



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

DVOU TLAKÝ HORIZONTÁLNÍ KOTEL NA
ODPADNÍ TEPLA ZA SPALOVACÍ TURBÍNOU;
131KG/S SPALIN, 558°C

HRSR TWO PRESSURE LEVELS; 131KG/S, 558°C

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VOJTĚCH KOLARČÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK SKÁLA, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Vojtěch Kolarčík

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:

Dvoutlaký horizontální kotel na odpadní teplo za spalovací turbinu; 131kg/s spalin, 558° C

v anglickém jazyce:

Heat recovery Steam generator-HRSG two presurre levels, 131kg/s flue gas ,558°C

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte dvoutlaký horizontální parní kotel:

vysokotlaký okruh: 9,1 MPa, 520°C,

nízkotlaký okruh: 0,32 MPa, 210°C,

teplota napájecí vody: 62°C

Složení spalin: O₂=13,05%, Ar=0,89%, N₂=74,62%, CO₂=3,54%, H₂O=7,9%

Cíle diplomové práce:

Návrh velikosti a uspořádání teplosměnných ploch kotle,

tepelný výpočet kotle,

výkres kotle-výpočtový projekt

Seznam odborné literatury:

Budaj F.,Parní kotle,podklady pro tepelný výpočet,skriptum VUT v Brně,
Černý, Janeba,Teysler: Rarní kotle,technický průvodce ,SNTL Praha

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

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

V Brně, dne 15.11.2012

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

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

Abstrakt

Tato diplomová práce popisuje tepelný výpočet a návrh rozměrů výhřevných ploch kotle na odpadní teplo za spalovací turbínou při zadaných vstupních parametrech spalin a výstupních parametrech páry. Součástí práce je návrh rozměrů bubnů, zavodňovacích a převáděcích potrubí. Na závěr práce je vypočtena ztráta v tahu a nakreslen výkres kotle.

Abstract

This master's thesis describes thermal calculation and design of proportions of calorific components of a heat recovery steam generator (HRSG) for given input parameters of flue gas and output parameters of steam. Part of the thesis is design proportions of boiler drums, irrigation and transfer pipes. On the end of the thesis is counting draught losses and design drawing of steam generator.

Klíčová slova

Dvoutlaký, horizontální, kotel, odpadní teplo, spaliny, pára

Keywords

two pressure levels, horizontal, steam generator, heat recovery, flue gases, steam

Bibliografická citace

KOLARČÍK, V. *Dvoutlaký horizontální kotel na odpadní teplo za spalovací turbínou, 131kg/s spalin, 558°C*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 115 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma:

Dvoutlaký horizontální kotel na odpadní teplo za spalovací turbínou, 131kg/s spalin, 558°C.

vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce doc. Ing. Zdeňka Skály, CSc. a konzultanta Ing. Pavla Křemínského a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 27.5.2014

Bc. Vojtěch Kolarčík

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu své diplomové práce doc. Ing. Zdeňku Skálovi, CSc a panu Ing. Pavlu Křemínskému za cenné rady a připomínky k tvorbě této diplomové práce.

Obsah

Úvod.....	21
1. Popis kotle.....	22
1.1. Zadané parametry	23
2. Tepelný výpočet.....	24
2.1. Návrh pilového diagramu	24
2.1.1. Parametry páry a vody ve vysokotlakém okruhu.....	25
2.1.2. Parametry páry a vody v nízkotlakém okruhu	26
2.2. Předaná tepla jednotlivých částí vysokotlakého okruhu	27
2.2.1. Entalpie spalin bodu A.....	27
2.2.2. Tepelné ztráty sáláním	27
2.2.3. Teplota a entalpie spalin bodu D	28
2.2.4. Předané teplo bodů 1VO a 6VO	28
2.2.5. Hmotnostní průtok páry vysokotlakým okruhem	28
2.2.6. Tepla předaná v jednotlivých plochách vysokotlakého okruhu.....	28
2.3. Předaná tepla jednotlivých částí nízkotlakého okruhu	29
2.3.1. Teplota a entalpie spalin bodu G	29
2.3.2. Teplota a entalpie spalin bodu E.....	29
2.3.3. Předané teplo bodů 1No a 4NO	30
2.3.4. Hmotnostní průtok páry nízkotlakým okruhem	30
2.3.5. Tepla předaná v jednotlivých plochách nízkotlakého okruhu	30
2.4. Pilový diagram vypočtených hodnot	30
3. Návrh spalinového kanálu	31
3.1. Návrh rozměrů trubek VPII	31
3.2. Počet trubek v jedné podélné řadě	32
3.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalin pro VOpII	33
3.4. Návrh rozměrů spalinového kanálu	33
3.5. Vypočtené hodnoty pro VOpII	34
4. Návrh výhřevných ploch.....	35
4.1. Návrh druhého stupně vysokotlakého přehříváku (VOpII)	36
4.1.1. Vstupní parametry VOpII	36
4.1.2. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalin VOpII.....	36
4.1.2.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí VOpII.....	36
4.1.2.2. Návrh součinitele efektivnosti žebor VOpII	37
4.1.2.3. Podíly teplosměnných ploch žebor a celkové plochy ze strany spalin VOpII	37

4.1.2.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalín VOpII.....	38
4.1.3. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany páry VOpII.....	38
4.1.4. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VOpII	38
4.1.5. Návrh počtu podélných řad VOpII.....	39
4.1.6. Výpočet skutečného předaného tepla VOpII	39
4.1.7. Výpočet skutečné teploty spalín bodu B	40
4.1.8. Přehled navržených hodnot VOpII.....	40
4.2. Návrh prvního stupně vysokotlakého přehříváku (VOpI).....	41
4.2.1. Vstupní parametry VOpI.....	41
4.2.2. Počet trubek v jedné podélné řadě VOpI	41
4.2.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalín pro VOpI	42
4.2.4. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín VOpI	42
4.2.4.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí VOpI.....	42
4.2.4.2. Návrh součinitele efektivnosti žebíř VOpI.....	43
4.2.4.3. Podíly teplosměnných ploch žebíř a celkové plochy ze strany spalín VOpI.....	44
4.2.4.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalín VOpI	44
4.2.5. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany páry VOpI.....	44
4.2.6. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VOpI	45
4.2.7. Návrh počtu podélných řad VOpI	45
4.2.8. Výpočet skutečného předaného tepla VOpI.....	46
4.2.9. Výpočet skutečné teploty spalín bodu C	46
4.2.10. Přehled navržených hodnot VOpI.....	46
4.3. Návrh vysokotlakého výparníku (VOv).....	47
4.3.1. Vstupní parametry VOv	47
4.3.2. Počet trubek v jedné podélné řadě VOv.....	47
4.3.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalín pro VOv.....	47
4.3.4. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín VOv	48
4.3.4.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí VOv	48
4.3.4.2. Návrh součinitele efektivnosti žebíř VOv	49
4.3.4.3. Podíly teplosměnných ploch žebíř a celkové plochy ze strany spalín VOv	49
4.3.5. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VOv	50
4.3.6. Návrh počtu podélných řad VOv	50
4.3.7. Výpočet skutečného předaného tepla VOv	51

4.3.8. Výpočet skutečné teploty spalin bodu D	51
4.3.9. Přehled navržených hodnot VOv	51
4.4. Návrh třetího stupně vysokotlakého ekonomizéru (VOe3)	52
4.4.1. Vstupní parametry VOe3	52
4.4.2. Počet trubek v jedné podélné řadě VOe3	52
4.4.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalin pro VOe3	53
4.4.4. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalin VOe3	53
4.4.4.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí VOe3	53
4.4.4.2. Návrh součinitele efektivnosti žebor VOe3	54
4.4.4.3. Podíly teplosměnných ploch žebor a celkové plochy ze strany spalin VOe3	55
4.4.4.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalin VOe3	55
4.4.5. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VOe3	55
4.4.6. Návrh počtu podélných řad VOe3	55
4.4.7. Výpočet skutečného předaného tepla VOe3	56
4.4.8. Výpočet skutečné teploty spalin bodu E	56
4.4.9. Přehled navržených hodnot VOe3	57
4.5. Návrh nízkotlakého přehříváku (NOp)	57
4.5.1. Vstupní parametry NOp	57
4.5.2. Počet trubek v jedné podélné řadě NOp	57
4.5.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalin pro NOp	58
4.5.4. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalin NOp	59
4.5.4.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí NOp	59
4.5.4.2. Návrh součinitele efektivnosti žebor NOp	60
4.5.4.3. Podíly teplosměnných ploch žebor a celkové plochy ze strany spalin NOp	60
4.5.4.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalin NOp	60
4.5.5. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany páry NOp	60
4.5.6. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu NOp	61
4.5.7. Návrh počtu podélných řad NOp	62
4.5.8. Výpočet skutečného předaného tepla NOp	62
4.5.9. Výpočet skutečné teploty spalin bodu F	62
4.5.10. Přehled navržených hodnot NOp	63
4.6. Návrh nízkotlakého výparníku (NOv)	63
4.6.1. Vstupní parametry NOv	63
4.6.2. Počet trubek v jedné podélné řadě NOv	63

4.6.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalin pro NOv.....	64
4.6.4. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalin NOv	64
4.6.4.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekci NOv	64
4.6.4.2. Návrh součinitele efektivnosti žebor NOv	65
4.6.4.3. Podíly teplosměnných ploch žebor a celkové plochy ze strany spalin NOv	66
4.6.4.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalin NOv	66
4.6.5. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu NOv	66
4.6.6. Návrh počtu podélných řad NOv	66
4.6.7. Výpočet skutečného předaného tepla NOv	67
4.6.8. Výpočet skutečné teploty spalin bodu G.....	67
4.6.9. Přehled navržených hodnot NOv	68
4.7. Návrh druhého stupně vysokotlakého ekonomizéru (VOe2).....	68
4.7.1. Vstupní parametry VOe2	68
4.7.2. Počet trubek v jedné podélné řadě VOe2	68
4.7.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalin pro VOe2.....	69
4.7.4.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekci VOe2	70
4.7.4.2. Návrh součinitele efektivnosti žebor VOe2	71
4.7.4.3. Podíly teplosměnných ploch žebor a celkové plochy ze strany spalin VOe2	71
4.7.4.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalin VOe2.....	71
4.7.5. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VOe2	71
4.7.6. Návrh počtu podélných řad VOe2.....	72
4.7.7. Výpočet skutečného předaného tepla VOe2	72
4.7.8. Výpočet skutečné teploty spalin bodu H.....	73
4.7.9. Přehled navržených hodnot VOe2.....	73
4.8. Návrh druhého stupně nízkotlakého ekonomizéru (NOe2).....	73
4.8.1. Vstupní parametry NOe2	73
4.8.2. Počet trubek v jedné podélné řadě NOe2	74
4.8.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalin pro NOe2.....	74
4.8.4. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalin NOe2	75
4.8.4.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekci NOe2	75
4.8.4.2. Návrh součinitele efektivnosti žebor NOe2	76
4.8.4.3. Podíly teplosměnných ploch žebor a celkové plochy ze strany spalin NOe2	76
4.8.4.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalin NOe2.....	76

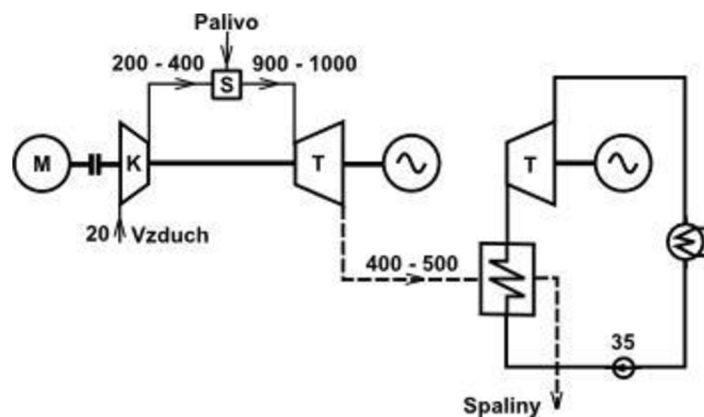
4.8.5. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu NOe3	77
4.8.6. Návrh počtu podélných řad NOe2	77
4.8.7. Výpočet skutečného předaného tepla NOe2	77
4.8.8. Výpočet skutečné teploty spalín bodu I	78
4.8.9. Přehled navržených hodnot NOe2	78
4.9. Návrh prvního stupně vysokotlakého ekonomizéru (VOe1)	78
4.9.1. Vstupní parametry VOe1	78
4.9.2. Počet trubek v jedné podélné řadě VOe1	79
4.9.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalín pro VOe1	79
4.9.4. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín VOe1	80
4.9.4.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí VOe1	80
4.9.4.2. Návrh součinitele efektivnosti žebíř VOe1	81
4.9.4.3. Podíly teplosměnných ploch žebíř a celkové plochy ze strany spalín VOe1	81
4.9.4.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalín VOe1	82
4.9.5. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VOe1	82
4.9.6. Návrh počtu podélných řad VOe1	82
4.9.7. Výpočet skutečného předaného tepla VOe1	83
4.9.8. Výpočet skutečné teploty spalín bodu J	83
4.9.9. Přehled navržených hodnot VOe1	83
4.10. Návrh prvního stupně nízkotlakého ekonomizéru (NOe1)	84
4.10.1. Vstupní parametry NOe1	84
4.10.2. Počet trubek v jedné podélné řadě NOe1	84
4.10.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalín pro NOe1	85
4.10.4. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín NOe1	85
4.10.4.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí NOe1	85
4.10.4.2. Návrh součinitele efektivnosti žebíř NOe1	86
4.10.4.3. Podíly teplosměnných ploch žebíř a celkové plochy ze strany spalín NOe1	87
4.10.4.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalín NOe1	87
4.10.5. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního	87
4.10.6. Návrh počtu podélných řad NOe1	87
4.10.7. Výpočet skutečného předaného tepla NOe1	88
4.10.8. Výpočet skutečné teploty spalín bodu K	88
4.10.9. Přehled navržených hodnot NOe1	89
4.11. Návrh materiálů trubek	89

4.11.1. Volba materiálů pro jednotlivé výhřevné plochy	89
4.12. Návrh rozměrů vstupních a výstupních potrubí	90
4.12.1. Výstupní potrubí VOpII	90
4.12.2. Výstupní potrubí VOpI a vstupní potrubí VOpII	91
4.12.3. Vstupní potrubí VOpI.....	91
4.12.4. Výstupní potrubí VOe3	92
4.12.5. Výstupní potrubí VOe2 a vstupní VOe3	92
4.12.6. Výstupní potrubí VOe1 a vstupní VOe2	92
4.12.7. Vstupní potrubí VOe1	93
4.12.8. Výstupní potrubí NOp	93
4.12.9. Vstupní potrubí NOp	94
4.12.10. Výstupní potrubí NOe2	94
4.12.11. Výstupní potrubí NOe1 a vstupní NOe2	94
4.12.12. Vstupní potrubí NOe1	95
4.12.13. Vypočtené rozměry potrubí	95
5. Návrh bubnů	96
5.1. Návrh rozměrů a kontrola zatížení vysokotlakého bubnu	96
5.2. Návrh rozměrů a kontrola zatížení nízkotlakého bubnu	96
6. Návrh rozměrů zavodňovacích potrubí	98
6.1. Návrh rozměrů zavodňovacích potrubí vysokotlakého okruhu	98
6.2. Návrh rozměrů zavodňovacích potrubí nízkotlakého okruhu	99
7. Návrh rozměrů převáděcích potrubí	100
7.1. Návrh rozměrů převáděcího potrubí vysokotlakého okruhu	100
7.2. Návrh rozměrů převáděcího potrubí nízkotlakého okruhu	101
8. Výpočet tahové ztráty kotle.....	102
8.1. Výpočet tlakových ztrát výhřevných ploch.....	102
8.1.1. Tlaková ztráta VOpII	103
8.1.2. Tlaková ztráta VOpI.....	103
8.1.3. Tlaková ztráta VOv	103
8.1.4. Tlaková ztráta VOe3	104
8.1.5. Tlaková ztráta NOp	104
8.1.6. Tlaková ztráta NOv	104
8.1.7. Tlaková ztráta VOe2	105
8.1.8. Tlaková ztráta NOe2	105
8.1.9. Tlaková ztráta VOe1	105
8.1.10. Tlaková ztráta NOe1	105
8.2. Tlaková ztráta v komíně.....	106

8.2.1 Tlaková ztráta v komíně třením	106
8.2.2. Tlaková ztráta na vstupu a výstupu z komína.....	106
8.3. Celková tahová ztráta.....	107
Závěr	108
Seznam použitých zdrojů.....	109
Seznam obrázků a tabulek	110
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	111
Seznam příloh	115

Úvod

Kotel je zařízení, které vyrábí tlakovou páru pro různé účely. Především pro energetický sektor, pro topné účely, případně různé průmyslové technologie. Kotel na odpadní teplo nalézá využití v mnoha průmyslových odvětvích, to je zapříčiněno kvalitním využitím spalín. Pomocí vysoké teploty spalín dochází k tvorbě páry nebo horké vody, což vede ke zvýšení účinnosti výroby. Velmi vhodné se jeví využití kotle na odpadní teplo v paroplynovém oběhu, kde je vyráběna pára za pomoci zbytkového tepla vzniklého spalováním zemního plynu. Proces výroby páry probíhá následovně. Spaliny proudí skrze spalínový kanál kotle, zde jsou za sebou řazeny přehříváky, výparníky a ekonomizéry. Po průchodu spalínovým kanálem směřují spaliny do komína, který je konstruován s tlumičem hluku vzhledem k využití v městských oblastech.



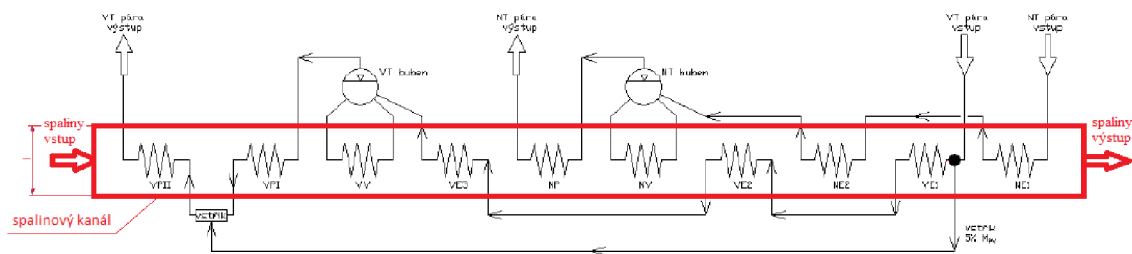
Obr. 1.1. Schéma paroplynového oběhu [4]

1. Popis kotle

Tato diplomová práce se zabývá kotlem, který je určen na odpadní teplo. Umístěn je za spalovací turbínou, jeho provedení je horizontální. Kotel je dvoutlaký bubnový s přirozenou cirkulací. Z důvodu transportu je podélně rozdělen na několik částí s průřezovými otvory.

Skládá se z 10 částí, které jsou schematicky znázorněny na obr. 1.2. Je tvořen dvěma okruhy a to nízkotlakým a vysokotlakým. Nízkotlaký okruh se skládá z přehříváku, výparníku a ekonomizéru, který je rozdělen do dvou stupňů. Vysokotlaký okruh je složen podobně, pouze přehřívák je zde rozdělen na dva stupně a ekonomizér do tří stupňů. Napájecí voda na počátku procesu vstupuje do ekonomizéru, následně zavodňovacím potrubím putuje do výparníku a dále převáděcím potrubím do bubnu, kde dochází k oddělení syté páry od syté kapaliny. Z bubnu je dále vedena sytá pára do přehříváku. V přehříváku je vyrobena výstupní přehřátá pára. K regulaci výstupní teploty z vysokotlakého okruhu slouží vstřík napájecí vody před druhý stupeň vysokotlakého přehříváku.

V počáteční fázi diplomové práce je za pomoci pilového diagramu proveden tepelný výpočet jednotlivých bodů diagramu a celkového tepla předaného v kotli. Později dochází k návrhu rozměrů spalinového kanálu a jednotlivých výhřevných ploch tvořených kompletně žebrovanými trubkami. V poslední části jsou vypočteny rozměry bubnu, zavodňovacích a převáděcích potrubí. Na konci je proveden výpočet ztráty v tahu a vykreslen výpočtový projekt.



Obr. 1.2. Schéma výhřevných ploch kotle

1.1. Zadané parametry

Zadané hodnoty pro vysokotlaký okruh:

$$\text{výstupní teplota: } t_{IVO} = 520^{\circ}\text{C},$$

$$\text{výstupní tlak: } p_{IVO} = 9,1\text{MPa}.$$

Zadané hodnoty pro nízkotlaký okruh:

$$\text{výstupní teplota: } t_{INO} = 210^{\circ}\text{C},$$

$$\text{výstupní tlak: } p_{INO} = 0,52\text{MPa}.$$

Teplota napájecí vody: $t_{nv} = 62^{\circ}\text{C}$,

hmotnostní průtok spalín pro výrobu páry: $M_{SP} = 131\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$,

vstupní teplota spalín: $t_A = 558^{\circ}\text{C}$

objemové složení spalín:

$$\text{O}_2: x_{O_2} = 0,1305,$$

$$\text{CO}_2: x_{CO_2} = 0,0089,$$

$$\text{N}_2: x_{N_2} = 0,7462,$$

$$\text{H}_2\text{O}: x_{H_2O} = 0,0354,$$

$$\text{Ar}: x_{Ar} = 0,079,$$

hustota složek spalín:

$$\text{O}_2: \rho_{O_2} = 1,4289\text{kg}\cdot\text{m}^{-3},$$

$$\text{CO}_2: \rho_{CO_2} = 1,7839\text{kg}\cdot\text{m}^{-3},$$

$$\text{N}_2: \rho_{N_2} = 1,2505\text{kg}\cdot\text{m}^{-3},$$

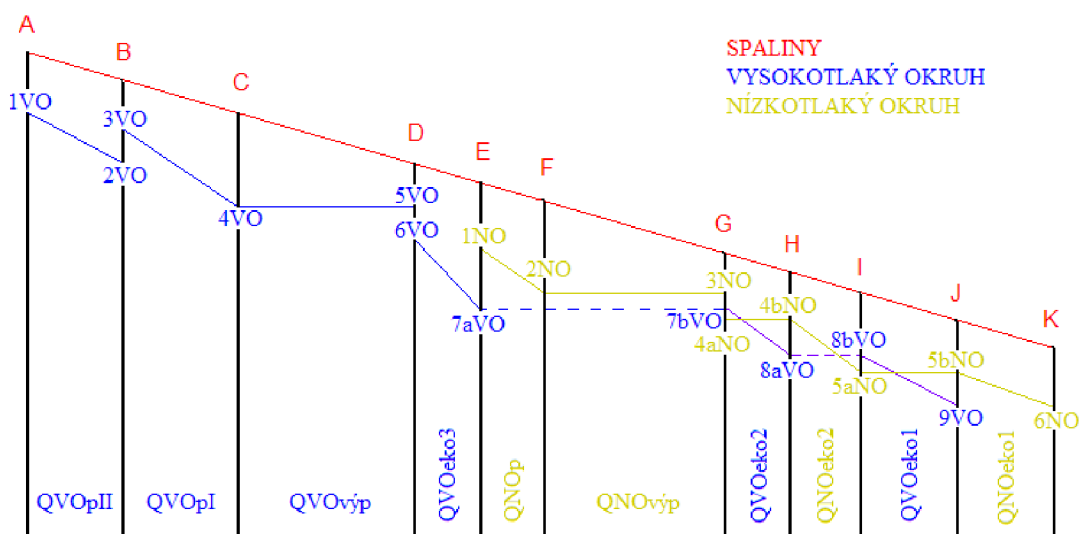
$$\text{H}_2\text{O}: \rho_{H_2O} = 1,9768\text{kg}\cdot\text{m}^{-3},$$

$$\text{Ar}: \rho_{Ar} = 0,804\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}.$$

2. Tepelný výpočet

2.1. Návrh pilového diagramu

Prvním krokem tvorby této práce bylo sestavení pilového diagramu. Z důvodu co nejlepšího využití tepelné energie spalin a co největšího vychlazení spalin před odchodem z komína byl ekonomizér rozdělen na tři části u vysokotlakého okruhu a na dvě u nízkotlakého okruhu. K tomu byl u vysokotlakého okruhu také rozdělen přehřívač na dvě části. Nákres předběžného pilového diagramu je na obr. 2.1.



Obr. 2.1. Obecný nákres pilového diagramu

Parametry v bodech jednotlivých výhřevných ploch jsou zjištěny za pomoci programu X-Steam [3], případně jsou zvoleny na základě konzultací. Zvolené hodnoty jsou přehledně seřazeny níže.

Tlaková diference ve vysokotlakých přehřívácích	: $\Delta p_{VOP} = 0,15 \text{ MPa}$
Tlaková diference v nízkotlakém přehříváku	: $\Delta p_{NOP} = 0,15 \text{ MPa}$
Tlaková diference ve vysokotlakém ekonomizéru	: $\Delta p_{VOE} = 0,1 \text{ MPa}$
Tlaková diference v nízkotlakém ekonomizéru	: $\Delta p_{NOE} = 0,15 \text{ MPa}$
Entalpický spád 2. stupně vysokotl. přehříváku	: $\Delta i_{VOPII} = 250 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Teplota nedohřevu u vysokotl. a nízkotl. okruhu	: $\Delta t_{ned} = 8^\circ \text{C}$
Pinchpoint u nízkotlakého a vysokotl. okruhu	: $\Delta t_{pp} = 10^\circ \text{C}$

2.1.1. Parametry páry a vody ve vysokotlakém okruhu

Parametry páry v bodě 1VO:

$$\begin{aligned}p_{1VO} &= 9,1\text{MPa} && \text{(zadáno)} \\t_{1VO} &= 520^\circ\text{C} && \text{(zadáno)} \\i_{1VO} &= 3436,43\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1} && \text{(určeno z X-Steamu)} \\v_{1VO} &= 0,0376\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1} && \text{(určeno z X-Steamu)}\end{aligned}$$

Parametry páry v bodě 2VO:

$$\begin{aligned}p_{2VO} &= p_{1VO} + \Delta p_{VOP} = 9,1 + 0,15 = 9,25\text{MPa} \\i_{2VO} &= i_{1VO} + i_{2VO} = 3436,43 - 250 = 3186,43\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \\t_{2VO} &= 425,15^\circ\text{C} && \text{(určeno z X-Steamu)} \\v_{2VO} &= 0,0308247\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1} && \text{(určeno z X-Steamu)}\end{aligned}$$

Parametry páry v bodě 3VO:

Teplota páry je regulována vstříkem napájecí vody s teplotou $t_{9VO} = t_{nv}$. Vstřík je volen 5% z celkového průtoku vysokotlakým okruhem. Parametry bodu 9VO jsou vypočteny dále. Pro výpočet entalpie i_{3VO} využijeme bilanci vstříku.

$$\begin{aligned}p_{3VO} &= p_{2VO} = 9,25\text{MPa} \\i_{3VO} &= \frac{i_{2VO} - 0,05 \cdot i_{9VO}}{0,95} = \frac{3186,43 - 0,05 \cdot 276,6}{0,95} = 3318\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \\t_{3VO} &= 474,22^\circ\text{C} && \text{(určeno z X-Steamu)} \\v_{3VO} &= 0,0340964\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1} && \text{(určeno z X-Steamu)}\end{aligned}$$

Parametry páry v bodě 4VO:

$$\begin{aligned}p_{4VO} &= p_{2VO} + \Delta p_{VOP} = 9,25 + 0,15 = 9,4\text{MPa} \\t_{4VO} &= 306,48^\circ\text{C} && \text{(určeno z X-Steamu, teplota saturace)} \\i_{4VO} &= 2736,1\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1} && \text{(určeno z X-Steamu, entalpie syté páry)} \\v_{4VO} &= 0,0194471\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1} && \text{(určeno z X-Steamu, měrný objem syté páry)}\end{aligned}$$

Parametry páry v bodě 5VO:

$$\begin{aligned}p_{5VO} &= p_{4VO} = 9,4\text{MPa} \\t_{5VO} &= t_{4VO} = 306,48^\circ\text{C} \\i_{5VO} &= 1202,4\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1} && \text{(určeno z X-Steamu, entalpie syté kapaliny)} \\v_{5VO} &= 0,0014318\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1} && \text{(určeno z X-Steamu, měrný objem syté kapaliny)}\end{aligned}$$

Parametry páry v bodě 6VO:

$$\begin{aligned}p_{6VO} &= p_{5VO} = 9,4\text{MPa} \\t_{6VO} &= t_{5VO} - \Delta t_{ned} = 306,48 - 8 = 298,48^\circ\text{C} \\i_{6VO} &= 1335,15\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1} && \text{(určeno z X-Steamu)} \\v_{6VO} &= 0,0013939\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1} && \text{(určeno z X-Steamu)}\end{aligned}$$

Parametry páry v bodě 7VO = 7aVO = 7bVO:

$$\begin{aligned}p_{7VO} &= p_{6VO} + \Delta p_{VOE} = 9,4 + 0,1 = 9,5\text{MPa} \\t_{7VO} &= 160^\circ\text{C} && \text{(navrženo)} \\i_{7VO} &= 680,81\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1} && \text{(určeno z X-Steamu)} \\v_{7VO} &= 0,0010957\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1} && \text{(určeno z X-Steamu)}\end{aligned}$$

Parametry páry v bodě 8VO = 8aVO = 8bVO:

$$\begin{aligned}p_{8VO} &= p_{7VO} + \Delta p_{VOE} = 9,5 + 0,1 = 9,6 \text{MPa} \\t_{8VO} &= 135^\circ\text{C} \quad (\text{navrženo}) \\i_{8VO} &= 573,96 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (\text{určeno z X-Steamu}) \\v_{8VO} &= 0,0010691 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (\text{určeno z X-Steamu})\end{aligned}$$

Parametry páry v bodě 9VO:

$$\begin{aligned}p_{9VO} &= p_{8VO} + \Delta p_{VOE} = 9,5 + 0,1 = 9,6 \text{MPa} \\t_{9VO} &= 62^\circ\text{C} \quad (\text{zadáno}) \\i_{9VO} &= 276,6 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (\text{určeno z X-Steamu}) \\v_{9VO} &= 0,0010139 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (\text{určeno z X-Steamu})\end{aligned}$$

Entalpický spád VOpI:

$$\Delta i_{VOpI} = i_{3VO} - i_{4VO} = 3318 - 2736,1 = 581,9 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

2.1.2. Parametry páry a vody v nízkotlakém okruhu

Parametry páry v bodě 1NO:

$$\begin{aligned}p_{1NO} &= 0,52 \text{MPa} \quad (\text{zadáno}) \\t_{1NO} &= 210^\circ\text{C} \quad (\text{zadáno}) \\i_{1NO} &= 2876,29 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (\text{určeno z X-Steamu}) \\v_{1NO} &= 0,4178869 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (\text{určeno z X-Steamu})\end{aligned}$$

Parametry páry v bodě 2NO:

$$\begin{aligned}p_{2NO} &= p_{1NO} + \Delta p_{NOP} = 0,52 + 0,15 = 0,67 \text{MPa} \\t_{2NO} &= 163,19^\circ\text{C} \quad (\text{určeno z X-Steamu, teplota saturace}) \\i_{2NO} &= 2760,9 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (\text{určeno z X-Steamu, entalpie syté páry}) \\v_{2NO} &= 0,2841086 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (\text{určeno z X-Steamu, měrný objem syté páry})\end{aligned}$$

Parametry páry v bodě 3NO:

$$\begin{aligned}p_{3NO} &= p_{2NO} = 0,67 \text{MPa} \\t_{3NO} &= t_{2NO} = 163,19^\circ\text{C} \\i_{3NO} &= 689,46 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (\text{určeno z X-Steamu, entalpie syté kapaliny}) \\v_{3NO} &= 0,0011058 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (\text{určeno z X-Steamu, měrný objem syté kapaliny})\end{aligned}$$

Parametry páry v bodě 4NO = 4aNO = 4bNO:

$$\begin{aligned}p_{4NO} &= p_{3NO} = 0,67 \text{MPa} \\t_{4NO} &= t_{3NO} - \Delta t_{ned} = 163,19 - 8 = 155,19^\circ\text{C} \\i_{4NO} &= 654,77 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (\text{určeno z X-Steamu}) \\v_{4NO} &= 0,0010963 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (\text{určeno z X-Steamu})\end{aligned}$$

Parametry páry v bodě 5NO = 5aNO = 5bNO:

$$\begin{aligned}p_{5NO} &= p_{4NO} + \Delta p_{NOE} = 0,67 + 0,15 = 0,82 \text{MPa} \\t_{5NO} &= 100^\circ\text{C} \quad (\text{zvoleno}) \\i_{5NO} &= 419,64 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (\text{určeno z X-Steamu}) \\v_{5NO} &= 0,0010431 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (\text{určeno z X-Steamu})\end{aligned}$$

Parametry páry v bodě 6NO:

$$\begin{aligned}p_{6NO} &= p_{5NO} + \Delta p_{NOE} = 0,82 + 0,15 = 0,97 \text{MPa} \\t_{6NO} &= 62^\circ\text{C} \quad (\text{zadáno})\end{aligned}$$

$$i_{6NO} = 260,31 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (\text{určeno z X-Steamu})$$

$$v_{6NO} = 0,0010178 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (\text{určeno z X-Steamu})$$

2.2. Předaná tepla jednotlivých částí vysokotlakého okruhu

2.2.1. Entalpie spalín bodu A

Pro zadané složení spalín je třeba vypočítat entalpie spalín při jednotlivých teplotách. Jako vzor je uveden výpočet pro 100°C.

