAINT-GOBAIN ORSIL s. r. o. Situace je znázorněna na obr. 26 a základní údaje pro výpočet jsou uvedeny v tab. 11.



Obr. 26 Schematické znázornění izolace konvekčního bloku

Tab. 10 Základní hodnoty pro výpočet izolace konvekčního bloku

$t_{ok}$ [K]	$t_{w1}$ [K]	$t_{w4}$ [K]	$\lambda_s$ <sup>[12]</sup> [W/mK]	$\lambda_{lan}$ <sup>[18]</sup> [W/mK]	$\lambda_{or}$ <sup>[17]</sup> [W/mK]	$\delta_s$ [m]	$\delta_{lan}$ [m]
298,15	873,15	323,15	50	0,078	0,075	0,004	0,1

Teplný výkon je vypočítán stejně jako v předchozím případě. Podle rovnice (38) je pak tepelný výkon  $\dot{q} = 175 \text{ W/m}^2$ . Pomocí vypočítaného tepelného toku, vnitřní teploty stěny izolace konvekčního bloku, dovolené vnější teploty izolace a tabelovaných hodnot, které jsou získány z katalogu materiálu, je vypočítána potřebná tloušťka izolačního materiálu  $\delta_{or}$ .

$$\delta_{or} = \frac{\lambda_{or} \cdot \left( t_{w1} - t_{w4} - \dot{q} \cdot \left( \frac{\delta_{lan}}{\lambda_{lan}} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} \right) \right)}{\dot{q}} \quad (41)$$

$$\delta_{or} = \frac{0,075 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot \left( 873,15\text{K} - 323,15\text{K} - 175 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \left( \frac{0,078 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}}{0,1\text{m}} + \frac{50 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}}{0,004\text{m}} \right) \right)}{175 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

$$\delta_{or} = 0,139 \text{ m}$$

Vypočítanou tloušťku je nutné zaokrouhlit na katalogovou hodnotu, proto je výsledná hodnota  $\delta_{orsk} = 0,14 \text{ m}$ . [17] Pro tuto tloušťku rohože je v rovnici (42) spočítaná skutečná teplota na povrchu izolace.

$$t_{w4,sk} = t_{w1} - \dot{q} \cdot \left( \frac{\delta_{lan}}{\lambda_{lan}} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{\delta_{orsk}}{\lambda_{or}} \right) \quad (42)$$

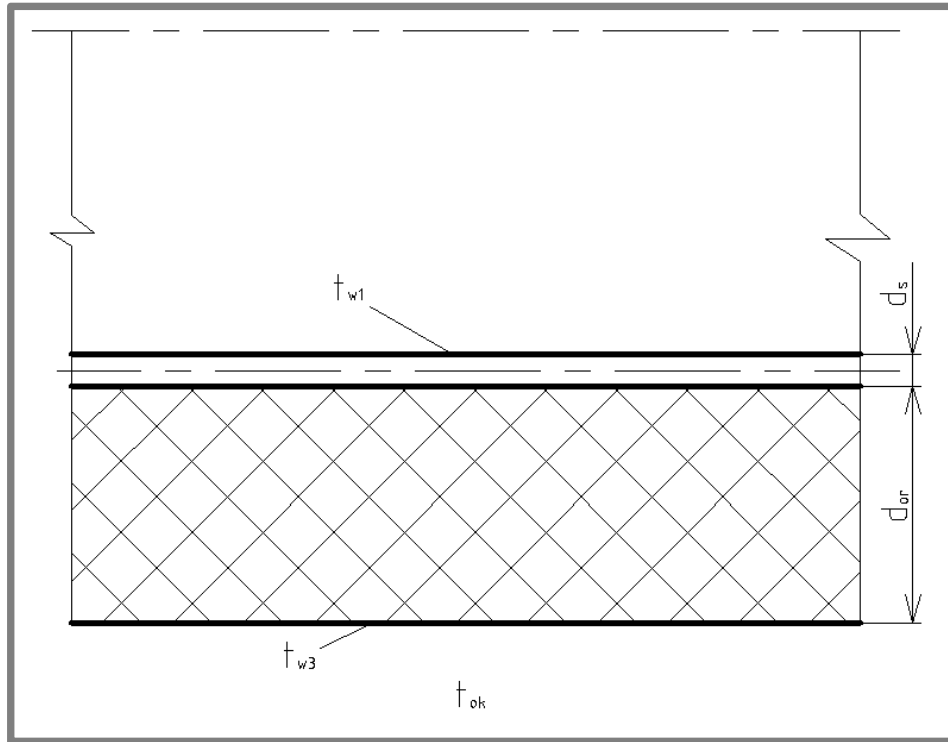
$$t_{w4,sk} = 873,15\text{K} - 175 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \left( \frac{0,1\text{m}}{0,078 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,004\text{m}}{50 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,14\text{m}}{0,075 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} \right) = 322,05\text{K} = 48,9^\circ\text{C}$$

