



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

NAVRHNĚTE PARNÍ KOTEL S PŘIROZENOU CIRKULACÍ NA SPALOVÁNÍ DŘEVNÍ ŠTĚPKY

STEAM BOILER WITH NATURAL CIRCULATION FOR WOOD CHEAPS BURNING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTOR

Bc. JAROSLAV VACULÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK SKÁLA, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jaroslav Vaculík

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

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

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

Navrhnete parní kotel s přirozenou cirkulací na spalování dřevní štěpky

v anglickém jazyce:

Steam boiler with natural cirkulation for wood cheaps burning

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

parametry páry: výkon 12t/h, tlak přehřáté páry 3,3 MPa, teplota přehř. páry 400°C, teplota napájecí vody 105°C;

palivo: $Q_{ir} = 8 \text{ MJ/kg}$

$Cr = 23,21\%$

$Nr = 0,22\%$

$Sr = 0,01\%$

$Ar = 3,5\%$

$Hr = 2,93\%$

$Or = 20,11\%$

$W = 50\%$

$Clr = \max 0,02\%$

Cíle diplomové práce:

Návrh kotle včetně tepelného výpočtu a dimenzování výhřevných ploch

Seznam odborné literatury:

Černý, Janeba, Teysler: Parní kotle, technický průvodce, SNTL Praha 1992
Budaj, F.: Parní kotle, podklady pro tepelný výpočet, skriptum VUT v Brně
Basu, Kefe, Jestin: Boilers and Burners, Design and Theory, Springer 2000
Internetové zdroje
Firemní podklady

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Zdeněk skála, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně dne

L.S.

doc. Ing. Zdeněk skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tématem této diplomové práce je návrh parního kotle s přirozenou cirkulací na spalování dřevní štěpky dle zadaných parametrů. Jedná se o kotel o výkonu 12 t/h s výstupními parametry přehřáté páry 3,3 MPa o teplotě 400 °C s napájecí vodou o teplotě 105 °C. Pro dané parametry jsem nejdříve vypočetl stechiometrii, účinnost kotle a následně pomocí geometrických parametrů jednotlivých bloků a tepelnými výpočty stanovil návrh a počet teplosměnných ploch v závislosti na vstupních parametrech vzduchu a vody a výstupních parametrech páry. Práce zahrnuje také výkresovou dokumentaci kotle.

Klíčová slova

Parní kotel, účinnost kotle, dřevní štěpka, spalovací komora, přehřívák, výparník

Abstract

The purpose of this Diploma Thesis is the construction design of the steam boiler with natural circulation for the combustion of wood biomass according to the specified parameters. It is the boiler with the power of 12 tons per hour of superheated vapor output parameters of 3,3 Mpa at a temperature of 400 °C and a temperature of feed water 105 °C. For the specified parameters I first calculated the stoichiometric calculations, boiler efficiency, and followed by using geometrical parameters of the blocks and thermal calculations set design and the number of heat transfer surfaces, depending on the input parameters of the air and water and output parameters of vapor. The work also includes drawings of the boiler.

Key words

Steam boiler, boiler efficiency, wood biomass, combustion chamber, super-heater, evaporator

Bibliografická citace

VACULÍK, J. *Navrhněte parní kotel s přirozenou cirkulací na spalování dřevní štěpky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 133 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci na téma „*Navrhněte parní kotel s přirozenou cirkulací na spalování dřevní štěpky*“ vypracoval samostatně, s využitím odborné literatury a pramenů uvedených v příloženém seznamu.

Jméno a příjmení: Jaroslav Vaculík

Datum:

Podpis:

Poděkování

Děkuji tímto všem, kteří mi byli nápomocni při vypracování mé diplomové práce. Obzvláště bych chtěl poděkovat doc. Ing. Zdeňku Skálovi, CSc. za odborné vedení této diplomové práce a Ing. Pavlu Křeminskému za poskytnutí odborných konzultací.

Obsah

1.	Úvod	11
1.1.	Energetické využití biomasy	11
1.2.	Výhody využití biomasy.....	11
1.3.	Nevýhody využití biomasy	12
1.4.	Palivo kotle – dřevní štěpka.....	12
2.	Technické parametry parního kotle	13
3.	Stechiometrický výpočet	14
3.1.	Výpočet minimálního množství vzduchu	14
3.2.	Výpočet minimálních množství jednotlivých složek ve spalínách.....	15
3.3.	Skutečné množství spalín a vzduchu	16
3.4.	Entalpie vzduchu a spalín	17
4.	Tepelná bilance kotle.....	20
4.1.	Teplo přivedené do kotle	20
4.2.	Tepelné ztráty a tepelná účinnost kotle	21
4.2.1.	Ztráta mechanickým nedopalem Z_c	21
4.2.2.	Ztráta chemickým nedopalem Z_{cn}	22
4.2.3.	Ztráta sdílením tepla do okolí Z_{sv}	22
4.2.4.	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků Z_f	22
4.2.5.	Ztráta citelným teplem spalín (komínová) Z_k	23
4.2.6.	Tepelná účinnost kotle.....	23
4.3.	Výrobní teplo páry a množství paliva.....	23
4.3.1.	Výrobní teplo páry.....	23
4.3.2.	Množství paliva	24
5.	Návrh konvekčních ploch:.....	24
5.1.	Přehřívák II.....	25
5.2.	Přehřívák I	25
5.3.	Závěsné trubky	26
5.4.	Výparník.....	27
5.5.	Ekonomizér.....	28
5.6.	Celkový tepelný výkon.....	28
6.	Výpočet spalovací komory	30
6.1.	Tepelný výpočet ohniště.....	31
7.	Mříž	36
7.1.	Tepelný výpočet mříže	36
7.2.	Přepočet teploty spalín na výstupu z mříže:	40
8.	Výpočet II. tahu kotle	41

8.1. Rozměry II. tahu	41
8.2. Tepelný výpočet membránové stěny II. tahu	43
8.3. Přepočet teploty spalin na výstupu z II. tahu	46
9. Výpočet III. tahu kotle	47
9.1. Výpočet I. části III. tahu (obratové komory)	47
9.1.1. Výpočet membránové stěny	48
9.1.2. Výpočet závěsných trubek	51
9.1.3. Přepočet teploty spalin na výstupu z 1. části III. tahu.....	56
9.2. Výpočet II. části III. tahu	57
9.2.1. Výpočet membránové stěny	57
9.2.2. Výpočet přehříváku II	61
9.2.3. Výpočet závěsných trubek	65
9.2.4. Přepočet teploty spalin na výstupu z 2. části III. tahu.....	70
9.3. Výpočet III. části III. tahu	71
9.3.1. Výpočet membránové stěny	72
9.3.2. Výpočet přehříváku I-B	75
9.3.3. Výpočet závěsných trubek	80
9.3.4. Přepočet teploty spalin na výstupu z 3. části III. tahu.....	84
9.4. Výpočet IV. části III. tahu.....	85
9.4.1. Výpočet membránové stěny	86
9.4.2. Výpočet přehříváku I-A	89
9.4.3. Výpočet závěsných trubek	94
9.4.4. Přepočet teploty spalin na výstupu ze 4. části III. tahu.....	99
10. Výpočet IV a V tahu	100
10.1. Výpočet I. části IV. a V. tahu.....	100
10.1.1. Bilance ohřívání vzduchu	102
10.1.2. Výpočet ohříváku vzduchu B	103
10.1.3. Přepočet teploty spalin na výstupu z 1. části IV. a V. tahu	108
10.2. Výpočet II. části IV. a V. tahu	109
10.2.1. Výpočet ekonomizéru.....	110
10.2.2. Přepočet teploty spalin na výstupu z 2. části IV. a V. tahu	115
10.3. Výpočet III. části IV. a V. tahu	116
10.3.1. Výpočet ohříváku vzduchu A.....	117
10.3.2. Přepočet teploty spalin na výstupu z 3. části IV. a V. tahu	122
11. Kontrola tepelné bilance	123
12. Závěr	124
13. Seznam použitých zdrojů	125
14. Seznam použitých zkratk	126

15.	Seznam Tabulek	131
16.	Seznam obrázků.....	132
17.	Seznam Příloh.....	133

1. Úvod

Vzhledem ke stále se ztenčujícím zásobám fosilních paliv se do budoucna počítá s jejich postupným nahrazováním alternativními zdroji energie, kde by právě biomasa mohla sehrát důležitou roli. Biomasa při své tvorbě spotřebuje stejné množství oxidu uhličitého, jaké se uvolňuje při jejím hoření, je to lokálně neomezený obnovitelný zdroj, lze ji získat ve velmi krátké době a při jejím hoření unikají do ovzduší podstatně menší emise než při spalování fosilních paliv. To vše jsou argumenty, hovořící pro biomasu, díky nimž se tato diplomová práce bude zabývat jejím energetickým využitím, respektive návrhem parního kotle, jehož palivem je jedna z forem biomasy a to dřevní štěpka.

1.1. Energetické využití biomasy

Způsoby získávání energie z biomasy jsou přímo závislé na jejích fyzikálních a chemických vlastnostech. Klíčová charakteristika biomasy s ohledem na spalování, která dělí její energetické využití do dvou skupin je obsah vlhkosti (podíl sušiny) a to na:

- suché procesy (obsah sušiny je větší než 50%, převládá spalování biomasy),
- mokré procesy (obsah sušiny je menší než 50%, výroba bioplynu aerobní fermentací vlhké biomasy, dále dominuje výroba metylesteru kyselin bioolejů získávaných ze semen olejnatých rostlin). [3]

1.2. Výhody využití biomasy

Využití biomasy je velmi pestré a je realizováno odjakživa, to co se však s vývojem technologie mění je množství energie, které z ní jsme schopni uvolnit a ekologický vliv spalování vůči životnímu prostředí. Výhody využití biomasy k energetickým účelům jsou následující:

- obnovitelný charakter,
- menší negativní dopady na životní prostředí, jelikož při správném spalování rostlin se uvolní do ovzduší pouze tolik CO₂, kolik ho spotřebovaly při fotosyntéze, vzniká minimum škodlivých látek, popel může posloužit jako výborné minerální hnojivo,
- zdroje nejsou lokálně omezeny (pouze vysokou nadmořskou výškou a zeměpisnou šířkou),
- řízená produkce přispívá k vytváření krajiny a péči o ni,
- účelné spalování nebezpečných a někdy i toxických odpadů, což má za následek zmenšení prostor pro jejich skladování,
- domácí zdroj energie, nižší náklady na dopravu,
- možnost pěstovat energetické plodiny na přebytečné půdě, nevhodné pro potravinářský průmysl. [4]

1.3. Nevýhody využití biomasy

Energetické využití biomasy je považováno všeobecně za žádoucí a z hlediska minimalizace ekologické zátěže za vhodné. Nicméně vše má své pro a proti a proto je třeba zmínit i negativa:

- využití biomasy pro energetické účely konkuruje způsobům jejího dalšího využití (potravinářský průmysl),
- energie z biomasy ekonomicky těžko konkuruje klasickým zdrojům energie,
- problémové využití vzhledem k rozmístění zdrojů biomasy a spotřebičů energie, vzhledem k potížím s akumulací, transportem a distribucí získané energie,
- v porovnání s fosilními palivy má nižší výhřevnost a energetickou hustotu. [5]

1.4. Palivo kotle – dřevní štěpka

Dřevní štěpka nejčastěji vzniká jako odpad z lesní těžby nebo cíleně drcením dřevních částí. Jedná se o nadrcenou dřevní hmotu do částic o délce od 3 do 250 milimetrů. Obsah vody bezprostředně po těžbě dosahuje více než 55 %, z čehož vyplývá, že ji musíme dále dosušet. Dalším zdrojem pro výrobu štěpky jsou různé dřevozpracující podniky. Obsah vody z pilařských odpadů bývá kolem 45 %, z truhlářské výroby kolem 15 %. Z důvodu minimální hodnoty lidské práce a mnoha zdrojů dřevního odpadu se jedná o velmi výhodné a levné biopalivo s výhřevností 8-15 MJ/kg.

Podle kvality štěpky a dalších příměsí ji rozdělujeme do následujících skupin:

- Zelená štěpka- štěpka získaná ze zbytků po lesní těžbě, obsahující do 45 % dřeva s příměsí kůry a zeleně maximálně do 55 %. Nalezneme v ní nejen části větví, ale také listí, popřípadě i jehličí. Z důvodu zpracování čerstvé hmoty je vlhkost této štěpky poměrně vysoká a rychle ztrácí svou kvalitu a není tedy vhodná pro dlouhodobější skladování. Jediné využití spočívá ve spalování v elektrárnách a spalovnách.
- Hnědá štěpka- vzniká při zpracování zbytkových částí kmenů a pilařských odřezků bez asimilačních orgánů (jehličí a listí), ale s větším podílem kůry. Obsahuje do 70 % dřeva s příměsí kůry maximálně do 30 % a sjednocujícím prvkem je obsah kůry. Díky vyšší výhřevnosti je vhodná pro energetické využití, zároveň díky snížené vlhkosti může být skladována delší dobu bez výraznější ztráty kvality
- Bílá štěpka- získává se z odkorněného dříví, především z odřezků při pilařské výrobě. Z důvodu vyšší ceny se pro energetické účely nepoužívá, ale uplatňuje se při výrobě dřevotřískových desek. [7]

Jedná se o čistý zdroj energie bez přidané energie na zpracování (lisování), což se promítá na její nízké pořizovací ceně. Štěpka má však nízkou objemovou hmotnost (300 kg/m^3), je tedy třeba počítat s velkým prostorem k jejímu skladování. Další nevýhodou je nutnost dobrého odvětrávání skladu štěpky, z důvodu náchylnosti k vlhnutí. [6]



Obr. 1 Dřevní štěpka [6]

2. Technické parametry parního kotle

Jedná se o parní kotel s přirozenou cirkulací na spalování dřevní štěpky o výkonu 12 t/h s výstupními parametry přehřáté páry 3,3 MPa o teplotě 400 °C a napájecí vodou o teplotě 105 °C. Kotel je konstruován jako pěti-tah, přičemž první tři tahy jsou tvořeny membránovou stěnou, tedy výparníkem a další dva tvoří plechovou nechlazenou šachtu.

Do spalovací komory je vháněn primární a sekundární spalovací vzduch v poměru jedna ku jedné, primární o teplotě 190 °C a sekundární o teplotě 260 °C. Deset procent celkového vzduchu pak slouží k pohazování paliva na rošt. Předěl mezi spalovací komorou a druhým tahem tvoří mříž, tedy rozvolnění trubek membránové stěny. Rozvolnění je realizováno vyhnutím trubek, a to tak, že jsou ve směru toku spalin navzájem přesazené, takže vždy tvoří svazek tří trubek uspořádaných za sebou.

Druhý tah je konstruován jako prázdný, (pouze membránová stěna) tím se docílí snížení koncentrace popílku, což povede k menšímu zalepování výhřevných ploch popílkovými částicemi v dalších tazích kotle.

Ve třetím tahu jsou umístěny přehříváky PII, PI-B a PI-A, ty jsou zavěšeny na dvou řadách závěsných trubek, které prochází celým 3. tahem a jsou chlazeny sytou párou z bubnu. Tah je tvořen membránovou stěnou, přičemž rozteč membránových trubek na zadní straně je 100 mm, z důvodu zavedení přehříváků.

Čtvrtý a pátý tah spalinového kanálu již není chlazen membránovou stěnou, tvoří jej plechová šachta, ve které jsou teplosměnné plochy zavěšeny na nechlazených závěsech. V tahu se nachází dva ohříváky vzduchu (OV-B a OV-A) a svazky ekonomizéru.

výkon kotle	12 t/h
tlak přehřáté páry	3,3 Mpa
teplota přehřáté páry	400 °C
teplota napájecí vody	105 °C
teplota spalin na výstupu z kotle	145 °C
palivo o výhřevnosti	8 MJ/kg

Tab. 1: Technické parametry kotle

3. Stechiometrický výpočet

Pomocí stochiometrického výpočtu získáme potřebný objem vzduchu pro spálení jednotkového množství paliva (1 kg) a objem spalin, vzniklý při tomto spálení. Jedná se o objemové výpočty, při jejichž řešení vycházíme z bilance látkového množství a z chemických reakčních rovnic, které jinak nazýváme stochiometrické spalovací rovnice.

Zadané palivo: dřevní štěpka

výhřevnost Q_r [MJ/kg]	C ^r [%]	N ^r [%]	S ^r [%]	A ^r [%]	H ^r [%]	O ^r [%]	W [%]	Cl ^r [%]
8	23,21	0,22	0,01	3,5	2,93	20,11	50	0,02 max

Tab. 2: složení paliva – hrubý vzorek

3.1. Výpočet minimálního množství vzduchu

Minimální množství kyslíku pro spálení 1 kg paliva

$$\begin{aligned} O_{O_2_{min}} &= \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) = \\ &= \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{23,21}{12,01} + \frac{2,93}{4,032} + \frac{0,01}{32,06} - \frac{20,11}{32} \right) = 0,454767 \text{ Nm}^3/\text{kg} \end{aligned} \quad (1)$$

Minimální množství suchého vzduchu pro spálení 1 kg paliva

$$O_{VZ_{min}}^S = \frac{O_{O_2_{min}}}{0,2103} = \frac{0,454767}{0,2103} = 2,162468 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (2)$$

Minimální množství vlhkého vzduchu pro spálení 1 kg paliva

Pro běžné klimatické podmínky je možno volit $f=1,016$, jež odpovídá relativní vlhkosti 70 % a teplotě 20 °C. [1]

$$O_{VZ_{min}}^V = f \cdot O_{VZ_{min}}^S = 1,016 \cdot 2,162468 = 2,197068 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (3)$$

f – součinitel respektující podíl vodní páry připadající na 1 Nm³

Minimální objem vodní páry ve spalovacím vzduchu pro spálení 1 kg paliva

$$O_{H_2O_{min}} = O_{VZ_{min}}^V - O_{VZ_{min}}^S = 2,197068 - 2,162468 = 0,034599 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (4)$$

3.2. Výpočet minimálních množství jednotlivých složek ve spalinách

Oxid uhličitý

$$\begin{aligned} O_{CO_2} &= \frac{22,26}{100} \cdot \frac{C^r}{12,01} + 0,0003 \cdot O_{VZ_min}^S = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{23,21}{12,01} + 0,0003 \cdot 2,162468 = \\ &= 0,430836 \text{ Nm}^3/\text{kg} \end{aligned} \quad (5)$$

Oxid siřičitý

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{S^r}{32,06} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{0,01}{32,06} = 6,82782 \cdot 10^{-5} \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (6)$$

Dusík

$$\begin{aligned} O_{N_2} &= \frac{22,4}{100} \cdot \frac{N^r}{28,016} + 0,7805 \cdot O_{VZ_min}^S = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{0,22}{28,016} + 0,7805 \cdot 2,162468 = \\ &= 1,689566 \text{ Nm}^3/\text{kg} \end{aligned} \quad (7)$$

Argon

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VZ_min}^S = 0,0092 \cdot 2,162468 = 0,019895 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (8)$$

Minimální množství suchých spalin

$$\begin{aligned} O_{SP_min}^S &= O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} = 0,430836 + 6,82782 \cdot 10^{-5} + 1,689566 + \\ &+ 0,019895 = 2,140364 \text{ Nm}^3/\text{kg} \end{aligned} \quad (9)$$

Vznikne dokonalým spalováním při minimálním přebytku vzduchu ($\alpha=1$).

Minimální množství vodní páry ve spalinách

$$\begin{aligned} O_{SP}^{H_2O_min} &= \frac{44,8}{4,032 \cdot 100} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016 \cdot 100} \cdot W^r + O_{H_2O_min} = \\ &= \frac{44,8}{4,032 \cdot 100} \cdot 2,93 + \frac{22,4}{18,016 \cdot 100} \cdot 50 + 0,034599 = \\ &= 0,981825 \text{ Nm}^3/\text{kg} \end{aligned} \quad (10)$$

Minimální množství vlhkých spalin

$$O_{SP_{min}}^V = O_{SP_{min}}^S + O_{SP}^{H_2O-min} = 2,140364 + 0,981825 = 3,122189 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (11)$$

3.3. Skutečné množství spalin a vzduchu

V praxi k dokonalému promísení a spálení při stechiometrickém množství vzduchu nedochází. Proto je třeba volit součinitele přebytku vzduchu, který je jednou z důležitých veličin pro provoz kotle. Při nízkém přebytku vzduchu může docházet k nedokonalému spalování, tím pádem ke zvýšení ztrát chemickým nedopalem a snížení účinnosti. Vysoký součinitel přebytku vzduchu vede naopak ke zvýšení komínové ztráty a tím snížení účinnosti. S ohledem na poměrně vysokou vlhkost paliva tedy volím $\alpha = 1,35$.

Skutečné množství suchého vzduchu pro spálení 1 kg paliva

$$O_{VZ_{skut}}^S = \alpha \cdot O_{VZ_{min}}^S = 1,35 \cdot 2,162468 = 2,919332 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (12)$$

Skutečné množství vlhkého vzduchu pro spálení 1 kg paliva

$$O_{VZ_{skut}}^V = f \cdot O_{VZ_{skut}}^S = 1,016 \cdot 2,919332 = 2,9660418 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (13)$$

Skutečné množství suchých spalin

$$\begin{aligned} O_{SP_{skut}}^S &= O_{SP_{min}}^S + (\alpha - 1) \cdot O_{VZ_{min}}^S = 2,140364 + (1,35 - 1) \cdot 2,162468 = \\ &= 2,897228 \text{ Nm}^3/\text{kg} \end{aligned} \quad (14)$$

Skutečné množství vlhkých spalin

$$\begin{aligned} O_{SP_{skut}}^V &= O_{SP_{min}}^V + (\alpha - 1) \cdot O_{VZ_{min}}^V = 3,122189 + (1,35 - 1) \cdot 2,197068 = \\ &= 3,891163 \text{ Nm}^3/\text{kg} \end{aligned} \quad (15)$$

	vzduch [Nm ³ /kg]	spaliny [Nm ³ /kg]
suchý	2,162468	2,140364
vhký	2,197068	3,122189
s přebytkem vzduchu	2,9660418	3,891163

Tab. 3: Vypočtené objemy vzduchu a spalin

3.4. Entalpie vzduchu a spalin

t [°C]	CO ₂	SO ₂	N ₂	Ar	H ₂ O	Vzduch suchý	CO	O ₂	Popílek [kJ/kg]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	170	191,2	129,5	93,07	150,6	132,3	132,3	131,7	80,4
200	357,5	394,1	259,9	186	304,5	266,2	261,4	267	170
300	558,8	610,4	392,1	278,8	462,8	402,5	395	406,8	264,6
400	771,9	836,5	526,7	371,7	625,9	541,7	531,7	550,9	361,6
500	994,4	1070	664	464,7	794,5	684,1	671,6	698,7	459,5
600	1225	1310	804,3	557,3	968,8	829,6	814,3	849,9	558
700	1462	1554	947,3	650,2	1149	978,1	960,4	1003	658,3
800	1705	1801	1093	743,1	1335	1129	1109	1159	760,8
900	1952	2052	1241	835,7	1526	1283	1260	1318	868,4
1000	2203	2304	1392	928,2	1723	1439	1413	1477	982,8
1100	2458	2540	1544	1020	1925	1597	1567	1638	1106
1200	2716	2803	1698	1114	2132	1756	1723	1802	1240
1300	2976	3063	1853	1207	2344	1916	1881	1965	1386
1400	3239	3323	2009	1300	2559	2077	2040	2129	1543
1500	3503	3587	2166	1393	2779	2240	2199	2293	1710

Tab. 4: Měrné entalpie vybraných složek spalin [2]

Entalpie minimálního objemu suchých spalin

Příklad výpočtu pro 1000°C.

$$\begin{aligned}
 I_{SP_min}^S &= O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{Ar} \cdot i_{Ar} + O_{SP}^{H_2O_min} \cdot i_{H_2O} = \\
 &= 0,430836 \cdot 2203 + 6,82782 \cdot 10^{-5} \cdot 2304 + 1,689566 \cdot 1392 + \\
 &+ 0,019895 \cdot 1020 + 0,981825 \cdot 1723 = 5011,314 \text{ KJ/kg}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Entalpie minimálního množství vlhkého vzduchu

Příklad výpočtu pro 1000°C.

$$\begin{aligned}
 I_{VZ_min}^V &= O_{VZ_min}^S \cdot i_{VZ}^S + O_{H_2O_min} \cdot i_{H_2O} = 2,162468 \cdot 1439 + 0,034599 \cdot 1723 = \\
 &= 3171,407 \text{ KJ/kg}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Entalpie popílku ve spalinách se uvažuje, jen pokud procento popelovin splňuje následující nerovnost [1]

$$A^r > \frac{6 \cdot Q_i^r}{41,8 \cdot X_p}$$

$$3,5 > \frac{6 \cdot 8000}{41,8 \cdot 50} \quad X_p \dots \text{procento popílku v úletu volím 50\%}$$

$$3,5 > 22,966 \rightarrow \text{nerovnost není splněna, tudíž } I_p \text{ neuvažuji}$$

(18)

Entalpie spalin při spalování s přebytkem vzduchu α

Příklad výpočtu pro teplotu 1000 °C a $\alpha = 1,35$.

$$I_{SP}^\alpha = I_{SP_min}^S + (\alpha - 1) \cdot I_{VZ_min}^V = 5011,314 + (1,35 - 1) \cdot 3171,407 =$$

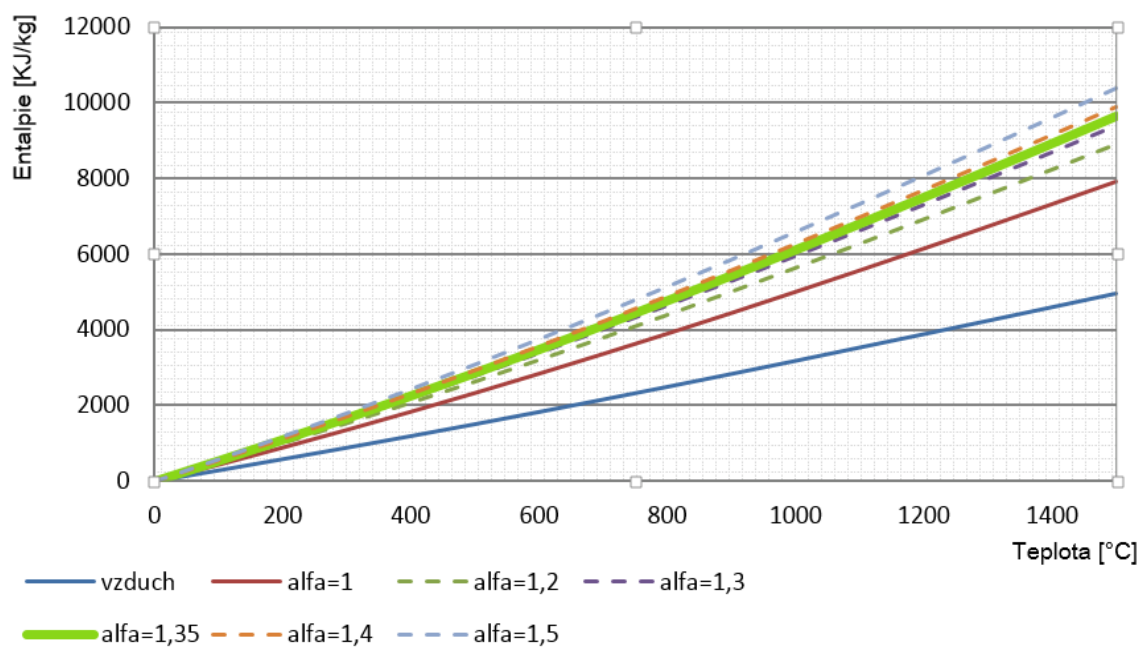
$$= 6121,30654 \text{ KJ/kg}$$

(19)

Vypočtené hodnoty entalpií při různých teplotách jsou uvedeny v následující tabulce, podle nich byl zkonstruován I-t diagram vzduchu a spalin (Obr. 1.), včetně různých hodnot přebytku vzduchu.

t [°C]	i_{VZ_min}	i_{SP_min}	$i_{SP} (\alpha=1)$	$i_{SP} (\alpha=1,2)$	$i_{SP} (\alpha=1,3)$	$i_{SP} (\alpha=1,35)$	$i_{SP} (\alpha=1,4)$	$i_{SP} (\alpha=1,5)$
100	291,3053	441,7683	441,7683	500,0293	529,1599	543,72513	558,2904	587,4209
200	586,1847	895,8348	895,8348	1013,072	1071,69	1100,9995	1130,309	1188,927
300	886,4062	1363,206	1363,206	1540,488	1629,128	1673,4487	1717,769	1806,41
400	1193,065	1844,432	1844,432	2083,045	2202,352	2262,0051	2321,658	2440,965
500	1506,834	2339,673	2339,673	2641,039	2791,723	2867,0644	2942,406	3093,09
600	1827,504	2849,06	2849,06	3214,561	3397,311	3488,6863	3580,062	3762,812
700	2154,865	3371,566	3371,566	3802,539	4018,025	4125,7685	4233,512	4448,998
800	2487,617	3906,913	3906,913	4404,436	4653,198	4777,5789	4901,96	5150,722
900	2827,246	4452,773	4452,773	5018,222	5300,947	5442,309	5583,671	5866,396
1000	3171,407	5011,314	5011,314	5645,595	5962,736	6121,3065	6279,877	6597,018
1100	3520,066	5578,162	5578,162	6282,175	6634,182	6810,1854	6986,189	7338,195
1200	3871,061	6154,637	6154,637	6928,849	7315,955	7509,508	7703,061	8090,167
1300	4224,391	6738,551	6738,551	7583,43	8005,869	8217,0883	8428,308	8850,747
1400	4579,987	7328,394	7328,394	8244,391	8702,39	8931,3893	9160,389	9618,387
1500	4940,081	7925,266	7925,266	8913,282	9407,29	9654,2944	9901,298	10395,31

Tab. 5: Vypočtené hodnoty entalpie



Obr. 2: I-t diagram vzduchu a spalin

4. Tepelná bilance kotle

4.1. Teplo přivedené do kotle

Teplo přivedené do kotle na 1 kg paliva:

$$Q_p^P = Q_i^r + i_p = 8000 + 53,4 = 8053,4 \text{ KJ/kg} \quad (20)$$

Kde:

Q_i^r – výhřevnost paliva [KJ/kg]
 i_p – fyzické teplo paliva [KJ/kg]

Fyzické teplo paliva se uvažuje jen v případě, je-li palivo předeřhříváno mimo kotel. V případě, že palivo předeřhříváno není, se fyzické teplo uvažuje u paliv, jejichž obsah vody splňuje následující podmínku:

$$\begin{aligned} W^r &\geq \frac{Q_i^r}{4,19} \cdot \frac{1}{150} \\ 50 &\geq \frac{8000}{4,19} \cdot \frac{1}{150} \\ 50 &\geq 12,7287 \rightarrow \text{vyhovuje} \end{aligned} \quad (21)$$

Fyzické teplo paliva:

$$i_p = c_p \cdot t_p = 2,67 \cdot 20 = 53,4 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \quad (22)$$

Kde:

c_p – měrné teplo paliva [KJ/kgK]
 t_p – teplota paliva, podle [1] volena 20°C

Měrné teplo paliva se určí ze vztahu:

$$c_p = c_w \cdot \frac{W^r}{100} + c_{su} \cdot \frac{100 - W^r}{100} = 4,19 \cdot \frac{50}{100} + 1,15 \cdot \frac{100 - 50}{100} = 2,67 \text{ KJ/kgK} \quad (23)$$

Kde:

c_{su} – měrné teplo sušiny paliva, volelo 1,15 $\frac{\text{KJ}}{\text{kgK}}$ dle [1]
 c_w – měrné teplo vody [KJ/kgK]

4.2. Tepelné ztráty a tepelná účinnost kotle

Tepelná účinnost kotle je značně ovlivňována velikostí tepelných ztrát. Výpočty hodnot jednotlivých tepelných ztrát jsou znázorněny v této kapitole.