Tab. 2.1. Entalpie jednotlivých složek spalín při dané teplotě

t °C	O ₂ kJ/m ³	CO ₂ kJ/m ³	N ₂ kJ/m ³	H ₂ O kJ/m ³	Ar kJ/m ³
100	132	170	130	150	93
200	267	357	260	304	186
300	407	559	392	463	278
400	551	772	527	626	372
500	699	994	666	795	465
600	850	1225	804	969	557

$$i_{SP100} = x_{O_2} \cdot 132 + x_{CO_2} \cdot 170 + x_{N_2} \cdot 130 + x_{H_2O} \cdot 150 + x_{Ar} \cdot 93 = 0,1305 \cdot 132 + 0,0354 \cdot 170 + 0,7462 \cdot 130 + 0,079 \cdot 150 + 0,0089 \cdot 93 = 132,928 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$i_{SP200} = 267,928 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$i_{SP300} = 404,464 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$i_{SP400} = 545,246 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$i_{SP500} = 690,32 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$i_{SP600} = 835,743 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Entalpie v bodě A se určuje pro teplotu $t_A = 558^\circ\text{C}$

$$i_{SPA} = i_{SP500} + \frac{(i_{SP600} - i_{SP500}) \cdot 58}{100} = 696 + \frac{(843 - 696) \cdot 58}{100} = 774,665 \text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

2.2.2. Tepelné ztráty sáláním

Pro zadané složení spalín a hustoty složek spalín je vypočtena hustota spalín ρ_{SP}

$$\rho_{SP} = x_{O_2} \cdot \rho_{O_2} + x_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2} + x_{N_2} \cdot \rho_{N_2} + x_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} + x_{Ar} \cdot \rho_{Ar} = 0,1305 \cdot 1,4289 + 0,0354 \cdot 1,9768 + 0,7462 \cdot 1,2505 + 0,079 \cdot 0,804 + 0,0089 \cdot 1,7839 = 1,269 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Převedení hmotnostního toku spalín na tok objemový:

$$M_{SPO} = \frac{M_{SP}}{\rho_{SP}} = \frac{131}{1,269} = 103,234 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Maximální využitelný výkon:

$$Q_A = i_{SPA} \cdot M_{SPO} = 774665 \cdot 103,234 = 79,97 \text{MW}$$

Pro kotle na zemní plyn a kapalná paliva je volena konstanta:

$$C = 0,0113$$

Ztráty sáláním a konvekcí (za Q_A se dosazuje v MW):

$$Q_{RC} = C \cdot Q_A^{0,7} = 0,0113 \cdot 79,97^{0,7} = 0,2427 \text{ MW}$$

Poměrná ztráta sáláním a konvekcí:

$$z_s = \frac{Q_{RC}}{Q_A} = \frac{0,2427}{79,97} = 0,003 = 0,3\%$$

2.2.3. Teplota a entalpie spalin bodu D

Návrh teploty bodu D probíhá za pomoci pinchpointu $\Delta t_{pp} = 10^\circ\text{C}$:

$$t_D = t_{5VO} + \Delta t_{pp} = 306,48 + 10 = 316,48$$

Entalpie bodu D se určuje interpolací pro teplotu t_D :

$$\begin{aligned} i_{SPD} &= i_{sp300} + \frac{(i_{SP400} - i_{SP300}) \cdot 16,48}{100} = 404,464 + \frac{(545,246 - 404,464) \cdot 16,48}{100} \\ &= 427,693 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \end{aligned}$$

2.2.4. Předané teplo bodů 1VO a 6VO

Teplo dodané spalinami mezi body A a D:

$$Q_{SPA-D} = (i_{SPA} - i_{SPD}) \cdot M_{SPO} = (774,665 - 427,693) \cdot 103,234 = 35,82 \text{ MW}$$

Teplo předané páře mezi body 1VO a 6VO:

$$Q_{1VO-6VO} = Q_{SPA-D} \cdot (1 - z_s) = 35,82 \cdot (1 - 0,003) = 35,71 \text{ MW}$$

2.2.5. Hmotnostní průtok páry vysokotlakým okruhem

Hmotnostní průtok z hodnoty předaného tepla (v kW) a vstřík činí 5%:

$$\begin{aligned} M_{PV} &= \frac{Q_{1VO-6VO}}{(i_{1VO} - i_{2VO}) + 0,95 \cdot (i_{2VO} - i_{6VO}) + 0,05 \cdot (i_{2VO} - i_{9VO})} \\ &= \frac{35710}{(3436,43 - 3186,43) + 0,95 \cdot (3186,43 - 1335,15) + 0,05 \cdot (3186,43 - 276,6)} \\ &= 16,779 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

2.2.6. Tepla předaná v jednotlivých plochách vysokotlakého okruhu

Ve vysokotlakém přehříváku VOpII:

$$Q^{VOpII} = M_{PV} \cdot (i_{1VO} - i_{2VO}) = 16,779 \cdot (3436,43 - 3186,43) = 4,195 \text{ MW}$$

Ve vysokotlakém přehříváku VOpI:

$$Q^{VOpI} = 0,95 \cdot M_{PV} \cdot (i_{3VO} - i_{4VO}) = 0,95 \cdot 16,779 \cdot (3318 - 2736,1) = 9,28 \text{ MW}$$

Ve vysokotlakém výparníku VOv:

$$Q^{VOv} = 0,95 \cdot M_{PV} \cdot (i_{4VO} - i_{6VO}) = 0,95 \cdot 16,779 \cdot (2736,1 - 1335,15) = 22,33MW$$

Ve vysokotlakém ekonomizéru VOe3:

$$Q^{VOe3} = 0,95 \cdot M_{PV} \cdot (i_{6VO} - i_{7VO}) = 0,95 \cdot 16,779 \cdot (1335,15 - 680,81) = 10,43MW$$

Ve vysokotlakém ekonomizéru VOe2:

$$Q^{VOe2} = 0,95 \cdot M_{PV} \cdot (i_{7VO} - i_{8VO}) = 0,95 \cdot 16,779 \cdot (680,81 - 573,96) = 1,7MW$$

Ve vysokotlakém ekonomizéru VOe1:

$$Q^{VOe1} = 0,95 \cdot M_{PV} \cdot (i_{8VO} - i_{9VO}) = 0,95 \cdot 16,779 \cdot (573,96 - 276,6) = 10,43MW$$

2.3. Předaná tepla jednotlivých částí nízkotlakého okruhu

2.3.1. Teplota a entalpie spalin bodu G

Návrh teploty bodu g probíhá za pomoci pinchpointu $\Delta t_{pp} = 10^\circ C$:

$$t_G = t_{3NO} + \Delta t_{pp} = 163,19 + 10 = 173,19$$

Entalpie bodu G se určuje interpolací pro teplotu t_G :

$$i_{SPG} = i_{sp100} + \frac{(i_{SP200} - i_{SP100}) \cdot 73,19}{100} = 132,928 + \frac{(267,928 - 132,928) \cdot 73,19}{100} \\ = 231,189 kJ \cdot m^{-3}$$

2.3.2. Teplota a entalpie spalin bodu E

K výpočtu teploty t_E je třeba zjistit teplo dodané mezi body 1VO až 7VO:

$$Q_{1VO-7VO} = Q_{VOpII} + Q_{VOpI} + Q_{VOv} + Q_{VOe3} = 4,195 + 9,28 + 22,33 + 10,43 \\ = 46,24MW$$

Teplo dodané spalinami se zjistí využitím ztrát sáláním a konvekcí:

$$Q_{SPA-E} = \frac{Q_{1VO-7VO}}{(1 - z_s)} = \frac{46,24}{(1 - 0,003)} = 46,38MW$$

Rozdíl entalpií spalin bodů A a E (Q_{SPA-E} v kW):

$$\Delta i_{SPA-E} = \frac{Q_{SPA-E}}{M_{SPO}} = \frac{46380}{103,234} = 448,044 kJ \cdot m^{-3}$$

Entalpie spalin bodu E:

$$i_{SPE} = i_{SPA} - \Delta i_{SPA-E} = 774,665 - 448,044 = 326,621 kJ \cdot m^{-3}$$

Teplotu spalin t_E určíme interpolací za pomoci entalpie i_{SPE}

$$t_E = 200 + \frac{(300 - 200) \cdot (326,621 - i_{SP200})}{100} \\ = 200 + \frac{(300 - 200) \cdot (326,621 - 267,165)}{100} = 259,457^\circ C$$

2.3.3. Předané teplo bodů 1NO a 4NO

Teplo předané párou mezi body 1NO a 4NO:

$$Q_{1NO-4NO} = (i_{SPE} - i_{SPG}) \cdot M_{SPO} \cdot (1 - z_s) = (326,621 - 231,189) \cdot 103,234 \cdot (1 - 0,003) = 9,848 \text{ MW}$$

2.3.4. Hmotnostní průtok páry nízkotlakým okruhem

Výpočet za pomoci hodnot předaného tepla ($Q_{1NO-4NO}$ v kW)

$$M_{PN} = \frac{Q_{1NO-4NO}}{i_{1NO} - i_{4NO}} = \frac{9848}{2876,29 - 654,77} = 4,433 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

2.3.5. Tepla předaná v jednotlivých plochách nízkotlakého okruhu

V nízkotlakém přehříváku NOp:

$$Q^{NOp} = M_{PN} \cdot (i_{1NO} - i_{2NO}) = 4,433 \cdot (2876,29 - 2760,9) = 0,511 \text{ MW}$$

V nízkotlakém výparníku NOv:

$$Q^{NOv} = M_{PN} \cdot (i_{2NO} - i_{3NO}) = 4,433 \cdot (2760,9 - 689,46) = 9,183 \text{ MW}$$

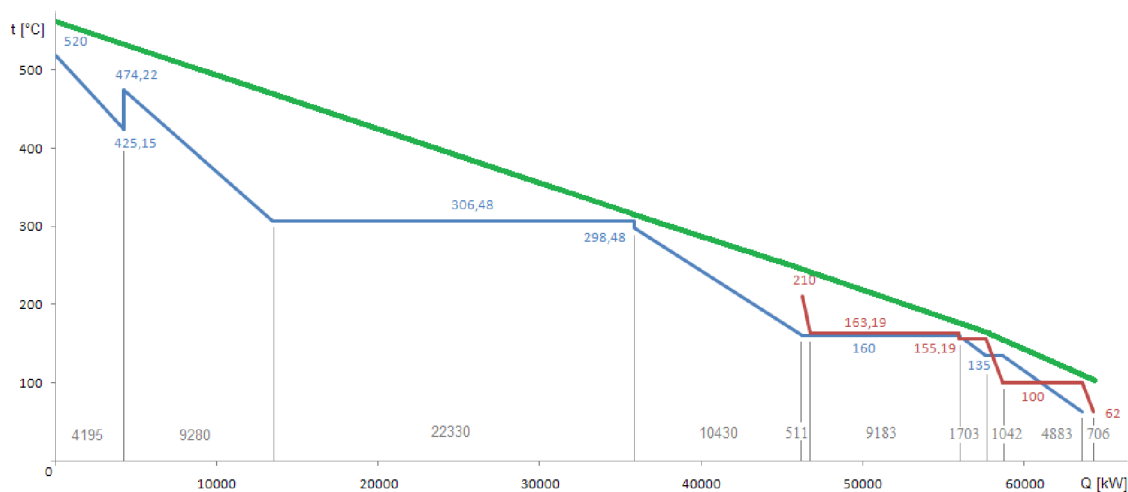
V nízkotlakém ekonomizéru NOe2:

$$Q^{NOe2} = M_{PN} \cdot (i_{4NO} - i_{5NO}) = 4,433 \cdot (654,77 - 419,64) = 1,042 \text{ MW}$$

V nízkotlakém ekonomizéru NOe1:

$$Q^{NOe1} = M_{PN} \cdot (i_{5NO} - i_{6NO}) = 4,433 \cdot (419,64 - 260,31) = 0,706 \text{ MW}$$

2.4. Pilový diagram vypočtených hodnot



Obr. 2.2. Pilový diagram vypočtených hodnot

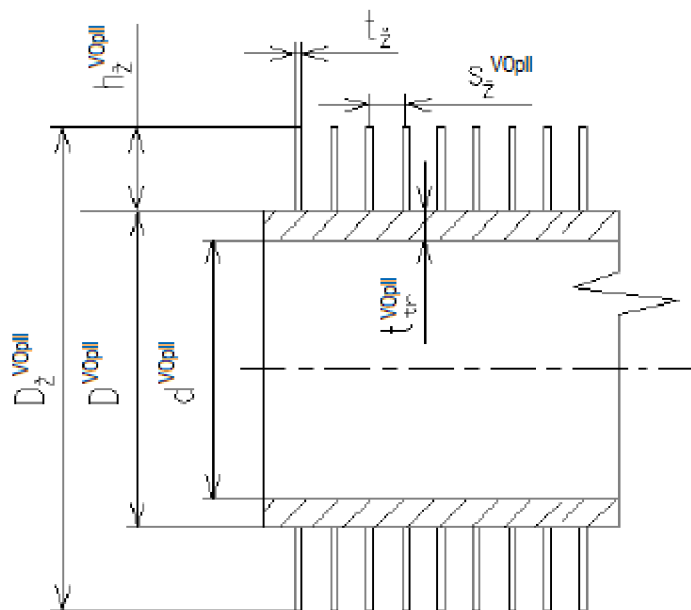
3. Návrh spalínového kanálu

Druhý stupeň přehříváku ve vysokotlakém okruhu (VOpII) je vybrán pro volbu rozměru spalínového kanálu. Prvním krokem je stanovení počtu trubek v jedné podélné řadě n_{tr} a příčné rozteče mezi trubkami s_1 . Následně je třeba zkontrolovat, jestli pro zvolený počet trubek a vnitřní průměr d vychází rychlost proudění páry w_p v příslušných mezích. Šířka spalínového kanálu \check{s}_n se zjistí za pomoci hodnot příčné rozteče a počtu trubek v jedné podélné řadě. V další části bude vypočten skutečný objemový průtok spalín M_{SPOs} pro střední teplotu spalín. Zvolením návrhové rychlosti proudění spalín w_{SPn} a použitím M_{SPOs} bude zjištěna návrhová průtočná plocha spalín S_{SP-PRn} . Následně se stanoví z S_{SP-PRn} , \check{s}_n a zvolených rozměrů trubek návrhová výška spalínového kanálu l_n .

Po úspěšném výpočtu se návrhové hodnoty zaokrouhlí na skutečné volené šířky \check{s} a l spalínového kanálu. Z těchto hodnot se vypočítá skutečná průtočná plocha spalín S_{SP-PR} a skutečná průtočná rychlost spalín w_{SP} .

3.1. Návrh rozměrů trubek VPII

Pro VPII se použijí žebrované trubky. Náhled na rozměry trubek viz obr. 3.1.



Obr. 3.1. Náhled na značení rozměrů trubek

Vnější průměr trubky	$D_z^{VOpII} = 38\text{mm}$
Vnitřní průměr trubky	$d^{VOpII} = 30\text{mm}$
Tloušťka trubky	$t_{tr}^{VOpII} = 4\text{mm}$
Tloušťka žeber	$t_z = 1\text{mm}$
Výška žeber	$h_z^{VOpII} = 14\text{mm}$
Průměr žeber	$D_z^{VOpII} = 66\text{mm}$
Počet žeber na 1m trubky	$n_z^{VOpII} = 170$
Rozteč mezi žebry	$s_z^{VOpII} = 5,88\text{mm}$

3.2. Počet trubek v jedné podélné řadě

Vzorec pro výpočet rychlosti proudění páry v potrubí w_p :

$$w_p = \frac{M_{pV} \cdot v_p}{f} \quad (3-1)$$

v_p [$m^3 \cdot kg^{-1}$] je střední objem páry ve VOpII
 f [m^2] je teplosměnná plocha VOpII ze strany páry

Je třeba vypočíst měrný objem páry ve VOpII:

$$v_p^{VOpII} = \frac{v_{1VO} + v_{2VO}}{2} = \frac{0,038 + 0,031}{2} = 0,0345 m^3 \cdot kg^{-1}$$

Rychlost proudění páry w_p^{VOpII} se musí pohybovat v rozmezí 15 - 25 $m \cdot s^{-1}$.
 Zvoleno 17 $m \cdot s^{-1}$:

$$f^{VOpII} = \frac{M_{pV} \cdot v_p^{VOpII}}{w_p^{VOpII}} = \frac{16,779 \cdot 0,0345}{17} = 0,034 m^2$$

Vzorec pro výpočet teplosměnné plochy ze strany páry f :

$$f = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}}{4} \Rightarrow n_{tr} = \frac{4 \cdot f}{\pi \cdot d^2} \quad (3-2)$$

Z vzorce pro výpočet teplosměnné plochy ze strany páry f lze získat vztah pro určení počtu trubek:

$$n_{tr}^{VOpII} = \frac{4 \cdot f^{VOpII}}{\pi \cdot d^{VOpII^2}} = \frac{4 \cdot 0,034}{\pi \cdot 0,03} = 47,71$$

V podélné řadě byl zvolen počet trubek $n_{tr}^{VOpII} = 48$.

Do vzorce (3-1) je dosazeno f ze vztahu (3-2) a je získán vzorec pro výpočet rychlosti proudění páry v potrubí w_p :

$$w_p = \frac{M_{pV} \cdot v_p}{\frac{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}}{4}} \Rightarrow \frac{4 \cdot M_{pV} \cdot v_p}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{tr}} \quad (3-3)$$

Kontrola rychlosti proudění pro zvolený počet trubek:

$$w_p^{VOpII} = \frac{4 \cdot M_{pV} \cdot v_p^{VOpII}}{\pi \cdot d^{VOpII^2} \cdot n_{tr}^{VOpII}} = \frac{4 \cdot 16,779 \cdot 0,0345}{\pi \cdot 0,03 \cdot 48} = 16,92 m \cdot s^{-1}$$

Rychlost je v mezích a proto pro zvolený počet trubek vyhovuje.

3.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalín pro VOpII

Výpočet entalpie spalín bodu B:

$$i_{SPB} = i_{SPA} - \frac{Q^{VOpII}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 774,665 - \frac{4,195}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 734,017 \text{ kJ} \cdot \text{m}^3$$

Návrhová teplota v bodě B se vypočte interpolací a za pomoci entalpie v bodě B:

$$t_{Bn} = 500 + \frac{(i_{SPB} - i_{SP500}) \cdot 100}{i_{SP600} - i_{SP500}} = 500 + \frac{(734,017 - 690,32) \cdot 100}{835,743 - 690,32} = 530,048^\circ\text{C}$$

Střední teplota proudu spalín VOpII je aritmetickým průměrem hodnot bodů A a B:

$$t_{SP}^{VOpII} = \frac{t_A + t_{Bn}}{2} = \frac{558 + 530,048}{2} = 544,024^\circ\text{C}$$

Objemový průtok spalín na skutečný objemový průtok se provede dle střední teploty proudu spalín pomocí vzorce:

$$M_{SPOs} = M_{SPO} \cdot \frac{t_{SP} + 273,15}{273,15} \quad (3-4)$$

$$M_{SPOs}^{VPOII} = M_{SPO} \cdot \frac{t_{SP}^{VPOII} + 273,15}{273,15} = 103,234 \cdot \frac{544,024 + 273,15}{273,15} = 308,841 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost spalín zvolena $w_{SPn}^{VPOII} = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.4. Návrh rozměrů spalínového kanálu

Návrhovou průtočnou plochu spalín pro VOpII lze zjistit z objemového průtoku a rychlosti spalín:

$$S_{SP-PRn}^{VOpII} = \frac{M_{SPOs}^{VOpII}}{w_{SPn}^{VOpII}} = \frac{308,841}{15} = 20,589 \text{ m}^2$$

Mezera mezi trubkami byla zvolena $a^{VOpII} = 15 \text{ mm}$, hodnota se musí nacházet v rozmezí 5 - 15 mm.

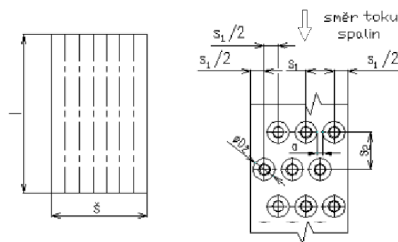
Příčná rozteč mezi trubkami se zjistí ze vztahu:

$$s_1^{VOpII} = D_z^{VOpII} + a^{VOpII} = 66 + 15 = 81 \text{ mm}$$

Výpočet šířky kanálu ze vztahu (viz obr. 3-2):

$$\check{s} = \frac{3s_1}{2} + (n_{tr} - 1) \cdot s_1 \quad (3-5)$$

$$\check{s}_n = \frac{3s_1^{VOpII}}{2} + (n_{tr}^{VOpII} - 1) \cdot s_1^{VOpII} = \frac{3 \cdot 81}{2} + (48 - 1) \cdot 81 = 3,929 \text{ m}$$



Obr. 3.2. Nákres rozměrů spalínového kanálu s roztečemi trubek

Průtočnou plochu lze vypočítat dle vzorce:

$$S_{SP-PR} = \check{s} \cdot l - l \cdot D \cdot n_{tr} - 2 \cdot h_z \cdot t_z \cdot l \cdot n_z \cdot n_{tr} \quad (3-6)$$

Vyjádřením l ze vztahu (3-6) je získána hodnota, která je totožná s délkou trubky:

$$l_n = \frac{S_{PRn}^{VOpII}}{\check{s}_n - D^{VOpII} \cdot n_{tr}^{VOpII} - 2 \cdot h_z^{VOpII} \cdot t_z \cdot n_z^{VOpII} \cdot n_{tr}^{VOpII}}$$

$$= \frac{20,589}{9,929 - 0,038 \cdot 48 - 2 \cdot 0,014 \cdot 0,001 \cdot 170 \cdot 48} = 10,975$$

Skutečné rozměry zvoleny:

$$\check{s} = 3,93$$

$$l = 10,98$$

Šířka kanálu se blíží k 4m, z tohoto důvodu je vhodné z důvodu převozu rozdělit kanál v polovině šířky na dvě části. Skutečná šířka kanálu zůstane 3,93, jelikož volný prostor o 150mm bude vyplněn izolací.

Skutečná průtočná plocha ze strany spalín VOpII lze získat ze vzorce (3-6):

$$S_{SP-PR}^{VOpII} = \check{s} \cdot l - l \cdot D^{VOpII} \cdot n_{tr}^{VOpII} - 2 \cdot h_z^{VOpII} \cdot t_z \cdot l \cdot n_z^{VOpII} \cdot n_{tr}^{VOpII} =$$

$$= 3,93 \cdot 10,98 - 10,98 \cdot 0,038 \cdot 48 - 2 \cdot 0,014 \cdot 0,001 \cdot 10,98 \cdot 170 \cdot 48 =$$

$$= 20,589 \text{m}^2$$

Skutečná rychlost spalín se vypočítá z vzorce:

$$w_{SP} = \frac{M_{SPOs}}{S_{SP-PR}}$$

$$w_{SP}^{VOpII} = \frac{M_{SPOs}^{VOpII}}{S_{SP-PR}^{VOpII}} = \frac{308,841}{20,589} = 15 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

3.5. Vypočtené hodnoty pro VOpII

Počet trubek v jedné podélné řadě	$n_{tr}^{VOpII} = 48$
Příčná rozteč mezi trubkami	$s_1^{VOpII} = 81 \text{mm}$
Šířka spalínového kanálu	$\check{s} = 3,93 \text{m}$
Výška spalínového kanálu	$l = 10,98 \text{m}$
Rychlost proudění páry v trubkách	$w_P^{VOpII} = 16,92 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Rychlost proudění spalín v kanále	$w_{SP}^{VOpII} = 15 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

4. Návrh výhřevných ploch

Pro návrh jednotlivých výhřevných ploch je třeba využít z tabulky vyráběných rozměrů trubek vnější průměr D a tloušťku stěny trubek t_{tr} . Vnitřní průměr se dopočítá za pomoci vzorce:

$$d = D - 2 \cdot t_{tr}$$

Výška žebra se pohybuje od 10 do 15mm pro přehříváky a ekonomizéry, pro výparníky je rozmezí 15 - 20mm. Vnější průměr žebrování se dopočítá z vzorce:

$$D_z = D_v + 2 \cdot h_z.$$

Počet žebor n_z na 1m trubky je 150 - 200 (maximum 250), hodnoty se volí vždy po 10. Rozteč mezi žebry je s_z je převrácená hodnota n_z .

Pro trubky se vypočítá příčná rozteč s_1 a počet trubek v jedné podélné řadě n_{tr} . Při tomto výpočtu je třeba dbát na dodržení rychlosti páry w_p . Pro žebrované trubky platí, že s_1 je dána průměrem žebrování D_z a hodnotou a . Dle rozměrů rozváděcích trubek je dále zvolena podélná rozteč trubek s_2 . U přehříváků a výparníku se volí rozteč o něco větší než je průměr rozváděcích trubek (114,3mm) a to $s_2 = 117$ mm, u ekonomizéru obdobně (88,9mm) a rozteč poté činí $s_2 = 92$ mm.

Také je třeba zjistit průtočnou rychlost spalín w_{SP} . Následně celkový počet podélných řad trubek n_R lze zjistit z podílu teplosměnné plochy ze strany spalín S_{SP} a na jednu řadu S_{SP-1r} . Pomocí hodnot tepla Q , součinitele prostupu tepla K a logaritmičského teplotního spádu Δt_{ln} lze zjistit hodnoty S_{SP} a S_{SP-1r} .

Skutečná plocha ze strany spalín S_{SPs} bude přepočtena pro zvolený počet podélných řad. Poté bude vypočteno skutečné předané teplo Q_s . Důležitý je výpočet kontroly rozdílu mezi návrhovým Q a skutečným teplem Q_s . Tento rozdíl by neměl přesáhnout 5%. Pro výpočet je využit podklad [1].

Tab. 4.1. Hodnoty pro výpočet jednotlivých výhřevných ploch

Veličina	Značení	Hodnota
Součinitel rozšíření žebra	μ	1
Koeficient nerovnoměrnosti rozložení α_K po povrchu žebra	Ψ_z	0,85
Poměrná ztráta sáláním a konvekcí	z_s	0,3%
Poměrná zářivost	ε	$0,002 \text{W}^{-1} \text{m}^2 \text{K}$
Součinitel tepelné vodivosti žebor	λ_z	$40 \text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$
Opravný koeficient teploty proudu a stěny	c_t	1
Opr. koef. poměrné délky	c_l	1
Opr. koef. mezikruží	c_m	1
Objemový průtok spalín	M_{SPO}	$103,234 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$
Šířka spalínového kanálu	\check{s}	3,93m
Výška spalínového kanálu	l	10,98m

4.1. Návrh druhého stupně vysokotlakého přehříváku (VOpII)

4.1.1. Vstupní parametry VOpII

Teplo předané ve VOpII	$Q^{VOpII} = 4,195\text{MW}$
Hmotnostní průtok páry vysokotl. okruhem	$M_{PV} = 16,779\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
Teplota spalín v bodě A	$t_A = 558^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 1VO	$t_{1VO} = 520^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 2VO	$t_{2VO} = 425,15^\circ\text{C}$
Entalpie spalín v bodě A	$i_{SPA} = 774,665\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Entalpie spalín při 500°C	$i_{SP500} = 690,32\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Entalpie spalín při 600°C	$i_{SP600} = 835,743\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Měrný objem páry v bodě 1VO	$v_{1VO} = 0,0376\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 2VO	$v_{2VO} = 0,0308247\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$
Tlak páry v bodě 1VO	$p_{1VO} = 9,1\text{MPa}$
Tlak páry v bodě 2VO	$p_{2VO} = 9,25\text{MPa}$
Rychlost proudění spalín v kanále	$w_{SP}^{VOpII} = 15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Rychlost proudění páry v trubkách VOpII	$w_P^{VOpII} = 16,92\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Počet trubek VOpII v jedné podélné řadě	$n_{tr}^{VOpII} = 48$
Příčná rozteč mezi trubkami VOpII	$s_1^{VOpII} = 81\text{mm}$

4.1.2. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín VOpII

4.1.2.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí VOpII

Ze vzorce je získána hodnota s'^{VOpII} :

$$s'^{VOpII} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{VOpII}}{2}\right)^2 + s_2^{VOpII^2}} = \sqrt{\left(\frac{81}{2}\right)^2 + 117^2} = 124\text{mm}$$

Poměrné podélné rozteče:

$$\sigma_1^{VOpII} = \frac{s_1^{VOpII}}{D^{VOpII}} = \frac{81}{38} = 2,132$$

$$\sigma_2^{VOpII} = \frac{s'^{VOpII}}{D^{VOpII}} = \frac{124}{38} = 3,258$$

Vzorec pro výpočet poměrných podélných roztečí:

$$\varphi_\sigma^{VOpII} = \frac{\sigma_1^{VOpII} - 1}{\sigma_2^{VOpII} - 1} = \frac{2,132 - 1}{3,258 - 1} = 0,501$$

Z obr. 8.4. na str. 116 [1] lze určit součinitel opravy. Předpoklad počtu podélných řad méně než 5.

$$c_z^{VOpII} = 0,9$$

Interpolací hodnot z tab. 3-3 na str. 24 [1] lze zjistit součinitel tepelné vodivosti spalin a součinitel kinematické viskozity spalin. K tomu je využita střední teplota spalin t_{SP}^{VOpII} a objemový podíl vodní páry ve spalinách 9,7%:

$$\lambda_{SP}^{VOpII} = 0,07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$v_{SP}^{VOpII} = 8,409 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí lze spočítat ze vzorce:

$$\alpha_K^{VOpII} = 0,23 \cdot c_z^{VOpII} \cdot \varphi_\sigma^{VOpII 0,2} \cdot \frac{\lambda_{SP}^{VOpII}}{s_z^{VOpII}} \cdot \left(\frac{D^{VOpII}}{s_z^{VOpII}} \right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z^{VOpII}}{s_z^{VOpII}} \right)^{-0,14}$$

$$\cdot \left(\frac{w_{SP}^{VOpII} \cdot s_z^{VOpII}}{v_{SP}^{VOpII}} \right)^{0,65} = 0,23 \cdot 0,9 \cdot 0,501^{0,2} \cdot \frac{0,07}{5,88 \cdot 10^{-3}}$$

$$\cdot \left(\frac{0,038}{5,88 \cdot 10^{-3}} \right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,014}{5,88 \cdot 10^{-3}} \right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{15 \cdot 5,88 \cdot 10^{-3}}{8,409 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65}$$

$$= 63,803 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

4.1.2.2. Návrh součinitele efektivnosti žeber VOpII

Součinitel β lze zjistit ze vzorce:

$$\beta^{VOpII} = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{VOpII}}{t_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{VOpII})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 63,803}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 63,803)}}$$

$$= 49,46 \text{ m}^{-1}$$

Součinitel efektivnosti žeber lze zjistit z grafu na str. 114 [1] za pomoci:

$$\beta^{VOpII} \cdot h_z^{VOpII} = 49,46 \cdot 0,015 = 0,692$$

$$\frac{D_z^{VOpII}}{D^{VOpII}} = \frac{66}{38} = 1,737$$

$$\Rightarrow E^{VOpII} = 0,84$$

4.1.2.3. Podíly teplosměnných ploch žeber a celkové plochy ze strany spalin VOpII

Pro kruhové trubky s kruhovými žebry:

$$S_z^{VOpII} = \frac{\left(\frac{D_z^{VOpII}}{D^{VOpII}} \right)^2 - 1}{\left(\frac{D_z^{VOpII}}{D^{VOpII}} \right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_z^{VOpII}}{D^{VOpII}} - \frac{t_z}{D^{VOpII}} \right)} = \frac{\left(\frac{66}{38} \right)^2 - 1}{\left(\frac{66}{38} \right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{5,88}{38} - \frac{1}{38} \right)}$$

$$= 0,887$$

Pro volné části trubky, bez žeber:

$$\frac{S_h^{VOpII}}{S^{VOpII}} = 1 - \frac{S_z^{VOpII}}{S^{VOpII}} = 1 - 0,887 = 0,113$$

4.1.2.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalin VOpII

Vychází se z následujícího vzorce:

$$\begin{aligned} \alpha_{1r}^{VOpII} &= \left(\frac{S_z^{VOpII}}{S^{VOpII}} \cdot E^{VOpII} \cdot \mu + \frac{S_h^{VOpII}}{S^{VOpII}} \right) \cdot \frac{\psi_z \cdot \alpha_K^{VOpII}}{1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{VOpII}} = \\ &= (0,887 \cdot 0,84 \cdot 1 + 0,113) \cdot \frac{0,85 \cdot 63,803}{1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 63,803} = 41,982 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \end{aligned}$$