### 7.3 Izolace potrubí spalovacího vzduchu

V potrubí spalovacího vzduchu proudí přehřátý vzduch při teplotě  $200^\circ\text{C}$ . Proto musí být potrubí tepelně izolováno. Jako izolační materiál je navržena rohož ORSTECH DP 100 od firmy SAINT-GOBAIN ORSIL s. r. o. Situace je znázorněna na obr. 27 a základní údaje pro výpočet jsou uvedeny v tab. 12.

Tab. 11 Hodnoty pro výpočet izolace potrubí spalovacího vzduchu

$t_{ok}$ [K]	$t_{w1}$ [K]	$t_{w3}$ [K]	$\lambda_s$ <sup>[12]</sup> [W/mK]	$\lambda_{or}$ <sup>[17]</sup> [W/mK]	$\delta_s$ [m]
298,15	473,15	323,15	50	0,055	0,004



Obr. 27 Schéma znázornění izolace potrubí spalovacího vzduchu

Tepelný výkon je vypočítán stejně jako v rovnici (38) a jeho hodnota se rovná  $\dot{q} = 175 \text{ W/m}^2$ . Pomocí hodnoty tepelného toku, vnitřní teploty stěny potrubí, dovolené vnější teploty izolace a tabelovaných hodnot, které jsou získány z katalogu materiálu, je vypočítána potřebná tloušťka izolačního materiálu  $\delta_{or}$ .

$$\delta_{or} = \frac{\lambda_{or} \cdot \left( t_{w1} - t_{w3} - \dot{q} \cdot \frac{\delta_s}{\lambda_s} \right)}{\dot{q}} \quad (43)$$

$$\delta_{or} = \frac{0,055 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot \left( 473,15 \text{ K} - 323,15 \text{ K} - 175 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \frac{50 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}}{0,0045 \text{ m}} \right)}{175 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} = 0,0471 \text{ m}$$

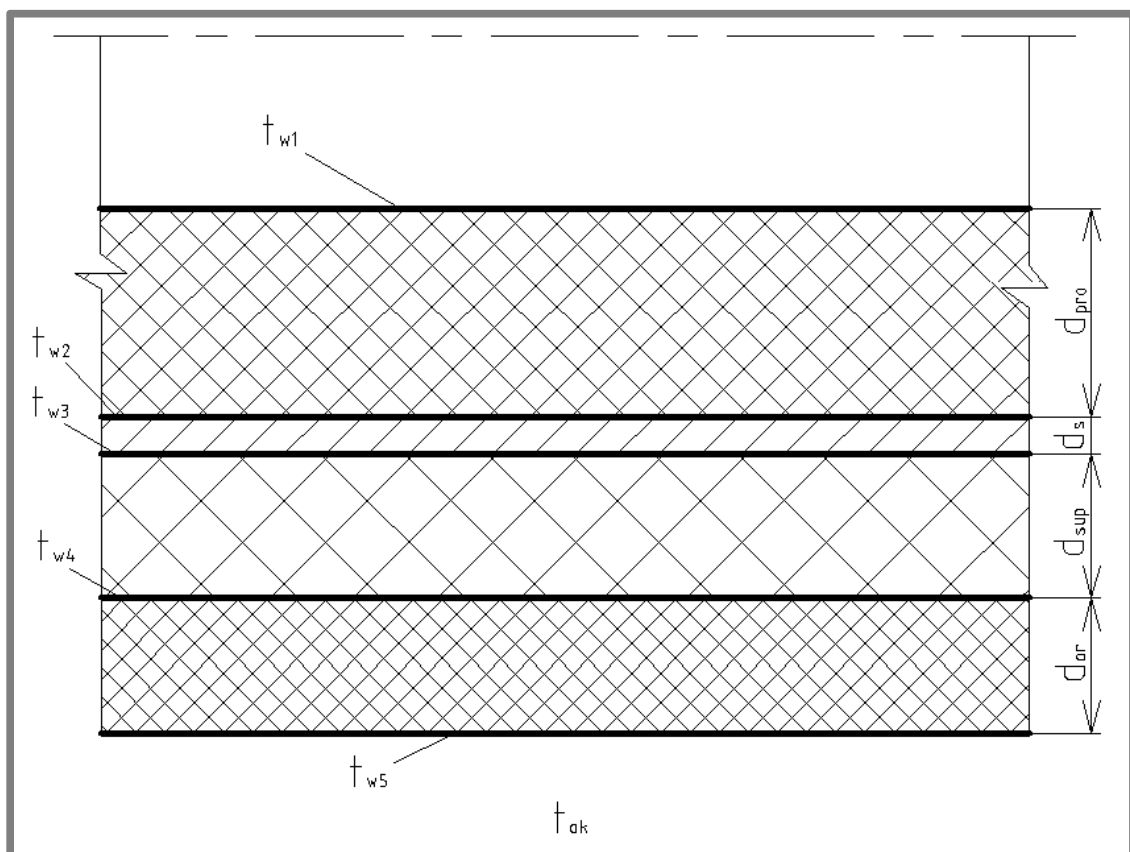
Vypočítanou tloušťku je nutné zaokrouhlit na katalogovou hodnotu. Firma ISOVER nabízí tloušťku rohože 50 mm, proto je  $\delta_{orsk} = 0,05 \text{ m}$ . [17] Pro tuto tloušťku rohože je v rovnici (44) spočítána skutečná teplota na povrchu izolace.