	X_i [%]	C_i [%]	t_i [°C]	c_i [kJ/kgK]
rošt	50	5	300	0,882
2. tah	20	40	300	0,882
3. tah	20	40	300	0,882
4. tah	15	20	250	0,8659
5. tah	15	20	250	0,8659
úlet	15	20	145	0,82439

Tab. 6. Bilance popele v kotli

Kde:

X_i – bilance popele v jednotlivých částech kotle [%]
 C_i – obsah spalitelných látek v pevných zbytcích [%]
 t_i – teploty popílku [°C]
 c_i – měrné teplo popílku pro teploty t_i [kJ/kgK]

4.2.1. Ztráta mechanickým nedopalem Z_c

Neboli ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích, lze ji určit ze vztahu:

$$Z_c = Z_{cr} + Z_{c23} + Z_{c45} + Z_{cú} = 0,373 + 1,889 + 0,531 + 0,531 = 3,324 \% \quad (24)$$

Kde:

Z_{cr} – ztráta mech. nedopalem na roštu [%]
 Z_{c23} – ztráta mech. nedopalem ve II. a III. tahu [%]
 Z_{c45} – ztráta mech. nedopalem ve IV. a V. tahu [%]
 $Z_{cú}$ – ztráta mech. nedopalem úletu [%]

Ztráta na roštu

$$Z_{cr} = \frac{C_r}{100 - C_r} \cdot \frac{X_r}{100} \cdot \frac{A_r}{Q_p^p} \cdot Q_{ci} = \frac{5}{100 - 5} \cdot \frac{50}{100} \cdot \frac{3,5}{8053,4} \cdot 32600 = 0,373 \% \quad (25)$$

Kde:

Q_{ci} – průměrná výhřevnost spalitelných látek ve zbytcích, dle [1] činí $32600 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
 A_r – obsah popele v palivu [%]

Ztráta ve II. a III. tahu:

$$Z_{c23} = \frac{C_{23}}{100 - C_{23}} \cdot \frac{X_{23}}{100} \cdot \frac{A_r}{Q_p^p} \cdot Q_{ci} = \frac{40}{100 - 40} \cdot \frac{20}{100} \cdot \frac{3,5}{8053,4} \cdot 32600 = 1,889 \% \quad (26)$$

Ztráta ve IV. a V. tahu:

$$Z_{c45} = \frac{C_{45}}{100 - C_{45}} \cdot \frac{X_{45}}{100} \cdot \frac{A_r}{Q_p^p} \cdot Q_{ci} = \frac{20}{100 - 20} \cdot \frac{15}{100} \cdot \frac{3,5}{8053,4} \cdot 32600 = 0,531 \% \quad (27)$$

Ztráta v úletu:

$$Z_{cú} = \frac{C_{ú}}{100 - C_{ú}} \cdot \frac{X_{ú}}{100} \cdot \frac{A_r}{Q_p^p} \cdot Q_{ci} = \frac{20}{100 - 20} \cdot \frac{15}{100} \cdot \frac{3,5}{8053,4} \cdot 32600 = 0,531 \% \quad (28)$$

4.2.2. Ztráta chemickým nedopalem Z_{cn}

Neboli ztráta hořlavinou ve spalínách je dána chemickou nedokonalostí spalování a vyjadřuje teplo ztracené v důsledku přítomnosti nespálených plynů ve spalínách. Po odborné konzultaci volím $Z_{cn} = 0,1 \%$

4.2.3. Ztráta sdílením tepla do okolí Z_{sv}

Zohledňuje množství tepla, unikající pláštěm kotle do okolí. Hodnota se odvíjí od způsobu oplechování, velikosti povrchu a kvality izolace stěn. Po odborné konzultaci volím $Z_{sv} = 1,1\%$

4.2.4. Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků Z_f

Vyjadřuje nevyužité teplo odcházejících tuhých zbytků.

$$Z_f = Z_{fr} + Z_{f23} + Z_{f45} + Z_{fú} = 0,061 + 0,038 + 0,018 + 0,009 = 0,126 \% \quad (29)$$

Kde:

Z_{fr} – ztráta fyz. teplem tuhých zbytků na roštu [%]

Z_{f23} – ztráta fyz. teplem tuhých zbytků ve II. a III. tahu [%]

Z_{f45} – ztráta fyz. teplem tuhých zbytků ve IV. a V. tahu [%]

$Z_{fú}$ – ztráta fyz. teplem tuhých zbytků úletu [%]

Ztráta na roštu:

$$Z_{fr} = \frac{X_r}{100 - C_r} \cdot \frac{A_r}{Q_p^p} \cdot c_r \cdot t_r = \frac{50}{100 - 5} \cdot \frac{3,5}{8053,4} \cdot 0,882 \cdot 300 = 0,061 \% \quad (30)$$

Ztráta ve II. a III. tahu:

$$Z_{f23} = \frac{X_{23}}{100 - C_{23}} \cdot \frac{A_r}{Q_p^p} \cdot c_{23} \cdot t_{23} = \frac{20}{100 - 40} \cdot \frac{3,5}{8053,4} \cdot 0,881 \cdot 300 = 0,038 \% \quad (31)$$

Ztráta ve IV. a V. tahu:

$$Z_{f45} = \frac{X_{45}}{100 - C_{45}} \cdot \frac{A_r}{Q_P^P} \cdot c_{45} \cdot t_{45} = \frac{15}{100 - 20} \cdot \frac{3,5}{8053,4} \cdot 0,8659 \cdot 250 = 0,018 \% \quad (32)$$

Ztráta v úletu:

$$Z_{fú} = \frac{X_{ú}}{100 - C_{ú}} \cdot \frac{A_r}{Q_P^P} \cdot c_{ú} \cdot t_{ú} = \frac{15}{100 - 20} \cdot \frac{3,5}{8053,4} \cdot 0,8221 \cdot 140 = 0,009 \% \quad (33)$$

4.2.5. Ztráta citelným teplem spalin (komínová) Z_k

Jedná se o teplo odcházející z kotle ve formě kouřových plynů, které představuje nejvýznamnější ztrátu, jež ovlivňuje účinnost kotle.

$$Z_k = (100 - Z_c) \cdot \frac{I_{sp}^{145} - I_{vz}}{Q_P^P} = (100 - 3,324) \cdot \frac{794,499 - 78,652}{8053,4} = 8,593 \% \quad (34)$$

Kde:

I_{sp}^{145} – entalpie spalin při teplotě 145°C a přebytku vzduchu 1,35 [kJ/kg]

I_{vz} – entalpie vzduchu při okolní teplotě 20°C a přebytku vzduchu 1,35 [kJ/kg]

$$I_{vz} = \alpha \cdot I_{vz_min}^{20} = 1,35 \cdot 58,261 = 78,652 \text{ kJ/kg} \quad (35)$$

4.2.6. Tepelná účinnost kotle

$$\begin{aligned} \eta_k &= 100 - (Z_c + Z_{cn} + Z_f + Z_{sv} + Z_k) = \\ &= 100 - (3,324 + 0,1 + 0,126 + 1,1 + 8,593) = 86,756 \% \end{aligned} \quad (36)$$

4.3. Výrobní teplo páry a množství paliva

4.3.1. Výrobní teplo páry

$$Q_V = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) = 3,333 \cdot (3226,471 - 443,0471) = 9277,463 \text{ kJ/s} \quad (37)$$

Kde:

M_{pp} – parní výkon kotle $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$

i_{pp} – entalpie přehřáté páry (400°C; 3,3MPa) [kJ/kg]

i_{nv} – entalpie napájecí vody (105°C) [kJ/kg]

4.3.2. Množství paliva

Množství paliva přivedeného do kotle:

$$M_p = \frac{Q_v}{Q_p^p \cdot \frac{\eta_k}{100}} = \frac{9277,463}{8053,4 \cdot \frac{86,756}{100}} = 1,3279 \text{ kg/s} \quad (38)$$

Množství paliva skutečně spáleného:

$$M_{pv} = M_p \cdot \left(1 - \frac{Z_c}{100}\right) = 1,3279 \cdot \left(1 - \frac{3,3245}{100}\right) = 1,2837 \text{ kg/s} \quad (39)$$

5. Návrh konvekčních ploch:

Výpočet teplosměnných ploch se odvíjí od požadavků na páru, pro kterou je kotel navrhován. Uvažované tlakové ztráty v jednotlivých teplosměnných plochách:

teplosměnná plocha	tlaková ztráta [MPa]
přehřívák II.	0,2
přehřívák I.	0,2
závěsné trubky	0,05
výparník	0
ekonomizér	0,2

Tab. 7: Tlakové ztráty

Tlak a teplota napájecí vody:

Ke koncovému tlaku páry přičtu jednotlivé uvažované tlakové ztráty.

$$\begin{aligned} p_{nv} &= p_{pp} + \Delta p_{přII} + \Delta p_{přI} + \Delta p_{zt} + \Delta p_{vyp} + \Delta p_{eko} = \\ &= 3,3 + 0,2 + 0,2 + 0,05 + 0 + 0,2 = 3,95 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (40)$$

p_{nv} – tlak napájecí vody [MPa]

t_{nv} – teplota napájecí vody, $t_{nv} = 105 \text{ °C}$

Této teplotě a tlaku odpovídá entalpie:

$$i_{nv} = 443,047 \text{ kJ/kgK}$$

5.1. Přehřívák II

Volím entalpický spád: $\Delta i_{přII} = 220 \text{ kJ/kg}$

Výstupní parametry páry z přehříváku II:

$$p_{out}^{přII} = 3,3 \text{ MPa}$$

$$t_{out}^{přII} = 400 \text{ °C}$$

$$i_{out}^{přII} = 3226,471 \text{ kJ/kg}$$

Vstupní parametry páry do přehříváku II:

$$p_{in}^{přII} = p_{out}^{přII} + \Delta p = 3,3 + 0,2 = 3,5 \text{ MPa}$$

$$i_{in}^{přII} = i_{out}^{přII} - \Delta i = 3226,471 - 220 = 3006,471 \text{ kJ/kg}$$

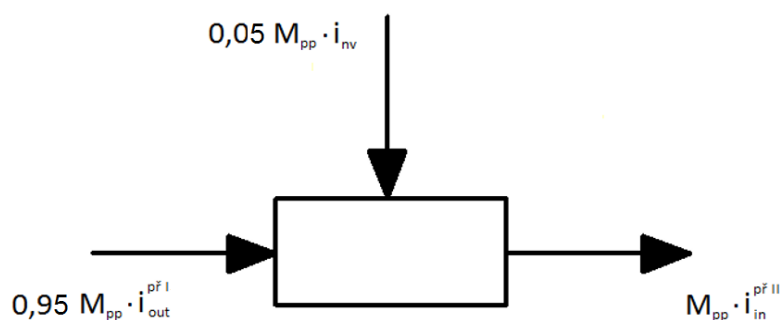
$$t_{in}^{přII} = 310,659 \text{ °C}$$

Tepelný výkon:

$$Q_{přII} = M_{pp} \cdot (i_{out}^{přII} - i_{in}^{přII}) = 3,333 \cdot (3226,471 - 3006,471) = 733,333 \text{ kW} \quad (41)$$

5.2. Přehřívák I

Na výstupu z přehříváku I je umístěna regulace teploty přehřáté páry, a to vstřikem napájecí vody. Množství vstřikované vody volím po odborné konzultaci 5%.



Obr. 3.: Bilanční schéma

Výstupní parametry páry z přehříváku I:

Bilanční rovnice:

$$i_{out}^{přI} \cdot 0,95M_{pp} + i_{nv} \cdot 0,05M_{pp} = i_{in}^{přII} \cdot M_{pp} \rightarrow$$
$$\rightarrow i_{out}^{přI} = \frac{i_{in}^{přII} \cdot M_{pp} - i_{nv} \cdot 0,05M_{pp}}{0,95 \cdot M_{pp}} = \frac{3006,471 \cdot 3,333 - 443,232 \cdot 0,05 \cdot 3,333}{0,95 \cdot 3,333} =$$
$$= 3141,3779 \text{ kJ/kg}$$

(42)

$$p_{out}^{přI} = p_{in}^{přII} = 3,5 \text{ MPa}$$

$$t_{out}^{přI} = 365,2146^\circ\text{C}$$

*hodnota stanovena jako funkce tlaku a entalpie [3]***Vstupní parametry páry do přehříváku I:**

$$p_{in}^{přI} = p_{out}^{přI} + \Delta p = 3,5 + 0,2 = 3,7 \text{ MPa}$$

(43)

Volím entalpický spád: $\Delta i_{přI} = 300 \text{ kJ/kg}$

$$i_{in}^{přI} = i_{out}^{přI} - \Delta i_{přI} = 3141,3779 - 300 = 2841,3779 \text{ kJ/kg}$$
$$t_{in}^{přI} = 256,5781^\circ\text{C} \quad \text{hodnota stanovena jako funkce tlaku a entalpie [3]}$$

(44)

Tepelný výkon:

$$Q_{přI} = 0,95 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out}^{přI} - i_{in}^{přI}) = 0,95 \cdot 3,333 \cdot (3141,3779 - 2841,3779) =$$
$$= 950 \text{ kW}$$

(45)

5.3. Závěsné trubky

Závěsné trubky jsou napájeny sytou párou z bubnu.

Výstupní parametry páry ze závěsných trubek:

$$t_{out}^{zt} = t_{in}^{přI} = 256,5781^\circ\text{C}$$

$$p_{out}^{zt} = p_{in}^{přl} = 3,7 \text{ MPa}$$

$$i_{out}^{zt} = i_{in}^{přl} = 2841,3779 \text{ kJ/kg}$$

Vstupní parametry páry do závěsných trubek:

$$p_{in}^{zt} = p_{out}^{zt} + \Delta p = 3,7 + 0,05 = 3,75 \text{ MPa}$$

$$i_{in}^{zt} = 2801,9666 \text{ kJ/kg}$$

$$t_{in}^{zt} = 246,5593 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{hodnota teploty a entalpie se stanoví jako funkce tlaku [3].} \quad (46)$$

Tepelný výkon:

$$\begin{aligned} Q_{zt} &= 0,95 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out}^{zt} - i_{in}^{zt}) = 0,95 \cdot 3,333 \cdot (2841,3779 - 2801,9666) = \\ &= 124,8024 \text{ kW} \end{aligned} \quad (47)$$

5.4. Výparník

Do výparníku vstupuje voda, dochází k ohřevu na sytou kapalinu a dále pak k přeměně na sytou páru.

Výstupní parametry páry z výparníku:

$$t_{out}^{vyp} = t_{in}^{zt} = 246,5593 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$p_{out}^{vyp} = p_{in}^{zt} = 3,75 \text{ MPa}$$

$$i_{out}^{vyp} = i_{in}^{zt} = 2801,9666 \text{ kJ/kg}$$

Vstupní parametry vody do výparníku:

$$t_{in}^{vyp} = t_{out}^{vyp} = 246,5593 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$p_{in}^{vyp} = p_{out}^{vyp} = 3,75 \text{ MPa}$$

$$i_{in}^{vyp} = 1069,01146 \text{ kJ/kg}$$

kde:

$$i_{in}^{vyp} - \text{entalpie syté kapaliny, stavená jako funkce tlaku [3].}$$

Tepelný výkon:

$$\begin{aligned} Q_{vyp} &= 0,95 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out}^{vyp} - i_{in}^{vyp}) = 0,95 \cdot 3,333 \cdot (2801,9666 - 1069,0114) = \\ &= 6651,7681 \text{ kW} \end{aligned} \quad (48)$$

5.5. Ekonomizér

Výstupní parametry vody z ekonomizéru:

Uvažuji nedohřev vody v ekonomizéru 81 °C

$$\begin{aligned} t_{out}^{eko} &= t_{in}^{vyp} - \Delta t = 246,5593 - 81 = 165,5363 \text{ °C} \\ p_{out}^{eko} &= p_{in}^{vyp} = 3,75 \text{ MPa} \\ i_{out}^{vyp} &= 701,8083 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{hodnota entalpie stanovena jako funkce tlaku a teploty [3]} \end{aligned} \quad (49)$$

Vstupní parametry vody do ekonomizéru:

$$\begin{aligned} t_{in}^{eko} &= 105 \text{ °C} \\ p_{in}^{eko} &= p_{out}^{eko} + \Delta p = 3,75 + 0,2 = 3,95 \text{ MPa} \\ i_{in}^{eko} &= 443,2323 \text{ kJ/kg} \quad \text{hodnota entalpie stanovena jako funkce tlaku a teploty [3]} \end{aligned} \quad (50)$$

Tepelný výkon:

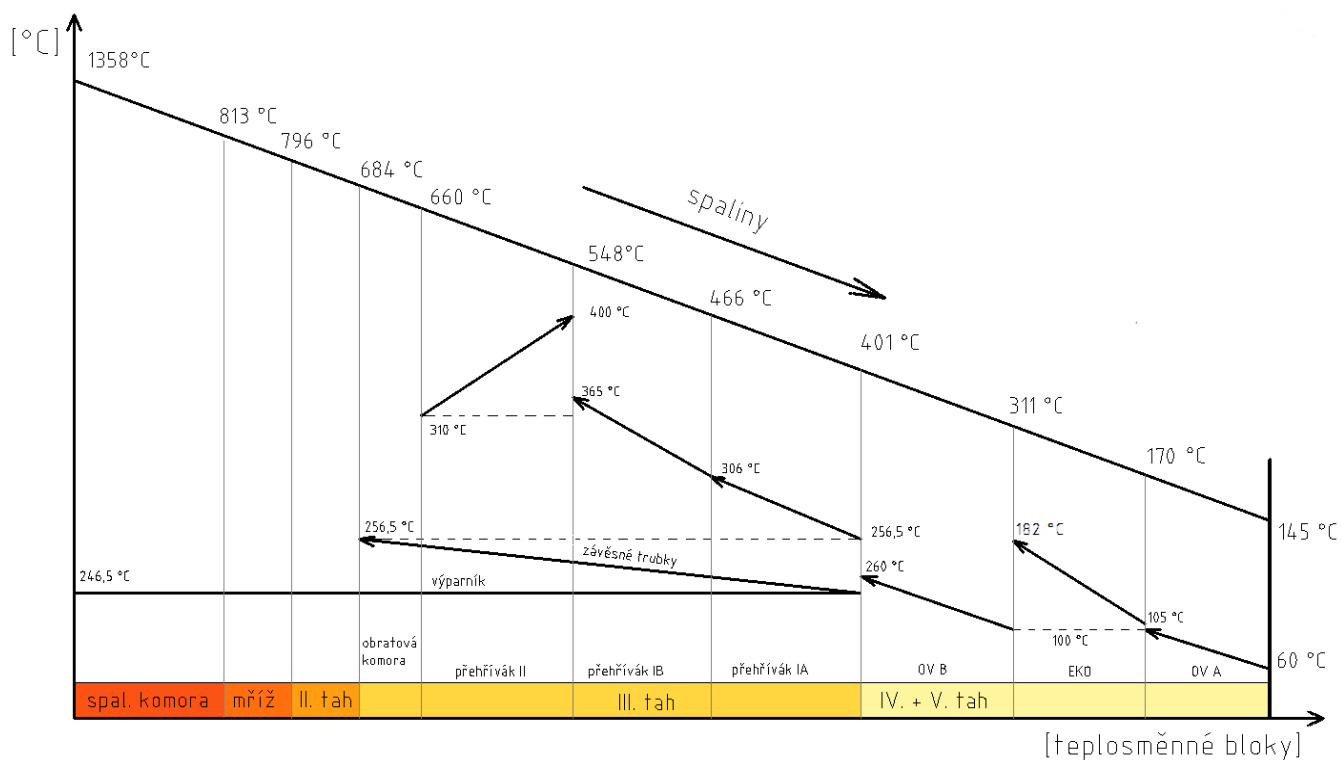
$$\begin{aligned} Q_{eko} &= 0,95 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out}^{eko} - i_{in}^{eko}) = 0,95 \cdot 3,333 \cdot (701,8083 - 443,2323) = \\ &= 817,557 \text{ kW} \end{aligned} \quad (51)$$

5.6. Celkový tepelný výkon

$$\begin{aligned} Q_{celk} &= Q_{přII} + Q_{přI} + Q_{zt} + Q_{vyp} + Q_{eko} = \\ &= 733,333 + 950 + 124,8024 + 6651,7681 + 817,557 = \\ &= 9277,4609 \text{ kW} \end{aligned} \quad (52)$$

teplosměnná plocha		teplota [°C]	tlak [Mpa]	entalpie [kJ/kg]	entalpický spád [kJ/kg]	výkon [kW]
přehřívák II	výstup	400,00	3,3	3226,47	220,00	733,33
	vstup	310,66	3,5	3006,47		
přehřívák I	výstup	365,21	3,5	3141,38	300,00	950,00
	vstup	256,58	3,7	2841,38		
závěsné trubky	výstup	256,58	3,7	2841,38	39,41	124,80
	vstup	246,56	3,75	2801,97		
výparník	výstup	246,56	3,75	2801,97	1732,96	6651,77
	vstup	246,54	3,75	1069,01		
ekonomizér	výstup	165,54	3,75	701,41	258,18	817,56
	vstup	105,00	3,95	443,047		
celkový výkon						9277,46

Tab. 8: Přehled výhřevných ploch ze strany pracovního média



Obr. 4: Pilový diagram

6. Výpočet spalovací komory

Spalovací komora, nazývaná též jako ohniště, je prostor, do kterého je přiváděno palivo spolu se spalovacím vzduchem. Dochází k hoření, při němž se uvolňuje teplo. Ve spalovací komoře dosahují teploty nejvyšších hodnot a je to tedy tepelně nejexponovanější část celého kotle. Výpočet spočívá ve stanovení geometrických rozměrů, adiabatické teploty a následně teploty odcházejících spalin, tedy teploty na konci ohniště. [1]

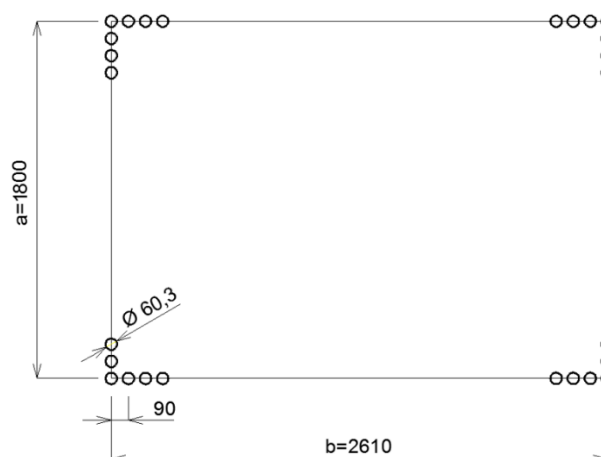
Předběžné průřezové zatížení ohniště volím po odborné konzultaci $q_s = 2 \text{ MW/m}^2$, z něhož stanovím základní rozměry ohniště.

Plošný rozměr ohniště:

$$q_s = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{S_0} \rightarrow S_0 = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{q_s} = S_0 = \frac{1,3279 \cdot 8}{2} = 5,3114 \text{ m}^2 \quad (53)$$

Při volbě rozměrů plochy je třeba vycházet z doporučení poměru stran ($a/b \approx 0,8$). V mém případě je poměr stran 0,69. Další věcí je navolit rozměry tak, aby byly dělitelné číslem 0,09, a to z důvodu roztečí membránových trubek.

Volím ($a = 1,8 \text{ m}$; $b = 2,61 \text{ m}$)



Obr. 5: Spalovací komora

Skutečná plocha roštu: $S_0 = a \cdot b = 1,8 \cdot 2,61 = 4,698 \text{ m}^2 \quad (54)$

Skutečné zatížení roštu: $q_s = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{S_0} = \frac{1,3279 \cdot 8}{4,698} = 2,2611 \text{ MW/m}^2 \quad (55)$

Předběžný objem spalovací komory:

Informativní hodnoty objemového tepelného zatížení jsou uvedeny v [2], podle nichž pro roštové ohniště nabývá hodnot od 100 do 200 kW/m^3 , přičemž obecně platí, že u většího ohniště lze užít nižší objemové zatížení. Volím tedy $q_v = 180 \text{ kW/m}^3$

$$V_0 = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{q_v} = \frac{1,3279 \cdot 8000}{180} = 59,0157 \text{ m}^3 \quad (56)$$



Výška spalovací komory: $h = \frac{V_0}{S_0} = \frac{59,0157}{4,698} = 12,562 \rightarrow 12 \text{ m}$ (57)

Skutečný objem spalovací komory: $V_0 = S_0 \cdot h = 4,698 \cdot 12 = 56,846 \text{ m}^3$ (58)

Skutečné objemové zatížení: $q_v = \frac{M_p \cdot Q_l^r}{V_0} = \frac{1,3279 \cdot 8000}{56,846} = 188,4282 \text{ kW/m}^3$ (59)

Účinná sálavá plocha stěn ohniště:

Je dána součtem všech ploch spalovací komory kromě plochy mříže a roštu.

$$\begin{aligned} F_{úsp} &= 2 \cdot (b \cdot h) + a \cdot h + a \cdot (h - c) + a \cdot b = \\ &= 2 \cdot (2,61 \cdot 12) + 1,8 \cdot 12 + 1,8 \cdot (12 - 2) + 1,8 \cdot 2,61 = 106,938 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (60)$$

Celkový povrch stěn ohniště:

$$\begin{aligned} F_{st} &= 2 \cdot (a \cdot b) + 2 \cdot (a \cdot h) + 2 \cdot (b \cdot h) = \\ &= 2 \cdot (1,8 \cdot 2,61) + 2 \cdot (1,8 \cdot 12) + 2 \cdot (2,61 \cdot 12) = 115,236 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (61)$$

Výška mříže:

Výpočet se odvíjí od zvolené rychlosti spalin v mříži, kterou s ohledem na obrazivní účinky popítku volím $w_{sp} = 7 \text{ m/s}$.

$$\begin{aligned} c &= \frac{O_{SP_{skut}}^V \cdot M_{pv}}{w_{sp} \cdot (a - z_1 \cdot D)} \cdot \frac{273 + t_{ko}}{273} = \frac{3,891 \cdot 1,2837}{7 \cdot (1,8 - 7 \cdot 0,0603)} \cdot \frac{273 + 813}{273} = \\ &= 2,0601 \rightarrow 2 \text{ m} \end{aligned} \quad (62)$$

Kde:

D – vnější průměr membránové trubky [m]
 z_1 – počet trubek v jedné řadě mříže
 t_{ko} – zvolená teplota na konci ohniště [°C]

6.1. Tepelný výpočet ohniště

Tepelný výpočet ohniště je založen na teorii podobnosti v tepelných procesech spalovací komory. Některé veličiny jsou závislé na T_{ko} , tuto teplotu nejdříve zvolím a pro ni pak provádím další výpočty. Z vypočtených potřebných veličin už můžu dopočítat skutečnou teplotu na konci ohniště. [1]

Volená teplota na konci ohniště:

$$T_{ko} = 813 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Součinitel M:

Součinitel se mění v závislosti na poměrné výšce maximální hodnoty teploty plamene x_{pl} , pro spalování v tenké vrstvě je $x_{pl} = 0$

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot x_{pl} = 0,59 \text{ [-]} \quad (63)$$

Boltzmannovo číslo:

$$\begin{aligned} Bo &= \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot c}{5,68 \cdot 10^{-11} \cdot \psi \cdot F_{st} \cdot (273,15 + t_{ad})^3} = \\ &= \frac{0,9875 \cdot 1,2837 \cdot 6,9478}{5,68 \cdot 10^{-11} \cdot 0,45 \cdot 115,236 \cdot (273,15 + 1358,0259)^3} = 0,6604 \end{aligned} \quad (64)$$

Kde:

φ – součinitel uchování tepla [-]
 M_{pv} – množství skutečně spáleného paliva [kg/s]
 $O_{sp} \cdot c$ – střední celkové měrné teplo spalín [kJ/kgK]
 ψ – střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěn [-]
 F_{st} – celkový povrch stěn ohniště [m²]
 t_{ad} – adiabatická teplota v ohništi [°C]

Součinitel uchování tepla:

$$\varphi = 1 - \frac{z_{so}}{\eta_k + z_{so}} = 1 - \frac{0,011}{0,8675 + 0,011} = 0,9875 \text{ [-]} \quad (65)$$

Střední celkové měrné teplo spalín:

$$O_{sp} \cdot c = \frac{I_u - I_0}{t_{ad} - t_{ko}} = \frac{8631,5684 - 4850,6992}{1358,0259 - 813} = 6,9478 \text{ kJ/kgK} \quad (66)$$

Kde:

I_u – užitečné teplo uvolněné ve spalovací komoře [kJ/kg]
 I_0 – entalpie spalín na výstupu z ohniště [kJ/kg]
 t_{ad} – adiabatická teplota v ohništi, teplota odpovídající I_u [°C]

$$I_u = Q_p^p \cdot \frac{100 - z_{cn} - z_c - z_f}{100 - z_c} + Q_{vz} =$$

$$= 8053,4 \cdot \frac{100 - 0,1 - 3,324 - 0,126}{100 - 3,324} + 596,9948 =$$

$$= 8631,5684 \text{ kJ/kg}$$

(67)

Kde:

z_{cn} – ztráta chemickým nedopalem [–]
 z_c – ztráta mech. nedopalem [%]
 z_f – ztráta fyz. teplem tuhých zbytků [%]
 Q_p^p – teplo přivedené do kotle na 1 kg [kJ/kg]
 Q_{vz} – teplo přivedené do kotle se vzduchem [kJ/kg]

Vzduch, vcházející do kotle, je rozdělen tak, že 10% vzduchu o teplotě 20 °C slouží k pohazování paliva, zbytek vzduchu je rozdělen v poměru 1:1 na primární o teplotě 190 °C a sekundární o teplotě 260 °C.

$$Q_{vz} = 0,1 \cdot \alpha \cdot I_{vz_min}^{20} + 0,45 \cdot \alpha \cdot I_{vz_min}^{190} + 0,45 \cdot \alpha \cdot I_{vz_min}^{260} =$$

$$= 0,1 \cdot 1,35 \cdot 58,261 + 0,45 \cdot 1,35 \cdot 556,697 + 0,45 \cdot 1,35 \cdot 766,3176 =$$

$$= 596,9948 \text{ kJ/kg}$$

(68)

Kde:

α – součinitel přebytku vzduchu [–]
 $I_{vz_min}^t$ – entalpie minimálního množství vzduchu pro teplotu t [kJ/kg]

Součinitel tepelné efektivity stěn:

$$\psi = x_{\dot{u}} \cdot \zeta = 1 \cdot 0,45 = 0,45$$

(69)

Kde:

$x_{\dot{u}}$ – úhlový součinitel osálení stěn ohniště, pro membránové stěny $x_{\dot{u}} = 1$ [1]
 ζ – součinitel zanesení stěn, $\zeta = 0,45$ dle [1]

Stupeň černosti ohniště:

$$a_0 = \frac{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \frac{R}{F_{st}}}{1 - (1 - a_{pl}) \cdot (1 - \psi) \cdot \left(1 - \frac{R}{F_{st}}\right)} =$$

$$= \frac{0,327 + (1 - 0,327) \cdot \frac{5,3114}{115,236}}{1 - (1 - 0,327) \cdot (1 - 0,45) \cdot \left(1 - \frac{5,3114}{115,236}\right)} = 0,5496$$