4.1.3. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany páry VOpII

Hodnoty tepelné vodivosti vodní páry, Prandtlova čísla a součinitele dynamické viskozity zjistím za pomoci středního tlaku a střední teploty páry z programu X-Steam.

$$p_P^{VOpII} = \frac{p_{1VO} + p_{2VO}}{2} = \frac{9,1 + 9,25}{2} = 9,175 MPa$$

$$t_P^{VOpII} = \frac{t_{1VO} + t_{2VO}}{2} = \frac{520 + 425,15}{2} = 472,575^\circ C$$

$$\lambda_P^{VOpII} = 0,0716335 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

$$Pr_P^{VOpII} = 0,9997$$

$$\mu_P^{VOpII} = 2,768 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$$

Součinitel kinematické viskozity vodní páry:

$$\nu_P^{VOpII} = \mu_P^{VOpII} \cdot \nu_P^{VOpII} = 2,768 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0345 = 9,47 \cdot 10^{-7} m^2 \cdot s^{-1}$$

Ekvivalentní průměr při proudění uvnitř trubek se rovná vnitřnímu průměru trubek:

$$d_e^{VOpII} = d^{VOpII} = 30 mm$$

Součinitel přestupu tepla ze strany páry získáno ze vzorce:

$$\begin{aligned} \alpha_{2r}^{VOpII} &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_P^{VOpII}}{d_e^{VOpII}} \cdot \left(\frac{w_P^{VOpII} \cdot d_e^{VOpII}}{\nu_P^{VOpII}} \right)^{0,8} \cdot Pr_P^{VOpII 0,4} \cdot c_t^{VOpII} \cdot c_l^{VOpII} \cdot c_m^{VOpII} \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,0716335}{0,03} \cdot \left(\frac{16,92 \cdot 0,03}{9,47 \cdot 10^{-7}} \right) \cdot 0,9997 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 2112 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \end{aligned}$$

4.1.4. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VOpII

Teplosměnná plocha ze strany spalin na 1m délky trubky:

$$S_{SP-1m}^{VOpII} = \pi \cdot D^{VOpII} + 2 \cdot \pi \cdot n_z^{VOpII} \cdot \left(\frac{D_z^{VOpII 2} - D^{VOpII 2}}{4} \right)$$

$$= \pi \cdot 0,038 + 2 \cdot \pi \cdot 170 \cdot \left(\frac{0,66^2 - 0,038^2}{4} \right) = 0,897m$$

Teplosměnná plocha ze strany páry na 1m délky trubky:

$$S_{P-1m}^{VOpII} = \pi \cdot d^{VOpII} = \pi \cdot 0,03 = 0,094m$$

Součinitel prostupu tepla:

$$K^{VOpII} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}^{VOpII}} + \frac{1}{\alpha_{2r}^{VOpII}} \cdot \frac{S_{SP-1m}^{VOpII}}{S_{P-1m}^{VOpII}} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{41,982} + \frac{1}{2112} \cdot \frac{0,897}{0,094} + 0,002}$$

$$= 32,975W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Logaritmický spád:

$$\Delta t_1^{VOpII} = t_A - t_{1VO} = 558 - 520 = 38^\circ C$$

$$\Delta t_2^{VOpII} = t_{Bn} - t_{2VO} = 530,048 - 425,15 = 104,898^\circ C$$

$$\Delta t_{ln}^{VOpII} = \frac{\Delta t_2^{VOpII} - \Delta t_1^{VOpII}}{\ln\left(\frac{\Delta t_2^{VOpII}}{\Delta t_1^{VOpII}}\right)} = \frac{104,898 - 38}{\ln\left(\frac{104,898}{38}\right)} = 65,883^\circ C$$

4.1.5. Návrh počtu podélných řad VOpII

Celková teplosměnná plocha ze strany spalín:

$$S_{SP}^{VOpII} = \frac{Q^{VOpII}}{K^{VOpII} \cdot \Delta t_{ln}^{VOpII}} = \frac{4195}{32,975 \cdot 65,883} = 1931m^2$$

Plocha ze strany spalín na jednu řadu:

$$S_{SP-1r}^{VOpII} = S_{SP-1m}^{VOpII} \cdot l \cdot n_{tr}^{VOpII} = 0,94 \cdot 10,98 \cdot 48 = 472,535m^2$$

Počet podélných řad:

$$n_R^{VOpII} = \frac{S_{SP}^{VOpII}}{S_{SP-1r}^{VOpII}} = \frac{1931}{472,535} = 4,086$$

Hodnota je zaokrouhlena na:

$$n_R^{VOpII} = 4$$

4.1.6. Výpočet skutečného předaného tepla VOpII

Skutečná teplosměnná plocha pro zvolený počet řad:

$$S_{SPs}^{VOpII} = S_{SP-1r}^{VOpII} \cdot n_R^{VOpII} = 472,535 \cdot 4 = 1890m^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_s^{VOpII} = K^{VOpII} \cdot S_{SPs}^{VOpII} \cdot \Delta t_{ln}^{VOpII} = 32,975 \cdot 1890 \cdot 65,883 = 4,106MW$$

Původní hodnota:
 $Q^{VOpII} = 4,195\text{MW}$

Kontrola rozdílu (tolerance do 5%):

$$x_Q^{VOpII} = \left| 5 \cdot \frac{Q_s^{VOpII} - Q^{VOpII}}{Q_s^{VOpII} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{4,106 - 4,195}{4,106 \cdot 0,05} \right| = 2,152\%$$

Rozdíl je v toleranci, tudíž zvolený počet řad vyhovuje.

4.1.7. Výpočet skutečné teploty spalín bodu B

Skutečná entalpie bodu B:

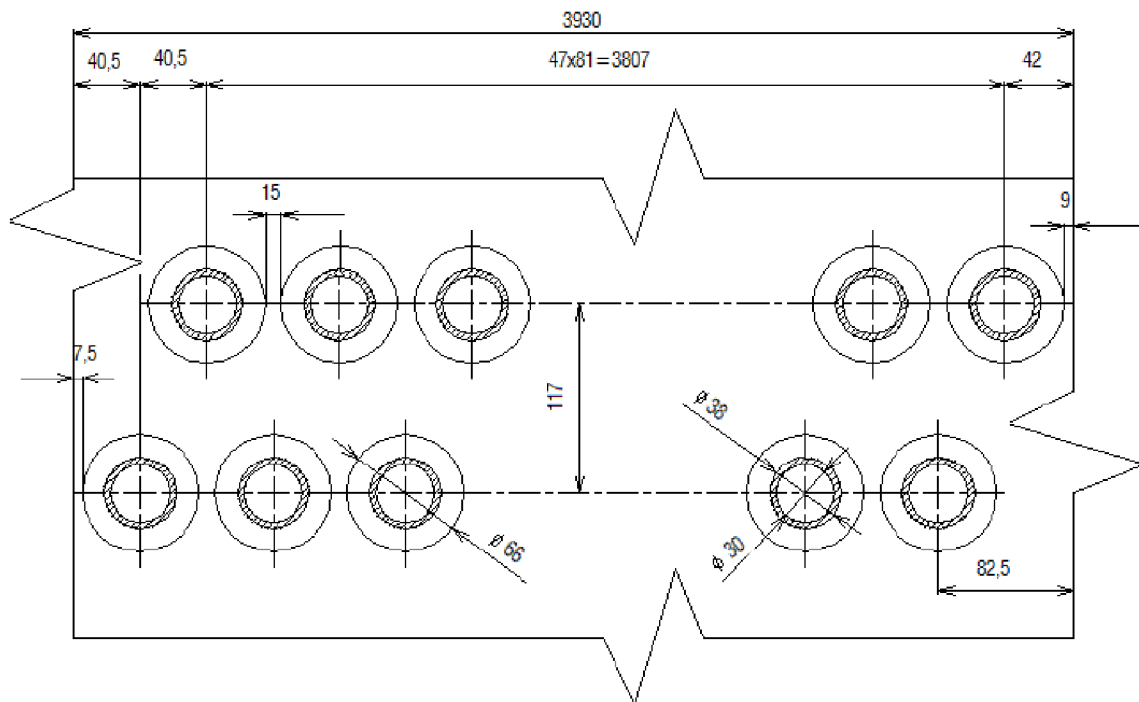
$$i_{SPB} = i_{SPA} - \frac{Q_s^{VOpII}}{M_{SP0} \cdot (1 - z_s)} = 774,665 - \frac{4,106}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 734,874\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

Skutečná teplota bodu B:

$$t_B = \frac{(i_{SPB} - i_{SP500}) \cdot 100}{i_{SP600} - i_{SP500}} + 500 = \frac{(734,874 - 690,32) \cdot 100}{837,743 - 690,32} + 500 = 530,637^\circ\text{C}$$

4.1.8. Přehled navržených hodnot VOPII

Podélná rozteč mezi trubkami VOPII:	$s_2^{VOpII} = 0,117\text{m}$
Počet podélných řad trubek VOPII:	$n_R^{VOpII} = 4$
Skutečné teplo předané v VOPII:	$Q_s^{VOpII} = 4,106\text{MW}$
Skutečná teplota spalín v bodě B:	$t_B = 530,637^\circ\text{C}$



Obr. 4.1. Nákres trubek VOPII

4.2. Návrh prvního stupně vysokotlakého přehříváku (VOPI)

4.2.1. Vstupní parametry VOPI

Vstupní parametry pro výpočet:

Teplo předané ve VOPI	$Q^{VOPI} = 9,28\text{MW}$
Hmotnostní průtok páry vysokotl. okruhem	$M_{PV} = 16,779\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
Teplota spalín v bodě B	$t_B = 530,637^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 3VO	$t_{3VO} = 474,22^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 4VO	$t_{4VO} = 306,48^\circ\text{C}$
Entalpie spalín v bodě B	$i_{SPB} = 734,017\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Entalpie spalín při 400°C	$i_{SP400} = 545,246\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Entalpie spalín při 500°C	$i_{SP500} = 690,32\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Měrný objem páry v bodě 3VO	$v_{3VO} = 0,034\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 4VO	$v_{4VO} = 0,019\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$
Tlak páry v bodě 3VO	$p_{3VO} = 9,25\text{MPa}$
Tlak páry v bodě 4VO	$p_{4VO} = 9,4\text{MPa}$

Zvolené rozměry trubek VOPI:

Vnější průměr trubky	$D^{VOPI} = 33,7\text{mm}$
Vnitřní průměr trubky	$d^{VOPI} = 25,7\text{mm}$
Tloušťka trubky	$t_{tr}^{VOPI} = 4\text{mm}$
Tloušťka žeber	$t_z = 1\text{mm}$
Výška žeber	$h_z^{VOPI} = 14\text{mm}$
Průměr žeber	$D_z^{VOPI} = 61,7\text{mm}$
Počet žeber na 1m trubky	$n_z^{VOPI} = 170$
Rozteč mezi žebry	$s_z^{VOPI} = 5,88\text{mm}$

4.2.2. Počet trubek v jedné podélné řadě VOPI

Mezera mezi trubkami byla zvolena $a^{VOPI} = 13\text{mm}$, hodnota se musí nacházet v rozmezí 5 - 15 mm.

Příčná rozteč mezi trubkami se zjistí ze vztahu:

$$s_1^{VOPI} = D_z^{VOPI} + a^{VOPI} = 61,7 + 13 = 74,7\text{mm}$$

Pro návrh počtu trubek lze využít upraveného vzorce (3-5):

$$n_{tr}^{VOPI} = \frac{\check{s}}{s_1^{VOPI}} - \frac{1}{2} = \frac{3,93}{0,0747} - \frac{1}{2} = 52,09$$

V podélné řadě byl zvolen počet trubek $n_{tr}^{VOPI} = 52$.

Je třeba vypočítat měrný objem páry ve VOPI:

$$v_p^{VOPI} = \frac{v_{3VO} + v_{4VO}}{2} = \frac{0,034 + 0,019}{2} = 0,027\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$$

Kontrola rychlosti proudění pro zvolený počet trubek, musí být v rozmezí 15 - 25 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$:

$$w_p^{VOpl} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_p^{VOpl}}{\pi \cdot d^{VOpl^2} \cdot n_{tr}^{VOpl}} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 16,779 \cdot 0,027}{\pi \cdot 0,0257^2 \cdot 52} = 15,82 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost je v mezích a proto pro zvolený počet trubek vyhovuje.

4.2.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalin pro VOpl

Výpočet entalpie spalin bodu C:

$$i_{SPC} = i_{SPB} - \frac{Q^{VOpl}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 734,017 - \frac{9,28}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 644,944 \text{ kJ} \cdot \text{m}^3$$

Návrhová teplota v bodě C se vypočte interpolací a za pomoci entalpie v bodě C:

$$t_{Cn} = 400 + \frac{(i_{SPC} - i_{SP400}) \cdot 100}{i_{SP500} - i_{SP400}} = 400 + \frac{(644,944 - 545,246) \cdot 100}{690,32 - 545,246} = 468,722^\circ\text{C}$$

Střední teplota proudu spalin VOpl je aritmetickým průměrem hodnot bodů B a C:

$$t_{SP}^{VOpl} = \frac{t_B + t_{Cn}}{2} = \frac{530,637 + 468,722}{2} = 499,68^\circ\text{C}$$

Skutečný objemový průtok VOpl se zjistí pomocí vzorce (3-4):

$$M_{SPOs}^{VOpl} = M_{SPO} \cdot \frac{t_{SP}^{VOpl} + 273,15}{273,15} = 103,234 \cdot \frac{499,68 + 273,15}{273,15} = 298,081 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Skutečná průtočná plocha ze strany spalin VOpl lze získat ze vzorce (3-6):

$$\begin{aligned} S_{SP-PR}^{VOpl} &= \check{s} \cdot l - l \cdot D^{VOpl} \cdot n_{tr}^{VOpl} - 2 \cdot h_z^{VOpl} \cdot t_z \cdot l \cdot n_z^{VOpl} \cdot n_{tr}^{VOpl} = \\ &= 3,93 \cdot 10,98 - 10,98 \cdot 0,0337 \cdot 52 - 2 \cdot 0,014 \cdot 0,001 \cdot 10,98 \cdot 170 \cdot 52 = \\ &= 21,166 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Skutečná rychlost spalin se vypočítá z vzorce:

$$w_{SP}^{VOpl} = \frac{M_{SPOs}^{VOpl}}{S_{SP-PR}^{VOpl}} = \frac{298,081}{21,166} = 13,799 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4.2.4. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalin VOpl

4.2.4.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí VOpl

Ze vzorce je získána hodnota s^{VOpl} :

$$s^{VOpl} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{VOpl}}{2}\right)^2 + s_2^{VOpl^2}} = \sqrt{\left(\frac{74,7}{2}\right)^2 + 117^2} = 123 \text{ mm}$$

Poměrné podélné rozteče:

$$\sigma_1^{VOpl} = \frac{s_1^{VOpl}}{D^{VOpl}} = \frac{74,7}{33,7} = 2,217$$

$$\sigma_2^{VOpl} = \frac{s_2^{VOpl}}{D^{VOpl}} = \frac{123}{33,7} = 3,644$$

Vzorec pro výpočet poměrných podélných roztečí:

$$\varphi_\sigma^{VOpl} = \frac{\sigma_1^{VOpl} - 1}{\sigma_2^{VOpl} - 1} = \frac{2,217 - 1}{3,644 - 1} = 0,46$$

Z obr. 8.4. na str. 116 [1] lze určit součinitel opravy. Předpoklad počtu podélných řad 5-10.

$$c_z^{VOpl} = 0,95$$

Interpolací hodnot z tab. 3-3 na str. 24 [1] lze zjistit součinitel tepelné vodivosti spalin a součinitel kinematické viskozity spalin. K tomu je využita střední teplota spalin t_{SP}^{VOpl} a objemový podíl vodní páry ve spalinách 9,7%:

$$\lambda_{SP}^{VOpl} = 0,065 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\nu_{SP}^{VOpl} = 7,615 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí lze spočítat ze vzorce:

$$\begin{aligned} \alpha_K^{VOpl} &= 0,23 \cdot c_z^{VOpl} \cdot \varphi_\sigma^{VOpl 0,2} \cdot \frac{\lambda_{SP}^{VOpl}}{s_z^{VOpl}} \cdot \left(\frac{D^{VOpl}}{s_z^{VOpl}} \right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z^{VOpl}}{s_z^{VOpl}} \right)^{-0,14} \\ &\cdot \left(\frac{w_{SP}^{VOpl} \cdot s_z^{VOpl}}{\nu_{SP}^{VOpl}} \right)^{0,65} = 0,23 \cdot 0,95 \cdot 0,46^{0,2} \cdot \frac{0,065}{5,88 \cdot 10^{-3}} \\ &\cdot \left(\frac{0,0337}{5,88 \cdot 10^{-3}} \right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,014}{5,88 \cdot 10^{-3}} \right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{14 \cdot 5,88 \cdot 10^{-3}}{7,615 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \\ &= 66,272 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

4.2.4.2. Návrh součinitele efektivnosti žeber VOpl

Součinitel β lze zjistit ze vzorce:

$$\begin{aligned} \beta^{VOpl} &= \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{VOpl}}{t_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{VOpl})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 66,272}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 66,272)}} \\ &= 50,313 \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$

Součinitel efektivnosti žeber lze zjistit z grafu na str. 114 [1] za pomoci:

$$\beta^{VOpl} \cdot h_z^{VOpl} = 50,313 \cdot 0,014 = 0,704$$

$$\frac{D_z^{VOpl}}{D^{VOpl}} = \frac{61,7}{33,7} = 1,831$$

$$\Rightarrow E^{VOpl} = 0,82$$

4.2.4.3. Podíly teplosměnných ploch žebry a celkové plochy ze strany spalín VOpl

Pro kruhové trubky s kruhovými žebry:

$$\frac{S_{\dot{z}}^{VOpl}}{S^{VOpl}} = \frac{\left(\frac{D_{\dot{z}}^{VOpl}}{D^{VOpl}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_{\dot{z}}^{VOpl}}{D^{VOpl}}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_{\dot{z}}^{VOpl}}{D^{VOpl}} - \frac{t_{\dot{z}}}{D^{VOpl}}\right)} = \frac{\left(\frac{61,7}{31,7}\right)^2 - 1}{\left(\frac{61,7}{31,7}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{5,88}{31,7} - \frac{1}{31,7}\right)}$$

$$= 0,89$$

Pro volné části trubky, bez žebry:

$$\frac{S_h^{VOpl}}{S^{VOpl}} = 1 - \frac{S_{\dot{z}}^{VOpl}}{S^{VOpl}} = 1 - 0,89 = 0,11$$

4.2.4.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalín VOpl

Vychází se z následujícího vzorce:

$$\alpha_{1r}^{VOpl} = \left(\frac{S_{\dot{z}}^{VOpl}}{S^{VOpl}} \cdot E^{VOpl} \cdot \mu + \frac{S_h^{VOpl}}{S^{VOpl}}\right) \cdot \frac{\psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{VOpl}}{1 + \varepsilon \cdot \psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{VOpl}} =$$

$$= (0,89 \cdot 0,82 \cdot 1 + 0,11) \cdot \frac{0,85 \cdot 66,272}{1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 66,272} = 42,514W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

4.2.5. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany páry VOpl

Hodnoty tepelné vodivosti vodní páry, Prandtlova čísla a součinitele dynamické viskozity zjistím za pomoci středního tlaku a střední teploty páry z programu X-Steam.

$$p_P^{VOpl} = \frac{p_{3VO} + p_{4VO}}{2} = \frac{9,25 + 9,4}{2} = 9,325MPa$$

$$t_P^{VOpl} = \frac{t_{3VO} + t_{4VO}}{2} = \frac{474,22 + 306,48}{2} = 390,35^\circ C$$

$$\lambda_P^{VOpl} = 0,0605311W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

$$Pr_P^{VOpl} = 0,9432$$

$$\mu_P^{VOpl} = 2,422 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$$

Součinitel kinematické viskozity vodní páry:

$$\nu_P^{VOpl} = \mu_P^{VOpl} \cdot \nu_P^{VOpl} = 2,422 \cdot 10^{-5} \cdot 0,027 = 6,487 \cdot 10^{-7} m^2 \cdot s^{-1}$$

Ekvivalentní průměr při proudění uvnitř trubek se rovná vnitřnímu průměru trubek:

$$d_e^{VOpl} = d^{VOpl} = 26mm$$

Součinitel přestupu tepla ze strany páry získán ze vzorce:

$$\alpha_{2r}^{VOpl} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p^{VOpl}}{d_e^{VOpl}} \cdot \left(\frac{w_p^{VOpl} \cdot d_e^{VOpl}}{u_p^{VOpl}} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{VOpl 0,4} \cdot c_t^{VOpl} \cdot c_1^{VOpl} \cdot c_m^{VOpl}$$

$$= 0,023 \cdot \frac{0,0605311}{0,026} \cdot \left(\frac{15,82 \cdot 0,026}{6,487 \cdot 10^{-7}} \right) \cdot 0,9432 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 2298 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

4.2.6. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VOpl

Teplosměnná plocha ze strany spalín na 1m délky trubky:

$$S_{SP-1m}^{VOpl} = \pi \cdot D^{VOpl} + 2 \cdot \pi \cdot n_z^{VOpl} \cdot \left(\frac{D_z^{VOpl 2} - D^{VOpl 2}}{4} \right)$$

$$= \pi \cdot 0,0337 + 2 \cdot \pi \cdot 170 \cdot \left(\frac{0,617^2 - 0,0337^2}{4} \right) = 0,819m$$

Teplosměnná plocha ze strany páry na 1m délky trubky:

$$S_{P-1m}^{VOpl} = \pi \cdot d^{VOpl} = \pi \cdot 0,027 = 0,081m$$

Součinitel prostupu tepla:

$$K^{VOpl} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}^{VOpl}} + \frac{1}{\alpha_{2r}^{VOpl}} \cdot \frac{S_{SP-1m}^{VOpl}}{S_{P-1m}^{VOpl}} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{42,514} + \frac{1}{2,298} \cdot \frac{0,819}{0,081} + 0,002}$$

$$= 33,405 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Logaritmický spád:

$$\Delta t_1^{VOpl} = t_B - t_{3VO} = 530,637 - 474,22 = 56,417^\circ C$$

$$\Delta t_2^{VOpl} = t_{Cn} - t_{4VO} = 468,722 - 306,48 = 162,242^\circ C$$

$$\Delta t_{ln}^{VOpl} = \frac{\Delta t_2^{VOpl} - \Delta t_1^{VOpl}}{\ln \left(\frac{\Delta t_2^{VOpl}}{\Delta t_1^{VOpl}} \right)} = \frac{162,242 - 56,417}{\ln \left(\frac{162,242}{56,417} \right)} = 100,183^\circ C$$

4.2.7. Návrh počtu podélných řad VOpl

Celková teplosměnná plocha ze strany spalín:

$$S_{SP}^{VOpl} = \frac{Q^{VOpl}}{K^{VOpl} \cdot \Delta t_{ln}^{VOpl}} = \frac{9280}{33,405 \cdot 100,183} = 2773m^2$$

Plocha ze strany spalín na jednu řadu:

$$S_{SP-1r}^{VOpl} = S_{SP-1m}^{VOpl} \cdot l \cdot n_{tr}^{VOpl} = 0,819 \cdot 10,98 \cdot 52 = 467,506m^2$$

Počet podélných řad:

$$n_R^{VOpl} = \frac{S_{SP}^{VOpl}}{S_{SP-1r}^{VOpl}} = \frac{2773}{467,506} = 5,932$$

Hodnota je zaokrouhlena na:

$$n_R^{VOpl} = 6$$

4.2.8. Výpočet skutečného předaného tepla VOpI

Skutečná teplosměnná plocha pro zvolený počet řad:

$$S_{SPs}^{VOpl} = S_{SP-1r}^{VOpl} \cdot n_R^{VOpl} = 467,506 \cdot 6 = 2805m^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_s^{VOpl} = K^{VOpl} \cdot S_{SPs}^{VOpl} \cdot \Delta t_{in}^{VOpl} = 33,405 \cdot 2805 \cdot 100,183 = 9387MW$$

Původní hodnota:

$$Q^{VOpl} = 9,28MW$$

Kontrola rozdílu (tolerance do 5%):

$$x_Q^{VOpl} = \left| 5 \cdot \frac{Q_s^{VOpl} - Q^{VOpl}}{Q_s^{VOpl} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{9,387 - 9,28}{9,387 \cdot 0,05} \right| = 1,141\%$$

Rozdíl je v toleranci, tudíž zvolený počet řad vyhovuje.

4.2.9. Výpočet skutečné teploty spalin bodu C

Skutečná entalpie bodu C:

$$i_{SPC} = i_{SPB} - \frac{Q_s^{VOpl}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 774,665 - \frac{9,387}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 643,05kJ \cdot m^{-3}$$

Skutečná teplota bodu C:

$$t_C = \frac{(i_{SPC} - i_{SP400}) \cdot 100}{i_{SP500} - i_{SP400}} + 400 = \frac{(643,05 - 545,246) \cdot 100}{690,32 - 545,246} + 400 = 467,417^\circ C$$

4.2.10. Přehled navržených hodnot VOpI

Příčná rozteč mezi trubkami:

$$s_1^{VOpl} = 0,075m$$

Podélná rozteč mezi trubkami VOpI:

$$s_2^{VOpl} = 0,117m$$

Počet podélných řad trubek VOpI:

$$n_R^{VOpl} = 6$$

Počet trubek v jedné podélné řadě VOpI:

$$n_{tr}^{VOpl} = 52$$

Rychlost proudění spalin v kanále VOpI:

$$w_{SP}^{VOpl} = 13,799 m \cdot s^{-1}$$

Rychlost proudění páry v trubkách VOpI:

$$w_P^{VOpl} = 15,82m \cdot s^{-1}$$

Skutečné teplo předané v VOpI:

$$Q_s^{VOpl} = 9,387MW$$

Skutečná teplota spalin v bodě C:

$$t_C = 467,417^\circ C$$

4.3. Návrh vysokotlakého výparníku (VOv)

4.3.1. Vstupní parametry VOv

Vstupní parametry pro výpočet:

Teplo předané ve VOv	$Q^{VOv} = 22,33\text{MW}$
Hmotnostní průtok páry vysokotl. okruhem	$M_{PV} = 16,779\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
Teplota spalín v bodě C	$t_C = 467,417^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 4VO	$t_{4VO} = 306,48^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 5VO	$t_{5VO} = 306,48^\circ\text{C}$
Entalpie spalín v bodě C	$i_{SPC} = 643,05\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Entalpie spalín při 300°C	$i_{SP300} = 404,464\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Entalpie spalín při 400°C	$i_{SP400} = 545,246\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$

Zvolené rozměry trubek VOv:

Vnější průměr trubky	$D^{VOv} = 57\text{mm}$
Vnitřní průměr trubky	$d^{VOv} = 49\text{mm}$
Tloušťka trubky	$t_{tr}^{VOv} = 4\text{mm}$
Tloušťka žeber	$t_{\check{z}} = 1\text{mm}$
Výška žeber	$h_{\check{z}}^{VOv} = 20\text{mm}$
Průměr žeber	$D_{\check{z}}^{VOv} = 97\text{mm}$
Počet žeber na 1m trubky	$n_{\check{z}}^{VOv} = 170$
Rozteč mezi žebry	$s_{\check{z}}^{VOv} = 5,88\text{mm}$

4.3.2. Počet trubek v jedné podélné řadě VOv

Mezera mezi trubkami byla zvolena $a^{VOv} = 14\text{mm}$, hodnota se musí nacházet v rozmezí 5 - 15 mm.

Příčná rozteč mezi trubkami se zjistí ze vztahu:

$$s_1^{VOv} = D_{\check{z}}^{VOv} + a^{VOv} = 97 + 14 = 111\text{mm}$$

Pro návrh počtu trubek lze využít upraveného vzorce (3-5):

$$n_{tr}^{VOv} = \frac{\check{s}}{s_1^{VOv}} - \frac{1}{2} = \frac{3,93}{0,111} - \frac{1}{2} = 34,89$$

V podélné řadě byl zvolen počet trubek $n_{tr}^{VOv} = 35$.

4.3.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalín pro VOv

Návrhová teplota v bodě D byla zvolena stejná jako v kap. 2.2.3:

$$t_{Dn} = 316,48^\circ\text{C}$$

Střední teplota proudu spalín VOv je aritmetickým průměrem hodnot bodů C a D:

$$t_{SP}^{VOv} = \frac{t_C + t_{Dn}}{2} = \frac{467,417 + 316,48}{2} = 391,948^\circ\text{C}$$

Skutečný objemový průtok VOv se zjistí pomocí vzorce (3-4):

$$M_{SP0s}^{VOv} = M_{SP0} \cdot \frac{t_{SP}^{VOv} + 273,15}{273,15} = 103,234 \cdot \frac{391,948 + 273,15}{273,15} = 251,36 m^3 \cdot s^{-1}$$

Skutečná průtočná plocha ze strany spalin VOv lze získat ze vzorce (3-6):

$$\begin{aligned} S_{SP-PR}^{VOv} &= \check{s} \cdot l - l \cdot D^{VOv} \cdot n_{tr}^{VOv} - 2 \cdot h_z^{VOv} \cdot t_z \cdot l \cdot n_z^{VOv} \cdot n_{tr}^{VOv} = \\ &= 3,93 \cdot 10,98 - 10,98 \cdot 0,057 \cdot 35 - 2 \cdot 0,02 \cdot 0,001 \cdot 10,98 \cdot 170 \cdot 35 = \\ &= 18,608 m^2 \end{aligned}$$

Skutečná rychlost spalin se vypočítá z vzorce:

$$w_{SP}^{VOv} = \frac{M_{SP0s}^{VOv}}{S_{SP-PR}^{VOv}} = \frac{251,36}{18,608} = 13,508 m \cdot s^{-1}$$

4.3.4. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalin VOv

4.3.4.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí VOv

Ze vzorce je získána hodnota s^{VOv} :

$$s^{VOv} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{VOv}}{2}\right)^2 + s_2^{VOv^2}} = \sqrt{\left(\frac{111}{2}\right)^2 + 117^2} = 129 mm$$

Poměrné podélné rozteče:

$$\sigma_1^{VOv} = \frac{s_1^{VOv}}{D^{VOv}} = \frac{111}{57} = 1,947$$

$$\sigma_2^{VOv} = \frac{s^{VOv}}{D^{VOv}} = \frac{129}{57} = 2,272$$

Vzorec pro výpočet poměrných podélných roztečí:

$$\varphi_{\sigma}^{VOv} = \frac{\sigma_1^{VOv} - 1}{\sigma_2^{VOv} - 1} = \frac{1,947 - 1}{2,272 - 1} = 0,745$$

Z obr. 8.4. na str. 116 [1] lze určit součinitel opravy. Předpoklad počtu podélných řad větší než 10.

$$c_z^{VOv} = 1$$

Interpolací hodnot z tab. 3-3 na str. 24 [1] lze zjistit součinitel tepelné vodivosti spalin a součinitel kinematické viskozity spalin. K tomu je využita střední teplota spalin t_{SP}^{VOv} a objemový podíl vodní páry ve spalinách 9,7%:

$$\lambda_{SP}^{VOv} = 0,0559 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

$$\nu_{SP}^{VOv} = 5,923 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí lze spočítat ze vzorce:

$$\begin{aligned} \alpha_K^{VOv} &= 0,23 \cdot c_z^{VOv} \cdot \varphi_\sigma^{VOv,0,2} \cdot \frac{\lambda_{SP}^{VOv}}{s_z^{VOv}} \cdot \left(\frac{D^{VOv}}{s_z^{VOv}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z^{VOv}}{s_z^{VOv}}\right)^{-0,14} \\ &\cdot \left(\frac{w_{SP}^{VOv} \cdot s_z^{VOv}}{u_{SP}^{VOv}}\right)^{0,65} = 0,23 \cdot 1 \cdot 0,745^{0,2} \cdot \frac{0,0559}{5,88 \cdot 10^{-3}} \\ &\cdot \left(\frac{0,057}{5,88 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,02}{5,88 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{13,508 \cdot 5,88 \cdot 10^{-3}}{5,923 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,65} \\ &= 54,945 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

4.3.4.2. Návrh součinitele efektivnosti žeber VOv

Součinitel β lze zjistit ze vzorce:

$$\begin{aligned} \beta^{VOv} &= \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{VOv}}{t_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{VOv})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 54,945}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 54,945)}} \\ &= 46,213 \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$

Součinitel efektivnosti žeber lze zjistit z grafu na str. 114 [1] za pomoci:

$$\beta^{VOv} \cdot h_z^{VOv} = 46,213 \cdot 0,02 = 0,924$$

$$\frac{D_z^{VOv}}{D^{VOv}} = \frac{111}{57} = 1,702$$

$$\Rightarrow E^{VOv} = 0,75$$

4.3.4.3. Podíly teplosměnných ploch žeber a celkové plochy ze strany spalin VOv

Pro kruhové trubky s kruhovými žebry:

$$\begin{aligned} \frac{S_z^{VOv}}{S^{VOv}} &= \frac{\left(\frac{D_z^{VOv}}{D^{VOv}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_z^{VOv}}{D^{VOv}}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_z^{VOv}}{D^{VOv}} - \frac{t_z}{D^{VOv}}\right)} = \frac{\left(\frac{111}{57}\right)^2 - 1}{\left(\frac{111}{57}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{5,88}{57} - \frac{1}{57}\right)} \\ &= 0,917 \end{aligned}$$

Pro volné části trubky, bez žeber:

$$\frac{S_h^{VOv}}{S^{VOv}} = 1 - \frac{S_z^{VOv}}{S^{VOv}} = 1 - 0,917 = 0,083$$

4.3.4.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalin VOv

Vychází se z následujícího vzorce:

$$\alpha_{1r}^{VOv} = \left(\frac{S_{\dot{z}}^{VOv}}{S^{VOv}} \cdot E^{VOv} \cdot \mu + \frac{S_h^{VOv}}{S^{VOv}} \right) \cdot \frac{\psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{VOv}}{1 + \varepsilon \cdot \psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{VOv}} =$$

$$= (0,917 \cdot 0,75 \cdot 1 + 0,083) \cdot \frac{0,85 \cdot 54,945}{1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 54,945} = 32,92 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

4.3.5. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VOv

Součinitel prostupu tepla (předpoklad vysoké hodnoty α_{2r}^{VOv} celý člen $1/\alpha_{2r}^{VOv} = 0$):

$$K^{VOv} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}^{VOv}} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{32,920} + 0,002} = 30,887 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$$

Logaritmický spád:

$$\Delta t_1^{VOv} = t_c - t_{4VO} = 467,417 - 306,48 = 160,937^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2^{VOv} = t_{Dn} - t_{5VO} = 316,48 - 306,48 = 10^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{ln}^{VOv} = \frac{\Delta t_2^{VOv} - \Delta t_1^{VOv}}{\ln\left(\frac{\Delta t_2^{VOv}}{\Delta t_1^{VOv}}\right)} = \frac{160,937 - 10}{\ln\left(\frac{160,937}{10}\right)} = 54,325^\circ\text{C}$$

4.3.6. Návrh počtu podélných řad VOv

Celková teplosměnná plocha ze strany spalin:

$$S_{SP}^{VOv} = \frac{Q^{VOv}}{K^{VOv} \cdot \Delta t_{ln}^{VOv}} = \frac{22330}{30,887 \cdot 54,325} = 13309 \text{ m}^2$$

Teplosměnná plocha ze strany spalin na 1m délky trubky:

$$S_{SP-1m}^{VOv} = \pi \cdot D^{VOv} + 2 \cdot \pi \cdot n_{\dot{z}}^{VOv} \cdot \left(\frac{D_{\dot{z}}^{VOv^2} - D^{VOv^2}}{4} \right) = \pi \cdot 0,057 + 2 \cdot \pi \cdot 170 \cdot$$

$$\cdot \left(\frac{0,111^2 - 0,057^2}{4} \right) = 1,824 \text{ m}$$

Plocha ze strany spalin na jednu řadu:

$$S_{SP-1r}^{VOv} = S_{SP-1m}^{VOv} \cdot l \cdot n_{tr}^{VOv} = 1,824 \cdot 10,98 \cdot 35 = 700,65 \text{ m}^2$$

Počet podélných řad:

$$n_R^{VOv} = \frac{S_{SP}^{VOv}}{S_{SP-1r}^{VOv}} = \frac{13309}{700,65} = 18,995$$

Hodnota je zaokrouhlena na:

$$n_R^{VOv} = 19$$

4.3.7. Výpočet skutečného předaného tepla VOv

Skutečná teplosměnná plocha pro zvolený počet řad:

$$S_{SPs}^{VOv} = S_{SP-1r}^{VOv} \cdot n_R^{VOv} = 700,65 \cdot 19 = 13310 \text{m}^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_s^{VOv} = K^{VOv} \cdot S_{SPs}^{VOv} \cdot \Delta t_{ln}^{VOv} = 30,887 \cdot 13310 \cdot 54,325 = 22,34 \text{MW}$$

Původní hodnota:

$$Q^{VOv} = 22,33 \text{MW}$$

Kontrola rozdílu (tolerance do 5%):

$$x_Q^{VOv} = \left| 5 \cdot \frac{Q_s^{VOv} - Q^{VOv}}{Q_s^{VOv} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{22,34 - 22,33}{22,34 \cdot 0,05} \right| = 0,027\%$$

Rozdíl je v toleranci, tudíž zvolený počet řad vyhovuje.