$$t_{w3,sk} = t_{w1} - \dot{q} \cdot \left( \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{\delta_{orsk}}{\lambda_{or}} \right) \quad (44)$$

$$t_{w3,sk} = 473,15K - 175 \frac{W}{m^2} \cdot \left( \frac{0,0045m}{50 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,05m}{0,055 \frac{W}{m \cdot K}} \right) = 314,045K = 40,893^\circ C$$

#### 7.4 Izolace potrubí spalin

Jelikož proudí v potrubí horké spaliny, které mohou mít s ohledem na možné provozní podmínky teplotu až 1330 °C a materiál potrubí snese maximální teplotu 1100 °C, je nutné vložit tepelnou izolaci do potrubí. Pro vnitřní izolaci byl zvolen materiál PROMAFORM 1430 od firmy Promat. Situace je schematicky znázorněna na obr. 28 a základní údaje pro výpočet jsou uvedeny v tab. 12.



Obr. 28 Schematické znázornění izolace potrubí spalin

Tab. 12 Základní hodnoty pro výpočet izolace potrubí spalin

$t_{ok}$ [K]	$t_{w1}$ [K]	$t_{w5}$ [K]	$\lambda_s$ [13] [W/mK]	$\lambda_{pro}$ [18] [W/mK]	$\lambda_{sup}$ [19] [W/mK]	$\lambda_{or}$ [17] [W/mK]	$\delta_s$ [m]
298,15	1573,15	323,15	22	0,15	0,15	0,115	0,004

Teplný výkon je vypočítán stejným způsobem jako v rovnici (38) a jeho hodnota se rovná  $\dot{q} = 175 \text{ W/m}^2$ . Pomocí hodnoty tepelného toku, vnitřní teploty stěny izolace, dovolené teploty stěny potrubí a tabelovaných hodnot, které jsou získány z katalogu materiálu, je vypočítána potřebná tloušťka izolačního materiálu  $\delta_{pro}$ .

$$\delta_{pro} = \frac{\lambda_{pro}}{\dot{q}} \cdot (t_{w1} - t_{w2}) = \frac{0,15 \frac{W}{m \cdot K}}{175 \frac{W}{m^2}} \cdot (1573,15K - 1373,15K) = 0,171m \quad (45)$$

Navrhovaná rychlost spalin v potrubí je cca 10 m/s. Této rychlosti odpovídá vnitřní průměr potrubí 240 mm. Po přičtení vypočtené tloušťky vnitřní izolace dostaneme hodnotu průměru potrubí, která je 582 mm. Taková trubka se však nevyrobí, proto je zvolena nejbližší vyšší, což je trubka 609,6 x 4,0 s vnitřním průměrem 601,6 mm. [20] Díky tomu pak je možné zvýšit tloušťku vnitřní izolace na hodnotu  $\delta_{prosk} = 0,18 \text{ m}$ . [18] Skutečná teplota stěny potrubí pak je.

$$t_{w2,sk} = t_{w1} - \frac{\dot{q} \cdot \delta_{prosk}}{\lambda_{pro}} = 1573,15K - \frac{175 \frac{W}{m^2} \cdot 0,18m}{0,22 \frac{W}{m \cdot K}} = 1363,15K = 1090^\circ C \quad (46)$$