(70)

Kde:

a_{pl} – efektivní stupeň černosti plamene
 R – plocha hořící vrstvy paliva na roštu [m^2]

Efektivní stupeň černosti plamene

$$a_{pl} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-2,227 \cdot 0,101 \cdot 1,761} = 0,327 \quad (71)$$

Kde:

k – součinitel zeslabení sálání [–]
 p – tlak v ohništi, $p = 0,101 \text{ MPa}$, dle [1]
 s – účinná tloušťka sálavé vrstvy [m]

$$\begin{aligned} k &= k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu + 10 \cdot k_k \cdot \chi_1 \cdot \chi_2 = \\ &= 1,8286 + k_p \cdot \mu + 10 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 0,03 = 2,227 \end{aligned} \quad (72)$$

Kde:

$k_{sp} \cdot r_{sp}$ – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [m^{-1}/MPa]
 $k_p \cdot \mu$ – součinitel zeslabení sálání popílkovými částmi [m^{-1}/MPa]
 k_k – součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi, $k_k = 1$ dle [1]
 χ_1, χ_2 – součinitelé závislé na druhu roštu a paliva, $\chi_1 = 0,5$, $\chi_2 = 0,03$ dle [1]

$$\begin{aligned} k_{sp} \cdot r_{sp} &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{ko} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} = \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,255}{3,16 \cdot \sqrt{0,0369 \cdot 1,7611}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{813 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3662 = \\ &= 1,8286 \text{ m}^{-1}/MPa \end{aligned} \quad (73)$$

Kde:

r_{H_2O} , r_{sp} – objemové části tříatomových plynů
 p_{sp} – celkový parciální tlak [MPa]

$$\begin{aligned} r_{H_2O} &= \frac{O_{SP}^{H_2O_min} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VZ_min}^S}{O_{SP_skut}^V} = \\ &= \frac{0,9818 + (1,016 - 1) \cdot (1,35 - 1) \cdot 2,1625}{3,8912} = 0,2554 \end{aligned} \quad (74)$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{SO_2} + O_{CO_2}}{O_{SP_{skut}}^V} = \frac{6,828 \cdot 10^{-5} + 0,431}{3,8912} = 0,1107 \quad (75)$$

$$r_{sp} = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,2554 + 0,1107 = 0,3662 \quad (76)$$

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,101 \cdot 0,3662 = 0,0369 \quad (77)$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{(t_{ko} + 273,15)^2 \cdot d_{\check{c}p}^2}} \cdot \mu =$$

$$= \frac{43}{\sqrt[3]{(813 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \cdot 4,4974 = 0,2484 \quad (78)$$

Kde:

μ – koncentrace popílku ve spalínách

$d_{\check{c}p}$ – střední efektivní průměr částic popílku, $d_{\check{c}p} = 20 \mu m$ [1]

$$\mu = \frac{10 \cdot A^r}{O_{SP_{skut}}^V} \cdot \frac{X_p}{100} = \frac{10 \cdot 3,5}{3,891} \cdot \frac{50}{100} = 4,4974 \text{ g/m}^3 \quad (79)$$

Účinná tloušťka sálavé plochy:

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_0}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{56,376}{115,236} = 1,7612 \text{ m} \quad (80)$$

Množství tepla odevzdaného v ohništi do stěn:

$$Q_{st} = M_{pv} \cdot \varphi \cdot (I_u - I_0) = 1,2837 \cdot 0,9875 \cdot (8631,5684 - 4850,6992) =$$

$$= 4792,7692 \text{ kW} \quad (81)$$

Skutečná teplota na výstupu z ohniště:

$$t_{ko}^{skut} = \frac{t_{ad} + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_0}{B_0}\right)^{0,6}} - 273,15 =$$

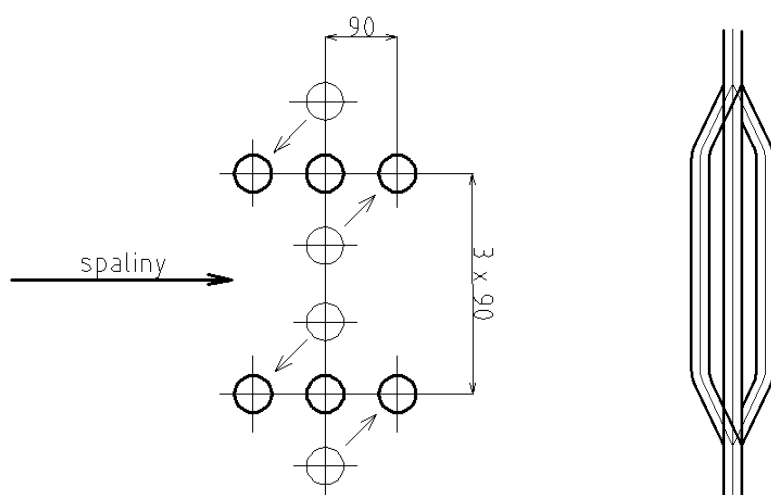
$$= \frac{1358,0259 + 273,15}{1 + 0,59 \cdot \left(\frac{0,5496}{0,6604}\right)^{0,6}} - 273,15 = 813,7082 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(82)

Skutečná teplota se od zvolené liší o 0,708 °C, což je dostačující přesnost.

7. Mříž

Mříž je tvořena rozvolněním trubek membránové stěny, tedy části výparníku a tvoří přechod mezi spalovací komorou a druhým tahem. Rozvolnění je realizováno vyhnutím trubek, a to tak, že jsou ve směru toku spalín navzájem přesazené, takže vždy tvoří svazek tří trubek uspořádaných za sebou.



Obr. 6: Princip rozvolnění membránové stěny

7.1. Tepelný výpočet mříže

Výšku rozvolnění mříže jsem již spočítal, a to na základě rychlosti proudění spalín, dále zvolím teplotu na konci mříže a pomocí tepelného výpočtu ji ověřím.

parametr	značka	rozměr	jednotka
šířka	a	1,8	m
výška	c	2	m
vnější průměr	D	0,0603	m
příčná rozteč	s ₁	0,27	m
podélná rozteč	s ₂	0,09	m
počet trubek v řadě	n _{tr}	7	-
počet řad	n _{řad}	3	-

Tab. 9: Konstrukční parametry mříže

Zvolená teplota na konci mříže:

$$t_{km} = 796 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Střední teplota spalin:

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{ko}^{skut} + t_{km}}{2} = \frac{813,7082 + 796}{2} = 805,3541 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{stř}^{sp} = t_{stř}^{sp} + 273,15 = 805,3541 + 273,15 = 1078,5041 \text{ K} \quad (83)$$

Skutečná rychlost spalin:

$$w_{sp} = \frac{O_{SP_skut}^V \cdot M_{pv}}{c \cdot (a - n_{tr} \cdot D)} \cdot \frac{273 + t_{stř}^{sp}}{273} = \frac{3,8912 \cdot 1,2837}{2 \cdot (1,8 - 7 \cdot 0,0603)} \cdot \frac{273 + 805,3541}{273} = 7,1597 \text{ m/s} \quad (84)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin:

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,65} \cdot Pr_{sp}^{0,33} = \\ &= 0,2 \cdot 0,9225 \cdot 0,9088 \cdot \frac{0,0915}{0,0603} \cdot \left(\frac{7,1597 \cdot 0,0603}{0,000127} \right)^{0,65} \cdot 0,5899^{0,33} = \\ &= 42,2027 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (85)$$

Kde:

c_z – opravný součinitel na počet řad

c_s – opravný součinitel na uspořádání svazku v závislosti na podélné a příčné rozteči

λ_{sp} – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalin [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

ν_{sp} – kinematická viskozita pro střední teplotu spalin [m^2/s]

Pr_{sp} – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalin [1]

Opravný součinitel na počet řad:

Pro méně řad než 10 platí:

$$c_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (n_{řad} - 2) = 0,91 + 0,0125 \cdot (3 - 2) = 0,9225 \quad (86)$$

Opravný součinitel na uspořádání svazku:

$$\begin{aligned} c_s &= \left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} = \left[1 + (2 \cdot 3 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,4925}{2} \right)^3 \right]^{-2} = \\ &= 0,9088 \end{aligned} \quad (87)$$

Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,27}{0,0603} = 4,478 \quad (88)$$

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,09}{0,0603} = 1,493 \quad (89)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\zeta} \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2354 \cdot 1078,5041^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{599,6863}{1078,5041}\right)^4}{1 - \left(\frac{599,6863}{1078,5041}\right)} = \\ &= 30,8672 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (90)$$

Kde:

a_{st} – stupeň černosti povrchu stěn, $a_{st} = 0,8$ [1]
 a_{ζ} – stupeň černosti proudu spalín
 T_z – teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]
 $T_{stř}^{sp}$ – střední teplota spalín [K]

$$a_{\zeta} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2685} = 0,2354 \quad (91)$$

Kde:

$k \cdot p \cdot s$ – optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (6,5226 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,4075 = 0,2685 \quad (92)$$

Kde:

k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [$\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$]
 r_{sp} – objemový podíl tříatomových plynů ve spalínách
 $k_p \cdot \mu$ – součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi, na optickou hustotu má minimální vliv, a proto jej dle [2] zanedbávám
 p – tlak, $p = 0,101 \text{ MPa}$
 s – efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} =$$

$$= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2554}{3,16 \cdot \sqrt{0,0369 \cdot 0,4076}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{805,3541 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3662 = 6,5226$$

(93)

Kde:

r_{H_2O} , r_{sp} – objemové části tříatomových plynů
 p_{sp} – celkový parciální tlak [MPa]

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,27 \cdot 0,09}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,4075 \text{ m}$$

(94)

$$t_z = t_{výp} + \Delta t = 246,5363 + 80 = 326,5363 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 326,5363 + 273,15 = 599,6863 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(95)

Kde:

Δt – voleno dle [1] 80 °C
 $t_{výp}$ – teplota média ve výparníku [°C]

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \psi_e \cdot \alpha_{sp} = 0,6 \cdot 73,0699 = 43,8419 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

(96)

Kde:

ψ_e – součinitel tepelné efektivity, pro dřevní štěpku volím 0,6 [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (42,2027 + 30,8672) = 73,0699 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

(97)

Kde:

ω – součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

Teplosměnná plocha mříže:

$$S_{mříž} = \pi \cdot D \cdot c \cdot (n_{tr} \cdot n_{řad} - 1) = \pi \cdot 0,0603 \cdot 2 \cdot (7 \cdot 3 - 1) = 8,3353 \text{ m}^2$$

(98)

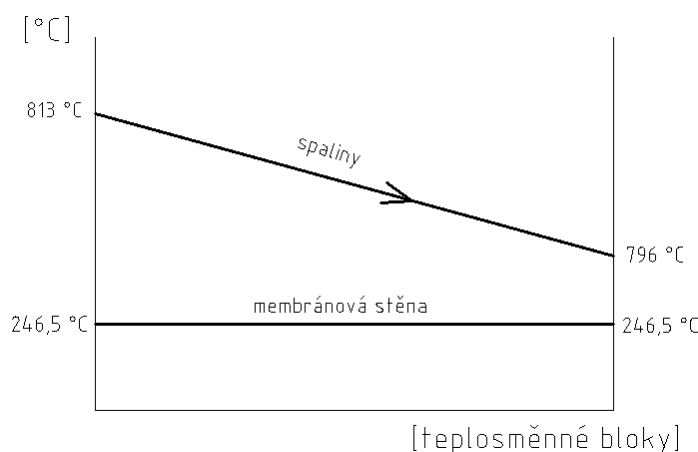
Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{567,1719 - 550,4637}{\ln \frac{567,1719}{550,4637}} = 558,7762 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_1 = t_{ko}^{skut} - t_{výp} = 813,7082 - 246,5363 = 567,1719 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_{km} - t_{výp} = 796 - 246,5363 = 550,4637 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(99)



Obr. 7: Tepelné schéma mříže

7.2. Přepočet teploty spalin na výstupu z mříže:

Teplo, které mříž odebere spalinám:

$$Q_{mříž} = (S_{mříž} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}) / 1000 = (8,3353 \cdot 43,8419 \cdot 558,7762) / 1000 = 204,196 \text{ kW}$$

(100)

Teplo spalin na vstupu do mříže:

$$Q_{sp}^{in} = I_{sp}^{in} \cdot M_{pv} = 4915,01 \cdot 1,2837 = 6309,4392 \text{ kW}$$

(101)

Kde:

I_{sp} – entalpie spalin na vstupu do mříže [kJ/kg]

Teplo spalin na výstupu z mříže:

$$Q_{sp}^{out} = Q_{sp}^{in} - Q_{mříž} = 6309,4392 - 204,196 = 6105,243 \text{ kW}$$

$$I_{sp}^{out} = \frac{Q_{sp}^{out}}{M_{pv}} = \frac{6105,243}{1,2837} = 4755,9379 \text{ kJ/kg} \quad (102)$$

Skutečnou teplotu na výstupu z mříže zjistím lineární interpolací z tabulky 5 pro I_{sp}^{out} .

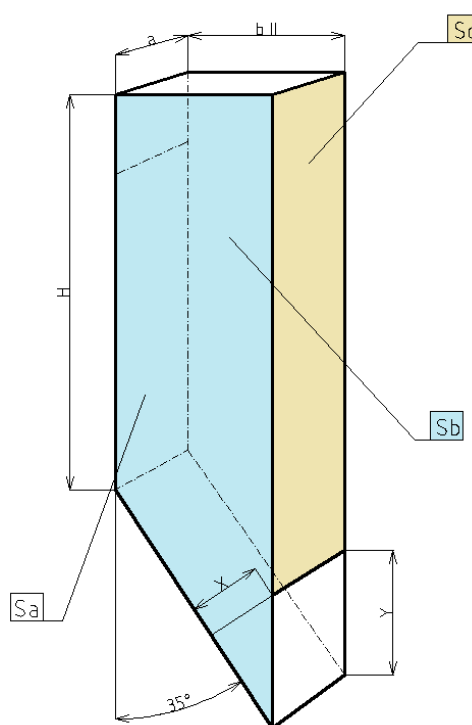
$$t_{km}^{skut} = 796,6798 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Liší se o 0,6798 $^\circ\text{C}$, což je dostačující odchylka.

8. Výpočet II. tahu kotle

Druhý tah je prázdný, je tvořen pouze membránovou stěnou, nejsou v něm tedy umístěny žádné svazky a závěsné trubky. Tím se docílí snížení koncentrace popílku, což povede k menšímu zalepování výhřevných ploch popílkovými částicemi v dalších tazích kotle.

Výpočet spočívá opět ve zvolení výstupní teploty na konci tahu, dále pak její ověření tepelným výpočtem.



8.1. Rozměry II. tahu

Volená teplota spalin na konci tahu: $t_{kII} = 685 \text{ } ^\circ\text{C}$

Volená rychlost spalin: $w_{sp} = 6 \text{ m/s}$

Obr. 8: Náčrt 2. tahu

Střední teplota spalin:

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{km}^{skut} + t_{kII}}{2} = \frac{796,6798 + 685}{2} = 740,8399 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (103)$$

Plošný průřez spalin:

$$F_{sp-II} = \frac{Q_{sp}^{vskut} \cdot M_{pv}}{w_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{stř}^{sp})}{273} = \frac{3,8912 \cdot 1,2873}{6} \cdot \frac{(273 + 740,8399)}{273} = 3,0917 \text{ m}^2 \quad (104)$$

Skutečná rychlost spalin:

$$w_{sp}^{skut} = \frac{O_{sp}^{vskut} \cdot M_{pv}}{a \cdot b_{II}} \cdot \frac{(273 + t_{stř}^{sp})}{273} = \frac{3,8912 \cdot 1,2873}{1,8 \cdot 1,62} \cdot \frac{(273 + 740,8399)}{273} =$$
$$= 6,3616 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (105)$$

Délka II. tahu:

$$b_{II} = \frac{F_{sp,II}}{a} = \frac{3,0917}{1,8} = 1,7176 \rightarrow 1,62 \text{ m (musí být dělitelné 0,09)}$$
$$(106)$$

Plošný průřez spalin v nejužším místě: (počítán se zvolenou rychlostí spalin 9 m/s)

$$F_{sp,II,min} = \frac{O_{sp}^{vskut} \cdot M_{pv}}{w_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{stř}^{sp})}{273} = \frac{3,8912 \cdot 1,2873}{9} \cdot \frac{(273 + 740,8399)}{273} =$$
$$= 1,9476 \text{ m}^2 \quad (107)$$

$$X = \frac{F_{sp,II,min}}{a} = \frac{1,9476}{1,8} = 1,082 \text{ m} \quad (108)$$

$$Y = \frac{X}{\sin 35^\circ} = \frac{1,082}{\sin 35^\circ} = 1,8864 \text{ m} \quad (109)$$

Přední stěna S_a:

$$S_a = a \cdot H + a \cdot \frac{b_{II}}{\sin 35^\circ} = 1,8 \cdot 8,5 + 1,8 \cdot \frac{1,62}{\sin 35^\circ} = 20,3839 \text{ m}^2 \quad (110)$$

Boční stěna S_b:

$$S_b = b_{II} \cdot H + 0,5 \cdot \left(b_{II} \cdot \frac{b_{II}}{\tan 35^\circ} \right) = 1,62 \cdot 8,5 + 0,5 \cdot \left(1,62 \cdot \frac{1,62}{\tan 35^\circ} \right) = 15,644 \text{ m}^2 \quad (111)$$

Zadní stěna S_c:

$$S_c = \left(H + \frac{b_{II}}{\tan 35^\circ} - Y \right) \cdot a = \left(8,5 + \frac{1,62}{\tan 35^\circ} - 1,8864 \right) \cdot 1,8 = 16,0688 \text{ m}^2 \quad (112)$$

8.2. Tepelný výpočet membránové stěny II. tahu

Součinitel přestupu tepla pro podélné proudění na straně spalín:

$$\begin{aligned}\alpha_k &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_{sp}}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp}^{skut} \cdot d_e}{\nu_{sp}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{sp}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m = \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,0862}{1,7053} \cdot \left(\frac{6,3616 \cdot 1,7053}{0,0001146} \right)^{0,8} \cdot 0,596^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = \\ &= 9,0486 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\end{aligned}\quad (113)$$

Kde:

c_t, c_l, c_m – opravné koeficienty [1]
 λ_{sp} – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalín [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
 ν_{sp} – kinematická viskozita pro střední teplotu spalín [m^2/s]
 Pr_{sp} – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalín [1]
 d_e – ekvivalentní průměr [m]

$$d_e = \frac{4 \cdot a \cdot b_{II}}{O} = \frac{4 \cdot 1,8 \cdot 1,62}{2 \cdot (1,8 + 1,62)} = 1,7053 \text{ m}\quad (114)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\begin{aligned}\alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\check{c}} \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,3919 \cdot 1013,99^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{575,4186}{1013,99} \right)^4}{1 - \left(\frac{575,4186}{1013,99} \right)} = \\ &= 43,4216 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\end{aligned}\quad (115)$$

Kde:

a_{st} – stupeň černosti povrchu stěn, $a_{st} = 0,8$ [1]
 $a_{\check{c}}$ – stupeň černosti proudu spalín
 T_z – teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]
 $T_{stř}^{sp}$ – střední teplota spalín [K]

$$a_{\check{c}} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,4975} = 0,3919\quad (116)$$

Kde:

 $k \cdot p \cdot s$ – optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (3,5962 + 0) \cdot 0,101 \cdot 1,3689 = 0,4975 \quad (117)$$

Kde:

 k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [$m^{-1} \cdot MPa^{-1}$] r_{sp} – objemový podíl tříatomových plynů ve spalínách $k_p \cdot \mu$ – součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi, na optickou hustotu má minimální vliv, a proto jej dle [2] zanedbávám p – tlak, $p = 0,101 MPa$ s – efektivní tloušťka sálové vrstvy [m]

$$\begin{aligned} k_{sp} \cdot r_{sp} &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{st}^{sp} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} = \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2554}{3,16 \cdot \sqrt{0,0369 \cdot 1,3689}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{740,8399 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3662 = \\ &= 3,5962 \end{aligned} \quad (118)$$

Kde:

 r_{H_2O} , r_{sp} – objemové části tříatomových plynů p_{sp} – celkový parciální tlak [MPa]

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{28,1592}{74,0524} = 1,3689 \text{ m} \quad (119)$$

Kde:

 V – objem sálající vrstvy [m^3] F_{st} – povrch stěn sálající vrstvy [m^2]

$$V = S_b \cdot a = 15,644 \cdot 1,8 = 28,1592 \text{ m}^3 \quad (120)$$

$$F_{st} = 2 \cdot S_b + S_a + S_c + a \cdot b_{II} + a \cdot Y =$$

$$= 2 \cdot 15,644 + 20,3839 + 16,0688 + 1,8 \cdot 1,62 + 1,8 \cdot 1,8864 = 74,0524 \text{ m}^2 \quad (121)$$

$$t_z = t_{vyp} + \varepsilon_{ms} \cdot \frac{M_{pv} \cdot (I_{sp}^{in} - I_{sp}^{out})}{S_{otr}} =$$

$$= 246,5363 + 0,004 \cdot \frac{1,2837 \cdot (4758,0246 - 4030,2061)}{67,0568} = 302,2686 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 302,2686 + 273,15 = 575,4186 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (122)$$

Kde:

ε_{ms} – součinitel zanesení nmembránové stěny, volím $\varepsilon_{ms} = 0,004$

t_{vyp} – teplota média ve výparníku [$^\circ\text{C}$]

S_{otr} – součet všech výhřevných ploch v tahu [m^2]

$$\begin{aligned} S_{otr} &= 2 \cdot S_b + S_a + S_c + a \cdot b_{II} - c \cdot a = \\ &= 2 \cdot 15,644 + 20,3839 + 16,0688 + 1,8 \cdot 1,62 - 2 \cdot 1,8 = 67,0568 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (123)$$

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \psi_e \cdot \alpha_{sp} = 0,6 \cdot 47,2232 = 28,3339 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (124)$$

Kde:

ψ_e – součinitel tepelné efektivity, pro dřevní štěpku volím 0,6 [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (9,0486 + 43,4216) = 47,2232 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (125)$$

Kde:

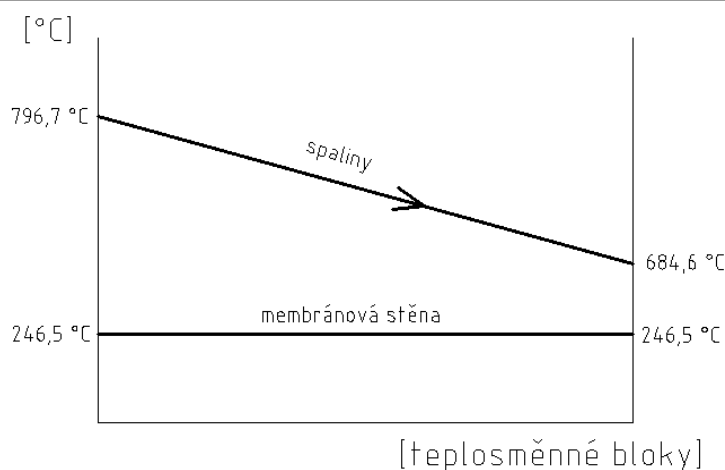
ω – součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{550,1436 - 438,4637}{\ln \frac{550,1436}{438,4637}} = 492,1937 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (126)$$

$$\Delta t_1 = t_{km}^{skut} - t_{vyp} = 796,6798 - 246,5363 = 550,1436 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (127)$$

$$\Delta t_2 = t_{kII} - t_{vyp} = 685 - 246,5363 = 438,4637 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (128)$$



Obr. 9: Tepelné schéma II. tahu

8.3. Přepočet teploty spalin na výstupu z II. tahu

Teplo odebrané spalinám ve II. tahu:

$$Q_{II.tah} = \frac{S_{otr} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{67,0568 \cdot 28,3339 \cdot 492,1937}{1000} = 935,1599 \text{ kW} \quad (129)$$

Teplo spalin na vstupu do II. tahu:

$$Q_{sp}^{in} = I_{sp}^{in} \cdot M_{pv} = 4758,0246 \cdot 1,2837 = 6105,243 \text{ kW} \quad (130)$$

Kde:

I_{sp} – entalpie spalin na vstupu do II. tahu [kJ/kg]

Teplo spalin na výstupu z II. tahu:

$$Q_{sp}^{out} = Q_{sp}^{in} - Q_{II.tah} = 6105,243 - 935,1599 = 5170,0831 \text{ kW} \quad (131)$$

$$I_{sp}^{out} = \frac{Q_{sp}^{out}}{M_{pv}} = \frac{5170,0831}{1,2837} = 4027,4555 \text{ kJ/kg} \quad (132)$$

Skutečnou teplotu na výstupu z II. tahu zjistím lineární interpolací z tabulky 5 pro I_{sp}^{out} .

$$t_{kII.tah}^{skut} = 684,5682 \text{ °C}$$

Liší se o 0,4316 °C, což je dostačující odchylka.

9. Výpočet III. tahu kotle

Ve 3. tahu jsou umístěny přehřívačky PII, PI-B a PI-A, ty jsou zavěšeny na dvou řadách závěsných trubek, které prochází celým 3. tahem a jsou chlazeny sytou párou z bubnu. Tah je tvořen membránovou stěnou, přičemž rozteč membránových trubek na zadní straně je 100 mm, z důvodu zavedení přehřívačů. Nejdříve si zvolím rychlost spalin v místě, kde ji předpokládám nejvyšší. Tím je přehřívač I-B, pomocí této rychlosti vypočítám plošný průřez spalin, z něhož mohu následně dopočítat délku 3. tahu. Ta musí být dělitelná číslem 0,09 z důvodu rozteče membránové stěny.

Rychlost spalin volím: $w_{sp} = 6 \text{ m/s}$

Plošný průřez spalin:

$$F_{sp} = \frac{O_{spkut}^v \cdot M_{pv}}{w_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{pIB}^{sp})}{273} = \frac{3,8912 \cdot 1,2873}{6} \cdot \frac{(273 + 547)}{273} = 2,5006 \text{ m}^2 \quad (133)$$

Kde:

t_{pIB}^{sp} – teplota zvolená do přehřívačku I – B
 w_{sp} – rychlost spalin zvolená do přehřívačku I – B

Délka b_{III}:

$$b_{III} = \frac{F_{sp} + n_{zt} \cdot \frac{\pi \cdot D_{zt}^2}{4}}{a - n_{tr} \cdot D} = \frac{2,5006 + 18 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4}}{1,8 - 18 \cdot 0,038} = 2,2589 \rightarrow 2,16 \text{ m} \quad (134)$$

Kde:

n_{zt} – celkový počet závěsných trubek
 n_{tr} – počet trubek přehřívačku I – B v jedné řadě
 D_{zt} – vnější průměr závěsných trubek [m]
 D – vnější průměr trubek přehřívačku I – B [m]

9.1. Výpočet I. části III. tahu (obratové komory)

Výpočet spočívá opět ve zvolení výstupní teploty na konci části tahu, dále pak její ověření tepelným výpočtem.

obratová komora	rozměr	jednotka
Sa	6,408	m ²
Sb	4,991	m ²
a	1,8	m
b _{III}	2,16	m
Y	1,88	m
K	0,5	m

Tab. 10: Obratová komora

Zvolená výstupní teplota: $t_{k1č_III.tahu} = 660 \text{ }^{\circ}\text{C}$

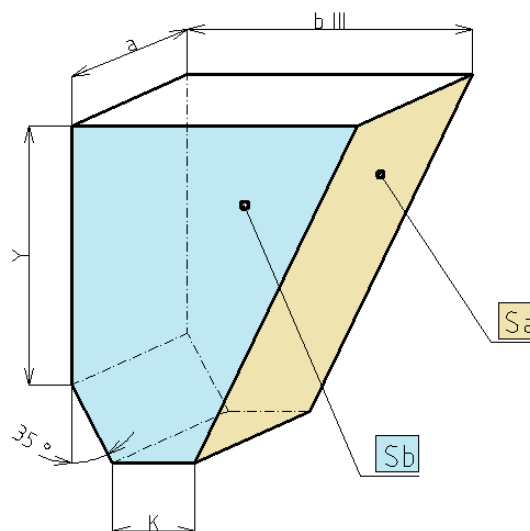
Střední teplota spalin v 1. části III. tahu:

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{kII.tah}^{skut} + t_{k1č_III.tahu}}{2} = \frac{684,5682 + 660}{2} = 672,2841 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

(135)

$$T_{stř}^{sp} = t_{stř}^{sp} + 273,15 = 672,2841 + 273,15 = 945,4341 \text{ K}$$

(136)



Obr. 10: Obratová komora

Plošný průřez spalin v 1. části III. tahu:

$$F_{sp} = a \cdot b_{III} - n_{zt} \cdot D_{zt} \cdot b_{III} = 1,8 \cdot 2,16 - 9 \cdot 0,038 \cdot 2,16 = 3,1613 \text{ m}^2$$

(137)

Kde:

n_{zt} – počet závěsných trubek v jedné řadě

D_{zt} – vnější průměr závěsných trubek [m]

Skutečná rychlost spalin:

$$w_{sp}^{skut} = \frac{O_{sp}^{skut} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{stř}^{sp})}{273} = \frac{3,8912 \cdot 1,2873}{3,1613} \cdot \frac{(273 + 672,2841)}{273} = 5,4712 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

(138)

9.1.1. Výpočet membránové stěny

Součinitel přestupu tepla pro podélné proudění na straně spalin:

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_{sp}}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp}^{skut} \cdot d_e}{v_{sp}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{sp}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m = \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,0803}{0,2693} \cdot \left(\frac{5,4712 \cdot 0,2693}{0,000102} \right)^{0,8} \cdot 0,6028^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = \\ &= 11,9104 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \end{aligned}$$

(139)



Kde:

c_t, c_l, c_m – opravné koeficienty [1]
 λ_{sp} – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalín [$Wm^{-1}K^{-1}$]
 ν_{sp} – kinematická viskozita pro střední teplotu spalín [m^2/s]
 Pr_{sp} – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalín [1]
 d_e – ekvivalentní průměr [m]

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 3,1613}{46,965} = 0,2693 \text{ m} \quad (140)$$

Kde:

O – obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (a + b_{III}) + n_{zt} \cdot b_{III} = 2 \cdot (1,8 + 2,16) + 18 \cdot 2,16 = 46,965 \text{ m} \quad (141)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\zeta} \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)} =$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,3983 \cdot 945,4312^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{567,5884}{945,4312}\right)^4}{1 - \left(\frac{567,5884}{945,4312}\right)} = 7,5907 \text{ Wm}^{-2}K^{-1} \quad (142)$$

Kde:

a_{st} – stupeň černosti povrchu stěn, $a_{st} = 0,8$ [1]
 a_{ζ} – stupeň černosti proudu spalín
 T_z – teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]
 $T_{stř}^{sp}$ – střední teplota spalín [K]

$$a_{\zeta} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,5079} = 0,3983 \quad (143)$$

Kde:

$k \cdot p \cdot s$ – optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (3,8213 + 0) \cdot 0,101 \cdot 1,3161 = 0,5079 \quad (144)$$

Kde:

k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [$m^{-1} \cdot MPa^{-1}$]
 r_{sp} – objemový podíl tříatomových plynů ve spalínách
 $k_p \cdot \mu$ – součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi, na optickou hustotu má minimální vliv, a proto jej dle [2] zanedbávám

p – tlak, $p = 0,101$ [MPa]

s – efektivní tloušťka sálové vrstvy [m]

$$\begin{aligned}
 k_{sp} \cdot r_{sp} &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} = \\
 &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2554}{3,16 \cdot \sqrt{0,0369 \cdot 1,3161}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{672,2841 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3662 = \\
 &= 3,8213
 \end{aligned}
 \tag{145}$$

Kde:

r_{H_2O} , r_{sp} – objemové části tříatomových plynů

p_{sp} – celkový parciální tlak [MPa]

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{8,9838}{24,5736} = 1,3161 \text{ m}
 \tag{146}$$

Kde:

V – objem sálající vrstvy [m^3]

F_{st} – povrch stěn sálající vrstvy [m^2]

$$V = S_b \cdot a = 4,991 \cdot 1,8 = 8,9838 \text{ m}^3
 \tag{147}$$

$$\begin{aligned}
 F_{st} &= 2 \cdot S_b + S_a + K \cdot a + a \cdot b_{III} + a \cdot Y = \\
 &= 2 \cdot 4,991 + 6,408 + 0,5 \cdot 1,8 + 1,8 \cdot 2,16 + 1,8 \cdot 1,8864 = 24,5736 \text{ m}^2
 \end{aligned}
 \tag{148}$$

$$\begin{aligned}
 t_z &= t_{výp} + \varepsilon_{ms} \cdot \frac{M_{pv} \cdot (I_{sp}^{in} - I_{sp}^{out})}{S_{otr}} = \\
 &= 246,5363 + 0,004 \cdot \frac{1,2837 \cdot (4030,2061 - 3877,3064)}{16,39} = 294,4384 \text{ °C}
 \end{aligned}
 \tag{149}$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 294,4384 + 273,15 = 567,5884 \text{ °C}
 \tag{150}$$

Kde:

ε_{ms} – součinitel zanesení nmembránové stěny, volím $\varepsilon_{ms} = 0,004$

$t_{výp}$ – teplota média ve výparníku [°C]

S_{otr} – celková plocha membránové stěny [m^2]

$$S_{otr} = 2 \cdot S_b + S_a = 2 \cdot 4,991 + 6,408 = 16,39 \text{ m}^2 \quad (151)$$

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \psi_e \cdot \alpha_{sp} = 0,6 \cdot 36,1358 = 21,6815 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (152)$$

Kde:

ψ_e – součinitel tepelné efektivity, pro dřevní štěpku volím 0,6 [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,73 \cdot (11,9104 + 37,5907) = 36,1358 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (153)$$

Kde:

ω – součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{438,0319 - 413,4638}{\ln \frac{438,0319}{413,4638}} = 425,6297 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (154)$$

$$\Delta t_1 = t_{kil.tah}^{skut} - t_{výp} = 684,5682 - 246,5363 = 438,0319 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (155)$$

$$\Delta t_2 = t_{k1č.III.tahu} - t_{výp} = 660 - 246,5363 = 413,4638 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (156)$$

Teplo odebrané spalínám membránovou stěnou v 1. části III. tahu:

$$Q_{ms_{1č.III.tahu}} = \frac{S_{otr} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{16,39 \cdot 21,6815 \cdot 425,6297}{1000} = 151,2516 \text{ kW} \quad (157)$$

9.1.2. Výpočet závěsných trubek

Princip výpočtu spočívá ve zvolení vstupní teploty páry v daném úseku a jejím následným ověřením tepelným výpočtem.