4.3.8. Výpočet skutečné teploty spalín bodu D

Skutečná entalpie bodu D:

$$i_{SPD} = i_{SPC} - \frac{Q_s^{VOv}}{M_{SP0} \cdot (1 - z_s)} = 774,665 - \frac{22340}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 426,596 \text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

Skutečná teplota bodu D:

$$t_D = \frac{(i_{SPD} - i_{SP300}) \cdot 100}{i_{SP400} - i_{SP300}} + 300 = \frac{(426,596 - 404,464) \cdot 100}{545,246 - 404,464} + 300 = 315,721^\circ\text{C}$$

4.3.9. Přehled navržených hodnot VOv

Příčná rozteč mezi trubkami:	$s_1^{VOv} = 0,111 \text{m}$
Podélná rozteč mezi trubkami VOv :	$s_2^{VOv} = 0,117 \text{m}$
Počet podélných řad trubek VOv:	$n_R^{VOv} = 19$
Počet trubek v jedné podélné řadě VOv:	$n_{tr}^{VOv} = 35$
Rychlost proudění spalín v kanále VOv:	$w_{SP}^{VOv} = 13,508 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Skutečné teplo předané v VOv:	$Q_s^{VOv} = 22,34 \text{MW}$
Skutečná teplota spalín v bodě D:	$t_D = 315,721^\circ\text{C}$

4.4. Návrh třetího stupně vysokotlakého ekonomizéru (VOe3)

4.4.1. Vstupní parametry VOe3

Vstupní parametry pro výpočet:

Teplo předané ve VOe3	$Q^{VOe3} = 10,43\text{MW}$
Hmotnostní průtok páry vysokotl. okruhem	$M_{PV} = 16,779\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
Teplota spalin v bodě D	$t_D = 315,721^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 6VO	$t_{6VO} = 298,48^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 7VO	$t_{7VO} = 160^\circ\text{C}$
Entalpie spalin v bodě D	$i_{SPD} = 425,596\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Entalpie spalin při 200°C	$i_{SP200} = 267,165\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Entalpie spalin při 300°C	$i_{SP300} = 404,464\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Měrný objem páry v bodě 6VO	$v_{6VO} = 0,001394\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 7VO	$v_{7VO} = 0,001096\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$

Zvolené rozměry trubek VOe3:

Vnější průměr trubky	$D^{VOe3} = 31,8\text{mm}$
Vnitřní průměr trubky	$d^{VOe3} = 23,8\text{mm}$
Tloušťka trubky	$t_{tr}^{VOe3} = 4\text{mm}$
Tloušťka žeber	$t_z = 1\text{mm}$
Výška žeber	$h_z^{VOe3} = 15\text{mm}$
Průměr žeber	$D_z^{VOe3} = 61,8\text{mm}$
Počet žeber na 1m trubky	$n_z^{VOe3} = 200$
Rozteč mezi žebry	$s_z^{VOe3} = 5\text{mm}$

4.4.2. Počet trubek v jedné podélné řadě VOe3

Mezera mezi trubkami byla zvolena $a^{VOe3} = 9\text{mm}$, hodnota se musí nacházet v rozmezí 5 - 15 mm.

Příčná rozteč mezi trubkami se zjistí ze vztahu:

$$s_1^{VOe3} = D_z^{VOe3} + a^{VOe3} = 61,8 + 9 = 70,8\text{mm}$$

Pro návrh počtu trubek lze využít upraveného vzorce (3-5):

$$n_{tr}^{VOe3} = \frac{\check{s}}{s_1^{VOe3}} - \frac{1}{2} = \frac{3,93}{0,0708} - \frac{1}{2} = 54,987$$

V podélné řadě byl zvolen počet trubek $n_{tr}^{VOe3} = 55$.

Je třeba vypočítat měrný objem páry ve VOe3:

$$v_p^{VOe3} = \frac{v_{6VO} + v_{7VO}}{2} = \frac{0,001394 + 0,001096}{2} = 0,001245\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$$

Kontrola rychlosti proudění pro zvolený počet trubek, musí být v rozmezí $1-3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$:

$$w_P^{VOe3} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_P^{VOe3}}{\pi \cdot d^{VOe3^2} \cdot n_{tr}^{VOe3}} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 16,779 \cdot 0,001245}{\pi \cdot 0,0238^2 \cdot 55} = 0,811 m \cdot s^{-1}$$

Rychlost proudění je nízká, dojde tedy k rozdělní rozváděcího kanálu na dvě části, čímž se rychlost zdvojnásobí a bude vyhovovat.

$$w_P^{VOe3} = 2 \cdot 0,811 = 1,622 m \cdot s^{-1}$$

4.4.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalin pro VOe3

Výpočet entalpie spalin bodu E:

$$i_{SPE} = i_{SPD} - \frac{Q^{VOe3}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 425,596 - \frac{10,43}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 325,525 kJ \cdot m^3$$

Návrhová teplota v bodě E se vypočte interpolací a za pomoci entalpie v bodě E:

$$t_{En} = 200 + \frac{(i_{SPE} - i_{SP200}) \cdot 100}{i_{SP300} - i_{SP200}} = 200 + \frac{(325,525 - 267,165) \cdot 100}{404,464 - 267,165} = 242,506^\circ C$$

Střední teplota proudu spalin VOe3 je aritmetickým průměrem hodnot bodů D a E:

$$t_{SP}^{VOe3} = \frac{t_D + t_{En}}{2} = \frac{315,721 + 242,506}{2} = 279,114^\circ C$$

Skutečný objemový průtok VOe3 se zjistí pomocí vzorce (3-4):

$$M_{SPOs}^{VPe3} = M_{SPO} \cdot \frac{t_{SP}^{VPe3} + 273,15}{273,15} = 103,234 \cdot \frac{279,114 + 273,15}{273,15} = 208,721 m^3 \cdot s^{-1}$$

Skutečná průtočná plocha ze strany spalin VOe3 lze získat ze vzorce (3-6):

$$\begin{aligned} S_{SP-PR}^{VOe3} &= \check{s} \cdot l - l \cdot D^{VOe3} \cdot n_{tr}^{VOe3} - 2 \cdot h_{\check{z}}^{VOe3} \cdot t_{\check{z}} \cdot l \cdot n_{\check{z}}^{VOe3} \cdot n_{tr}^{VOe3} = \\ &= 3,93 \cdot 10,98 - 10,98 \cdot 0,0318 \cdot 55 - 2 \cdot 0,015 \cdot 0,001 \cdot 10,98 \cdot 200 \cdot 55 = \\ &= 21,298 m^2 \end{aligned}$$

Skutečná rychlost spalin se vypočítá z vzorce:

$$w_{SP}^{VOe3} = \frac{M_{SPOs}^{VOe3}}{S_{SP-PR}^{VOe3}} = \frac{208,721}{21,298} = 10,283 m \cdot s^{-1}$$

4.4.4. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalin VOe3

4.4.4.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí VOe3

Ze vzorce je získána hodnota s^{VOe3} :

$$s^{VOe3} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{VOe3}}{2}\right)^2 + s_2^{VOe3^2}} = \sqrt{\left(\frac{70,8}{2}\right)^2 + 92^2} = 99 mm$$

Poměrné podélné rozteče:

$$\sigma_1^{VOe3} = \frac{s_1^{VOe3}}{D^{VOe3}} = \frac{70,8}{31,8} = 2,226$$

$$\sigma_2^{VOe3} = \frac{s^{VOe3}}{D^{VOe3}} = \frac{99}{31,8} = 3,1$$

Vzorec pro výpočet poměrných podélných roztečí:

$$\varphi_\sigma^{VOe3} = \frac{\sigma_1^{VOe3} - 1}{\sigma_2^{VOe3} - 1} = \frac{2,226 - 1}{3,1 - 1} = 0,584$$

Z obr. 8.4. na str. 116 [1] lze určit součinitel opravy. Předpoklad počtu podélných řad více než 10.

$$c_z^{VOe3} = 1$$

Interpolací hodnot z tab. 3-3 na str. 24 [1] lze zjistit součinitel tepelné vodivosti spalin a součinitel kinematické viskozity spalin. K tomu je využita střední teplota spalin t_{SP}^{VOe3} a objemový podíl vodní páry ve spalinách 9,7%:

$$\lambda_{SP}^{VOe3} = 0,0464 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\nu_{SP}^{VOe3} = 4,312 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí lze spočítat ze vzorce:

$$\begin{aligned} \alpha_K^{VOe3} &= 0,23 \cdot c_z^{VOe3} \cdot \varphi_\sigma^{VOe3 0,2} \cdot \frac{\lambda_{SP}^{VOe3}}{s_z^{VOe3}} \cdot \left(\frac{D^{VOe3}}{s_z^{VOe3}} \right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z^{VOe3}}{s_z^{VOe3}} \right)^{-0,14} \\ &\cdot \left(\frac{w_{SP}^{VOe3} \cdot s_z^{VOe3}}{\nu_{SP}^{VOe3}} \right)^{0,65} = 0,23 \cdot 0,1 \cdot 0,584^{0,2} \cdot \frac{0,0464}{5 \cdot 10^{-3}} \\ &\cdot \left(\frac{0,0318}{5 \cdot 10^{-3}} \right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,015}{5 \cdot 10^{-3}} \right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{10,283 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{4,312 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \\ &= 60,473 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

4.4.4.2. Návrh součinitele efektivity žebér VOe3

Součinitel β lze zjistit ze vzorce:

$$\begin{aligned} \beta^{VOe3} &= \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{VOe3}}{t_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{VOe3})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 60,473}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 60,473)}} \\ &= 48,275 \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$

Součinitel efektivity žebér lze zjistit z grafu na str. 114 [1] za pomoci:

$$\beta^{VOe3} \cdot h_z^{VOe3} = 48,275 \cdot 0,015 = 0,724$$

$$\frac{D_z^{VOe3}}{D^{VOe3}} = \frac{61,8}{31,8} = 1,943$$

$$\Rightarrow E^{VOe3} = 0,8$$

4.4.4.3. Podíly teplosměnných ploch žebříků a celkové plochy ze strany spalin VOe3

Pro kruhové trubky s kruhovými žebříky:

$$\frac{S_z^{VOe3}}{S^{VOe3}} = \frac{\left(\frac{D_z^{VOe3}}{D^{VOe3}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_z^{VOe3}}{D^{VOe3}}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_z^{VOe3}}{D^{VOe3}} - \frac{t_z}{D^{VOe3}}\right)} = \frac{\left(\frac{61,8}{31,8}\right)^2 - 1}{\left(\frac{61,8}{31,8}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{5}{31,8} - \frac{1}{31,8}\right)}$$

$$= 0,917$$

Pro volné části trubky, bez žebříků:

$$\frac{S_h^{VOe3}}{S^{VOe3}} = 1 - \frac{S_z^{VOe3}}{S^{VOe3}} = 1 - 0,917 = 0,083$$

4.4.4.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalin VOe3

Vychází se z následujícího vzorce:

$$\alpha_{1r}^{VOe3} = \left(\frac{S_z^{VOe3}}{S^{VOe3}} \cdot E^{VOe3} \cdot \mu + \frac{S_h^{VOe3}}{S^{VOe3}}\right) \cdot \frac{\psi_z \cdot \alpha_K^{VOe3}}{1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{VOe3}} =$$

$$= (0,917 \cdot 0,8 \cdot 1 + 0,083) \cdot \frac{0,85 \cdot 60,473}{1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 60,473} = 38,063 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

4.4.5. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VOe3

Součinitel prostupu tepla (předpoklad vysoké hodnoty α_{2r}^{VOe3} celý člen $1/\alpha_{2r}^{VOe3} = 0$):

$$K^{VOe3} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}^{VOe3}} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{38,063} + 0,002} = 35,37 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$$

Logaritmický spád:

$$\Delta t_1^{VOe3} = t_D - t_{6VO} = 315,721 - 298,48 = 17,241^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2^{VOe3} = t_{En} - t_{7VO} = 242,506 - 160 = 82,506^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{ln}^{VOe3} = \frac{\Delta t_2^{VOe3} - \Delta t_1^{VOe3}}{\ln\left(\frac{\Delta t_2^{VOe3}}{\Delta t_1^{VOe3}}\right)} = \frac{82,506 - 17,241}{\ln\left(\frac{82,506}{17,241}\right)} = 41,688^\circ\text{C}$$

4.4.6. Návrh počtu podélných řad VOe3

Celková teplosměnná plocha ze strany spalin:

$$S_{SP}^{VOe3} = \frac{Q^{VOe3}}{K^{VOe3} \cdot \Delta t_{ln}^{VOe3}} = \frac{10430}{35,37 \cdot 41,688} = 7074 \text{ m}^2$$

Teplosměnná plocha ze strany spalin na 1m délky trubky:

$$S_{SP-1m}^{VOe3} = \pi \cdot D^{VOe3} + 2 \cdot \pi \cdot n_z^{VOe3} \cdot \left(\frac{D_z^{VOe3^2} - D^{VOe3^2}}{4} \right) = \pi \cdot 0,0318 + 2 \cdot \pi \cdot 200 \cdot \left(\frac{0,618^2 - 0,0318^2}{4} \right) = 0,982m$$

Plocha ze strany spalin na jednu řadu:

$$S_{SP-1r}^{VOe3} = S_{SP-1m}^{VOe3} \cdot l \cdot n_{tr}^{VOe3} = 0,982 \cdot 10,98 \cdot 55 = 592,799m^2$$

Počet podélných řad:

$$n_R^{VOe3} = \frac{S_{SP}^{VOe3}}{S_{SP-1r}^{VOe3}} = \frac{7074}{592,799} = 11,933$$

Hodnota je zaokrouhlena na:

$$n_R^{VOe3} = 12$$

4.4.7. Výpočet skutečného předaného tepla VOe3

Skutečná teplosměnná plocha pro zvolený počet řad:

$$S_{SPs}^{VOe3} = S_{SP-1r}^{VOe3} \cdot n_R^{VOe3} = 592,799 \cdot 12 = 7114m^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_s^{VOe3} = K^{VOe3} \cdot S_{SPs}^{VOe3} \cdot \Delta t_{ln}^{VOe3} = 35,37 \cdot 7114 \cdot 41,688 = 10,49MW$$

Původní hodnota:

$$Q^{VOe3} = 10,43MW$$

Kontrola rozdílu (tolerance do 5%):

$$x_Q^{VOe3} = \left| 5 \cdot \frac{Q_s^{VOe3} - Q^{VOe3}}{Q_s^{VOe3} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{10,49 - 10,43}{10,49 \cdot 0,05} \right| = 0,562\%$$

Rozdíl je v toleranci, tudíž zvolený počet řad vyhovuje.

4.4.8. Výpočet skutečné teploty spalin bodu E

Skutečná entalpie bodu E:

$$i_{SPE} = i_{SPD} - \frac{Q_s^{VOe3}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 425,596 - \frac{10490}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 324,954kJ \cdot m^{-3}$$

Skutečná teplota bodu E:

$$t_E = \frac{(i_{SPE} - i_{SP200}) \cdot 100}{i_{SP300} - i_{SP200}} + 200 = \frac{(324,954 - 267,165) \cdot 100}{404,464 - 267,165} + 200 = 242,09^\circ C$$

4.4.9. Přehled navržených hodnot VOe3

Příčná rozteč mezi trubkami:	$s_1^{VOe3} = 0,071\text{m}$
Podélná rozteč mezi trubkami VOe3 :	$s_2^{VOe3} = 0,092\text{m}$
Počet podélných řad trubek VOe3:	$n_R^{VOe3} = 12$
Počet trubek v jedné podélné řadě VOe3:	$n_{tr}^{VOe3} = 55$
Rychlost proudění spalín v kanále VOe3:	$w_{SP}^{VOe3} = 10,283\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Rychlost proudění vody v trubkách VOe3:	$w_P^{VOe3} = 1,622\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Skutečné teplo předané v VOe3:	$Q_s^{VOe3} = 10,49\text{MW}$
Skutečná teplota spalín v bodě E:	$t_E = 242,09^\circ\text{C}$

4.5. Návrh nízkotlakého přehříváku (NOp)

4.5.1. Vstupní parametry NOp

Vstupní parametry pro výpočet:

Teplo předané ve NOp	$Q^{NOp} = 0,511\text{MW}$
Hmotnostní průtok páry nízkotl. okruhem	$M_{PN} = 4,433\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
Teplota spalín v bodě E	$t_E = 242,09^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 1NO	$t_{1NO} = 210^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 2NO	$t_{2NO} = 163,19^\circ\text{C}$
Entalpie spalín v bodě E	$i_{SPE} = 324,954\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Entalpie spalín při 200°C	$i_{SP200} = 267,165\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Entalpie spalín při 300°C	$i_{SP300} = 404,464\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Měrný objem páry v bodě 1NO	$v_{1NO} = 0,418\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 2NO	$v_{2NO} = 0,0284\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$
Tlak páry v bodě 1NO	$p_{1NO} = 0,52\text{MPa}$
Tlak páry v bodě 2NO	$p_{2NO} = 0,67\text{MPa}$

Zvolené rozměry trubek NOp:

Vnější průměr trubky	$D^{NOp} = 44,5\text{mm}$
Vnitřní průměr trubky	$d^{NOp} = 38,1\text{mm}$
Tloušťka trubky	$t_{tr}^{NOp} = 3,2\text{mm}$
Tloušťka žeber	$t_z = 1\text{mm}$
Výška žeber	$h_z^{NOp} = 10\text{mm}$
Průměr žeber	$D_z^{NOp} = 64,5\text{mm}$
Počet žeber na 1m trubky	$n_z^{NOp} = 200$
Rozteč mezi žebry	$s_z^{NOp} = 5\text{mm}$

4.5.2. Počet trubek v jedné podélné řadě NOp

Mezera mezi trubkami byla zvolena $a^{NOp} = 5\text{mm}$, hodnota se musí nacházet v rozmezí 5 - 15 mm.

Příčná rozteč mezi trubkami se zjistí ze vztahu:

$$s_1^{NOp} = D_z^{NOp} + a^{NOp} = 64,5 + 5 = 69,5\text{mm}$$

Pro návrh počtu trubek lze využít upraveného vzorce (3-5):

$$n_{tr}^{NOp} = \frac{\xi}{s_1^{NOp}} - \frac{1}{2} = \frac{3,93}{0,0695} - \frac{1}{2} = 56,025$$

V podélné řadě byl zvolen počet trubek $n_{tr}^{NOp} = 56$.

Je třeba vypočítat měrný objem páry ve NOp:

$$v_p^{NOp} = \frac{v_{1NO} + v_{2NO}}{2} = \frac{0,418 + 0,284}{2} = 0,351 m^3 \cdot kg^{-1}$$

Kontrola rychlosti proudění pro zvolený počet trubek, musí být v rozmezí 15 - 25 m·s⁻¹:

$$w_p^{NOp} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PN} \cdot v_p^{NOp}}{\pi \cdot d^{NOp^2} \cdot n_{tr}^{NOp}} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 4,433 \cdot 0,351}{\pi \cdot 0,0381^2 \cdot 56} = 23,153 m \cdot s^{-1}$$

Rychlost je v mezích a proto pro zvolený počet trubek vyhovuje.

4.5.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalin pro NOp

Výpočet entalpie spalin bodu F:

$$i_{SPF} = i_{SPE} - \frac{Q^{NOp}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 324,954 - \frac{0,511}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 319,997 kJ \cdot m^3$$

Návrhová teplota v bodě F se vypočte interpolací a za pomoci entalpie v bodě F:

$$t_{Fn} = 200 + \frac{(i_{SPF} - i_{SP200}) \cdot 100}{i_{SP300} - i_{SP200}} = 200 + \frac{(319,997 - 267,165) \cdot 100}{404,464 - 267,165} = 238,48^\circ C$$

Střední teplota proudu spalin NOp je aritmetickým průměrem hodnot bodů E a F:

$$t_{SP}^{NOp} = \frac{t_E + t_{Fn}}{2} = \frac{242,09 + 238,48}{2} = 240,285^\circ C$$

Skutečný objemový průtok NOp se zjistí pomocí vzorce (3-4):

$$M_{SP0s}^{NOp} = M_{SPO} \cdot \frac{t_{SP}^{NOp} + 273,15}{273,15} = 103,234 \cdot \frac{240,285 + 273,15}{273,15} = 194,046 m^3 \cdot s^{-1}$$

Skutečná průtočná plocha ze strany spalin NOp lze získat ze vzorce (3-6):

$$\begin{aligned} S_{SP-PR}^{NOp} &= \xi \cdot l \cdot D^{NOp} \cdot n_{tr}^{NOp} - 2 \cdot h_z^{NOp} \cdot t_z \cdot l \cdot n_z^{NOp} \cdot n_{tr}^{NOp} = \\ &= 3,93 \cdot 10,98 \cdot 10,98 \cdot 0,0445 \cdot 56 - 2 \cdot 0,01 \cdot 0,001 \cdot 10,98 \cdot 200 \cdot 56 = \\ &= 13,307 m^2 \end{aligned}$$

Skutečná rychlost spalin se vypočítá z vzorce:

$$w_{SP}^{NOp} = \frac{M_{SP0s}^{NOp}}{S_{SP-PR}^{NOp}} = \frac{194,046}{13,307} = 14,582 m \cdot s^{-1}$$

4.5.4. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalin NOP

4.5.4.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí NOP

Ze vzorce je získána hodnota s^{NOP} :

$$s^{NOP} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{NOP}}{2}\right)^2 + s_2^{NOP}} = \sqrt{\left(\frac{69,5}{2}\right)^2 + 117^2} = 122 \text{ mm}$$

Poměrné podélné rozteče:

$$\sigma_1^{NOP} = \frac{s_1^{NOP}}{D^{NOP}} = \frac{69,5}{44,5} = 1,562$$

$$\sigma_2^{NOP} = \frac{s^{NOP}}{D^{NOP}} = \frac{122}{44,5} = 2,743$$

Vzorec pro výpočet poměrných podélných roztečí:

$$\varphi_{\sigma}^{NOP} = \frac{\sigma_1^{NOP} - 1}{\sigma_2^{NOP} - 1} = \frac{1,562 - 1}{2,743 - 1} = 0,322$$

Z obr. 8.4. na str. 116 [1] lze určit součinitel opravy. Předpoklad počtu podélných řad menší než 5.

$$c_z^{VOpI} = 0,9$$

Interpolací hodnot z tab. 3-3 na str. 24 [1] lze zjistit součinitel tepelné vodivosti spalin a součinitel kinematické viskozity spalin. K tomu je využita střední teplota spalin t_{SP}^{NOP} a objemový podíl vodní páry ve spalinách 9,7%:

$$\lambda_{SP}^{NOP} = 0,043 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\nu_{SP}^{NOP} = 3,802 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí lze spočítat ze vzorce:

$$\begin{aligned} \alpha_K^{NOP} &= 0,23 \cdot c_z^{NOP} \cdot \varphi_{\sigma}^{NOP 0,2} \cdot \frac{\lambda_{SP}^{NOP}}{s_z^{NOP}} \cdot \left(\frac{D^{NOP}}{s_z^{NOP}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z^{NOP}}{s_z^{NOP}}\right)^{-0,14} \\ &\cdot \left(\frac{W_{SP}^{NOP} \cdot s_z^{NOP}}{\nu_{SP}^{NOP}}\right)^{0,65} = 0,23 \cdot 0,9 \cdot 0,322^{0,2} \cdot \frac{0,043}{5 \cdot 10^{-3}} \\ &\cdot \left(\frac{0,0445}{5 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,01}{5 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{14,582 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{3,802 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,65} \\ &= 53,843 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

4.5.4.2. Návrh součinitele efektivnosti žeber NOp

Součinitel β lze zjistit ze vzorce:

$$\beta^{NOp} = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{NOp}}{t_{\dot{z}} \cdot \lambda_{\dot{z}} \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{NOp})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 53,843}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 53,843)}} = 45,787 \text{m}^{-1}$$

Součinitel efektivnosti žeber lze zjistit z grafu na str. 114 [1] za pomoci:

$$\beta^{NOp} \cdot h_{\dot{z}}^{NOp} = 45,787 \cdot 0,01 = 0,458$$

$$\frac{D_{\dot{z}}^{NOp}}{D^{NOp}} = \frac{64,5}{44,5} = 1,449$$

$$\Rightarrow E^{NOp} = 0,93$$

4.5.4.3. Podíly teplosměnných ploch žeber a celkové plochy ze strany spalín NOp

Pro kruhové trubky s kruhovými žebry:

$$\frac{S_{\dot{z}}^{NOp}}{S^{NOp}} = \frac{\left(\frac{D_{\dot{z}}^{NOp}}{D^{NOp}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_{\dot{z}}^{NOp}}{D^{NOp}}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_{\dot{z}}^{NOp}}{D^{NOp}} - \frac{t_{\dot{z}}}{D^{NOp}}\right)} = \frac{\left(\frac{64,5}{44,5}\right)^2 - 1}{\left(\frac{64,5}{44,5}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{5}{44,5} - \frac{1}{44,5}\right)} = 0,86$$

Pro volné části trubky, bez žeber:

$$\frac{S_h^{NOp}}{S^{NOp}} = 1 - \frac{S_{\dot{z}}^{NOp}}{S^{NOp}} = 1 - 0,86 = 0,14$$

4.5.4.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalín NOp

Vychází se z následujícího vzorce:

$$\alpha_{1r}^{NOp} = \left(\frac{S_{\dot{z}}^{NOp}}{S^{NOp}} \cdot E^{NOp} \cdot \mu + \frac{S_h^{NOp}}{S^{NOp}}\right) \cdot \frac{\psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{NOp}}{1 + \varepsilon \cdot \psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{NOp}} =$$

$$= (0,86 \cdot 0,93 \cdot 1 + 0,14) \cdot \frac{0,85 \cdot 53,843}{1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 53,843} = 39,406 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

4.5.5. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany páry NOp

Hodnoty tepelné vodivosti vodní páry, Prandtlova čísla a součinitele dynamické viskozity zjistím za pomoci středního tlaku a střední teploty páry z programu X-Steam.

$$p_P^{NOp} = \frac{p_{1NO} + p_{2NO}}{2} = \frac{0,52 + 0,67}{2} = 0,595 \text{MPa}$$

$$t_p^{NOp} = \frac{t_{1NO} + t_{2NO}}{2} = \frac{210 + 163,19}{2} = 186,595^\circ\text{C}$$

$$\lambda_p^{NOp} = 0,0305314 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Pr}_p^{NOp} = 1,033$$

$$\mu_p^{NOp} = 1,546 \cdot 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$$

Součinitel kinematické viskozity vodní páry:

$$\nu_p^{NOp} = \mu_p^{NOp} \cdot \nu_p^{NOp} = 1,546 \cdot 10^{-5} \cdot 0,351 = 5,426 \cdot 10^{-7} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Ekvivalentní průměr při proudění uvnitř trubek se rovná vnitřnímu průměru trubek:

$$d_e^{NOp} = d^{NOp} = 38,1 \text{mm}$$

Součinitel přestupu tepla ze strany páry získáno ze vzorce:

$$\begin{aligned} \alpha_{2r}^{NOp} &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_p^{NOp}}{d_e^{NOp}} \cdot \left(\frac{w_p^{NOp} \cdot d_e^{NOp}}{\nu_p^{NOp}} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_p^{NOp 0,4} \cdot c_t^{NOp} \cdot c_1^{NOp} \cdot c_m^{NOp} \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,0305314}{0,0381} \cdot \left(\frac{23,153 \cdot 0,0381}{5,426 \cdot 10^{-7}} \right) \cdot 1,033 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 275,422 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

4.5.6. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu NOp

Teplosměnná plocha ze strany spalín na 1m délky trubky:

$$\begin{aligned} S_{SP-1m}^{NOp} &= \pi \cdot D^{NOp} + 2 \cdot \pi \cdot n_z^{NOp} \cdot \left(\frac{D_z^{NOp 2} - D^{NOp 2}}{4} \right) \\ &= \pi \cdot 0,0445 + 2 \cdot \pi \cdot 200 \cdot \left(\frac{0,0645^2 - 0,0445^2}{4} \right) = 0,825 \text{m} \end{aligned}$$

Teplosměnná plocha ze strany páry na 1m délky trubky:

$$S_{p-1m}^{NOp} = \pi \cdot d^{NOp} = \pi \cdot 0,0381 = 0,12 \text{m}$$

Součinitel prostupu tepla:

$$\begin{aligned} K^{NOp} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}^{NOp}} + \frac{1}{\alpha_{2r}^{NOp}} \cdot \frac{S_{SP-1m}^{NOp}}{S_{p-1m}^{NOp}} + \varepsilon} = \frac{1}{39,406 + \frac{1}{275,422} \cdot \frac{0,825}{0,12} + 0,002} \\ &= 19,087 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

Logaritmický spád:

$$\Delta t_1^{NOp} = t_E - t_{1NO} = 242,09 - 210 = 32,09^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2^{NOp} = t_{Fn} - t_{2NO} = 238,48 - 163,19 = 75,29^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{ln}^{NOp} = \frac{\Delta t_2^{NOp} - \Delta t_1^{NOp}}{\ln \left(\frac{\Delta t_2^{NOp}}{\Delta t_1^{NOp}} \right)} = \frac{75,29 - 32,09}{\ln \left(\frac{75,29}{32,09} \right)} = 50,656^\circ\text{C}$$

4.5.7. Návrh počtu podélných řad NOP

Celková teplosměnná plocha ze strany spalin:

$$S_{SP}^{NOP} = \frac{Q^{NOP}}{K^{NOP} \cdot \Delta t_{ln}^{NOP}} = \frac{511}{319,087 \cdot 50,656} = 529,056 m^2$$

Plocha ze strany spalin na jednu řadu:

$$S_{SP-1r}^{NOP} = S_{SP-1m}^{NOP} \cdot 1 \cdot n_{tr}^{NOP} = 0,825 \cdot 10,98 \cdot 56 = 506,843 m^2$$

Počet podélných řad:

$$n_R^{NOP} = \frac{S_{SP}^{NOP}}{S_{SP-1r}^{NOP}} = \frac{529,056}{506,843} = 1,044$$

Hodnota je zaokrouhlena na:

$$n_R^{NOP} = 1$$

4.5.8. Výpočet skutečného předaného tepla NOP

Skutečná teplosměnná plocha pro zvolený počet řad:

$$S_{SPs}^{NOP} = S_{SP-1r}^{NOP} \cdot n_R^{NOP} = 506,843 \cdot 1 = 506,843 m^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_s^{NOP} = K^{NOP} \cdot S_{SPs}^{NOP} \cdot \Delta t_{ln}^{NOP} = 19,087 \cdot 506,843 \cdot 50,656 = 0,49 MW$$

Původní hodnota:

$$Q^{NOP} = 0,511 MW$$

Kontrola rozdílu (tolerance do 5%):

$$x_Q^{NOP} = \left| 5 \cdot \frac{Q_s^{NOP} - Q^{NOP}}{Q_s^{NOP} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{0,49 - 0,511}{0,49 \cdot 0,05} \right| = 4,383\%$$

Rozdíl je v toleranci, tudíž zvolený počet řad vyhovuje.