Jelikož je teplota stěny potrubí vysoká, je potřeba nejdříve vybrat vhodný materiál. Byl zvolen materiál Superwool 607 Blanket od firmy MORGAN Thermal Ceramics a poté, co je teplota snížena přibližně na 650 °C, je použita izolační rohož ORSTECH DP 100 od firmy ISOVER SAINT-GOBAIN ORSIL s. r. o. Tloušťka vrstvy Superwool je spočítána v rovnici (47) a tloušťka rohože ORSTECH DP 100 je spočítána v rovnici (49).

$$\delta_{sup} = \frac{\lambda_{sup} \cdot \left( t_{w1} - t_{w4} - \dot{q} \cdot \left( \frac{\delta_{prosk}}{\lambda_{pro}} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} \right) \right)}{\dot{q}} \quad (47)$$

$$\delta_{\text{sup}} = \frac{0,15 \frac{W}{m \cdot K} \cdot \left( 1573,15K - 923,15K - 175 \frac{W}{m^2} \cdot \left( \frac{0,15 \frac{W}{m \cdot K}}{0,18m} + \frac{22 \frac{W}{m \cdot K}}{0,004m} \right) \right)}{175 \frac{W}{m^2}}$$

$$\delta_{\text{sup}} = 0,377m$$

Skutečná tloušťka vrstvy je pak zaokrouhlena dle katalogu firmy na  $\delta_{\text{supsk}} = 0,4m$ . [19] Výsledná teplota na povrchu této vrstvy  $t_{w4sk}$  pak je:

$$t_{w4sk} = t_{w1} - \dot{q} \cdot \left( \frac{\delta_{\text{prosk}}}{\lambda_{\text{pro}}} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{\delta_{\text{supsk}}}{\lambda_{\text{sup}}} \right) \quad (48)$$

$$t_{w4sk} = 1523,15K - 175 \frac{W}{m^2} \cdot \left( \frac{0,18m}{0,15 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,004m}{22 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,4m}{0,15 \frac{W}{m \cdot K}} \right)$$

$$t_{w4sk} = 896,48K = 623,3^\circ C$$

Následně je vypočítána tloušťka rohože ORSTECH DP 100.

$$\delta_{\text{or}} = \frac{\lambda_{\text{or}} \cdot \left( t_{w1} - t_{w5} - \dot{q} \cdot \left( \frac{\delta_{\text{prosk}}}{\lambda_{\text{pro}}} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{\delta_{\text{supsk}}}{\lambda_{\text{sup}}} \right) \right)}{\dot{q}} \quad (49)$$

$$\delta_{\text{or}} = \frac{0,115 \frac{W}{m \cdot K} \cdot \left( 1573,15K - 323,15K - 175 \frac{W}{m^2} \cdot \left( \frac{0,15 \frac{W}{m \cdot K}}{0,18m} + \frac{22 \frac{W}{m \cdot K}}{0,004m} + \frac{0,15 \frac{W}{m \cdot K}}{0,4m} \right) \right)}{175 \frac{W}{m^2}}$$

$$\delta_{\text{or}} = 0,376m$$



Skutečná tloušťka vrstvy je pak zaokrouhlena dle katalogu firmy na  $\delta_{orsk} = 0,38 \text{ m}$ . [17] Výsledná teplota na povrchu izolace  $t_{w5sk}$  pak je:

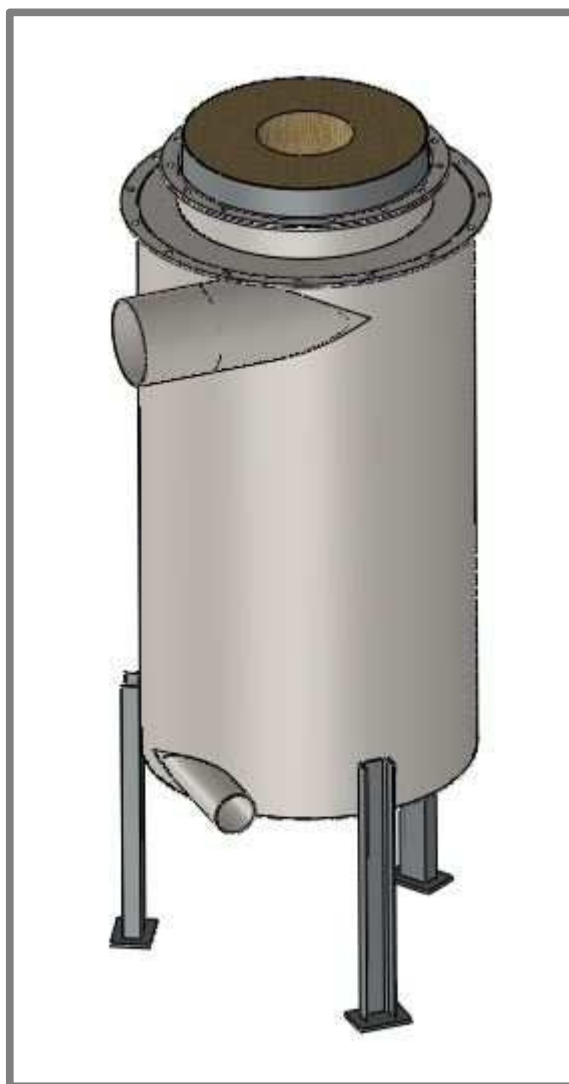
$$t_{w5sk} = t_{w1} - \dot{q} \cdot \left( \frac{\delta_{prosk}}{\lambda_{pro}} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{\delta_{supsk}}{\lambda_{sup}} + \frac{\delta_{orsk}}{\lambda_{or}} \right) \quad (50)$$

$$t_{w5sk} = 1523,15 \text{ K} - 175 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \left( \frac{0,18 \text{ m}}{0,22 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,004 \text{ m}}{22 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,4 \text{ m}}{0,15 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,38 \text{ m}}{0,115 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} \right)$$

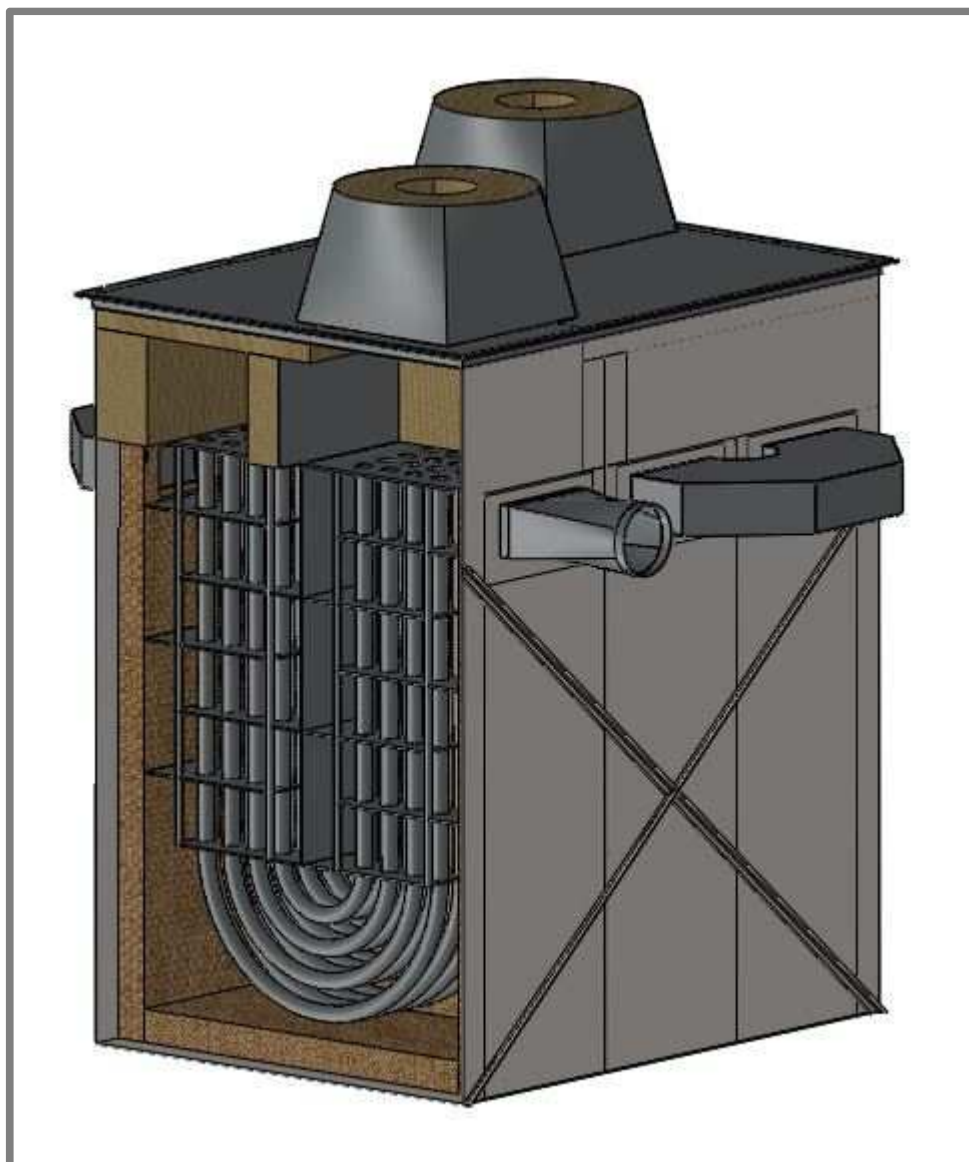
$$t_{w5sk} = 318,2 \text{ K} = 45,07^\circ \text{C}$$