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín:

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,65} \cdot Pr_{sp}^{0,33} =$$

$$\begin{aligned} &= 0,2 \cdot 0,91 \cdot 1 \cdot \frac{0,0803}{0,038} \cdot \left(\frac{5,4712 \cdot 0,038}{0,000102} \right)^{0,65} \cdot 0,6028^{0,33} = \\ &= 46,067 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (158)$$

Kde:

c_z – opravný součinitel na počet řad

c_s – opravný součinitel na uspořádání svazku v závislosti na podélné a příčné rozteči

λ_{sp} – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalín [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

ν_{sp} – kinematická viskozita pro střední teplotu spalín [m^2/s]

Pr_{sp} – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalín [1]

Opravný součinitel na počet podélných řad:

Pro méně řad než 10 platí:

$$c_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (n_{rad} - 2) = 0,91 + 0,0125 \cdot (2 - 2) = 0,91 \quad (159)$$

Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,2}{0,038} = 5,263 \quad (160)$$

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,15}{0,038} = 3,947 \quad (161)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně páry:

$$\begin{aligned} \alpha_p &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d_{zt}} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_{zt}}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m = \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,0492}{0,0254} \cdot \left(\frac{19,3606 \cdot 0,0254}{9,9085 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,2613^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = \\ &= 1759,3789 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (162)$$

Kde:

c_t, c_l, c_m – opravné koeficienty [1]

λ_p – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu páry [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

ν_p – kinematická viskozita pro střední teplotu páry [m^2/s]

Pr_p – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu páry [1]

d_{zt} – vnitřní průměr [m]

w_p – rychlost proudění páry [m/s]

Průtočný průřez pro páru:

$$F_p = \frac{\pi \cdot d_{zt}^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,0254^2}{4} \cdot 18 = 0,0091 \text{ m}^2 \quad (163)$$

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{0,95 \cdot M_{pp} \cdot v_{stř}}{F_p} = \frac{0,95 \cdot 3,333 \cdot 0,0558}{0,0091} = 19,3606 \text{ m/s} \quad (164)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\check{c}} \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,3416 \cdot 945,4341^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{614,7409}{945,4341}\right)^4}{1 - \left(\frac{614,7409}{945,4341}\right)} = \\ &= 34,768 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1} \end{aligned} \quad (165)$$

Kde:

a_{st} – stupeň černosti povrchu stěn, $a_{st} = 0,8$ [1]
 $a_{\check{c}}$ – stupeň černosti proudu spalin
 T_z – teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]
 $T_{stř}^{sp}$ – střední teplota spalin [K]

$$a_{\check{c}} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,4179} = 0,3416 \quad (166)$$

Kde:

$k \cdot p \cdot s$ – optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (4,7534 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,8705 = 0,4179 \quad (167)$$

Kde:

k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [$\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$]
 r_{sp} – objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách
 $k_p \cdot \mu$ – součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi, na optickou hustotu má minimální vliv, a proto jej dle [2] zanedbávám
 p – tlak, $p = 0,101 \text{ MPa}$
 s – efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

$$\begin{aligned}
 k_{sp} \cdot r_{sp} &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} = \\
 &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2554}{3,16 \cdot \sqrt{0,0369 \cdot 0,8705}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{672,2841 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3662 = \\
 &= 4,7534
 \end{aligned} \tag{168}$$

Kde:

r_{H_2O} , r_{sp} – objemové části tříatomových plynů
 p_{sp} – celkový parciální tlak [MPa]

$$s = 0,9 \cdot D_{zt} \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D_{zt}^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,2 \cdot 0,15}{0,038^2} - 1 \right) = 0,8705 \text{ m} \tag{169}$$

$$\begin{aligned}
 t_z &= t_{zt}^{stř} + \left(\varepsilon_{zt} + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{0,95 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out} - i_{in})}{S_{zt}} = \\
 &= 254,6533 + \left(0,004 + \frac{1}{1759,3789} \right) \cdot \frac{0,95 \cdot 3,3333 \cdot (2841,3779 - 2827,3778)}{2,3296} \cdot 1000 = 341,5909 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned} \tag{170}$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 341,5909 + 273,15 = 614,7409 \text{ } ^\circ\text{C} \tag{171}$$

Kde:

ε_{zt} – součinitel zanesení závěsných trubek, volím $\varepsilon_{zt} = 0,004$
 $t_{zt}^{stř}$ – teplota média v závěsných trubkách [$^\circ\text{C}$]
 S_{zt} – plocha závěsných trubek v tahu [m^2]

$$S_{zt} = \pi \cdot D_{zt} \cdot \frac{b_{III}}{2} \cdot n_{zt} = \pi \cdot 0,038 \cdot \frac{2,16}{2} \cdot 18 = 2,3296 \text{ m}^2 \tag{172}$$

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \frac{\psi_e \cdot \alpha_{sp}}{1 + \frac{\alpha_{sp}}{\alpha_p}} = \frac{0,6 \cdot 80,8351}{1 + \frac{80,8351}{1759,3789}} = 46,3705 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \tag{173}$$

Kde:

ψ_e – součinitel tepelné efektivity, pro dřevní štěpku volím 0,6 [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (46,067 + 34,768) = 80,8351 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (174)$$

Kde:

ω – součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{427,9902 - 407,2714}{\ln \frac{427,9902}{407,2714}} = 417,5451 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (175)$$

$$\Delta t_1 = t_{kII.tah}^{skut} - t_{zt}^{out} = 684,5682 - 256,5781 = 427,9902 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (176)$$

$$\Delta t_2 = t_{k1\check{c}.III.tahu} - t_{zt}^{in} = 660 - 252,7 = 407,2714 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (177)$$

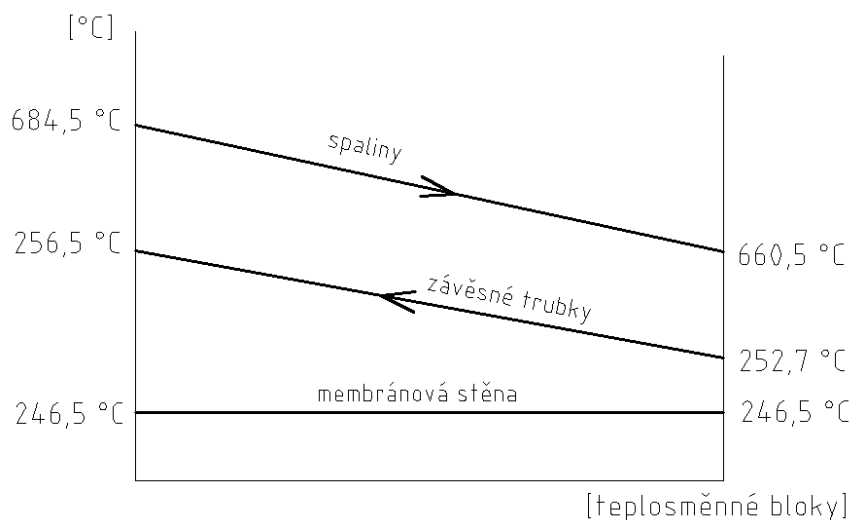
Teplo odebrané spalinám závěsnými trubkami v 1. části III. tahu:

$$Q_{zt1.\check{c}.III.tah} = \frac{S_{zt} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{2,3296 \cdot 46,3705 \cdot 417,5451}{1000} = 45,1056 \text{ kW} \quad (178)$$

Skutečná vstupní teplota do závěsných trubek:

$$I_{skutečná}^{in} = I^{out} - \frac{Q_{zt1.\check{c}.III.tah}}{0,95 \cdot M_{pp}} = 2841,3779 - \frac{45,1056}{0,95 \cdot 3,3333} = 2827,1339 \text{ kJ/kg}$$
$$t_{skutečná}^{in} = 252,6603 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (179)$$

Liší se o 0,068 °C, což je dostačující odchylka.



Obr. 11: Tepelné schéma 1. části III. tahu

9.1.3. Přepočet teploty spalin na výstupu z 1. části III. tahu

Teplo odebrané spalinám v 1. části III. tahu:

$$\begin{aligned} Q_{1.\check{c}.III.tah} &= Q_{zt_{1.\check{c}.III.tah}} + Q_{ms_{1.\check{c}.III.tahu}} = \\ &= 45,1056 + 151,2516 = 196,3572 \text{ kW} \end{aligned} \quad (180)$$

Teplo spalin na vstupu do 1. části III. tahu:

$$Q_{sp}^{in} = I_{sp}^{in} \cdot M_{pv} = 4027,4555 \cdot 1,2837 = 5170,0831 \text{ kW} \quad (181)$$

Kde: I_{sp} – entalpie spalin na vstupu do 1. části III. tahu [kJ/kg]

Teplo spalin na výstupu z 1. části III. tahu:

$$Q_{sp}^{out} = Q_{sp}^{in} - Q_{1.\check{c}.III.tah} = 5170,0831 - 196,3572 = 4973,7259 \text{ kW} \quad (182)$$

$$I_{sp}^{out} = \frac{Q_{sp}^{out}}{M_{pv}} = \frac{4973,7259}{1,2837} = 3874,4947 \text{ kJ/kg} \quad (183)$$

Skutečnou teplotu na výstupu z 1. části III. tahu zjistím lineární interpolací z tabulky 5 pro I_{sp}^{out} .

$$t_{k1.\check{c}.III.tah}^{skut} = 660,5587 \text{ °C}$$

Liší se o 0,5587 °C, což je dostačující odchylka.

9.2. Výpočet II. části III. tahu

Výpočet spočívá opět ve zvolení výstupní teploty na konci části tahu, dále pak její ověření tepelným výpočtem.

Zvolená výstupní teplota: $t_{k2.č.III.tahu} = 547\text{ }^{\circ}\text{C}$

Střední teplota spalin v 2. části III. tahu:

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{k1.č.III.tah}^{skut} + t_{k2.č.III.tahu}}{2} = \frac{660,5587 + 547}{2} = 603,7793\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (184)$$

$$T_{stř}^{sp} = t_{stř}^{sp} + 273,15 = 603,7793 + 273,15 = 876,9293\text{ K} \quad (185)$$

Plošný průřez spalin v 2. části III. tahu:

$$\begin{aligned} F_{sp} &= a \cdot b_{III} - n_{tr} \cdot D \cdot l_e - n_{zt} \cdot \frac{\pi \cdot D_{zt}^2}{4} = \\ &= 1,8 \cdot 2,16 - 9 \cdot 0,038 \cdot 2 - 18 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4} = 3,1836\text{ m}^2 \end{aligned} \quad (186)$$

Kde:

n_{zt} – počet závěsných trubek
 D_{zt} – vnější průměr závěsných trubek [m]
 n_{tr} – počet trubek v řadě přehříváku II
 D – vnější průměr trubek přehříváku II [m]
 l_e – délka přehřívákových trubek [m]

Skutečná rychlost spalin:

$$\begin{aligned} w_{sp}^{skut} &= \frac{O_{sp}^{skut} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{stř}^{sp})}{273} = \frac{3,8912 \cdot 1,2873}{3,1836} \cdot \frac{(273 + 603,7793)}{273} = \\ &= 5,0391\text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned} \quad (187)$$

9.2.1. Výpočet membránové stěny

Součinitel přestupu tepla pro podélné proudění na straně spalin:

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{sp}}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp}^{skut} \cdot d_e}{\nu_{sp}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{sp}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m =$$

$$= 0,023 \cdot \frac{0,0745}{0,2724} \cdot \left(\frac{5,0391 \cdot 0,2724}{0,0000899} \right)^{0,8} \cdot 0,6097^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 =$$

$$= 11,4658 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1} \quad (188)$$

Kde:

c_t, c_l, c_m – opravné koeficienty [1]
 λ_{sp} – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalín [$\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$]
 ν_{sp} – kinematická viskozita pro střední teplotu spalín [m^2/s]
 Pr_{sp} – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalín [1]
 d_e – ekvivalentní průměr [m]

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 3,1839}{46,7528} = 0,2724 \text{ m} \quad (189)$$

Kde:

O – obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (a + b_{III}) + \pi \cdot n_{zt} \cdot D_{zt} + 2 \cdot n_{tr} \cdot (l_e + D) =$$

$$= 2 \cdot (1,8 + 2,16) + \pi \cdot 18 \cdot 0,038 + 2 \cdot 9 \cdot (2 + 0,038) = 46,7528 \text{ m} \quad (190)$$

Kde:

n_{zt} – počet závěsných trubek v jedné řadě
 D_{zt} – vnější průměr závěsných trubek [m]
 n_{tr} – počet trubek v řadě přehříváku II
 D – vnější průměr trubek přehříváku II [m]
 l_e – délka přehřívákových trubek [m]

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\check{c}} \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)} =$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2378 \cdot 876,9293^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{663,5176}{876,9293} \right)^4}{1 - \left(\frac{663,5176}{876,9293} \right)} =$$

$$= 22,725 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1} \quad (191)$$

Kde:

a_{st} – stupeň černosti povrchu stěn, $a_{st} = 0,8$ [1]

a_{ξ} – stupeň černosti proudu spalin

T_z – teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]

$T_{stř}^{sp}$ – střední teplota spalin [K]

$$a_{\xi} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2716} = 0,2378 \quad (192)$$

Kde:

$k \cdot p \cdot s$ – optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (8,2054 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,3277 = 0,2716 \quad (193)$$

Kde:

k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [$m^{-1} \cdot MPa^{-1}$]

r_{sp} – objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách

$k_p \cdot \mu$ – součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi, na optickou hustotu má minimální vliv, a proto jej dle [2] zanedbávám

p – tlak, $p = 0,101$ [MPa]

s – efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

$$\begin{aligned} k_{sp} \cdot r_{sp} &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} = \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2554}{3,16 \cdot \sqrt{0,0369 \cdot 0,3277}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{603,7793 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3662 = \\ &= 8,2054 \end{aligned} \quad (194)$$

Kde:

r_{H_2O} , r_{sp} – objemové části tříatomových plynů

p_{sp} – celkový parciální tlak [MPa]

$$s = 0,09 \cdot D \left(\frac{4}{\pi} \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,09 \cdot 0,038 \left(\frac{4}{\pi} \frac{0,2 \cdot 0,06}{0,038^2} - 1 \right) = 0,3277 \text{ m} \quad (195)$$

$$\begin{aligned} t_z &= t_{výp} + \varepsilon_{ms} \cdot \frac{M_{pv} \cdot (I_{sp}^{in} - I_{sp}^{out})}{S_{otr}} = \\ &= 246,5363 + 0,004 \cdot \frac{1,2837 \cdot (3874,4947 - 3208,956)}{23,76} = 390,3676 \text{ °C} \end{aligned} \quad (196)$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 390,3676 + 273,15 = 663,5176 \text{ °C} \quad (197)$$

Kde:

ε_{ms} – součinitel zanesení membránové stěny, volím $\varepsilon_{ms} = 0,004$

t_{vyp} – teplota média ve výparníku [°C]

S_{otr} – celková plocha membránové stěny [m²]

$$S_{otr} = 2 \cdot H \cdot (a + b_{III}) = 2 \cdot 3 \cdot (1,8 + 2,16) = 23,76 \text{ m}^2 \quad (198)$$

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \psi_e \cdot \alpha_{sp} = 0,6 \cdot 30,7717 = 18,463 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (199)$$

Kde:

ψ_e – součinitel tepelné efektivity, pro dřevní štěpku volím 0,6 [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (11,4658 + 22,7251) = 30,7717 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (200)$$

Kde:

ω – součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{414,0224 - 300,4637}{\ln \frac{414,0224}{300,4637}} = 354,2144 \text{ °C} \quad (201)$$

$$\Delta t_1 = t_{k1.č.III.tah}^{skut} - t_{vyp} = 660,5587 - 246,5363 = 414,0224 \text{ °C} \quad (202)$$

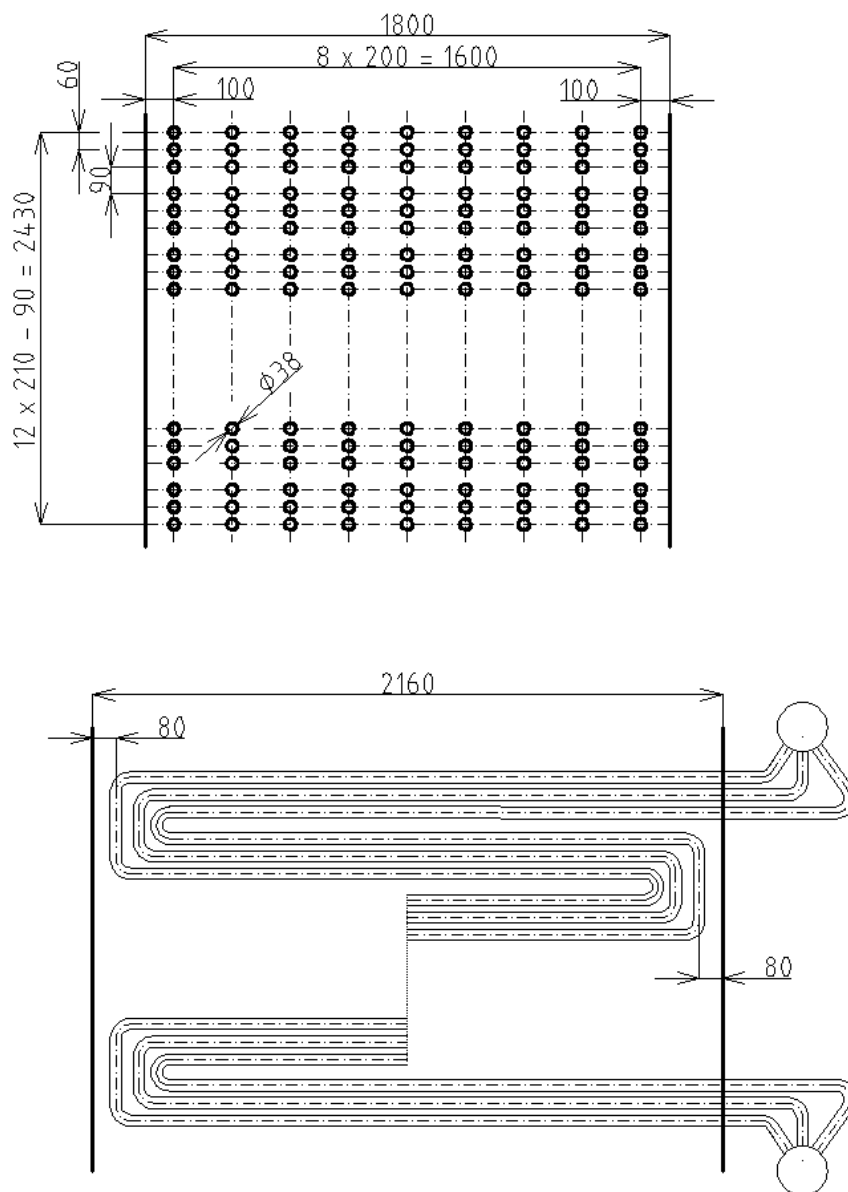
$$\Delta t_2 = t_{k2.č.III.tahu} - t_{vyp} = 547 - 246,5363 = 300,4637 \text{ °C} \quad (203)$$

Teplo odebrané spalinám membránovou stěnou v 2. části III. tahu:

$$\begin{aligned} Q_{ms_2č.III.tahu} &= \frac{S_{otr} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{23,76 \cdot 18,463 \cdot 354,2144}{1000} = \\ &= 155,3874 \text{ kW} \end{aligned} \quad (204)$$

9.2.2. Výpočet přehříváku II

Přehřívák II. je tvořen hladkými trubkami a koncipován jako troj-had v souproutém zapojení.



Obr. 12: Schéma přehříváku II

vstup			výstup			střední hodnota		
parametr	hodnota	jednotka	parametr	hodnota	jednotka	parametr	hodnota	jednotka
tlak	3,5	Mpa	tlak	3,3	Mpa	tlak	3,4	Mpa
teplota	310,6586	°C	teplota	400	°C	teplota	355,3293	°C
entalpie	3006,471	kJ/kg	entalpie	3226,471	kJ/kg	entalpie	3116,471	kJ/kg

Tab. 11: Parametry páry

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín:

$$\begin{aligned}
 \alpha_k &= 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,65} \cdot Pr_{sp}^{0,33} = \\
 &= 0,2 \cdot 1,035 \cdot 0,9462 \cdot \frac{0,0744}{0,038} \cdot \left(\frac{5,0391 \cdot 0,038}{0,0000899} \right)^{0,65} \cdot 0,6097^{0,33} = \\
 &= 47,4842 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{204}$$

přehřívák II	rozměr	jednotka
D	0,038	m
d	0,029	m
t	0,0045	m
l _e	2	m
s ₁	0,2	m
s ₂	0,09 / 0,06	m
n _{tr_v řadě}	9	-
n _{řad}	12	-
n _{hadů}	3	-

Tab. 12: geometrické parametry přehříváku II

Kde:

c_z – opravný součinitel na počet řad

c_s – opravný součinitel na uspořádání svazku v závislosti na podélné a příčné rozteči

λ_{sp} – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalín [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

ν_{sp} – kinematická viskozita pro střední teplotu spalín [m^2/s]

Pr_{sp} – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalín [1]

Opravný součinitel na počet podélných řad:

Pro méně řad než 10 platí:

$$c_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (n_{\text{řad}} - 2) = 0,91 + 0,0125 \cdot (12 - 2) = 1,035
 \tag{205}$$

Opravný součinitel na uspořádání svazků:

$$c_s = \left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} = \left[1 + (2 \cdot 3 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,5789}{2} \right)^3 \right]^{-2} = 0,9462
 \tag{206}$$

Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,2}{0,038} = 5,263 \text{ (pokud } \sigma_1 > 3, \text{ dosazují } \sigma_1 = 3)
 \tag{207}$$

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,6}{0,038} = 1,5789
 \tag{208}$$

Součinitel přestupu tepla konvekci pro podélné proudění na straně páry:

$$\begin{aligned}\alpha_p &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m = \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,053}{0,029} \cdot \left(\frac{14,9278 \cdot 0,029}{1,7856 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 1,0109^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = \\ &= 857,8199 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\end{aligned}\quad (209)$$

Kde:

c_t, c_l, c_m – opravné koeficienty [1]
 λ_p – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu páry [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
 ν_p – kinematická viskozita pro střední teplotu páry [m^2/s]
 Pr_p – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu páry [1]
 w_p – rychlost proudění páry [m/s]

Průtočný průřez pro páru:

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{hadû} = \frac{\pi \cdot 0,029^2}{4} \cdot 9 \cdot 3 = 0,0178 \text{ m}^2 \quad (210)$$

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot \nu_{stř}}{F_p} = \frac{3,333 \cdot 0,0799}{0,0178} = 14,9278 \text{ m/s} \quad (211)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\begin{aligned}\alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\xi} \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2378 \cdot 876,9293^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{696,4082}{876,9293} \right)^4}{1 - \left(\frac{696,4082}{876,9293} \right)} = \\ &= 24,0687 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\end{aligned}\quad (212)$$

Kde:

a_{st} – stupeň černosti povrchu stěn, $a_{st} = 0,8$ [1]
 a_{ξ} – stupeň černosti proudu spalin
 T_z – teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]
 $T_{stř}^{sp}$ – střední teplota spalin [K]

$$t_z = t_{stř}^{přII} + \left(\varepsilon_{přII} + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{Q_{přII}}{S_{přII}} \cdot 1000 =$$

$$= 246,5363 + \left(0,006 + \frac{1}{857,8199} \right) \cdot \frac{733,3333}{77,3586} \cdot 1000 = 423,2582 \text{ } ^\circ\text{C}$$
(213)

$$T_z = t_z + 273,15 = 423,2582 + 273,15 = 696,4082 \text{ } ^\circ\text{C}$$
(214)

Kde:

$\varepsilon_{přII}$ – součinitel zanesení přehříváku, volím $\varepsilon_{přII} = 0,006$

$t_{stř}^{přII}$ – střední teplota média v přehříváku [$^\circ\text{C}$]

$S_{přII}$ – celková teplosměnná plocha přehříváku [m^2]

$Q_{přII}$ – výkon přehříváku [kW]

$$S_{přII} = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} \cdot n_{had} = \pi \cdot 0,038 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 12 \cdot 3 = 77,3586 \text{ m}^2$$
(215)

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \frac{\psi_e \cdot \alpha_{sp}}{1 + \frac{\alpha_{sp}}{\alpha_p}} = \frac{0,6 \cdot 71,5529}{1 + \frac{71,5529}{857,8199}} = 39,6264 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$
(216)

Kde:

ψ_e – součinitel tepelné efektivity, pro dřevní štěpku volím 0,6 [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (47,4842 + 24,0687) = 71,5529 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$
(217)

Kde:

ω – součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{349,9 - 147}{\ln \frac{349,9}{147}} = 233,9674 \text{ } ^\circ\text{C}$$
(218)

$$\Delta t_1 = t_{k1.č.III.tah}^{skut} - t_{přII}^{in} = 660,5587 - 310,6586 = 349,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$
(219)

$$\Delta t_2 = t_{k2.č.III.tahu} - t_{přII}^{out} = 547 - 400 = 147 \text{ } ^\circ\text{C}$$
(220)

Ideální plocha přehříváku II:

$$S_{přII}^{id} = \frac{Q_{přII} \cdot 1000}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{733,3333 \cdot 1000}{39,6264 \cdot 233,9674} = 79,0972 \text{ m}^2 \quad (221)$$

Počet řad:

$$n_{řad} = \frac{S_{přII}^{id}}{S_{1-řada}} = \frac{S_{přII}^{id}}{\pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{hadů}} = \frac{79,0972}{\pi \cdot 0,038 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 3} = 12,26 \rightarrow \text{volím 12 řad} \quad (222)$$

Teplo odebrané spalínám přehřívákem II v 2. části III. tahu:

$$Q_{přII} = \frac{S_{přII} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{77,3586 \cdot 39,6264 \cdot 233,9674}{1000} = 717,2138 \text{ kW} \quad (223)$$

9.2.3. Výpočet závěsných trubek

Princip výpočtu spočívá ve zvolení vstupní teploty páry v daném úseku a jejím následným ověřením tepelným výpočtem.