4.5.9. Výpočet skutečné teploty spalin bodu F

Skutečná entalpie bodu F:

$$i_{SPF} = i_{SPE} - \frac{Q_s^{NOP}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 324,954 - \frac{0,49}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 320,776 kJ \cdot m^{-3}$$

Skutečná teplota bodu F:

$$t_F = \frac{(i_{SPF} - i_{SP200}) \cdot 100}{i_{SP300} - i_{SP200}} + 200 = \frac{(320,776 - 267,165) \cdot 100}{404,464 - 267,165} + 200 = 239,047^\circ C$$

4.5.10. Přehled navržených hodnot NOp

Příčná rozteč mezi trubkami:	$s_1^{VOpl} = 0,0708\text{m}$
Podélná rozteč mezi trubkami NOp:	$s_2^{VOpl} = 0,117\text{m}$
Počet podélných řad trubek NOp:	$n_R^{VOpl} = 1$
Počet trubek v jedné podélné řadě NOp:	$n_{tr}^{VOpl} = 56$
Rychlost proudění spalín v kanále NOp:	$w_{SP}^{VOpl} = 14,582\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Rychlost proudění páry v trubkách NOp:	$w_P^{VOpl} = 23,153\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Skutečné teplo předané v NOp:	$Q_s^{VOpl} = 0,49\text{MW}$
Skutečná teplota spalín v bodě F:	$t_F = 239,047^\circ\text{C}$

4.6. Návrh nízkotlakého výparníku (NOv)

4.6.1. Vstupní parametry NOv

Vstupní parametry pro výpočet:

Teplo předané ve NOv	$Q^{NOv} = 9,183\text{MW}$
Hmotnostní průtok páry nízkotl. okruhem	$M_{PN} = 4,433\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
Teplota spalín v bodě F	$t_F = 239,047^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 2NO	$t_{2NO} = 163,19^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 3NO	$t_{3NO} = 163,19^\circ\text{C}$
Entalpie spalín v bodě F	$i_{SPF} = 320,776\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Entalpie spalín při 100°C	$i_{SP100} = 132,928\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Entalpie spalín při 200°C	$i_{SP200} = 267,165\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$

Zvolené rozměry trubek NOv:

Vnější průměr trubky	$D^{NOv} = 57\text{mm}$
Vnitřní průměr trubky	$d^{NOv} = 51,6\text{mm}$
Tloušťka trubky	$t_{tr}^{NOv} = 3,2\text{mm}$
Tloušťka žeber	$t_z = 1\text{mm}$
Výška žeber	$h_z^{NOv} = 19\text{mm}$
Průměr žeber	$D_z^{NOv} = 95\text{mm}$
Počet žeber na 1m trubky	$n_z^{NOv} = 170$
Rozteč mezi žebry	$s_z^{NOv} = 5,88\text{mm}$

4.6.2. Počet trubek v jedné podélné řadě NOv

Mezera mezi trubkami byla zvolena $a^{NOv} = 1\text{mm}$, hodnota se musí nacházet v rozmezí 5 - 15 mm.

Příčná rozteč mezi trubkami se zjistí ze vztahu:

$$s_1^{NOv} = D_z^{NOv} + a^{NOv} = 95 + 1 = 105\text{mm}$$

Pro návrh počtu trubek lze využít upraveného vzorce (3-5):

$$n_{tr}^{NOv} = \frac{\check{s}}{s_1^{NOv}} - \frac{1}{2} = \frac{3,93}{0,105} - \frac{1}{2} = 36,914$$

V podélné řadě byl zvolen počet trubek $n_{tr}^{NOv} = 37$.

4.6.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalín pro NOv

Výpočet entalpie spalín bodu G:

$$i_{SPG} = i_{SPE} - \frac{Q^{NOv}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 320,776 - \frac{9,183}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 231,791 \text{ kJ} \cdot \text{m}^3$$

Návrhová teplota v bodě G se vypočte interpolací a za pomoci entalpie v bodě G:

$$t_{Gn} = 100 + \frac{(i_{SPG} - i_{SP100}) \cdot 100}{i_{SP200} - i_{SP100}} = 100 + \frac{(231,791 - 132,928) \cdot 100}{267,165 - 132,928} = 173,648^\circ\text{C}$$

Střední teplota proudu spalín NOv je aritmetickým průměrem hodnot bodů F a G:

$$t_{SP}^{NOv} = \frac{t_F + t_{Gn}}{2} = \frac{239,047 + 173,648}{2} = 206,348^\circ\text{C}$$

Skutečný objemový průtok NOv se zjistí pomocí vzorce (3-4):

$$M_{SPoS}^{NOv} = M_{SPO} \cdot \frac{t_{SP}^{NOv} + 273,15}{273,15} = 103,234 \cdot \frac{206,348 + 273,15}{273,15} = 181,22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Skutečná průtočná plocha ze strany spalín VOv lze získat ze vzorce (3-6):

$$\begin{aligned} S_{SP-PR}^{NOv} &= \check{s} \cdot l \cdot l \cdot D^{NOv} \cdot n_{tr}^{NOv} - 2 \cdot h_z^{NOv} \cdot t_z \cdot l \cdot n_z^{NOv} \cdot n_{tr}^{NOv} = \\ &= 3,93 \cdot 10,98 \cdot -10,98 \cdot 0,057 \cdot 37 - 2 \cdot 0,019 \cdot 0,001 \cdot 10,98 \cdot 170 \cdot 37 = \\ &= 17,346 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Skutečná rychlost spalín se vypočítá z vzorce:

$$w_{SP}^{NOv} = \frac{M_{SPoS}^{NOv}}{S_{SP-PR}^{NOv}} = \frac{181,22}{17,346} = 10,447 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4.6.4. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín NOv

4.6.4.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí NOv

Ze vzorce je získána hodnota s^{NOv} :

$$s^{NOv} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{VOv}}{2}\right)^2 + s_2^{VOv^2}} = \sqrt{\left(\frac{105}{2}\right)^2 + 117^2} = 128 \text{ mm}$$

Poměrné podélné rozteče:

$$\sigma_1^{NOv} = \frac{s_1^{NOv}}{D^{NOv}} = \frac{105}{57} = 1,842$$

$$\sigma_2^{NOv} = \frac{s^{NOv}}{D^{NOv}} = \frac{128}{57} = 2,25$$

Vzorec pro výpočet poměrných podélných roztečí:

$$\varphi_{\sigma}^{NOv} = \frac{\sigma_1^{NOv} - 1}{\sigma_2^{NOv} - 1} = \frac{1,842 - 1}{2,25 - 1} = 0,674$$

Z obr. 8.4. na str. 116 [1] lze určit součinitel opravy. Předpoklad počtu podélných řad větší než 10.

$$c_z^{NOv} = 1$$

Interpolací hodnot z tab. 3-3 na str. 24 [1] lze zjistit součinitel tepelné vodivosti spalín a součinitel kinematické viskozity spalín. K tomu je využita střední teplota spalín t_{SP}^{NOv} a objemový podíl vodní páry ve spalínách 9,7%:

$$\lambda_{SP}^{NOv} = 0,04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\nu_{SP}^{NOv} = 3,362 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí lze spočítat ze vzorce:

$$\begin{aligned} \alpha_K^{NOv} &= 0,23 \cdot c_z^{NOv} \cdot \varphi_{\sigma}^{NOv 0,2} \cdot \frac{\lambda_{SP}^{NOv}}{S_{\dot{z}}^{NOv}} \cdot \left(\frac{D^{NOv}}{S_{\dot{z}}^{NOv}} \right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_{\dot{z}}^{NOv}}{S_{\dot{z}}^{NOv}} \right)^{-0,14} \\ &\cdot \left(\frac{W_{SP}^{NOv} \cdot S_{\dot{z}}^{NOv}}{\nu_{SP}^{NOv}} \right)^{0,65} = 0,23 \cdot 1 \cdot 0,674^{0,2} \cdot \frac{0,04}{5,88 \cdot 10^{-3}} \\ &\cdot \left(\frac{0,057}{5,88 \cdot 10^{-3}} \right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,019}{5,88 \cdot 10^{-3}} \right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{10,447 \cdot 5,88 \cdot 10^{-3}}{3,362 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \\ &= 47,459 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

4.6.4.2. Návrh součinitele efektivnosti žeber NOv

Součinitel β lze zjistit ze vzorce:

$$\begin{aligned} \beta^{NOv} &= \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{NOv}}{t_{\dot{z}} \cdot \lambda_{\dot{z}} \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{NOv})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 47,459}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 47,459)}} \\ &= 43,02 \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$

Součinitel efektivnosti žeber lze zjistit z grafu na str. 114 [1] za pomoci:

$$\beta^{NOv} \cdot h_{\dot{z}}^{NOv} = 46,213 \cdot 0,02 = 0,924$$

$$\frac{D_{\dot{z}}^{NOv}}{D^{NOv}} = \frac{95}{57} = 1,667$$

$$\Rightarrow E^{NOv} = 0,79$$

4.6.4.3. Podíly teplosměnných ploch žebry a celkové plochy ze strany spalín NOv

Pro kruhové trubky s kruhovými žebry:

$$\frac{S_{\dot{z}}^{NOv}}{S^{NOv}} = \frac{\left(\frac{D_{\dot{z}}^{NOv}}{D^{NOv}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_{\dot{z}}^{NOv}}{D^{NOv}}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_{\dot{z}}^{NOv}}{D^{NOv}} - \frac{t_{\dot{z}}}{D^{NOv}}\right)} = \frac{\left(\frac{95}{57}\right)^2 - 1}{\left(\frac{95}{57}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{5,88}{57} - \frac{1}{57}\right)}$$

$$= 0,912$$

Pro volné části trubky, bez žebry:

$$\frac{S_h^{NOv}}{S^{NOv}} = 1 - \frac{S_{\dot{z}}^{NOv}}{S^{NOv}} = 1 - 0,91 = 0,088$$

4.6.4.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalín NOv

Vychází se z následujícího vzorce:

$$\alpha_{1r}^{NOv} = \left(\frac{S_{\dot{z}}^{NOv}}{S^{NOv}} \cdot E^{NOv} \cdot \mu + \frac{S_h^{NOv}}{S^{NOv}}\right) \cdot \frac{\psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{NOv}}{1 + \varepsilon \cdot \psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{NOv}} =$$

$$= (0,912 \cdot 0,79 \cdot 1 + 0,088) \cdot \frac{0,85 \cdot 47,459}{1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 47,459} = 30,178 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

4.6.5. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu NOv

Součinitel prostupu tepla (předpoklad vysoké hodnoty α_{2r}^{NOv} celý člen $1/\alpha_{2r}^{NOv} = 0$):

$$K^{NOv} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}^{NOv}} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{30,178} + 0,002} = 28,461 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$$

Logaritmický spád:

$$\Delta t_1^{NOv} = t_F - t_{2NO} = 239,047 - 163,19 = 75,857^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2^{NOv} = t_{Gh} - t_{3NO} = 173,648 - 163,19 = 10,458^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{ln}^{NOv} = \frac{\Delta t_2^{NOv} - \Delta t_1^{NOv}}{\ln\left(\frac{\Delta t_2^{NOv}}{\Delta t_1^{NOv}}\right)} = \frac{75,857 - 10,458}{\ln\left(\frac{75,857}{10,458}\right)} = 33,006^\circ\text{C}$$

4.6.6. Návrh počtu podélných řad NOv

Celková teplosměnná plocha ze strany spalín:

$$S_{SP}^{NOv} = \frac{Q^{NOv}}{K^{NOv} \cdot \Delta t_{ln}^{NOv}} = \frac{9183}{28,461 \cdot 33,006} = 9776 \text{ m}^2$$

Teplosměnná plocha ze strany spalin na 1m délky trubky:

$$S_{SP-1m}^{NOv} = \pi \cdot D^{NOv} + 2 \cdot \pi \cdot n_z^{NOv} \cdot \left(\frac{D_z^{NOv^2} - D^{NOv^2}}{4} \right) = \pi \cdot 0,057 + 2 \cdot \pi \cdot 170 \cdot \left(\frac{0,95^2 - 0,057^2}{4} \right) = 1,721m$$

Plocha ze strany spalin na jednu řadu:

$$S_{SP-1r}^{NOv} = S_{SP-1m}^{NOv} \cdot l \cdot n_{tr}^{NOv} = 1,721 \cdot 10,98 \cdot 37 = 699,047m^2$$

Počet podélných řad:

$$n_R^{NOv} = \frac{S_{SP}^{NOv}}{S_{SP-1r}^{NOv}} = \frac{9776}{699,047} = 13,984$$

Hodnota je zaokrouhlena na:

$$n_R^{NOv} = 14$$

4.6.7. Výpočet skutečného předaného tepla NOv

Skutečná teplosměnná plocha pro zvolený počet řad:

$$S_{SPs}^{NOv} = S_{SP-1r}^{NOv} \cdot n_R^{NOv} = 699,047 \cdot 14 = 9787m^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_s^{NOv} = K^{NOv} \cdot S_{SPs}^{NOv} \cdot \Delta t_{ln}^{NOv} = 28,461 \cdot 9787 \cdot 33,006 = 9,193MW$$

Původní hodnota:

$$Q^{NOv} = 9,183MW$$

Kontrola rozdílu (tolerance do 5%):

$$x_Q^{NOv} = \left| 5 \cdot \frac{Q_s^{NOv} - Q^{NOv}}{Q_s^{NOv} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{9,193 - 9,183}{9,183 \cdot 0,05} \right| = 0,113\%$$

Rozdíl je v toleranci, tudíž zvolený počet řad vyhovuje.

4.6.8. Výpočet skutečné teploty spalin bodu G

Skutečná entalpie bodu G:

$$i_{SPG} = i_{SPE} - \frac{Q_s^{NOv}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 320,776 - \frac{9193}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 231,69kJ \cdot m^{-3}$$

Skutečná teplota bodu G:

$$t_G = \frac{(i_{SPG} - i_{SP100}) \cdot 100}{i_{SP200} - i_{sp100}} + 100 = \frac{(231,69 - 132,928) \cdot 100}{267,165 - 132,928} + 100 = 173,573°C$$

4.6.9. Přehled navržených hodnot NOv

Příčná rozteč mezi trubkami:	$s_1^{NOv} = 0,105\text{m}$
Podélná rozteč mezi trubkami NOv :	$s_2^{NOv} = 0,117\text{m}$
Počet podélných řad trubek NOv:	$n_R^{NOv} = 14$
Počet trubek v jedné podélné řadě NOv:	$n_{tr}^{NOv} = 37$
Rychlost proudění spalin v kanále NOv:	$w_{SP}^{NOv} = 10,447\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Rychlost proudění páry v trubkách NOv:	$w_P^{NOv} = 8,072\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Skutečné teplo předané v NOv:	$Q_s^{NOv} = 9,193\text{MW}$
Skutečná teplota spalin v bodě G:	$t_G = 173,573^\circ\text{C}$

4.7. Návrh druhého stupně vysokotlakého ekonomizéru (VOe2)

4.7.1. Vstupní parametry VOe2

Vstupní parametry pro výpočet:

Teplo předané ve VOe2	$Q^{VOe2} = 1,73\text{MW}$
Hmotnostní průtok páry vysokotl. okruhem	$M_{PV} = 16,779\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
Teplota spalin v bodě G	$t_G = 173,573^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 7VO	$t_{7VO} = 160^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 8VO	$t_{8VO} = 135^\circ\text{C}$
Entalpie spalin v bodě G	$i_{SPG} = 231,69\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Entalpie spalin při 100°C	$i_{SP100} = 132,928\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Entalpie spalin při 200°C	$i_{SP200} = 267,165\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Měrný objem páry v bodě 7VO	$v_{7VO} = 0,001096\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 8VO	$v_{8VO} = 0,001069\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$

Zvolené rozměry trubek VOe2:

Vnější průměr trubky	$D^{VOe2} = 33,7\text{mm}$
Vnitřní průměr trubky	$d^{VOe2} = 25,7\text{mm}$
Tloušťka trubky	$t_{tr}^{VOe2} = 4\text{mm}$
Tloušťka žeber	$t_z = 1\text{mm}$
Výška žeber	$h_z^{VOe2} = 15\text{mm}$
Průměr žeber	$D_z^{VOe2} = 63,7\text{mm}$
Počet žeber na 1m trubky	$n_z^{VOe2} = 170$
Rozteč mezi žebry	$s_z^{VOe2} = 5,88\text{mm}$

4.7.2. Počet trubek v jedné podélné řadě VOe2

Mezera mezi trubkami byla zvolena a $^{VOe2} = 7\text{mm}$, hodnota se musí nacházet v rozmezí 5 - 15 mm.

Příčná rozteč mezi trubkami se zjistí ze vztahu:

$$s_1^{VOe2} = D_z^{VOe2} + a^{VOe2} = 63,7 + 7 = 70,7\text{mm}$$

Pro návrh počtu trubek lze využít upraveného vzorce (3-5):

$$n_{tr}^{VOe2} = \frac{\check{s}}{s_1^{VOe2}} - \frac{1}{2} = \frac{3,93}{0,0707} - \frac{1}{2} = 55,066$$

V podélné řadě byl zvolen počet trubek $n_{tr}^{VOe2} = 55$.

Je třeba vypočítat měrný objem páry ve VOe2:

$$v_p^{VOe2} = \frac{v_{7VO} + v_{8VO}}{2} = \frac{0,001096 + 0,001069}{2} = 0,001082 m^3 \cdot kg^{-1}$$

Kontrola rychlosti proudění pro zvolený počet trubek, musí být v rozmezí $1-3 m \cdot s^{-1}$:

$$w_p^{VOe2} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_p^{VOe2}}{\pi \cdot d^{VOe2^2} \cdot n_{tr}^{VOe2}} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 16,779 \cdot 0,001082}{\pi \cdot 0,0257^2 \cdot 55} = 0,605 m \cdot s^{-1}$$

Rychlost proudění je nízká, dojde tedy k rozdělní rozváděcího kanálu na dvě části, čímž se rychlost zdvojnásobí a bude vyhovovat.

$$w_p^{VOe2} = 2 \cdot 0,605 = 1,209 m \cdot s^{-1}$$

4.7.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalin pro VOe2

Výpočet entalpie spalin bodu H:

$$i_{SPH} = i_{SPG} - \frac{Q^{VOe2}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 231,69 - \frac{1,73}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 215,186 kJ \cdot m^3$$

Návrhová teplota v bodě H se vypočte interpolací a za pomoci entalpie v bodě H:

$$t_{Hn} = 100 + \frac{(i_{SPH} - i_{SP100}) \cdot 100}{i_{SP200} - i_{SP100}} = 100 + \frac{(215,186 - 132,928) \cdot 100}{267,165 - 132,928} = 161,28^\circ C$$

Střední teplota proudu spalin VOe2 je aritmetickým průměrem hodnot bodů G a H:

$$t_{SP}^{VOe2} = \frac{t_G + t_{Hn}}{2} = \frac{173,573 + 161,28}{2} = 167,426^\circ C$$

Skutečný objemový průtok VOe2 se zjistí pomocí vzorce (3-4):

$$M_{SPOs}^{VOe2} = M_{SPO} \cdot \frac{t_{SP}^{VOe2} + 273,15}{273,15} = 103,234 \cdot \frac{167,426 + 273,15}{273,15} = 166,51 m^3 \cdot s^{-1}$$

Skutečná průtočná plocha ze strany spalin VOe2 lze získat ze vzorce (3-6):

$$\begin{aligned} S_{SP-PR}^{VOe2} &= \check{s} \cdot l - l \cdot D^{VOe2} \cdot n_{tr}^{VOe2} - 2 \cdot h_z^{VOe2} \cdot t_z \cdot l \cdot n_z^{VOe2} \cdot n_{tr}^{VOe2} = \\ &= 3,93 \cdot 10,98 \cdot 10,98 \cdot 0,0337 \cdot 55 - 2 \cdot 0,015 \cdot 0,001 \cdot 10,98 \cdot 170 \cdot 55 = \\ &= 19,695 m^2 \end{aligned}$$

Skutečná rychlost spalin se vypočítá z vzorce:

$$w_{SP}^{VOe2} = \frac{M_{SPOs}^{VOe2}}{S_{SP-PR}^{VOe2}} = \frac{166,51}{19,695} = 8,455 m \cdot s^{-1}$$

4.7.4. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalin VOe2

4.7.4.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí VOe2

Ze vzorce je získána hodnota s^{VOe2} :

$$s^{VOe2} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{VOe2}}{2}\right)^2 + s_2^{VOe2^2}} = \sqrt{\left(\frac{70,7}{2}\right)^2 + 92^2} = 99\text{mm}$$

Poměrné podélné rozteče:

$$\sigma_1^{VOe2} = \frac{s_1^{VOe2}}{D^{VOe2}} = \frac{70,7}{33,7} = 2,098$$

$$\sigma_2^{VOe2} = \frac{s^{VOe2}}{D^{VOe2}} = \frac{99}{33,7} = 2,925$$

Vzorec pro výpočet poměrných podélných roztečí:

$$\varphi_\sigma^{VOe2} = \frac{\sigma_1^{VOe2} - 1}{\sigma_2^{VOe2} - 1} = \frac{2,098 - 1}{2,925 - 1} = 0,57$$

Z obr. 8.4. na str. 116 [1] lze určit součinitel opravy. Předpoklad počtu podélných řad 5 - 10.

$$c_z^{VOe2} = 0,95$$

Interpolací hodnot z tab. 3-3 na str. 24 [1] lze zjistit součinitel tepelné vodivosti spalin a součinitel kinematické viskozity spalin. K tomu je využita střední teplota spalin t_{SP}^{VOe2} a objemový podíl vodní páry ve spalinách 9,7%:

$$\lambda_{SP}^{VOe2} = 0,037\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\nu_{SP}^{VOe2} = 2,912 \cdot 10^{-5} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí lze spočítat ze vzorce:

$$\begin{aligned} \alpha_K^{VOe2} &= 0,23 \cdot c_z^{VOe2} \cdot \varphi_\sigma^{VOe2^{0,2}} \cdot \frac{\lambda_{SP}^{VOe2}}{s_z^{VOe2}} \cdot \left(\frac{D^{VOe2}}{s_z^{VOe2}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z^{VOe2}}{s_z^{VOe2}}\right)^{-0,14} \\ &\cdot \left(\frac{w_{SP}^{VOe2} \cdot s_z^{VOe2}}{u_{SP}^{VOe2}}\right)^{0,65} = 0,23 \cdot 0,95 \cdot 0,57^{0,2} \cdot \frac{0,037}{5,88 \cdot 10^{-3}} \\ &\cdot \left(\frac{0,0337}{5,88 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,015}{5,88 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{8,455 \cdot 5,88 \cdot 10^{-3}}{2,912 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,65} \\ &= 52,986\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

4.7.4.2. Návrh součinitele efektivnosti žebor VOe2

Součinitel β lze zjistit ze vzorce:

$$\beta^{VOe2} = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{VOe2}}{t_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{VOe2})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 52,986}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 52,986)}} = 45,452 \text{m}^{-1}$$

Součinitel efektivnosti žebor lze zjistit z grafu na str. 114 [1] za pomoci:

$$\beta^{VOe2} \cdot h_z^{VOe2} = 45,452 \cdot 0,015 = 0,682$$

$$\frac{D_z^{VOe2}}{D^{VOe2}} = \frac{63,7}{33,7} = 1,89$$

$$\Rightarrow E^{VOe2} = 0,83$$

4.7.4.3. Podíly teplosměnných ploch žebor a celkové plochy ze strany spalin VOe2

Pro kruhové trubky s kruhovými žebry:

$$\frac{S_z^{VOe2}}{S^{VOe2}} = \frac{\left(\frac{D_z^{VOe2}}{D^{VOe2}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_z^{VOe2}}{D^{VOe2}}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_z^{VOe2}}{D^{VOe2}} - \frac{t_z}{D^{VOe2}}\right)} = \frac{\left(\frac{63,7}{33,7}\right)^2 - 1}{\left(\frac{63,7}{33,7}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{5,88}{33,7} - \frac{1}{33,7}\right)} = 0,899$$

Pro volné části trubky, bez žebor:

$$\frac{S_h^{VOe2}}{S^{VOe2}} = 1 - \frac{S_z^{VOe2}}{S^{VOe2}} = 1 - 0,899 = 0,101$$

4.7.4.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalin VOe2

Vychází se z následujícího vzorce:

$$\alpha_{1r}^{VOe2} = \left(\frac{S_z^{VOe2}}{S^{VOe2}} \cdot E^{VOe2} \cdot \mu + \frac{S_h^{VOe2}}{S^{VOe2}}\right) \cdot \frac{\psi_z \cdot \alpha_K^{VOe2}}{1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{VOe2}} =$$

$$= (0,899 \cdot 0,83 \cdot 1 + 0,101) \cdot \frac{0,85 \cdot 52,986}{1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 52,986} = 35,004 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

4.7.5. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VOe2

Součinitel prostupu tepla (předpoklad vysoké hodnoty α_{2r}^{VOe2} celý člen $1/\alpha_{2r}^{VOe2} = 0$):

$$K^{VOe2} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}^{VOe2}} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{35,004} + 0,002} = 32,714 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$$

Logaritmický spád:

$$\Delta t_1^{VOe2} = t_G - t_{7VO} = 173,573 - 160 = 13,573^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2^{VOe2} = t_{Hn} - t_{8VO} = 161,28 - 135 = 26,28^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{ln}^{VOe2} = \frac{\Delta t_2^{VOe2} - \Delta t_1^{VOe2}}{\ln\left(\frac{\Delta t_2^{VOe2}}{\Delta t_1^{VOe2}}\right)} = \frac{26,28 - 13,573}{\ln\left(\frac{26,28}{13,573}\right)} = 19,231^\circ\text{C}$$

4.7.6. Návrh počtu podélných řad VOe2

Celková teplosměnná plocha ze strany spalin:

$$S_{SP}^{VOe2} = \frac{Q^{VOe2}}{K^{VOe2} \cdot \Delta t_{ln}^{VOe2}} = \frac{1,73}{32,714 \cdot 19,231} = 2707\text{m}^2$$

Teplosměnná plocha ze strany spalin na 1m délky trubky:

$$S_{SP-1m}^{VOe2} = \pi \cdot D^{VOe2} + 2 \cdot \pi \cdot n_z^{VOe2} \cdot \left(\frac{D_z^{VOe2^2} - D^{VOe2^2}}{4}\right) = \pi \cdot 0,0337 + 2 \cdot \pi \cdot 170 \cdot \left(\frac{0,0637^2 - 0,0337^2}{4}\right) = 0,886\text{m}$$

Plocha ze strany spalin na jednu řadu:

$$S_{SP-1r}^{VOe2} = S_{SP-1m}^{VOe2} \cdot 1 \cdot n_{tr}^{VOe2} = 0,886 \cdot 10,98 \cdot 55 = 534,904\text{m}^2$$

Počet podélných řad:

$$n_R^{VOe2} = \frac{S_{SP}^{VOe2}}{S_{SP-1r}^{VOe2}} = \frac{2707}{534,904} = 5,061$$

Hodnota je zaokrouhlena na:

$$n_R^{VOe2} = 5$$

4.7.7. Výpočet skutečného předaného tepla VOe2

Skutečná teplosměnná plocha pro zvolený počet řad:

$$S_{SPs}^{VOe2} = S_{SP-1r}^{VOe2} \cdot n_R^{VOe2} = 534,904 \cdot 5 = 2675\text{m}^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_s^{VOe2} = K^{VOe2} \cdot S_{SPs}^{VOe2} \cdot \Delta t_{ln}^{VOe2} = 32,714 \cdot 2675 \cdot 19,231 = 1,683\text{MW}$$

Původní hodnota:

$$Q^{VOe2} = 1,703\text{MW}$$

Kontrola rozdílu (tolerance do 5%):

$$x_Q^{VOe2} = \left| 5 \cdot \frac{Q_s^{VOe2} - Q^{VOe2}}{Q_s^{VOe2} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{1,683 - 1,703}{1,683 \cdot 0,05} \right| = 1,221\%$$

Rozdíl je v toleranci, tudíž zvolený počet řad vyhovuje.

4.7.8. Výpočet skutečné teploty spalin bodu H

Skutečná entalpie bodu H:

$$i_{SPH} = i_{SPG} - \frac{Q_s^{VOe2}}{M_{SP0} \cdot (1 - z_s)} = 231,69 - \frac{1,683}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 214,884 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

Skutečná teplota bodu H:

$$t_H = \frac{(i_{SPH} - i_{SP100}) \cdot 100}{i_{SP200} - i_{SP100}} + 100 = \frac{(214,884 - 132,928) \cdot 100}{267,165 - 132,928} + 100 = 161,053^\circ\text{C}$$

4.7.9. Přehled navržených hodnot VOe2

Příčná rozteč mezi trubkami:	$s_1^{VOe2} = 0,071\text{m}$
Podélná rozteč mezi trubkami VOe2:	$s_2^{VOe2} = 0,092\text{m}$
Počet podélných řad trubek VOe2:	$n_R^{VOe2} = 5$
Počet trubek v jedné podélné řadě VOe2:	$n_{tr}^{VOe2} = 55$
Rychlost proudění spalin v kanále VOe2:	$w_{SP}^{VOe2} = 8,455\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Rychlost proudění vody v trubkách VOe2:	$w_P^{VOe2} = 1,209\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Skutečné teplo předané v VOe2:	$Q_s^{VOe2} = 1,683\text{MW}$
Skutečná teplota spalin v bodě H:	$t_H = 161,053^\circ\text{C}$

4.8. Návrh druhého stupně nízkotlakého ekonomizéru (NOe2)

4.8.1. Vstupní parametry NOe2

Vstupní parametry pro výpočet:

Teplo předané ve NOe2	$Q^{NOe2} = 1,043\text{MW}$
Hmotnostní průtok páry nízkotl. okruhem	$M_{PN} = 4,433\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Teplota spalin v bodě H	$t_H = 161,053^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 4NO	$t_{4NO} = 155,19^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 5NO	$t_{5NO} = 100^\circ\text{C}$
Entalpie spalin v bodě H	$i_{SPH} = 214,884\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Entalpie spalin při 100°C	$i_{SP100} = 132,928\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Entalpie spalin při 200°C	$i_{SP200} = 267,165\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Měrný objem páry v bodě 4NO	$v_{4NO} = 0,001096\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 5NO	$v_{5NO} = 0,001043\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Zvolené rozměry trubek NOe2:

Vnější průměr trubky	$D^{NOe2} = 25\text{mm}$
Vnitřní průměr trubky	$d^{NOe2} = 18,6\text{mm}$
Tloušťka trubky	$t_{tr}^{NOe2} = 3,2\text{mm}$
Tloušťka žeber	$t_z = 1\text{mm}$
Výška žeber	$h_z^{NOe2} = 13\text{mm}$
Průměr žeber	$D_z^{NOe2} = 51\text{mm}$
Počet žeber na 1m trubky	$n_z^{NOe2} = 190$
Rozteč mezi žebry	$s_z^{NOe2} = 5,263\text{mm}$

4.8.2. Počet trubek v jedné podélné řadě NO_{e2}

Mezera mezi trubkami byla zvolena $a^{\text{NOe2}} = 9$ mm, hodnota se musí nacházet v rozmezí 5 - 15 mm.