## 8 TVORBA VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE

Na základě analytického výpočtu experimentálního předehřívače spalovacího vzduchu je vytvořen 3D model v programu SolidWorks. První stupeň předehřívače (spalovací komora s duplikátorovým pláštěm) je znázorněn na obr. 29. Druhý stupeň předehřívače (konvekční blok) je znázorněn na obr. 30. Vzhledem k tomu, že není dosud známa přesná poloha zařízení, není součástí 3D modelu spojovací potrubí. Dále pak není součástí modelu vnější izolace. Z vytvořeného 3D modelu jsou vygenerovány jednotlivé výkresy. Výsledná výkresová dokumentace je zpracována dle norem pomocí programu AutoCAD. Výkresy potřebné pro výrobu zařízení jsou součástí příloh.



Obr. 29 První stupeň předehřívače – spalovací komora



*Obr. 30 Druhý stupeň předehřívače – konvekční blok*

## 9 ZÁVĚR, ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

### *Konstrukční rozbor řešení*

Cílem práce bylo navrhnout konstrukční řešení experimentálního předehřívače vzduchu, který je koncipován jako dvoustupňový systém. První stupeň obsahuje spalovací komoru, v jejímž duplikátorovém plášti proudí předehřívaný spalovací vzduch. Výstupní proud z prvního stupně následně vstupuje do druhého stupně předehřívače, který je koncipován jako trubkový výměník tepla se svazkem U trubek a přepážkovým systémem. Analytickým pevnostním výpočtem byly získány tloušťky stěn jednotlivých částí zařízení. S ohledem na to, že se nejedná o sériovou výrobu, ale o výrobu jednoho zařízení, mají tyto tloušťky dostatečný přídavek, což by mělo zaručit dlouhou životnost zařízení. Pro dosažení cílů bylo také nutné řešit tepelnou izolaci zařízení. Cíle diplomové práce byly splněny.

Další vývoj této práce by se mohl zabývat prouděním plynů v zařízení a jeho vlivu na optimalizaci zařízení.

### *Technologický rozbor řešení*

Konstrukce je vyrobena z několika materiálů. Volba materiálu má velký vliv na výslednou cenu zařízení, proto je zařízení vyrobeno z několika materiálů. Části zařízení, které jsou zatíženy velkou teplotou, což je třetí U-blok, vnitřní válec spalovací komory a spalinové potrubí, jsou vyrobeny z austenitické oceli 1.4845, která vydrží teploty až 1100 °C. Části zařízení, kde je nižší teplota, především první a druhý U-blok, jsou postupně materiálově odstupňovány. První U-blok je vyroben z materiálu 1.4301 a druhý U-blok je vyroben z materiálu 1.4501. Části zařízení, které nejsou tolik teplotně zatíženy, jsou vyrobeny z konstrukční oceli 1.0036. Materiály byly zvoleny na základě údajů o materiálu ve strojírenských tabulkách a materiálových listech.

Na izolaci zařízení je použito také několik materiálů. Pro vnitřní izolaci nejvíce zatížených částí je zvolen materiál PROMAFORM 1430 a pro části méně zatížené je navržen materiál PROMALAN HT100 od firmy Promat. Pro vnější izolaci je ve většině případů použita rohož ORSTECH DP100 od firmy ISOVER. Pouze v případě spalinového potrubí, kvůli vysoké teplotě je nejdříve použit materiál Superwool 607 od firmy Thermal Ceramics a až poté je použita opět rohož ORSTECH DP100. Izolační materiály byly zvoleny na základě údajů uvedených v katalogových listech.