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín:

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_{sp}}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp}^{skut} \cdot d_e}{\nu_{sp}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{sp}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m = \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,0745}{0,2724} \cdot \left(\frac{5,0391 \cdot 0,2724}{0,0000899} \right)^{0,8} \cdot 0,6097^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = \\ &= 11,4658 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (224)$$

Kde:

c_t, c_l, c_m – opravné koeficienty [1]
 λ_{sp} – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalín [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
 ν_{sp} – kinematická viskozita pro střední teplotu spalín [m^2/s]
 Pr_{sp} – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalín [1]
 d_e – ekvivalentní průměr [m]

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 3,1839}{46,7528} = 0,2724 \text{ m} \quad (225)$$

Kde: O – obvod průřezu kanálu

$$\begin{aligned} O &= 2 \cdot (a + b_{III}) + \pi \cdot n_{zt} \cdot D_{zt} + 2 \cdot n_{tr} \cdot (l_e + D) = \\ &= 2 \cdot (1,8 + 2,16) + \pi \cdot 18 \cdot 0,038 + 2 \cdot 9 \cdot (2 + 0,038) = 46,7528 \text{ m} \end{aligned} \quad (226)$$

Kde:

n_{zt} – počet závěsných trubek v jedné řadě
 D_{zt} – vnější průměr závěsných trubek [m]
 n_{tr} – počet trubek v řadě přehříváku II
 D – vnější průměr trubek přehříváku II [m]
 l_e – délka přehřívákových trubek [m]

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně páry:

$$\begin{aligned} \alpha_p &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d_{zt}} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_{zt}}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m = \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,0495}{0,0254} \cdot \left(\frac{19,0386 \cdot 0,0254}{9,6497 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,2931^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = \\ &= 1802,4587 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1} \end{aligned} \quad (227)$$

Kde:

c_t, c_l, c_m – opravné koeficienty [1]
 λ_p – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu páry [$\text{Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$]
 ν_p – kinematická viskozita pro střední teplotu páry [m^2/s]
 Pr_p – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu páry [1]
 d_{zt} – vnitřní průměr [m]
 w_p – rychlost proudění páry [m/s]

Průtočný průřez pro páru:

$$F_p = \frac{\pi \cdot d_{zt}^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,0254^2}{4} \cdot 18 = 0,0091 \text{ m}^2 \quad (228)$$

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{0,95 \cdot M_{pp} \cdot \nu_{stř}}{F_p} = \frac{0,95 \cdot 3,333 \cdot 0,0548}{0,0091} = 19,0386 \text{ m/s} \quad (229)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\begin{aligned}\alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\zeta} \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2378 \cdot 876,9293^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{551,1601}{876,9293}\right)^4}{1 - \left(\frac{614,7409}{551,1601}\right)} = \\ &= 18,6898 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\end{aligned}\quad (230)$$

Kde:

a_{st} – stupeň černosti povrchu stěn, $a_{st} = 0,8$ [1]
 a_{ζ} – stupeň černosti proudu spalin
 T_z – teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]
 $T_{stř}^{sp}$ – střední teplota spalin [K]

$$a_{\zeta} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2716} = 0,2378 \quad (231)$$

Kde:

$k \cdot p \cdot s$ – optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (8,2054 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,3277 = 0,2716 \quad (232)$$

Kde:

k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [$\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$]
 r_{sp} – objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách
 $k_p \cdot \mu$ – součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi, na optickou hustotu má minimální vliv, a proto jej dle [2] zanedbávám
 p – tlak, $p = 0,101$ [MPa]
 s – efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

$$\begin{aligned}k_{sp} \cdot r_{sp} &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000}\right) \cdot r_{sp} = \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2554}{3,16 \cdot \sqrt{0,0369 \cdot 0,3277}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{603,7793 + 273,15}{1000}\right) \cdot 0,3662 = \\ &= 8,2054\end{aligned}\quad (233)$$

Kde:

r_{H_2O} , r_{sp} – objemové části tříatomových plynů
 p_{sp} – celkový parciální tlak [MPa]

$$s = 0,09 \cdot D \left(\frac{4 s_1 \cdot s_2}{\pi D^2} - 1 \right) = 0,09 \cdot 0,038 \left(\frac{4 \cdot 0,2 \cdot 0,06}{\pi \cdot 0,038^2} - 1 \right) = 0,3277 \text{ m} \quad (234)$$

$$\begin{aligned} t_z &= t_{zt}^{stř} + \left(\varepsilon_{zt} + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{0,95 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out} - i_{in})}{S_{zt}} = \\ &= 251,1613 + \left(0,004 + \frac{1}{1802,4587} \right) \cdot \frac{0,95 \cdot 3,3333 \cdot (2827,3779 - 2815,3779)}{6,4465} \cdot 1000 = 278,0101 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (235)$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 278,0101 + 273,15 = 551,1601 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (236)$$

Kde:

ε_{zt} – součinitel zanesení závěsných trubek, volím $\varepsilon_{zt} = 0,004$

$t_{zt}^{stř}$ – teplota média v závěsných trubkách [$^\circ\text{C}$]

S_{zt} – plocha závěsných trubek v tahu [m^2]

$$S_{zt} = \pi \cdot D_{zt} \cdot H \cdot n_{zt} = \pi \cdot 0,038 \cdot 3 \cdot 18 = 6,4465 \text{ m}^2 \quad (237)$$

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \frac{\psi_e \cdot \alpha_{sp}}{1 + \frac{\alpha_{sp}}{\alpha_p}} = \frac{0,6 \cdot 30,1556}{1 + \frac{30,1556}{1802,4587}} = 17,7956 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (238)$$

Kde:

ψ_e – součinitel tepelné efektivity, pro dřevní štěpku volím 0,6 [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (11,4658 + 18,6898) = 30,1556 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (239)$$

Kde:

ω – součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{407,8301 - 297,4061}{\ln \frac{407,8301}{297,4061}} = 349,7173 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (240)$$

$$\Delta t_1 = t_{k1\check{c}.III.tahu}^{skut} - t_{zt}^{out} = 660,5587 - 252,7286 = 407,8301 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (241)$$

$$\Delta t_2 = t_{k2\check{c}.III.tahu} - t_{zt}^{in} = 547 - 249,5939 = 297,4061 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (242)$$

Teplo odebrané spalinám závěsnými trubkami v 2. části III. tahu:

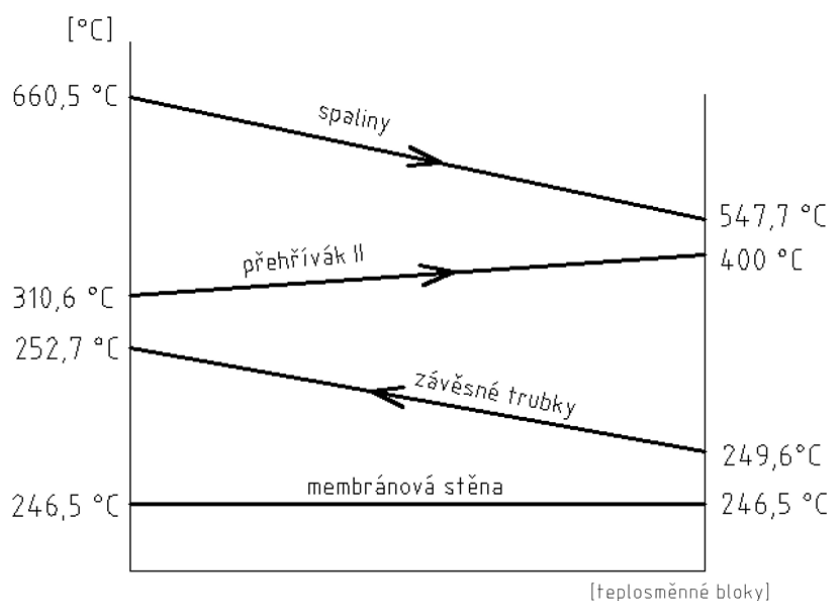
$$Q_{zt2.\check{c}.III.tah} = \frac{S_{zt} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{6,4465 \cdot 17,7956 \cdot 349,7173}{1000} = 40,1197 \text{ kW} \quad (243)$$

Skutečná vstupní teplota do závěsných trubek:

$$I_{skutečná}^{in} = I^{out} - \frac{Q_{zt2.\check{c}.III.tah}}{0,95 \cdot M_{pp}} = 2827,3779 - \frac{40,1197}{0,95 \cdot 3,3333} = 2814,7085 \text{ kJ/kg} \quad (244)$$

$$t_{skutečná}^{in} = 249,4139 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Liší se o 0,1799 °C, což je dostačující odchylka.



Obr. 13: Tepelné schéma 2. části III. Tahu

9.2.4. Přepočet teploty spalin na výstupu z 2. části III. tahu

Teplo odebrané spalinám v 2. části III. tahu:

$$\begin{aligned} Q_{2.č.III.tah} &= Q_{zt_{2.č.III.tah}} + Q_{ms_{2.č.III.tahu}} + Q_{přII} = \\ &= 40,1197 + 155,3874 + 717,2138 = \\ &= 912,7209 \text{ kW} \end{aligned} \quad (245)$$

Teplo spalin na vstupu do 2. části III. tahu:

$$Q_{sp}^{in} = I_{sp}^{in} \cdot M_{pv} = 3874,4947 \cdot 1,2837 = 4973,7259 \text{ kW} \quad (246)$$

Kde:

I_{sp} – entalpie spalin na vstupu do 2. části III. tahu [kJ/kg]

Teplo spalin na výstupu z 2. části III. tahu:

$$Q_{sp}^{out} = Q_{sp}^{in} - Q_{2.č.III.tah} = 4973,7259 - 912,7209 = 4061,0049 \text{ kW} \quad (247)$$

$$I_{sp}^{out} = \frac{Q_{sp}^{out}}{M_{pv}} = \frac{4061,0049}{1,2837} = 3163,492 \text{ kJ/kg} \quad (248)$$

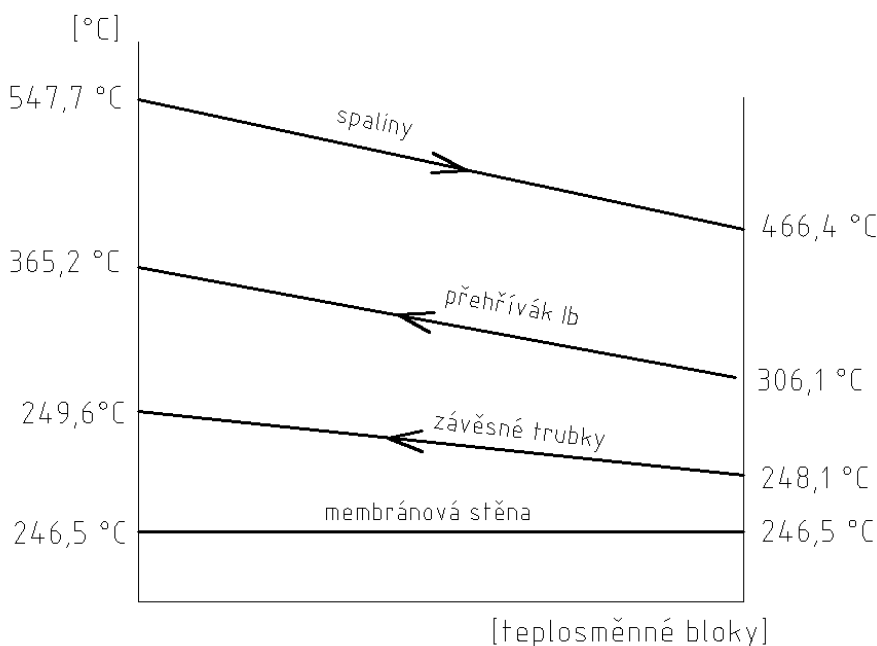
Skutečnou teplotu na výstupu z 2. části III. tahu zjistím lineární interpolací z tabulky 5 pro I_{sp}^{out} .

$$t_{k2.č.III.tah}^{skut} = 547,6862 \text{ °C}$$

Liší se o 0,6862 °C, což je dostačující odchylka.

9.3. Výpočet III. části III. tahu

Výpočet spočívá opět ve zvolení výstupní teploty na konci části tahu, dále pak její ověření tepelným výpočtem.



Obr. 14: Tepelné schéma

Zvolená výstupní teplota: $t_{k3.č.III.tahu} = 466 \text{ °C}$

Střední teplota spalin v 3. části III. tahu:

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{k2.č.III.tah}^{skut} + t_{k3.č.III.tahu}}{2} = \frac{547,6862 + 466}{2} = 506,8431 \text{ °C} \quad (249)$$

$$T_{stř}^{sp} = t_{stř}^{sp} + 273,15 = 506,8431 + 273,15 = 779,9931 \text{ K} \quad (250)$$

Plošný průřez spalin v 3. části III. tahu:

$$\begin{aligned} F_{sp} &= a \cdot b_{III} - n_{tr} \cdot D \cdot l_e - n_{zt} \cdot \frac{\pi \cdot D_{zt}^2}{4} = \\ &= 1,8 \cdot 2,16 - 18 \cdot 0,038 \cdot 2 - 18 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4} = 2,4996 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (251)$$

Kde:

n_{zt} – počet závěsných trubek

D_{zt} – vnější průměr závěsných trubek [m]
 n_{tr} – počet trubek v řadě přehříváku I – B
 D – vnější průměr trubek přehříváku I – B [m]
 l_e – délka přehřívákových trubek [m]

Skutečná rychlost spalín:

$$\begin{aligned}
 w_{sp}^{skut} &= \frac{O_{sp}^{skut} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{stř}^{sp})}{273} = \frac{3,8912 \cdot 1,2873}{2,4996} \cdot \frac{(273 + 506,8431)}{273} = \\
 &= 5,7086 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{252}$$

9.3.1. Výpočet membránové stěny

Součinitel přestupu tepla pro podélné proudění na straně spalín:

$$\begin{aligned}
 \alpha_k &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_{sp}}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp}^{skut} \cdot d_e}{\nu_{sp}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{sp}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m = \\
 &= 0,023 \cdot \frac{0,0662}{0,1198} \cdot \left(\frac{5,7086 \cdot 0,1198}{0,0000741} \right)^{0,8} \cdot 0,6193^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = \\
 &= 15,5877 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{253}$$

Kde:

c_t, c_l, c_m – opravné koeficienty [1]
 λ_{sp} – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalín [$\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$]
 ν_{sp} – kinematická viskozita pro střední teplotu spalín [m^2/s]
 Pr_{sp} – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalín [1]
 d_e – ekvivalentní průměr [m]

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 2,4996}{83,437} = 0,1198 \text{ m}
 \tag{254}$$

Kde:

O – obvod průřezu kanálu

$$\begin{aligned}
 O &= 2 \cdot (a + b_{III}) + \pi \cdot n_{zt} \cdot D_{zt} + 2 \cdot n_{tr} \cdot (l_e + D) = \\
 &= 2 \cdot (1,8 + 2,16) + \pi \cdot 18 \cdot 0,038 + 2 \cdot 18 \cdot (2 + 0,038) = 83,437 \text{ m}
 \end{aligned}
 \tag{255}$$

Kde:

n_{zt} – počet závěsných trubek v jedné řadě

D_{zt} – vnější průměr závěsných trubek [m]
 n_{tr} – počet trubek v řadě přehříváku lb
 D – vnější průměr trubek přehříváku lb [m]
 l_e – délka přehřívákových trubek [m]

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\zeta} \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)} =$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2168 \cdot 779,9931^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{643,6344}{779,9931}\right)^4}{1 - \left(\frac{643,6344}{779,9931}\right)} =$$

$$= 16,1943 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

(256)

Kde:

a_{st} – stupeň černosti povrchu stěn, $a_{st} = 0,8$ [1]
 a_{ζ} – stupeň černosti proudu spalin
 T_z – teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]
 $T_{stř}^{sp}$ – střední teplota spalin [K]

$$a_{\zeta} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2444} = 0,2168$$

(257)

Kde:

$k \cdot p \cdot s$ – optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (10,2016 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,2372 = 0,2444$$

(258)

Kde:

k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [$\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$]
 r_{sp} – objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách
 $k_p \cdot \mu$ – součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi, na optickou hustotu má minimální vliv, a proto jej dle [2] zanedbávám
 p – tlak, $p = 0,101$ [MPa]
 s – efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000}\right) \cdot r_{sp} =$$

$$= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2554}{3,16 \cdot \sqrt{0,0369 \cdot 0,2372}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{506,8431 + 273,15}{1000}\right) \cdot 0,3662 =$$

$$= 10,2016 \quad (259)$$

Kde:

r_{H_2O} , r_{sp} – objemové části tříatomových plynů
 p_{sp} – celkový parciální tlak [MPa]

$$s = 0,09 \cdot D \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,09 \cdot 0,038 \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1 \right) = 0,2372 \text{ m} \quad (260)$$

$$t_z = t_{vyp} + \varepsilon_{ms} \cdot \frac{M_{pv} \cdot (I_{sp}^{in} - I_{sp}^{out})}{S_{otr}} =$$
$$= 246,5363 + 0,004 \cdot \frac{1,2837 \cdot (3163,492 - 2685,5466)}{19,8} = 370,4844 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (261)$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 370,4844 + 273,15 = 643,6344 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (262)$$

Kde:

ε_{ms} – součinitel zanesení membránové stěny, volím $\varepsilon_{ms} = 0,004$
 t_{vyp} – teplota média ve výparníku [$^\circ\text{C}$]
 S_{otr} – celková plocha membránové stěny [m^2]

$$S_{otr} = 2 \cdot H \cdot (a + b_{III}) = 2 \cdot 2,5 \cdot (1,8 + 2,16) = 19,8 \text{ m}^2 \quad (263)$$

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \psi_e \cdot \alpha_{sp} = 0,6 \cdot 28,6038 = 17,1623 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (264)$$

Kde:

ψ_e – součinitel tepelné efektivity, pro dřevní štěpku volím 0,6 [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (15,5878 + 16,1943) = 28,6038 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (265)$$

Kde:

ω – součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{301,1499 - 219,4638}{\ln \frac{301,1499}{219,4638}} = 258,1565 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (266)$$

$$\Delta t_1 = t_{k2\check{c}.III.tah}^{skut} - t_{výp} = 547,6862 - 246,5363 = 301,1499 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (267)$$

$$\Delta t_2 = t_{k3\check{c}.III.tahu} - t_{výp} = 466 - 246,5363 = 219,4638 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (268)$$

Teplo odebrané spalinám membránovou stěnou v 3. části III. tahu:

$$Q_{ms_{3\check{c}.III.tahu}} = \frac{S_{otr} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{19,8 \cdot 17,1623 \cdot 258,1565}{1000} = 87,7251 \text{ kW} \quad (269)$$

9.3.2. Výpočet přehříváku I-B

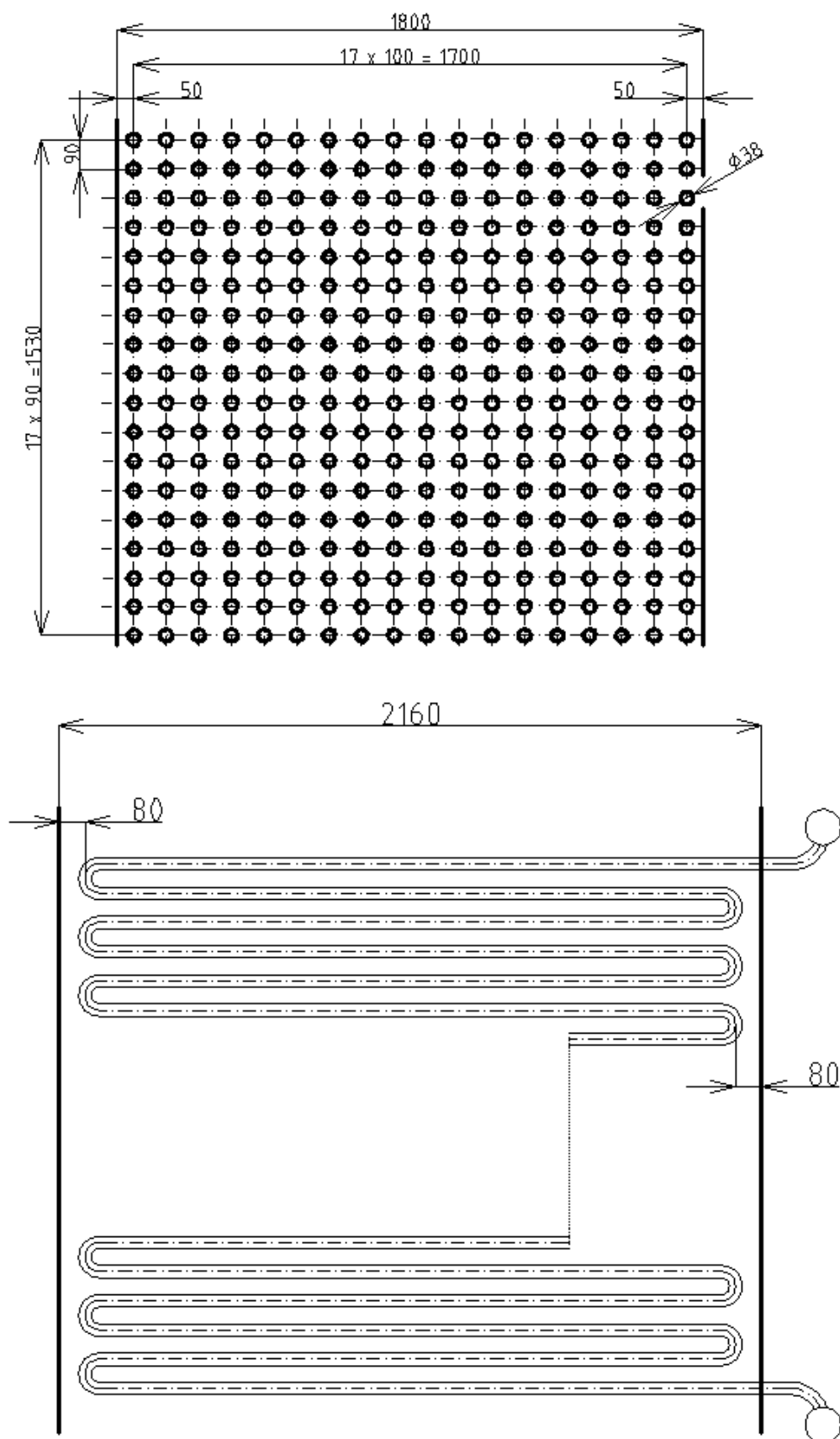
Přehřívák I-B (výstupní část přehříváku P-I) je tvořen hladkými trubkami a zapojen jako protiproud.

přehřívák I-B	rozměr	jednotka
D	0,038	m
d	0,029	m
t	0,0045	m
l_e	2	m
s_1	0,1	m
s_2	0,09	m
$n_{tr_v\text{ řadě}}$	18	-
$n_{řad}$	18	-
$n_{hadů}$	1	-

Tab. 13: Parametry přehříváku I-B

vstup			výstup			střední hodnota		
parametr	hodnota	jednotka	parametr	hodnota	jednotka	parametr	hodnota	jednotka
tlak	3,6	Mpa	tlak	3,5	Mpa	tlak	3,55	Mpa
teplota	306,079	°C	teplota	365,2146	°C	teplota	335,6468	°C
entalpie	2991,378	kJ/kg	entalpie	3141,378	kJ/kg	entalpie	3066,378	kJ/kg

Tab. 14: Parametry páry



Obr. 15: Návrh Přehříváku I-B

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin:

$$\begin{aligned}\alpha_k &= 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,65} \cdot Pr_{sp}^{0,33} = \\ &= 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0662}{0,038} \cdot \left(\frac{5,7085 \cdot 0,038}{0,0000741} \right)^{0,65} \cdot 0,6093^{0,33} = \\ &= 53,2696 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\end{aligned}$$

(270)

Kde:

c_z – opravný součinitel na počet řad

c_s – opravný součinitel na uspořádání svazku v závislosti na podélné a příčné rozteči

λ_{sp} – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalin [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

ν_{sp} – kinematická viskozita pro střední teplotu spalin [m^2/s]

Pr_{sp} – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalin [1]

Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,1}{0,038} = 2,6316$$

(271)

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,9}{0,038} = 2,3684$$

(272)

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně páry:

$$\begin{aligned}\alpha_p &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m = \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,0515}{0,029} \cdot \left(\frac{19,4995 \cdot 0,029}{1,574 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 1,0366^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = \\ &= 1153,6708 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\end{aligned}$$

(273)

Kde:

c_t, c_l, c_m – opravné koeficienty [1]

λ_p – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu páry [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

ν_p – kinematická viskozita pro střední teplotu páry [m^2/s]

Pr_p – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu páry [1]

w_p – rychlost proudění páry [m/s]

Průtočný průřez pro páru:

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{hadu} = \frac{\pi \cdot 0,029^2}{4} \cdot 18 \cdot 1 = 0,0118 \text{ m}^2$$

(274)

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot v_{stř}}{F_p} = \frac{3,333 \cdot 0,0732}{0,0118} = 19,4995 \text{ m/s} \quad (275)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\check{c}} \cdot T_{stř}^{sp^3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2168 \cdot 779,9931^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{641,5112}{779,9931}\right)^4}{1 - \left(\frac{641,5112}{779,9931}\right)} = \\ &= 17,687 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (276)$$

Kde:

a_{st} – stupeň černosti povrchu stěn, $a_{st} = 0,8$ [1]
 $a_{\check{c}}$ – stupeň černosti proudu spalín
 T_z – teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]
 $T_{stř}^{sp}$ – střední teplota spalín [K]

$$\begin{aligned} t_z &= t_{stř}^{přlb} + \left(\varepsilon_{přlb} + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \frac{Q_{přlb}}{S_{přlb}} \cdot 1000 = \\ &= 335,6468 + \left(0,004 + \frac{1}{1153,6708}\right) \cdot \frac{530}{77,3586} \cdot 1000 = 368,3612 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (277)$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 368,3612 + 273,15 = 641,5112 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (278)$$

Kde:

$\varepsilon_{přlb}$ – součinitel zanesení přehříváku, volím $\varepsilon_{přlb} = 0,004$
 $t_{stř}^{přlb}$ – střední teplota média v přehříváku [°C]
 $S_{přlb}$ – celková teplosměnná plocha přehříváku [m²]
 $Q_{přlb}$ – výkon přehříváku [kW]

$$S_{přlb} = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} \cdot n_{hadu} = \pi \cdot 0,038 \cdot 2 \cdot 18 \cdot 18 \cdot 1 = 77,3586 \text{ m}^2 \quad (279)$$

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \frac{\psi_e \cdot \alpha_{sp}}{1 + \frac{\alpha_{sp}}{\alpha_p}} = \frac{0,6 \cdot 70,9566}{1 + \frac{70,9566}{1153,6708}} = 40,1072 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (280)$$

Kde:

 ψ_e – součinitel tepelné efektivity, pro dřevní štěpku volím 0,6 [1]**Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín:**

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (53,2696 + 17,687) = 70,9566 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (280)$$

Kde:

 ω – součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]**Teplotní logaritmický spád:**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{182,4715 - 159,9209}{\ln \frac{182,4715}{159,9209}} = 170,9483 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (281)$$

$$\Delta t_1 = t_{k2\check{c}.III.tah}^{skut} - t_{přlb}^{out} = 547,6862 - 365,2146 = 182,4715 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (282)$$

$$\Delta t_2 = t_{k3\check{c}.III.tahu} - t_{přlb}^{in} = 466 - 306,079 = 159,9209 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (283)$$

Ideální plocha přehříváku I-B:

$$S_{přlb}^{id} = \frac{Q_{přlb} \cdot 1000}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{520 \cdot 1000}{40,1072 \cdot 170,9483} = 75,8431 \text{ m}^2 \quad (284)$$

Počet řad:

$$n_{řad} = \frac{S_{přlb}^{id}}{S_{1-řada}} = \frac{S_{přlb}^{id}}{\pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{hadu}} = \frac{75,8431}{\pi \cdot 0,038 \cdot 2 \cdot 18 \cdot 1} = 17,6474 \rightarrow \text{volím } 18 \text{ řad} \quad (285)$$

Teplo odebrané spalínám přehřívákem I-B v 3. části III. tahu:

$$Q_{přlb} = \frac{S_{přlb} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{77,3586 \cdot 40,1072 \cdot 170,9483}{1000} =$$

$$= 530,3902 \text{ kW} \quad (286)$$

9.3.3. Výpočet závěsných trubek

Princip výpočtu spočívá ve zvolení vstupní teploty páry v daném úseku a jejím následným ověřením tepelným výpočtem.

Součinitel přestupu tepla pro podélné proudění na straně spalín:

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_{sp}}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp}^{skut} \cdot d_e}{v_{sp}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{sp}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m = \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,0662}{0,1198} \cdot \left(\frac{5,7085 \cdot 0,1198}{0,0000741} \right)^{0,8} \cdot 0,6193^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = \\ &= 15,5877 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (287)$$

Kde:

c_t, c_l, c_m – opravné koeficienty [1]
 λ_{sp} – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalín [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
 v_{sp} – kinematická viskozita pro střední teplotu spalín [m^2/s]
 Pr_{sp} – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalín [1]
 d_e – ekvivalentní průměr [m]

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 2,4996}{83,437} = 0,1198 \text{ m} \quad (288)$$

Kde:

O – obvod průřezu kanálu

$$\begin{aligned} O &= 2 \cdot (a + b_{III}) + \pi \cdot n_{zt} \cdot D_{zt} + 2 \cdot n_{tr} \cdot (l_e + D) = \\ &= 2 \cdot (1,8 + 2,16) + \pi \cdot 18 \cdot 0,038 + 2 \cdot 18 \cdot (2 + 0,038) = 83,437 \text{ m} \end{aligned} \quad (289)$$

Kde:

n_{zt} – počet závěsných trubek v jedné řadě
 D_{zt} – vnější průměr závěsných trubek [m]
 n_{tr} – počet trubek v řadě přehříváku Ib
 D – vnější průměr trubek přehříváku Ib [m]
 l_e – délka přehřívákových trubek [m]

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně páry:

$$\begin{aligned}\alpha_p &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d_{zt}} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_{zt}}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m = \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,0497}{0,0254} \cdot \left(\frac{18,7666 \cdot 0,0254}{9,4491 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,3216^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = \\ &= 1839,2104 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\end{aligned}\tag{290}$$

Kde:

c_t, c_l, c_m – opravné koeficienty [1]

λ_p – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu páry [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

ν_p – kinematická viskozita pro střední teplotu páry [m^2/s]

Pr_p – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu páry [1]

d_{zt} – vnitřní průměr [m]

w_p – rychlost proudění páry [m/s]

Průtočný průřez pro páru:

$$F_p = \frac{\pi \cdot d_{zt}^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,0254^2}{4} \cdot 18 = 0,0091 \text{ m}^2\tag{291}$$

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{0,95 \cdot M_{pp} \cdot \nu_{stř}}{F_p} = \frac{0,95 \cdot 3,333 \cdot 0,0541}{0,0091} = 18,7666 \text{ m/s}\tag{292}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\begin{aligned}\alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\check{c}} \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2168 \cdot 779,9931^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{540,7259}{779,9931} \right)^4}{1 - \left(\frac{540,7259}{779,9931} \right)} = \\ &= 13,2331 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\end{aligned}\tag{293}$$

Kde:

a_{st} – stupeň černosti povrchu stěn, $a_{st} = 0,8$ [1]

$a_{\check{c}}$ – stupeň černosti proudu spalin

T_z – teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]

$T_{stř}^{sp}$ – střední teplota spalin [K]

$$a_{\xi} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2444} = 0,2168 \quad (294)$$

Kde:

$k \cdot p \cdot s$ – optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (10,2016 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,2372 = 0,2444 \quad (295)$$

Kde:

k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [$m^{-1} \cdot MPa^{-1}$]

r_{sp} – objemový podíl tříatomových plynů ve spalínách

$k_p \cdot \mu$ – součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi, na optickou hustotu má minimální vliv, a proto jej dle [2] zanedbávám

p – tlak, $p = 0,101$ [MPa]

s – efektivní tloušťka sálové vrstvy [m]

$$\begin{aligned} k_{sp} \cdot r_{sp} &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} = \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2554}{3,16 \cdot \sqrt{0,0369 \cdot 0,2372}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{506,8431 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3662 = \\ &= 10,2016 \end{aligned} \quad (296)$$

Kde:

r_{H_2O} , r_{sp} – objemové části tříatomových plynů

p_{sp} – celkový parciální tlak [MPa]

$$s = 0,09 \cdot D \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,09 \cdot 0,038 \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1 \right) = 0,2372 \text{ m} \quad (297)$$

$$\begin{aligned} t_z &= t_{zt}^{stř} + \left(\varepsilon_{zt} + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{0,95 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out} - i_{in})}{S_{zt}} = \\ &= 248,8274 + \left(0,004 + \frac{1}{1839,2104} \right) \cdot \frac{0,95 \cdot 3,3333 \cdot (2815,38 - 2808,378)}{5,3721} \cdot 1000 \\ &= 267,5759 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (298)$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 267,5759 + 273,15 = 540,7259 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (299)$$



Kde:

ε_{zt} – součinitel zanesení závěsných trubek, volím $\varepsilon_{zt} = 0,004$

$t_{zt}^{stř}$ – teplota média v závěsných trubkách [°C]

S_{zt} – plocha závěsných trubek v tahu [m²]

$$S_{zt} = \pi \cdot D_{zt} \cdot H \cdot n_{zt} = \pi \cdot 0,038 \cdot 2,5 \cdot 18 = 5,3721 \text{ m}^2 \quad (300)$$

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \frac{\psi_e \cdot \alpha_{sp}}{1 + \frac{\alpha_{sp}}{\alpha_p}} = \frac{0,6 \cdot 28,8209}{1 + \frac{28,8209}{1839,2104}} = 17,0257 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (301)$$

Kde:

ψ_e – součinitel tepelné efektivity, pro dřevní štěpku volím 0,6 [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (15,5878 + 13,2331) = 28,8209 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (302)$$

Kde:

ω – součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{298,0922 - 217,9391}{\ln \frac{298,0922}{217,9391}} = 255,9272 \text{ °C} \quad (303)$$

$$\Delta t_1 = t_{k2.č.III.tahu}^{skut} - t_{zt}^{out} = 547,6862 - 249,594 = 298,0922 \text{ °C} \quad (304)$$

$$\Delta t_2 = t_{k3.č.III.tahu} - t_{zt}^{in} = 466 - 248,0609 = 217,9391 \text{ °C} \quad (305)$$

Teplo odebrané spalinám závěsnými trubkami v 3. části III. tahu:

$$Q_{zt,3.č.III.tah} = \frac{S_{zt} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{5,3721 \cdot 17,0257 \cdot 255,9272}{1000} = 23,4082 \text{ kW} \quad (306)$$

Skutečná vstupní teplota do závěsných trubek:

$$I_{skutečná}^{in} = I^{out} - \frac{Q_{zt,3.č.III.tah}}{0,95 \cdot M_{pp}} = 2815,38 - \frac{23,4082}{0,95 \cdot 3,3333} = 2807,9858 \text{ kJ/kg}$$

$$t_{skutečná}^{in} = 247,9581 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (307)$$

Liší se o 0,1027 °C, což je dostačující odchylka.