Příčná rozteč mezi trubkami se zjistí ze vztahu:

$$s_1^{\text{NOe2}} = D_z^{\text{NOe2}} + a^{\text{NOe2}} = 51 + 9 = 60\text{mm}$$

Pro návrh počtu trubek lze využít upraveného vzorce (3-5):

$$n_{tr}^{\text{NOe2}} = \frac{\check{s}}{s_1^{\text{NOe2}}} - \frac{1}{2} = \frac{3,93}{0,06} - \frac{1}{2} = 64,975$$

V podélné řadě byl zvolen počet trubek $n_{tr}^{\text{NOe2}} = 65$.

Je třeba vypočítat měrný objem páry ve NO_{e2}:

$$v_P^{\text{NOe2}} = \frac{v_{4NO} + v_{5NO}}{2} = \frac{0,001096 + 0,001043}{2} = 0,00107\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Kontrola rychlosti proudění pro zvolený počet trubek, musí být v rozmezí 1-3m·s⁻¹:

$$w_P^{\text{NOe2}} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PN} \cdot v_P^{\text{NOe2}}}{\pi \cdot d^{\text{NOe2}2} \cdot n_{tr}^{\text{NOe2}}} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 4,433 \cdot 0,00107}{\pi \cdot 0,0186^2 \cdot 65} = 0,255\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost proudění je nízká, dojde tedy k rozdělení rozváděcího kanálu na čtyři části, čímž se rychlost zvýší čtyřikrát a bude vyhovovat.

$$w_P^{\text{NOe2}} = 4 \cdot 0,255 = 1,02\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4.8.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalín pro NO_{e2}

Výpočet entalpie spalín bodu I:

$$i_{SP1} = i_{SPH} - \frac{Q^{\text{NOe2}}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 214,884 - \frac{1,043}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 204,783\text{kJ} \cdot \text{m}^3$$

Návrhová teplota v bodě I se vypočte interpolací a za pomoci entalpie v bodě I:

$$t_{In} = 100 + \frac{(i_{SPH} - i_{SP100}) \cdot 100}{i_{SP200} - i_{SP100}} = 100 + \frac{(204,783 - 132,928) \cdot 100}{267,165 - 132,928} = 153,529^\circ\text{C}$$

Střední teplota proudu spalín NO_{e2} je aritmetickým průměrem hodnot bodů H a I:

$$t_{SP}^{\text{NOe2}} = \frac{t_H + t_{In}}{2} = \frac{161,053 + 153,529}{2} = 157,291^\circ\text{C}$$

Skutečný objemový průtok NO_{e2} se zjistí pomocí vzorce (3-4):

$$M_{SPOs}^{\text{NOe2}} = M_{SPO} \cdot \frac{t_{SP}^{\text{NOe2}} + 273,15}{273,15} = 103,234 \cdot \frac{157,291 + 273,15}{273,15} = 162,68\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Skutečná průtočná plocha ze strany spalín VOe2 lze získat ze vzorce (3-6):

$$S_{SP-PR}^{NOe2} = \check{s} \cdot l - l \cdot D^{NOe2} \cdot n_{tr}^{NOe2} - 2 \cdot h_z^{NOe2} \cdot t_z \cdot l \cdot n_z^{NOe2} \cdot n_{tr}^{NOe2} =$$

$$= 3,93 \cdot 10,98 \cdot 10,98 \cdot 0,025 \cdot 65 - 2 \cdot 0,013 \cdot 0,001 \cdot 10,98 \cdot 190 \cdot 65 =$$

$$= 21,757m^2$$

Skutečná rychlost spalín se vypočítá z vzorce:

$$w_{SP}^{NOe2} = \frac{M_{SP}^{NOe2}}{S_{SP-PR}^{NOe2}} = \frac{162,68}{21,757} = 7,477m \cdot s^{-1}$$

4.8.4. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín NOe2

4.8.4.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí NOe2

Ze vzorce je získána hodnota s^{NOe2} :

$$s^{NOe2} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{NOe2}}{2}\right)^2 + s_2^{NOe2}} = \sqrt{\left(\frac{60}{2}\right)^2 + 92^2} = 97mm$$

Poměrné podélné rozteče:

$$\sigma_1^{NOe2} = \frac{s_1^{NOe2}}{D^{NOe2}} = \frac{60}{25} = 2,4$$

$$\sigma_2^{NOe2} = \frac{s^{NOe2}}{D^{NOe2}} = \frac{97}{25} = 3,871$$

Vzorec pro výpočet poměrných podélných roztečí:

$$\varphi_{\sigma}^{NOe2} = \frac{\sigma_1^{NOe2} - 1}{\sigma_2^{NOe2} - 1} = \frac{2,4 - 1}{3,871 - 1} = 0,488$$

Z obr. 8.4. na str. 116 [1] lze určit součinitel opravy. Předpoklad počtu podélných řad méně než 5.

$$c_z^{NOe2} = 0,9$$

Interpolací hodnot z tab. 3-3 na str. 24 [1] lze zjistit součinitel tepelné vodivosti spalín a součinitel kinematické viskozity spalín. K tomu je využita střední teplota spalín t_{SP}^{NOe2} a objemový podíl vodní páry ve spalínách 9,7%:

$$\lambda_{SP}^{NOe2} = 0,036W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

$$\nu_{SP}^{NOe2} = 2,794 \cdot 10^{-5}m^2 \cdot s^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí lze spočítat ze vzorce:

$$\alpha_K^{NOe2} = 0,23 \cdot c_z^{NOe2} \cdot \varphi_{\sigma}^{NOe2,0,2} \cdot \frac{\lambda_{SP}^{NOe2}}{s_z^{NOe2}} \cdot \left(\frac{D^{NOe2}}{s_z^{NOe2}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z^{NOe2}}{s_z^{NOe2}}\right)^{-0,14}$$

$$\cdot \left(\frac{w_{SP}^{NOe2} \cdot s_z^{NOe2}}{\nu_{SP}^{NOe2}}\right)^{0,65} = 0,23 \cdot 0,9 \cdot 0,488^{0,2} \cdot \frac{0,036}{5,263 \cdot 10^{-3}}$$

$$\cdot \left(\frac{0,025}{5,263 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,013}{5,263 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{7,477 \cdot 5,263 \cdot 10^{-3}}{2,794 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,65}$$

$$= 51,874 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

4.8.4.2. Návrh součinitele efektivity žebířek NO₂

Součinitel β lze zjistit ze vzorce:

$$\beta^{NO_2} = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{NO_2}}{t_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{NO_2})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 51,874}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 51,874)}}$$

$$= 45,011 \text{ m}^{-1}$$

Součinitel efektivity žebířek lze zjistit z grafu na str. 114 [1] za pomoci:

$$\beta^{NO_2} \cdot h_z^{NO_2} = 45,011 \cdot 0,013 = 0,585$$

$$\frac{D_z^{NO_2}}{D^{NO_2}} = \frac{51}{25} = 2,04$$

$$\Rightarrow E^{NO_2} = 0,86$$

4.8.4.3. Podíly teplosměnných ploch žebířek a celkové plochy ze strany spalín NO₂

Pro kruhové trubky s kruhovými žebířky:

$$\frac{S_z^{NO_2}}{S^{NO_2}} = \frac{\left(\frac{D_z^{NO_2}}{D^{NO_2}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_z^{NO_2}}{D^{NO_2}}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_z^{NO_2}}{D^{NO_2}} - \frac{t_z}{D^{NO_2}}\right)} = \frac{\left(\frac{51}{25}\right)^2 - 1}{\left(\frac{51}{25}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{5,263}{25} - \frac{1}{25}\right)}$$

$$= 0,903$$

Pro volné části trubky, bez žebířek:

$$\frac{S_h^{NO_2}}{S^{NO_2}} = 1 - \frac{S_z^{NO_2}}{S^{NO_2}} = 1 - 0,903 = 0,097$$

4.8.4.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalín NO₂

Vychází se z následujícího vzorce:

$$\alpha_{1r}^{NO_2} = \left(\frac{S_z^{NO_2}}{S^{NO_2}} \cdot E^{NO_2} \cdot \mu + \frac{S_h^{NO_2}}{S^{NO_2}}\right) \cdot \frac{\psi_z \cdot \alpha_K^{NO_2}}{1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{NO_2}} =$$

$$= (0,903 \cdot 0,86 \cdot 1 + 0,097) \cdot \frac{0,85 \cdot 51,874}{1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 51,874} = 35,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

4.8.5. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu NOe3

Součinitel prostupu tepla (předpoklad vysoké hodnoty α_{2r}^{NOe2} celý člen $1/\alpha_{2r}^{NOe2} = 0$:

$$K^{NOe2} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}^{NOe2}} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{35,4} + 0,002} = 33,059 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$$

Logaritmický spád:

$$\Delta t_1^{NOe2} = t_H - t_{4NO} = 161,053 - 155,19 = 5,863^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2^{NOe2} = t_{1n} - t_{5NO} = 153,529 - 100 = 53,529^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{ln}^{NOe2} = \frac{\Delta t_2^{NOe2} - \Delta t_1^{NOe2}}{\ln\left(\frac{\Delta t_2^{NOe2}}{\Delta t_1^{NOe2}}\right)} = \frac{53,529 - 5,863}{\ln\left(\frac{53,529}{5,863}\right)} = 21,553^\circ\text{C}$$

4.8.6. Návrh počtu podélných řad NOe2

Celková teplosměnná plocha ze strany spalín:

$$S_{SP}^{NOe2} = \frac{Q^{NOe2}}{K^{NOe2} \cdot \Delta t_{ln}^{NOe2}} = \frac{1,043}{33,059 \cdot 21,553} = 1463 \text{ m}^2$$

Teplosměnná plocha ze strany spalín na 1m délky trubky:

$$S_{SP-1m}^{NOe2} = \pi \cdot D^{NOe2} + 2 \cdot \pi \cdot n_z^{NOe2} \cdot \left(\frac{D_z^{NOe2^2} - D^{NOe2^2}}{4} \right) = \pi \cdot 0,025 + 2 \cdot \pi \cdot 190 \cdot \left(\frac{0,051^2 - 0,025^2}{4} \right) = 0,668 \text{ m}$$

Plocha ze strany spalín na jednu řadu:

$$S_{SP-1r}^{NOe2} = S_{SP-1m}^{NOe2} \cdot l \cdot n_{tr}^{NOe2} = 0,668 \cdot 10,98 \cdot 65 = 476,736 \text{ m}^2$$

Počet podélných řad:

$$n_R^{NOe2} = \frac{S_{SP}^{NOe2}}{S_{SP-1r}^{NOe2}} = \frac{1463}{476,736} = 3,068$$

Hodnota je zaokrouhlena na:

$$n_R^{NOe2} = 3$$

4.8.7. Výpočet skutečného předaného tepla NOe2

Skutečná teplosměnná plocha pro zvolený počet řad:

$$S_{SPs}^{NOe2} = S_{SP-1r}^{NOe2} \cdot n_R^{NOe2} = 476,736 \cdot 3 = 1430 \text{ m}^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_s^{NOe2} = K^{NOe2} \cdot S_{SPs}^{NOe2} \cdot \Delta t_{ln}^{NOe2} = 33,059 \cdot 1430 \cdot 21,553 = 1,019 \text{ MW}$$

Původní hodnota:

$$Q^{\text{NOe2}} = 1,042\text{MW}$$

Kontrola rozdílu (tolerance do 5%):

$$x_Q^{\text{NOe2}} = \left| 5 \cdot \frac{Q_s^{\text{NOe2}} - Q^{\text{NOe2}}}{Q_s^{\text{NOe2}} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{1,042 - 1,019}{1,042 \cdot 0,05} \right| = 2,283\%$$

Rozdíl je v toleranci, tudíž zvolený počet řad vyhovuje.

4.8.8. Výpočet skutečné teploty spalin bodu I

Skutečná entalpie bodu I:

$$i_{\text{SPI}} = i_{\text{SPH}} - \frac{Q_s^{\text{NOe2}}}{M_{\text{SPO}} \cdot (1 - z_s)} = 231,69 - \frac{1,042}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 205,09\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

Skutečná teplota bodu I:

$$t_I = \frac{(i_{\text{SPH}} - i_{\text{SP100}}) \cdot 100}{i_{\text{SP200}} - i_{\text{sp100}}} + 100 = \frac{(214,884 - 132,928) \cdot 100}{267,165 - 132,928} + 100 = 153,697^\circ\text{C}$$

4.8.9. Přehled navržených hodnot NOe2

Příčná rozteč mezi trubkami:	$s_1^{\text{NOe2}} = 0,06\text{m}$
Podélná rozteč mezi trubkami NOe2:	$s_2^{\text{NOe2}} = 0,092\text{m}$
Počet podélných řad trubek NOe2:	$n_R^{\text{NOe2}} = 3$
Počet trubek v jedné podélné řadě NOe2:	$n_{\text{tr}}^{\text{NOe2}} = 65$
Rychlost proudění spalin v kanále NOe2:	$w_{\text{SP}}^{\text{NOe2}} = 7,477\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Rychlost proudění vody v trubkách NOe2:	$w_P^{\text{NOe2}} = 1,02\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Skutečné teplo předané v NOe2:	$Q_s^{\text{NOe2}} = 1,019\text{MW}$
Skutečná teplota spalin v bodě I:	$t_I = 153,697^\circ\text{C}$

4.9. Návrh prvního stupně vysokotlakého ekonomizéru (VOe1)

4.9.1. Vstupní parametry VOe1

Vstupní parametry pro výpočet:

Teplo předané ve VOe1	$Q^{\text{VOe1}} = 4,883\text{MW}$
Hmotnostní průtok páry vysokotl. okruhem	$M_{\text{PV}} = 16,779\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Teplota spalin v bodě I	$t_I = 153,697^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 8VO	$t_{8\text{VO}} = 135^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 9VO	$t_{9\text{VO}} = 62^\circ\text{C}$
Entalpie spalin v bodě I	$i_{\text{SPI}} = 205,09\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Entalpie spalin při 100°C	$i_{\text{SP100}} = 132,928\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Entalpie spalin při 200°C	$i_{\text{SP200}} = 267,165\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Měrný objem páry v bodě 8VO	$v_{8\text{VO}} = 0,001069\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 9VO	$v_{9\text{VO}} = 0,001014\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Zvolené rozměry trubek VOe1:

Vnější průměr trubky	$D^{VOe1} = 33,7\text{mm}$
Vnitřní průměr trubky	$d^{VOe1} = 25,7\text{mm}$
Tloušťka trubky	$t_{tr}^{VOe1} = 4\text{mm}$
Tloušťka žeber	$t_z = 1\text{mm}$
Výška žeber	$h_z^{VOe1} = 15\text{mm}$
Průměr žeber	$D_z^{VOe1} = 63,7\text{mm}$
Počet žeber na 1m trubky	$n_z^{VOe1} = 200$
Rozeč mezi žebry	$s_z^{VOe1} = 5\text{mm}$

4.9.2. Počet trubek v jedné podélné řadě VOe1

Mezera mezi trubkami byla zvolena $a^{VOe1} = 11\text{mm}$, hodnota se musí nacházet v rozmezí 5 - 15 mm.

Příčná rozeč mezi trubkami se zjistí ze vztahu:

$$s_1^{VOe1} = D_z^{VOe1} + a^{VOe1} = 63,7 + 11 = 74,7\text{mm}$$

Pro návrh počtu trubek lze využít upraveného vzorce (3-5):

$$n_{tr}^{VOe1} = \frac{\xi}{s_1^{VOe1}} - \frac{1}{2} = \frac{3,93}{0,0747} - \frac{1}{2} = 52,09$$

V podélné řadě byl zvolen počet trubek $n_{tr}^{VOe1} = 52$.

Je třeba vypočítat měrný objem páry ve VOe1:

$$v_p^{VOe1} = \frac{v_{8VO} + v_{9VO}}{2} = \frac{0,001069 + 0,001014}{2} = 0,001041\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Kontrola rychlosti proudění pro zvolený počet trubek, musí být v rozmezí $1-3\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$:

$$w_p^{VOe1} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_p^{VOe1}}{\pi \cdot d^{VOe1^2} \cdot n_{tr}^{VOe1}} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 16,779 \cdot 0,001041}{\pi \cdot 0,0257^2 \cdot 52} = 0,615\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost proudění je nízká, dojde tedy k rozdělení rozváděcího kanálu na dvě části, čímž se rychlost zdvojnásobí a bude vyhovovat.

$$w_p^{VOe1} = 2 \cdot 0,615 = 1,231\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4.9.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalín pro VOe1

Výpočet entalpie spalín bodu J:

$$i_{SPJ} = i_{SPI} - \frac{Q^{VOe1}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 205,09 - \frac{4,883}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 157,687\text{kJ} \cdot \text{m}^3$$

Návrhová teplota v bodě J se vypočte interpolací a za pomoci entalpie v bodě J:

$$t_{jn} = 100 + \frac{(i_{SPJ} - i_{SP100}) \cdot 100}{i_{SP200} - i_{SP100}} = 100 + \frac{(157,687 - 132,928) \cdot 100}{267,165 - 132,928} = 118,445^\circ\text{C}$$

Střední teplota proudu spalin VOe1 je aritmetickým průměrem hodnot bodů I a J:

$$t_{SP}^{VOe1} = \frac{t_I + t_{jn}}{2} = \frac{153,697 + 118,445}{2} = 136,071^\circ\text{C}$$

Skutečný objemový průtok VOe1 se zjistí pomocí vzorce (3-4):

$$M_{SPoS}^{VOe1} = M_{SP0} \cdot \frac{t_{SP}^{VOe1} + 273,15}{273,15} = 103,234 \cdot \frac{136,071 + 273,15}{273,15} = 154,66 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Skutečná průtočná plocha ze strany spalin VOe1 lze získat ze vzorce (3-6):

$$\begin{aligned} S_{SP-PR}^{VOe1} &= \check{s} \cdot l - l \cdot D^{VOe1} \cdot n_{tr}^{VOe1} - 2 \cdot h_z^{VOe1} \cdot t_z \cdot l \cdot n_z^{VOe1} \cdot n_{tr}^{VOe1} = \\ &= 3,93 \cdot 10,98 \cdot 10,98 \cdot 0,0337 \cdot 52 - 2 \cdot 0,015 \cdot 0,001 \cdot 10,98 \cdot 200 \cdot 52 = \\ &= 20,459 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Skutečná rychlost spalin se vypočítá z vzorce:

$$w_{SP}^{VOe1} = \frac{M_{SPoS}^{VOe1}}{S_{SP-PR}^{VOe1}} = \frac{154,66}{20,459} = 7,56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4.9.4. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalin VOe1

4.9.4.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí VOe1

Ze vzorce je získána hodnota s^{VOe1} :

$$s^{VOe1} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{VOe1}}{2}\right)^2 + s_2^{VOe1^2}} = \sqrt{\left(\frac{74,7}{2}\right)^2 + 92^2} = 99 \text{ mm}$$

Poměrné podélné rozteče:

$$\sigma_1^{VOe1} = \frac{s_1^{VOe1}}{D^{VOe1}} = \frac{74,7}{33,7} = 2,217$$

$$\sigma_2^{VOe1} = \frac{s^{VOe1}}{D^{VOe1}} = \frac{99}{33,7} = 2,946$$

Vzorec pro výpočet poměrných podélných roztečí:

$$\varphi_\sigma^{VOe1} = \frac{\sigma_1^{VOe1} - 1}{\sigma_2^{VOe1} - 1} = \frac{2,217 - 1}{2,946 - 1} = 0,625$$

Z obr. 8.4. na str. 116 [1] lze určit součinitel opravy. Předpoklad počtu podélných řad 5 - 10.

$$c_z^{VOe1} = 0,95$$

Interpolací hodnot z tab. 3-3 na str. 24 [1] lze zjistit součinitel tepelné vodivosti spalin a součinitel kinematické viskozity spalin. K tomu je využita střední teplota spalin t_{SP}^{VOe1} a objemový podíl vodní páry ve spalinách 9,7%:

$$\lambda_{SP}^{VOe1} = 0,034 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\nu_{SP}^{VOe1} = 2,557 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí lze spočítat ze vzorce:

$$\alpha_K^{VOe1} = 0,23 \cdot c_z^{VOe1} \cdot \varphi_\sigma^{VOe1 0,2} \cdot \frac{\lambda_{SP}^{VOe1}}{s_z^{VOe1}} \cdot \left(\frac{D^{VOe1}}{s_z^{VOe1}} \right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z^{VOe1}}{s_z^{VOe1}} \right)^{-0,14}$$

$$\cdot \left(\frac{w_{SP}^{VOe1} \cdot s_z^{VOe1}}{\nu_{SP}^{VOe1}} \right)^{0,65} = 0,23 \cdot 0,95 \cdot 0,625^{0,2} \cdot \frac{0,034}{5 \cdot 10^{-3}}$$

$$\cdot \left(\frac{0,0337}{5 \cdot 10^{-3}} \right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,015}{5 \cdot 10^{-3}} \right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{7,56 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{2,557 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65}$$

$$= 47,556 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

4.9.4.2. Návrh součinitele efektivnosti žeber VOe1

Součinitel β lze zjistit ze vzorce:

$$\beta^{VOe1} = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{VOe1}}{t_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{VOe1})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 47,556}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 47,556)}}$$

$$= 43,243 \text{ m}^{-1}$$

Součinitel efektivnosti žeber lze zjistit z grafu na str. 114 [1] za pomoci:

$$\beta^{VOe1} \cdot h_z^{VOe1} = 43,243 \cdot 0,015 = 0,649$$

$$\frac{D_z^{VOe1}}{D^{VOe1}} = \frac{63,7}{33,7} = 1,89$$

$$\Rightarrow E^{VOe1} = 0,85$$

4.9.4.3. Podíly teplosměnných ploch žeber a celkové plochy ze strany spalin VOe1

Pro kruhové trubky s kruhovými žebry:

$$\frac{S_z^{VOe1}}{S^{VOe1}} = \frac{\left(\frac{D_z^{VOe1}}{D^{VOe1}} \right)^2 - 1}{\left(\frac{D_z^{VOe1}}{D^{VOe1}} \right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{s_z^{VOe1}}{D^{VOe1}} - \frac{t_z}{D^{VOe1}} \right)} = \frac{\left(\frac{63,7}{33,7} \right)^2 - 1}{\left(\frac{63,7}{33,7} \right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{5}{33,7} - \frac{1}{33,7} \right)}$$

$$= 0,916$$

Pro volné části trubky, bez žeber:

$$\frac{S_h^{VOe1}}{S^{VOe1}} = 1 - \frac{S_{\dot{z}}^{VOe1}}{S^{VOe1}} = 1 - 0,916 = 0,084$$

4.9.4.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalin VOe1

Vychází se z následujícího vzorce:

$$\begin{aligned} \alpha_{1r}^{VOe1} &= \left(\frac{S_{\dot{z}}^{VOe1}}{S^{VOe1}} \cdot E^{VOe1} \cdot \mu + \frac{S_h^{VOe1}}{S^{VOe1}} \right) \cdot \frac{\psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_k^{VOe1}}{1 + \varepsilon \cdot \psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_k^{VOe1}} = \\ &= (0,916 \cdot 0,85 \cdot 1 + 0,084) \cdot \frac{0,85 \cdot 47,556}{1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 47,556} = 32,263 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

4.9.5. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VOe1

Součinitel prostupu tepla (předpoklad vysoké hodnoty α_{2r}^{VOe1} celý člen $1/\alpha_{2r}^{VOe1} = 0$:

$$K^{VOe1} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}^{VOe1}} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{32,263} + 0,002} = 30,307 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$$

Logaritmický spád:

$$\Delta t_1^{VOe1} = t_1 - t_{8VO} = 153,697 - 135 = 18,697^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2^{VOe1} = t_{1n} - t_{9VO} = 118,445 - 62 = 56,445^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{ln}^{VOe1} = \frac{\Delta t_2^{VOe1} - \Delta t_1^{VOe1}}{\ln\left(\frac{\Delta t_2^{VOe1}}{\Delta t_1^{VOe1}}\right)} = \frac{56,445 - 18,697}{\ln\left(\frac{56,445}{18,697}\right)} = 34,164^\circ\text{C}$$

4.9.6. Návrh počtu podélných řad VOe1

Celková teplosměnná plocha ze strany spalin:

$$S_{SP}^{VOe1} = \frac{Q^{VOe1}}{K^{VOe1} \cdot \Delta t_{ln}^{VOe1}} = \frac{4,883}{30,307 \cdot 34,164} = 4716 \text{ m}^2$$

Teplosměnná plocha ze strany spalin na 1m délky trubky:

$$\begin{aligned} S_{SP-1m}^{VOe1} &= \pi \cdot D^{VOe1} + 2 \cdot \pi \cdot n_{\dot{z}}^{VOe1} \cdot \left(\frac{D_{\dot{z}}^{VOe1^2} - D^{VOe1^2}}{4} \right) = \pi \cdot 0,0337 + 2 \cdot \pi \cdot 200 \cdot \\ &\cdot \left(\frac{0,0637^2 - 0,0337^2}{4} \right) = 1,024 \text{ m} \end{aligned}$$

Plocha ze strany spalin na jednu řadu:

$$S_{SP-1r}^{VOe1} = S_{SP-1m}^{VOe1} \cdot l \cdot n_{tr}^{VOe1} = 1,024 \cdot 10,98 \cdot 52 = 584,31 \text{ m}^2$$

Počet podélných řad:

$$n_R^{VOe1} = \frac{S_{SP}^{VOe1}}{S_{SP-1r}^{VOe1}} = \frac{4716}{584,31} = 8,071$$

Hodnota je zaokrouhlena na:

$$n_R^{VOe1} = 8$$

4.9.7. Výpočet skutečného předaného tepla VOe1

Skutečná teplosměnná plocha pro zvolený počet řad:

$$S_{SPs}^{VOe1} = S_{SP-1r}^{VOe1} \cdot n_R^{VOe1} = 584,31 \cdot 8 = 4674m^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_s^{VOe1} = K^{VOe1} \cdot S_{SPs}^{VOe1} \cdot \Delta t_{in}^{VOe1} = 30,307 \cdot 4674 \cdot 34,164 = 4,84MW$$

Původní hodnota:

$$Q^{VOe1} = 4,883MW$$

Kontrola rozdílu (tolerance do 5%):

$$x_Q^{VOe1} = \left| 5 \cdot \frac{Q_s^{VOe1} - Q^{VOe1}}{Q_s^{VOe1} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{4,84 - 4,883}{4,84 \cdot 0,05} \right| = 0,894\%$$

Rozdíl je v toleranci, tudíž zvolený počet řad vyhovuje.

4.9.8. Výpočet skutečné teploty spalín bodu J

Skutečná entalpie bodu J:

$$i_{SPJ} = i_{SP1} - \frac{Q_s^{VOe1}}{M_{SP0} \cdot (1 - z_s)} = 205,09 - \frac{4,84}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 158,106kJ \cdot m^{-3}$$

Skutečná teplota bodu J:

$$t_j = \frac{(i_{SPJ} - i_{SP100}) \cdot 100}{i_{SP200} - i_{SP100}} + 100 = \frac{(158,106 - 132,928) \cdot 100}{267,165 - 132,928} + 100 = 118,757^\circ C$$

4.9.9. Přehled navržených hodnot VOe1

Příčná rozteč mezi trubkami:	$s_1^{VOe1} = 0,075m$
Podélná rozteč mezi trubkami VOe1 :	$s_2^{VOe1} = 0,092m$
Počet podélných řad trubek VOe1:	$n_R^{VOe1} = 8$
Počet trubek v jedné podélné řadě VOe1:	$n_{tr}^{VOe1} = 52$
Rychlost proudění spalín v kanále VOe1:	$w_{SP}^{VOe1} = 7,56m \cdot s^{-1}$
Rychlost proudění vody v trubkách VOe1:	$w_P^{VOe1} = 1,231 m \cdot s^{-1}$
Skutečné teplo předané v VOe1:	$Q_s^{VOe1} = 4,84MW$
Skutečná teplota spalín v bodě J:	$t_j = 118,757^\circ C$

4.10. Návrh prvního stupně nízkotlakého ekonomizéru (NOe1)

4.10.1. Vstupní parametry NOe1

Vstupní parametry pro výpočet:

Teplo předané ve NOe1	$Q^{\text{NOe1}} = 0,706\text{MW}$
Hmotnostní průtok páry nízkotl. okruhem	$M_{\text{PN}} = 4,433\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
Teplota spalin v bodě J	$t_J = 118,757^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 5NO	$t_{5\text{NO}} = 100^\circ\text{C}$
Teplota páry v bodě 6NO	$t_{6\text{NO}} = 62^\circ\text{C}$
Entalpie spalin v bodě J	$i_{\text{SPJ}} = 158,106\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Entalpie spalin při 100°C	$i_{\text{SP100}} = 132,928\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Entalpie spalin při 200°C	$i_{\text{SP200}} = 267,165\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
Měrný objem páry v bodě 5NO	$v_{5\text{NO}} = 0,001043\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 6NO	$v_{6\text{NO}} = 0,001018\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$

Zvolené rozměry trubek NOe1:

Vnější průměr trubky	$D^{\text{NOe1}} = 25\text{mm}$
Vnitřní průměr trubky	$d^{\text{NOe1}} = 18,6\text{mm}$
Tloušťka trubky	$t_{\text{tr}}^{\text{NOe1}} = 3,2\text{mm}$
Tloušťka žeber	$t_z = 1\text{mm}$
Výška žeber	$h_z^{\text{NOe1}} = 15\text{mm}$
Průměr žeber	$D_z^{\text{NOe1}} = 55\text{mm}$
Počet žeber na 1m trubky	$n_z^{\text{NOe1}} = 240$
Rozteč mezi žebry	$s_z^{\text{NOe1}} = 4,167\text{mm}$

4.10.2. Počet trubek v jedné podélné řadě NOe1

Mezera mezi trubkami byla zvolena $a^{\text{NOe1}} = 5\text{mm}$, hodnota se musí nacházet v rozmezí 5 - 15 mm.

Příčná rozteč mezi trubkami se zjistí ze vztahu:

$$s_1^{\text{NOe1}} = D_z^{\text{NOe1}} + a^{\text{NOe1}} = 55 + 5 = 60\text{mm}$$

Pro návrh počtu trubek lze využít upraveného vzorce (3-5):

$$n_{\text{tr}}^{\text{NOe1}} = \frac{\check{s}}{s_1^{\text{NOe1}}} - \frac{1}{2} = \frac{3,93}{0,06} - \frac{1}{2} = 64,975$$

V podélné řadě byl zvolen počet trubek $n_{\text{tr}}^{\text{NOe1}} = 65$.