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. Parní kotle. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983, 858 s., 2 příl.
- [2] HESELTON, Kenneth. Boiler Operator's Handbook. 1. vyd. Fairmont Press, 2004, 600 s., ISBN 0-88173-435-7
- [3] SHAH, Ramesh K., Dušan P. SEKULIC. Fundamentals of Heat Exchanger Design. 1. vyd. John Wiley & Sons, 2003 941 s., ISBN 0-471-32171-03
- [4] RAJPUT, R.K. Thermal Engineering. 8. vyd. Laxmi Publications, 2010, 1679 s., ISBN 8131808041
- [5] GOODGELLOW, Howard D. Industrial Ventilation Design Guidebook. 1. vyd. Academic Press, 2001, 1519 s., ISBN 0080508642
- [6] LAIN Miloš. Zpětné získávání tepla ve větrání a klimatizaci [online]. Praha, 2006. [cit. 2014-05-22]. Dostupné na URL: <<http://www.tzb-info.cz/3648-zpetne-ziskavani-tepla-ve-vetrani-a-klimatizaci-i>>
- [7] HORSLEY Paul, Steam Heating systems [online]. Velká Británie, nedatováno. [cit. 2014-05-24]. Dostupné na URL: <[http://www.cool-info.co.uk/brines\\_steam/steam\\_heating/stm\\_heating.html](http://www.cool-info.co.uk/brines_steam/steam_heating/stm_heating.html)>
- [8] ARMSTRON International. Heating and Cooling Coils [online]. USA, 2014. [cit. 2014-05-23]. Dostupné na URL: <<http://www.armstronginternational.com/heat-cooling-coils>>
- [9] BALKE – DÜRR. Air Preheaters [online]. Germany, nedatováno. [cit. 2014-05-24]. Dostupné na URL: <<http://www.balcke-duerr.com/products/regenerative-heat-exchangers/air-preheaters/>>
- [10] JEGLA Z. Výsledky tepelně – hydraulického návrhu experimentálního přehříváče spalovacího vzduchu, technická zpráva, Ústav procesního a ekologického inženýrství, FSI VUt v Brně, 2013
- [11] ČSN EN 13445 – Netopné tlakové nádoby
- [12] LEINVEBER, Jan, Pavel VÁVRA. Strojírenské tabulky. Čtvrté doplněné vydání. Úvaly – pedagogické nakladatelství ALBRA, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7
- [13] OUTOKUMPU. High Temperature Austenitic Stainless Steel [online]. Espoo, nedatováno. [cit. 2014-05-26]. Dostupné na URL: <[https://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Austenitic\\_High\\_Temperature\\_Grades\\_Datasheet.pdf](https://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Austenitic_High_Temperature_Grades_Datasheet.pdf)>

- [14] ČSN EN 13480 – Kovová průmyslová potrubí
- [15] ARCELOR MITTAL. Trubky – Výrobní program [online]. Ostrava, 2008. [cit. 2014-05-26]. Dostupné na URL: <<http://www.arcelormittal.cz/pdf/Trubky.pdf>>
- [16] ČSN 07 0620 – Konstrukce a výstroj parních a horkovodních kotlů
- [17] ISOVER SAINT-GOBAIN ORSIL s. r. o. ISOVER pro technické izolace. Nedatováno, 31 s.
- [18] PROMAT Technische Wärmedämmung. Technické tepelné izolace výrobky a know – how. Nedatováno, 51 s.
- [19] MORGAN THERMAL CERAMICS. Superwool 607 Blanket. Nedatováno
- [20] ARMAT spol. s. r. o. Trubky svařované [online]. Řetová, nedatováno. [cit. 2014-05-25]. Dostupné na URL: <<http://www.armat.cz/pdf/nerezove-trubky-svarovane.pdf>>
- [21] SVOBODA, Pavel. Základy konstruování. Vyd. 4. Brno: CERM, 2011, 234 s. ISBN 978-80-7204-750-5.