9.3.4. Přepočet teploty spalin na výstupu z 3. části III. tahu

Teplo odebrané spalinám v 3. části III. tahu:

$$\begin{aligned} Q_{3.č.III.tah} &= Q_{z3.č.III.tah} + Q_{ms_3.tahu} + Q_{přlb} = \\ &= 23,4082 + 87,7251 + 530,3902 = \\ &= 641,5235 \text{ kW} \end{aligned} \quad (308)$$

Teplo spalin na vstupu do 3. části III. tahu:

$$Q_{sp}^{in} = I_{sp}^{in} \cdot M_{pv} = 3163,4920 \cdot 1,2837 = 4061,0049 \text{ kW} \quad (309)$$

Kde:

I_{sp} – entalpie spalin na vstupu do 3. části III. tahu [kJ/kg]

Teplo spalin na výstupu z 3. části III. tahu:

$$Q_{sp}^{out} = Q_{sp}^{in} - Q_{3.č.III.tah} = 4061,0049 - 641,5235 = 3419,4814 \text{ kW} \quad (310)$$

$$I_{sp}^{out} = \frac{Q_{sp}^{out}}{M_{pv}} = \frac{3419,4814}{1,2837} = 2663,7501 \text{ kJ/kg} \quad (311)$$

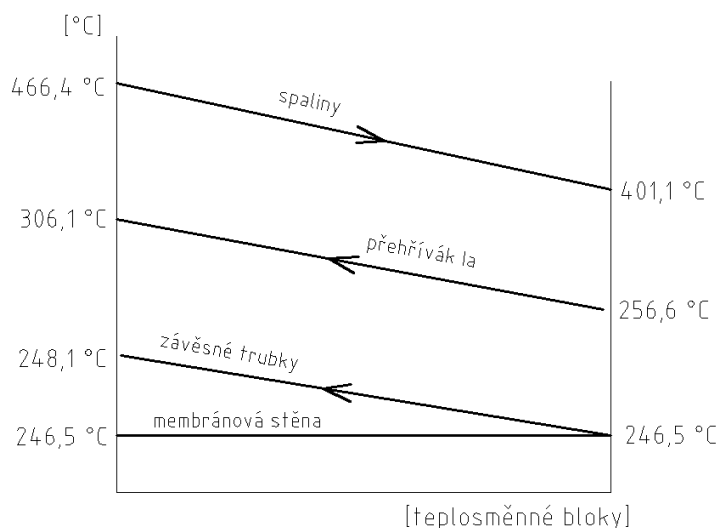
Skutečnou teplotu na výstupu z 3. části III. tahu zjistím lineární interpolací z tabulky 5 pro I_{sp}^{out} .

$$t_{k3.č.III.tah}^{skut} = 466,3976 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Liší se o 0,3976 °C, což je dostačující odchylka.

9.4. Výpočet IV. části III. tahu

Výpočet spočívá opět ve zvolení výstupní teploty na konci části tahu, dále pak její ověření tepelným výpočtem.



Obr. 16: Tepelné schéma

Zvolená výstupní teplota: $t_{k4.č.III.tahu} = 401\text{ °C}$

Střední teplota spalin v 4. části III. tahu:

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{k3.č.III.tah}^{skut} + t_{k4.č.III.tahu}}{2} = \frac{466,3976 + 401}{2} = 433,6988\text{ °C} \quad (312)$$

$$T_{stř}^{sp} = t_{stř}^{sp} + 273,15 = 433,6988 + 273,15 = 706,8488\text{ K} \quad (313)$$

Plošný průřez spalin v 4. části III. tahu:

$$\begin{aligned} F_{sp} &= a \cdot b_{III} - n_{tr} \cdot D \cdot l_e - n_{zt} \cdot \frac{\pi \cdot D_{zt}^2}{4} = \\ &= 1,8 \cdot 2,16 - 18 \cdot 0,038 \cdot 2 - 18 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4} = 2,4996\text{ m}^2 \end{aligned} \quad (314)$$

Kde:

- n_{zt} – počet závěsných trubek
- D_{zt} – vnější průměr závěsných trubek [m]
- n_{tr} – počet trubek v řadě přehříváku I – A
- D – vnější průměr trubek přehříváku I – A [m]
- l_e – délka přehřívákových trubek [m]

Skutečná rychlost spalín:

$$w_{sp}^{skut} = \frac{O_{sp}^{skut} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{stř}^{sp})}{273} = \frac{3,8912 \cdot 1,2873}{2,4996} \cdot \frac{(273 + 433,6988)}{273} =$$

$$= 5,1731 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (315)$$

9.4.1. Výpočet membránové stěny

Součinitel přestupu tepla pro podélné proudění na straně spalín:

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{sp}}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp}^{skut} \cdot d_e}{\nu_{sp}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{sp}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m =$$

$$= 0,023 \cdot \frac{0,0599}{0,1198} \cdot \left(\frac{5,1731 \cdot 0,1198}{0,0000629} \right)^{0,8} \cdot 0,6332^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 =$$

$$= 14,9946 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \quad (316)$$

Kde:

c_t, c_l, c_m – opravné koeficienty [1]
 λ_{sp} – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalín [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
 ν_{sp} – kinematická viskozita pro střední teplotu spalín [m^2/s]
 Pr_{sp} – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalín [1]
 d_e – ekvivalentní průměr [m]

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 2,4996}{83,437} = 0,1198 \text{ m} \quad (317)$$

Kde:

O – obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (a + b_{III}) + \pi \cdot n_{zt} \cdot D_{zt} + 2 \cdot n_{tr} \cdot (l_e + D) =$$

$$= 2 \cdot (1,8 + 2,16) + \pi \cdot 18 \cdot 0,038 + 2 \cdot 18 \cdot (2 + 0,038) = 83,437 \text{ m} \quad (318)$$

Kde:

n_{zt} – počet závěsných trubek v jedné řadě
 D_{zt} – vnější průměr závěsných trubek [m]
 n_{tr} – počet trubek v řadě přehříváku Ia
 D – vnější průměr trubek přehříváku Ia [m]
 l_e – délka přehřívákových trubek [m]

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\begin{aligned}\alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\zeta} \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2241 \cdot 706,8488^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{605,2008}{706,8488}\right)^4}{1 - \left(\frac{605,2008}{706,8488}\right)} = \\ &= 13,0598 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\end{aligned}\tag{319}$$

Kde:

a_{st} – stupeň černosti povrchu stěn, $a_{st} = 0,8$ [1]
 a_{ζ} – stupeň černosti proudu spalín
 T_z – teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]
 $T_{stř}^{sp}$ – střední teplota spalín [K]

$$a_{\zeta} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2537} = 0,2241\tag{320}$$

Kde:

$k \cdot p \cdot s$ – optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (10,5898 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,2372 = 0,2537\tag{321}$$

Kde:

k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [$\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$]
 r_{sp} – objemový podíl tříatomových plynů ve spalínách
 $k_p \cdot \mu$ – součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi, na optickou hustotu má minimální vliv, a proto jej dle [2] zanedbávám
 p – tlak, $p = 0,101$ [MPa]
 s – efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

$$\begin{aligned}k_{sp} \cdot r_{sp} &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000}\right) \cdot r_{sp} = \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2554}{3,16 \cdot \sqrt{0,0369 \cdot 0,2372}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{433,6988 + 273,15}{1000}\right) \cdot 0,3662 = \\ &= 10,5898\end{aligned}\tag{322}$$

Kde:

r_{H_2O} , r_{sp} – objemové části tříatomových plynů
 p_{sp} – celkový parciální tlak [MPa]

$$s = 0,09 \cdot D \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,09 \cdot 0,038 \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1 \right) = 0,2372 \text{ m} \quad (323)$$

$$t_z = t_{vyp} + \varepsilon_{ms} \cdot \frac{M_{pv} \cdot (I_{sp}^{in} - I_{sp}^{out})}{S_{otr}} =$$
$$= 246,5363 + 0,004 \cdot \frac{1,2837 \cdot (2663,75 - 2268,0557)}{23,76} = 332,0508 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (324)$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 332,0508 + 273,15 = 605,2008 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (325)$$

Kde:

ε_{ms} – součinitel zanesení membránové stěny, volím $\varepsilon_{ms} = 0,004$
 t_{vyp} – teplota média ve výparníku [$^\circ\text{C}$]
 S_{otr} – celková plocha membránové stěny [m^2]

$$S_{otr} = 2 \cdot H \cdot (a + b_{III}) = 2 \cdot 3 \cdot (1,8 + 2,16) = 23,76 \text{ m}^2 \quad (326)$$

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \psi_e \cdot \alpha_{sp} = 0,6 \cdot 25,2489 = 15,1494 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (327)$$

Kde:

ψ_e – součinitel tepelné efektivity, pro dřevní štěpku volím 0,6 [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (14,9946 + 13,0598) = 25,2489 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (328)$$

Kde:

ω – součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{219,8613 - 154,4637}{\ln \frac{219,8613}{154,4637}} = 185,2425 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (329)$$

$$\Delta t_1 = t_{k3\check{c}.III.tah}^{skut} - t_{výp} = 466,3976 - 246,5363 = 219,8613 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (330)$$

$$\Delta t_2 = t_{k4\check{c}.III.tahu} - t_{výp} = 401 - 246,5363 = 154,4637 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (331)$$

Teplo odebrané spalínám membránovou stěnou v 4. části III. tahu:

$$Q_{ms_4\check{c}.III.tahu} = \frac{S_{otr} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{23,76 \cdot 15,1494 \cdot 185,2425}{1000} = 66,6778 \text{ kW} \quad (332)$$

9.4.2. Výpočet přehříváku I-A

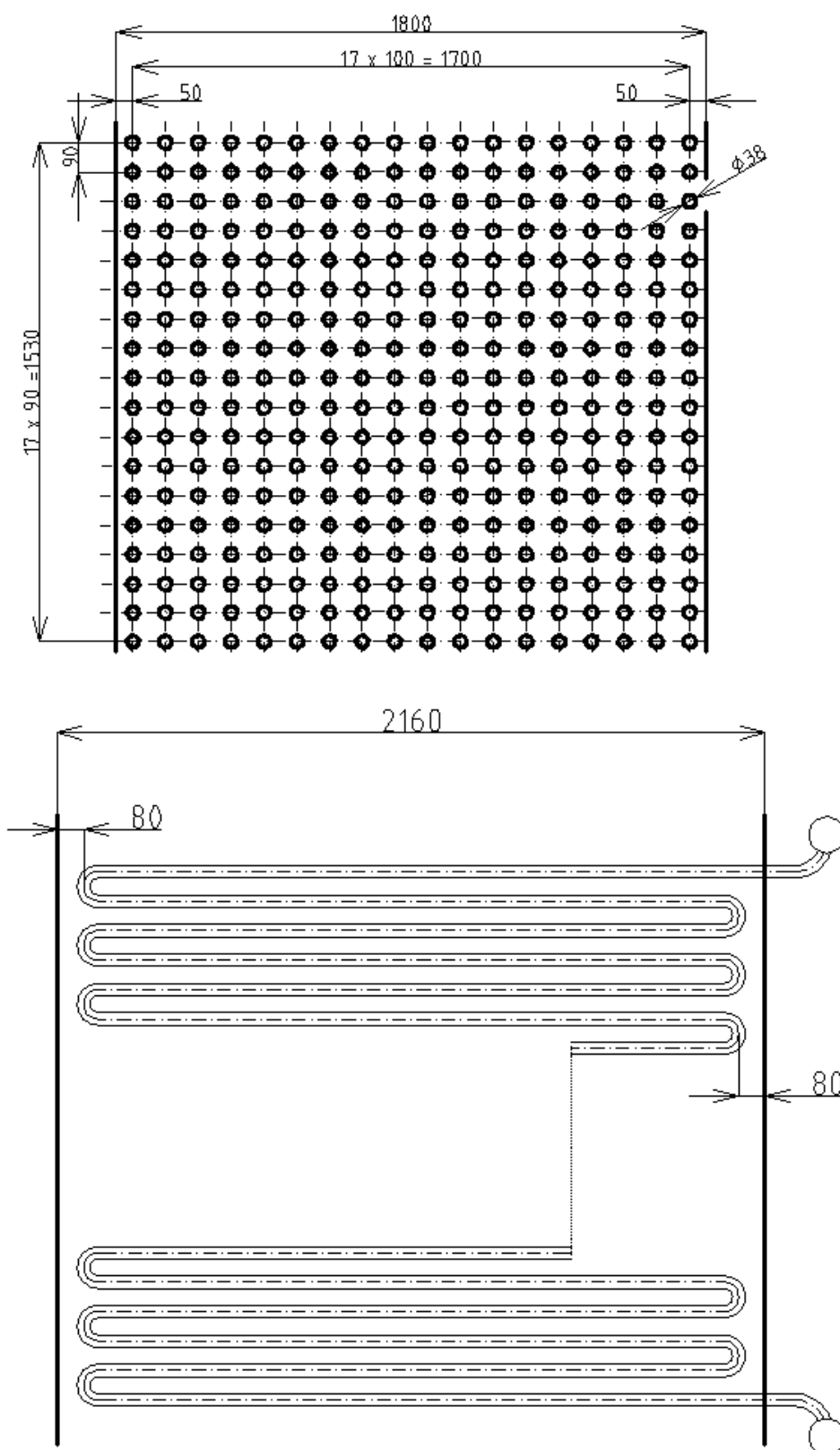
Přehřívák I-A (vstupní část přehříváku P-I) je tvořen hladkými trubkami a zapojen jako protiproud.

přehřívák I-A	rozměr	jednotka
D	0,038	m
d	0,029	m
t	0,0045	m
l_e	2	m
s_1	0,1	m
s_2	0,09	m
$n_{tr_v\text{ řadě}}$	18	-
$n_{řad}$	18	-
$n_{hadů}$	1	-

Tab. 15: Parametry přehříváku I-A

vstup			výstup			střední hodnota		
parametr	hodnota	jednotka	parametr	hodnota	jednotka	parametr	hodnota	jednotka
tlak	3,7	Mpa	tlak	3,6	Mpa	tlak	3,65	Mpa
teplota	256,57807	°C	teplota	306,079	°C	teplota	281,3285	°C
entalpie	2841,3779	kJ/kg	entalpie	2991,378	kJ/kg	entalpie	2916,378	kJ/kg

Tab. 16: Parametry páry



Obr. 17: Přehřívák I-A

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín:

$$\begin{aligned}\alpha_k &= 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,65} \cdot Pr_{sp}^{0,33} = \\ &= 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0599}{0,038} \cdot \left(\frac{5,1731 \cdot 0,038}{0,0000629} \right)^{0,65} \cdot 0,6332^{0,33} = \\ &= 50,6669 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\end{aligned}\quad (333)$$

Kde:

c_z – opravný součinitel na počet řad
 c_s – opravný součinitel na uspořádání svazku v závislosti na podélné a příčné rozteči
 λ_{sp} – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalín [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
 ν_{sp} – kinematická viskozita pro střední teplotu spalín [m^2/s]
 Pr_{sp} – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalín [1]

Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{1}{0,038} = 2,6316 \quad (334)$$

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,09}{0,038} = 2,3684 \quad (335)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně páry:

$$\begin{aligned}\alpha_p &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m = \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,0489}{0,029} \cdot \left(\frac{16,4352 \cdot 0,029}{1,171 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 1,1462^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = \\ &= 1248,8403 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\end{aligned}\quad (336)$$

Kde:

c_t, c_l, c_m – opravné koeficienty [1]
 λ_p – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu páry [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
 ν_p – kinematická viskozita pro střední teplotu páry [m^2/s]
 Pr_p – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu páry [1]
 w_p – rychlost proudění páry [m/s]

(337)

Průtočný průřez pro páru:

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{hadu} = \frac{\pi \cdot 0,029^2}{4} \cdot 18 \cdot 1 = 0,0118 \text{ m}^2 \quad (338)$$

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot v_{stř}}{F_p} = \frac{3,333 \cdot 0,0617}{0,0118} = 16,4352 \text{ m/s} \quad (339)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\check{c}} \cdot T_{stř}^{sp^3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2241 \cdot 706,8488^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{570,0465}{706,8488}\right)^4}{1 - \left(\frac{570,0465}{706,8488}\right)} = \\ &= 12,1034 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (340)$$

Kde:

a_{st} – stupeň černosti povrchu stěn, $a_{st} = 0,8$ [1]
 $a_{\check{c}}$ – stupeň černosti proudu spalín
 T_z – teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]
 $T_{stř}^{sp}$ – střední teplota spalín [K]

$$a_{\check{c}} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2537} = 0,2241 \quad (341)$$

Kde:

$k \cdot p \cdot s$ – optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (10,5898 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,2372 = 0,2537 \quad (342)$$

Kde:

k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [$\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$]
 r_{sp} – objemový podíl tříatomových plynů ve spalínách
 $k_p \cdot \mu$ – součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi, na optickou hustotu má minimální vliv, a proto jej dle [2] zanedbávám
 p – tlak, $p = 0,101$ [MPa]
 s – efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

$$\begin{aligned}
 k_{sp} \cdot r_{sp} &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} = \\
 &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2554}{3,16 \cdot \sqrt{0,0369 \cdot 0,2372}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{433,6988 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3662 = \\
 &= 10,5898
 \end{aligned}
 \tag{343}$$

Kde:

r_{H_2O} , r_{sp} – objemové části tříatomových plynů
 p_{sp} – celkový parciální tlak [MPa]

$$s = 0,09 \cdot D \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,09 \cdot 0,038 \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1 \right) = 0,2372 \text{ m}
 \tag{344}$$

$$\begin{aligned}
 t_z &= t_{stř}^{přla} + \left(\varepsilon_{přla} + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{Q_{přla}}{S_{přla}} \cdot 1000 = \\
 &= 281,3285 + \left(0,002 + \frac{1}{1248,8402} \right) \cdot \frac{430}{77,3586} \cdot 1000 = 296,8965 \text{ °C}
 \end{aligned}
 \tag{345}$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 296,8965 + 273,15 = 570,0465 \text{ °C}
 \tag{346}$$

Kde:

$\varepsilon_{přla}$ – součinitel zanesení přehříváku, volím $\varepsilon_{přla} = 0,002$
 $t_{stř}^{přla}$ – střední teplota média v přehříváku [°C]
 $S_{přla}$ – celková teplosměnná plocha přehříváku [m²]
 $Q_{přla}$ – výkon přehříváku [kW]

$$S_{přla} = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{rad} \cdot n_{hadů} = \pi \cdot 0,038 \cdot 2 \cdot 18 \cdot 18 \cdot 1 = 77,3586 \text{ m}^2
 \tag{347}$$

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \frac{\psi_e \cdot \alpha_{sp}}{1 + \frac{\alpha_{sp}}{\alpha_p}} = \frac{0,6 \cdot 62,7703}{1 + \frac{62,7703}{1248,8403}} = 35,8598 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}
 \tag{348}$$

Kde:

ψ_e – součinitel tepelné efektivity, pro dřevní štěpku volím 0,6 [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (50,6669 + 12,1034) = 62,7703 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (349)$$

Kde:

 ω – součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]**Teplotní logaritmický spád:**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{160,3186 - 144,4219}{\ln \frac{160,3186}{144,4219}} = 152,2319 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (350)$$

$$\Delta t_1 = t_{k3\check{c}.III.tah}^{skut} - t_{přla}^{out} = 466,3976 - 306,079 = 160,3186 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (351)$$

$$\Delta t_2 = t_{k4\check{c}.III.tahu} - t_{přla}^{in} = 401 - 256,5781 = 144,4219 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (352)$$

Ideální plocha přehříváku I-A:

$$S_{přla}^{id} = \frac{Q_{přla} \cdot 1000}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{430 \cdot 1000}{35,8598 \cdot 152,2319} = 78,7689 \text{ m}^2 \quad (353)$$

Počet řad:

$$n_{řad} = \frac{S_{přla}^{id}}{S_{1-řada}} = \frac{S_{přla}^{id}}{\pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{hadů}} = \frac{78,7689}{\pi \cdot 0,038 \cdot 2 \cdot 18 \cdot 1} = 18,3281 \rightarrow \text{volím 18 řad} \quad (354)$$

Teplu odebrané spalinám přehřívákem I-A v 4. části III. tahu:

$$Q_{přla} = \frac{S_{přla} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{78,7689 \cdot 35,8598 \cdot 152,2319}{1000} = 422,3009 \text{ kW} \quad (355)$$

9.4.3. Výpočet závěsných trubek

Princip výpočtu spočívá ve zvolení vstupní teploty páry v daném úseku a jejím následným ověřením tepelným výpočtem.

Součinitel přestupu tepla pro podélné proudění na straně spalín:

$$\begin{aligned}\alpha_k &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_{sp}}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp}^{skut} \cdot d_e}{\nu_{sp}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{sp}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m = \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,0599}{0,1198} \cdot \left(\frac{5,1731 \cdot 0,1198}{0,0000629} \right)^{0,8} \cdot 0,6332^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = \\ &= 14,9946 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\end{aligned}\quad (356)$$

Kde:

c_t, c_l, c_m – opravné koeficienty [1]
 λ_{sp} – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalín [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
 ν_{sp} – kinematická viskozita pro střední teplotu spalín [m^2/s]
 Pr_{sp} – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalín [1]
 d_e – ekvivalentní průměr [m]

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 2,4996}{83,437} = 0,1198 \text{ m}\quad (357)$$

Kde:

O – obvod průřezu kanálu

$$\begin{aligned}O &= 2 \cdot (a + b_{III}) + \pi \cdot n_{zt} \cdot D_{zt} + 2 \cdot n_{tr} \cdot (l_e + D) = \\ &= 2 \cdot (1,8 + 2,16) + \pi \cdot 18 \cdot 0,038 + 2 \cdot 18 \cdot (2 + 0,038) = 83,437 \text{ m}\end{aligned}\quad (358)$$

Kde:

n_{zt} – počet závěsných trubek v jedné řadě
 D_{zt} – vnější průměr závěsných trubek [m]
 n_{tr} – počet trubek v řadě přehříváku Ia
 D – vnější průměr trubek přehříváku Ia [m]
 l_e – délka přehřívákových trubek [m]

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně páry:

$$\begin{aligned}\alpha_p &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d_{zt}} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_{zt}}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m = \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,0500}{0,0254} \cdot \left(\frac{18,555 \cdot 0,0254}{9,3012 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,345^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = \\ &= 1868,2889 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\end{aligned}\quad (359)$$

Kde:

c_t, c_l, c_m – opravné koeficienty [1]

λ_p – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu páry [$Wm^{-1}K^{-1}$]

ν_p – kinematická viskozita pro střední teplotu páry [m^2/s]

Pr_p – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu páry [1]

d_{zt} – vnitřní průměr [m]

w_p – rychlost proudění páry [m/s]

Průtočný průřez pro páru:

$$F_p = \frac{\pi \cdot d_{zt}^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,0254^2}{4} \cdot 18 = 0,0091 \text{ m}^2 \quad (360)$$

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{0,95 \cdot M_{pp} \cdot \nu_{stř}}{F_p} = \frac{0,95 \cdot 3,333 \cdot 0,0534}{0,0091} = 18,555 \text{ m/s} \quad (361)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\check{c}} \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2241 \cdot 706,8488^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{534,7431}{706,8488}\right)^4}{1 - \left(\frac{534,7431}{706,8488}\right)} = \\ &= 11,2121 \text{ Wm}^{-2}K^{-1} \end{aligned} \quad (362)$$

Kde:

a_{st} – stupeň černosti povrchu stěn, $a_{st} = 0,8$ [1]

$a_{\check{c}}$ – stupeň černosti proudu spalín

T_z – teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]

$T_{stř}^{sp}$ – střední teplota spalín [K]

$$a_{\check{c}} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2537} = 0,2241 \quad (363)$$

Kde:

$k \cdot p \cdot s$ – optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (10,5898 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,2372 = 0,2537 \quad (364)$$



Kde:

k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [$m^{-1} \cdot MPa^{-1}$]

r_{sp} – objemový podíl tříatomových plynů ve spalínách

$k_p \cdot \mu$ – součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi, na optickou hustotu má minimální vliv, a proto jej dle [2] zanedbávám

p – tlak, $p = 0,101$ [MPa]

s – efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

$$\begin{aligned} k_{sp} \cdot r_{sp} &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} = \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2554}{3,16 \cdot \sqrt{0,0369 \cdot 0,2372}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{433,6988 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3662 = \\ &= 10,5898 \end{aligned} \quad (365)$$

Kde:

r_{H_2O} , r_{sp} – objemové části tříatomových plynů

p_{sp} – celkový parciální tlak [MPa]

$$s = 0,09 \cdot D \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,09 \cdot 0,038 \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1 \right) = 0,2372 \text{ m} \quad (366)$$

$$\begin{aligned} t_z &= t_{zt}^{stř} + \left(\varepsilon_{zt} + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{0,95 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out} - i_{in})}{S_{zt}} = \\ &= 247,31 + \left(0,004 + \frac{1}{1868,2889} \right) \cdot \frac{0,95 \cdot 3,3333 \cdot (2808,378 - 2801,967)}{6,4465} \cdot 1000 \\ &= 261,5931 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (367)$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 261,5931 + 273,15 = 534,7431 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (368)$$

Kde:

ε_{zt} – součinitel zanesení závěsných trubek, volím $\varepsilon_{zt} = 0,004$

$t_{zt}^{stř}$ – teplota média v závěsných trubkách [$^\circ\text{C}$]

S_{zt} – plocha závěsných trubek v tahu [m^2]

$$S_{zt} = \pi \cdot D_{zt} \cdot H \cdot n_{zt} = \pi \cdot 0,038 \cdot 3 \cdot 18 = 6,4465 \text{ m}^2 \quad (369)$$

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \frac{\psi_e \cdot \alpha_{sp}}{1 + \frac{\alpha_{sp}}{\alpha_p}} = \frac{0,6 \cdot 26,2067}{1 + \frac{26,2067}{1868,2889}} = 15,5065 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (370)$$

Kde:

ψ_e – součinitel tepelné efektivity, pro dřevní štěpku volím 0,6 [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (14,9946 + 11,2121) = 26,2067 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (371)$$

Kde:

ω – součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{218,3367 - 154,4407}{\ln \frac{218,3367}{154,4407}} = 184,5488 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (372)$$

$$\Delta t_1 = t_{k3\check{c}.III.tahu}^{skut} - t_{zt}^{out} = 466,3976 - 248,0609 = 218,3367 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (373)$$

$$\Delta t_2 = t_{k4\check{c}.III.tahu} - t_{zt}^{in} = 401 - 246,5593 = 154,4407 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (374)$$

Teplu odebrané spalínám závěsnými trubkami v 4. části III. tahu:

$$Q_{zt.4.\check{c}.III.tah} = \frac{S_{zt} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{6,4465 \cdot 15,5065 \cdot 184,5488}{1000} = 18,4482 \text{ kW} \quad (375)$$

Skutečná vstupní teplota do závěsných trubek:

$$I_{skutečná}^{in} = I^{out} - \frac{Q_{zt.4.\check{c}.III.tah}}{0,95 \cdot M_{pp}} = 2808,378 - \frac{18,4482}{0,95 \cdot 3,3333} = 2802,5521 \text{ kJ/kg} \quad (376)$$

$$t_{skutečná}^{in} = 246,7131 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Liší se o 0,1538 °C, což je dostačující odchylka.

9.4.4. Přepočet teploty spalin na výstupu ze 4. části III. tahu

Teplo odebrané spalinám v 4. části III. tahu:

$$\begin{aligned} Q_{4.č.III.tah} &= Q_{z4.č.III.tah} + Q_{ms4.tahu} + Q_{přla} = \\ &= 18,4482 + 66,6778 + 422,3009 = 507,4269 \text{ kW} \end{aligned} \quad (377)$$

Teplo spalin na vstupu do 4. části III. tahu:

$$Q_{sp}^{in} = I_{sp}^{in} \cdot M_{pv} = 2663,7501 \cdot 1,2837 = 3419,4814 \text{ kW} \quad (378)$$

Kde:

$$I_{sp} - \text{entalpie spalin na vstupu do 4. části III. tahu [kJ/kg]} \quad (379)$$

Teplo spalin na výstupu ze 4. části III. tahu:

$$Q_{sp}^{out} = Q_{sp}^{in} - Q_{4.č.III.tah} = 3419,4814 - 507,4269 = 2912,0545 \text{ kW} \quad (380)$$

$$I_{sp}^{out} = \frac{Q_{sp}^{out}}{M_{pv}} = \frac{2912,0545}{1,2837} = 2268,4683 \text{ kJ/kg} \quad (381)$$

Skutečnou teplotu na výstupu ze 4. části III. tahu zjistím lineární interpolací z tabulky 5 pro I_{sp}^{out} .

$$t_{k4.č.III.tah}^{skut} = 401,0682 \text{ °C}$$

Liší se o 0,0682 °C, což je dostačující odchylka.

10. Výpočet IV a V tahu

Tato část spalinového kanálu již není chlazena membránovou stěnou, tvoří ji plechová šachta, ve které jsou teplosměnné plochy zavěšeny na nechlazených závěsech. V tahu se nachází dva ohříváky vzduchu (OV-B a OV-A) a svazky ekonomizéru.

Nejdříve si zvolím rychlost spalin v místě, kde ji předpokládám nejvyšší. Tím je ohřívák vzduchu B, pomocí této rychlosti vypočítám plošný průřez spalin, z něhož mohu následně dopočítat délku 4. a 5. tahu.