Je třeba vypočítat měrný objem páry ve NOe1:

$$v_P^{\text{NOe1}} = \frac{v_{5\text{NO}} + v_{6\text{NO}}}{2} = \frac{0,001043 + 0,001018}{2} = 0,00103\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$$

Kontrola rychlosti proudění pro zvolený počet trubek, musí být v rozmezí $1\text{-}3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$:

$$w_P^{NOe1} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PN} \cdot v_P^{NOe1}}{\pi \cdot d^{NOe1^2} \cdot n_{tr}^{NOe1}} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 4,433 \cdot 0,00103}{\pi \cdot 0,0186^2 \cdot 65} = 0,246 m \cdot s^{-1}$$

Rychlost proudění je nízká, dojde tedy k rozdělení rozváděcího kanálu na čtyři části, čímž se rychlost zvýší čtyřikrát a bude vyhovovat.

$$w_P^{NOe1} = 4 \cdot 0,246 = 0,983 m \cdot s^{-1}$$

4.10.3. Výpočet objemového průtoku a volby rychlosti spalin pro NOe1

Výpočet entalpie spalin bodu K:

$$i_{SPK} = i_{SPJ} - \frac{Q^{NOe1}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 158,106 - \frac{0,706}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 151,262 kJ \cdot m^3$$

Návrhová teplota v bodě K se vypočte interpolací a za pomoci entalpie v bodě K:

$$t_{Kn} = 100 + \frac{(i_{SPK} - i_{SP100}) \cdot 100}{i_{SP200} - i_{SP100}} = 100 + \frac{(151,262 - 132,928) \cdot 100}{267,165 - 132,928} = 113,658^\circ C$$

Střední teplota proudu spalin NOe1 je aritmetickým průměrem hodnot bodů J a K:

$$t_{SP}^{NOe1} = \frac{t_J + t_{Kn}}{2} = \frac{118,757 + 113,658}{2} = 116,207^\circ C$$

Skutečný objemový průtok NOe1 se zjistí pomocí vzorce (3-4):

$$M_{SPOs}^{NOe1} = M_{SPO} \cdot \frac{t_{SP}^{NOe1} + 273,15}{273,15} = 103,234 \cdot \frac{116,207 + 273,15}{273,15} = 147,153 m^3 \cdot s^{-1}$$

Skutečná průtočná plocha ze strany spalin NOe1 lze získat ze vzorce (3-6):

$$\begin{aligned} S_{SP-PR}^{NOe1} &= \check{s} \cdot l - l \cdot D^{NOe1} \cdot n_{tr}^{NOe1} - 2 \cdot h_z^{NOe1} \cdot t_z \cdot l \cdot n_z^{NOe1} \cdot n_{tr}^{NOe1} = \\ &= 3,93 \cdot 10,98 \cdot 10,98 \cdot 0,025 \cdot 65 - 2 \cdot 0,015 \cdot 0,001 \cdot 10,98 \cdot 240 \cdot 65 = \\ &= 20,145 m^2 \end{aligned}$$

Skutečná rychlost spalin se vypočítá z vzorce:

$$w_{SP}^{NOe1} = \frac{M_{SPOs}^{NOe1}}{S_{SP-PR}^{NOe1}} = \frac{147,153}{20,145} = 7,305 m \cdot s^{-1}$$

4.10.4. Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalin NOe1

4.10.4.1. Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí NOe1

Ze vzorce je získána hodnota s^{NOe1} :

$$s^{NOe1} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{NOe1}}{2}\right)^2 + s_2^{NOe1^2}} = \sqrt{\left(\frac{60}{2}\right)^2 + 92^2} = 97 mm$$

Poměrné podélné rozteče:

$$\sigma_1^{NOe1} = \frac{s_1^{NOe1}}{D^{NOe1}} = \frac{60}{25} = 2,4$$

$$\sigma_2^{NOe1} = \frac{s_2^{NOe1}}{D^{NOe1}} = \frac{97}{25} = 3,871$$

Vzorec pro výpočet poměrných podélných roztečí:

$$\varphi_\sigma^{NOe1} = \frac{\sigma_1^{NOe1} - 1}{\sigma_2^{NOe1} - 1} = \frac{2,4 - 1}{3,871 - 1} = 0,488$$

Z obr. 8.4. na str. 116 [1] lze určit součinitel opravy. Předpoklad počtu podélných řad méně než 5.

$$c_z^{NOe1} = 0,9$$

Interpolací hodnot z tab. 3-3 na str. 24 [1] lze zjistit součinitel tepelné vodivosti spalín a součinitel kinematické viskozity spalín. K tomu je využita střední teplota spalín t_{SP}^{NOe1} a objemový podíl vodní páry ve spalínách 9,7%:

$$\lambda_{SP}^{NOe1} = 0,033 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\nu_{SP}^{NOe1} = 2,331 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí lze spočítat ze vzorce:

$$\begin{aligned} \alpha_K^{NOe1} &= 0,23 \cdot c_z^{NOe1} \cdot \varphi_\sigma^{NOe1 0,2} \cdot \frac{\lambda_{SP}^{NOe1}}{s_z^{NOe1}} \cdot \left(\frac{D^{NOe1}}{s_z^{NOe1}} \right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z^{NOe1}}{s_z^{NOe1}} \right)^{-0,14} \\ &\cdot \left(\frac{w_{SP}^{NOe1} \cdot s_z^{NOe1}}{u_{SP}^{NOe1}} \right)^{0,65} = 0,23 \cdot 0,9 \cdot 0,488^{0,2} \cdot \frac{0,03}{4,167 \cdot 10^{-3}} \\ &\cdot \left(\frac{0,025}{4,167 \cdot 10^{-3}} \right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,015}{4,167 \cdot 10^{-3}} \right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{7,305 \cdot 4,167 \cdot 10^{-3}}{2,557 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \\ &= 47,813 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

4.10.4.2. Návrh součinitele efektivity žebér NOe1

Součinitel β lze zjistit ze vzorce:

$$\begin{aligned} \beta^{NOe1} &= \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{NOe1}}{t_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{NOe1})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 47,813}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 47,813)}} \\ &= 43,351 \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$

Součinitel efektivity žebér lze zjistit z grafu na str. 114 [1] za pomoci:

$$\beta^{NOe1} \cdot h_z^{NOe1} = 43,351 \cdot 0,015 = 0,65$$

$$\frac{D_z^{NOe1}}{D^{NOe1}} = \frac{55}{25} = 2,2$$

$$\Rightarrow E^{NOe1} = 0,84$$

4.10.4.3. Podíly teplosměnných ploch žebíř a celkové plochy ze strany spalín NOe1

Pro kruhové trubky s kruhovými žebířy:

$$\frac{S_{\dot{z}}^{NOe1}}{S^{NOe1}} = \frac{\left(\frac{D_{\dot{z}}^{NOe1}}{D^{NOe1}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_{\dot{z}}^{NOe1}}{D^{NOe1}}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_{\dot{z}}^{NOe1}}{D^{NOe1}} - \frac{t_{\dot{z}}}{D^{NOe1}}\right)} = \frac{\left(\frac{55}{25}\right)^2 - 1}{\left(\frac{55}{25}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{4,167}{25} - \frac{1}{25}\right)}$$

$$= 0,938$$

Pro volné části trubky, bez žebíř:

$$\frac{S_h^{NOe1}}{S^{NOe1}} = 1 - \frac{S_{\dot{z}}^{NOe1}}{S^{NOe1}} = 1 - 0,938 = 0,062$$

4.10.4.4. Součinitel přestupu tepla ze strany spalín NOe1

Vychází se z následujícího vzorce:

$$\alpha_{1r}^{NOe1} = \left(\frac{S_{\dot{z}}^{NOe1}}{S^{NOe1}} \cdot E^{NOe1} \cdot \mu + \frac{S_h^{NOe1}}{S^{NOe1}}\right) \cdot \frac{\psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{NOe1}}{1 + \varepsilon \cdot \psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{NOe1}} =$$

$$= (0,938 \cdot 0,84 \cdot 1 + 0,062) \cdot \frac{0,85 \cdot 47,813}{1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 47,813} = 31,944 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

4.10.5. Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu NOe1

Součinitel prostupu tepla (předpoklad vysoké hodnoty α_{2r}^{NOe1} celý člen $1/\alpha_{2r}^{NOe1} = 0$):

$$K^{NOe1} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}^{NOe1}} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{31,944} + 0,002} = 30,026 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$$

Logaritmický spád:

$$\Delta t_1^{NOe1} = t_j - t_{5NO} = 118,757 - 100 = 18,757^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2^{NOe1} = t_{kn} - t_{6NO} = 113,658 - 62 = 51,658^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{ln}^{NOe1} = \frac{\Delta t_2^{NOe1} - \Delta t_1^{NOe1}}{\ln\left(\frac{\Delta t_2^{NOe1}}{\Delta t_1^{NOe1}}\right)} = \frac{51,658 - 18,757}{\ln\left(\frac{51,658}{18,757}\right)} = 32,476^\circ\text{C}$$

4.10.6. Návrh počtu podélných řad NOe1

Celková teplosměnná plocha ze strany spalín:

$$S_{SP}^{NOe1} = \frac{Q^{NOe1}}{K^{NOe1} \cdot \Delta t_{ln}^{NOe1}} = \frac{0,706}{30,026 \cdot 32,476} = 724,327 \text{ m}^2$$

Teplosměnná plocha ze strany spalin na 1m délky trubky:

$$S_{SP-1m}^{NOe1} = \pi \cdot D^{NOe1} + 2 \cdot \pi \cdot n_z^{NOe1} \cdot \left(\frac{D_z^{NOe1^2} - D^{NOe1^2}}{4} \right) = \pi \cdot 0,025 + 2 \cdot \pi \cdot 240 \cdot \left(\frac{0,055^2 - 25}{4} \right) = 0,983m$$

Plocha ze strany spalin na jednu řadu:

$$S_{SP-1r}^{NOe1} = S_{SP-1m}^{NOe1} \cdot l \cdot n_{tr}^{NOe1} = 0,983 \cdot 10,98 \cdot 65 = 701,477m^2$$

Počet podélných řad:

$$n_R^{NOe1} = \frac{S_{SP}^{NOe1}}{S_{SP-1r}^{NOe1}} = \frac{724,327}{701,477} = 1,033$$

Hodnota je zaokrouhlena na:

$$n_R^{NOe1} = 1$$

4.10.7. Výpočet skutečného předaného tepla NOe1

Skutečná teplosměnná plocha pro zvolený počet řad:

$$S_{SPs}^{NOe1} = S_{SP-1r}^{NOe1} \cdot n_R^{NOe1} = 701,477 \cdot 1 = 701,477m^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_s^{NOe1} = K^{NOe1} \cdot S_{SPs}^{NOe1} \cdot \Delta t_{ln}^{NOe1} = 30,026 \cdot 701,477 \cdot 32,467 = 0,684MW$$

Původní hodnota:

$$Q^{NOe1} = 0,706MW$$

Kontrola rozdílu (tolerance do 5%):

$$x_Q^{NOe1} = \left| 5 \cdot \frac{Q_s^{NOe1} - Q^{NOe1}}{Q_s^{NOe1} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{0,684 - 0,706}{0,684 \cdot 0,05} \right| = 3,257\%$$

Rozdíl je v toleranci, tudíž zvolený počet řad vyhovuje.

4.10.8. Výpočet skutečné teploty spalin bodu K

Skutečná entalpie bodu K:

$$i_{SPK} = i_{SPJ} - \frac{Q_s^{NOe1}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 158,106 - \frac{0,684}{103,234 \cdot (1 - 0,003)} = 151,478kJ \cdot m^{-3}$$

Skutečná teplota bodu K:

$$t_K = \frac{(i_{SPK} - i_{SP100}) \cdot 100}{i_{SP200} - i_{sp100}} + 100 = \frac{(151,478 - 132,928) \cdot 100}{267,165 - 132,928} + 100 = 113,819^\circ C$$

4.10.9. Přehled navržených hodnot NOe1

Příčná rozteč mezi trubkami:	$s_1^{NOe1} = 0,06\text{m}$
Podélná rozteč mezi trubkami NOe1 :	$s_2^{NOe1} = 0,092\text{m}$
Počet podélných řad trubek NOe1:	$n_R^{NOe1} = 1$
Počet trubek v jedné podélné řadě NOe1:	$n_{tr}^{NOe1} = 65$
Rychlost proudění spalin v kanále NOe1:	$w_{SP}^{NOe1} = 7,305\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Rychlost proudění vody v trubkách NOe1:	$w_P^{NOe1} = 0,983\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Skutečné teplo předané v NOe1:	$Q_s^{NOe1} = 0,684\text{MW}$
Skutečná teplota spalin v bodě K:	$t_K = 113,819^\circ\text{C}$

4.11. Návrh materiálů trubek

Dle norem jsou zvoleny materiály trubek. Hlavní teplotou při volby materiálu je vstupní teplota spalin pro výhřevnou plochu navýšenou o teplotní přírůstek Δt_p^i .

Teplotní přírůstky pro přehříváky VOpII, VOpI a NOp jsou $\Delta t_{pr}^P = 35^\circ\text{C}$.

Pro zbývající plochy je třeba využít vztahu: $\Delta t_{pr}^{VE} = (15 + 2 \cdot t_{tr})^\circ\text{C}$. Maximálně však do 50°C .

Pro vysokotlakou část je tloušťka trubek vždy 4mm:
 $\Delta t_{pr}^{VOVE} = (15 + 2 \cdot t_{tr}^{VO}) = (15 + 2 \cdot 4) = 23^\circ\text{C}$

Pro nízkotlakou část je tloušťka trubek vždy 3,2mm:
 $\Delta t_{pr}^{NOVE} = (15 + 2 \cdot t_{tr}^{NO}) = (15 + 2 \cdot 3,2) = 21,4^\circ\text{C}$

Pro žebra do teplot 800°C je zvolen materiál X10CR13

4.11.1. Volba materiálů pro jednotlivé výhřevné plochy

Hodnoty vstupní teploty spalin, teplotního přírůstku, vypočtené teploty pro výběr materiálu a zvolený materiál jsou zvoleny v tab. 4.2.

Tab. 4.2. Volba materiálů trubek

Teplosměnná plocha	Vstupní teplota spalin t_i [$^\circ\text{C}$]	Teplotní přírůstek Δt_{pr}^i [$^\circ\text{C}$]	Vztažná teplota pro výběr materiálu Δt_{mat}^i [$^\circ\text{C}$]	Zvolený materiál trubky
VOpII	558	35	593	10CrMo9-10
VOpI	530,637	35	565,637	10CrMo9-10
VOv	467,417	23	490,417	16Mo3
VOe3	315,721	23	338,721	P265GH
NOp	242,09	35	277,09	P265GH
NOv	239,047	21,4	260,447	P265GH
VOe2	173,573	23	196,573	P265GH
NOe2	161,053	21,4	182,453	P265GH
VOe1	153,697	23	176,697	P265GH
NOe1	118,757	21,4	140,157	P265GH

4.12. Návrh rozměrů vstupních a výstupních potrubí

S ohledem na doporučenou rychlost proudění páry lze zvolit rozměry vstupních a výstupních potrubí výhřevných ploch. Využitím vzorce (3-3), kde $n_{tr} = 1$ získáme vzorec:

$$w_P = \frac{4 \cdot M_{PV} \cdot v_P}{\pi \cdot d^2} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \cdot M_{PV} \cdot v_P}{\pi \cdot w_P}} \quad (4-1)$$

Rychlost proudění vstupního a výstupního potrubí je zvolena $w_P^P = 25 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ pro přehříváky a $w_P^E = 1-1,5 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Dle těchto rychlostí je spočtena hodnota vnitřního průměru potrubí, to je dále zaokrouhleno na nejbližší hodnotu vyráběných rozměrů. Pro tuto zvolenou hodnotu je dále zkontrolována rychlost proudění. Ta by se měla nacházet v rozmezí $w_P^P = 20-30 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ pro přehříváky a $w_P^E = 1-3 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ pro ekonomizéry.

Vstupní hodnoty pro výpočet:

Měrný objem páry v bodě 1VO:	$v_{1VO} = 0,038 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 2VO:	$v_{2VO} = 0,031 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 3VO:	$v_{3VO} = 0,034 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 4VO:	$v_{4VO} = 0,019 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 5VO:	$v_{5VO} = 0,001432 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 6VO:	$v_{6VO} = 0,001394 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 7VO:	$v_{7VO} = 0,001096 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 8VO:	$v_{8VO} = 0,001069 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 9VO:	$v_{9VO} = 0,001014 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 1NO:	$v_{1NO} = 0,418 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 2NO:	$v_{2NO} = 0,284 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 3NO:	$v_{3NO} = 0,001106 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 4NO:	$v_{4NO} = 0,001096 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 5NO:	$v_{5NO} = 0,001043 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 6NO:	$v_{6NO} = 0,001018 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Hmotnostní průtok páry VO:	$M_{VO} = 16,779 \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Hmotnostní průtok páry NO:	$M_{NO} = 4,433 \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

4.12.1. Výstupní potrubí VOpII

Využitím vzorce (4-1) lze získat návrhový vnitřní průměr:

$$d_{vy}^{VOpII} = \sqrt{\frac{4 \cdot M_{PV} \cdot v_{1VO}}{\pi \cdot w_P^P}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 16,779 \cdot 0,038}{\pi \cdot 25}} = 0,179 \text{m}$$

Z tabulky vybrány hodnoty:

$$D_{vy}^{VOpII} = 193,7 \text{mm}$$

$$t_{vy}^{VOpII} = 10 \text{mm}$$

$$d_{vy}^{VOpII} = D_{vy}^{VOpII} - 2 \cdot t_{vy}^{VOpII} = 193,7 - 2 \cdot 10 = 173,7 \text{mm}$$

Přepočet skutečné rychlosti proudění:

$$w_{vys}^{VOpII} = \frac{4 \cdot M_{PV} \cdot v_{1VO}}{\pi \cdot d_{vy}^{VOpII^2}} = \frac{4 \cdot 16,779 \cdot 0,038}{\pi \cdot 0,174^2} = 26,623 m \cdot s^{-1}$$

Rychlost pro dané rozměry vyhovuje.

4.12.2. Výstupní potrubí VOpl a vstupní potrubí VOplII

Využitím vzorce (4-1) lze získat návrhový vnitřní průměr:

$$d_{vy}^{VOpl} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot \frac{v_{2VO} + v_{3VO}}{2}}{\pi \cdot w_p^P}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot 16,779 \cdot \frac{0,031 + 0,034}{2}}{\pi \cdot 25}} = 0,162 m$$

Z tabulky vybrány hodnoty:

$$D_{vy}^{VOpl} = 177,8 mm$$

$$t_{vy}^{VOpl} = 10 mm$$

$$d_{vy}^{VOpl} = D_{vy}^{VOpl} - 2 \cdot t_{vy}^{VOpl} = 177,8 - 2 \cdot 10 = 157,8 mm$$

Přepočet skutečné rychlosti proudění:

$$w_{vys}^{VOpl} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot \frac{v_{2VO} + v_{3VO}}{2}}{\pi \cdot d_{vy}^{VOpl^2}} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 16,779 \cdot \frac{0,034 + 0,031}{2}}{\pi \cdot 0,158^2} = 26,456 m \cdot s^{-1}$$

Rychlost pro dané rozměry vyhovuje.

4.12.3. Vstupní potrubí VOpl

Využitím vzorce (4-1) lze získat návrhový vnitřní průměr:

$$d_{vs}^{VOpl} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_{4VO}}{\pi \cdot w_p^P}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot 16,779 \cdot 0,019}{\pi \cdot 25}} = 0,126 m$$

Z tabulky vybrány hodnoty:

$$D_{vs}^{VOpl} = 152,4 mm$$

$$t_{vs}^{VOpl} = 10 mm$$

$$d_{vs}^{VOpl} = D_{vs}^{VOpl} - 2 \cdot t_{vs}^{VOpl} = 152,4 - 2 \cdot 10 = 132,4 mm$$

Přepočet skutečné rychlosti proudění:

$$w_{vss}^{VOpl} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_{4VO}}{\pi \cdot d_{vy}^{VOpl^2}} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 16,779 \cdot 0,019}{\pi \cdot 0,132^2} = 22,515 m \cdot s^{-1}$$

Rychlost pro dané rozměry vyhovuje.

4.12.4. Výstupní potrubí VOe3

Využitím vzorce (4-1) lze získat návrhový vnitřní průměr:

$$d_{vy}^{VOe3} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot \frac{v_{5VO} + v_{6VO}}{2}}{\pi \cdot w_P^E}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot 16,779 \cdot \frac{0,001432 + 0,001394}{2}}{\pi \cdot 1,5}} = 0,138m$$

Z tabulky vybrány hodnoty:

$$D_{vy}^{VOe3} = 152,4mm$$

$$t_{vy}^{VOe3} = 10mm$$

$$d_{vy}^{VOe3} = D_{vy}^{VOe3} - 2 \cdot t_{vy}^{VOe3} = 152,4 - 2 \cdot 10 = 132,4mm$$

Přepočet skutečné rychlosti proudění:

$$w_{vys}^{VOe3} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot \frac{v_{5VO} + v_{6VO}}{2}}{\pi \cdot d_{vy}^{VOe3^2}} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 16,779 \cdot \frac{0,001432 + 0,001394}{2}}{\pi \cdot 0,132^2} = 1,636m \cdot s^{-1}$$

Rychlost pro dané rozměry vyhovuje.

4.12.5. Výstupní potrubí VOe2 a vstupní VOe3

Využitím vzorce (4-1) lze získat návrhový vnitřní průměr:

$$d_{vy}^{VOe2} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_{7VO}}{\pi \cdot w_P^E}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot 16,779 \cdot 0,001096}{\pi \cdot 1,5}} = 0,122m$$

Z tabulky vybrány hodnoty:

$$D_{vy}^{VOe2} = 141,3mm$$

$$t_{vy}^{VOe2} = 10mm$$

$$d_{vy}^{VOe2} = D_{vy}^{VOe2} - 2 \cdot t_{vy}^{VOe2} = 141,3 - 2 \cdot 10 = 121,3mm$$

Přepočet skutečné rychlosti proudění:

$$w_{vys}^{VOe2} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_{7VO}}{\pi \cdot d_{vy}^{VOe2^2}} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 16,779 \cdot 0,001096}{\pi \cdot 0,121^2} = 1,511m \cdot s^{-1}$$

Rychlost pro dané rozměry vyhovuje.

4.12.6. Výstupní potrubí VOe1 a vstupní VOe2

Využitím vzorce (4-1) lze získat návrhový vnitřní průměr:

$$d_{vy}^{VOe1} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_{8VO}}{\pi \cdot w_P^E}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot 16,779 \cdot 0,001069}{\pi \cdot 1,5}} = 0,12m$$

Z tabulky vybrány hodnoty:

$$D_{vy}^{VOe1} = 141,3\text{mm}$$

$$t_{vy}^{VOe1} = 10\text{mm}$$

$$d_{vy}^{VOe1} = D_{vy}^{VOe1} - 2 \cdot t_{vy}^{VOe1} = 141,3 - 2 \cdot 10 = 121,3\text{mm}$$

Přepočet skutečné rychlosti proudění:

$$w_{vys}^{VOe1} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_{8VO}}{\pi \cdot d_{vy}^{VOe1^2}} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 16,779 \cdot 0,001069}{\pi \cdot 0,121^2} = 1,475\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost pro dané rozměry vyhovuje.

4.12.7. Vstupní potrubí VOe1

Využitím vzorce (4-1) lze získat návrhový vnitřní průměr:

$$d_{vs}^{VOe1} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_{9VO}}{\pi \cdot w_P^E}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot 16,779 \cdot 0,001014}{\pi \cdot 1,5}} = 0,117\text{m}$$

Z tabulky vybrány hodnoty:

$$D_{vs}^{VOe1} = 141,3\text{mm}$$

$$t_{vs}^{VOe1} = 10\text{mm}$$

$$d_{vs}^{VOe1} = D_{vs}^{VOe1} - 2 \cdot t_{vs}^{VOe1} = 141,3 - 2 \cdot 10 = 121,3\text{mm}$$

Přepočet skutečné rychlosti proudění:

$$w_{vss}^{VOe1} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_{9VO}}{\pi \cdot d_{vs}^{VOe1^2}} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 16,779 \cdot 0,001014}{\pi \cdot 0,121^2} = 1,394\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost pro dané rozměry vyhovuje.

4.12.8. Výstupní potrubí NOP

Využitím vzorce (4-1) lze získat návrhový vnitřní průměr:

$$d_{vy}^{NOP} = \sqrt{\frac{4 \cdot M_{PN} \cdot v_{1NO}}{\pi \cdot w_P^P}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,433 \cdot 0,418}{\pi \cdot 25}} = 0,307\text{m}$$

Z tabulky vybrány hodnoty:

$$D_{vy}^{NOP} = 323,9\text{mm}$$

$$t_{vy}^{NOP} = 10\text{mm}$$

$$d_{vy}^{NOP} = D_{vy}^{NOP} - 2 \cdot t_{vy}^{NOP} = 323,9 - 2 \cdot 10 = 303,9\text{mm}$$

Přepočet skutečné rychlosti proudění:

$$w_{vys}^{NOP} = \frac{4 \cdot M_{PN} \cdot v_{1NO}}{\pi \cdot d_{vy}^{NOP^2}} = \frac{4 \cdot 4,433 \cdot 0,418}{\pi \cdot 0,3039^2} = 25,539\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost pro dané rozměry vyhovuje.

4.12.9. Vstupní potrubí NOp

Využitím vzorce (4-1) lze získat návrhový vnitřní průměr:

$$d_{vs}^{NOp} = \sqrt{\frac{4 \cdot M_{PN} \cdot v_{2NO}}{\pi \cdot w_p^P}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,433 \cdot 0,284}{\pi \cdot 25}} = 0,253m$$

Z tabulky vybrány hodnoty:

$$D_{vs}^{NOp} = 273mm$$

$$t_{vs}^{NOp} = 10mm$$

$$d_{vs}^{NOp} = D_{vs}^{NOp} - 2 \cdot t_{vs}^{NOp} = 273 - 2 \cdot 10 = 253mm$$

Přepočítání skutečné rychlosti proudění:

$$w_{vss}^{NOp} = \frac{4 \cdot M_{PN} \cdot v_{2NO}}{\pi \cdot d_{vs}^{NOp2}} = \frac{4 \cdot 4,433 \cdot 0,284}{\pi \cdot 0,253^2} = 25,053m \cdot s^{-1}$$

Rychlost pro dané rozměry vyhovuje.

4.12.10. Výstupní potrubí NOe2

Využitím vzorce (4-1) lze získat návrhový vnitřní průměr:

$$d_{vy}^{NOe2} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PN} \cdot \frac{v_{3NO} + v_{4NO}}{2}}{\pi \cdot w_p^E}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot 4,433 \cdot \frac{0,001106 + 0,001096}{2}}{\pi \cdot 1,5}} = 0,079m$$

Z tabulky vybrány hodnoty:

$$D_{vy}^{NOe2} = 101,6mm$$

$$t_{vy}^{NOe2} = 10mm$$

$$d_{vy}^{NOe2} = D_{vy}^{NOe2} - 2 \cdot t_{vy}^{NOe2} = 101,6 - 2 \cdot 10 = 81,6mm$$

Přepočítání skutečné rychlosti proudění:

$$w_{vys}^{NOe2} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PN} \cdot \frac{v_{3NO} + v_{4NO}}{2}}{\pi \cdot d_{vy}^{NOe22}} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 4,433 \cdot \frac{0,001106 + 0,001096}{2}}{\pi \cdot 0,0816^2} = 1,636m \cdot s^{-1}$$

Rychlost pro dané rozměry vyhovuje.

4.12.11. Výstupní potrubí NOe1 a vstupní NOe2

Využitím vzorce (4-1) lze získat návrhový vnitřní průměr:

$$d_{vy}^{NOe1} = \sqrt{\frac{4 \cdot M_{PN} \cdot v_{5NO}}{\pi \cdot w_p^E}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,433 \cdot 0,001043}{\pi \cdot 1,5}} = 0,077m$$

Z tabulky vybrány hodnoty:

$$D_{vy}^{NOe1} = 101,6\text{mm}$$

$$t_{vy}^{NOe2} = 10\text{mm}$$

$$d_{vy}^{NOe2} = D_{vy}^{NOe2} - 2 \cdot t_{vy}^{NOe2} = 101,6 - 2 \cdot 10 = 81,6\text{mm}$$

Přepočet skutečné rychlosti proudění:

$$w_{vys}^{NOe2} = \frac{4 \cdot M_{PN} \cdot v_{5NO}}{\pi \cdot d_{vy}^{NOe2^2}} = \frac{4 \cdot 4,433 \cdot 0,001043}{\pi \cdot 0,0816^2} = 0,884\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost pro dané rozměry vyhovuje.

4.12.12. Vstupní potrubí NOe1

Využitím vzorce (4-1) lze získat návrhový vnitřní průměr:

$$d_{vs}^{NOe1} = \sqrt{\frac{4 \cdot M_{PN} \cdot v_{6NO}}{\pi \cdot w_p^p}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,433 \cdot 0,001018}{\pi \cdot 1,5}} = 0,076\text{m}$$

Z tabulky vybrány hodnoty:

$$D_{vs}^{NOe1} = 88,9\text{mm}$$

$$t_{vs}^{NOe1} = 10\text{mm}$$

$$d_{vs}^{NOe1} = D_{vs}^{NOe1} - 2 \cdot t_{vs}^{NOe1} = 88,9 - 2 \cdot 10 = 68,9\text{mm}$$

Přepočet skutečné rychlosti proudění:

$$w_{vss}^{NOe1} = \frac{4 \cdot M_{PN} \cdot v_{6NO}}{\pi \cdot d_{vs}^{NOe1^2}} = \frac{4 \cdot 4,433 \cdot 0,001018}{\pi \cdot 0,0689^2} = 1,21\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost pro dané rozměry vyhovuje.

4.12.13. Vypočtené rozměry potrubí

Tab. 4.3. Rozměry vstupních a výstupních potrubí

Druh	Vnější průměr D^i [mm]	Tloušťka trubky t^i [mm]	Vnitřní průměr d^i [mm]
Výstupní potrubí VOpII	193,7	10	173,7
Výstupní potrubí VOpI	177,8	10	157,8
Vstupní potrubí VOpI	152,4	10	132,4
Výstupní potrubí VOe3	152,4	10	132,4
Výstupní potrubí VOe2	141,3	10	121,3
Výstupní potrubí VOe1	141,3	10	121,3
Vstupní potrubí VOe1	141,3	10	121,3
Výstupní potrubí NOP	323,9	10	303,9
Vstupní potrubí NOP	273	10	253
Výstupní potrubí NOe2	101,6	10	81,6
Výstupní potrubí NOe1	101,6	10	81,6
Vstupní potrubí NOe1	88,9	10	68,9

5. Návrh bubnů

Vnější průměr bubnu D_{Bu} se zvolí na základě hmotnostního průtoku (převést z $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ na $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$).

Délka bubnu l_{Bu} je rovna šířce kanálu δ .

Tloušťka stěny bubnu se zvolí v rozmezí $t_{Bu} = 40\text{-}120\text{mm}$.

Vnitřní průměr se dopočítá ze vztahu: $d_{Bu} = D_{Bu} - 2 \cdot t_{Bu}$.

Zatížení bubnu se vypočítá ze vztahu:

$$z_{Bu} = \frac{M_P}{V_{Bu}},$$

kde V_{Bu} je polovina objemu bubnu.

Toto zatížení je při kontrole menší než zatížení zjištěné z tabulek.

5.1. Návrh rozměrů a kontrola zatížení vysokotlakého bubnu

Zvoleny rozměry, dle $M_{PV} = 16,779\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} = 60,403\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$:

$$D_{Bu}^{VO} = 1600\text{mm},$$

$$t_{Bu}^{VO} = 40\text{mm},$$

$$l_{Bu}^{VO} = 3,93\text{m},$$

$$d_{Bu}^{VO} = D_{Bu}^{VO} - 2 \cdot t_{Bu}^{VO} = 1600 - 2 \cdot 40 = 1520\text{mm}.$$

Poloviční objem bubnu lze zjistit ze vztahu:

$$V_{Bu}^{VO} = \frac{\pi \cdot d_{Bu}^{VO^2} \cdot l_{Bu}^{VO}}{8} = \frac{\pi \cdot 1,52^2 \cdot 3,93}{8} = 3,564\text{m}^3$$

Zatížení bubnu:

$$z_{Bu}^{VO} = \frac{M_{PV}}{V_{Bu}^{VO}} = \frac{16,779}{3,564} = 4,707$$

Tlak v bubnu je roven tlaku vysokotlakého výparníku $p_{Bu}^{VO} = p_{4VO} = 9,4\text{MPa}$. Z tabulky se interpolací zjistí hodnota běžného zatížení bubnu:

$$z_{Bub}^{VO} = 8,4192$$

Buben vyhovuje, jelikož platí, že běžné zatížení je vyšší než vypočtené.

5.2. Návrh rozměrů a kontrola zatížení nízkotlakého bubnu

Zvoleny rozměry, dle $M_{PN} = 4,433\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} = 15,959\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$:

$$D_{Bu}^{NO} = 1400\text{mm},$$

$$t_{Bu}^{NO} = 40\text{mm},$$

$$l_{Bu}^{NO} = 3,93\text{m},$$

$$d_{Bu}^{NO} = D_{Bu}^{NO} - 2 \cdot t_{Bu}^{NO} = 1400 - 2 \cdot 40 = 1320\text{mm}.$$

Poloviční objem bubnu lze zjistit ze vztahu:

$$V_{Bu}^{NO} = \frac{\pi \cdot d_{Bu}^{NO^2} \cdot l_{Bu}^{NO}}{8} = \frac{\pi \cdot 1,32^2 \cdot 3,93}{8} = 2,688\text{m}^3$$

Zatížení bubnu:

$$z_{Bu}^{NO} = \frac{M_{PN}}{V_{Bu}^{NO}} = \frac{4,433}{2,688} = 1,649$$

Tlak v bubnu je roven tlaku nízkotlakého výparníku $p_{Bu}^{NO} = p_{2NO} = 0,67\text{MPa}$. Z tabulky se interpolací zjistí hodnota běžného zatížení bubnu:

$$z_{Bub}^{NO} = 2,25$$

Buben vyhovuje, jelikož platí, že běžné zatížení je vyšší než vypočtené.