## 11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Trubkový předehříváč vzduchu v protiproudém uspořádání [4] .....	12
Obr. 2 Řez typickým litinovým předehříváč vzduchu [1] .....	13
Obr. 3 Schéma deskového výměníku s křížovým proudem [6].....	14
Obr. 4 Schéma deskového výměníku s protiproudem [6] .....	14
Obr. 5 Princip parní spirály [8] .....	15
Obr. 6 Princip Ljungströмова předehříváče [4] .....	16
Obr. 7 Princip Rothemühleho předehříváče [4].....	17
Obr. 8 Předehříváč typu Ljungström [9].....	18
Obr. 9 Předehřívák typu Babcock – Wilcox [1] .....	19
Obr. 10 Principiální (blokové) schéma experimentálního předehříváče vzduchu...	20
Obr. 11 Blokové schéma experimentálního předehříváče – spalovací komora.....	23
Obr. 12 Schematické znázornění situace vnitřního válce .....	24
Obr. 13 Definice tloušťky stěny [11].....	27
Obr. 14 Schematické znázornění situace vnějšího válce .....	28
Obr. 15 Blokové schéma experimentálního předehříváče – konvekční blok .....	30
Obr. 16 Svazek trubek s trubkovnicí a přepážkami .....	31
Obr. 17 Silové působení.....	31
Obr. 18 Podpěra trubkovnice .....	32
Obr. 19 Numerické řešení napětí .....	33
Obr. 20 Příklad dilatace trubkovnice .....	34
Obr. 21 Numerická kontrola dilatací .....	35
Obr. 22 Blokové schéma experimentálního předehříváče – spojovací potrubí .....	36
Obr. 23 Schematické znázornění potrubí spalovacího vzduchu .....	37
Obr. 24 Závislost $\epsilon$ na $ncyl$ .....	39
Obr. 25 Schematické znázornění izolace spalovací komory .....	41
Obr. 26 Schematické znázornění izolace konvekčního bloku .....	43
Obr. 27 Schéma znázornění izolace potrubí spalovacího vzduchu .....	45
Obr. 28 Schematické znázornění izolace potrubí spalin.....	46
Obr. 29 První stupeň předehříváče – spalovací komora .....	50
Obr. 30 Druhý stupeň předehříváče – konvekční blok .....	51

## 12 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Základní hodnoty pro výpočet vnitřního válce spalovací komory .....	24
Tab. 3 Základní hodnoty pro výpočet vnějšího válce spalovací komory .....	27
Tab. 4 Hodnoty součinitele svarového spoje [11] .....	29
Tab. 5 Technická specifikace svazku trubek a trubkovnice .....	30
Tab. 6 Dilatace součástí zařízení .....	34
Tab. 7 Základní hodnoty pro výpočet potrubí spalovacího vzduchu.....	36
Tab. 8 Základní hodnoty pro výpočet potrubí spalin.....	38
Tab. 9 Výsledné $\varepsilon$ hodnoty pro jednotlivá $n_{cyl}$ .....	40
Tab. 10 Základní hodnoty pro výpočet izolace spalovací komory .....	42
Tab. 11 Základní hodnoty pro výpočet izolace konvekčního bloku.....	43
Tab. 12 Hodnoty pro výpočet izolace potrubí spalovacího vzduchu.....	44
Tab. 13 Základní hodnoty pro výpočet izolace potrubí spalin .....	47



## 13 SEZNAM PŘÍLOH

- |   |         |
|---|---------|
| 1. Výkres sestavy - spalovací komory        | 1-A2-00 |
| 2. Výkres svarku - pláště spal. komory      | 1-A3-01 |
| 3. Výkres svarku - víka spalovací komory    | 1-A3-02 |
| 4. Výkres součásti - při. a odv. vzduchu    | 1-A3-03 |
| 5. Výkres součásti - vnějšího pláště        | 1-A3-04 |
| 6. Výkres sestavy - konvekčního bloku       | 2-A1-00 |
| 7. Výkres svarku - skříně konvekčního bloku | 2-A1-01 |
| 8. Výkres svarku - víka konvekčního bloku   | 2-A3-02 |
| 9. Výkres svarku - svazku U trubek          | 2-A3-03 |
| 10. Výkres svarku - podpěry trubkovnice     | 2-A3-04 |
| 11. Výkres svarku - horních přepážek        | 2-A3-05 |
| 12. Výkres svarku - kolena pro vzduch       | 2-A3-06 |
| 13. Výkres součásti - trubkovnice           | 2-A3-07 |
| 14. Výkres součásti vodorovné přepážky      | 2-A3-08 |
| 15. Výkres součásti trubka R454             | 2-A4-09 |
| 16. Výkres součásti trubka R356             | 2-A4-10 |
| 17. Výkres součásti trubka R258             | 2-A4-11 |
| 18. Výkres součásti trubka R160             | 2-A4-12 |
| 19. Výkres součásti přívodu spal vzduchu    | 2-A3-13 |
| 20. Výkres součásti přívodu spalin          | 2-A3-14 |
| 21. CD, které obsahuje:                     |         |
| - Diplomovou práci ve formátu pdf           |         |
| - 3D model zařízení                         |         |
| - Výkresy zařízení ve formátu dwg           |         |
| - Výkresy zařízení ve formátu pdf           |         |