Rychlost spalin volím: $w_{sp} = 6 \text{ m/s}$

Plošný průřez spalin:

$$F_{sp} = \frac{O_{sp_{skut}}^v \cdot M_{pv}}{w_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{OV-B}^{sp})}{273} = \frac{3,8912 \cdot 1,2873}{6} \cdot \frac{(273 + 356,0341)}{273} =$$
$$= 1,9183 \text{ m}^2 \quad (382)$$

Kde:

t_{OV-B}^{sp} – střední teplota v OV – B
 w_{sp} – rychlost spalin zvolená do OV – B

Délka b_{IV-V}:

$$b_{IV-V} = \frac{F_{sp}}{a - n_{tr} \cdot D} = \frac{1,9183}{1,8 - 20 \cdot 0,0445} = 2,1079 \rightarrow 2 \text{ m} \quad (383)$$

Kde:

n_{tr} – počet trubek OV – B v jedné řadě
 D – vnější průměr trubek OV – B [m]

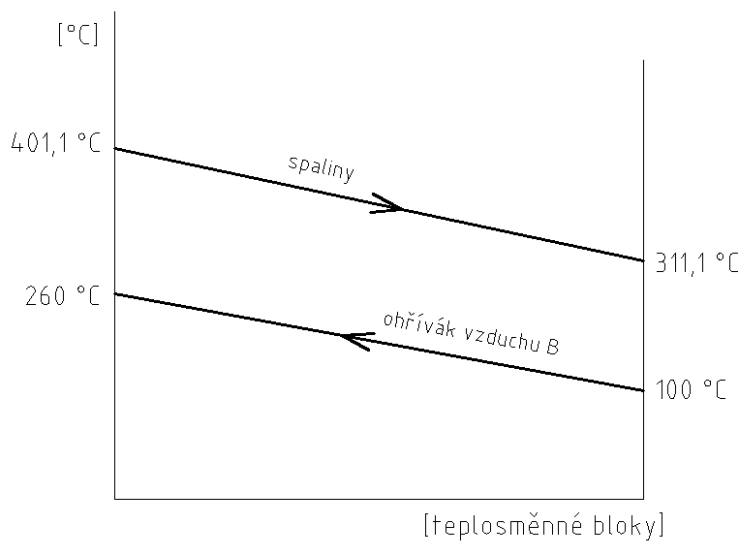
10.1. Výpočet I. části IV. a V. tahu

Zvolená výstupní teplota: $t_{k1.č_{IV.tahu}} = 311 \text{ °C}$

Střední teplota spalin v 1. části IV. a V. tahu:

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{k4.č_{III.tahu}}^{skut} + t_{k1.č_{IV.tahu}}}{2} = \frac{401,0682 + 311}{2} = 356,0341 \text{ °C} \quad (384)$$

$$T_{stř}^{sp} = t_{stř}^{sp} + 273,15 = 356,0341 + 273,15 = 629,1841 \text{ K} \quad (385)$$



Obr. 18: Tepelní schéma

Plošný průřez spalin v 1. části IV. a V. tahu:

$$F_{sp} = a \cdot b_{IV-V} - n_{tr} \cdot D \cdot l_e = 1,8 \cdot 2 - 20 \cdot 0,0445 \cdot 2 = 1,82 \text{ m}^2 \quad (386)$$

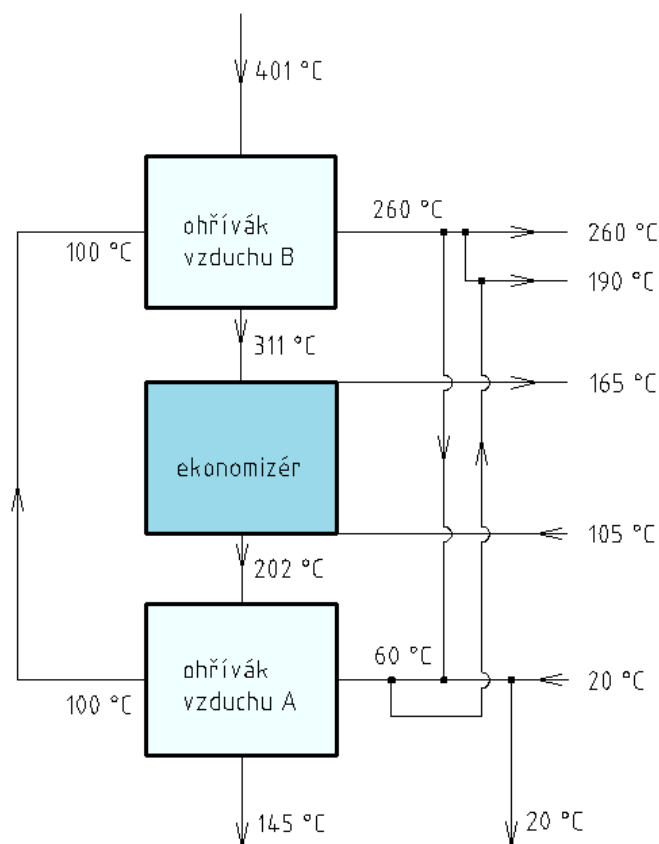
Kde:

n_{tr} – počet trubek OV – B v jedné řadě
 D – vnější průměr trubek OV – B [m]

Skutečná rychlost spalin:

$$w_{sp}^{skut} = \frac{O_{sp}^{skut} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{stř}^{sp})}{273} = \frac{3,8912 \cdot 1,2873}{1,82} \cdot \frac{(273 + 356,0341)}{273} = 6,3239 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (387)$$

10.1.1. Balance ohřivaného vzduchu



Obr. 19: schéma balance ohřivaného vzduchu

45% vzduchu o teplotě 190 °C primární vzduch
45% vzduchu o teplotě 260 °C sekundární vzduch
10% vzduchu o teplotě 20 °C pohazování

Množství primárního vzduchu

$$M_1 = 0,45 \cdot M_{vzskut}^v = 0,45 \cdot 2,966 = 1,3347 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (388)$$

Kde:

M_{vzskut}^v – skutečné množství vzduchu pro spálení 1 kg paliva [Nm^3/kg]

Množství vzduchu potřebné na dochlazení primárního vzduchu

$$M_{dochl} \cdot 60 + (M_1 - M_{dochl}) \cdot 260 = M_1 \cdot 190$$

$$M_{dochl} = \frac{M_1 \cdot 70}{200} = \frac{1,3347 \cdot 70}{200} = 0,4672 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (389)$$

Množství recirkulovaného vzduchu

$$0,9 \cdot M_{vzskut}^v \cdot 20 + M_{rec} \cdot 260 = (0,9 \cdot M_{vzskut}^v + M_{rec}) \cdot 60$$

$$M_{rec} = 0,9 \cdot M_{vzskut}^v \cdot \frac{40}{210} = 0,9 \cdot 2,966 \cdot \frac{40}{210} = 0,5085 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

(390)

Množství vzduchu na pohazování

$$M_{pohaz} = 0,1 \cdot M_{vzskut}^v = 0,1 \cdot 2,966 = 0,2966 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

(391)

Celkové množství vzduchu v ohřívácích

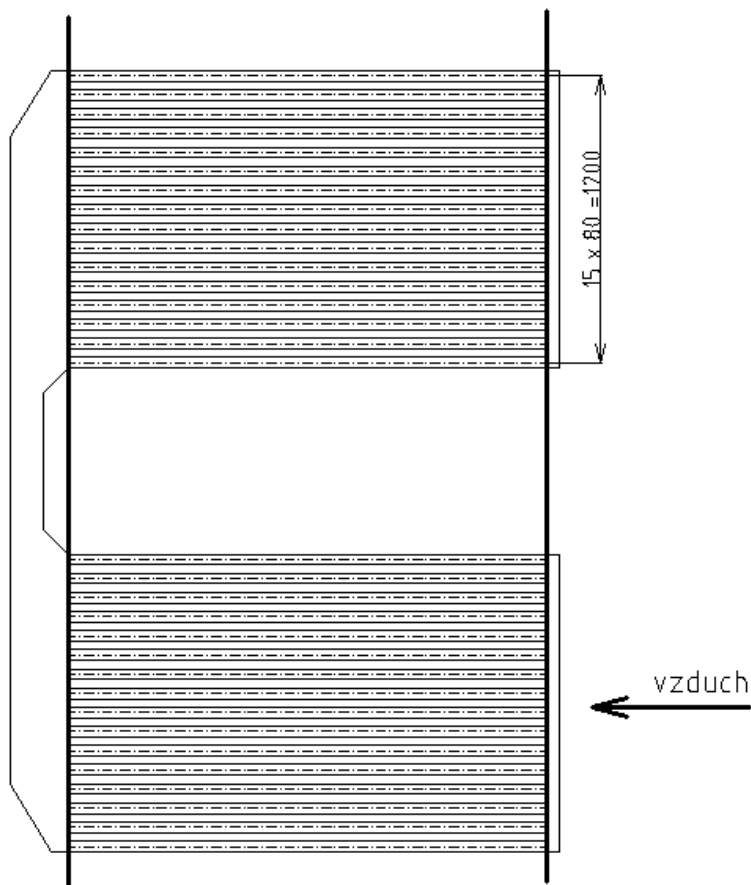
$$M_{celk} = M_{vzskut}^v - M_{pohaz} - M_{dochl} + M_{rec} =$$
$$= 2,966 - 0,2966 - 0,4672 + 0,5085 = 2,7108 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

(392)

10.1.2. Výpočet ohříváku vzduchu B

OV-B	rozměr	jednotka
D	0,0445	m
d	0,0395	m
t	0,0025	m
l_e	2	m
s_1	0,09	m
s_2	0,08	m
$n_{tr \text{ v řadě}}$	20	-
$n_{řad}$	16	-
$n_{bloků}$	2	-

Tab. 17: parametry ohříváku vzduchu B



Obr. 20: ohřívák vzduchu B

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín:

$$\begin{aligned}\alpha_k &= 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,65} \cdot Pr_{sp}^{0,33} = \\ &= 0,2 \cdot 1 \cdot 0,9978 \cdot \frac{0,0531}{0,0445} \cdot \left(\frac{6,3239 \cdot 0,0445}{0,0000515} \right)^{0,65} \cdot 0,6445^{0,33} = \\ &= 55,3693 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\end{aligned}\tag{393}$$

Kde:

c_z – opravný součinitel na počet řad

c_s – opravný součinitel na uspořádání svazku v závislosti na podélné a příčné rozteči

λ_{sp} – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalín [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

ν_{sp} – kinematická viskozita pro střední teplotu spalín [m^2/s]

Pr_{sp} – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalín [1]

Opravný součinitel na počet řad:

Pro více řad než 10 platí:

$$c_z = 1\tag{394}$$

Opravný součinitel na uspořádání svazku:

$$c_s = \left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} = \left[1 + (2 \cdot 2,0225 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,7977}{2} \right)^3 \right]^{-2} =$$

$$= 0,9978 \quad (395)$$

Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,09}{0,0445} = 2,0225 \quad (396)$$

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,08}{0,0445} = 1,7977 \quad (397)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\zeta} \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)} =$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1874 \cdot 629,1841^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{541,167}{629,1841} \right)^4}{1 - \left(\frac{541,167}{629,1841} \right)} =$$

$$= 7,7478 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1} \quad (398)$$

Kde:

a_{st} – stupeň černosti povrchu stěn, $a_{st} = 0,8$ [1]
 a_{ζ} – stupeň černosti proudu spalin
 T_z – teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]
 $T_{stř}^{sp}$ – střední teplota spalin [K]

$$a_{\zeta} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2075} = 0,1874 \quad (399)$$

Kde:

$k \cdot p \cdot s$ – optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (14,1323 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,1455 = 0,2075 \quad (400)$$

Kde:

k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [$m^{-1} \cdot MPa^{-1}$]

r_{sp} – objemový podíl tříatomových plynů ve spalínách

$k_p \cdot \mu$ – součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi, na optickou hustotu má minimální vliv, a proto jej dle [2] zanedbávám

p – tlak, $p = 0,101$ [MPa]

s – efektivní tloušťka sálové vrstvy [m]

$$\begin{aligned} k_{sp} \cdot r_{sp} &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} = \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2554}{3,16 \cdot \sqrt{0,0369 \cdot 0,1455}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{356,0341 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3662 = \\ &= 14,1323 \end{aligned} \quad (401)$$

Kde:

r_{H_2O} , r_{sp} – objemové části tříatomových plynů;

p_{sp} – celkový parciální tlak [MPa]

$$s = 0,09 \cdot D \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,09 \cdot 0,0445 \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,08 \cdot 0,09}{0,0445^2} - 1 \right) = 0,1455 \text{ m} \quad (402)$$

$$t_z = \frac{t_{sp}^{stř} + t_{vz}^{stř}}{2} = \frac{356,0341 + 180}{2} = 268,017 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (403)$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 268,017 + 273,15 = 541,167 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (404)$$

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (55,3693 + 7,7478) = 63,1171 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (405)$$

Kde:

ω – součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně vzduchu:

$$\begin{aligned}\alpha_{vz} &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_{vz}}{d} \cdot \left(\frac{w_{vz} \cdot d}{\nu_{vz}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{vz}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m = \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,0376}{0,0395} \cdot \left(\frac{14,7251 \cdot 0,0395}{3,25 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,676^{0,4} \cdot 0,9151 \cdot 1 \cdot 1 = \\ &= 43,2467 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}\end{aligned}\tag{406}$$

Kde:

c_t, c_l, c_m – opravné koeficienty [1]

λ_{vz} – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu vzduchu [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$]

ν_{vz} – kinematická viskozita pro střední teplotu vzduchu [m^2/s]

Pr_{vz} – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu vzduchu [1]

d – vnitřní průměr [m]

w_{vz} – rychlost proudění vzduchu [m/s]

Průtočný průřez pro vzduch:

$$F_{vz} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{rad} = \frac{\pi \cdot 0,0395^2}{4} \cdot 20 \cdot 16 = 0,3921 \text{ m}^2\tag{407}$$

Rychlost proudění vzduchu:

$$w_{vz} = \frac{M_{pv} \cdot M_{celk}}{F_{vz}} \cdot \left(1 + \frac{t_{vz}^{stř}}{273} \right) = \frac{1,2837 \cdot 2,7108}{0,3921} \cdot \left(1 + \frac{180}{273} \right) = 14,7251 \text{ m/s}\tag{408}$$

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_{vz} \cdot \alpha_{sp}}{\alpha_{vz} + \alpha_{sp}} = 0,85 \cdot \frac{43,2467 \cdot 63,1171}{43,2467 + 63,1171} = 21,8135 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}\tag{409}$$

Kde:

ξ – součinitel využití plochy, volím $\xi = 0,85$ [1]

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{211 - 141,0682}{\ln \frac{211}{141,0682}} = 173,6941 \text{ } ^\circ\text{C}\tag{410}$$

$$\Delta t_1 = t_{k1\check{c}.IV.tahu} - t_{OV-B}^{in} = 311 - 100 = 211 \text{ } ^\circ\text{C}\tag{411}$$

$$\Delta t_2 = t_{k4\check{c}.III.tah}^{skut} - t_{OV-B}^{out} = 401,0682 - 260 = 141,0682 \text{ } ^\circ\text{C}\tag{412}$$

Výkon ohříváku vzduchu B

$$\begin{aligned} Q_{OV-B} &= M_{pv} \cdot \alpha \cdot \left(0,9 - \frac{M_{dochl}}{M_{vzskut}^v} + \frac{M_{rec}}{M_{vzskut}^v} \right) \cdot (I_{out} - I_{in}) = \\ &= 1,2837 \cdot 1,35 \cdot \left(0,9 - \frac{0,4672}{2,966} + \frac{0,5084}{2,966} \right) \cdot (766,3176 - 291,3053) = \\ &= 665,9101 \text{ kW} \end{aligned} \quad (413)$$

Plocha ohříváku vzduchu B:

$$S_{OV-B} = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{rad} \cdot n_{blokû} = \pi \cdot 0,0445 \cdot 2 \cdot 20 \cdot 16 \cdot 2 = 178,9451 \text{ m}^2 \quad (414)$$

Ideální plocha ohříváku vzduchu B:

$$S_{OV-B}^{id} = \frac{Q_{OV-B} \cdot 1000}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{665,9101 \cdot 1000}{21,8135 \cdot 173,6941} = 175,7542 \text{ m}^2 \quad (415)$$

Počet řad:

$$\begin{aligned} n_{rad} &= \frac{S_{OV-B}^{id}}{S_{1-řada}} = \frac{S_{OV-B}^{id}}{\pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr}} = \frac{175,7542}{\pi \cdot 0,0445 \cdot 2 \cdot 20} = 31,4294 \\ &= \frac{31,4294}{n_{blokû}} = \frac{31,4294}{2} = 15,714 \rightarrow \text{volím 16 řad} \end{aligned} \quad (416)$$

Teplo odebrané spalínám ohřívákem vzduchu v 1. části IV. a V. tahu:

$$\begin{aligned} Q_{OV-B}^{skut} &= \frac{S_{OV-B} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{178,9451 \cdot 21,8135 \cdot 173,6941}{1000} = \\ &= 678,0002 \text{ kW} \end{aligned} \quad (417)$$

10.1.3. Přepočet teploty spalín na výstupu z 1. části IV. a V. tahu**Teplo odebrané spalínám v 1. části IV. a V. tahu:**

$$Q_{1.č.IV.tah} = Q_{OV-B}^{skut} = 678,0002 \text{ kW} \quad (418)$$

Teplo spalín na vstupu do 1. části IV. a V. tahu:

$$Q_{sp}^{in} = I_{sp}^{in} \cdot M_{pv} = 2268,468 \cdot 1,2837 = 2913,2124 \text{ kW} \quad (419)$$

Kde:

I_{sp} – entalpie spalín na vstupu do 1. části IV. tahu [kJ/kg]

Teplo spalín na výstupu z 1. části IV. a V. tahu:

$$Q_{sp}^{out} = Q_{sp}^{in} - Q_{1.č.IV.tah} = 2913,2124 - 678,0002 = 2235,2122 \text{ kW} \quad (420)$$

$$I_{sp}^{out} = \frac{Q_{sp}^{out}}{M_{pv}} = \frac{2235,2122}{1,2837} = 1741,2133 \text{ kJ/kg} \quad (421)$$

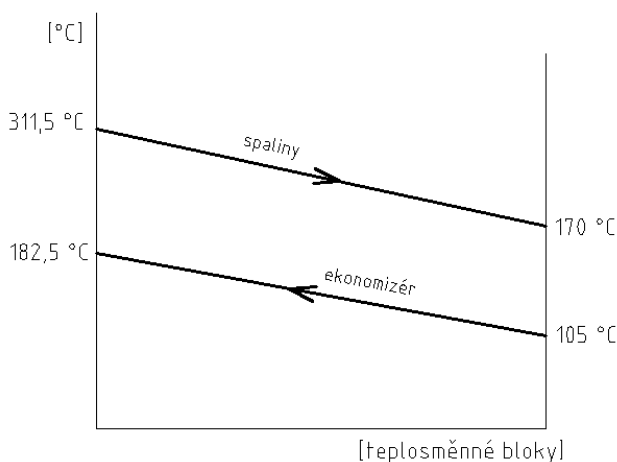
Skutečnou teplotu na výstupu z 1. části IV. tahu zjistím lineární interpolací z tabulky 5 pro I_{sp}^{out} .

$$t_{k1.č.IV.tah}^{skut} = 311,5137 \text{ °C}$$

Liší se o 0,5137 °C, což je dostačující odchylka.

10.2. Výpočet II. části IV. a IV. tahu

Tato část zahrnuje svazky ekonomizéru. Rychlost proudění vody v ekonomizéru by se měla pohybovat v rozmezí 0,4 až 1,2 m/s. Zvýšení rychlosti vody řeším dvojitým vyhnutím trubek. Z důvodu rizika podkročení rosného bodu spalín v posledních tazích kotle je ekonomizér opatřen bypassem, který slouží k regulaci teploty spalín na výstupu z kotle.



Obr. 21: tepelné schéma

Zvolená výstupní teplota: $t_{k2.č.IV.tahu} = 170 \text{ °C}$

Střední teplota spalin v 2. části IV. a V. tahu:

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{k1.č.IV.tah}^{skut} + t_{k2.č.IV.tahu}}{2} = \frac{311,513 + 170}{2} = 240,7568 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (422)$$

$$T_{stř}^{sp} = t_{stř}^{sp} + 273,15 = 240,7568 + 273,15 = 513,9068 \text{ K} \quad (423)$$

Plošný průřez spalin v 2. části IV. a V. tahu:

$$F_{sp} = a \cdot b_{IV-V} - 2 \cdot n_{tr} \cdot D \cdot l_e = 1,8 \cdot 2 - 2 \cdot 11 \cdot 0,0318 \cdot 1,9 = 2,2707 \text{ m}^2 \quad (424)$$

Kde:

n_{tr} – počet trubek ekonomizéru v jedné řadě
 D – vnější průměr trubek ekonomizéru [m]

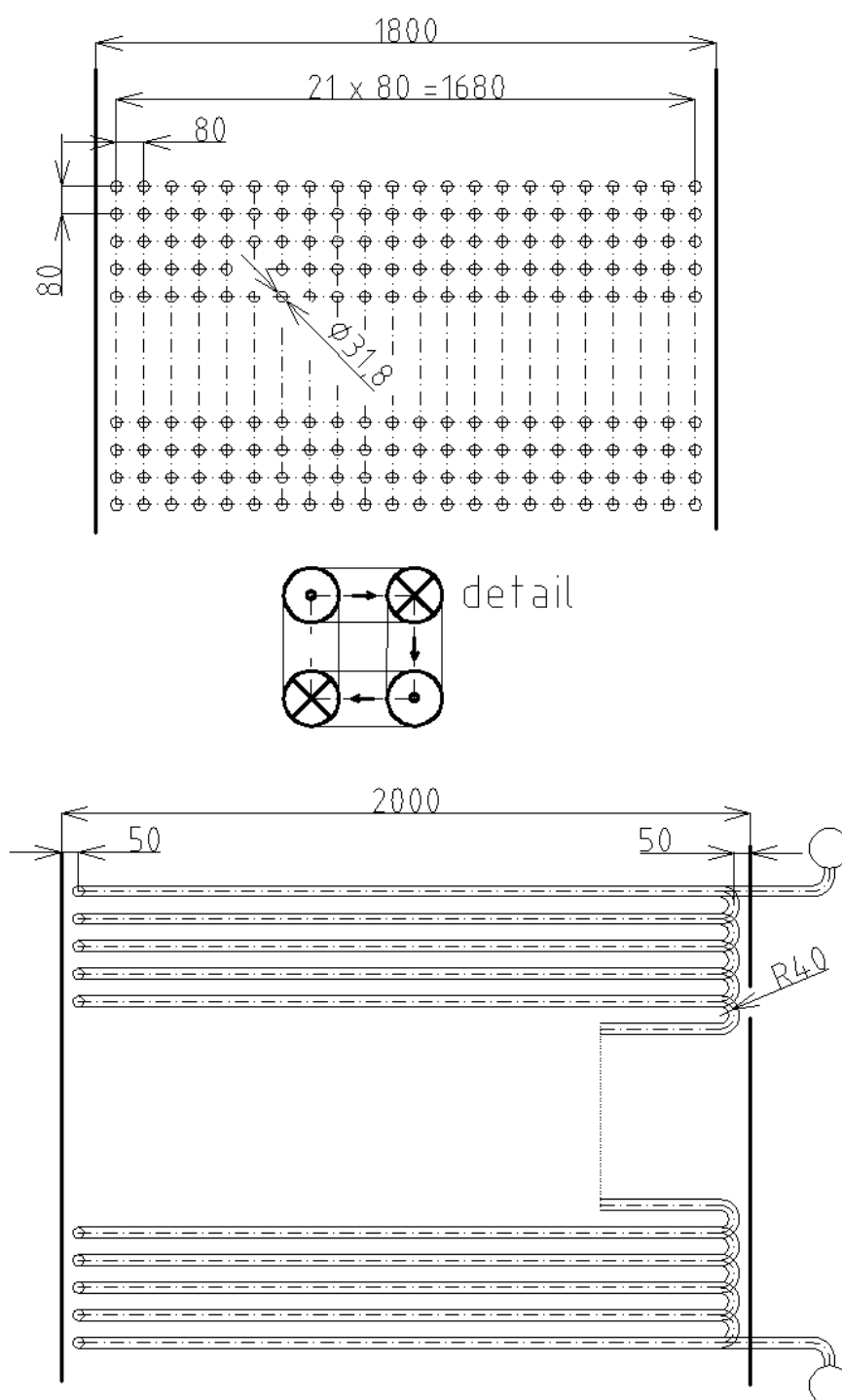
Skutečná rychlost spalin:

$$w_{sp}^{skut} = \frac{O_{sp}^{skut} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{stř}^{sp})}{273} = \frac{3,8912 \cdot 1,2873}{2,2707} \cdot \frac{(273 + 240,7568)}{273} = 4,1397 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (425)$$

10.2.1. Výpočet ekonomizéru

EKO	rozměr	jednotka
D	0,0318	m
d	0,0246	m
t	0,0036	m
l_e	1,9	m
s_1	0,08	m
s_2	0,08	m
$n_{tr_v \text{ řadě}}$	11	-
$n_{řad}$	83	-
$n_{hadů}$	1	-

Tab. 18: Geometrické parametry ekonomizéru



Obr. 22: Ekonomizér

Průtočný průřez pro vodu:

$$F_v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,0245^2}{4} \cdot 11 = 0,0052 \text{ m}^2$$

(426)

rychlost proudění vody v ekonomizéru

$$w_v = \frac{0,95 \cdot M_{pp} \cdot v_{stř}}{F_v} = \frac{0,95 \cdot 3,3333 \cdot 0,00107}{0,0052} = 0,6553 \text{ m/s} \quad (427)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin:

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{v_{sp}} \right)^{0,65} \cdot Pr_{sp}^{0,33} = \\ &= 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0447}{0,0318} \cdot \left(\frac{4,1397 \cdot 0,0318}{0,0000384} \right)^{0,65} \cdot 0,659^{0,33} = \\ &= 48,6133 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (428)$$

Kde:

c_z – opravný součinitel na počet řad

c_s – opravný součinitel na uspořádání svazku v závislosti na podélné a příčné rozteči

λ_{sp} – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalin [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

v_{sp} – kinematická viskozita pro střední teplotu spalin [m^2/s]

Pr_{sp} – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalin [1]

Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,08}{0,0318} = 2,5157 \quad (429)$$

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,08}{0,0318} = 2,5157 \quad (430)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\check{c}} \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2254 \cdot 513,9068^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{430,5885}{513,9068} \right)^4}{1 - \left(\frac{430,5885}{513,9068} \right)} = \\ &= 4,9404 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (431)$$



Kde:

a_{st} – stupeň černosti povrchu stěn, $a_{st} = 0,8$ [1]

a_{ζ} – stupeň černosti proudu spalín

T_z – teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]

$T_{stř}^{sp}$ – střední teplota spalín [K]

$$a_{\zeta} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2554} = 0,2254$$

(432)

Kde:

$k \cdot p \cdot s$ – optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (12,5186 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,202 = 0,2554$$

(433)

Kde:

k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [$m^{-1} \cdot MPa^{-1}$]

r_{sp} – objemový podíl tříatomových plynů ve spalínách

$k_p \cdot \mu$ – součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi, na optickou hustotu má minimální vliv, a proto jej dle [2] zanedbávám

p – tlak, $p = 0,101$ [MPa]

s – efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

$$\begin{aligned} k_{sp} \cdot r_{sp} &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} = \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2554}{3,16 \cdot \sqrt{0,0369 \cdot 0,202}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{240,7568 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3662 = \\ &= 12,5186 \end{aligned}$$

(434)

Kde:

r_{H_2O} , r_{sp} – objemové části tříatomových plynů;

p_{sp} – celkový parciální tlak [MPa]

$$s = 0,09 \cdot D \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,09 \cdot 0,0318 \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,08 \cdot 0,08}{0,0318^2} - 1 \right) = 0,202 \text{ m}$$

(435)

$$\begin{aligned} t_z &= t_{eko}^{stř} + \left(\varepsilon_{eko} + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{Q_{eko}}{S_{eko}} \cdot 1000 = \\ &= 143,7681 + (0,004 + 0) \cdot \frac{1052,9252}{346,6022} \cdot 1000 \\ &= 157,4385 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

(436)

$$T_z = t_z + 273,15 = 157,4385 + 273,15 = 430,5885 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (437)$$

Kde:

ε_{eko} – součinitel zanesení ekonomizéru, volím $\varepsilon_{eko} = 0,004$

$t_{eko}^{stř}$ – teplota média v ekonomizéru [$^\circ\text{C}$]

S_{eko} – plocha trubek ekonomizéru [m^2]

$$S_{eko} = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot 2 \cdot n_{řad} = \pi \cdot 0,0318 \cdot 1,9 \cdot 11 \cdot 2 \cdot 83 = 346,6022 \text{ m}^2 \quad (438)$$

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \psi_e \cdot \alpha_{sp} = 0,6 \cdot 53,5537 = 32,1322 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (439)$$

Kde:

ψ_e – součinitel tepelné efektivity, pro dřevní štěpku volím 0,6 [1]

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (48,6133 + 4,9404) = 53,5537 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (440)$$

Kde:

ω – součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{128,9774 - 65}{\ln \frac{128,9774}{65}} = 93,3636 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (441)$$

$$\Delta t_1 = t_{k1.č.IV.tah}^{skut} - t_{eko}^{out} = 311,05 - 182,536 = 128,9774 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (442)$$

$$\Delta t_2 = t_{k2.č.IV.tahu} - t_{eko}^{in} = 170 - 105 = 65 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (443)$$

Ideální plocha ekonomizéru:

$$S_{eko}^{id} = \frac{Q_{eko} \cdot 1000}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{1052,9252 \cdot 1000}{32,1322 \cdot 93,3636} = 350,977 \text{ m}^2 \quad (444)$$

Počet řad:

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{\text{eko}}^{\text{id}}}{s_{1-\text{řada}}} = \frac{S_{\text{eko}}^{\text{id}}}{\pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{\text{tr}} \cdot 2} = \frac{350,977}{\pi \cdot 0,0318 \cdot 2 \cdot 11} = 84,047 \rightarrow \text{volím } 83 \text{ řad}$$

(445)

Teplo odebrané spalínám ekonomizérem v 2. části IV. a V. tahu:

$$Q_{\text{eko}}^{\text{skut}} = \frac{S_{\text{eko}} \cdot k \cdot \Delta t_{\text{ln}}}{1000} = \frac{346,6022 \cdot 32,1322 \cdot 93,3636}{1000} = 1039,8 \text{ kW}$$

(446)

10.2.2. Přepočet teploty spalín na výstupu z 2. části IV. a V. tahu

Teplo odebrané spalínám v 2. části IV. a V. tahu:

$$Q_{2.\text{č.IV.tah}} = Q_{\text{eko}}^{\text{skut}} = 1039,8 \text{ kW}$$

(447)

Teplo spalín na vstupu do 2. části IV. a V. tahu:

$$Q_{\text{sp}}^{\text{in}} = I_{\text{sp}}^{\text{in}} \cdot M_{\text{pv}} = 1741,2133 \cdot 1,2837 = 2235,2122 \text{ kW}$$

(448)

Kde: I_{sp} – entalpie spalín na vstupu do 2. části IV. tahu [kJ/kg]

Teplo spalín na výstupu z 2. části IV. a V. tahu:

$$Q_{\text{sp}}^{\text{out}} = Q_{\text{sp}}^{\text{in}} - Q_{2.\text{č.IV.tah}} = 2235,2122 - 1039,8 = 1195,4112 \text{ kW}$$

(449)

$$I_{\text{sp}}^{\text{out}} = \frac{Q_{\text{sp}}^{\text{out}}}{M_{\text{pv}}} = \frac{1195,4112}{1,2837} = 931,2163 \text{ kJ/kg}$$

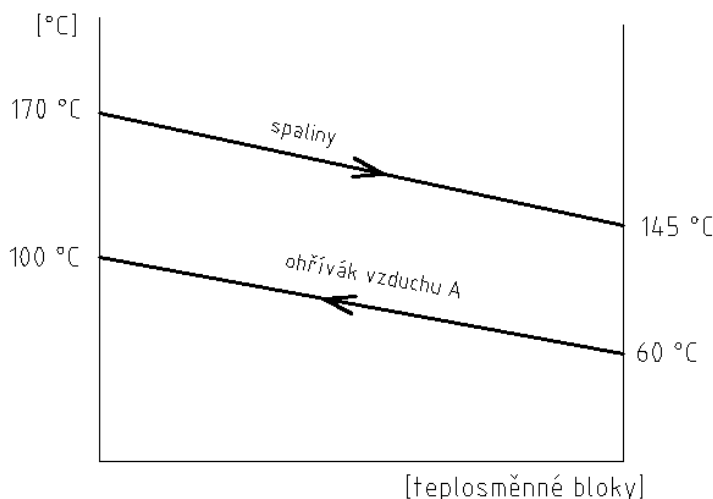
(450)

Skutečnou teplotu na výstupu z 2. části IV. tahu zjistím lineární interpolací z tabulky 5 pro $I_{\text{sp}}^{\text{out}}$.

$$t_{k1.\text{č.IV.tah}}^{\text{skut}} = 169,5333 \text{ °C}$$

Liší se o 0,5333 °C, což je dostačující odchylka.