6. Návrh rozměrů zavodňovacích potrubí

6.1. Návrh rozměrů zavodňovacích potrubí vysokotlakého okruhu

Návrh průtočných průřezů všech varných trubek:

$$S_{OV}^{VO} = \frac{\pi \cdot d^{VOv^2}}{4} \cdot n_{tr}^{VOv} \cdot n_R^{VOv} = \frac{\pi \cdot 0,049^2}{4} \cdot 35 \cdot 19 = 1,254m^2$$

Výška umístění bubnu se zjistí ze vztahu:

$$h_p = 1 + 3 = 10,975 + 3 = 13,975m$$

Poměr průřezů zavodňovacích a varných trubek (p_{Bu}^{VO} se dosazuje v MPa a h_p se dosazuje v m, obě se ale dosazují bez jednotek):

$$\frac{S_{OZ}^{VO}}{S_{OV}^{VO}} = 0,06 + 0,016 \cdot p_{Bu}^{VO} + 0,005 \cdot h_p = 0,06 + 0,016 \cdot 9,4 + 0,005 \cdot 13,975 = 0,28$$

Výpočet průtočných průřezů všech zavodňovacích trubek:

$$S_{OZ}^{VO} = \frac{S_{OZ}^{VO}}{S_{OV}^{VO}} \cdot S_{OV}^{VO} = 0,28 \cdot 1,254 = 0,351m^2$$

Volba počtu zavodňovacích trubek:

$$n_{trZ}^{VO} = 4$$

Průtočný průřez jedné zavodňovací trubky:

$$S_{1Z}^{VO} = \frac{S_{OZ}^{VO}}{n_{trZ}^{VO}} = \frac{0,351}{4} = 0,088m^2$$

Vnitřní průměr zavodňovací trubky:

$$d_Z^{VO} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{1Z}^{VO}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,088}{\pi}} = 0,334m$$

Za pomoci tabulky zvoleny rozměry zavodňovacích trubek:

$$D_Z^{VO} = 355,6mm$$

$$t_Z^{VO} = 14,2mm$$

$$d_Z^{VO} = D_Z^{VO} - 2 \cdot t_Z^{VO} = 355,6 - 2 \cdot 14,2 = 327,2mm$$

6.2. Návrh rozměrů zavodňovacích potrubí nízkotlakého okruhu

Návrh průtočných průřezů všech varných trubek:

$$S_{OV}^{NO} = \frac{\pi \cdot d^{NOv^2}}{4} \cdot n_{tr}^{NOv} \cdot n_R^{NOv} = \frac{\pi \cdot 0,051^2}{4} \cdot 37 \cdot 14 = 1,042m^2$$

Poměr průřezů zavodňovacích a varných trubek (p_{Bu}^{NO} se dosazuje v MPa a h_p se dosazuje v m, obě se ale dosazují bez jednotek):

$$\frac{S_{OZ}^{NO}}{S_{OV}^{NO}} = 0,06 + 0,016 \cdot p_{Bu}^{NO} + 0,005 \cdot h_p = 0,06 + 0,016 \cdot 0,67 + 0,005 \cdot 13,975 = 0,141$$

Výpočet průtočných průřezů všech zavodňovacích trubek:

$$S_{OZ}^{NO} = \frac{S_{OZ}^{NO}}{S_{OV}^{NO}} \cdot S_{OV}^{NO} = 0,141 \cdot 1,042 = 0,146m^2$$

Volba počtu zavodňovacích trubek:

$$n_{trZ}^{NO} = 2$$

Průtočný průřez jedné zavodňovací trubky:

$$S_{1Z}^{NO} = \frac{S_{OZ}^{NO}}{n_{trZ}^{NO}} = \frac{0,146}{2} = 0,073m^2$$

Vnitřní průměr zavodňovací trubky:

$$d_Z^{NO} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{1Z}^{NO}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,073}{\pi}} = 0,305m$$

Za pomoci tabulky zvoleny rozměry zavodňovacích trubek:

$$D_Z^{NO} = 323,9mm$$

$$t_Z^{NO} = 14,2mm$$

$$d_Z^{NO} = D_Z^{NO} - 2 \cdot t_Z^{NO} = 323,9 - 2 \cdot 14,2 = 295,5mm$$

7. Návrh rozměrů převáděcích potrubí

7.1. Návrh rozměrů převáděcího potrubí vysokotlakého okruhu

Výpočet průtočných průřezů všech převáděcích trubek (p_{Bu}^{VO} se dosazuje v MPa a h_p se dosazuje v m, obě se ale dosazují bez jednotek).

$$S_{OP}^{VO} = (0,1 + 0,01 \cdot p_{Bu}^{VO} + 0,01 \cdot h_p) \cdot S_{OV}^{VO} = (0,1 + 0,01 \cdot 9,4 + 0,01 \cdot 13,975) \cdot 1,254 = 0,419m^3$$

Počet převáděcích trubek:

$$n_{trP}^{VO} = 20$$

Průtočný průřez jedné převáděcí trubky:

$$S_{1P}^{VO} = \frac{S_{OP}^{VO}}{n_{trP}^{VO}} = \frac{0,419}{20} = 0,021m^2$$

Vnitřní průměr převáděcí trubky:

$$d_P^{VO} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{1P}^{VO}}{\pi}} = \frac{\sqrt{4 \cdot 0,021}}{\pi} = 0,163m$$

Za pomocí tabulky zvoleny rozměry:

$$D_P^{VO} = 177,8mm$$

$$t_P^{VO} = 8mm$$

$$d_P^{VO} = D_P^{VO} - 2 \cdot t_P^{VO} = 161.8mm$$

7.2. Návrh rozměrů převáděcího potrubí nízkotlakého okruhu

Výpočet průtočných průřezů všech převáděcích trubek (p_{Bu}^{NO} se dosazuje v MPa a h_p se dosazuje v m, obě se ale dosazují bez jednotek).

$$S_{OP}^{NO} = (0,1 + 0,01 \cdot p_{Bu}^{NO} + 0,01 \cdot h_p) \cdot S_{OV}^{NO} = (0,1 + 0,01 \cdot 0,67 + 0,01 \cdot 13,975) \cdot 1,042 = 0,257m^3$$

Počet převáděcích trubek:

$$n_{trP}^{NO} = 12$$

Průtočný průřez jedné převáděcí trubky:

$$S_{1P}^{NO} = \frac{S_{OP}^{NO}}{n_{trP}^{NO}} = \frac{0,257}{12} = 0,021m^2$$

Vnitřní průměr převáděcí trubky:

$$d_p^{NO} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{1P}^{NO}}{\pi}} = \frac{\sqrt{4 \cdot 0,021}}{\pi} = 0,165m$$

Za pomoci tabulky zvoleny rozměry:

$$D_p^{NO} = 177,8mm$$

$$t_p^{NO} = 8mm$$

$$d_p^{NO} = D_p^{NO} - 2 \cdot t_p^{NO} = 161,8mm$$

8. Výpočet tahové ztráty kotle

Celková ztráta Δp_{ZC} je součtem tlakových ztrát jednotlivých výhřevných ploch a ztráty v komíně. Maximální dovolenou hodnotou tahové ztráty je $\Delta p_{ZD} = 2000\text{Pa}$. Výpočty jsou prováděny za použití literatury [2].

8.1. Výpočet tlakových ztrát výhřevných ploch

Střední teplota zaneseného povrchu stěny se určí ze vztahu ($\Delta t = 25^\circ\text{C}$):

$$t_z = t_p + \Delta t, \quad (8-1)$$

kde t_p [$^\circ\text{C}$] je teplotou páry nebo vody pro teplosměnnou plochu.

Ekvivalentní průměr spalínového kanálu:

$$d_e^{lan} = \frac{2 \cdot \check{s} \cdot l}{\check{s} + l} = \frac{2 \cdot 3,93 \cdot 10,98}{3,93 + 10,98} = 5,786\text{m}$$

Reynoldsovo číslo:

$$Re_s = \frac{w_{SP} \cdot d_e}{\nu_s} \quad (8-2)$$

kde ν_s [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] je součinitel dynamické viskozity spalín vztažený na střední teplotu stěny.

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek:

$$\zeta = k_4 \cdot n_R \cdot \left(\frac{h_z}{d}\right)^{k_1} \cdot \left(\frac{s_z}{d}\right)^{-k_2} \cdot Re_s^{-k_3} \quad (8-3)$$

kde $k_1 - k_4$ [-] jsou konstanty závislé na uspořádání trubek,

$$k_1 = 0,$$

$$k_2 = 0,72,$$

$$k_3 = 0,24,$$

$$k_4 = 2$$

pro vystřídání uspořádání trubek.

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek:

$$\Delta p_z = \zeta \cdot \frac{w_{SP}^2}{2} \cdot \rho_{SP} \quad (8-4)$$

$$\text{kde } \rho_{SP} = 1,269\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Hodnoty potřebné k výpočtu jsou uvedeny v tab. 8.1.

Tab. 8.1. Parametry ploch pro výpočet tlakových ztrát

	t_z^i [°C]	w_{SP}^i [m·s ⁻¹]	$v_s^i \cdot 10^5$ [m ² ·s ⁻¹]	n_R^i [-]	h_z^i [mm]	D^i [mm]	s_z^i [mm]	$Re_s^i \cdot 10^6$ [-]
VOpII	497,575	15	7,593	4	14	38	5,882	1,143
VOpI	415,35	13,799	6,283	6	14	34	5,882	1,271
VOv	327,48	13,508	4,872	19	20	57	5,882	1,604
VOe3	254,24	10,283	3,943	12	15	32	5	1,509
NOp	211,595	14,582	2,281	1	10	45	5	3,699
NOv	184,19	10,447	3,102	14	19	57	5,882	1,949
VOe2	172,5	8,455	2,969	5	15	34	5,882	1,648
NOe2	152,595	7,477	2,743	3	13	25	5,263	1,578
VOe1	123,5	7,56	2,433	8	15	34	5	1,798
NOe1	106	7,305	2,218	1	15	25	4,167	1,906

8.1.1. Tlaková ztráta VOpII

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-3):

$$\begin{aligned} \zeta^{VOpII} &= k_4 \cdot n_R^{VOpII} \cdot \left(\frac{h_z^{VOpII}}{D^{VOpII}} \right)^{k_1} \cdot \left(\frac{s_z^{VOpII}}{D^{VOpII}} \right)^{-k_2} \cdot Re_s^{VOpII - k_3} \\ &= 2 \cdot 4 \cdot \left(\frac{14}{38} \right)^0 \cdot \left(\frac{5,882}{38} \right)^{-0,72} \cdot (1,143 \cdot 10^6)^{-0,24} = 1,078 \end{aligned}$$

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-4):

$$\Delta p_Z^{VOpII} = \zeta^{VOpII} \cdot \rho_{SP} \cdot \frac{w_{SP}^{VOpII^2}}{2} = 1,078 \cdot 1,269 \cdot \frac{15^2}{2} = 153,865 Pa$$

8.1.2. Tlaková ztráta VOpI

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-3):

$$\begin{aligned} \zeta^{VOpI} &= k_4 \cdot n_R^{VOpI} \cdot \left(\frac{h_z^{VOpI}}{D^{VOpI}} \right)^{k_1} \cdot \left(\frac{s_z^{VOpI}}{D^{VOpI}} \right)^{-k_2} \cdot Re_s^{VOpI - k_3} \\ &= 2 \cdot 6 \cdot \left(\frac{14}{34} \right)^0 \cdot \left(\frac{5,882}{34} \right)^{-0,72} \cdot (1,271 \cdot 10^6)^{-0,24} = 1,446 \end{aligned}$$

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-4):

$$\Delta p_Z^{VOpI} = \zeta^{VOpI} \cdot \rho_{SP} \cdot \frac{w_{SP}^{VOpI^2}}{2} = 1,446 \cdot 1,269 \cdot \frac{13,799^2}{2} = 174,652 Pa$$

8.1.3. Tlaková ztráta VOv

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-3):

$$\begin{aligned}\zeta^{VOv} &= k_4 \cdot n_R^{VOv} \cdot \left(\frac{h_z^{VOv}}{D^{VOv}}\right)^{k_1} \cdot \left(\frac{S_z^{VOv}}{D^{VOv}}\right)^{-k_2} \cdot Re_s^{VOv-k_3} \\ &= 2 \cdot 19 \cdot \left(\frac{20}{57}\right)^0 \cdot \left(\frac{5,882}{57}\right)^{-0,72} \cdot (1,604 \cdot 10^6)^{-0,24} = 6,319\end{aligned}$$

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-4):

$$\Delta p_Z^{VOv} = \zeta^{VOv} \cdot \rho_{SP} \cdot \frac{w_{SP}^{VOv}}{2} = 6,319 \cdot 1,269 \cdot \frac{13,508^2}{2} = 731,658 Pa$$

8.1.4. Tlaková ztráta VOe3

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-3):

$$\begin{aligned}\zeta^{VOe3} &= k_4 \cdot n_R^{VOe3} \cdot \left(\frac{h_z^{VOe3}}{D^{VOe3}}\right)^{k_1} \cdot \left(\frac{S_z^{VOe3}}{D^{VOe3}}\right)^{-k_2} \cdot Re_s^{VOe3-k_3} \\ &= 2 \cdot 12 \cdot \left(\frac{15}{32}\right)^0 \cdot \left(\frac{5}{32}\right)^{-0,72} \cdot (1,509 \cdot 10^6)^{-0,24} = 2,991\end{aligned}$$

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-4):

$$\Delta p_Z^{VOe3} = \zeta^{VOe3} \cdot \rho_{SP} \cdot \frac{w_{SP}^{VOe3}}{2} = 2,991 \cdot 1,269 \cdot \frac{10,283^2}{2} = 200,663 Pa$$

8.1.5. Tlaková ztráta NOP

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-3):

$$\begin{aligned}\zeta^{NOP} &= k_4 \cdot n_R^{NOP} \cdot \left(\frac{h_z^{NOP}}{D^{NOP}}\right)^{k_1} \cdot \left(\frac{S_z^{NOP}}{D^{NOP}}\right)^{-k_2} \cdot Re_s^{NOP-k_3} \\ &= 2 \cdot 1 \cdot \left(\frac{10}{45}\right)^0 \cdot \left(\frac{5}{45}\right)^{-0,72} \cdot (3,699 \cdot 10^6)^{-0,24} = 0,256\end{aligned}$$

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-4):

$$\Delta p_Z^{NOP} = \zeta^{NOP} \cdot \rho_{SP} \cdot \frac{w_{SP}^{NOP}}{2} = 0,256 \cdot 1,269 \cdot \frac{14,582^2}{2} = 34,54 Pa$$

8.1.6. Tlaková ztráta NOv

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-3):

$$\begin{aligned}\zeta^{NOv} &= k_4 \cdot n_R^{NOv} \cdot \left(\frac{h_z^{NOv}}{D^{NOv}}\right)^{k_1} \cdot \left(\frac{S_z^{NOv}}{D^{NOv}}\right)^{-k_2} \cdot Re_s^{NOv-k_3} \\ &= 2 \cdot 14 \cdot \left(\frac{19}{57}\right)^0 \cdot \left(\frac{5,882}{57}\right)^{-0,72} \cdot (1,949 \cdot 10^6)^{-0,24} = 4,444\end{aligned}$$

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-4):

$$\Delta p_Z^{NOv} = \zeta^{NOv} \cdot \rho_{SP} \cdot \frac{W_{SP}^{NOv^2}}{2} = 4,444 \cdot 1,269 \cdot \frac{10,447^2}{2} = 207,771 Pa$$

8.1.7. Tlaková ztráta VOe2

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-3):

$$\begin{aligned} \zeta^{VOe2} &= k_4 \cdot n_R^{VOe2} \cdot \left(\frac{h_z^{VOe2}}{D^{VOe2}} \right)^{k_1} \cdot \left(\frac{S_z^{VOe2}}{D^{VOe2}} \right)^{-k_2} \cdot Re_s^{VOe2-k_3} \\ &= 2 \cdot 5 \cdot \left(\frac{15}{34} \right)^0 \cdot \left(\frac{5,882}{34} \right)^{-0,72} \cdot (1,648 \cdot 10^6)^{-0,24} = 1,132 \end{aligned}$$

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-4):

$$\Delta p_Z^{VOe2} = \zeta^{VOe2} \cdot \rho_{SP} \cdot \frac{W_{SP}^{VOe2^2}}{2} = 1,132 \cdot 1,269 \cdot \frac{8,455^2}{2} = 51,332 Pa$$

8.1.8. Tlaková ztráta NOe2

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-3):

$$\begin{aligned} \zeta^{NOe2} &= k_4 \cdot n_R^{NOe2} \cdot \left(\frac{h_z^{NOe2}}{D^{NOe2}} \right)^{k_1} \cdot \left(\frac{S_z^{NOe2}}{D^{NOe2}} \right)^{-k_2} \cdot Re_s^{NOe2-k_3} \\ &= 2 \cdot 3 \cdot \left(\frac{13}{25} \right)^0 \cdot \left(\frac{5,263}{25} \right)^{-0,72} \cdot (1,578 \cdot 10^6)^{-0,24} = 0,6 \end{aligned}$$

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-4):

$$\Delta p_Z^{NOe2} = \zeta^{NOe2} \cdot \rho_{SP} \cdot \frac{W_{SP}^{NOe2^2}}{2} = 0,6 \cdot 1,269 \cdot \frac{7,477^2}{2} = 21,269 Pa$$

8.1.9. Tlaková ztráta VOe1

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-3):

$$\begin{aligned} \zeta^{VOe1} &= k_4 \cdot n_R^{VOe1} \cdot \left(\frac{h_z^{VOe1}}{D^{VOe1}} \right)^{k_1} \cdot \left(\frac{S_z^{VOe1}}{D^{VOe1}} \right)^{-k_2} \cdot Re_s^{VOe1-k_3} \\ &= 2 \cdot 8 \cdot \left(\frac{15}{34} \right)^0 \cdot \left(\frac{5}{34} \right)^{-0,72} \cdot (1,798 \cdot 10^6)^{-0,24} = 1,994 \end{aligned}$$

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-4):

$$\Delta p_Z^{VOe1} = \zeta^{VOe1} \cdot \rho_{SP} \cdot \frac{W_{SP}^{VOe1^2}}{2} = 1,994 \cdot 1,269 \cdot \frac{7,56^2}{2} = 72,286 Pa$$

8.1.10. Tlaková ztráta NOe1

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-3):

$$\begin{aligned}\zeta^{NOe1} &= k_4 \cdot n_R^{NOe1} \cdot \left(\frac{h_z^{NOe1}}{D^{NOe1}}\right)^{k_1} \cdot \left(\frac{s_z^{NOe1}}{D^{NOe1}}\right)^{-k_2} \cdot Re_s^{NOe1-k_3} \\ &= 2 \cdot 1 \cdot \left(\frac{15}{25}\right)^0 \cdot \left(\frac{4,167}{25}\right)^{-0,72} \cdot (1,906 \cdot 10^6)^{-0,24} = 0,226\end{aligned}$$

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se zjistí ze vztahu (8-4):

$$\Delta p_Z^{NOe1} = \zeta^{NOe1} \cdot \rho_{SP} \cdot \frac{w_{SP}^{NOe1^2}}{2} = 0,226 \cdot 1,269 \cdot \frac{7,305^2}{2} = 7,651 Pa$$

8.2. Tlaková ztráta v komíně

8.2.1 Tlaková ztráta v komíně třením

Výška komína je zvolena: $H^{kom} = 25m$

Vnitřní průměr komína je zvolen: $d^{kom} = 5m$

Součinitel tření v komíně je: $\lambda^{kom} = 0,04$

Vzorec pro průtočnou plochu spalín:

$$S_{SP-PR}^{kom} = \frac{\pi \cdot d^{kom^2}}{4} = \frac{\pi \cdot 5^2}{4} = 19,635 m^2$$

Ze vzorce (3-4) lze vypočítat skutečný objemový průtok spalín:

$$M_{SPOs}^{kom} = M_{SPO} \cdot \frac{t_j + 273,15}{273,15} = 103,234 \cdot \frac{118,757 + 273,15}{273,15} = 148,116 m^3 \cdot s^{-1}$$

Rychlost spalín:

$$w_{SP}^{kom} = \frac{M_{SPOs}^{kom}}{S_{SP-PR}^{kom}} = \frac{148,116}{19,635} = 7,544$$

Tlaková ztráta třením:

$$\Delta p_{ZT}^{kom} = \lambda^{kom} \cdot \rho_{SP} \cdot \frac{H^{kom}}{d^{kom}} \cdot \frac{w_{SP}^{kom^2}}{2} = 0,04 \cdot 1,269 \cdot \frac{25}{5} \cdot \frac{7,544^2}{2} = 7,221 Pa$$

8.2.2. Tlaková ztráta na vstupu a výstupu z komína

Pro výpočet se využije vzorce (8-4), kde součinitel tlakové ztráty pro vstup nebo výstup z komína se volí:

$$\zeta_{vs}^{kom} = \zeta_{vý}^{kom} = 1$$

$$\Delta p_{ZVV}^{kom} = (\zeta_{vs}^{kom} + \zeta_{vý}^{kom}) \cdot \frac{w_{SP}^{kom^2}}{2} \cdot \rho_{SP} = (1 + 1) \cdot \frac{7,544^2}{2} \cdot 1,269 = 72,212 Pa$$

8.3. Celková tahová ztráta

Celková ztráta Δp_{ZC} se vypočítá sečtením všech vypočtených ztrát a ztráty v tlumiči hluku $\Delta p_{ZTH}^{kom} = 200 Pa$. Celková ztráta musí být nižší než 2000 Pa.

$$\begin{aligned}\Delta p_{ZC} &= \Delta p_Z^{VOpII} + \Delta p_Z^{VOpI} + \Delta p_Z^{VOv} + \Delta p_Z^{VOe3} + \Delta p_Z^{NOp} + \Delta p_Z^{NOv} + \Delta p_Z^{VOe2} + \Delta p_Z^{NOe2} \\ &\quad + \Delta p_Z^{VOe1} + \Delta p_Z^{NOe1} + \Delta p_{ZT}^{kom} + \Delta p_{ZVV}^{kom} + \Delta p_{ZTH}^{kom} \\ &= 153,865 + 174,652 + 731,658 + 200,663 + 34,54 + 207,771 + 51,332 + 21,269 + \\ &\quad + 72,286 + 7,651 + 7,221 + 72,212 + 200 \\ &= 1935 Pa\end{aligned}$$

Hodnota vychází nižší než je dovolená, ztráta je tedy v normě.

Závěr

Tato diplomová práce měla za hlavní cíle: Provedení tepelného výpočtu a návrh výhřevných ploch dvoutlakého horizontálního kotle na odpadní teplo za spalovací turbínou dle zadaných parametrů. Prvním krokem při tvorbě byl návrh výhřevných ploch spolu s pilovým diagramem, následně byl proveden tepelný výpočet. Posléze došlo k návrhu výšky a šířky spalinového kanálu za pomoci zvolených rozměrů jedné výhřevné plochy. Dle těchto navržených rozměrů byly poté vypočítány zbývající výhřevné plochy. S využitím teploty spalin byly zvoleny materiály trubek jednotlivých teplosměnných ploch. Rozměry vstupních a výstupních potrubí přehříváků a ekonomizérů byly zvoleny na základě rychlosti vody nebo páry v dané oblasti. Dalším krokem byla volba rozměrů bubnu a kontrola jeho zatížení. Počet a rozměry zavodňovacích a převáděcích trubek byl vypočten z tlaku a výšky umístění bubnu. Závěrečným krokem ve výpočtové části byl návrh a kontrola tahové ztráty. Návrh kotle včetně jednotlivých teplosměnných ploch je proveden na výkrese (příloha č. 1).

Seznam použitých zdrojů

- [1] BUDAJ, Florian; *Parní kotle - podklady pro tepelný výpočet*. Nakladatelství VUT Brno, 1992. 200 s.
- [2] ČERNÝ, Václav; Janeba, Břetislav; Teyssler, Jiří; *Parní kotle energetika*. SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983. 859 s.
- [3] Magnus Holmgren: *X-Steam tables Excel v2.6, IF-97 Steam tables*. Dostupné z WWW: <http://xsteam.sourceforge.net/>
- [4] Kves.uniza.sk. *Elektrárne*. [online]. 2014, [citováno 2014-05-17]. Dostupné z WWW: http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/elektroenergetika1/ELEN2007/EENERGETIKA/ELEN-3_2.htm

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1.1. Schéma paroplynového oběhu	21
Obr. 1.2. Schéma výhřevných ploch kotle	22
Obr. 2.1. Obecný nákres pilového diagramu.....	24
Obr. 2.2. Pilový diagram vypočtených hodnot.....	30
Obr. 3.1. Náhled na značení rozměrů trubek.....	31
Obr. 3.2. Nákres rozměrů spalinového kanálu s roztečemi trubek	34
Obr. 4.1. Nákres trubek VOpII.....	40
Tab. 2.1. Entalpie jednotlivých složek spalin při dané teplotě.....	27
Tab. 4.1. Hodnoty pro výpočet jednotlivých výhřevných ploch.	35
Tab. 4.2. Volba materiálů trubek.....	89
Tab. 4.3. Rozměry vstupních a výstupních potrubí.....	95
Tab. 8.1. Parametry ploch pro výpočet tlakových ztrát	103

Seznam použitých symbolů a zkratk

Symbol:	Jednotka:	Název:
c_l	-	Koeficient opravy na poměrnou délku
c_m	-	Koeficient opravy mezikružší
c_s	-	Součinitel opravy na uspořádání svazku
c_t	-	Koeficient opravy vztažený na teplotu proudu a stěny
c_z	-	Součinitel opravy na počet podélných řad
C	-	Konstanta pro výpočet ztrát sáláním a konvekcí
k_1, \dots, k_4	-	Konstanty pro uspořádání trubek
n_R	-	Počet podélných řad
n_{tr}	-	Počet trubek v jedné podélné řadě
n_{trP}	-	Počet převáděcích trubek
n_{trZ}	-	Počet zavodňovacích trubek
Pr_P	-	Prandtlovo číslo vody nebo páry
Re_s	-	Reynoldsovo číslo vztažené na střední teplotu zaneseného povrchu stěny
S_h/S	-	Podíl plochy části trubky bez žebor a celkové plochy ze strany spalín
$S_ž/S$	-	Podíl výhřevných ploch žebor a celkové plochy ze strany spalín
x	-	Objemový podíl prvku ve spalínách
x_3	-	Koeficient závislý na roztečích mezi trubkami upravený
x_4	-	Koeficient závislý na teplotě stěny a proudu spalín upravený
λ^{kom}	-	Součinitel tření v komíně
μ	-	Součinitel rozšíření žebra
ζ	-	Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek
ζ_{vs}^{kom}	-	Součinitel tlakové ztráty na vstupu spalín do komína
ζ_{vy}^{kom}	-	Součinitel tlakové ztráty na výstupu spalín z komína
σ	-	Poměrná rozteč
φ_σ	-	Součinitel poměrných roztečí
$\psi_ž$	-	Koeficient nerovnoměrnosti rozložení α_K po povrchu žebra
x_Q	%	Procentuální rozdíl mezi navrženým a skutečným předaným teplem ve výhřevné ploše
z_s	%	Poměrná ztráta sáláním a konvekcí
a	mm	Prostor mezi žebory u žebrovaných trubek
d	mm	Vnitřní průměr trubky
d^{kom}	mm	Vnitřní průměr komína
d_{Bu}	mm	Vnitřní průměr bubnu
d_e	mm	Ekvivalentní průměr
d_p	mm	Vnitřní průměr převáděcí trubky
d_{vs}	mm	Vnitřní průměr vstupního potrubí
d_{vy}	mm	Vnitřní průměr výstupního potrubí
d_z	mm	Vnitřní průměr zavodňovací trubky
D	mm	Vnější průměr trubky
D_{Bu}	mm	Vnější průměr bubnu

D_P	mm	Vnější průměr převáděcí trubky
D_{vs}	mm	Vnější průměr vstupního potrubí
D_{vy}	mm	Vnější průměr výstupního potrubí
D_Z	mm	Vnější průměr zavodňovací trubky
$D_{\check{z}}$	mm	Průměr žebrování trubky
h_P	mm	Přibližná výška umístění bubnu
$h_{\check{z}}$	mm	Výška žeber
H^{kom}	mm	Výška komína od místa vstupu spalin
l	mm	Skutečná výška spalinového kanálu
l_{Bu}	mm	Délka bubnu
l_n	mm	Návrhová výška spalinového kanálu
o	mm	Obvod průtočné plochy kotle
s	mm	Efektivní tloušťka sálové vrstvy
s_1	mm	Příčná rozteč mezi trubkami
s_2	mm	Podélná rozteč mezi trubkami
\check{s}	mm	Skutečná šířka spalinového kanálu
\check{s}_n	mm	Návrhová šířka spalinového kanálu
$s_{\check{z}}$	mm	Rozteč mezi žebry
t_{Bu}	mm	Tloušťka stěny bubnu
t_{tr}	mm	Tloušťka trubky
t_P	mm	Tloušťka stěny převáděcí trubky
t_{vs}	mm	Tloušťka stěny vstupního potrubí
t_{vy}	mm	Tloušťka stěny výstupního potrubí
t_Z	mm	Tloušťka stěny zavodňovací trubky
$t_{\check{z}}$	mm	Tloušťka žeber
f	m^2	Teplosměnná plocha ze strany páry
S_{1P}	m^2	Průtočný průřez jedné převáděcí trubky
S_{1Z}	m^2	Průtočný průřez jedné zavodňovací trubky
S_{OP}	m^2	Součet průtočných průřezů převáděcích trubek
S_{OV}	m^2	Součet průtočných průřezů varných trubek
S_{OZ}	m^2	Součet průtočných průřezů všech zavodňovacích trubek
S_{pr}	m^2	Průtočná plocha kotle
S_{SP}	m^2	Celková teplosměnná plocha ze strany spalin
S_{SP-1m}	m^2	Teplosměnná plocha ze strany spalin na 1m délky trubky
S_{SP-1r}	m^2	Teplosměnná plocha ze strany spalin na jednu podélnou řadu
S_{SP-PR}	m^2	Skutečná průtočná plocha spalin
S_{SP-PRn}	m^2	Návrhová průtočná plocha spalin
S_{SPs}	m^2	Skutečná teplosměnná plocha ze strany spalin
V_{Bu}	m^3	Polovina objemu bubnu
$n_{\check{z}}$	m^{-1}	Počet žeber na 1m délky trubky
w_P	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost páry
w_{SP}	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost spalin
υ_P	$m^2 \cdot s^{-1}$	Součinitel dynamické viskozity vody nebo páry
υ_S	$m^2 \cdot s^{-1}$	Součinitel dynamické viskozity spalin vztažený na střední teplotu stěny
υ_{SP}	$m^2 \cdot s^{-1}$	Součinitel dynamické viskozity spalin
M_{SPO}	$m^3 \cdot s^{-1}$	Objemový tok spalin
M_{SPOS}	$m^3 \cdot s^{-1}$	Skutečný objemový průtok spalin pro danou střední
v	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem

v_P	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Střední měrný objem páry
v_{SP}	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Střední měrný objem spalin
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	Hustota
ρ_{SP}	$kg \cdot m^{-3}$	Hustota spalin
z_{Bu}	$kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$	Zatížení bubnu
z_{Bub}	$kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$	Běžné zatížení bubnu
M_{PN}	$kg \cdot s^{-1}$	Hmotnostní průtok páry nízkotlakým okruhem
M_{PV}	$kg \cdot s^{-1}$	Hmotnostní průtok páry vysokotlakým okruhem
M_{SP}	$kg \cdot s^{-1}$	Hmotnostní průtok spalin
i_{SP}	$kJ \cdot m^{-3}$	Entalpie spalin
i	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie páry
Δi	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpický spád
α_{1r}	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla ze strany spalin
α_{2r}	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla ze strany vody nebo páry
λ_P	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti vody nebo páry
λ_{SP}	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti spalin
$\lambda_{\dot{z}}$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti žebër
ε	$W^{-1} \cdot m^2 \cdot K$	Poměrná zářivost
Δt_{ln}	K	Střední logaritmický teplotní spád
t	°C	Teplota
t_{mat}	°C	Vztažná teplota pro návrh materiálu trubek
t_P	°C	Střední teplota páry
t_{SP}	°C	Střední teplota spalin
Δt	°C	Teplotní přírůstek pro výpočet teploty zaneseného povrchu stěny
Δt_{ned}	°C	Teplotní nedohřev
Δt_{pp}	°C	Pinchpoint
$\Delta t_{př}$	°C	Teplotní přírůstek
Δp_1	Pa	Tlaková diference závislá na rychlosti průtoku spalin
Δp_{VV}^{kom}	Pa	Tlaková ztráta na vstupu a výstupu z komína
Δp_{ZT}^{kom}	Pa	Tlaková ztráta třením v komíně
Δp_{ZTH}^{kom}	Pa	Ztráta v tlumiči hluku v komíně
Δp_Z	Pa	Tlaková ztráta svazku trubek
Δp_{ZC}	Pa	Celková tahová ztráta
Δp_{ZD}	Pa	Dovolená hodnota tahové ztráty
p	MPa	Tlak
p_{Bu}	MPa	Tlak v bubnu
p_P	MPa	Střední tlak páry
p_{SP}	MPa	Střední tlak spalin
Δp	MPa	Tlaková diference
Q	MW	Předané teplo
Q_A	MW	Maximální využitelný tepelný výkon
Q_{RC}	MW	Ztráty sáláním a konvekcí
Q_s	MW	Skutečné předané teplo

Zkratka: Význam zkratky:

NO	Nízkotlaký okruh
NOe1	První stupeň nízkotlakého ekonomizéru
NOe2	Druhý stupeň nízkotlakého ekonomizéru
NOp	Nízkotlaký přehřívák
NOv	Nízkotlaký výparník
VO	Vysokotlaký okruh
VOe1	První stupeň vysokotlakého ekonomizéru
VOe2	Druhý stupeň vysokotlakého ekonomizéru
VOe3	Třetí stupeň vysokotlakého ekonomizéru
VOpI	První stupeň vysokotlakého přehříváku
VOpII	Druhý stupeň vysokotlakého přehříváku
VOv	Vysokotlaký výparník

Seznam příloh

Příloha č.1 Výkres kotle na odpadní teplo (A2)