10.3. Výpočet III. části IV. a V. tahu



Obr. 23: Tepelné schéma

Zvolená výstupní teplota: $t_{k3.č.IV.tahu} = 145 \text{ °C}$

Střední teplota spalin v 3. části IV. a V. tahu:

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{k2.č.IV.tahu}^{skut} + t_{k3.č.IV.tahu}}{2} = \frac{170 + 145}{2} = 157,5 \text{ °C} \quad (451)$$

$$T_{stř}^{sp} = t_{stř}^{sp} + 273,15 = 157,5 + 273,15 = 430,65 \text{ K} \quad (452)$$

Plošný průřez spalin v 3. části IV. a V. tahu:

$$F_{sp} = a \cdot b_{IV-V} - n_{tr} \cdot D \cdot l_e = 1,8 \cdot 2 - 20 \cdot 0,0445 \cdot 2 = 1,82 \text{ m}^2 \quad (453)$$

Kde:

n_{tr} – počet trubek OV – A v jedné řadě
 D – vnější průměr trubek OV – A [m]

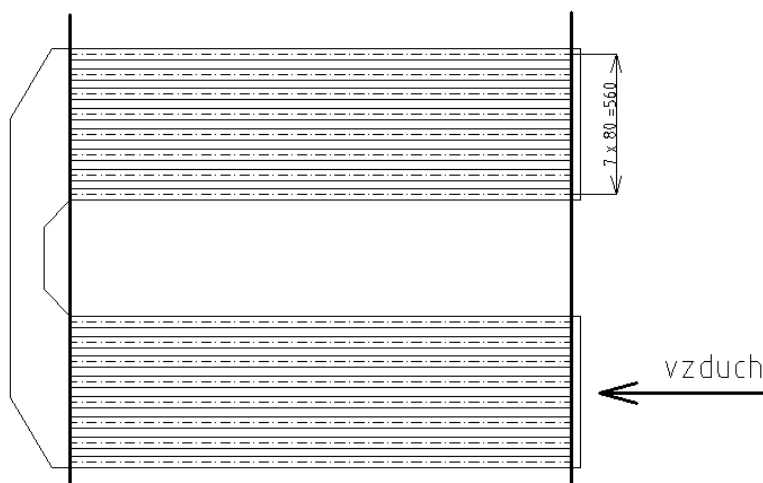
Skutečná rychlost spalin:

$$w_{sp}^{skut} = \frac{O_{sp}^{skut} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{(273 + t_{stř}^{sp})}{273} = \frac{3,8912 \cdot 1,2873}{1,82} \cdot \frac{(273 + 157,5)}{273} = 4,3279 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (454)$$

10.3.1. Výpočet ohříváku vzduchu A

OV-A	rozměr	jednotka
D	0,0445	m
d	0,0395	m
t	0,0025	m
l_e	2	m
s_1	0,09	m
s_2	0,08	m
$n_{tr_v\ řad\ ě}$	20	-
$n_{řad}$	8	-
$n_{blok\ ů}$	2	-

Tab. 19: Parametry ohříváku vzduchu A



Obr. 24: Ohřívák vzduchu A

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín:

$$\begin{aligned}
 \alpha_k &= 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,65} \cdot Pr_{sp}^{0,33} = \\
 &= 0,2 \cdot 1 \cdot 0,9978 \cdot \frac{0,0378}{0,0445} \cdot \left(\frac{4,3279 \cdot 0,0445}{0,0000286} \right)^{0,65} \cdot 0,6781^{0,33} = \\
 &= 45,9295 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{455}$$

Kde:

c_z – opravný součinitel na počet řad

c_s – opravný součinitel na uspořádání svazku v závislosti na podélné a příčné rozteči

λ_{sp} – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu spalín [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$]

ν_{sp} – kinematická viskozita pro střední teplotu spalín [m^2/s]

Pr_{sp} – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu spalín [1]

Opravný součinitel na uspořádání svazku:

$$c_s = \left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} = \left[1 + (2 \cdot 2,0225 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,7977}{2} \right)^3 \right]^{-2} =$$

$$= 0,9978 \quad (456)$$

Poměrná příčná rozteč:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,09}{0,0445} = 2,0225 \quad (457)$$

Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,08}{0,0445} = 1,7977 \quad (458)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{\check{c}} \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)} =$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2021 \cdot 430,65^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{391,9}{430,65} \right)^4}{1 - \left(\frac{391,9}{430,65} \right)} =$$

$$= 2,9093 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1} \quad (459)$$

Kde:

a_{st} – stupeň černosti povrchu stěn, $a_{st} = 0,8$ [1]
 $a_{\check{c}}$ – stupeň černosti proudu spalín
 T_z – teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách [K]
 $T_{stř}^{sp}$ – střední teplota spalín [K]

$$a_{\check{c}} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,2257} = 0,2021 \quad (460)$$

Kde:

$k \cdot p \cdot s$ – optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (15,3763 + 0) \cdot 0,101 \cdot 0,1453 = 0,2257 \quad (461)$$

Kde:

k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [$m^{-1} \cdot MPa^{-1}$]

r_{sp} – objemový podíl tříatomových plynů ve spalínách

$k_p \cdot \mu$ – součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi, na optickou hustotu má minimální vliv, a proto jej dle [2] zanedbávám

p – tlak, $p = 0,101$ [MPa]

s – efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

$$\begin{aligned} k_{sp} \cdot r_{sp} &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_{sp} = \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2554}{3,16 \cdot \sqrt{0,0369 \cdot 0,1453}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{157,5 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,3662 = \\ &= 15,3763 \end{aligned} \quad (462)$$

Kde:

r_{H_2O} , r_{sp} – objemové části tříatomových plynů;

p_{sp} – celkový parciální tlak [MPa]

$$s = 0,09 \cdot D \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,09 \cdot 0,0445 \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,08 \cdot 0,09}{0,0445^2} - 1 \right) = 0,1453 \text{ m} \quad (463)$$

$$t_z = \frac{t_{sp}^{stř} + t_{vz}^{stř}}{2} = \frac{157,5 + 80}{2} = 118,75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (464)$$

$$T_z = t_z + 273,15 = 126,75 + 273,15 = 391,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (465)$$

Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín:

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 1 \cdot (45,9295 + 2,9093) = 48,8387 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (466)$$

Kde:

ω – součinitel využití, charakterizující neúplnost proudění [1]

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění na straně vzduchu:

$$\begin{aligned}\alpha_{vz} &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_{vz}}{d} \cdot \left(\frac{w_{vz} \cdot d}{\nu_{vz}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{vz}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m = \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,0303}{0,0395} \cdot \left(\frac{22,949 \cdot 0,0395}{0,0000212} \right)^{0,8} \cdot 0,692^{0,4} \cdot 0,9397 \cdot 1 \cdot 1 = \\ &= 73,4469 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}\end{aligned}\tag{467}$$

Kde:

c_t, c_l, c_m – opravné koeficienty [1]

λ_{vz} – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu vzduchu [$\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$]

ν_{vz} – kinematická viskozita pro střední teplotu vzduchu [m^2/s]

Pr_{vz} – prandtlovo číslo, voleno pro střední teplotu vzduchu [1]

d – vnitřní průměr [m]

w_{vz} – rychlost proudění vzduchu [m/s]

$$c_t = \left(\frac{t_{vz}^{stř} + 273,15}{T_z} \right)^{0,5} = \left(\frac{80 + 273,15}{391,9} \right)^{0,5} = 0,9397\tag{468}$$

Průtočný průřez pro vzduch:

$$F_{vz} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{rad} = \frac{\pi \cdot 0,0395^2}{4} \cdot 20 \cdot 8 = 0,196 \text{ m}^2\tag{469}$$

Rychlost proudění vzduchu:

$$w_{vz} = \frac{M_{pv} \cdot M_{celk}}{F_{vz}} \cdot \left(1 + \frac{t_{vz}^{stř}}{273} \right) = \frac{1,2837 \cdot 2,7108}{0,1961} \cdot \left(1 + \frac{80}{273} \right) = 22,949 \text{ m/s}\tag{470}$$

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_{vz} \cdot \alpha_{sp}}{\alpha_{vz} + \alpha_{sp}} = \xi \cdot \frac{73,4469 \cdot 48,8387}{73,4469 + 48,8387} = 24,9333 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}\tag{471}$$

Kde:

ξ – součinitel využití plochy, volím $\xi = 0,85$ [1]

Teplotní logaritmický spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{70 - 85}{\ln \frac{70}{85}} = 77,2574 \text{ } ^\circ\text{C}\tag{472}$$



$$\Delta t_1 = t_{k2\check{c}.IV.tahu} - t_{OV-A}^{out} = 170 - 100 = 70\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (473)$$

$$\Delta t_2 = t_{k3\check{c}.IV.tah} - t_{OV-A}^{out} = 145 - 60 = 85\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (474)$$

Výkon ohříváku vzduchu A

$$\begin{aligned} Q_{OV-A} &= M_{pv} \cdot \alpha \cdot \left(0,9 - \frac{M_{dochl}}{M_{vzskut}^v} + \frac{M_{rec}}{M_{vzskut}^v} \right) \cdot (I_{out} - I_{in}) = \\ &= 1,2837 \cdot 1,35 \cdot \left(0,9 - \frac{0,4672}{2,966} + \frac{0,5084}{2,966} \right) \cdot (291,305 - 174,7831) = \\ &= 163,3499\text{ kW} \end{aligned} \quad (475)$$

Plocha ohříváku vzduchu A:

$$S_{OV-A} = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{rad} \cdot n_{bloků} = \pi \cdot 0,0445 \cdot 2 \cdot 20 \cdot 8 \cdot 2 = 89,4726\text{ m}^2 \quad (476)$$

Ideální plocha ohříváku vzduchu A:

$$S_{OV-A}^{id} = \frac{Q_{OV-A} \cdot 1000}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{163,3499 \cdot 1000}{24,9333 \cdot 77,2574} = 84,8003\text{ m}^2 \quad (477)$$

Počet řad:

$$\begin{aligned} n_{rad} &= \frac{S_{OV-A}^{id}}{S_{1-řada}} = \frac{S_{OV-A}^{id}}{\pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{bloků}} = \frac{84,8003}{\pi \cdot 0,0445 \cdot 2 \cdot 20 \cdot 2} = 7,58 \\ &\rightarrow \text{volím 8 řad} \end{aligned} \quad (478)$$

Teplo odebrané spalinám ohřívákem vzduchu v 3. části IV. a V. tahu:

$$\begin{aligned} Q_{OV-A}^{skut} &= \frac{S_{OV-A} \cdot k \cdot \Delta t_{ln}}{1000} = \frac{89,4726 \cdot 24,9333 \cdot 77,2574}{1000} = \\ &= 172,35\text{ kW} \end{aligned} \quad (479)$$

10.3.2. Přepočet teploty spalin na výstupu z 3. části IV. a V. tahu

Teplo odebrané spalinám v 3. části IV. a V. tahu:

$$Q_{3.č.IV.tah} = Q_{OV-A}^{skut} = 172,35 \text{ kW} \quad (480)$$

Teplo spalin na vstupu do 3. části IV. a V. tahu:

$$Q_{sp}^{in} = I_{sp}^{in} \cdot M_{pv} = 931,216 \cdot 1,2837 = 1195,4112 \text{ kW} \quad (481)$$

Kde:

I_{sp} – entalpie spalin na vstupu do 3. části IV. tahu [kJ/kg]

Teplo spalin na výstupu z 3. části IV. a V. tahu:

$$Q_{sp}^{out} = Q_{sp}^{in} - Q_{3.č.IV.tah} = 1195,4112 - 172,35 = 1023,0612 \text{ kW} \quad (482)$$

$$I_{sp}^{out} = \frac{Q_{sp}^{out}}{M_{pv}} = \frac{1019,9054}{1,2837} = 796,9628 \text{ kJ/kg} \quad (483)$$

Skutečnou teplotu na výstupu z 3. části IV. tahu zjistím lineární interpolací z tabulky 5 pro I_{sp}^{out} .

$$t_{k3.č.IV.tah}^{skut} = 145,442 \text{ °C}$$

Liší se o 0,442 °C, což je dostačující odchylka.

11. Kontrola tepelné bilance

$$\begin{aligned}\Delta Q &= Q_p^p \cdot \eta_k - \frac{\sum Q_i}{M_{pv}} \cdot \frac{100 - z_c}{100} = \\ &= 8053,4 \cdot 0,8676 - \frac{9228,7969}{1,2837} \cdot \frac{100 - 3,3245}{100} = \\ &= 36,6503 \text{ kJ/kg}\end{aligned}\tag{484}$$

Kde:

η_k – účinnost kotle [%]
 Q_p^p – celkové teplo přivedené do kotle [kJ/kg]
 $\sum Q_i$ – teplo odebrané výhřevnými plochami [kW]
 z_c – ztráta mechanickým nedopalem [%]

$$\begin{aligned}\sum Q_i &= Q_{st} + Q_{mříž} + Q_{II} + Q_{1čIII}^{ms} + Q_{1čIII}^{zt} + Q_{2čIII}^{ms} + Q_{přII} + Q_{2čIII}^{zt} + Q_{3čIII}^{ms} + \\ &+ Q_{přIB} + Q_{3čIII}^{zt} + Q_{4čIII}^{ms} + Q_{přIA} + Q_{4čIII}^{zt} + Q_{eko} = \\ &= 4792,7692 + 204,196 + 935,1599 + 151,2516 + 45,1056 + 155,3874 + 717,2138 + \\ &+ 40,1197 + 87,725 + 530,39 + 23,4082 + 66,6778 + 422,3009 + 18,4481 + 1039,8 + \\ &= 9228,7969 \text{ kW}\end{aligned}\tag{485}$$

Odchylka tepelné bilance:

$$\Delta = \frac{\Delta Q}{Q_p^p} \cdot 100 = \frac{36,6503}{8053,4} \cdot 100 = 0,455 \%\tag{486}$$

Odchylka by neměla přesáhnout 0,5 %, v mém případě tedy splňuje žádanou toleranci.

12. Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout parní kotel s přirozenou cirkulací na spalování dřevní štěpky o výkonu 12 t/hod s výstupními parametry přehřáté páry 3,3 MPa a teplotě 400 °C. Palivem, na které je kotel konstruován je jedna z forem biomasy a to dřevní štěpka, dále je ale možné použít některou z dalších forem biomasy splňující hodnoty výhřevnosti 8 MJ/kg a vlhkost 50 %. Výsledný návrh kotle sestává ze tří vertikálních chlazených tahů a dvou vertikálních nechlazených plechových tahů.

Nejdříve byly provedeny stechiometrické výpočty a na základě stanovení součinitele přebytku vzduchu poté vypočteny entalpie vzduchu a produktů spalování. Následně výpočet tepelné bilance kotle, ztrát kotle, výrobní množství páry, množství paliva a s tím spojená účinnost kotle. Dalším krokem bylo navržení teplosměnných ploch.

Prvním tahem kotle je spalovací komora tvořená membránovou stěnou, která je navržena tak, aby se výstupní teplota pohybovala kolem 800 °C z důvodu zanášení výhřevných ploch. Do spalovací komory je vháněn primární a sekundární spalovací vzduch v poměru jedna ku jedné, primární o teplotě 190 °C a sekundární o teplotě 260 °C. Deset procent z celkového množství vzduchu o teplotě 20 °C pak slouží k pohazování paliva na rošt.

Předěl mezi spalovací komorou a druhým tahem tvoří mříž, tedy rozvolnění trubek membránové stěny, které je realizováno vyhnutím trubek, a to tak, že jsou ve směru toku spalín navzájem přesazené, takže vždy tvoří svazek tří trubek uspořádaných za sebou.

Druhý tah je koncipován jako prázdný (pouze membránová stěna) se záměrem docílit snížení koncentrace popílku, což povede k menšímu zalepování výhřevných ploch popílkovými částicemi v dalších tazích kotle.

Ve třetím tahu jsou umístěny svazky přehříváků, zavěšeny na závěsných trubkách, chlazenými sytou párou z bubnu. Zanášení teplosměnných ploch je řešeno ofukovači, umístěnými před i za konvekčními plochami.

Čtvrtý a pátý tah spalínového kanálu již není chlazen membránovou stěnou, tvoří jej plechová šachta, ve které jsou teplosměnné plochy zavěšeny na nechlazených závěsech. V tahu se nachází dva ohříváky vzduchu (OV-B a OV-A) a svazky ekonomizéru.

Mezi jednotlivými konvekčními plochami jsou řazeny průlezové otvory, sloužící ke kontrole a případným opravám. Regulace teploty páry je provedena vstřikem napájecí vody mezi druhým a prvním přehřívákem. Problémem, který může vést až k podkročení rosného bodu spalín a následně k nízkoteplotní korozi je nestálá vlhkost paliva, řešením je opatření ekonomizéru bypassem, sloužícím k regulaci výstupní teploty spalín.

13. Seznam použitých zdrojů

- [1] BUDAJ, Florian. *Parní kotle: Podklady pro tepelný výpočet*. Brno: Nakladatelství VUT, 1986. 200 s. ISBN 80-21404-26-4.
- [2] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. 212 s. ISBN 978-80-01-03757-7.
- [3] Etext: Formy využití biomasy k energetickým účelům. [online]. [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: http://etext.czu.cz/php/skripta/kapitola.php?titul_key=85&idkapitola=5.
- [4] Ipofe: Výhody využití biomasy. *IPOFE* [online]. 2007 [cit. 2014-01-08]. Dostupné z: http://www.ipofe.sk/index.php?cmd=clanky&lang=svk&kateg=47-&k_id=107&id=4
- [5] Ipofe: Nevýhody využití biomasy. *IPOFE* [online]. 2007 [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: http://www.ipofe.sk/index.php?cmd=clanky&lang=svk&kateg=47&k_id=107&id=4
- [6] Biom: Dřevní štěpka. STUPAVSKÝ, Vladimír. [online]. 1.1 2010 [cit. 2014-03-07]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/drevni-stepka-zelena-hneda-bila>
- [7] VACULÍK, Jaroslav. *Vytápění rodinného domu biomasou* [online]. Brno, 2012 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52506. Bakalářská práce. VUT Brno.
- [8] X Steam version 2. 6. Excel Steam Tables

14. Seznam použitých zkratk

Značka	Jednotka	Popis
a	[m]	Šířka tahu
A_c	[-]	Stupeň černosti proudu spalin
A_o	[-]	Stupeň černosti ohniště
A_{pl}	[-]	Efektivní stupeň černosti ohniště
A_{st}	[-]	Stupeň černosti povrchu stěn
A'	[%]	Obsah popeloviny
b	[m]	Délka ohniště
b_{II}	[m]	Délka 2. tahu
b_{III}	[m]	Délka 3. tahu
b_{IV-V}	[m]	Délka 4. a 5. tahu
c	[m]	Výška mříže
c_i	[kJ/KgK]	Měrné teplo popílku
c_p	[kJ/KgK]	Měrné teplo paliva
c_s	[-]	Opravný součinitel na uspořádání svazku
c_t, c_l, c_m	[-]	Opravné koeficienty pro podélnou konvekci
$c_{suš}$	[kJ/KgK]	Měrné teplo sušiny
c_z	[-]	Opravný součinitel na počet řad
C_i	[%]	Obsah spalitelných látek v pevných zbytcích
d	[m]	Vnitřní průměr trubek
d_{zt}	[m]	Vnitřní průměr závěsných trubek
D	[m]	Průměr trubek
D_{zt}	[m]	Průměr závěsných trubek
f	[-]	Součinitel respektující podíl vodní páry na 1 Nm ³
F_p	[m ²]	Průtočný průřez pro páru
F_{sp}	[m ²]	Průřez spalin
F_{st}	[m ²]	Povrch stěn
F_v	[m ²]	Průtočný průřez pro vodu
F_{vz}	[m ²]	Průtočný průřez pro vzduch
H	[m]	Výška tahu
h	[m]	Výška spalovací komory
i_{in}	[kJ/Kg]	Entalpie média na vstupu
i_p	[kJ/Kg]	Fyzické teplo paliva
i_{inv}	[kJ/Kg]	Entalpie napájecí vody
i_{out}	[kJ/Kg]	Entalpie média na výstupu
i_{pp}	[kJ/Kg]	Entalpie přehřáté páry



I_o	[kJ/Kg]	Entalpie spalin na výstupu z ohniště
I_u	[kJ/Kg]	Užitečné teplo uvolněné ve spalovací komoře
I_{SP}^α	[kJ/Kg]	Entalpie spalin s přebytkem α
$I_{SP_min}^S$	[kJ/Kg]	Entalpie minimálního objemu suchých spalin
$I_{VZ_min}^V$	[kJ/Kg]	Entalpie minimálního množství vlhkého vzduchu
I_{vz}	[kJ/Kg]	Entalpie vzduchu
k	[m ⁻¹ MPa ⁻¹]	Součinitel zeslabení sálání
k	[W.m ⁻² K ⁻¹]	Součinitel prostupu tepla
$k.p.s$	[-]	Optická hustota spalin
$k_p.\mu$	[m ⁻¹ MPa ⁻¹]	Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi
$k_p.r_{sp}$	[m ⁻¹ MPa ⁻¹]	Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny
l_e	[m]	Efektivní délka trubek
M	[-]	Součinitel M
M_p	[kg/s]	Množství paliva přivedeného do kotle
M_{pp}	[kg/s]	Parní výkon kotle
M_{pv}	[kg/s]	Skutečně spálené množství paliva
M_{rec}	[Nm ³ /kg]	Množství recirkulovaného vzduchu
M_1	[Nm ³ /kg]	Množství primárního vzduchu
$n_{bloků}$	[-]	Počet bloků
$n_{hadů}$	[-]	Počet hadů
n_{tr}	[-]	Počet trubek
$n_{řad}$	[-]	Počet řad
O	[m]	Obvod
O_{Ar}	[Nm ³ /kg]	Množství argonu ve spalinách
O_{CO2}	[Nm ³ /kg]	Množství oxidu uhličitého ve spalinách
O_{N2}	[Nm ³ /kg]	Množství dusíku ve spalinách
O_{SO2}	[Nm ³ /kg]	Množství oxidu siřičitého ve spalinách
$O_{SP_min}^S$	[Nm ³ /kg]	Minimální množství suchých spalin
$O_{SP}^{H_2O_min}$	[Nm ³ /kg]	Minimální množství vodní páry ve spalinách
$O_{SP_min}^V$	[Nm ³ /kg]	Minimální množství vlhkých spalin
$O_{VZ_skut}^S$	[Nm ³ /kg]	Skutečné množství suchého vzduchu pro spálení 1 kg paliva
$O_{VZ_skut}^V$	[Nm ³ /kg]	Skutečné množství vlhkého vzduchu pro spálení 1 kg paliva
$O_{SP_skut}^S$	[Nm ³ /kg]	Skutečné množství suchých spalin
$O_{SP_skut}^V$	[Nm ³ /kg]	Skutečné množství vlhkých spalin
p	[MPa]	Tlak

p_{in}	[MPa]	Tlak na vstupu
p_{out}	[MPa]	Tlak na výstupu
p_{sp}	[MPa]	Parciální tlak tříatomových plynů
pr_{sp}	[-]	Prandtlovo číslo spalin
pr_{vz}	[-]	Prandtlovo číslo vzduchu
q_s	[MW/m ²]	Tepelné zatížení roštu
q_v	[kW/m ³]	Objemové zatížení
Q_{eko}	[kW]	Tepelný výkon ekonomizéru
Q_i^r	[kJ/kg]	Výhřevnost paliva
Q_{ms}	[kW]	Teplo odebrané membránovou stěnou
$Q_{mříž}$	[kW]	Teplo odebrané mříží
$Q_{II.tah}$	[kW]	Teplo odebrané 2. tahem
Q_{sp}^{in}	[kW]	Teplo spalin na vstupu
Q_{sp}^{out}	[kW]	Teplo spalin na výstupu
$Q_{př}$	[kW]	Teplo odebrané přehřívákem
Q_{st}	[kW]	Teplo odevzdané do stěn ohniště
Q_p^p	[kJ/kg]	Teplo přivedené do kotle
$Q_{výp}$	[kW]	Teplo odebrané výparníkem
Q_v	[kJ/s]	Výrobní teplo páry
Q_{vz}	[kJ/kg]	Teplo přivedené do kotle se vzduchem
Q_{zt}	[kW]	Teplo odebrané závěsnými trubkami
Γ_{H_2O}	[-]	Objemový podíl H ₂ O ve spalinách
Γ_{RO_2}	[-]	Objemový podíl SO ₂ a CO ₂ ve spalinách
Γ_{sp}	[-]	Objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách
s	[m]	Efektivní tloušťka sálové vrstvy
s_1	[m]	Příčná rozteč
s_2	[m]	Podélná rozteč
S_a	[m ²]	Plocha přední stěny
S_b	[m ²]	Plocha boční stěny
S_c	[m ²]	Plocha zadní stěny
S_{eko}	[m ²]	Plocha trubek ekonomizéru
S_{eko}^{id}	[m ²]	Plocha trubek ekonomizéru ideální
$S_{mříž}$	[m ²]	Plocha mříže
S_o	[m ²]	Plocha roštu
S_{o-v}	[m ²]	Plocha ohříváku vzduchu
S_{celk}	[m ²]	Celková plocha výhřevných ploch v dané části
$S_{př}$	[m ²]	Plocha přehříváku



$S_{\text{řada}}$	[m ²]	Plocha jedné řady
S_{zt}	[m ²]	Plocha závěsných trubek
t	[m]	Tloušťka stěny trubky
t_{kx}	[°C]	Teplota na výstupu z dané části
t_{ad}	[°C]	Adiabatická teplota
t_{in}	[°C]	Teplota média na vstupu
t_{ko}	[°C]	Teplota na konci ohniště
t_{km}	[°C]	Teplota na konci mříže
t_{out}	[°C]	Teplota na výstupu
t_{p}	[°C]	Teplota paliva
t_{i}	[°C]	Teplota popílku
$t_{\text{stř}}^{\text{sp}}$	[°C]	Střední teplota spalín
t_{z}	[°C]	Teplota vnějšího povrchu nánosů na stěnách
$T_{\text{stř}}^{\text{sp}}$	[K]	Střední teplota spalín
T_{z}	[K]	Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách
$v_{\text{stř}}$	[m ³ /kg]	Střední měrný objem
V	[m ³]	Objem sálající vrstvy
V_{o}	[m ³]	Objem spalovací komory
w_{p}	[m/s]	Rychlost páry
w_{sp}	[m/s]	Rychlost spalín
w_{v}	[m/s]	Rychlost proudění vody
w_{vz}	[m/s]	Rychlost vzduchu
W^{r}	[%]	Vlhkost paliva
X_{i}	[%]	Bilance popele
X_{p}	[%]	Procento popílku v úletu
z_{c}	[%]	Ztráta mechanickým nedopalem
z_{f}	[%]	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
z_{cn}	[%]	Ztráta chemickým nedopalem
z_{k}	[%]	Komínová ztráta
z_{sv}	[%]	Ztráta sdílením tepla do okolí
α	[-]	Součinitel přebytku vzduchu
α_{k}	[Wm ⁻² K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla konvekcí
α_{p}	[Wm ⁻² K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla ze strany páry
α_{s}	[Wm ⁻² K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla sáláním
α_{sp}	[Wm ⁻² K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla ze strany spalín
α_{vz}	[Wm ⁻² K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla ze strany vzduchu
Δ_{i}	[kJ/kg]	Entalpický spád



Δt_{ln}	[°C]	Teplotní logaritmický spád
Δt_1	[°C]	Teplotní spád
Δt_2	[°C]	Teplotní spád
Δp	[MPa]	Tlaková ztráta
ΔQ	[kJ/kg]	Tepelná bilance
ε	[-]	Součinitel zanesení
λ	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Součinitel tepelné vodivosti
φ	[-]	Součinitel uchování tepla
η_k	[%]	Účinnost kotle
μ	[g/m ³]	Koncentrace popílku ve spalínách
ν	[m ² /s]	Součinitel kinematické viskozity
ξ	[-]	Součinitel využití plochy
σ_1	[-]	Poměrná příčná rozteč
σ_2	[-]	Poměrná podélná rozteč
ψ	[-]	Součinitel tepelné efektivnosti stěn
σ_1	[-]	Poměrná příčná rozteč
σ_2	[-]	Poměrná podélná rozteč



15. Seznam Tabulek

Tab. 1: Technické parametry kotle.....	13
Tab. 2: složení paliva – hrubý vzorek.....	14
Tab. 3: Vypočtené objemy vzduchu a spalin.....	16
Tab. 4: Měrné entalpie vybraných složek spalin.....	17
Tab. 5: Vypočtené hodnoty entalpie	18
Tab. 6: Bilance popele v kotli.....	21
Tab. 7: Tlakové ztráty.....	24
Tab. 8: Přehled výhřevných ploch ze strany pracovního média.....	29
Tab. 9: Konstrukční parametry mříže.....	36
Tab. 10: Obratová komora.....	47
Tab. 11: Parametry páry.....	61
Tab. 12: geometrické parametry přehříváku II.....	62
Tab. 13: Parametry přehříváku I-B.....	75
Tab. 14: Parametry páry.....	75
Tab. 15: Parametry přehříváku I-A.....	89
Tab. 16: Parametry páry.....	89
Tab. 17: parametry ohříváku vzduchu B.....	103
Tab. 18: Geometrické parametry ekonomizéru.....	110
Tab. 19: Parametry ohříváku vzduchu A.....	117

16. Seznam obrázků

Obr. 1 Dřevní štěrka.....	12
Obr. 2: I-t diagram vzduchu a spalin.....	19
Obr. 3: Bilanční schéma.....	25
Obr. 4: Pilový diagram.....	29
Obr. 5: Spalovací komora.....	30
Obr. 6: Princip rozvolnění membránové stěny.....	36
Obr. 7: Tepelné schéma mříže.....	40
Obr. 8: Nákres 2. tahu.....	41
Obr. 9: Tepelné schéma II. Tahu.....	46
Obr. 10: Obratová komora.....	48
Obr. 11: Tepelné schéma 1. části III. Tahu.....	56
Obr. 12: Schéma přehříváku II.....	61
Obr. 13: Tepelné schéma 2. části III. Tahu.....	69
Obr. 14: Tepelné schéma.....	71
Obr. 15: Návrh Přehříváku I-B.....	76
Obr. 16: Tepelné schéma.....	85
Obr. 17: Přehřívák I-A.....	90
Obr. 18: Tepelné schéma.....	101
Obr. 19: schéma bilance ohřívání vzduchu.....	102
Obr. 20: ohřívák vzduchu B.....	104
Obr. 21: tepelné schéma.....	109
Obr. 22: Ekonomizér.....	111
Obr. 23: Tepelné schéma.....	116
Obr. 24: Ohřívák vzduchu A.....	117



17. Seznam Příloh

1. Výkresová dokumentace kotle